

# **STUDIUL UNUI PROTOTIP DE GENERATOR SINCRON TRIFAZAT CU MAGNEȚI PERMANENȚI DE 5kVA UTILIZÂND METODA ELEMENTULUI FINIT**

Teză destinată obținerii  
titlului științific de doctor inginer  
la  
Universitatea Politehnica Timișoara  
în domeniul Inginerie Electrică  
de către

**Constantin-Gabriel DOBREAN**

Conducător științific:  
Referenți științifici:

Prof.univ.dr.ing. Marius BIRIESCU  
Prof.univ.dr.ing. Radu MUNTEANU  
Prof.univ.dr.ing. Aurel CÂMPEANU  
Prof.univ.dr.ing. Dumitru TOADER

Ziua susținerii tezei: 16.06.2022

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- |   |  |
|---|--|
| 1. Automatică                               | 9. Inginerie Mecanică                      |
| 2. Chimie                                   | 10. Știința Calculatoarelor                |
| 3. Energetică                               | 11. Știința și Ingineria Materialelor      |
| 4. Ingineria Chimică                        | 12. Ingineria sistemelor                   |
| 5. Inginerie Civilă                         | 13. Inginerie energetică                   |
| 6. Inginerie Electrică                      | 14. Calculatoare și tehnologia informației |
| 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații | 15. Ingineria materialelor                 |
| 8. Inginerie Industrială                    | 16. Inginerie și Management                |

Universitatea Politehnică Timișoara a inițiat seriile de mai sus în scopul diseminării expertizei, cunoștințelor și rezultatelor cercetărilor întreprinse în cadrul Școlii doctorale a universității. Seriile conțin, potrivit H.B.Ex.S Nr. 14 / 14.07.2006, tezele de doctorat susținute în universitate începând cu 1 octombrie 2006.

Copyright © Editura Politehnică – Timișoara, 2022

Această publicație este supusă prevederilor legii dreptului de autor. Multiplicarea acestei publicații, în mod integral sau în parte, traducerea, tipărirea, reutilizarea ilustrațiilor, expunerea, radiodifuzarea, reproducerea pe microfilme sau în orice altă formă este permisă numai cu respectarea prevederilor Legii române a dreptului de autor în vigoare și permisiunea pentru utilizare obținută în scris din partea Universității Politehnică Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,  
Tel./fax 0256 403823  
e-mail: editura@edipol.upt.ro

## Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată pe parcursul activității mele în cadrul laboratorului D109 de „Testare mașini electrice” din Departamentul de Inginerie Electrică al Universității Politehnica Timișoara.

Mulțumiri deosebite se cuvin conducătorului de doctorat Prof.univ.dr.ing. Marius Biriescu pentru sprijinul acordat, implicarea, îndrumarea, sugestiile, observațiile, răbdarea, grija și profesionalismul deosebit acordate nu numai pe întregul parcurs al stagiului de doctorat, ci și în realizarea lucrărilor de licență și disertație.

Doresc în aceeași măsură să le mulțumesc și să îmi exprim deosebita recunoștință pentru sprijinul profesional, timpul acordat, sugestiile și observațiile referitoare la tematica abordată domnului Conf.univ.dr.ing. Marian Greconici, domnului Dr.ing. Gheorghe Madescu, domnului Ș.l.dr.ing. Marțian Moț, domnului Prof.univ.dr.ing. Gheorghe Liuba, domnului Prof.univ.dr.ing. Lucian Tutelea. De asemenea doresc să îi mulțumesc pentru suportul oferit colegului Dr.ing. Laurențiu Constantin Pădeanu, ale cărui contribuții în cadrul laboratorului mi-au fost de mare folos.

Nu în ultimul rând, doresc să-mi exprim recunoștința și să aduc mulțumiri familiei, profesorilor care au contribuit la educația și formarea mea profesională, și tuturor celor care m-au susținut și mi-au fost alături de-a lungul anilor chiar dacă numele acestora nu este amintit explicit.

Timișoara, Septembrie 2019

Constantin-Gabriel DOBREAN

Dobrean, Constantin-Gabriel

**Studiul unui prototip de generator sincron trifazat cu magneți permanenți de 5kVA utilizând metoda elementului finit**

Teze de doctorat ale UPT, Seria \_\_\_, Nr. \_\_\_, Editura Politehnica, 2022, 195 pagini, 130 figuri, 7 tabele.

Cuvinte cheie: generator sincron, magneți permanenți, câmp magnetic, metoda elementului finit

Rezumat,

Lucrarea prezintă simularea numerică a câmpului electromagnetic pentru un prototip de generator sincron cu magneți permanenți. Pe parcursul lucrării este prezentat mediul soft OPERA, program bazat pe calculul numeric folosind metoda elementului finit, utilizat pentru modelarea virtuală a prototipului generatorului sincron. Acest prototip de putere 5 kVA, cu magneți permanenți și cu turație scăzută este destinat utilizărilor în aplicații cu acționări hidraulice, respectiv eoliene și a fost realizat în cadrul unei colaborări între Facultatea de Automatică și Calculatoare și Facultatea de Electrotehnică și Electroenergetică din cadrul Universității "Politehnica" Timișoara.

## CUPRINS

Notații, abrevieri, acronime .....	7
Lista de figuri .....	8
Lista de tabele .....	13
Introducere .....	14
1. Conversia energiei eoliene în energie electrică .....	19
1.1 Evoluția în timp a utilizării energiei eoliene .....	21
1.2 Structura și funcționarea unui agregat eolian .....	27
1.3 Generatorul electric al unui agregat eolian .....	31
1.4 Balanța energetică actuală .....	34
1.5 Concluzii .....	36
2. Generatoare sincrone cu magneți permanenți și turație scăzută .....	38
2.1 Mașina sincronă – aspecte generale.....	40
2.1.1 Elementele constructive ale mașinilor sincrone .....	40
2.1.2 Principiul și regimurile de funcționare ale mașinilor sincrone .....	42
2.1.3 Generatorul sincron .....	43
2.2 Generatoare sincrone cu magneți permanenți.....	45
2.3 Caracteristicile generatoarelor sincrone cu magneți permanenți .....	54
2.4 Moduri de utilizare și consecințe asupra soluțiilor constructive. Avantaje și dezavantaje ale generatoarelor sincrone cu magneți permanenți .....	55
2.5 Concluzii .....	62
3. Metoda elementului finit utilizată la studiul câmpului electromagnetic – mediul “OPERA” .....	64
3.1 Metoda elementului finit - principiu .....	65
3.2 Principalele medii software utilizate în prezent .....	72
3.3 Mediul OPERA – descriere generală .....	74
3.4 Concluzii .....	79
4. Analiza numerică a unui generator sincron cu magneți permanenți 5 kVA cu turație scăzută – Prototip 1 .....	80
4.1 Datele constructive ale GSMP de 5 kVA – varianta $N_c=33$ crestături .....	80
4.2 Studiul GSMP cu metoda elementului finit – mediul OPERA.....	92
4.3 Caracteristicile funcționale ale generatoarelor sincrone .....	106
4.4 Caracteristica externă a generatorului sincron cu magneți permanenți în regim autonom .....	108
4.5 Îmbunătățirea caracteristicii externe a generatorului sincron cu magneți permanenți cu funcționare în regim autonom prin metode constructive .....	111
4.6 Concluzii .....	117
5. Determinări experimentale și comparații cu mărimile calculate .....	120
5.1 Standul experimental de testare al generatorului .....	120
5.2 Sistemul de achiziție și de prelucrare a datelor bazat pe mediul LabVIEW utilizat în cadrul măsurătorilor.....	128
5.3 Măsurători și rezultate experimentale .....	129
5.4 Concluzii .....	137
6. Analiza unei variante constructive de generator sincron cu magneți permanenți 5kVA – Prototip 2.....	138

## CUPRINS

---

6.1 Construcție, date nominale – varianta $N_c=63$ crestături .....	138
6.2 Simularea numerică în mediul OPERA .....	141
6.3 Comparație între cele două prototipuri .....	146
6.4 Concluzii .....	152
7. Analiza performanțelor unui generator sincron trifazat cu magneți permanenți și piese feromagnetice interpolare .....	153
7.1 Prezentarea topologiei constructive a generatorului sincron cu magneți permanenți cu 4 poli .....	153
7.2 Analiza numerică a performanțelor generatorului cu metoda elementului finit .....	154
7.3 Concluzii .....	165
8. Concluzii generale, contribuții și direcții de dezvoltare ulterioară .....	167
8.1 Concluzii generale .....	167
8.2 Contribuții .....	173
8.3 Direcții de dezvoltare .....	174
Anexe .....	175
A1 .....	175
A2 .....	176
A3 .....	177
A4 .....	178
A5 .....	179
A6 .....	180
A7 .....	181
A8 .....	182
A9 .....	183
A10 .....	184
A11 .....	185
A12 .....	186
A13 .....	187
A14 .....	188
A15 .....	189
Bibliografie .....	190

## NOTAȚII, ABREVIERI, ACRONIME

$C_1, C_2$	- contactoare
CAD	- Computer Aided Design, proiectare asistată de calculator
DSPM	- mașină cu poli aparenti pe stator și rotor cu excitație produsă de către magneții permanenți plasați tangențial în stator
$F_1, F_2, F_3$	- blocuri de protecție formate din siguranțe fuzibile și MPR
FRPM	- mașină cu flux reversibil trifazată
FSPM	- mașina cu comutarea fluxului
GS	- generator sincron
GSMP	- generator sincron cu magneți permanenți
K	- întreruptor general
Mcc	- motor de curent continuu
MDF	- metoda diferențelor finite
MEF	- metoda elementului finit
MEFr	- metoda elementelor de frontieră
MMC	- metoda Monte Carlo
MP	- magnet permanent
MPR	- siguranțe cu mare putere de rupere
NdFeB	- neodim-fier-bor
NI	- National Instruments
PWM	- modulație în lățime a impulsurilor de comandă
$Rd_1, Rd_2$	- punți redresoare
RM	- Rotating Machine Analysis, analiză de tip dinamic
ST	- Static Analysis, analiză de tip static
$T_1$	- transformator de alimentare reglabil
$T_A$	- transformator de adaptare

## LISTA DE FIGURI

- Fig. 1.1. Consumul de energie la nivel global pentru anul 2017
- Fig. 1.2. Vase cu pânze: a) modelul chinezesc [W5]; b) modelul egiptean [H1]
- Fig. 1.3. Moară de vânt chinezească cu ax vertical [L1]
- Fig. 1.4. Moară de vânt persană cu ax vertical [G2]
- Fig. 1.5. Model de moară de vânt europeană din jurul anilor 1800 [W6]
- Fig. 1.6. Prima turbină eoliană utilizată pentru conversia energiei electrice - Blyth [W7]
- Fig. 1.7. Prima turbină eoliană automatizată din lume – Brush [S2]
- Fig. 1.8. Turbine eoliene V164-8MW în parcul eolian Burbo Bank 2 [W8]
- Fig. 1.9. Conversia de energie și transferurile de putere realizate într-o turbină eoliană
- Fig. 1.10. Turbine eoliene cu ax vertical: a) Savonius; b) Darrieus [W1]
- Fig. 1.11. Principalele elemente structurale ale unui agregat eolian modern
- Fig. 1.12. Model de turbină eoliană cu viteză fixă
- Fig. 1.13. Model de turbină eoliană cu viteză variabilă și dotată cu echipament de excitație
- Fig. 1.14. Model de turbină eoliană cu viteză variabilă echipată cu generator sincron
- Fig. 1.15. Producția anuală de energie eoliană în intervalul 2000 – 2017
- Fig. 2.1. Variante constructive ale rotorului mașinii sincrone: a) cu poli înecați; b) cu poli aparenti
- Fig. 2.2. Mașina sincronă cu poli aparenti: a) polii aparenti plasați în rotor; b) polii aparenti plasați pe stator
- Fig. 2.3. Tipuri de circuite magnetice [U1]
- Fig. 2.4. Liniile fluxului magnetic [B1]
- Fig. 2.5. Comparație între energia maximă produsă de către diferite tipuri de materiale magnetice
- Fig. 2.6. Comparație între densitatea fluxului rezidual și coercivitatea diferitelor materiale magnetice
- Fig. 2.7. Mașină cu flux reversibil și magneți permanenți cu 6/8 poli [H2]
- Fig. 2.8. Mașină cu comutarea fluxului și magneți permanenți cu 12/10 poli [H2]
- Fig. 2.9. Variante constructive de rotoare: a) cu poli aparenti; b) cu poli înecați
- Fig. 2.10. Mașină cu poli aparenti pe stator și rotor, cu magneți permanenți cu 12/8 poli [R4]
- Fig. 2.11. Generator sincron cu magneți permanenți cu cuplaj direct utilizat într-o aplicație de conversie a energiei eoliene
- Fig. 2.12. Sistem de conversie a energiei eoliene autonom cu GSMP



- Fig. 2.13. Componentele principale ale unui sistem de conversie a energiei eoliene autonom echipat cu sistem de stocare a energiei
- Fig. 2.14. Sistem autonom hibrid eolian/fotovoltaic
- Fig. 3.1. Discretizarea domeniului de analiză a unei structuri
- Fig. 3.2. Procesul de analizare și validare al unui produs cu ajutorul MEF
- Fig. 3.3. Procesul analizei unei structuri cu ajutorul MEF în *Opera*
- Fig. 3.4. Meniul de comandă, ecranul grafic și textul afișat în pre-procesorul *Opera 2D*
- Fig. 3.5. Rețeaua de discretizare a unui generator sincron cu magneți permanenți în pre-procesorul *Opera 2D*
- Fig. 3.6. Densitatea fluxului magnetic a unui generator sincron cu magneți permanenți afișată în pre-procesorul *Opera 2D*
- Fig. 4.1. Stabilirea unităților de măsură
- Fig. 4.2. Stabilirea proprietăților materialelor
- Fig. 4.3. Fereastra de dialog pentru dimensionarea modelului
- Fig. 4.4. Trasarea unei jumătăți de dinte statoric
- Fig. 4.5. Trasarea liniilor și a arcelor de cerc pentru definirea geometriei transversale a GS
- Fig. 4.6. Prima regiune construită – jumătatea unui dinte statoric
- Fig. 4.7. Fereastra de dialog pentru crearea replicilor geometrice
- Fig. 4.8. Construcția geometrică a statorului
- Fig. 4.9. Înfășurare statorică
- Fig. 4.10. Crearea înfășurărilor statorice
- Fig. 4.11. Informații cu privire la circuitul trifazat statoric
- Fig. 4.12. Detalii privind crearea și editarea circuitelor electrice din schema de bobinaj
- Fig. 4.13. Schema de bobinaj a generatorului
- Fig. 4.14. Principalele părți constructive ale generatorului
- Fig. 4.15. Detaliu reprezentativ al întrefierului
- Fig. 4.16. Rețeaua de discretizare
- Fig. 4.17. Rețeaua de discretizare – detaliu înfășurări și magneți
- Fig. 4.18. Specificarea parametrilor necesari pentru analiza în regim static
- Fig. 4.19. Spectrul câmpului magnetic
- Fig. 4.20. Liniile de câmp ale inducției magnetice generate în funcție de poziția magnetului
- Fig. 4.21. Variația componentei normale a inducției  $B_n$  în întrefier în funcție de poziția rotorului
- Fig. 4.22.a). Rețeaua de discretizare pentru cazul 1
- Fig. 4.22.b). Rețeaua de discretizare pentru cazul 1
- Fig. 4.23.a). Spectrul câmpului magnetic în cazul 1
- Fig. 4.23.b). Spectrul câmpului magnetic în cazul 1
- Fig. 4.24.a). Rețeaua de discretizare pentru cazul 2

- Fig. 4.24.b). Rețeaua de discretizare pentru cazul 2
- Fig. 4.25.a). Spectrul câmpului magnetic în cazul 2
- Fig. 4.25.b). Spectrul câmpului magnetic în cazul 2
- Fig. 4.26.a). Rețeaua de discretizare pentru cazul 3
- Fig. 4.26.b). Rețeaua de discretizare pentru cazul 3
- Fig. 4.27.a). Spectrul câmpului magnetic în cazul 3
- Fig. 4.27.b). Spectrul câmpului magnetic în cazul 3
- Fig. 4.28. Efectuarea setărilor pentru analiza mașinii în mișcare de rotație
- Fig. 4.29. Formele de undă ale tensiunii electromotoare induse
- Fig. 4.30. Formele de undă ale tensiunii electromotoare induse pe faza R pentru funcționarea la diferite turații
- Fig. 4.31. Cuplul parazit al prototipului GSMP studiat obținut pe baza metodei elementului finit cu ajutorul OPERA
- Fig. 4.32. Caracteristicile externe ale generatorului sincron
- Fig. 4.33. Diagrama fazorială a GSMP reprezentată pentru una dintre faze în condiții de încărcare cu sarcină rezistivă
- Fig. 4.34. Caracteristica externă  $U=f(I)$  la sarcină rezistivă obținută pe baza simulărilor din OPERA
- Fig. 4.35. Dependența caracteristicii externe a GSMP în funcție de lățimea magneților permanenți
- Fig. 4.36. Simularea cuplului parazit în OPERA pentru diferite lățimi ale magneților
- Fig. 4.37. Prezentarea GS cu piese feromagnetice introduse în spațiul interpolar
- Fig. 4.38. Spectrul câmpului magnetic al generatorului pentru cele două cazuri: a) cu piese feromagnetice; b) fără piese feromagnetice în spațiul interpolar
- Fig. 4.39. Distribuția inducției magnetice fără piese interpolare
- Fig. 4.40. Distribuția inducției magnetice cu piese interpolare
- Fig. 4.41. Caracteristicile externe pentru cele două cazuri
- Fig. 5.1. Schema circuitului de forță al standului experimental
- Fig. 5.2. Ansamblul Mcc – GS din cadrul standului experimental
- Fig. 5.3. Transformatorul de adaptare
- Fig. 5.4. Transformatorul de adaptare – panoul frontal
- Fig. 5.5. Transformatorul de adaptare și transformatorul de alimentare din circuitul de forță al Mcc
- Fig. 5.6. Transformatorul de alimentare a înfășurării de excitație a Mcc
- Fig. 5.7. Dulapul de comandă și protecție al Mcc
- Fig. 5.8. Panoul frontal de conexiuni al sistemului de achiziție și prelucrare de date dedicat testării mașinilor electrice de putere mare realizat în cadrul [P5]
- Fig. 5.9. Schema de montaj pentru sistemul de achiziție și prelucrare de date
- Fig. 5.10. Caracteristica de funcționare în gol a generatorului sincron cu magneți permanenți
- Fig. 5.11. Formele de undă ale tensiunilor electromotoare induse și a curenților pe cele trei faze la funcționarea în gol

- Fig. 5.12. Detaliu privind formele de undă ale tensiunilor electromotoare induse pentru cele trei faze la funcționarea în gol
- Fig. 5.13. Detaliu pentru forma de undă a tensiunii electromotoare induse pe faza R la funcționarea în gol
- Fig. 5.14. Variația în timp a tensiunilor și a curenților pe fazele R, S, T la sarcină rezistivă – mediul LabVIEW
- Fig. 5.15. Tensiunea, respectiv curentul pe faza R la sarcină rezistivă
- Fig. 5.16. Detaliu privind variația în timp a tensiunilor pe cele trei faze la sarcină rezistivă
- Fig. 5.17. Detaliu privind variația în timp a curenților pe cele trei faze la sarcină rezistivă
- Fig. 5.18. Comparație între caracteristica externă a GSMP studiat obținută pe baza simulărilor în OPERA și cea obținută din probele din laborator
- Fig. 6.1. Reprezentarea unei creștături statorice pentru Prototipul 2 în OPERA
- Fig. 6.2. Reprezentarea creștăturilor statorice ale Prototipului 2 în OPERA
- Fig. 6.3. Schema de bobinaj a generatorului
- Fig. 6.4. Prezentarea generală a GSMP cu 63 de creștături
- Fig. 6.5. Spectrul câmpului magnetic pentru Prototipul 2
- Fig. 6.6. Distribuția densității fluxului magnetic în funcție de poziția rotorului în raport cu statorul
- Fig. 6.7. Variația componentei normale a inducției  $B_n$  în întrefier
- Fig. 6.8. Formele de undă ale tensiunii electromotoare induse pentru cele trei faze la turația  $n_N=120\text{rpm}$  (Prototip 2)
- Fig. 6.9. Cuplul parazit al GSMP Prototip 2 obținut pe baza metodei elementului finit cu ajutorul OPERA
- Fig. 6.10. Caracteristica externă  $U=f(I)$  la sarcină rezistivă a Prototipului 2 obținută pe baza simulărilor în OPERA
- Fig. 6.11. Comparație între caracteristica externă a Prototipului 2 obținută pe baza simulărilor în OPERA și cea obținută pe cale experimentală
- Fig. 6.12. Înfășurările statorice – Prototip 1
- Fig. 6.13. Înfășurările statorice – Prototip 2
- Fig. 6.14. Distribuția fluxului magnetic calculat la funcționare în gol: a) Prototip 1; b) Prototip 2
- Fig. 6.15. Comparație între formele de undă ale tensiunii electromotoare indusă pe faza R la cele două prototipuri
- Fig. 6.16. Caracteristicile externe  $U=f(I)$  la sarcină rezistivă ale celor două prototipuri
- Fig. 6.17. Cuplul parazit manifestat la cele două GSMP obținut pe baza metodei elementului finit în OPERA
- Fig. 7.1. Secțiunea transversală a GS cu magneți permanenți inserați în rotor
- Fig. 7.2. Distribuția fluxului magnetic pentru cazul fără piese interpolare (rotor cu magneți proeminenți)
- Fig. 7.3. Distribuția fluxului magnetic pentru cazul cu piese interpolare (rotor cu magneți inserați)

## 12 LISTA DE FIGURI

---

- Fig. 7.4. Distribuția fluxului magnetic prin piesele feromagnetice (detaliu)
- Fig. 7.5. Distribuția densității fluxului magnetic în întrefier (datorat magneților permanenți)
- Fig. 7.6. Densitatea fluxului magnetic în întrefier datorată curentului din stator (6A), cazul fără piese feromagnetice
- Fig. 7.7. Densitatea fluxului magnetic în întrefier datorată curentului din stator (6A), cazul cu piese feromagnetice
- Fig. 7.8. Distribuția densității fluxului magnetic în întrefier în lipsa pieselor feromagnetice, la viteză de 1500 rot/min și sub sarcină
- Fig. 7.9. Distribuția densității fluxului magnetic în întrefier în prezența pieselor feromagnetice, la viteză de 1500 rot/min și sub sarcină
- Fig. 7.10. Variația în timp a tensiunii de fază în prezența pieselor feromagnetice la o turație a rotorului de 1500 rot/min: 1. în gol; 2. la sarcină maximă
- Fig. 7.11. Tensiunea de fază la turația de 1500 rot/min în prezența pieselor feromagnetice pentru diferite dimensiuni ale arcului polar: 1. 78°; 2. 66°; 3. 58°
- Fig. 7.12. Caracteristicile externe ale generatorului la turația de 1500 rot/min pentru diferite dimensiuni ale arcului polar: 74°; 66°; 58°; 1 – cazul cu piese feromagnetice; 2 – cazul fără piese feromagnetice
- Fig. 7.13. Variația raportului tensiunii nominale la tensiunea de mers în gol a GS în funcție de valoarea arcului polar al magneților permanenți pentru turația de 1500 rot/min și curent de sarcină maxim (5.25 A); 1 – cazul cu piese feromagnetice; 2 – cazul fără piese feromagnetice

## LISTA DE TABELE

Tabelul 1.1. Capacitatea instalată de energie eoliană la nivel european

Tabelul 4.1. Parametrii generatorului sincron la variația unei sarcini rezistive

Tabel 5.1. Datele nominale ale Mcc

Tabel 5.2. Variația tensiunii de fază a generatorului în raport cu turația

Tabel 5.3. Valorile  $U=f(I)$  la variații ale sarcinii rezistive

Tabel 6.1. Datele obținute din simularea încărcării cu sarcină rezistivă a GSMP Prototip 2

Tabel 6.2. Specificațiile tehnice ale celor două prototipuri

## INTRODUCERE

Dorința oamenilor de a descoperi și de a cunoaște natura, universul material, fenomenele care se petrec în lumea înconjurătoare sunt preocupări care au existat întotdeauna, fie că această dorință s-a născut din curiozitate sau din necesitatea de a supraviețui.

De-a lungul existenței oamenii au realizat o mulțime de descoperiri, pentru multe dintre ele natura fiind sursa de inspirație, și au acumulat cunoștințe și informații pe care le-au transmis de la o generație la alta. Astfel, pe măsura trecerii timpului cunoștințele au condus la invenții și inovații care au contribuit la dezvoltarea tehnologiei și la evoluția civilizației umane.

Una dintre cele mai importante descoperiri ale omenirii este electricitatea, fără de care multe alte invenții ulterioare n-ar mai fi existat și implicit n-ar mai fi existat nici civilizația actuală sub forma pe care o cunoaștem.

Consumul de energie global la finele anului 2017 se situează undeva la 13511.2 MTep și este pe un trend ascendent cu o rată de creștere anuală de 2.2% calculată în intervalul 1965 – 2017, conform informațiilor preluate din *BP Statistical Review of World Energy June 2018*. Acest lucru obligă unitățile de producție să mențină pasul cu cererea, dar având în vedere problemele cauzate de poluarea aerului, ploile acide și efectul de seră, nu este suficient doar faptul ca energia să fie produsă, ci pe lângă acest lucru energia produsă trebuie să fie "verde". Este impus astfel un proces complex din care se pot evidenția două mari provocări în sectorul cercetării mașinilor electrice care joacă un rol esențial în acest context: pe de-o parte optimizarea mașinilor electrice pentru reducerea consumului de energie, iar pe de altă parte descoperirea unor noi metode de producție a energiei electrice pentru înlocuirea cu surse de producție verzi a centralelor clasice care folosesc ca și materie primă combustibili fosili și nucleari. Un alt sector unde se studiază intens este cel al automobilelor care ridică probleme de poluare și se încearcă înlocuirea lor cu automobilele electrice [G1].

În ultimii ani, în pas cu progresul ingineriei și în conformitate cu Directivele Naționale și Internaționale de producere a energiei din surse regenerabile, tehnologia turbinelor eoliene a evoluat rapid, energia eoliană devenind una dintre cele mai competitive forme de energie dintre resursele de acest tip. În plus, au fost dezvoltate sistemele de conversie a energiei eoliene cu viteză variabilă și cu control activ asupra puterii și vitezei vântului care oferă o serie de avantaje și pot reduce solicitările în diferite părți ale structurii turbinelor, incluzând aici palele și turnul. Astfel durata lor de funcționare este mai lungă, eficiența totală mai mare și calitatea energiei îmbunătățită, motive care fac ca acest tip de turbine eoliene să fie competitive din punct de vedere economic, în ciuda costurilor inițiale mai mari [E1].

Pe de altă parte, odată cu pătrunderea ascendentă a sistemelor de conversie a energiei eoliene cu viteză variabilă în sistemele energetice din întreaga lume, generatoarele sincrone cu magneți permanenți devin tot mai răspândite pentru utilizarea în aplicații cu viteză variabilă. Acestea oferă mai multe avantaje precum eliminarea sistemului de excitație, posibilitatea de funcționare în lipsa cutiei de viteze, controlul complet al sistemului și conversia puterii maxime obținută la variații ale vântului prin metoda de urmărire a punctului maxim al puterii, densitate mare de putere și precizie ridicată. În plus, dezvoltarea dispozitivelor cu electronică de

putere a jucat un rol important în perfecționarea controlului și fiabilității acestora [E1].

## Scopul și obiectivele tezei

Necesitățile energetice în creștere continuă au condus la dezvoltarea a numeroase studii privind atât proiectarea optimală a mașinilor electrice cât și dezvoltarea acționărilor asistate de către electronica de putere. În această tendință de dezvoltare intră și mașinile sincrone, utilizate pentru aplicații cu acționare directă (ca motoare pentru propulsia vapoarelor, tracțiunea autovehiculelor, a lifturilor și ca generatoare pentru turbine eoliene, microhidrocentrale) care oferă cuplu mare și turație scăzută, spre exemplu în aplicațiile pentru turbinele eoliene din ansamblul cărora a fost eliminat multiplicatorul de viteză. Ca urmare a dezvoltării tehnologice rapide și a performanțelor oferite, magneții permanenți au ajuns să fie utilizați pe scară largă de la echipamente de uz casnic până la echipamente de uz industrial (ex.: sisteme de automatizare, mecatronică), fie la motoare electrice în aplicații de tracțiune (ex.: autovehicule, lifturi, pompe, compresoare) și propulsie (ex.: vapoare) fie la generatoare electrice. Se pretează foarte bine mai ales la mașinile sincrone cu viteză variabilă, încadrând astfel aici, printre altele, generatoarele turbinelor eoliene cu o plajă de funcționare kW-MW, generatoarele turbinelor cu funcționare pe bază de gaz, precum și utilizarea lor în sectorul vehiculelor electrice [B1][S1].

Mașinile electrice care folosesc drept sursă de excitație magneții permanenți atrag din ce în ce mai multă atenție atât din partea comunității de cercetare cât și din partea industriei energetice, iar dezvoltarea în domeniul materialelor cu pământuri rare le-a facilitat accesibilitatea. Avantajele oferite de către generatoarele sincrone cu magneți permanenți au condus la considerentul că acestea sunt printre cele mai eficiente mașini electrice utilizate în prezent. Astfel acestea reprezintă un subiect abordat în numeroase studii de cercetare, fiind experimentate diferite structuri și topologii pentru diverse aplicații. Utilizarea lor pe scară largă în aplicațiile eoliene cu puteri mici s-a dovedit a fi avantajoasă deoarece oferă eficiență ridicată, factor de putere ridicat și densitate de putere sporită [S1][C1][A1].

În prezent există un interes ridicat în ceea ce privește utilizarea și dezvoltarea sistemelor de conversie a energiei eoliene pentru a genera energie electrică în zone urbane și rurale, în special unde conectarea consumatorilor la rețeaua de distribuție nu este posibilă sau nu este rezonabilă din punct de vedere economic. Astfel aceste generatoare se pretează foarte bine pentru utilizarea în aplicații precum iluminat stradal, pomparea apei, locuințe rezidențiale. Avantajele precum viteza mică a vântului la pornire și funcționarea la viteze moderate ale vântului facilitează instalarea pe scară largă a micro turbinelor eoliene în majoritatea zonelor din întreaga lume pentru exploatarea pe deplin a resurselor eoliene și sporirea semnificativă a disponibilității energiei eoliene [C1][W1].

Având în vedere actualitatea conversiei energiei eoliene și avantajele generatoarelor cu magneți permanenți, în această lucrare este prezentat și studiat un prototip de generator sincron cu magneți permanenți cu flux radial și cuplaj direct de putere 5kVA în două variante constructive. Studiul se face plecând de la ideea că acest prototip este destinat utilizării în aplicații pentru turbine eoliene și micro hidrocentrale instalate în zone urbane sau rurale cu posibilitate de interconectare la rețea sau în regim autonom, fiind eficient pentru conversia energiei la turații scăzute. Cuplajul direct constituie un avantaj important în ceea ce privește

costurile de fabricație și mentenanță, deoarece lipsa cutiei de viteze simplifică partea mecanică, crește fiabilitatea și în același timp reduce zgomotul, vibrațiile, greutatea și gabaritul generatorului. Lipsa multiplicatorului de viteză și funcționarea la turații joase necesită utilizarea unui număr mare de poli necesar pentru obținerea unei frecvențe de funcționare în plaja admisă pentru a nu fi afectată calitatea energiei electrice. Evaluarea performanțelor și procesul de analiză a unor aspecte precum proiectarea, topologia, structura și optimizarea generatorului sunt realizate cu ajutorul pachetului software *OPERA 2D Vector Fields* bazat pe metoda elementului finit. Ulterior rezultatele experimentale obținute pe baza simulărilor sunt comparate cu rezultatele obținute în urma măsurărilor efectuate pe standul existent în laborator.

Având în vedere mențiunile anterioare, au fost stabilite pentru această teză următoarele obiective:

- trasarea modelului geometric al prototipul generatorului sincron cu magneți permanenți montați pe suprafața rotorului și un număr foarte mic de creștături pe pol și fază în stator ( $q=0.34$ ) – Prototip 1, cu ajutorul interfeței CAD în mediul software OPERA, varianta 2D;
- obținerea și interpretarea spectrului câmpului electromagnetic calculat cu ajutorul metodei elementului finit;
- prezentarea formelor de undă ale tensiunii electromotoare indusă pentru diferite turații;
- determinarea cuplului parazit al prototipului;
- obținerea caracteristicii externe și prezentarea unor metode de îmbunătățire ale acesteia;
- efectuarea măsurărilor pe standul de probă și compararea acestora cu rezultatele obținute în urma simulărilor în mediul OPERA;
- analiza cu metoda elementului finit a unui generator sincron cu magneți permanenți inserați în rotor pentru a demonstra efectul de saliență inversă care se va observa că este semnificativ doar în cazul generatoarelor cu un număr mic de poli;
- studiul unui prototip de generator sincron cu magneți permanenți montați pe suprafața rotorului și un număr mic de creștături pe pol și fază în stator ( $q=0.65$ ) – Prototip 2, și compararea acestuia cu Prototipul 1.

Pentru îndeplinirea acestor obiective și implementarea programului de cercetare au fost utilizate două resurse fizice principale disponibile în cadrul UPT, și anume:

- standul experimental care este alcătuit din prototipul unui generator sincron cu magneți permanenți de putere nominală 5 kW și turație nominală 120 rot/min care este pus în mișcare de către o mașină de antrenare la turație variabilă;
- programul software *OPERA Vector Fields* cu licență și dongle cu număr nelimitat de noduri pentru calculul numeric.



## Structura tezei

Din punct de vedere structural teza prezentată este organizată pe un număr de opt capitole.

### Capitolul 1. Conversia energiei eoliene în energie electrică

În acest capitol este prezentată importanța energiei eoliene pentru omenire încă din cele mai vechi timpuri și până în prezent, precum și modul în care oamenii au știut să îi acorde întrebuințarea potrivită. În zilele noastre, principala întrebuințare a energiei eoliene este în sectorul energetic și pe piața de energie electrică. A fost considerată necesară abordarea acestui capitol în cadrul tezei deoarece generatorul analizat este destinat în special aplicațiilor de conversie a energiei eoliene în energie electrică.

### Capitolul 2. Generatoare sincrone cu magneți permanenți și turație scăzută

Al doilea capitol din această teză este dedicat pentru descrierea pe scurt a mașinilor electrice rotative din punct de vedere constructiv, funcțional și fenomenologic, în special a mașinii sincrone. Sunt prezentate caracteristicile generatoarelor cu magneți permanenți, modurile de utilizare și consecințele asupra soluțiilor constructive, precum și avantajele și dezavantajele dintre diferite tipuri de generatoare sincrone care utilizează magneți permanenți, dar și comparația acestora cu generatoarele uzuale. Este prezentată o scurtă istorie a evoluției magneților permanenți, a tipurilor acestora și a avantajelor care îi propun pentru utilizarea în domeniul mașinilor electrice.

### Capitolul 3. Metoda elementului finit utilizată la studiul câmpului electromagnetic – mediul "OPERA"

Acest capitol oferă noțiuni generale referitoare la influența calculului ingineresc și a metodelor numerice ca și componente esențiale ale procesului de proiectare în evoluția tehnologiei și a progresului omenirii. De asemenea, este realizată o prezentare de ansamblu asupra metodei elementelor finite și a programului software OPERA.

### Capitolul 4. Analiza numerică a unui generator sincron cu magneți permanenți 5 kVA cu turație scăzută – Prototip 1

Capitolul acesta este dedicat prezentării și analizei prototipului generatorului sincron cu magneți permanenți studiat. Sunt prezentate datele constructive ale generatorului și este trasată geometria de tip 2D a generatorului cu ajutorul librăriei CAD oferită de către mediul OPERA, iar apoi este realizată analiza numerică în acest program software bazat pe metoda elementului finit pentru evaluarea și îmbunătățirea performanțelor generatorului.

De asemenea tot în acest capitol sunt prezentate noțiuni generale despre caracteristicile funcționale ale generatoarelor sincrone. Este prezentată pe parcurs în amănunt caracteristica externă a generatorului sincron cu magneți permanenți în regim de funcționare autonom și câteva metode de îmbunătățire ale acesteia. Tot în cadrul acestui capitol este analizat un generator sincron trifazat cu magneți permanenți de NdFeB inserați în rotor pentru evidențierea beneficiilor acestui tip de generator pentru aplicațiile în care este necesară menținerea tensiunii de ieșire

aproape constantă, indiferent de sarcina de încărcare, cum ar fi de exemplu funcționarea generatorului în regim autonom.

#### Capitolul 5. Determinări experimentale și comparații cu mărimile calculate

În acest capitol sunt prezentate standul experimental și sistemul de achiziție și prelucrare a datelor cu ajutorul cărora vor fi realizate determinările experimentale propuse pentru generatorul sincron cu magneți permanenți studiat. Astfel vor fi prezentate valorile parametrilor rezultați din determinările experimentale pe standul de probă. De asemenea va fi realizată analiza comparativă a rezultatelor obținute experimental cu cele obținute pe cale analitică din calculul bazat pe metoda elementului finit în mediul OPERA.

#### Capitolul 6. Analiza unei variante constructive de generator sincron cu magneți permanenți 5kVA – Prototip 2

În acest capitol este prezentat un al doilea prototip de generator sincron cu magneți permanenți cu turație scăzută. Acesta este diferit din punct de vedere constructiv față de primul prototip analizat prin numărul de creștături statorice, Prototipul 1 fiind caracterizat de un număr de 33 de creștături, spre deosebire de Prototipul 2 la care numărul creștăturilor este de 63. După analizarea performanțelor Prototipului 2, acestea vor fi comparate cu performanțele primului prototip.

#### Capitolul 7. Analiza performanțelor unui generator sincron trifazat cu magneți permanenți și piese feromagnetice interpolate

Acest capitol este dedicat analizei unui generator sincron trifazat cu magneți permanenți de NdFeB inserați în rotor având ca scop evidențierea efectului de saliență inversă al rotorului în cazul în care acesta este construit cu un număr mic de poli.

Datorită numărului mic de poli se dorește a se demonstra faptul că la acest tip de structură a rotorului are loc efectul de saliență inversă, caz în care reactanța axei de cuadratură  $q$  este mai mare decât reactanța axei directe  $d$ . Ca urmare a acestui efect, generatorul prezintă o capacitate de compensare proprie a tensiunii pentru menținerea tensiunii la borne aproape constantă la diferite încărcări de sarcină.

Vor fi prezentate caracteristicile și performanțele obținute cu ajutorul OPERA pe baza metodei elementului finit și evidențiate beneficiile acestui tip de generator pentru aplicațiile în care este necesară menținerea tensiunii de ieșire aproape constantă, indiferent de sarcina de încărcare, cum ar fi de exemplu funcționarea generatorului în regim autonom.

#### Capitolul 8. Concluzii generale, contribuții și direcții de dezvoltare ulterioară

În capitolul acesta sunt prezentate concluziile rezultate în urma studiilor efectuate, contribuțiile personale în cadrul acestei teze și direcțiile de dezvoltare ulterioară a cercetării abordate în teză.

# 1. CONVERSIA ENERGIEI EOLIENE ÎN ENERGIE ELECTRICĂ

Resursele limitate și principalele dezavantaje ale energiei electrice obținută de pe urma combustibililor fosili, precum creșterea nivelului de poluare și îngrijorarea în ceea ce privește schimbările climatice, au dus la creșterea interesului pentru implementarea sistemelor de conversie a energiei electrice din surse alternative care au la bază energii regenerabile caracterizate de un grad de poluare foarte scăzut sau chiar nul. Implicit numărul sistemelor de conversie a energiilor regenerabile a început să crească considerabil în rețelele electrice din întreaga lume și a determinat ca impactul lor asupra funcționării sistemelor de alimentare să reprezinte un domeniu de cercetare în ascensiune.

Energia alternativă sau regenerabilă cuprinde totalul surselor de energie care oferă posibilitatea de înlocuire a metodelor clasice de obținere a energiei de pe urma combustibililor fosili, cărbune, gaze, petrol care contribuie la creșterea emisiilor de carbon în atmosferă de pe urma arderii. Energiile regenerabile sunt obținute de la surse provenite din natură, fiind inepuizabile, spre deosebire de cele tradiționale care nu pot fi reînnoite [B1]. Printre mijloacele de valorificare a energiei care au impact dăunător mai mic sau chiar deloc asupra mediului se enumeră [B1][D2]:

- **Energia solară** este una dintre cele mai importante surse de energie regenerabilă care poate fi captată cu ajutorul celulelor fotovoltaice și convertită în energie electrică; de asemenea energia solară poate fi utilizată într-un sistem de conversie solar-termic-electric. Alte sisteme la care poate fi utilizată energia solară sunt autovehiculele și navele spațiale.
- **Energia eoliană** reprezintă o sursă de energie alternativă disponibilă în natură, inepuizabilă și care poate fi utilizată fără a produce efecte dăunătoare asupra atmosferei. Energia cinetică a vântului acționează palele turbinelor eoliene, iar în acest fel energia mecanică este transferată arborelui care prin mișcarea de rotație dă naștere fluxului magnetic variabil în interiorul generatorului electric care în final realizează conversia energiei mecanice în energie electrică. Atât utilizarea energiei solare cât și cea a energiei eoliene este dependentă de condițiile meteorologice și locația de amplasare a sistemelor de captare și conversie.
- **Energia hidrolică** este cea care se atribuie potențialului apelor stocate în lacurile de acumulare. Pe măsură ce apa stocată în spatele barajului este eliberată la presiune înaltă, energia sa cinetică este transmisă arborelui turbinei, iar prin intermediul hidrogenatorului electric această energie se convertește în energie electrică. Pe de-o parte această modalitate de conversie a energiei necesită costuri de implementare foarte mari, dar prezintă costuri de întreținere scăzute și energie electrică relativ ieftină.

- **Energia mareelor** este forma de energie regenerabilă care i-a naștere prin mișcarea naturală a mareelor care alimentează bazinele cu apă utilizată apoi pentru turbinele hidro.
- **Energia geotermală** este forma de energie utilizată în centrale geotermale care captează aburul izvorului geotermal (centrale "uscate") sau apa aflată la temperaturi echivalente punctului de fierbere (centrale "flash") furnizate în mod natural sub această formă datorită căldurii ce se află în interiorul Pământului. Acest tip de energie este utilizat pentru realizarea conversiei energiei electrice și pentru încălzirea locuințelor. Un al treilea tip de centrală geotermală este cea cu ciclu binar, la care apa sau aburul provenite din izvorul geotermal nu ajunge în contact direct cu turbina, această caracteristică diferențiind-o față de celelalte două tipuri de centrale [W2].
- **Biomasa** reprezintă sursele biologice care oferă o gamă largă de materiale care au fost și continuă să fie utilizate ca surse de energie. Acestea pot proveni din lemn, deșeuri de lemn și reziduri din industria de prelucrare a lemnului, a apelor reziduale sau a deșeurilor municipale solide, plante erbacee cultivate, deșeuri provenite din industria alimentară, deșeuri animale [D2].
- **Energia termoelectrică** folosește energia termală pentru conversia directă în energie electrică prin utilizarea efectelor termoelectrice în materiale, de exemplu semiconductorii oferă opțiunea cea mai bună pentru utilizare ca și termocuple deoarece termojoncțiunile pot fi construite prin utilizarea materialelor de tip p și de tip n, care cumulează efectele în jurul unui circuit termoelectric [D2].
- **Energia termionică** se referă la transformarea directă a energiei termice în energie electrică prin intermediul efectului Edison.

Conform raportului *BP Statistical Review of World Energy June 2018*, prezentat în figura 1.1, 34% din consumul total de energie la nivel global pentru anul 2017 a fost suplinit din sursele de energie regenerabilă.

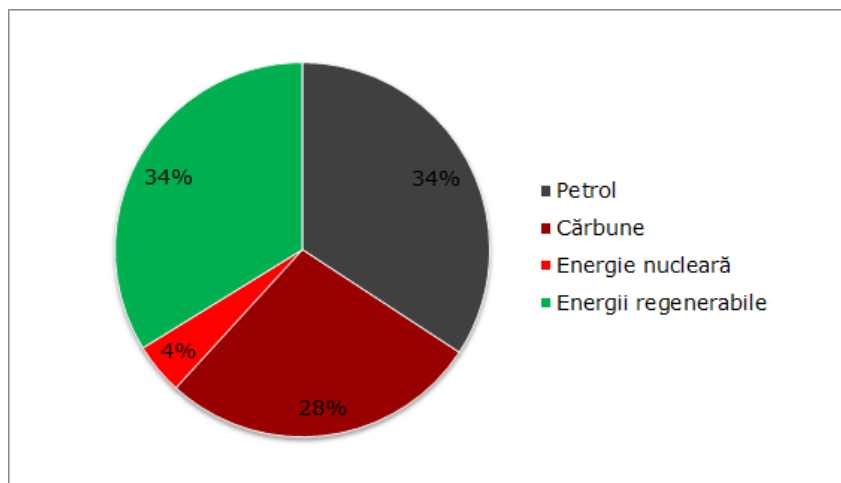


Fig. 1.1. Consumul de energie la nivel global pentru anul 2017

## 1.1 Evoluția în timp a utilizării energiei eoliene

Privită în urmă cu aproximativ 20 de ani doar ca o sursă de energie cu potențial de dezvoltare, energia eoliană prezintă astăzi un proces tehnologic comercial de generare a energiei electrice în peste 90 de țări, dintre care 29 au mai mult de 1 MW instalat, iar 9 dintre ele au peste 10 GW instalați, conform *Global Wind Energy Council*. Contribuția majoră asupra acestui fapt o reprezintă evoluția tehnologiei care a deschis calea pentru echipamente și mașini electrice mai fiabile și mai eficiente astfel încât vântul să devină una dintre sursele de energie cu cea mai rapidă creștere pe piața mondială. Printre alți factori care au avantajat creșterea exponențială a pieței de energie eoliană se enumeră: diminuarea rezervelor de combustibili fosili, reducerea costurilor de generare a energiei eoliene, creșterea sensibilității cu privire la problemele mediului și sprijinul diferitelor guverne din întreaga lume prin intermediul stimulentele financiare [R3].

Acestui domeniu a început să i se acorde mai multă atenție începând cu anii '80 când se obțineau turbine cu o putere nominală situată undeva la ordinul sutelor de kW (300-600 kW). Astăzi s-a ajuns la stadiul în care se construiesc curent turbine cu puteri nominale de până la ordinul MW (6-8 MW), existând turbine care au împins granițele chiar până la un record de 9,5 MW putere nominală [I1].

Fenomenul care generează energia eoliană este vântul, însă fundamentul acestei energii este Soarele. În miezul acestuia are loc fuziunea nucleară hidrogen-heliu, rezultând din acest proces caldura și radiația electromagnetică. O parte dintre acestea sunt interceptate de către suprafața terestră, însă în mod inegal, deoarece suprafața de absorbție a planetei variază atât în funcție de întinderile de apă față de cele de uscat, cât și de ecuator față de poli. În momentul în care două regiuni sunt încălzite diferit, diferența de presiune atmosferică generează mișcarea maselor de aer pentru echilibrarea raportului de presiune dintre cele două regiuni, rezultatul acestei mișcări fiind vântul. Intensitatea vântului este direct proporțională cu diferența de presiune dintre două zone geografice. Astfel, cu cât gradientul presiunii atmosferice este mai mare, cu atât viteza vântului este mai mare. Utilitatea sa poate să fie dovedită prin gestionarea corectă a instalațiilor eoliene care în acest demers au rolul de a utiliza energia cinetică a vântului în scopul conversiei acesteia în energie electrică sau mecanică [W1][W3][W4].

Energia cinetică este prezentă de fiecare dată când un obiect cu o anumită masă specifică se află în mișcare de translație sau de rotație cu o oarecare viteză. Având în vedere scopul principal al unei turbine eoliene de a capta și de a converti energia cinetică  $E_c$  a vântului în energie mecanică și ulterior în energie electrică, este utilă determinarea cantității de energie și puterea disponibilă. Aceasta poate fi dedusă din relația (1.1), în care  $m$  reprezintă masa aerului, iar  $\bar{u}$  este viteza medie a vântului considerată pe o anumită perioadă de timp [W1].

$$E_c = \frac{1}{2} m \cdot \bar{u}^2 \quad (1.1)$$

Stăpânirea vântului și folosirea sa în scopuri utile a fascinat omenirea cu mii de ani în urmă, încă din timpul civilizațiilor antice, fiind desoperită și utilizată în diferite locații ale globului în mod independent. Din acest motiv există multe speculații

contradictorii în ceea ce privește originea istorică a morilor de vânt. Cele mai vechi mențiuni despre utilizarea energiei vântului provin din Orient, fiind amintite Persia, China, Tibet, India, Egipt, Afghanistan în vechile manuscrise care însă au suferit adesea greșeli de traducere, revizuirii și interpolări făcând astfel originea acestora pierdută în antichitate. La început energia vântului era folosită de către oameni ca mijloc de propulsie pe apă pentru diverse ambarcațiuni, iar ceva mai târziu ca energie pentru morile de vânt. Prin anumite supoziții se estimează că în jurul anului 4000 î.e.n., chinezii antici foloseau puterea vântului pentru propulsia plutei primitive, iar mai târziu pentru navele de pescuit și transport de mărfuri și persoane. În jurul anului 3400 î.e.n., egiptenii antici foloseau energia eoliană pentru navigația pe fluviul Nil, iar ulterior de-a lungul coastelor Mediteranei și pe Marea Roșie cu nave mai sofisticate. Pe baza principiului de propulsie cu ajutorul energiei eoliene a fost dezvoltată considerabil navigația, iar vasele cu pânze au dominat mările și oceanele planetei în diferite scopuri pentru o lungă perioadă de timp, mai precis până la inventarea motoarelor cu aburi în secolul al XIX-lea [W1][S2].

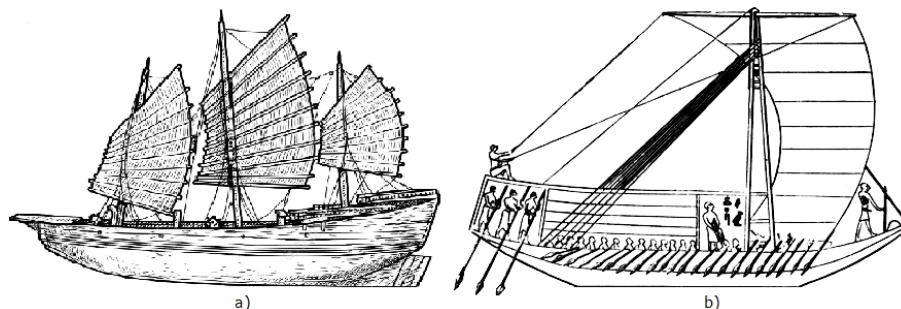


Fig. 1.2. Vase cu pânze: a) modelul chinezesc [W5]; b) modelul egiptean [H1]

Exploatarea energiei eoliene pe uscat a luat startul din momentul în care au fost construite primele mori de vânt cu ax vertical, în Sistan (Persia antică) în secolul al IX-lea î.e.n în scopul măcinării cerealelor și pomparea apei [W1].

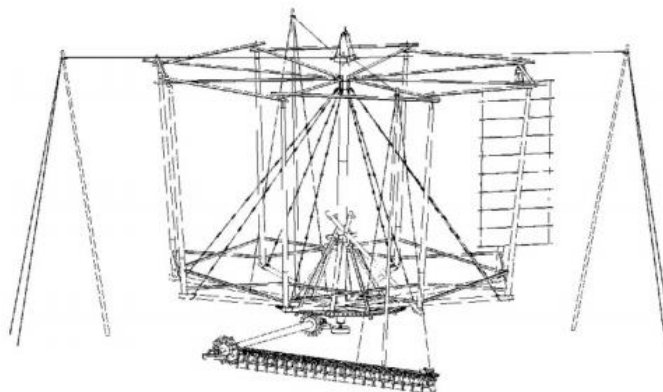


Fig. 1.3. Moară de vânt chinezească cu ax vertical [L1]

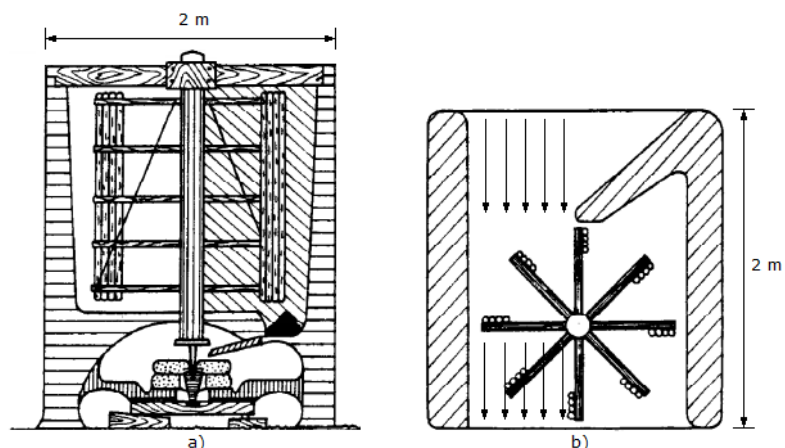


Fig. 1.4. Moară de vânt persană cu ax vertical [G2]

În Europa au fost inventate morile de vânt cu ax orizontal în jurul anilor 1180, acest stil devenind dominant pentru acest continent și pentru SUA. Aceste mori erau folosite pentru măcinat, tăierea lemnului, confecționarea hârtiei, presarea semințelor pentru obținerea uleiului, dar și în alte aplicații, cum ar fi de exemplu pentru drenare, în special în Olanda utilizându-se în acest scop. O prezentare amănunțită despre diferitele tipuri, construcția, utilizarea și controlul morilor de vânt a fost realizată de către D. Spera în cartea sa [S2]. De asemenea, în aceeași carte acesta afirmă că ideea de utilizare a morilor de vânt pentru punerea în mișcare a generatoarelor electrice în scopul încărcării unor acumulatori a fost sugerată pentru prima dată de către Sir William Thomson în anul 1881 într-un discurs. Experimentele de conversie a energiei electrice din energie eoliană au apărut la sfârșitul secolului al XIX-lea, între anii 1888-1900 când britanicii, americanii și danezii au început să folosească morile de vânt în acest scop, în special din interesul alimentării cu energie electrică a locuințelor izolate [S2].

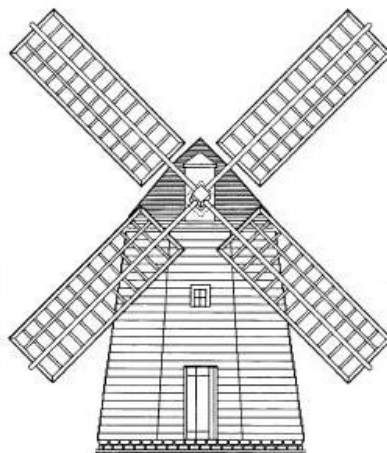


Fig. 1.5. Model de moară de vânt europeană din jurul anilor 1800 [W6]

## 24 Conversia energiei eoliene în energie electrică - 1

---

Profesorul scoțian James Blyth a construit în anul 1887 în propria sa grădină prima turbină eoliană care generează energie electrică utilizată pentru încărcarea acumulatorilor și iluminatul locuinței sale de vacanță. Blyth a elaborat numeroase lucrări și a efectuat experimente în care a studiat diferite concepte de turbine eoliene culminând patru ani mai târziu cu brevetarea unui model. Nu după mult timp, în anul 1888, inventatorul american Charles F. Brush a pus în funcțiune în Cleveland, Ohio, prima turbină eoliană automatizată din lume, fiind în acest sens creditat ca prima persoană care folosește o astfel de mașină pentru conversia energiei electrice [P1][W7].

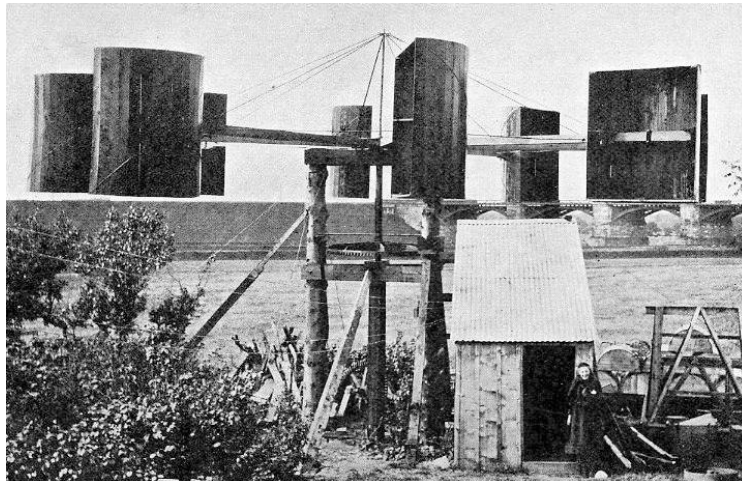


Fig. 1.6. Prima turbină eoliană utilizată pentru conversia energiei electrice - Blyth [W7]

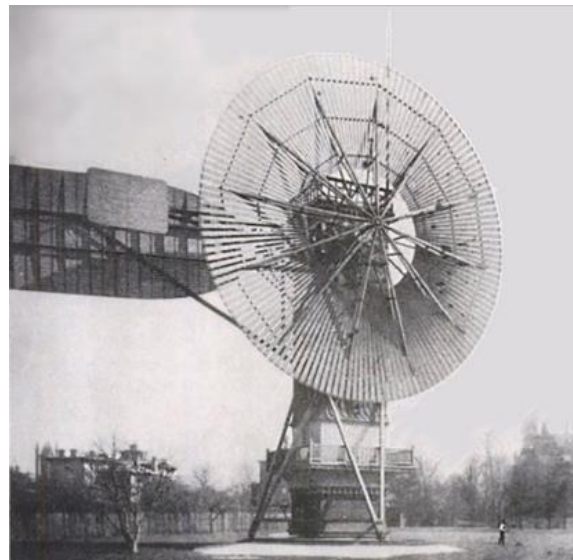


Fig. 1.7. Prima turbină eoliană automatizată din lume - Brush [S2]



Morile de vânt pentru conversia energiei electrice au fost folosite intens în Danemarca între anii 1900-1910, cu precădere în agricultură, dar între anii 1910-1914 au întâmpinat o concurență puternică din partea motoarelor diesel care ofereau mai mult confort și erau mai economice. Însă în perioada Primului Război Mondial, necesitatea utilizării eolienele s-a impus din cauza întreruperii livrărilor de țiței. Astfel au fost construite multe centrale eoliene cu puteri de la 20 la 35 kW, însă după război a avut loc electrificarea în întreaga țară, conducând la stagnarea eolienele. Istoria s-a repetat în timpul celui de-Al Doilea Război Mondial, însă de această dată nu s-a mai renunțat la energia eoliană, ci mai degrabă a fost început un proces de analiză în ceea ce privește extinderea acestora. Acest impuls nu a avut impact doar în Danemarca, ci și în Franța, Germania și Marea Britanie, dezvoltând până la un anumit punct tehnica în acest sens. Dar cu toate acestea nu a fost prezentă continuitatea în domeniu și nu a fost un proces susținut, turbinele eoliene fiind considerate ineficiente din punct de vedere al costurilor. Totuși, experiența acumulată până în acel moment și impactul crizei internaționale a petrolului din anul 1972, au condus la nivel global la orientarea atenției înspre energia eoliană [S2].

Una dintre primele turbine eoliene de largi dimensiuni utilizată pentru dezvoltarea centralelor eoliene a fost turbina eoliană rusească *Balaclava*, construită în 1931, având o putere de 100 kW. Însă un reper important în domeniul energiei eoliene îl reprezintă rezultatul unei colaborări între inginerul Palmer C. Putnam și compania *Morgan Smith Company* care a luat naștere la sfârșitul anilor 1930 și care a culminat în anul 1941 cu construirea turbinei eoliene *Smith-Putnam*, cea mai mare la acel moment și încă aproximativ 40 de ani după. Aceasta deținea o serie de inovații tehnologice de vârf la acea perioadă, printre care utilizarea cutiei de viteze pentru punerea în mișcare a unui generator sincron de 1,25 MW [S2].

De-a lungul timpului au fost construite și dezvoltate diferite concepte de turbine eoliene pentru maximizarea producției de energie electrică, minimizarea costurilor de producție și de întreținere, creșterea eficienței și a fiabilității.

În anul 2011 compania Vestas a dezvoltat schița turbinei eoliene V164 cu putere nominală de 7 MW. Procesul de dezvoltare a fost îmbunătățit, astfel că în ianuarie 2014 a fost pus în funcțiune pe terenul de testare din Østerild (Danemarca) primul prototip dezvoltat pe această platformă, folosit apoi la scară industrială din anul 2016. În timpul testelor, prototipul de putere nominală 8 MW a stabilit în octombrie 2014 un record de energie electrică furnizată într-un ciclu de 24 de ore de 192 MWh, echivalentul energiei electrice consumată în aproximativ 13500 de gospodării din Danemarca [W8][W9].

În procesul de extindere al parcului eolian *Burbo Bank 2* situat în largul Mării Irlandeze, *DONG Energy* a optat pentru instalarea unui număr de 32 de turbine eoliene V164-8MW furnizate de către producătorul *MHI Vestas Offshore Wind A/S*, proces început în septembrie 2016 și finalizat în aprilie 2017, parcul ajungând astfel la extinderea completă de 348 MW putere instalată și fiind primul proiect în care sunt utilizate modelele V164 [W8][W9][W10].



Fig. 1.8. Turbine eoliene V164-8MW în parcul eolian Burbo Bank 2 [W8]

*Vestas Wind Systems A/S* și *Mitsubishi Heavy Industries (MHI)* s-au angajat într-o activitate reciprocă de producție a unei turbine eoliene care deține astăzi recordul de putere nominală de 9,5 MW. În decembrie 2016 aceasta a stabilit noul record mondial la energie electrică furnizată pe o perioadă de 24 de ore de către o singură unitate eoliană la 216 MWh. Jens Tommerup, CEO al *MHI Vestas* a spus într-un comunicat că o astfel de turbină eoliană poate asigura singură consumul de energie a 8300 de case din Marea Britanie. Printre alte beneficii, conform *4coffshore.com*, acest model de turbină contribuie la scăderea CO<sub>2</sub> cu 11451 tone pe an. Planificat pentru finalizare cel târziu la sfârșitul anului 2019, *Northwester 2* (Belgia) se pregătește să devină primul parc eolian maritim care folosește turbinele cele mai puternice din lume, V164-9.5MW [W8][W9][W10].

Aceste lucruri arată printre altele că energia eoliană nu a avut la început nici un impact asupra sistemelor electroenergetice, însă acum, datorită progresului semnificativ în ceea ce privește creșterea ponderii de energie eoliană pe piața mondială a energiei electrice, trebuie luată în serios producția de energie eoliană și posibilitatea integrării ei în sistemul electroenergetic [W1].

Un rol important în acest proces de dezvoltare l-au avut și îl au în continuare generatoarele sincrone, acest trend ducând implicit și la studierea și analizarea foarte detaliată a acestora pentru îmbunătățirea performanțelor, oferirea unui randament cât mai ridicat în procesul de conversie a energiei și furnizarea de energie electrică de cea mai bună calitate și la cele mai înalte standarde.

În procesul de evoluție al energiei eoliene pentru utilizarea sa pe scară largă sunt enumerați următorii factori care au contribuit la dezvoltarea tehnologiei eoliene [R1]:

- rezistența înaltă a fibrelor compozite utilizate pentru fabricarea pe scară largă și la preț redus a palelor;
- punerea în funcțiune a generatoarelor electrice cu funcționare la viteză variabilă pentru captarea energiei maxime;

- progresele obținute în electronica de putere și reducerea costurilor asociate acesteia;
- îmbunătățiri în ceea ce privește funcționarea, operarea și eficiența parcurilor eoliene;
- apariția și dezvoltarea mediilor software care permit modelarea și simularea exactă a prototipurilor.

## 1.2 Structura și funcționarea unui agregat eolian

Apariția și dezvoltarea avionului în primele decenii ale secolului al XX-lea au dus la studii de proiectare și analize intense asupra elicei care puteau fi aplicate astfel turbinei eoliene [S2]. Funcționarea turbinelor eoliene are la bază forța cinetică a vântului. Ca și principiu, vântul acționează asupra palelor elicei și creează presiune pozitivă în partea superioară a palei și negativă în partea inferioară a acesteia, iar din această diferență de presiune rezultă forța de acționare a palelor și mișcarea de rotație a acestora. Astfel energia cinetică a vântului este convertită în forță mecanică de rotație care mai departe pune în mișcare generatorul electric, fiind astfel obținută energia electrică. Transformările de energie și transferurile de putere realizate de către un agregat eolian sunt ilustrate în figura 1.9.

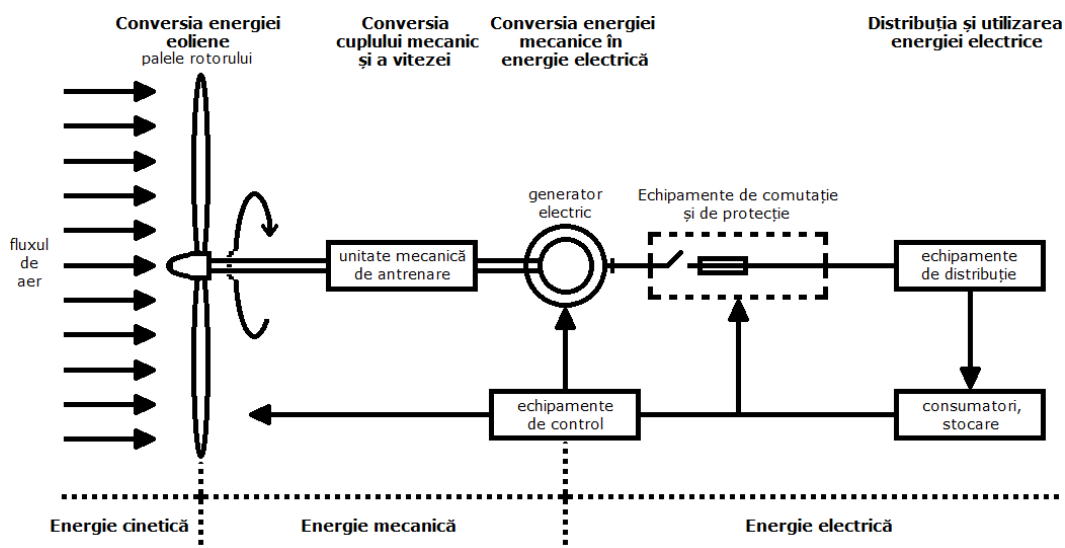


Fig. 1.9. Conversia de energie și transferurile de putere realizate într-o turbină eoliană

Procesul de conversie a energiei într-un agregat eolian modern are loc în trei etape, conform figurii prezentate anterior. În primul rând este captată energia cinetică a vântului de către palele turbinei eoliene și convertită în energie mecanică. Prin intermediul sistemului mecanic, această energie antrenează generatorul electric și astfel energia mecanică este convertită în energie electrică.

Din punct de vedere constructiv al axei de rotație a lamelor rotorului, turbinele eoliene se clasifică în două categorii: turbine eoliene cu ax vertical și turbine eoliene cu ax orizontal. Faptul că turbinelor eoliene li se acordă cele două adjective, "orizontală" și "verticală", se referă la aspectul geometric al arborelui de acționare dintre butucul elicei și generatorul electric. Turbinele cu ax vertical fără mecanism de orientare prezintă o serie de avantaje în comparație cu cele cu ax orizontal. Printre cele mai importante se enumeră faptul că pot funcționa sub incidența vântului din orice direcție, iar multiplicatorul de viteză și generatorul electric pot fi amplasate la nivelul solului reducându-se astfel greutatea exercitată asupra ansamblului și costurile de construcție, precum și efectuarea mai ușoară a mentenanței. Cu toate acestea însă este cunoscut faptul că turbinele cu ax orizontal sunt mai eficiente decât cele cu ax vertical, fiind cele mai utilizate la nivel comercial. Printre avantajele turbinelor eoliene cu ax orizontal se enumera eficiența ridicată, densitatea mare de energie, comportament și posibilități mai bune de control la pornire [S2][W1][T1].

Un model inovativ de turbină eoliană care stă la baza agregatelor eoliene moderne este cea cu rotor de tip *Savonius*, invenție ce aparține inginerului finlandez S.J. Savonius care a testat-o pentru prima dată în 1925, funcționarea sa având la bază principiile tracțiunii diferențiale. Secțiunea transversală a rotorului prezintă forma literei "S", iar energia exercitată de către vânt asupra sa are intensitate diferită pe suprafața curbată, dezvoltând un cuplu care rotește ansamblul [S2].

O altă structură de bază a cărei principiu este folosit în prezent este turbina cu rotor de tip *Darrieus*, concept introdus de către francezul F.M. Darrieus la începutul anilor 1930. Acest concept prezintă un rotor cu două sau mai multe lame aerodinamice bombate dispuse pe un ax vertical și acționate sub incidența vântului [S2]. De-a lungul timpului au fost abordate noi metode de modelare și optimizare a acestui tip de turbine eoliene. Autorii din lucrarea [T1] au prezentat o astfel de metodă și pornind de la modelul de bază au dovedit fezabilitatea unui prototip prin demonstrații ale conceptelor teoretice și practice, rezultatele simulărilor obținute având legătură cu rezultatele modelului cercetătorului român Ion Paraschivoiu.

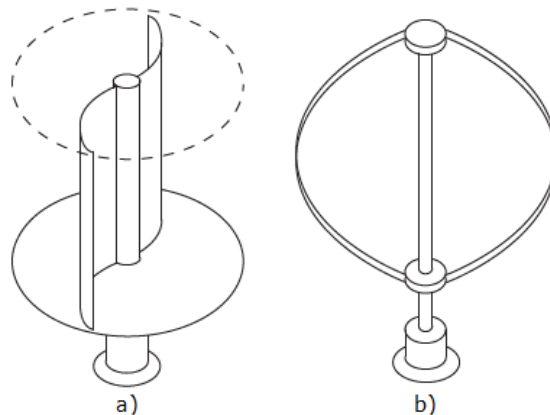


Fig. 1.10. Turbine eoliene cu ax vertical: a) Savonius; b) Darrieus [W1]

Agregatele eoliene moderne folosesc cu precădere modelul de turbine cu ax orizontal (HAWT - "horizontal-axis wind turbine"), fiind cele mai răspândite în numeroase configurații și reprezentând soluția cea mai bună pentru parcurile eoliene de mare putere în care generatoarele au o putere instalată de ordinul MW. Cea mai simplă structură tipică pentru un agregat eolian este prezentată în figura 1.11.

**Palele** au rolul de a capta energia vântului pentru ca aceasta să poată fi transferată mai departe rotorului turbinei. Eficiența cu care este extrasă energia vântului depinde în principal de forma, lungimea, numărul și unghiul de înclinație al palelor. Acestea sunt realizate dintr-un amestec de fibră de sticlă și materiale compozite, iar lungimea lor se alege în funcție de puterea dorită. Lățimea palelor determină cuplul de pornire, care este cu atât mai mare cu cât palele sunt mai late.

La viteze foarte mici ale vântului puterea generată este prea mică pentru a putea fi utilizată. Eolienele cu o structură tipică sunt proiectate să pornească atunci când viteza vântului ajunge undeva la 3-4 m/s. La vânt cu viteze cuprinse între 12 m/s până la aproximativ 25 m/s puterea este limitată cu ajutorul sistemelor de reglare și de control. Când vântul are viteză mai mare de 20-25 m/s turbinele eoliene de obicei se opresc pentru a evita aplicarea sarcinilor mecanice asupra elementelor turbinei și defectarea acestora.

Turbinele eoliene moderne pot fi echipate cu un sistem inteligent de control care are rolul de urmărire al punctului maxim de putere a vântului. Viteza și direcția acestuia sunt măsurate cu ajutorul unui anemometru și a unei giruete. Viteza recepționată este transmisă la un controler, iar girueta comunică cu unitatea de pivotare pentru a orienta turbina corect înspre direcția vântului [C2].

Numărul de pale se stabilește în funcție de tipul de eoliană. În prezent, cel mai utilizat este sistemul cu trei pale, deoarece acest sistem asigură limitarea vibrațiilor, a zgomotului și a "oboselii" rotorului, față de sistemele mono-pală sau bi-pală [R1].

**Butucul** este partea turbinei pe care sunt montate palele. Este prevăzut cu dispozitivul de tangaj care este folosit la turbinele eoliene pentru controlul palelor, realizând înclinarea sau întoarcerea acestora pentru ca viteza rotorului să poată fi controlată și să se păstreze funcționarea cât mai constantă a rotorului în condiții de vânt prea tare sau prea încet. Acesta realizează controlul activ, controlul pasiv și controlul mixt [W1].

Controlul activ se realizează prin motoare hidraulice, numit și 'pitch control'. Sistemul asigură rotirea palelor modificând astfel unghiul de incidență pentru ca palele să fie poziționate mereu la un unghi optim în raport cu viteza vântului și astfel aceasta să fie valorificată la maximum. În cazul în care vântul depășește viteza nominală, sistemul permite limitarea puterii prin modificarea poziției palelor [R2].

Controlul aerodinamic pasiv este caracterizat prin faptul că palele eoliene sunt fixe în raport cu butucul turbinei și concepute să permită deblocarea în cazul unui vânt puternic. Deblocarea se face progresiv, invers proporțional cu viteza vântului, până când vântul atinge viteza critică. Acest tip de control este utilizat la majoritatea eolienele, deoarece are avantajul că nu necesită piese mobile și sisteme de comandă în rotorul turbinei [R1].

Controlul mixt realizează îmbinarea avantajelor controlului activ și al celui pasiv cu scopul de a controla cât mai precis conversia în energie electrică. Acest sistem este utilizat la eolienele de foarte mare putere [R1].

**Generatorul electric** este cel care asigură conversia energiei eoliene în energie electrică. Acesta poate să fie de curent continuu sau de curent alternativ. Cele mai utilizate, aproape în totalitate, sunt generatoarele de curent alternativ, datorită prețului și randamentului. Generatoarele de curent alternativ folosite sunt fie de tip sincron, fie de tip asincron, funcționând la viteză fixă sau variabilă.

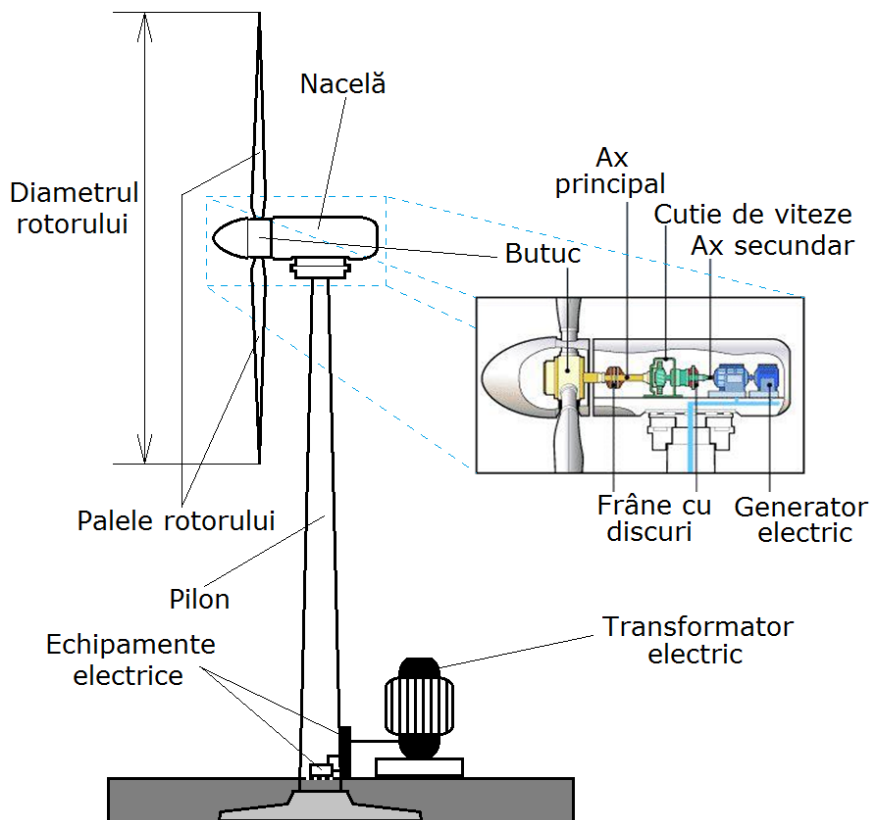


Fig. 1.11. Principalele elemente structurale ale unui agregat eolian modern

**Axul principal** este un arbore de viteză redusă care îndeplinește funcția de conducere a butucului turbinei, reprezentând un angrenaj mecanic [W1].

**Axul secundar** este un arbore de mare viteză care realizează conducerea generatorului electric [W1].

**Cutie de viteze** este cea care realizează conexiunea dintre arborele de viteză redusă și arborele de mare viteză, adică dintre cel principal și cel secundar, măbind viteza de rotație de la butuc la viteza de rotație cerută de către generator pentru a produce un optim de energie electrică. Cutia de viteze este foarte costisitoare și reprezintă partea cea mai masivă a turbinei eoliene, motiv pentru care există interes din partea inginerilor asupra cercetării tipurilor de generatoare care să funcționeze la

viteze de rotație mai mici în lipsa cutiei de viteze prin intermediul unui sistem de acționare directă [R2].

**Sistemul de frânare** reprezintă o frână cu disc, care poate fi acționată mecanic, electric, hidraulic pentru oprirea rotorului în situații de urgență, cum ar fi viteza de decuplare mai mare [W1].

**Sistemul de control** este cel care pornește turbina la viteze optime ale vântului și o oprește atunci când vântul depășește viteza impusă [W1].

**Nacela** este carcasa montată în partea superioară a turnului și conține cutia de viteze, arborii de viteză redusă și de viteză mare, generatorul, echipamentele de comandă și de frânare [W1].

**Pilonul** sau turnul este cel care susține turbina și nacela. Turnurile sunt realizate din oțel tubular, beton sau zăbrele de oțel. Deoarece viteza vântului crește tot mai mult odată cu înălțimea, turnurile se proiectează să fie cât mai înalte pentru a permite palelor să capteze mai multă energie și în acest mod generatorul va furniza mai multă energie electrică [W1].

### 1.3 Generatorul electric al unui agregat eolian

Mașina electrică destinată conversiei mecanică-electrică a energiei, adică generatorul electric, reprezintă un element extrem de important al sistemului eolian, care definește cu o pondere importantă performanțele întregului sistem. În funcție de tipul constructiv al acestuia este atribuit modul de funcționare al sistemului eolian care poate să activeze conectat la rețea sau în regim autonom. De asemenea, tipul generatorului dictează și posibilitățile de conectare a sistemului eolian la rețea.

De-a lungul timpului au fost construite și dezvoltate diferite tipuri și concepte de turbine eoliene în funcție de generatorul electric utilizat.

În jurul anilor 1980, primele prototipuri de turbine eoliene conectate la rețea funcționau la viteză fixă și au fost echipate cu generatoare sincrone. Dar la puțin timp generatorul de inducție cu rotor în colivie a apărut ca și soluție adoptată pe scară largă datorită în primul rând costurilor mai mici și tehnologiei simple. Generatorul de inducție cu rotor în colivie este folosit mai mult în turbine eoliene cu viteză fixă, conectat direct la rețea. Prin utilizarea cutiei de viteze, aceasta modifică viteza scăzută de rotație a turbinei la o viteză mare de rotație necesară generatorului. Astfel viteza de rotație a generatoarelor de acest tip folosite la eoliene este de obicei 1000÷1500 rpm. Dezavantajul principal al turbinelor eoliene cu viteză fixă este că funcționează în intervale scurte de timp deoarece depind de viteza vântului care nu este constantă, iar toate fluctuațiile sursei primare sunt resimțite de către consumatorii finali [P2].

Introducerea generatorului de inducție cu alimentare dublă la sistemele eoliene în jurul anilor 1990 a permis un control mult mai bun al transferului de putere electrică înspre consumatori. Un pas major în acest sens îl îndeplinește și utilizarea electronicii de putere prin intermediul căreia sunt facilitate controlul și optimizarea conversiei energiei eoliene [P2].

În zilele noastre, mulți producători de turbine eoliene se bazează pe turbine eoliene cu viteză variabilă. Sistemul electric pentru funcționarea cu viteză variabilă este mult mai complicat, în comparație cu sistemul turbinelor eoliene cu viteză fixă, însă

funcționarea la turație variabilă a unei turbine eoliene oferă avantajul că ea poate fi folosită pentru o gamă largă de viteze ale vântului. Așadar unul dintre avantajele principale ale sistemelor cu viteză variabilă este acela că viteza vântului poate fi controlată.

Rezultă așadar că pe piața de energie eoliană există două tipuri de sisteme eoliene diferențiate în funcție de tipul vitezei la care lucrează generatoarele electrice:

1. turbine eoliene cu viteză fixă, echipate cu generator de inducție cu rotor cu înfășurarea în colivie conectat direct la rețea;
2. turbine eoliene cu viteză variabilă cu generator de inducție cu alimentare dublă sau cu generator sincron cu magneți permanenți.

De regulă, generatoarele sincrone cu magneți permanenți sunt utilizate pentru aplicații cu turație scăzută în care generatorul este conectat direct la rețea fără multiplicatorul de viteză. Dar turbinele eoliene nu se limitează doar la utilizarea acestor tipuri de generatoare, fiind utilizate și altele precum generatoare sincrone cu rotor bobinat, generatoare asincrone cu rotorul în scurtcircuit, generatoare asincrone cu stator dublu, generator asincron cu reostat în circuitul rotoric, etc. [R1]

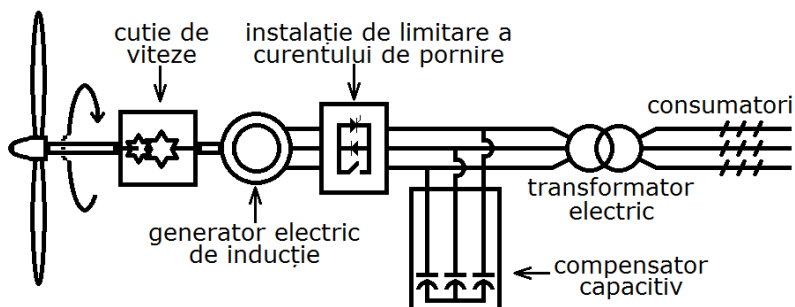


Fig. 1.12. Model de turbină eoliană cu viteză fixă

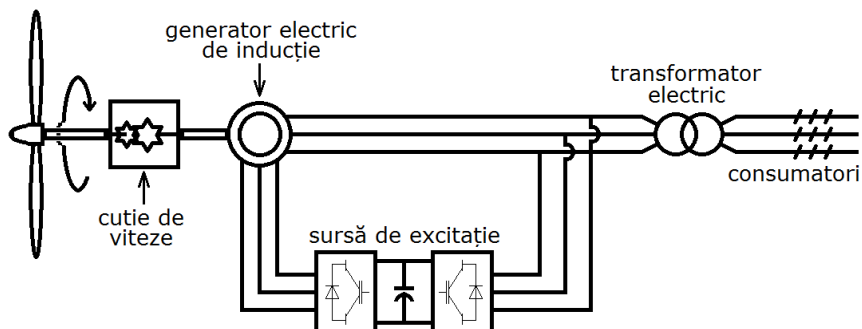


Fig. 1.13. Model de turbină eoliană cu viteză variabilă și dotată cu echipament de excitație



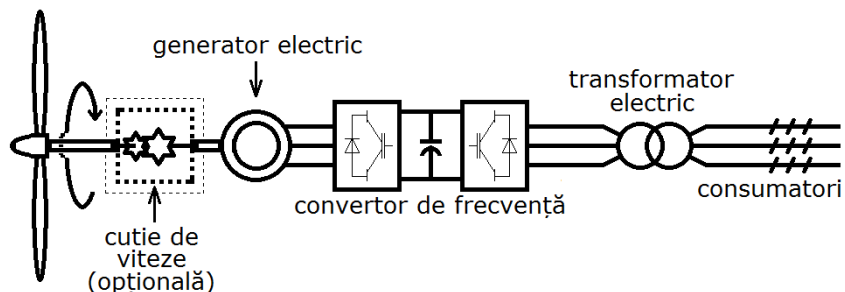


Fig. 1.14. Model de turbină eoliană cu viteză variabilă echipată cu generator sincron

Printre avantajele oferite de către turbinele eoliene cu viteză fixă se enumeră robustețea generatoarelor de inducție utilizate, simplitatea sistemului electric, fiabilitate ridicată și cost moderat. Principalele dezavantaje ale acestui tip de sistem sunt lipsa posibilității de reglare a puterii generate, absența puterii reactive condiționată de generatorul de inducție, putere cerută pentru funcționarea la rețea și implicit necesitatea instalării bateriilor de condensatoare pentru suplینirea ei. În unele cazuri sistemul poate să fie prevăzut cu instalație de limitare a curentului de pornire alcătuită dintr-un convertor cu două tiristoare [W1][R2].

Turbinele eoliene cu funcționare la viteză variabilă oferă avantaje precum creșterea eficienței energetice, reducerea variațiilor cuplului, generarea energiei electrice de înaltă calitate. La acest tip de sisteme nu este posibilă conectarea directă la rețea sau la consumatori deoarece tensiunea și frecvența sa variază, astfel este necesară utilizarea echipamentelor de electronică de putere ca interfață între generator și consumator [R2].

Ca și mod de amplasare, turbinele eoliene sunt în general instalate grupat pe o suprafață mai mare, formând astfel parcurile eoliene. Această suprafață poate să fie pe uscat (on-shore) sau în largul mărilor (off-shore). Cele două tipuri de instalări comparate între ele prezintă avantaje și dezavantaje. Instalările pe sol reprezintă o soluție mai ieftină, dar creează dificultăți în utilizarea agricolă a solului. Instalările sub formă de ferme în largul mărilor sau oceanelor au avantajul că beneficiază de o viteză mai constantă a vântului și o durată mai mare a acestuia. Acest tip de instalare reduce dezavantajul provocat de zgomotul sonor al centralelor eoliene și de asemenea ameliorează estetica mediului. Pot să apară însă probleme de integrare în sistemul electroenergetic, iar astfel energia eoliană se va confrunța cu noi probleme. De asemenea, pot să apară probleme legate de mărimea, greutatea, fiabilitatea și controlul agregatelor din locațiile de pe mare sau ocean, care sunt aspecte importante atunci când vine vorba de deplasarea pe mare față de cea pe uscat [E2].

Pentru o mai bună imagine asupra evoluției în timp a turbinelor eoliene, este adusă în vedere prima turbină eoliană construită de către Brush în anul 1888. Aceasta avea o înălțime a turnului de 18,3 metri, cu un diametru al rotorului de 17 metri și o putere nominală a generatorului electric de 12 kW. La momentul actual, cea mai puternică turbină eoliană din lume, V164-9.5MW care aparține producătorului MHI Vestas, conține trei pale a câte 80 metri lungime, fiecare cântărind 35 tone. Dimensiunile nacellei sunt 20,7 metri lungime, 9,3 metri înălțime și 8,8 metri lățime, iar greutatea acesteia se situează undeva la aproximativ 390 tone. Înălțimea până la butuc

este de aproximativ 105 metri, iar înălțimea totală a ansamblului undeva în jur de 187 metri. Diametrul rotorului este de 164 metri [S2][W8].

## 1.4 Balanța energetică actuală

Consultarea rapoartelor anuale întocmite în ceea ce privește producția de energie electrică arată că aceasta se află pe un trend ascendent de la an la an. Conform *BP Statistical Review of World Energy June 2018*, în anul 2017 producția de energie electrică la nivel mondial se situează la valoarea de 25551,3 TWh, înregistrând un procent de creștere anual de 2,8% calculat în intervalul anilor 1985 – 2017.

În ceea ce privește conversia energiei eoliene în energie electrică, rata de creștere anuală în acest sector a fost una foarte bună, mai ales pentru perioada 2006 – 2016, în care s-a înregistrat o valoare de 21,9%.

Capacitatea instalată cumulată de energie eoliană la nivel global în anul 2017 se regăsește la valoarea de 514,7 GW, conform surselor *IRENA, Global Wind Energy Council* și *Navigant Consulting*, liderul mondial fiind China cu o putere instalată de 164,1 GW. Această valoare reprezintă un procent de 31,7% din totalul de putere instalată pe glob în turbinele eoliene. SUA ocupă locul secund în ceea ce privește puterea instalată în turbinele eoliene la nivel mondial, cu o putere de 87,5 GW, adică 17% din total, fiind apoi urmată de către Germania cu o putere de 55,8 GW, reprezentând 10,8% din puterea totală la nivel global.

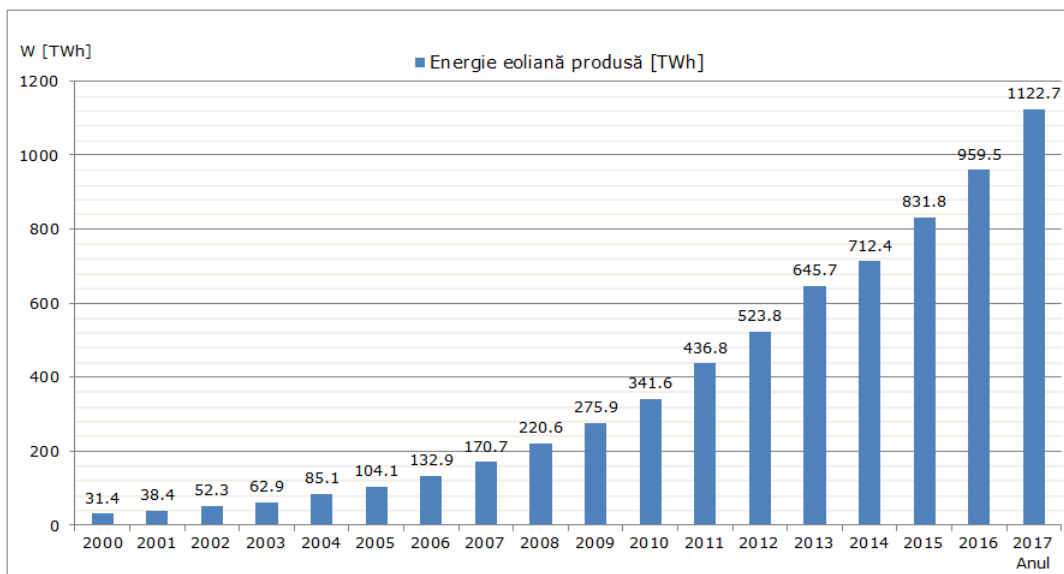


Fig. 1.15. Producția anuală de energie eoliană în intervalul 2000 – 2017

Pe continentul european, la sfârșitul anului 2017 puterea instalată cumulată în turbinele eoliene se afla la o valoare totală de 178.3 GW, principalele țări care contribuie la această valoare fiind expuse în tabelul 1.1.

Tabelul 1.1. Capacitatea instalată de energie eoliană la nivel european

Țara	Capacitate instalată [MW]		
	Final 2016	Nou 2017	Total (final 2017)
Germania	49.586	6290	55.876
Spania	23.025	95	23.120
Marea Britanie	16.217	3619	19.836
Franța	11.761	1798	13.559
Italia	9.410	252	9.662
Suedia	6.594	226	6.820
Polonia	5.796	650	6.446
Turcia	5.751	765	6.516
Danemarca	5.137	275	5.412
Portugalia	5.049	0	5.049
Olanda	4.268	13	4.281
<b>România</b>	3.034	4	3.038
Irlanda	2.887	538	3.425
Austria	2.635	195	2.830
Belgia	2.384	465	2.849
Grecia	2.370	171	2.541
Finlanda	1.511	512	2.023
Norvegia	838	324	1.162
Bulgaria	668	0	668
Ungaria	329	0	329
Alte țări europene	2.690	182	2.872
<b>Total Europa</b>	<b>161.940</b>	<b>16.374</b>	<b>178.314</b>

Sectorul energiei regenerabile în România, constituit în principal din energia eoliană, a ajuns la o capacitate de 4,6 GW în iunie 2016, din care aproximativ 3 GW provin din partea energiei eoliene. Mai mult decât atât, a fost îndeplinit și chiar depășit obiectivul impus de UE cu o pondere de 24% din energia brută consumată să provină din energie regenerabilă. După cum se poate observa din tabelul anterior, conform *BP Statistical Review of World Energy June 2018* România dispune de o puterea instalată cumulată în turbinele eoliene încadrată la valoarea de 3038 MW [B2][W11].

## 1.5 Concluzii

Sintetizând ideile din acest capitol se poate afirma că energia eoliană a reprezentat mereu un interes, în special în sectorul de conversie a sa în energie electrică, fiind construite și dezvoltate de-a lungul timpului diferite concepte de turbine eoliene pentru maximizarea producției de energie electrică, minimizarea costurilor de producție și de întreținere, creșterea eficienței și a fiabilității. Astfel s-a ajuns la conceperea unor turbine eoliene cu putere nominală de 9,5 MW.

Un rol important în acest proces de dezvoltare l-au avut și îl au în continuare generatoarele sincrone, acest trend ducând implicit și la studierea și analizarea foarte detaliată a acestora pentru îmbunătățirea performanțelor, oferirea unui randament cât mai ridicat în procesul de conversie a energiei și furnizarea de energie electrică de cea mai bună calitate și la cele mai înalte standarde.

S-a constatat că de-a lungul timpului au fost construite și dezvoltate diferite tipuri și concepte de turbine eoliene în funcție de generatorul electric utilizat. De exemplu primele prototipuri de turbine eoliene conectate la rețea funcționau la viteză fixă și au fost echipate cu generatoare sincrone, însă la scurt timp a fost adoptat, ca și soluție mai puțin costisitoare și mai simplă din punct de vedere tehnologic, generatorul de inducție cu rotor în colivie. În jurul anilor 1990 a fost introdus la sistemele eoliene generatorul de inducție cu alimentare dublă care a permis un control mult mai bun al transferului de putere electrică înspre consumatori. Un rol important în acest proces l-au avut și îl are în continuare electronica de putere prin intermediul căreia sunt facilitate controlul și optimizarea conversiei energiei eoliene.

S-a observat că în zilele noastre mulți producători de turbine eoliene se axează pe turbine eoliene cu viteză variabilă, deși sistemul electric pentru funcționarea în această configurație este mult mai complicat în comparație cu sistemul turbinelor eoliene cu viteză fixă. Unul dintre avantajele turbinelor eoliene cu viteză variabilă îl reprezintă faptul că acestea pot fi folosite pentru o gamă largă de viteze ale vântului, astfel viteza vântului poate fi controlată și randamentul turbinei eoliene poate fi maximizat.

Conform rapoartelor anuale producția de energie electrică arată că aceasta se află pe un trend ascendent de la an la an. Conform *BP Statistical Review of World Energy June 2018*, în anul 2017 producția de energie electrică la nivel mondial se situează la valoarea de 25551,3 TWh, înregistrând un procent de creștere anual de 2,8% calculat în intervalul anilor 1985 – 2017.

În ceea ce privește conversia energiei eoliene în energie electrică, rata de creștere anuală în acest sector a fost una ridicată, mai ales pentru perioada 2006 – 2016, în care s-a înregistrat o valoare de 21,9%.

Capacitatea instalată cumulată de energie eoliană la nivel global în anul 2017 se regăsește la valoarea de 514,7 GW, conform surselor *IRENA, Global Wind Energy Council și Navigant Consulting*, liderul mondial fiind China cu o putere instalată de 164,1 GW.

Conform *BP Statistical Review of World Energy June 2018* România se afla la sfârșitul anului 2017 pe locul 12 în Europa într-un clasament în ceea ce privește puterea instalată cumulată în turbinele eoliene, cu o valoare de 3038 MW.

Datorită progresului semnificativ în ceea ce privește creșterea ponderii de energie eoliană în sectorul energiei electrice la nivel mondial rezultă o altă provocare, și anume integrarea turbinelor eoliene în sistemul electroenergetic și impactul lor asupra acestuia.

## 2. GENERATOARE SINCRONE CU MAGNEȚI PERMANENȚI ȘI TURAȚIE SCĂZUTĂ

Una dintre cele mai importante invenții ingineresti care stă la baza progresului umanității este mașina electrică, un ansamblu de circuite electrice și magnetice în cadrul căruia se produce conversia electromecanică a energiei, și anume energia mecanică în energie electrică sau invers.

Mașinile electrice rotative care primesc energie mecanică și o convertesc în energie electrică se numesc generatoare electrice, iar cele care primesc energie electrică la borne și cedează energie mecanică la ax se numesc motoare electrice. Mașinile electrice rotative sunt reversibile din punct de vedere energetic, adică în concordanță cu principiul reversibilității a lui Lenz (1834) conversia energiei poate fi realizată în ambele sensuri prin intermediul aceluiași sistem electromecanic (mașina electrică), iar astfel nu apar diferențe esențiale între generatoare și motoare, de aceea teoria lor este comună [B3]. Pe lângă aceste două regimuri de funcționare, la unele mașini electrice se distinge și un al treilea mod de funcționare și anume regimul de frână caracterizat prin faptul că mașina primește atât energie electrică, cât și energie mecanică producând un cuplu electromagnetic opus mișcării care frânează rotorul, iar energia primită este disipată sub formă de caldură prin efect Joule. Este de precizat și faptul că în oricare dintre regimurile de funcționare s-ar afla, mașina electrică realizează conversia energiei însoțită de pierderi, printre care pierderi de tip Joule în materialele conductoare (în principal în înfășurări), pierderi prin curenți turbionari și histerezis în materiale feromagnetice (miezurile), pierderi mecanice de frecare și ventilație în părțile mobile (lagăre, perii-inele, perii-colector, sistemul de ventilație). Aceste pierderi reprezintă o componentă foarte importantă de luat în calcul deoarece acestea influențează una dintre cele mai importante caracteristici ale mașinilor electrice și anume randamentul de funcționare al mașinii, care de obicei se încadrează între 0,6%...0.95%. Reprezentarea matematică a randamentului pentru generatoare este exprimat în relația (2.1), iar pentru motoare în relația (2.2) [M1]:

$$\eta_G = \frac{P_{util}}{P_{util} + \sum Pierderi} \quad (2.1)$$

$$\eta_M = \frac{P_{absorbit} - \sum Pierderi}{P_{absorbit}} \quad (2.2)$$

Fenomenul principal care stă la baza funcționării mașinilor electrice este inducția electromagnetică, descoperit independent și aproape concomitent de către cercetătorii Michael Faraday și Joseph Henry (1831), care se referă la generarea de tensiune electromotoare într-un circuit electric înlăntuit de un flux magnetic variabil în timp [W12][W13]. Oamenii de știință au reușit să descrie matematic acest fenomen prin legea inducției electromagnetice (2.3), care împreună cu alte legi ale fizicii, precum legea circuitului magnetic, legile lui Ohm și cele ale lui Joule reprezintă relații

fundamentale care descriu funcționarea mașinilor electrice [U1].

$$u_{er} = \oint_{\Gamma} \vec{E} \cdot d\vec{l} = - \int_{S_r} \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \cdot d\vec{s} + \oint_{\Gamma} (\vec{v} \times \vec{B}) \cdot d\vec{l} = u'_{er} + u''_{er} \quad (2.3)$$

unde:  $\vec{E}$  – intensitatea câmpului electric indus;

$\vec{B}$  – inducția câmpului magnetic local asociată elementului vector de arie  $d\vec{s}$  al suprafeței  $S$  mărginită de conturul închis  $\Gamma$ ;

$\vec{v}$  – vectorul vitezei locale de deplasare a elementului de arc  $d\vec{l}$  orientat în sensul pozitiv de parcurgere;

Așadar se observă din relația (2.3) că tensiunea electromotoare indusă are în general două componente, prima  $u'_{er}$  este cea care reprezintă tensiunea electromotoare de pulsație ce apare la transformatorul electric de exemplu atunci când circuitele sunt fixe și variază doar inducția în miez, iar cea de-a doua  $u''_{er}$  este tensiunea electromotoare de rotație ce apare atunci când conductoarele care alcătuiesc circuitul electric se deplasează relativ față de câmpul magnetic, de exemplu la mașinile electrice rotative [U1].

În funcție de curentul electric produs sau utilizat, mașinile electrice pot fi de curent alternativ sau de curent continuu. La rândul lor mașinile electrice rotative de curent alternativ se împart în două tipuri: mașini sincrone și mașini asincrone. Teoria generală a acestor mașini prezintă anumite elemente comune, precum: construcția înfășurărilor, producerea câmpului magnetic, producerea cuplului electromagnetic, inducerea tensiunilor electromotoare. Mașinile electrice sincrone sunt caracterizate prin faptul că au viteza de rotație egală cu viteza câmpului magnetic învârtitor indiferent de regimul de funcționare și de gradul de încărcare al mașinii, pe când la mașinile electrice asincrone rotorul are turația diferită față de viteza câmpului magnetic învârtitor și dependentă de cuplul rezistent.

Din punct de vedere al fenomenelor electromagnetice care se produc în procesul de conversie a energiei, mașina electrică rotativă are două părți principale: *inductorul* (sistemul care produce câmpul magnetic) și *indusul* (sistemul în care este generată tensiunea electromotoare indusă, sistem construit din bobine cu miez de fier). Dintre aceste două părți una este fixă și poartă denumirea de *stator*, iar cealaltă parte este mobilă și poartă denumirea de *rotor*, deoarece se rotește în timpul funcționării în jurul axului său geometric. Spațiul dintre cele două organe cinematice este ocupat de aer și este numit *întrefier*. La mașina asincronă solenația înfășurării statorice produce câmpul magnetic principal, astfel că armătura și înfășurarea statorică formează inductorul mașinii. La mașina sincronă statorul este indusul, deoarece la funcționarea în sarcină solenația înfășurării statorice produce câmpul magnetic de reacție [B3].

Din punct de vedere constructiv, ca și orice mașină electrică, mașinile generatoare conțin următoarele sisteme: sistemul electric, sistemul magnetic, sistemul mecanic, sistemul de răcire (ventilație) și în unele cazuri sistemul de măsură, reglare și protecție [B3].

*Sistemul electric* este alcătuit din una sau mai multe înfășurări distribuite în creștături la periferia dinspre întrefier a celor două armături sau ca bobine concentrate. Înfășurările sunt izolate electric față de sistemul magnetic și de celelalte părți ale mașinii.

*Sistemul magnetic* constituie miezul feromagnetic separat în două de către întrefier. Miezul feromagnetic este realizat din oțel electrotehnic sub formă de tole sau masiv.

*Sistemul mecanic* este cel care reunește toate elementele componente ale mașinii și trebuie să asigure rigiditatea ei. La mașinile rotative, sistemul mecanic este alcătuit dintr-un arbore, pe care este dispus rotorul, din lagăre, scuturi, carcasă de susținere, etc.

*Sistemul de răcire* conține ventilatoare dispuse în interiorul sau exteriorul mașinii, sistemul de canale radiale și axiale și din agentul de răcire care poate fi aer, ulei, apă, hidrogen sau alte substanțe lichide sau gazoase, care au în anumite cazuri și rol de izolator electric.

## 2.1 Mașina sincronă – aspecte generale

Mașina sincronă este tipul de mașină electrică rotativă de curent alternativ caracterizată de faptul că viteza câmpului magnetic învârtitor este întotdeauna egală cu viteza mecanică a rotorului mașinii, indiferent de regimul de funcționare și de gradul de încărcare a mașinii.

### 2.1.1. Elementele constructive ale mașinilor sincrone

Câmpul magnetic inductor al mașinii sincrone este produs fie de către un sistem de magneți permanenți, fie de către un sistem cu poli magnetizați în curent continuu cu o înfășurare, numită *înfășurare de excitație*, care se plasează în general pe **rotor** și care efectuează în același timp cu acesta mișcarea de rotație. Armătura indusului este de regulă **statorul** care este format din miezul magnetic statoric echipat cu înfășurarea trifazată de curent alternativ. Motivele pentru care construcția este realizată astfel sunt:

- curentul continuu care alimentează înfășurarea inductorului este mult mai mic față de curentul care circulă prin înfășurarea indusului;
- deoarece mașinile sincrone de puteri mari, în special generatoarele sincrone, sunt construite de regulă pentru tensiuni mari de până la 30 kV, izolația unui bobinaj situat pe o armătură statică oferă mai multă siguranță în funcționare decât izolația unui bobinaj situat pe o armătură rotativă.

La mașini de puteri mici (sub 50 kVA) sau la mașini cu destinație specială se mai utilizează și construcția „inversă”, adică indusul reprezintă rotorul și inductorul reprezintă statorul, purtând numele de *mașini sincrone în construcție inversă* (fig.2.2 - b).

**Statorul** mașinii sincrone este construit dintr-o parte activă și o parte inactivă. Miezul statoric și înfășurarea statorică plasată în creștături reprezintă partea activă a statorului, iar carcasa, scuturile cu lagăre, sistemul de ventilație, etc., reprezintă partea inactivă a statorului. *Miezul statoric* este realizat de regulă din tole de oțel electrotehnic de 0,5 mm grosime care sunt izolate prin lăcuire sau oxidare sub forma unei coroane cilindrice și este prevăzut la periferia interioară cu creștături longitudinale în care este așezată înfășurarea statorică (de regulă trifazată). *Înfășurările statorice* sunt realizate



de obicei din conductoare de cupru în care se induce tensiunea electromotoare care este produsă de fluxul inductor creat de înfășurarea rotorică alimentată în c.c. și aflată în mișcare de rotație. *Carcasa* este realizată uneori din fontă turnată, în unele cazuri prevăzută cu nervuri în scopul de a mări suprafața de răcire, iar la mașinile de puteri mari ea se execută din oțel, turnată sau din tablă roluită, sudată și întărită cu profiluri de oțel.

**Rotorul** reprezintă partea mobilă a mașinii și este alcătuit din miezul de fier rotoric, înfășurările rotorice (de curent continuu), inelele colectoare și periile. Inelele și periile sunt folosite în scopul de a alimenta înfășurările rotorice de excitație cu un curent continuu numit curent de excitație. Alimentarea înfășurării de excitație în curent continuu poate fi realizată de la un generator de curent continuu, denumit excitatoare, care este plasat pe același ax cu mașina sincronă. Înfășurarea rotorică a generatorului induce, prin mișcare de rotație, tensiunea electromotoare în înfășurările statorice. Cu cât mașina este mai puternic excitată, cu atât este mai mare acțiunea de atracție dintre polii care compun cele două coroane, iar astfel este mai sigură funcționarea sincronă.

În funcție de forma rotorului există următoarele tipuri de mașini sincrone:

- mașini cu poli înecați, utilizate în special la turații mari (3000 – 10000 rot/min);
- mașini cu poli aparenti, folosite la turații mici (de obicei sub 1500 rot/min).

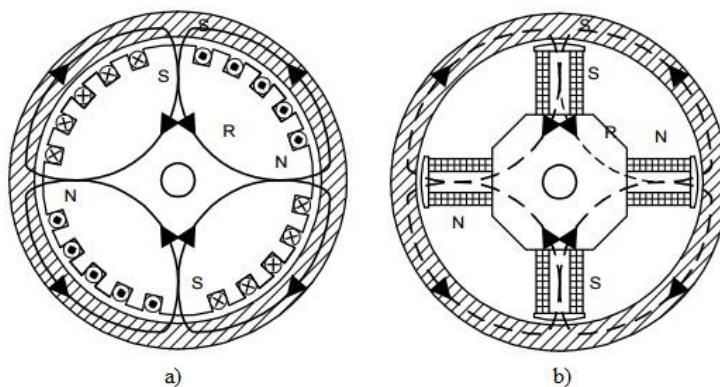


Fig. 2.1. Variante constructive ale rotorului mașinii sincrone:  
a) cu poli înecați; b) cu poli aparenti.

*Rotorul cu poli înecați* este utilizat pentru mașini cu doi poli și cu patru poli. Este construit dintr-un bloc cilindric de oțel masiv sau tole, prevăzut la exterior cu creștături longitudinale în care este așezată înfășurarea rotorică de excitație. Creștăturile nu sunt repartizate uniform pe circumferință, fiind prevăzute câte un dinte mai lat în axa fiecărui pol. Capetele înfășurării rotorice se conectează la două inele colectoare pe care alunecă periile. Această variantă constructivă este utilizată la viteze de rotație relativ mari, de 1500÷3000 rot/min, deoarece oferă rezistență mecanică mai ridicată și siguranță mai mare în funcționare.

*Rotorul cu poli aparenti* este utilizat de obicei la mașini cu patru sau mai mulți poli, aceștia fiind realizați din oțel masiv sau tole. Pe poli sunt așezate bobinele rotorice, numite bobine de excitație, alimentate în curent continuu astfel încât să formeze poli care să alterneze succesiv: N, S, N, S, etc. Acest tip de rotor se folosește doar la mașini

sincrone cu turație de cel mult 1000 rot/min (3 perechi de poli N-S) deoarece este dificil să se asigure o rezistență mecanică corespunzătoare la turații mai ridicate pentru această variantă constructivă.

În figura 2.2 sunt prezentate modalitățile de plasare a înfășurărilor indusului și inductorului în sistemul magnetic al mașinii sincrone, și anume: a) înfășurarea indusului în stator și înfășurarea inductorului în rotor; b) construcția inversă.

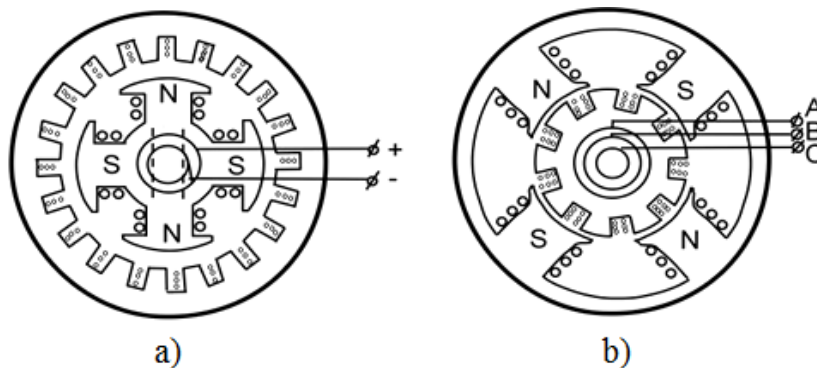


Fig. 2.2. Mașina sincronă cu poli aparenti:  
a) poli aparenti plasați în rotor; b) poli aparenti plasați pe stator.

### 2.1.2. Principiul și regimurile de funcționare ale mașinilor sincrone

Mașina sincronă este o mașină electrică reversibilă, astfel că ea poate funcționa atât în regim de motor cât și în regim de generator. Dintre acestea, cea mai largă răspândire o are mașina sincronă utilizată în regim de generator sincron trifazat, care este folosit în prezent în toate centralele electrice de mare putere din lume.

**Regimul de generator electric** reprezintă regimul de bază în funcționarea mașinilor sincrone care în momentul de față se regăsește în producerea energiei electrice în majoritatea centralelor electrice. Generatoarele sincrone ating cele mai mari puteri nominale unitare, precum 700 MW ca hidrogenatoare și 1200 MW ca turbogeneratoare, acestea fiind cele mai mari mașini electrice (ca putere unitară). Tendința economică actuală urmărește creșterea neîncetată a puterii nominale a generatoarelor sincrone în scopul creșterii puterii nominale pe unitate la un nivel cât mai înalt pentru a obține randamente cât mai mari.

*Turbogeneratorul* este tipul de generator sincron al cărui motor de antrenare este o turbină cu aburi sau cu gaze, de turație mare. Turbogeneratoarele se realizează de obicei ca mașini bipolare, cu poli înecați, cu axul orizontal. *Hidrogeneratorul* este tipul de generator sincron al cărui motor de antrenare primar este o turbină hidraulică. Hidrogeneratoarele se construiesc numai cu poli aparenti și de obicei cu axul vertical. Generatoarele sincrone antrenate de motoare termice (motoare Diesel sau turbine cu gaze de turație joasă) se realizează cu poli aparenti și cu axul orizontal. O altă aplicabilitate de bază a mașinii sincrone este întâlnită în **conversia energiei eoliene** în care mașina sincronă este folosită ca generator sincron pentru turbinele eoliene.

Această întrebuintare apare din ce în ce mai des, conversia energiei vânturilor reprezentând una dintre marile provocări actuale pe plan mondial pentru obținerea energiei electrice.

**Regimul de motor sincron** este folosit pentru acționarea unor utilaje de mare putere la care nu este necesară reglarea turației (compresoare, mori cu bile, pompe de irigații, etc.), înlocuind din ce în ce mai mult motoarele asincrone (în special la puteri mari) datorită avantajelor economice și tehnice pe care le prezintă: randament mai ridicat, factor de putere reglabil mergând până la unitate, întrefier mai mare. Acest lucru a fost posibil datorită evoluției tehnicii prin care s-au putut rezolva două deficiențe grave ale motorului sincron: absența cuplului de pornire și posibilitatea de pendulare cu pericolul ieșirii din sincronism (pierderea stabilității). În regimul de motor, mașina primește putere electrică de la o rețea de curent alternativ și o transformă în putere mecanică pe care urmează să o cedeze pe la arbore unei instalații mecanice. Ca și construcție, motoarele sincrone, la puteri medii și mari, se construiesc de obicei cu poli aparenti.

Pe lângă cele două regimuri de bază, mașina sincronă mai poate funcționa într-un alt regim particular și anume cel de **compensator al factorului** de putere în sistemele electroenergetice, caz în care mașina poartă numele de **compensator sincron**. În acest regim mașina rotește în gol cu excitație variabilă, contribuind la îmbunătățirea factorului de putere al rețelelor electroenergetice, compensând energia reactivă consumată în special de către motoarele asincrone alimentate de la rețea. Compensatoarele sincrone se realizează de obicei ca mașini cu poli înecați sau aparenti, la turații de 1000 rot/min sau 1500 rot/min.

### 2.1.3 Generatorul sincron

Deoarece regimul de bază al mașinii sincrone este cel de generator, în continuare se va face o analiză mai amplă referitoare la acest regim de funcționare.

Generatoarele sincrone sunt cele mai importante componente dintr-un sistem electroenergetic deoarece sunt sursele de energie electrică ale acestuia. Ca principiu funcțional de bază, în regimul de generator, mașina primește la arbore putere mecanică de la o sursă externă și o transformă în putere electrică pe care o debitează în rețeaua de curent alternativ. Acest lucru se realizează prin interacțiunea dintre cele două câmpuri învârtitoare care se produc în interiorul mașinii.

Dacă rotorul (inductorul) mașinii este antrenat cu viteza unghiulară  $\Omega$  de către turbină (care dezvoltă un cuplu activ  $M_a$ ), iar înfășurarea de excitație este alimentată în c.c. se produce un câmp magnetic învârtitor inductor. Câmpul magnetic învârtitor produce un flux magnetic  $\varphi$  variabil în timp care înlănțuie spirele fiecărui circuit de fază a înfășurării statorului și induce o tensiune electromotoare în fiecare fază. Cele trei înfășurări de fază sunt decalate în spațiu una față de cealaltă cu un unghi de  $120^\circ$  ( $2\pi/3$  rad), iar acest decalaj determină apariția unui sistem trifazat de tensiuni.

Tensiunile electromotoare induse în cele trei înfășurări statorice de fază sunt:

$$e_{01} = E_0 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \omega t \quad (2.4)$$

$$e_{02} = E_0 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.5)$$

$$e_{03} = E_0 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (2.6)$$

Dacă la bornele statorului este conectată o impedanță trifazată simetrică, atunci înfășurările vor fi parcurse de un sistem trifazat de curenți, curentul din faza de referință fiind de forma:

$$i_1 = I \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.7)$$

în care unghiul  $\varphi$  reprezintă unghiul de decalaj dintre t.e.m.  $e_{01}$  și curentul  $i_1$  care depinde de tipul sarcinii și de parametrii înfășurării.

Acest sistem trifazat de curenți dă naștere unui câmp magnetic învârtitor, numit câmp magnetic de reacție care se rotește tot cu viteza sincronă ca și câmpul învârtitor inductor de excitație. Cele două câmpuri magnetice se compun și se obține câmpul magnetic învârtitor rezultat din mașină. Generatorul sincron debitează pe impedanța de sarcină o putere electrică  $P_2$  care este mai mică decât puterea mecanică  $P_1$  primită la ax de la motorul primar, din cauza pierderilor. Raportul dintre cele două puteri reprezintă randamentul generatorului:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi}{3 \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi + P_{fv} + P_{ex} + P_{cu1} + P_{Fe2}} \quad (2.8)$$

unde:  $U$  și  $I$  – tensiunea, respectiv curentul de fază;  
 $P_{fv}$  – pierderile mecanice de frecare și ventilație ale mașinii;  
 $P_{ex}$  – puterea mecanică preluată de excitatoare;  
 $P_{cu1}$  – pierderile în înfășurările statorului prin efect Joule;  
 $P_{Fe2}$  – pierderile în histerezis și pierderile prin curenți turbionari în miezul feromagnetic al statorului.

Valoarea randamentului generatorului crește odată cu creșterea puterii sale unitare, ajungând la valori maxime de 98÷98.5 % pentru puteri de ordinul sutelor de MVA.

Sincronismul dintre cele două câmpuri stabilește legătura între turația turbinei,  $n$  și frecvența curenților induși,  $f$ :

$$f = \frac{\omega [rad/s]}{2\pi} = \frac{\Omega [rad/s]}{2\pi} = \frac{\frac{2\pi \cdot n [rot/min]}{60}}{2\pi} = \frac{p \cdot n [rot/min]}{60} [Hz] \quad (2.9)$$

unde  $p$  este numărul de perechi de poli ai mașinii,  $\Omega$  reprezintă viteza unghiulară iar  $n$  turația rotorului, acestea fiind exprimate în unități de măsură din S.I.

Câmpul magnetic de excitație generat de curentul continuu din înfășurarea de excitație este un câmp care are o repartiție sinusoidală în spațiu, constant față de rotor. Acest câmp se rotește cu turația sincronă odată cu rotorul, iar față de stator este perceput ca un câmp cu variație sinusoidală în timp. În același timp în stator, la funcționarea în sarcină, apar curenții de sarcină din indus care au frecvența  $f_1$  și care produc un câmp magnetic învârtitor propriu, numit câmp de reacție, care are turația  $n_1 = f_1/p$  egală cu turația sincronă a rotorului (sau cu turația câmpului magnetic de excitație). Aceste două câmpuri rotesc sincron față de stator, deci sunt în repaus

relativ. Ansamblul modificărilor din câmpul magnetic rezultat al mașinii sincrone, datorat suprapunerii câmpului magnetic de reacție peste câmpul magnetic principal de excitație, creează fenomenul care poartă numele de **reacția indusului**. La transformatoare și la mașinile asincrone acest fenomen nu se tratează ca și caz aparte. În general reacția indusului la aceste tipuri de mașini este dată de curentul din secundar,  $I_2$ , care datorită faptului că față de curentul din inductor  $I_1$ , curentul  $I_2$  din indus este practic în opoziție  $I_2 \approx -k * I_1$ , face ca reacția să fie demagnetizantă. Din acest motiv la aceste mașini câmpul rezultat care determină tensiunea electromotoare și cuplul electromagnetic la funcționarea mașinii în sarcină este constant și mic, practic independent de sarcină.

La mașina sincronă, reacția indusului se consideră prin introducerea reactanțelor de reacție, respectiv a reactanțelor sincrone. La mașina sincronă cu poli aparenti se aplică metoda celor două axe (metoda dublei reacții Blondel-Park), prin care reacția indusului se descompune în două componente: una transversală, care este produsă de componenta activă  $i_q$  a curentului de sarcină, și una longitudinală, produsă de componenta reactivă  $i_d$ , deoarece reluctanțele magnetice care se opun închiderii fluxului de reacție sunt diferite după cele două axe și anume, mai mare după axa transversală decât după axa longitudinală, porțiunea cu aer a circuitului magnetic corespunzător fiind mai mare.

La sarcini „pur inductive” reacția indusului este longitudinală (câmpul se închide după axa  $d$ ) și demagnetizantă. La sarcini „pur capacitive”, reacția indusului este tot longitudinală, dar magnetizantă, deoarece câmpul de reacție este în sensul câmpului de excitație și îl întărește. La sarcini „pur rezistive”, reacția indusului este de tip transversal (câmpul de reacție este maxim și se închide după axa  $q$ ), decalând câmpul rezultat cu unghiul  $\gamma$  față de axa câmpului de excitație.

Cazul cel mai des întâlnit în practică este cel rezistiv - inductiv, caz în care componenta longitudinală demagnetizează mașina, iar componenta transversală decalează câmpul rezultat cu unghiul  $\gamma$  față de câmpul de excitație, deci reacția indusului este demagnetizantă pentru o jumătate de pol și magnetizantă pentru cealaltă jumătate.

## 2.2 Generatoare sincrone cu magneți permanenți

Fiecare componentă a unui dispozitiv electromagnetic are o importanță aparte în funcționarea acestuia, iar dintre aceste componente un rol foarte important îl îndeplinesc circuitele magnetice, adică ansamblul de medii magnetice cu întrefier care atunci când sunt stimulate dau naștere câmpului magnetic [U1]. În funcție de câmpul magnetic creat există principalele tipuri de circuite magnetice [U1]:

- cu magneți permanenți (fig. 2.3, a);
- cu înfășurări (bobine) de excitație (fig. 2.3, b și c);

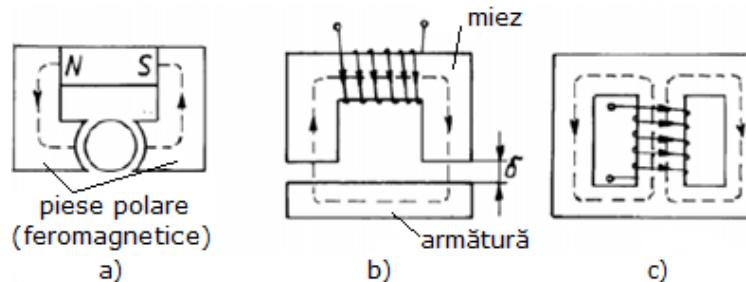


Fig. 2.3. Tipuri de circuite magnetice [U1]

Un corp căruia îi corespunde un câmp magnetic este descris de o stare, diferită de cea electrocinetică sau cea de electrizare, numită **stare de magnetizare**. Aceasta este caracterizată de către mărimea vectorială  $\vec{m}$ , numită **moment magnetic**, și sub formă locală în fiecare punct de către o mărime fizică derivată  $\vec{M}$ , numită magnetizație, dată de relația (2.10), în care  $\Delta\vec{m}$  corespunde sumei geometrice a momentelor magnetice corespunzătoare volumului elementar  $\Delta v$  [U1]:

$$\vec{M} = \lim_{\Delta v} \frac{\Delta\vec{m}}{\Delta v} \quad [A/m] \quad (2.10)$$

Starea de magnetizare poate fi de două tipuri: **magnetizare temporară**, cazul în care starea de magnetizare a corpurilor este condiționată de către prezența unui câmp magnetic exterior și **magnetizare permanentă** caracterizată de faptul că starea de magnetizare a corpurilor nu depinde de prezența unui câmp magnetic exterior, cazul magneților permanenți fiind cel mai elocvent [U1].

Un magnet permanent este o bucată de material feromagnetic (de exemplu Fe, Co, Ni, Nd, etc.) cu proprietatea de a atrage alte materiale de acest tip printr-o forță exercitată de către propriul său câmp magnetic cu efect tridimensional creat de către liniile fluxului magnetic care sunt orientate la exterior în jurul magnetului de la polul nord la polul sud al acestuia, iar în interiorul magnetului direcția liniilor fluxului se inversează fiind orientate pe direcția sud-nord [B1][ M2].

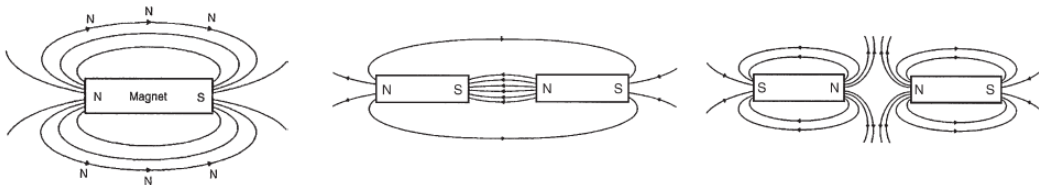


Fig. 2.4. Liniile fluxului magnetic [B1]

Deși sistemul de funcționare al mașinilor electrice cu magneți permanenți a fost descoperit și pus în practică de către Faraday încă din 1831, calitatea scăzută a materialelor magnetice dure a defavorizat utilizarea acestui sistem. Însă apariția materialelor alnico (Al, Ni, Co, Fe) în 1931, a feritelor precum ferita de bariu în anii 1950 și ferita de stronțiu, dar mai ales a materialelor de pământuri rare precum neodim-fier-bor (NdFeB) (anunțat în 1983, dezvoltat independent de către marile

companii General Motors și Sumitomo Special Metals) și samariu-cobalt (SmCo) a readus în atenție utilizarea sistemului de excitație cu magneți permanenți [G1][I2].

Magneții de SmCo prezintă avantaje ca densitate mare a fluxului remanent, forță coercitivă mare, dezvoltă energie mare, au curba de demagnetizare liniară și coeficient de temperatură scăzut. Acestea sunt avantaje care oferă posibilitatea construirii unor mașini electrice cu volum mic, densitate de putere mare, însă cu costuri ridicate din cauza prețului mare atât al samariului, cât și al cobaltului [G1].

La generatorul sincron studiat în această lucrare au fost utilizați 32 de magneți permanenți de tip NdFeB, plasați în circuitul rotoric.

Magneții de NdFeB oferă o serie de avantaje tehnice și performanțe ridicate în comparație cu alte materiale magnetice și de asemenea au un foarte bun raport calitate/preț, motiv pentru care au un impact și un potențial foarte ridicat pentru utilizarea în multe aplicații [G3]. Conform unui studiu realizat [W14], se poate observa în figura 2.5 produsul energetic maxim al magneților de NdFeB în comparație cu alte materiale magnetice. Acest produs se referă la energia magnetică maximă care poate fi stocată pe unitatea de volum de către un material magnetic și este rezultatul produsului maxim al densității fluxului magnetic rezidual al unui material (gradul de magnetizare) și coercivitatea acestuia (abilitatea de a rezista la demagnetizare după ce materialul a fost magnetizat). Comparația rezistenței magnetice și a rezistenței la demagnetizare a magneților de NdFeB cu alte materiale magnetice din categoria lor este realizată în figura 2.6. Calculul performanțelor magneților permanenți și al circuitelor magnetice cu magneți permanenți este explicat pe larg în [G1], unde de asemenea pot fi consultate și exemple numerice.

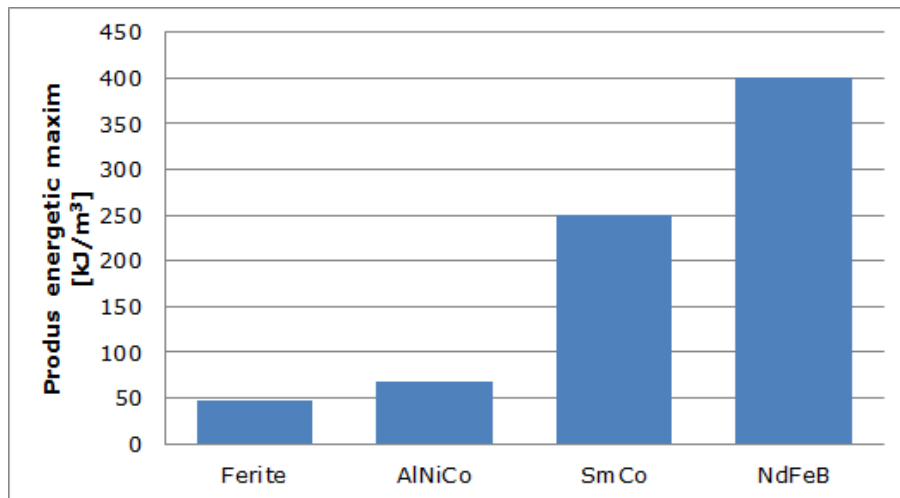


Fig. 2.5. Comparație între energia maximă produsă de către diferite tipuri de materiale magnetice

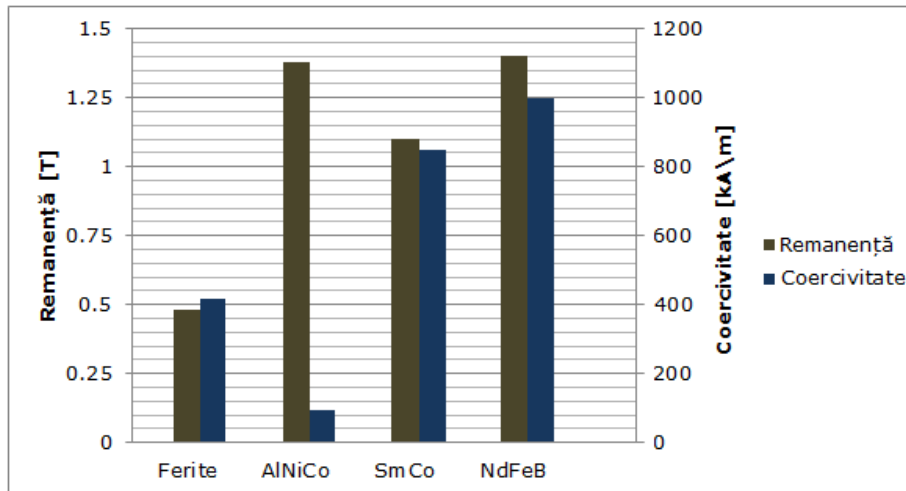


Fig. 2.6. Comparație între densitatea fluxului rezidual și coercivitatea diferitelor materiale magnetice

Printre alte avantaje care au dus la utilizarea acestor magneți pe scară largă se poate afirma faptul că aceștia au capacitatea de a dezvolta un câmp magnetic foarte puternic pe o suprafață foarte restransă. Un alt mare avantaj îl reprezintă faptul că oferă performanțe chiar și în aplicații cu temperaturi înalte de peste 100°C și asta datorită materialului chimic numit disprosiu care este combinat cu NdFeB, oferindu-le acestor magneți privilegiul de a fi folosiți în aplicații ale motoarelor și generatoarelor de puteri mari precum aplicații eoliene, aplicații hidro sau din ce în ce mai des aplicații ale vehiculelor cu tracțiune electrică [W14].

Dezvoltarea materialelor de înaltă calitate utilizate pentru fabricarea magneților permanenți la scară comercială și avantajele acestora au oferit un imbold mai multor producători să realizeze și să lanseze pe piață diferite tipuri de mașini sincrone care utilizează magneți permanenți în circuitul lor electric [P3].

Prin folosirea lor la construcția mașinilor electrice, magneții permanenți oferă avantaje față de mașinile electrice uzuale, printre care [G1]:

- eliminarea înfășurării de excitație a câmpului magnetic, fiind astfel eliminate pierderi de energie suplimentare, crescând automat și randamentul;
- cuplu și putere mai mare în raport cu volumul mașinii decât în cazul folosirii excitației externe;
- creșterea densității fluxului magnetic în întrefier îmbunătățind astfel eficiența;
- reducerea costurilor de fabricație și de întreținere.

Funcționarea generatoarelor sincrone cu magneți permanenți pornește de la un principiu de bază și anume acela că atunci când un conductor străbătut de curent este introdus într-un câmp magnetic se formează un cuplu electromagnetic pe respectivul conductor. Într-un astfel de angrenaj, magnetul permanent are un rol foarte important. Diferența de aer dintre magnet și miezul de fier, adică întrefierul, este foarte mică (de exemplu: 1,4 mm pentru generatorul studiat în această lucrare), densitatea fluxului



magnetic fiind uniformă și orientată într-o direcție radială astfel încât liniile de flux să formeze în permanență un unghi drept față de conductorul care transportă curentul. Prin urmare, atunci când curentul trece prin bobină se formează cuplul care este produs datorită interacțiunii dintre cele două fluxuri, cel al magnetului permanent și cel al bobinei.

Ca urmare a dezvoltării tehnologice rapide și a performanțelor oferite de către magneții permanenți aceștia au ajuns să fie utilizați pe scară largă de la echipamente de uz casnic până la echipamente de uz industrial (ex.: sisteme de automatizare, mecatronică), fie ca motoare electrice în aplicații de tracțiune (ex.: autovehicule, lifturi, pompe, compresoare) și propulsie (ex.: vapoare), ori ca generatoare electrice. Aceștia se pretează foarte bine mai ales la mașinile sincrone cu viteză variabilă, încadrând astfel aici, printre altele, generatoarele turbinelor eoliene cu o plajă de funcționare kW-MW, generatoarele turbinelor cu funcționare pe bază de gaz, precum și utilizarea lor în sectorul vehiculelor electrice [B1][S1].

În ceea ce privește modalitatea prin care este generat câmpul magnetic de excitație al generatoarelor sincrone, acestea pot fi clasificate în [I2]:

- generatoare sincrone cu circuit de excitație prin curent electric;
- generatoare sincrone cu excitație generată de către magneți permanenți.

Magneții permanenți prin natura lor generează un câmp magnetic constant oferind astfel densitate mare de putere pe un spațiu restrâns și performanță dinamică ridicată, comparativ spre exemplu cu mașinile sincrone tradiționale care au nevoie suplimentară de înfășurarea de excitație alimentată în c.c. pentru crearea câmpului magnetic. Comparațiile între generatoare sincrone care folosesc cele două sisteme de excitație au fost propuse în mai multe articole. În studiul său, Bang [B4] a făcut un rezumat al comparațiilor celor două tipuri de generatoare sincrone utilizate pentru turbine eoliene, iar concluzia este că generatoarele sincrone cu circuit de excitație în c.c. prezintă avantaje în ceea ce privește dimensiunea, greutatea și costul de producție, pe când generatoarele sincrone cu magneți permanenți sunt superioare datorită randamentului crescut, a construcției și a fiabilității prin eliminarea circuitului de excitație, și a costurilor de întreținere [B4].

Generatoarele sincrone cu magneți permanenți reprezintă un subiect abordat în numeroase studii de cercetare, fiind abordate diferite structuri și geometrii pentru diverse aplicații [C1]. Acestea se împart în trei categorii din punct de vedere al structurii lor și al direcției fluxului magnetic dezvoltat [S3]:

- generatoare sincrone cu magneți permanenți cu flux radial;
- generatoare sincrone cu magneți permanenți cu flux axial;
- generatoare sincrone cu magneți permanenți cu flux transversal.

*Generatoarele sincrone cu magneți permanenți cu flux radial* dezvoltă fluxul magnetic pe direcție radială în raport cu axa arborelui rotor. Unul dintre avantajele mașinilor cu magneți permanenți și flux radial este acela că are structura asemănătoare cu cea a mașinii de inducție, pentru care procesul de fabricație a fost optimizat treptat datorită numărului foarte mare de astfel de mașini produse de-a lungul secolului al XX-lea, așadar procesul de fabricație era deja clar stabilit, asistând practic la o evoluție naturală a mașinii de inducție către mașina cu magneți permanenți și flux radial [W15].

Din punct de vedere economic, mașinile cu flux radial oferă o opțiune mai bună comparativ cu mașinile cu flux axial, oferind avantaje precum raport ridicat cuplu/masă, cantitate mai mică de magneți permanenți necesari, diametru exterior mic, menținerea unui întrefier mic [S3].

*Generatoarele sincrone cu magneți permanenți cu flux axial* se caracterizează prin faptul că exercită fluxul magnetic pe direcția axială a arborelui rotoric. Dezvoltarea lor a fost mai lentă deoarece implică unele dificultăți în ceea ce privește construcția, precum și poziționarea eficientă a statorului și a înfășurărilor ținând cont de forțele magnetice de atracție dezvoltate, răcirea mai puțin eficientă a înfășurărilor care sunt situate între discurile rotorului, realizarea dificilă a calculului fluxului magnetic și a altor parametri pentru care se impun numeroase simulări și calcule bazate pe metoda elementului finit. Însă dacă aceste provocări sunt depășite este obținută o mașină cu performanțe superioare mașinii cu magneți permanenți și flux radial, precum cuplu mai mare datorită distanței mai mari dintre interacțiunea câmpului magnetic și arborele mașinii, zgomot redus, lungime axială scurtă și astfel căile fluxului magnetic sunt mai scurte rezultând așadar mai puține pierderi magnetice [I2][W15][S3].

O atenție sporită a fost atrasă de către inedita mașină cu magneți permanenți și flux axial de 5 kVA prezentată în [G4] care dobândește capacitatea de control al câmpului magnetic. S-a constatat că în absența înfășurărilor de excitație și a perilor colectoare sunt reduse costurile de întreținere, iar randamentul și fiabilitatea mașinilor cu magneți permanenți cresc [B4]. Dar cu toate acestea, condiția de a impune un flux constant la aplicații cu viteză variabilă devine crucială având în vedere variația liniară a tensiunii induse cu frecvența, fenomen care face ca funcționarea lor la viteză mare să fie periculoasă, iar pentru a evita acest lucru a fost realizat un sistem de control al fluxului magnetic în întrefier pentru menținerea tensiunii la valoarea impusă.

Un concept nou a fost propus în [S4] unde este studiat cu ajutorul metodei elementului finit prototipul unei mașini electrice hibrid care combină cele două mașini cu magneți permanenți cu flux radial și flux axial oferind ca și avantaje creșterea puterii și a cuplului mașinii prin creșterea fluxului în întrefier utilizând practic un spațiu restrâns.

*Generatoarele sincrone cu magneți permanenți și flux transversal* se deosebesc prin faptul că orientarea fluxului magnetic este perpendiculară pe direcția de rotație a rotorului. În comparație cu tipurile de generatoare cu flux radial și cu flux axial, la cele cu flux transversal este posibilă extinderea spațiului pentru înfășurări fără să fie redus spațiul utilizat de către fluxul principal. O altă caracteristică importantă este pasul polar foarte mic, comparativ cu alte tipuri de generatoare [I2].

S-a tras concluzia [B4] pe baza diferitelor topologii de generatoare sincrone cu magneți permanenți cu flux transversal că acestea oferă avantaje față de generatoarele cu flux radial și cele cu flux axial, mai ales utilizate la turbinele cu transmisie directă datorită cuplului specific ridicat, desitate de forță mai mare, pas polar foarte mic, pierderi în înfășurări scăzute considerabil, bobinaj simplu și costuri reduse. Însă contrar acestor avantaje, construcția acestui tip de generatoare este mult mai complicată decât la generatoarele cu flux radial și la cele cu flux axial, deoarece generatoarele cu flux transversal au traiectoria fluxului tridimensională, iar odată cu creșterea întrefierului densitatea de forță scade și costurile cresc, aceste inconveniente făcând această mașină mai puțin atractivă. Dar cu toate acestea, prin flexibilitatea și designul lor, acest tip de generatoare lasă o poartă deschisă pentru cercetarea a noi concepte și topologii pentru

îmbunătățirea performanțelor și minimizarea sau înlăturarea acestor dezavantaje [S3][B4].

Un nou prototip de generator sincron cu magneți permanenți și flux transversal este propus în [D3] unde este prezentată modelarea și analizarea performanțelor unei astfel de mașini construită cu rotor dințat care oferă o îmbunătățire constructivă și optimizare rapidă.

Așadar generatoarele sincrone cu magneți permanenți și flux axial prezintă avantaje comparativ cu generatoarele sincrone cu magneți permanenți și flux radial prin caracteristici precum schemă de înfășurare simplă, cuplul de atracție scăzut dintre rotor și stator, zgomot redus, lungime axială mică, raport mare cuplu/volum. Dintre dezavantajele lor comparativ cu generatoarele sincrone cu magneți permanenți și flux radial se enumeră raportul cuplu/masă mai mic, diametru exterior mai mare, dificultate în construcție cauzată de către menținerea constantă a întrefierului [I2].

Avantajele și dezavantajele utilizării acestor tipuri de generatoare sincrone cu magneți permanenți pentru turbinele eoliene cu cuplaj direct de puteri mari pot fi ilustrate și în urma revizuirii mai multor tipuri de turbine de la diferiți producători, rezumate de către Ivanovski [I2]. Din această analiză sunt reflectate avantajele și dezavantajele generatoarelor sincrone cu flux radial, a celor cu flux axial și a celor cu flux transversal în funcție de modalitatea lor de utilizare și utilitatea lor în aplicații specifice [I2]:

- generatoarele sincrone cu flux radial sunt cele mai utilizate în aplicațiile turbinelor de puteri mari ce funcționează cu transmisie directă;
- generatoarele sincrone cu flux axial nu sunt utilizate în aplicații cu puteri mari de 1 MW;
- configurația generatoarelor cu flux transversal nu este utilizată pentru generatoare de puteri mari cu întrefier mare.

De asemenea tot în ceea ce privește distribuția fluxului magnetic, există și tipuri constructive speciale de generatoare sincrone cu magneți permanenți precum cele cu flux reversibil și cele cu comutarea fluxului.

În [S1] este prezentat studiul unei mașini cu flux reversibil trifazată (FRPM) (care are la bază ca și reper principal mașina cu reluctanță variabilă) la care câmpul de excitație este produs de către magneții permanenți de NdFeB din întrefier fixați pe stator, pe suprafața fiecărui pol câte doi magneți permanenți de polarități opuse, și fără alți magneți sau înfășurări în creștăturile rotorului, fiind utilizată în aplicații cu acționare directă și turație scăzută. Optimizarea mașinii a fost realizată printr-un algoritm genetic combinat cu metoda elementului finit, iar rezultatele obținute au condus la concluzia că mașina prezintă performanțe bune și oferă o alternativă în aplicațiile cu acționare directă și turație scăzută. Caracteristici precum inductanță mutuală mică, construcție simplă și inerție redusă a rotorului conferă posibilitatea mașinii cu flux reversibil să fie atractivă precum un generator de turație ridicată, dar la un preț scăzut [H2].

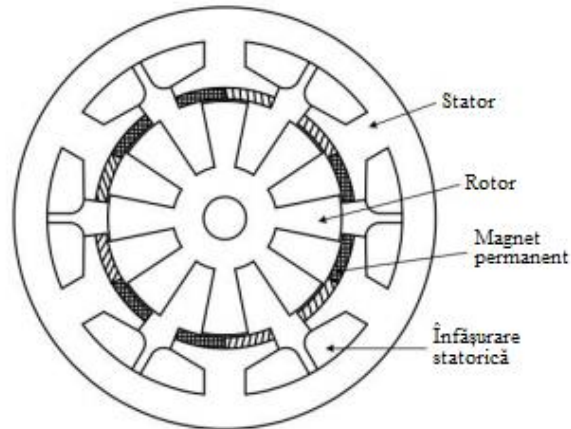


Fig. 2.7. Mașină cu flux reversibil și magneți permanenți cu 6/8 poli [H2]

Mașina cu comutarea fluxului (FSPM) a fost propusă inițial de către Hoang în 1997, iar ulterior studiată și optimizată. Din punct de vedere constructiv, în acest caz sunt plasați tangențial câte doi magneți permanenți de aceeași polaritate în interiorul polilor statorici, iar fiecare înfășurare este conturată în jurul unui set de două crestături statorice [H2][R4].

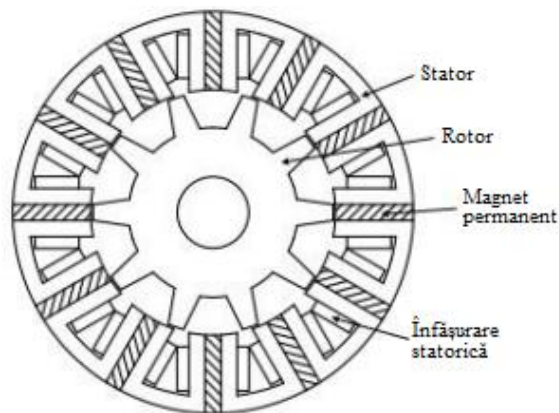


Fig. 2.8. Mașină cu comutarea fluxului și magneți permanenți cu 12/10 poli [H2]

Disponerea magneților permanenți se face în funcție de modalitatea constructivă a rotorului generatorului sincron, existând astfel două tipuri de configurații [B5]:

- cu poli aparenti;
- cu poli înecați.

La generatoarele sincrone cu poli înecați magnetii sunt fixați pe suprafața formată dintr-un bloc cilindric masiv a rotorului cu adezivi speciali și acoperiți cu rășină

foarte puternică pentru a rezista din punct de vedere mecanic. Statorul conține un miez laminat cu fante uniforme care găzduiesc o înfășurare trifazată cu bobine distribuite sau cu bobine concentrate [B5]. Se caracterizează prin diametrul mic și lungime axială mare, număr mic de perechi de poli (de regulă o singură pereche și uneori mai rar două) și este utilizat la mașini electrice cu turație mare (1500-3000 rpm), precum turbogeneratoarele [W16].

Rotorul cu poli aparenti se caracterizează prin diametru mare și lungime axială mică, conținând un număr mare de piese polare fixate de jug. Din cauza limitărilor mecanice generatoarele sincrone cu poli aparenti nu pot fi utilizate la viteze de rotație mari astfel că este necesar un număr mare de perechi de poli (între 2-30) pentru menținerea frecvenței impuse. Acestea sunt folosite la aplicații unde turația este relativ scăzută, de exemplu la hidrogeneratoare (viteză sub 1500 rot/min). În ceea ce privește distribuția fluxului magnetic aceasta este mai bună la generatoarele sincrone cu poli înecați, generând astfel o tensiune electromotosre sinusoidală mai uniformă decât cea livrată de către generatoarele sincrone cu poli aparenti. În plus față de generatoarele sincrone cu poli înecați, generatoarele sincrone cu poli aparenti necesită înfășurări de amortizare pentru împiedicarea oscilațiilor rotorului în timpul funcționării [W16].

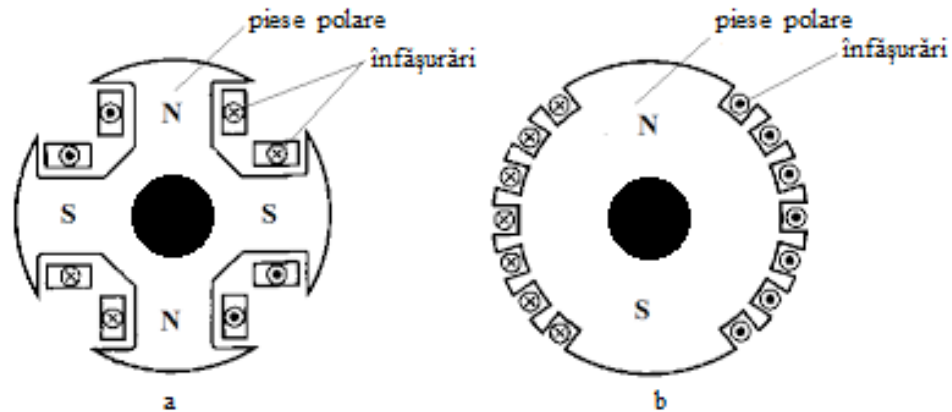


Fig. 2.9. Variante constructive de rotoare: a) cu poli aparenti; b) cu poli înecați

Așa cum s-a observat în clasificarea anterioară, de obicei mașinile cu magneți permanenți uzuale sunt construite cu magneții așezați pe rotor sau în rotor, dar în decursul anilor au fost efectuate studii și au fost propuse noi prototipuri de generatoare sincrone cu magneți permanenți montați în stator. Această soluție constructivă oferă două avantaje precum răcirea mult mai ușoară, acesta fiind lucru esențial în ceea ce privește performanțele magneților permanenți sensibili la creșterea temperaturii peste anumite praguri, și protecția magneților care în acest caz nu mai sunt supuși forțelor centrifuge [R4].

Un alt model constructiv important în care sunt utilizați magneți permanenți și care constituie un punct de plecare pentru numeroase studii și aplicații este mașina cu poli aparenti pe stator și rotor, cu excitație produsă de către magneții permanenți plasați tangențial în stator (DSPM), realizată de către Rauch și Johnson, în jurul anului 1955, care se mai numește și mașină cu reluctanță variabilă. În zilele noastre există un

mare interes pentru studiul acestei mașini, amintind aici aportul adus de către profesorul Thomas Lipo care a propus numeroase variante care au la bază această mașină [H2].

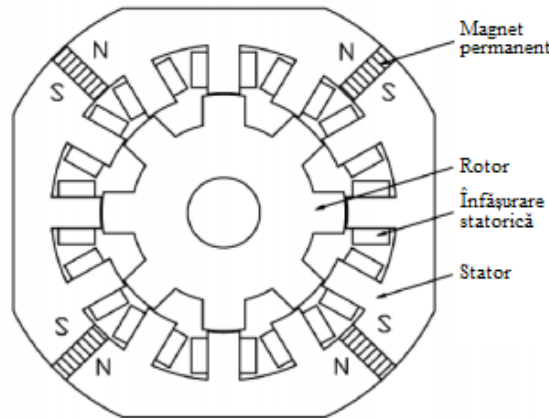


Fig. 2.10. Mașină cu poli aparenti pe stator și rotor, cu magneți permanenți cu 12/8 poli [R4]

### 2.3 Caracteristicile generatoarelor sincrone cu magneți permanenți

O caracteristică importantă a generatoarelor sincrone cu magneți permanenți este dată de posibilitatea de utilizare a lor în aplicații în care sursa primară de energie este caracterizată de viteză variabilă. Împreună cu utilizarea electronicii de putere, acestea reprezintă o soluție foarte bună pentru utilizarea în aplicații eoliene [B6].

Generatoarele sincrone cu magneți permanenți sunt caracterizate de faptul că pot funcționa în aplicații eoliene facilitând eliminarea multiplicatorului de viteze, astfel crescând eficiența turbinei. Acest lucru este susținut prin posibilitatea generatoarelor sincrone cu magneți permanenți de a funcționa la turații scăzute. Această caracteristică este dată de topologia constructivă care se distinge printr-un număr mare de poli magnetici necesar pentru obținerea frecvenței în plaje optime în condiții de turații joase și diametru mare al rotorului pentru obținerea unui cuplu mare al turbinei eoliene [S5].

Puterea mecanică a unui generator sincron cu magneți permanenți cu acționare directă reprezintă produsul dintre cuplul electromagnetic  $M$  și viteza unghiulară mecanică  $\omega_m$  [I2]:

$$P = M \cdot \omega_m \quad (2.11)$$

Cuplul electromagnetic este exprimat în relația 2.12, fiind definit în funcție de densitatea forței tangențiale  $F_d$ , diametrul întrefierului  $D_g$  dintre stator și rotor, și lungimea axială  $l_s$  [I2]:

$$M = \frac{\pi}{2} \cdot F_d \cdot D_g^2 \cdot l_s \quad (2.12)$$

Această relație motivează faptul că pentru creșterea cuplului este necesar ca generatoarele cu cuplaj direct să fie dimensionate astfel încât să conțină o forță tangențială mare și un diametru mare, dar în același timp să fie avut în vedere faptul că întrefierul trebuie limitat pentru a respecta cerințele necesare evitării unei magnetizări excesive. O caracteristică aparte este aceea că generatorul trebuie să posede o construcție mecanică foarte rigidă pentru a menține constant spațiul întrefierului în scopul de a contracara cuplul parazit creat de către magneții permanenți și caracterizat de puternice forțe de atracție dintre rotor și stator. Acesta este cunoscut și sub numele de "cogging torque" [I2].

Cuplul parazit reprezintă un parametru de proiectare foarte important specific la generatoarele sincrone cu magneți permanenți. Acest cuplu este generat de câmpul magnetic produs de către magneții permanenți și se manifestă prin tendința rotorului de a se alinia într-o poziție de echilibru în raport cu statorul indiferent dacă generatorul se află în stare de repaus sau lucrează la o anumită turație. Rezultă astfel un cuplu pulsatoriu a cărui valoare determinată în funcție de unghiul mecanic, adică poziția relativă dintre rotor și stator, nu contribuie la valoarea netă a cuplului util. Însă cu toate acestea reprezintă un obiectiv major al stadiului de proiectare, încercându-se reducerea sa deoarece poate provoca unde variaționale rapide și poate induce vibrații, mai ales la sarcini de încărcare mici și turații scăzute [G5][Z1][M3]

## **2.4 Moduri de utilizare și consecințe asupra soluțiilor constructive. Avantaje și dezavantaje ale generatoarelor sincrone cu magneți permanenți**

Utilizarea generatoarelor sincrone cu magneți permanenți în aplicațiile turbinelor eoliene reprezintă o soluție interesantă datorită avantajelor oferite, fiind o temă de cercetare foarte atractivă și de interes în literatura de specialitate.

În funcție de modalitatea de antrenare a generatorului electric al unei turbine eoliene acestea se împart în două categorii:

1. cu acționare directă;
2. cu acționare prin intermediul cutiei de viteze.

Multipliatorul de viteză este folosit în scopul amplificării vitezei de rotație a generatorului, însă utilizarea sa are și dezavantaje precum reducerea fiabilității turbinelor eoliene și creșterea nivelului de zgomot și a pierderilor mecanice. Astfel, turbinele eoliene cu acționare directă a generatorului prezintă superioritate în ceea ce privește eficiența energetică, fiabilitatea și simplitatea designului, iar generatoarele sincrone cu magneți permanenți sunt o soluție la îndemână în acest caz [W1].

Creșterea cererii de producție a energiei electrice a condus la creșterea gabariturii turbinelor comerciale utilizate pe scară largă în scopul creșterii puterii acestora, lucru care a dus simultan la creșterea cuplului rotorului și a raportului de multiplicare din cutia de viteze. Majoritatea producătorilor de turbine eoliene s-au confruntat cu defecțiuni ale cutiei de viteze, a angrenajelor aferente sau a rulmenților din interiorul multipliatorului. Aceste probleme provin de cele mai multe ori din [S2]:

- neînțelegerea încărcărilor ciclice și aleatorii impuse de către rotor, rezultând astfel avarii premature din cauza eforturilor inutile;
- alinierea inadecvată a arborelui superior rezultând dislocarea;
- mentenanța necorespunzătoare;
- controlul calității de asamblare necorespunzător care poate duce spre exemplu la joc axial excesiv și nealiniere a rulmentului;
- control necorespunzător al impactului de încărcare impus de către frânele de pe axul superior, conducând la ruperea unor componente vitale;
- lipsa gresajului și impactul sarcinilor de încărcare în condițiile în care rotorul este oprit.

În acest sens s-a constatat că eliminarea multiplicatorului de viteză și astfel folosirea sistemelor cu generatoarele cuplate direct este mai avantajoasă, conducând la îmbunătățirea performanțelor și fiabilității turbinelor eoliene în comparație cu cele convenționale. Aceste avantaje sunt reflectate și confirmate de cifrele care demonstrează ponderea crescută la nivel global de utilizare a turbinelor cu cuplaj direct al generatorului de la 24,9% în 2011 la 25,2% în 2016 și s-a prognozat că se va ajunge până la 32,2% în 2021 [R3][T2].

Așa cum am precizat și în capitolul anterior, o altă clasificare importantă a turbinelor eoliene este realizată de către viteza la care operează în funcție de energia primită de la sursa primară, și anume [I1]:

1. turbine eoliene cu viteză fixă, echipate cu generator de inducție cu rotor cu înfășurarea în colivie conectat direct la rețea;
2. turbine eoliene cu viteză variabilă cu generator de inducție cu alimentare dublă sau cu generator sincron cu magneți permanenți.

Turbinele eoliene cu funcționare la viteză variabilă oferă avantaje precum creșterea eficienței energetice, reducerea variațiilor cuplului, generarea energiei electrice de înaltă calitate. La acest tip de sisteme nu este posibilă conectarea directă la rețea sau la consumatori deoarece tensiunea și frecvența sa variază, astfel este necesară utilizarea echipamentelor de electronică de putere ca interfață între generator și consumator [R2].

Este bine cunoscut faptul că unul dintre dezavantajele energiei eoliene este chiar sursa primară, vântul, care este o sursă de energie intermitentă și incontrollabilă, provocând astfel fluctuații majore în procesul de conversie a energiei eoliene. Așadar energia electrică provenită de la surse de energie eoliană depinde într-o mare măsură de condițiile meteorologice și geografice. Creșterea ponderii de energie eoliană pe piața mondială a energiei electrice a ridicat alte provocări cu privire la integrarea turbinelor eoliene în rețelele electroenergetice și de aici o serie de analize în ceea ce privește impactul turbinelor eoliene asupra acestora [A2].

Tendința de ieftinire a costurilor metalelor de pământuri rare care sunt utilizate pentru confecționarea magneților permanenți (NdFeB) și îmbunătățirea performanțelor acestui tip de magneți au condus la utilizarea generatoarelor sincrone cu magneți permanenți în aplicații eoliene, acestea oferind o soluție pentru minimizarea inconvenientelor provocate de către inconstanța și variația vântului. Acestea sunt cu atât mai atractive și mai utile cu cât pot funcționa în lipsa multiplicatorului de viteză și în aplicații cu viteză variabilă a vântului și așa atrag după sine și avantajele oferite de către o astfel de



configurație a sistemului eolian. Mai mult decât atât, echiparea circuitului electric cu elemente de electronică de putere i-au atras acestui tip de generator renumele de convertor complet de putere. Acest renume provine de la abilitatea de a utiliza la maximum puterea mecanică obținută de la sursa primară, având în vedere variațiile și imposibilitatea de reglare ale acesteia, prin intermediul unui sistem de control indirect al puterii transmise ce permite operarea prin urmărirea punctului maxim de putere. Acest sistem a fost studiat pe larg și prezentat în literatura de specialitate [R2][C2][E1].

Electronica de putere a început să fie utilizată în jurul anilor 1990, pe când au început să fie utilizate și generatoarele cu viteză variabilă. Câțiva ani mai târziu, pe la începutul anilor 2000, Enercon și Siemens au introdus conceptul de convertor complet comandat dedicat sistemelor eoliene, care permite acestora ca toată energia extrasă din vânt să fie gestionată și transferată la rețea. Această configurație permite un control complet și optimizat al procesului de conversie a energiei eoliene cu maximum de eficiență pe întreaga plajă de viteze ale vântului. Sunt obținute astfel și o serie de avantaje precum reducerea la minim a vibrațiilor mecanice, costuri de întreținere reduse simțitor. Mai mult decât atât, convertorul complet comandat permite funcționarea turbinei eoliene la o viteză foarte scăzută, astfel tradiționala cutie de viteze devine opțională în cadrul ansamblului eolian [P2].

Rezultă astfel că un alt element foarte important de legătura în procesul de producție-consum a energiei electrice obținută de la generatoarele sincrone cu magneți permanenți îl constituie electronica de putere. Deoarece turbina eoliană funcționează la viteză variabilă în funcție de disponibilitatea vântului, amplitudinea și frecvența tensiunii generate la borne variază și prin urmare este necesară prelucrarea lor înainte de livrarea către consumatori. Așadar electronica de putere oferă posibilitatea fructificării avantajului de funcționare la viteză variabilă a generatoarelor sincrone și de conectare la bara consumatorilor printr-un convertor de frecvență, rezultând astfel un sistem cu un bun management și control asupra calității energiei electrice și a puterii reactive. Variația tensiunii și a frecvenței determinată de variația vitezei vântului este controlată prin redresarea semnalelor variaționale în curent continuu cu ajutorul unui redresor comandat, iar prin intermediul unui invertor este furnizat semnalul de curent alternativ cu amplitudinea și frecvența dorită, fiind în acest fel independente de viteza de rotație a palelor turbinei. Mai multe tipuri de echipamente de electronică de putere au fost propuse în literatura de specialitate [I1][P2][M4][F1] pentru utilizarea turbinelor eoliene cu viteză variabilă [W1][S5][R1].

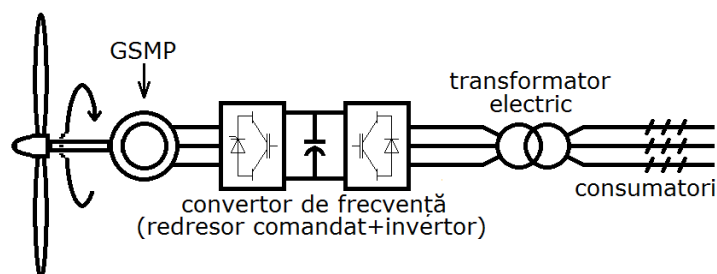


Fig. 2.11. Generator sincron cu magneți permanenți cu cuplaj direct utilizat într-o aplicație de conversie a energiei eoliene

Un alt avantaj important al utilizării generatoarelor sincrone cu magneți permanenți îl reprezintă eliminarea circuitului de excitație, astfel nu mai sunt necesare inelele și periile colectoare, sursa de curent continuu și bobinajul pentru crearea câmpului magnetic, fiind evitate așașadar și pierderile în cupru [D1]. Este oferit astfel încă un motiv pentru care acestea sunt mai atractive pentru utilizare [A1]. Așașadar dintre cele prezentate anterior și din numeroasele studii expuse în literatura de specialitate [E2][M5][W17][A1][R3][T2][E1], sunt prezentate în continuare o serie de avantaje ale utilizării generatoarelor sincrone cu magneți permanenți:

- eficiență mare și randament ridicat în condiții de operare la turații scăzute corespunzătoare vitezei de funcționare a turbinei fiind astfel eliminată necesitatea multiplicatorului de viteză;
- proiectare simplă;
- nu necesită sursă de alimentare exterioară pentru excitația câmpului magnetic rezultând astfel îmbunătățirea caracteristicilor termice datorită absenței pierderilor în câmp cauzate de înfășurările de excitație;
- fiabilitate crescută datorată absenței anumitor componente mecanice;
- dimensiune și greutate mult mai redusă a întregului ansamblu;
- costuri de instalare și de întreținere mai scăzute;
- o metodă de control mai ușoară, mai flexibilă și un răspuns rapid la fluctuații ale vântului și la variații ale sarcinii de încărcare.

Însă cu toate acestea, generatoarele sincrone cu magneți permanenți prezintă și dezavantaje pentru utilizarea lor la turbine eoliene, precum [M5]:

- tehnologia relativ nouă și necunoscută pentru aplicațiile la puteri mari de ordinul MW;
- dificultăți de manipulare la fabricare;
- fiabilitatea redusă a materialelor în cazul funcționării în condiții atmosferice dure, precum în aplicațiile off-shore de exemplu;
- demagnetizarea magneților permanenți la temperaturi ridicate.

În comparație cu alte tipuri de generatoare, la generatoarele sincrone cu magneți permanenți convenționale un mare dezavantaj îl reprezintă variația tensiunii la borne în funcție de sarcină. Prin natura lor constructivă, la generatoarele sincrone cu magneți permanenți câmpul de excitație este dat de către magneții permanenți. Prin lipsa curentului de excitație provenit de la o sursă externă, excitația nu mai poate fi reglată și astfel tensiunea de alimentare nu va mai fi constantă. Însă acest inconvenient poate fi eliminat prin metode constructive și prin utilizarea echipamentelor cu electronică de putere, fiind astfel îmbunătățită caracteristica de reglare a tensiunii prin aceste mijloace [D1].

Din punct de vedere al modului de furnizare a energiei electrice obținută prin conversia dintr-un sistem eolian cu generator sincron cu magneți permanenți, acestea pot funcționa în regim autonom, conectate la rețea sau în sistem hibrid [R1].

Deși toată atenția este ațintită înspre mașini de puteri mari, studiile demonstrează că există o cerere crescută pentru generatoare eoliene de dimensiuni mici sau medii, până la 100 kW, în special pentru utilitatea lor în aplicații cu funcționare autonomă sau în zone izolate. Scopul acestora este utilizarea directă a energiei electric

produsă pentru alimentarea locuințelor aflate la depărtare de sistemul electroenergetic sau în zone izolate pentru care nu este posibilă conectarea la rețea din diferite considerente precum distanța mare față de rețea, rezultând pierderi mari și o calitate proastă a energiei electrice, zona geografică, dimensiunea sarcinii, etc. Însăși condiția aceasta de funcționare autonomă impune ca generatoarele să fie compacte și ușoare pentru instalarea lor în partea superioară a turnului turbinei eoliene [R2].

Cele mai utilizate generatoare electrice pentru aplicații eoliene în zone izolate sunt [R1]:

- generatoarele de curent continuu;
- generatoarele sincrone cu magneți permanenți;
- generatoarele asincrone.

Un sistem eolian autonom este acel sistem de conversie a energiei eoliene care nu este conectat la sistemul electroenergetic și a cărui energie electrică este furnizată locațiilor care nu sunt conectate la un sistem de distribuție a energiei electrice. Avantaje precum simplitate, robustețe, mentenanță scăzută, raport redus al gabaritului cu puterea produsă, etc., recomandă utilizarea generatoarelor sincrone cu magneți permanenți de puteri mici și medii în astfel de aplicații cu funcționare autonomă [R1]. Pentru livrarea energiei electrice la parametrii standard este utilizată electronica de putere, numeroase studii de cercetare oferind diferite metode de control a calității energiei electrice. Configurațiile sistemelor eoliene autonome sunt următoarele [R2]:

- sistem eolian cu alimentare directă;
- sistem eolian cu stocare de energie;
- sistem eolian hibrid.

În ceea ce privește sistemele eoliene autonome cu cuplaj direct, există diverse soluții utilizate pentru conversia energiei mecanice în energie electrică. În această configurație alimentarea consumatorilor se face direct de la generatorul electric prin intermediul unui convertor cu redresor comandat și inverter. Ieftinirea magneților permanenți și performanțele competitive ale acestora, precum și dezvoltarea convertoarelor electronice de putere au făcut ca generatorul sincron cu magneți permanenți să fie o soluție foarte des adoptată, oferind avantaje precum eficiență mare, densitate crescută a cuplului electromagnetic, lipsa unei surse suplimentare pentru alimentarea circuitului de excitație și altele [S5][P2].

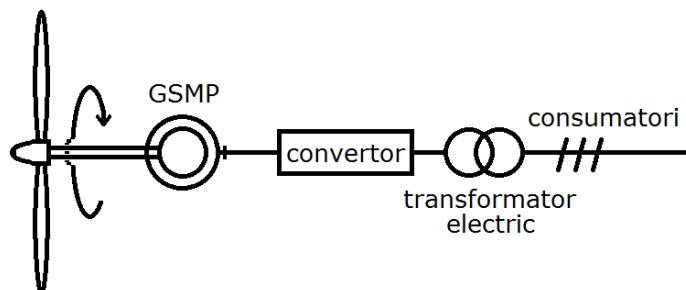


Fig. 2.12. Sistem de conversie a energiei eoliene autonome cu GSMP

Echiparea sistemelor eoliene cu subsisteme de stocare a energiei reprezintă un factor important care conduce la îmbunătățiri în cazul funcționării în regim autonom, dar reprezintă și o componenta de cost major dintr-un sistem izolat. Însă acest sistem este foarte util deoarece utilizează energia eoliană chiar și atunci când nu există cerere de putere din partea consumatorului sau când puterea vântului depășește cererea consumatorului, energia fiind utilizată pentru încărcarea bateriilor. De asemenea se dovedește a fi util și în celelalte caz când puterea vântului nu este capabilă să asigure necesarul de putere cerut de către consumator, astfel fiind utilizată energia înmagazinată în baterii [V1].

Așadar, dintre avantajele acestor sisteme se enumeră reducerea fluctuațiilor de putere, posibilitatea de creștere a fiabilității sistemului, înmagazinarea energiei produse în orele cu goluri de consum și utilizarea ei ulterior în orele de vârf ale consumului [R1]. Studiul unui astfel de sistem autonom prevăzut cu generator sincron cu magneți permanenți și cu funcționare la turație scăzută, echipat cu sistem bazat pe metoda de urmărire a punctului maxim de putere și echipament de stocare este prezentat în [D4] pentru diferite scenarii impuse de disponibilitatea sursei primare. Avantajele acestui tip de sistem sunt oferite de către maximizarea conversiei energiei eoliene prin reglarea tensiunii la borne a generatorului și asigurarea continuității în alimentarea consumatorilor locali prin acumularea de energie electrică în baterie [D4]. Există numeroase soluții pentru sub-sistemele de stocare a energiei, dintre aceste fiind enumerate [R2][A2]:

- stocarea electrochimică (baterii și stocare de energie pe bază de hidrogen);
- stocarea mecanică (sistem de stocare prin pompare hidraulică, stocare de energie prin comprimarea aerului);
- sistem de stocare cu energie electromagnetică (stocarea energiei cu supercapacitori, stocarea energiei cu superconductoare magnetice);
- sistem de stocare cu energie termală.

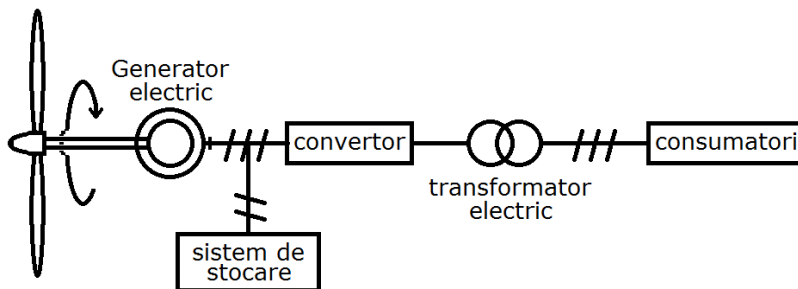


Fig. 2.13. Componentele principale ale unui sistem de conversie a energiei eoliene autonom echipat cu sistem de stocare a energiei

Sistemele de stocare hibride sunt cele care combină două sau mai multe surse de energie regenerabilă funcționând împreună ca o singură sursă convențională de energie. Această soluție a apărut ca o îmbunătățire a faptului că surse regenerabile de energie precum cea eoliană sau fotovoltaică nu furnizează o putere constantă, dar combinate pot să asigure furnizarea continuă de energie electrică. Sistemele de stocare hibride pot să mai conțină suplimentar un sistem de distribuție de curent continuu, un

sistem de stocare a energiei, convertoare și o opțiune a managementului de încărcare sau un sistem de supraveghere. Puterea livrată de astfel de sisteme hibride poate varia de la câțiva kW unde se poate folosi alimentarea în curent continuu, până la ordinul MW pentru sisteme întrebunțate pentru electrificarea satelor mici, sistemele fiind conectate la magistrale de curent alternativ. Astfel, generatoarele eoliene pot fi conectate în diferite configurații, în funcție de arhitectura magistralei pe care debitează puterea electrică, și anume configurație de curent continuu, configurație de curent alternativ sau configurație combinată de curent continuu-curent alternativ [R2].

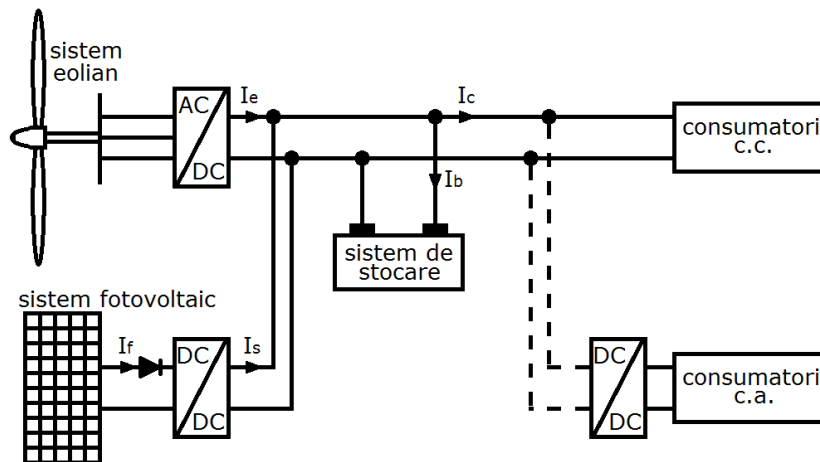


Fig. 2.14. Sistem autonom hibrid eolian/fotovoltaic

Un exemplu de aplicabilitate al unui generator sincron cu magneți permanenți este în cadrul unui sistem de conversie eolian echipat cu convertor de putere și sistem de control, fiind destinat pentru alimentarea unei clădiri rezidențiale inteligente. Un astfel de sistem este descris în [C2], unde este prezentată și modelare generatorului sincro cu magneți permanenți.

Sistemele electroenergetice clasice sunt bazate pe surse mari de generare a energiei electrice care sunt amplasate în centrale situate în locații geografice adecvate, producând cea mai mare parte a energiei electrice. Aceasta este transferată către unitățile mari de consum prin intermediul liniilor electrice de transport. Echilibrul producție – consum este realizat de către centrele de dispecerat ale sistemului prin care este reglată continuu tranziția energiei electrice, precum și calitatea ei subjugată tensiunii și frecvenței. Însă lucrurile au început să se schimbe în sistemele electroenergetice odată cu creșterea numărului de unități de generare distribuită constituite din surse regenerabile de energie și a puterii generate de către acestea. Datorită avantajelor oferite de către acestea și în ciuda faptului că sursele lor primare variază incontrollabil producând fluctuații în sistem și este greu de realizat o prognoză a energiei electrice sunt căutate soluții tehnologice pentru integrarea optimă a acestora în rețea [I1].

În această situație se încadrează și turbinele eoliene la care odată cu creșterea nivelului lor de putere și a capacității de conversie a energiei au ridicat provocări în ceea

ce privește integrarea în rețeaua sistemului electroenergetic, reprezentând astfel un studiu important cu impact major.

Majoritatea țărilor au cerințe stricte referitoare la comportamentul turbinelor eoliene, cunoscute ca și coduri de rețea care sunt actualizate periodic [B6]. În ceea ce privește conectarea și funcționarea turbinelor eoliene la rețea, au fost impuse acestora o serie de reguli și cerințe, precum [R2]:

- controlul puterii active;
- controlul puterii reactive;
- controlul tensiunii și al frecvenței;
- calitatea energiei electrice;
- capacitate de susținere în cazul defecțiunilor în rețea.

Pentru integrarea turbinelor eoliene în sistemul electroenergetic a fost necesar studiul asupra generatoarelor electrice pentru dezvoltarea unor prototipuri cu performanțe ridicate. Împreună cu acestea a fost necesară dezvoltarea electronicii de putere, astfel că în acest domeniu au fost create și perfecționate convertoare electronice de putere [B7] (Multilevel, Matrix, Back-to-back, Tandem) și sisteme de control care să permită turbinelor eoliene să funcționeze la parametrii optimi și în același timp să injecteze în rețea energie electrică la standardele de calitate impuse, oferind astfel acestora un caracter modern și elegant de control asupra puterilor activă și reactivă, a tensiunii, a frecvenței și a fenomenelor tranzitorii. Această temă a fost studiată și dezbătută pe larg și poate fi consultată în literatura de specialitate [B6][W1][A2][P2][H3].

## 2.5 Concluzii

Acest capitol a fost dedicat pentru descrierea mașinilor electrice rotative din punct de vedere constructiv, funcțional și fenomenologic, și în special a mașinilor sincrone. Au fost prezentate caracteristicile generatoarelor cu magneți permanenți, modurile de utilizare și consecințele asupra soluțiilor constructive, precum și avantajele și dezavantajele dintre diferite tipuri de generatoare sincrone care utilizează magneți permanenți, dar și comparația acestora cu generatoarele uzuale. A fost prezentată de asemenea o scurtă istorie a evoluției magneților permanenți, a tipurilor acestora, a proprietăților și a avantajelor care îi recomandă pentru utilizarea în aplicații din domeniul mașinilor electrice.

În ceea ce privește utilizarea generatoarelor sincrone de puteri mici la sistemele eoliene, evident acestea sunt mai puțin semnificative din punct de vedere energetic decât generatoarele de puteri mari din cadrul sistemelor eoliene, însă avantajul generatoarelor de puteri mici îl reprezintă faptul că odată cu creșterea cererii va crește și interesul în ceea ce privește cercetarea și dezvoltarea lor, fapt care va conduce la îmbunătățirea fiabilității, în timp ce costurile vor scădea. Un alt avantaj al sistemelor eoliene de puteri mici este utilizarea lor în regim autonom, în zonele izolate unde nu este posibilă sau nu este fiabilă din punct de vedere economic conectarea consumatorului la rețea.

S-a observat că din punct de vedere tehnic prezența electronicii de putere a produs un imbold care a dus la creșterea interesului pentru concepte care funcționează la viteză variabilă. Aceste inovații s-au dovedit a fi utile pentru turbinele eoliene din mai multe motive printre care reducerea stresului mecanic, creșterea capacității de captare a energiei vântului, reducerea zgomotului și un control sporit.

### 3. METODA ELEMENTULUI FINIT UTILIZATĂ LA STUDIUL CÂMPULUI ELECTROMAGNETIC – MEDIUL “OPERA”

Odată cu creșterea rapidă a cererii de mașini electrice de înaltă performanță, inginerii sunt la ora actuală însărcinați cu multe cerințe și specificații concurente în ceea ce privește proiectarea sau îmbunătățirea performanțelor unui astfel de produs. Indiferent că este vorba despre aplicații ale motoarelor pentru acționări electrice sau procese industriale, fie despre aplicații ale generatoarelor pentru surse de energie regenerabilă, inginerii se confruntă cu provocarea de a realiza modele ale acestora care să reprezinte în practică soluții convenabile prin eficiență sporită, randament crescut, să fie fiabile, să ocupe un volum redus, să fie mai ușoare și să aibă un impact redus asupra mediului înconjurător. Multe companii utilizează în acest sens simularea cu ajutorul pachetelor software dedicate, unul dintre acestea fiind *OPERA*, un mediu software bazat pe metoda elementului finit (MEF), reprezentând o parte de rutină a procesului de dezvoltare, recunoscând beneficiile utilizării sale pentru a răspunde provocărilor ingineresti [O1].

Electromagnetismul se definește ca fiind ramura fizicii care se ocupă cu studiul sarcinilor magnetice și electrice, a câmpurilor (electric și magnetic) pe care acestea le creează și a legilor ce descriu influența lor reciprocă. Acesta acoperă trei ramuri principale: **electrostatica** (studiază sarcinile electrice aflate în repaus și câmpul pe care acestea îl generează), **electrocinetica** (studiază sarcinile electrice aflate în mișcare și câmpul pe care acestea îl generează) și **electrodinamica** (cea care descrie interacțiunea câmpului magnetic și electric) [W18]. Pentru studiul lor, domeniul electromagnetismului a fost divizat în categorii în felul următor [B8]:

- Electromagnetismul teoretic se referă la acea arie în care sunt cuprinse noțiunile teoretice, principiile și legile fundamentale care descriu câmpul electromagnetic;
- Electromagnetismul aplicat reprezintă sectorul în care noțiunile teoretice care descriu fenomene fizice sunt transpuse în modelele matematice din aplicații științifice și ingineresti;
- Electromagnetismul computațional cuprinde sfera de analiză a câmpului electromagnetic cu ajutorul simulării prin metode numerice și funcții de transfer implementate calculatoarelor operaționale.

În procesul de conversie a energiei electrice din energie mecanică un rol esențial îl ocupă câmpul electromagnetic dezvoltat în interiorul mașinilor generatoare pe baza cărora se pot determina mărimi fizice ale mașinii în cantitate numerică și informații cu privire la parametrii funcționali, dar pentru acest lucru este nevoie de efectuarea unor calcule complexe. În acest scop au fost dezvoltate și perfecționate de-a lungul



anilor tehnici de determinare și de calcul a distribuției câmpului electromagnetic, folosind metodele de calcul clasice care conform [P4] se împart în:

- metode analitice;
- metode aproximative (metode grafice, metode grafo-analitice, metode analogice).

Dintre acestea cele mai utilizate sunt metodele analitice și metodele numerice, celelalte prezentând o preocupare scăzută din cauza soluțiilor mai puțin exacte oferite atunci când complexitatea structurilor crește [P4].

*Metodele analitice* utilizează concepte matematice precum dezvoltarea în serii a funcțiilor, metoda integrării Poisson-Laplace prin separarea variabilelor, metoda funcțiilor Green, transformata Laplace, transformata Fourier, polinoamele Lagrange, etc., dar aceste metode sunt convenabil de utilizat numai în cazurile problemelor simple, de complexitate redusă, care de regulă prezintă simetrie, aplicabilitatea lor fiind în general restricționată de către geometria structurii analizate și tipul condițiilor la limită care se impun [C3].

*Metodele aproximative* sunt utilizate atunci când nu poate fi oferită o soluție analitică pentru rezolvarea problemelor cu o complexitate crescută, rezolvarea ecuațiilor Maxwell – Hertz atât sub formă locală, cât și sub formă integrală reprezentând un proces laborios care necesită cunoștințe matematice la nivel avansat. Principiul acestei metode are ca punct de plecare înspre oferirea soluției crearea unui model (model virtual) într-un spațiu virtual cu ajutorul unui program software dedicat care utilizează metode numerice de analiză și rezolvare a ecuațiilor [M6].

Varietatea metodelor aproximative de calcul este mare, însă toate trebuie să ofere soluții cât mai precise. Conform [B8] printre cele mai utilizate metode se enumeră:

- Metoda diferențelor finite (MDF)
- Metoda elementelor de frontieră (MEFr)
- Metoda elementelor finite (MEF)
- Metoda Monte Carlo (MMC)

Dintre metodele enumerate mai sus cea mai răspândită, flexibilă și ușor de implementat programelor de calcul este metoda elementului finit care domină scena [H4][C3].

### **3.1 Metoda elementului finit – principiu**

Metoda elementului finit este o tehnică de calcul ce utilizează metode numerice pentru calculul ecuațiilor diferențiale cu derivate parțiale și ecuații cu integrale pentru rezolvarea problemelor la limită care caracterizează modelul unei structuri reale [M2].

Formulată inițial de către germanul Richard Courant în anul 1943 prin asocierea metodei Ritz cu analiza numerică în probleme de calcul variațional și minimizare pentru analiza sistemelor cu vibrații, MEF își demonstrează atuurile și utilitatea prin extinderea ei începând din jurul anul 1970 în multe domenii de activitate inginerescă, precum:

inginerie electrică, inginerie mecanică, inginerie civilă, ingineria aerospațială, ingineria automobilelor, etc. [M7]

Cu ajutorul MEF pot fi analizate diferite structuri, de la cele mai simple până la cele mai complexe, incluzând aici și mașinile cu magneți permanenți, indiferent de configurația constructivă și materialul utilizat. Unul dintre avantajele MEF este că prin utilizarea ei se poate determina câmpul electromagnetic indiferent de caracteristicile acestuia: variabil în timp, neliniar, etc., iar de aici se pot afla o serie de parametri fizici specifici [P4]. De exemplu la softurile moderne care utilizează MEF, prin introducerea datelor de intrare și a curbei de demagnetizare a magneților permanenți poate fi calculată variația densității fluxului magnetic în întreaga mașină.

Un alt avantaj important al MEF la analiza mașinilor sincrone cu magneți permanenți se evidențiază din capacitatea de a calcula cu exactitate efectele reacției indusului, inductanțele și variația cuplului electromagnetic în raport cu poziția rotorului, prin utilizarea de legi și teoreme, precum legile lui Faraday și Gauss, teorema lui Gauss, teorema Biot-Savart-Laplace, teorema lui Stokes, ecuațiile lui Maxwell toate acestea fiind prezentate în [G1].

Precizia rezultatelor oferite de către MEF este strict dependentă de **rețeaua de discretizare**, denumită *mesh*. Cu cât aceasta este mai fină cu atât oferă acuratețe mai mare calculelor, așadar la crearea acesteia este necesară acordarea unei atenții sporite. Ca și principiu, procesul de creare a rețelei de discretizare constă în descompunerea spațiului  $S$  pe care se face analiza într-un număr  $NE$  de subdomenii individuale  $S^e$  (elemente finite raportate indicelui  $e$ ) de formă geometrică simplă (în cazuri ideale, de exemplu, la discretizarea cu triunghiuri să fie obținute triunghiuri echilaterale, la cea cu patrulater să fie obținute pătrate, pentru cea spațială să fie obținute doar elemente cubice) pentru ușurarea calculelor pe fiecare subdomeniu în parte, urmând ca acestea să fie apoi reasamblate respectând o serie de condiții impuse astfel încât să reproducă pe cât posibil structura din realitate [S6].

$$S = \sum_{e=1}^{NE} S^e \quad (3.1)$$

Prin reasamblarea elementelor finite sunt create la extremitățile acestora **nodurile de rețea** care reprezintă punctele comune rezultate în urma intersecției acestor elemente. Fiecare nod este caracterizat, spre exemplu într-un spațiu 2D, de câte doi parametri independenți  $UX$  și  $UY$  care definesc deplasarea acestuia pe orizontală și verticală și care descriu așa-numitele **grade de libertate**. Acestea din urmă definesc la rândul lor configurația sistemului. Se poate spune astfel pe scurt că rețeaua de discretizare este alcătuită dintr-un număr finit de elemente și noduri de rețea, care cu cât sunt mai numeroase cu atât rezultatele obținute sunt mai exacte, însă trebuie ținut cont de faptul că numărul este direct proporțional cu volumul de calcul și timpul de analiză [S6].

Pentru trasarea granițelor și delimitarea modelului în spațiu, a materialelor cu proprietăți fizice diferite care definesc modelul și a elementelor de rețea este necesară impunerea unor condiții, numite condiții de frontieră sau condiții la limită. În majoritatea aplicațiilor sunt folosite condițiile la limită sau condițiile de graniță de tip Neumann (la care se cunosc derivatele după normala la suprafața închisă a potențialului magnetic scalar), Dirichlet (valorile potențialului magnetic scalar pe frontieră sunt

cunoscute), Robin (situația în care în punctele suprafeței cu frontieră închisă sunt deja cunoscute câteva combinații liniare dintre primele două condiții enumerate) pentru simplificarea modelului și pentru aproximarea potențialului vectorului magnetic în punctele nodale [G1][U1].

Nodurile de rețea asociate elementelor finite sunt cele pe baza cărora sunt construite funcțiile matematice de aproximare a necunoscutelor modelului, asigurând la traversarea frontierelor dintre elemente continuitatea aproximației matematice globale care devine astfel o funcție a valorilor necunoscutelor în nodurile rețelei. Valorile necunoscutelor nodale reprezintă mulțimea finită a parametrilor cărora li se atribuie valori arbitrare fiind obținută astfel mulțimea infinită a aproximantei globale. În cadrul acesteia, MEF, folosind un criteriu global de minimizare a erorii transpus sub forma unei integrale definite pe întreaga suprafață a rețelei de discretizare, are rolul de a căuta cea mai bună aproximație globală a soluției numerice, condiționând ca aceasta să corespundă minimului erorii [C3].

Programele software moderne care folosesc MEF pot genera automat rețeaua pe baza geometriei trasate cu ajutorul modulului de proiectare asistată de calculator folosind metoda triangulației Delaunay. Această metodă constă în descompunerea domeniului de analiză în fragmente de formă geometrică simplă, analizarea acestor fragmente și recompunerea domeniului respectând anumite cerințe matematice. Generarea rețelei prin metoda automată poate fi posibilă numai în cazul în care sunt luate în considerare erorile care apar la discretizarea rețelei, erori estimate prin algoritmi preciși bine stabiliți, fiind numită discretizare auto-adaptivă. Această metodă este caracterizată de generarea repetată a rețelei de discretizare și recalcularea de fiecare dată a erorilor până când se obține nivelul de precizie cerut pentru modelul analizat [G1].

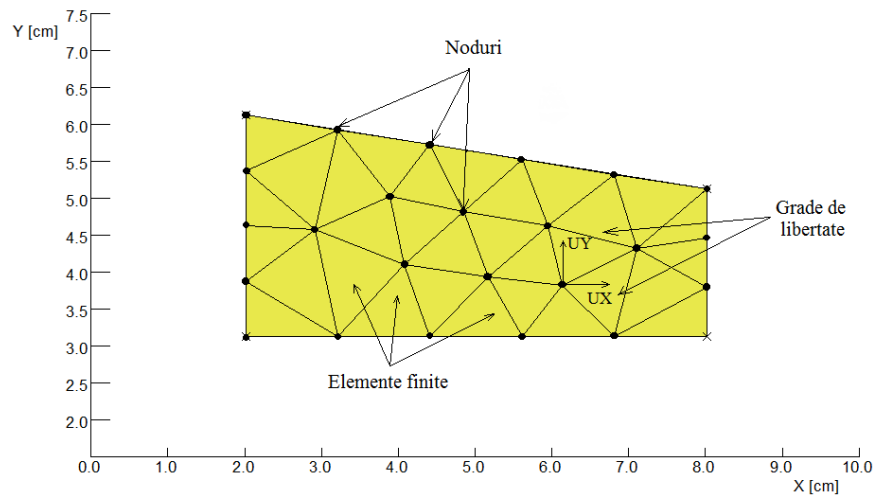


Fig. 3.1. Discretizarea domeniului de analiză a unei structuri

În funcție de dimensiunea spațială a domeniului de discretizare, elementele finite pot fi [C3]: *unidimensionale*; *bidimensionale*; *tridimensionale*. Continuând cu

caracteristicile de clasificare, elementele finite pot fi în funcție de forma: *liniare, parabolice, cubice, etc.*, în funcție de gradul polinomului utilizat pentru aproximarea necunoscutelor: *de ordinul întâi, de ordinul al doilea, de ordinul al treilea, etc.* [C3]

Etapele de rezolvare numerică a unei probleme cu ajutorul MEF [M7][M6][C3]:

1. **crearea modelului geometric** al structurii și discretizarea sa prin definirea tipurilor de elemente finite potrivite pentru problema care urmează a fi rezolvată, a nodurilor și numerotarea acestora;
2. **stabilirea funcțiilor de formă** reprezentate de către forma geometrică a elementului și coordonatele punctelor nodale caracteristice modelului studiat care să reproducă cu o exactitate cât mai mare soluția numerică a modelului și pe baza cărora este construită aproximanta globală;
3. **aplicarea criteriului global de minimizare a erorii** care permite determinarea soluțiilor aproximative ale ecuației diferențiale obținute din minimizarea funcției scalare asociată sub formă integrală și asamblarea sistemului de ecuații global care rezultă din această condiție;
4. **rezolvarea numerică** a sistemului de ecuații global obținut căruia i se asociază impunerea condițiilor la limită;
5. **procesarea și interpretarea rezultatelor.**

În anul 1973, Chari a deschis drumul pentru aplicarea MEF în calculul câmpurilor electromagnetice. Aplicarea MEF pentru găsirea soluțiilor la probleme de calcul ale câmpurilor electromagnetice s-a dezvoltat în mod constant, de la metode liniare la neliniare, de la câmp static la câmp dinamic și tranzitoriu. Mai mult decât atât, o complexitate adăugată modelelor MEF a fost realizată prin includerea modulației în lățime a impulsurilor de comandă (PWM) [H5].

În domeniul ingineriei electrice, MEF poate fi utilizată pentru analizarea, interpretarea și exprimarea sub formă matematică a multor fenomene electromagnetice care se petrec în cadrul structurilor electrice, de la propagarea microundelor până la calcularea și reprezentarea cuplului electromagnetic. Acest lucru implică studiul evoluției câmpului magnetic, câmpului electric și câmpului termic. Dispozitivele electrice studiate cu MEF pot fi de exemplu mașini electrice rotative, servomotoare, dispozitive de acționare și control, module de transfer și conversie a energiei, generatoare de câmp, senzori, etc. [B8].

Tipurile analizelor folosite în sectorul ingineriei electrice care au la bază MEF sunt [B8]:

- **analiza câmpului magnetic** (cu specific pentru analiza motoarelor și generatoarelor electrice, transformatoarelor, magneților permanenți, carcaselor magnetice, etc. din punct de vedere static, iar cantitățile fizice de urmărit sunt densitatea fluxului magnetic, intensitatea câmpului, cuplajul magnetic, cuplul, forțe, inductanțe);
- **analiza electrostatică**;
- **analiza electrodinamică**;
- **analiza electromagnetică de timp armonic** (folosită pentru a analiza câmpul magnetic produs de către efectele curentului alternativ și invers, când efectele câmpului magnetic conduc la inducerea curenților turbionari);

- **analiza fluxului curentului electric** (aplicată în sisteme de conducție electrică, fiind analizate mărimi fizice precum densitatea de curent, tensiune, pierderi de putere prin efect Joule);
- **analiza termică** (este foarte importantă în structurile mecanice și electrice, deoarece se pot observa distribuția căldurii între elementele constructive ale acestora, pierderile de căldură și gradientii termici);
- **analiza eforturilor și a solicitărilor** (utilizată în testarea structurilor din domeniul ingineriei civile, ingineriei mecanice și ingineriei electrice, analizând tensionări, dislocări și alte fenomene fizice la care poate fi expusă o anumită componentă din cadrul structurii).

Din punct de vedere ingineresc termenul de "câmp" poate avea mai multe semnificații, în funcție de ipostazele în care este înfățișat, astfel el poate reprezenta o regiune într-un spațiu în care își manifestă proprietățile (semnificație fizică) sau o mulțime alcătuită dintr-o funcție de puncte, spre exemplu un câmp de vectori (semnificație matematică).

Atunci când se consideră câmpul ca fiind o regiune al unui spațiu în care sunt exercitate forțe asupra corpurilor din acel spațiu, termenul de câmp se poate asocia câmpului electric, respectiv câmpului magnetic.

*Câmpul electric* se poate interpreta ca fiind o stare a unei regiuni dintr-un spațiu caracterizată de proprietatea că în momentul în care în această regiune este introdus un corp încărcat electric se va exercita o forță asupra lui care nu ar exista dacă respectivul corp nu ar fi încărcat electric [W19].

*Câmpul magnetic* reprezintă mărimea fizică vectorială caracteristică spațiului din vecinătatea unui magnet, a unui electromagnet sau a unei sarcini electrice aflată în mișcare asupra căreia își exercită forțele [W20]. Acesta poate să rezulte fie din contribuția curentului electric, fie din starea de magnetizare a corpurilor și se poate afla atât în interiorul și vecinătatea corpurilor, cât și în spațiul vid, fiind caracterizat de două variabile vectoriale:  $\vec{H}$  (intensitatea câmpului magnetic) și  $\vec{B}$  (densitatea fluxului magnetic sau inducția magnetică, cea care reprezintă caracterizarea locală a câmpului magnetic).

Fluxul magnetic  $\phi$  este o mărime fizică derivată care exprimă caracterizarea globală a câmpului magnetic printr-o suprafață cu secțiunea  $S$ , descris de relația (3.2), exprimată în SI în [Wb]:

$$\phi = \int_S \vec{B} \cdot \vec{ds} \quad (3.2)$$

Dacă vectorul inducție magnetică  $\vec{B}$  este perpendicular în toate punctele suprafeței de integrare  $S$  și are valoare identică, atunci relația (3.2) devine (3.3):

$$\phi = B \cdot S \quad (3.3)$$

Așa cum am precizat și în capitolul anterior, un corp căruia îi corespunde un câmp magnetic este descris de o stare, diferită de cea electrocinetică sau cea de electrizare, numită stare de magnetizare caracterizată de către mărimea vectorială  $\vec{m}$ , numită moment magnetic, și sub formă locală în fiecare punct de către o mărime fizică derivată  $\vec{M}$ , numită magnetizație, dată de relația (3.4), în care  $\Delta \vec{m}$  corespunde sumei geometrice a momentelor magnetice corespunzătoare volumului elementar  $\Delta v$  [U1]:

$$\bar{M} = \lim_{\Delta v} \frac{\Delta \bar{m}}{\Delta v} [A/m] \quad (3.4)$$

Între cele trei mărimi de stare ale câmpului magnetic (inducția magnetică, intensitatea câmpului magnetic și magnetizație) există o dependență dată de relația (3.5) numită *Legea legăturii dintre  $\bar{B}$ ,  $\bar{H}$  și  $\bar{M}$*  valabilă în orice condiții, atât în regim staționar cât și în regim variabil în timp care demonstrează că inducția magnetică este subordonată contribuției curenților electrici (prin  $\bar{H}$ ) și stării de magnetizare a mediilor (prin  $\bar{M}$ ), în care  $\mu_0$  reprezintă permeabilitatea vidului sau constanta magnetică exprimată în SI în [H/m] [U1]:

$$\bar{B} = \mu_0(\bar{H} + \bar{M}) \quad (3.5)$$

Făcând analogie între legea magnetizării temporare și faptul că în mediile izotrope magnetizate temporar magnetizarea permanentă este nulă, legea legăturii se scrie sub forma (3.6), în care constanta adimensională  $\mu_r$  reprezintă permeabilitatea magnetică relativă care este specifică fiecărui material care are proprietatea de a se magnetiza temporar. De exemplu în cadrul analizei unei mașini electrice domeniul său este divizat în medii diferite determinate de aerul din întrefier și miezuri feromagnetice. Fiecare material provine din substanțe cu proprietăți magnetice diferite, astfel că fiecare prezintă o permeabilitate magnetică relativă proprie care influențează variația inducției magnetice, deoarece liniile de câmp ale densității fluxului magnetic străbat aceste suprafețe, iar la trecerea granițelor acestor suprafețe pot apărea discontinuități. În acest sens sunt implementate ecuațiile care impun condițiile la limită [B9][U1].

$$\bar{B} = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \bar{H} \quad (3.6)$$

Cele două câmpuri, magnetic și electric, sunt caracterizate de faptul că au capacitatea de a se genera reciproc, orice câmp electric variabil în timp dă naștere unui curent de deplasare care produce un câmp magnetic variabil în timp, iar orice câmp magnetic variabil în timp conduce la apariția unui câmp electric variabil în timp. De aici rezultă concluzia că cele două câmpuri sunt asociate între ele, ocupând în același timp același spațiu comun, formând astfel câmpul electromagnetic. Acesta reprezintă o formă a materiei prin intermediul căreia are loc interacțiunea dintre particule, deoarece, ca orice formă de materie, câmpul electromagnetic poate avea energie și impuls pe care le poate transmite corpurilor [W21].

Cele două câmpuri magnetic și electric sunt reprezentate prin vectori și ecuații vectoriale care definesc starea câmpului electromagnetic. Analiza performanțelor oricărui dispozitiv electromagnetic se poate realiza prin cunoașterea distribuției câmpului electromagnetic, adică prin rezolvarea ecuațiilor ce descriu câmpul respectiv. Studiul general și sistematic al câmpului electromagnetic în interiorul dispozitivelor electromagnetice (cazul mașinilor electrice, de exemplu) se poate realiza cu ajutorul formelor locale ale legilor generale numite ecuațiile teoriei Maxwell-Hertz, care se compun din ecuații de evoluție, de stare și de material [U1]:

$$\text{rot } \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (3.7)$$

$$\operatorname{rot} \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (3.8)$$

$$\operatorname{div} \bar{B} = 0 \quad (3.9)$$

$$\operatorname{div} \bar{D} = \rho_v \quad (3.10)$$

$$\bar{J} = \sigma \bar{E} \quad (3.11)$$

$$\bar{D} = \varepsilon \bar{E} \quad (3.12)$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H} \quad (3.13)$$

unde:  $\bar{H}$  – intensitatea câmpului magnetic [A/m];

$\bar{J}$  – densitatea curentului electric [A/m<sup>2</sup>];

$\bar{D}$  – inducția electrică [C/m<sup>2</sup>];

$\bar{E}$  – intensitatea câmpului electric [V/m];

$\bar{B}$  – inducția magnetică [T];

$\rho_v$  – densitatea de volum a sarcinii [C/m<sup>3</sup>];

$\sigma$  – conductivitatea electrică [S/m];

$\varepsilon$  – permitivitatea absolută [F/m];

$\mu$  – permeabilitatea absolută [H/m].

Relația (3.7) stabilește legătura între intensitatea câmpului magnetic și cauzele care îl produc, descrisă ca un caz particular al *legii circuitului magnetic sub formă locală* introdusă pentru corpuri imobile ( $\vec{v}=0$ ), reprezentând **ecuația I a lui Maxwell** pentru câmpul electrostatic. Relația (3.8) reprezintă legătura dintre intensitatea câmpului electric și inducția magnetică a câmpului fiind interpretată ca *forma diferențială a legii inducției electromagnetice* pentru corpuri în stare de repaus ( $\vec{v}=0$ ). Aceasta este recunoscută ca **ecuația a II-a a lui Maxwell**.

În relația (3.9) este definită *forma diferențială sau locală a legii fluxului magnetic* care reflectă ideea că divergența inducției magnetice este întotdeauna nulă în orice punct atât din mediu cât și din vid, astfel rezultă faptul că liniile inducției magnetice care formează un câmp solenoidal sunt mereu închise.

Relația (3.10) reprezintă *forma locală a legii fluxului electric* care stabilește în orice punct pe un domeniu de continuitate al inducției electrice egalitatea între divergența acesteia și densitatea de volum a sarcinii electrice libere din respectivul punct.

Relația (3.11) descrie *legea conducției electrice în formă locală pentru medii liniare, izotrope și omogene* și face referire la faptul că în fiecare punct al unui conductor și în orice moment, vectorul densitate a curentului electric de conducție este proporțional cu vectorul intensitate a câmpului electric, factorul de proporționalitate fiind dat de către conductivitatea electrică  $\sigma$ .

Relația (3.12) este un caz particular a *legii legăturii dintre vectorii inducție electrică, intensitatea câmpului electric și polarizația electrică pentru medii liniare, izotrope și omogene, fără polarizare permanentă, cazul particular al câmpului electric în vid.*

Ultima relație, adică (3.13), provine din *legea legăturii dintre vectorii inducție magnetică  $\vec{B}$ , intensitatea câmpului magnetic  $\vec{H}$  și magnetizația  $\vec{M}$* , pentru cazul în care câmpul magnetic străbate medii liniare, izotrope și omogene, aflate în vid, fără magnetizație permanentă.

La calculul câmpului magnetic staționar de o anumită simetrie spațială sau când intensitatea câmpului magnetic are valoare egală a liniilor de câmp sau a unor porțiuni ale acestora, se folosește foarte frecvent **teorema lui Ampère** care se obține din prima ecuație a lui Maxwell în regim staționar (3.14):

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{J} \quad (3.14)$$

Descrierea câmpurilor magnetice create de curenți electrici constanți, când derivatele după timp sunt nule, se realizează cu ajutorul relațiilor (3.9), (3.13) și (3.14). Pe baza acestor formule și a celor care descriu condițiile la limită se poate determina câmpul magnetic.

La ecuațiile Maxwell-Hertz se mai adaugă un set de legi și teoreme, precum legile lui Faraday, Gauss, teorema Biot-Savart-Laplace, teorema lui Gauss, teorema lui Stokes (prezentate în [G1]) toate fiind înglobate în cadrul analizei MEF contribuind astfel la determinarea soluțiilor numerice. Ca exemplu, în cazul mașinilor sincrone cu magneți permanenți avantajele MEF se evidențiază din capacitatea de a calcula cu exactitate efectele reacției indusului, inductanțele și variația cuplului electromagnetic în raport cu poziția rotorului, etc.

Una dintre cele mai importante funcții ale MEF este calculul forțelor și a cuplurilor, pentru care sunt prezentate câteva metode conform [G1] aplicate în cazul studiului mașinilor electrice, fiecare metodă fiind utilizată în funcție de tipul problemei.

### 3.2 Principalele medii software utilizate în prezent

Principiile care stau la baza MEF impun un volum mare de calcul și de timp, iar în scopul simplificării procesului de analiză au fost dezvoltate și optimizate concomitent cu calculatoarele numerice operaționale pachete software moderne destinate aplicațiilor care utilizează MEF.

S-a dovedit prin utilizarea lor în numeroase studii cu aplicații privind analiza magnetică, analiza electrică, analiza termică, analiza structurală, analiza fluidelor, ingineria aerospațială, ingineria automobilelor și așa mai departe, că utilizarea acestor pachete software este extrem de eficientă, flexibilă, fiabilă și ușor de utilizat fără cunoștințe detaliate ale matematicii aplicate, fiind suficientă stăpânirea unor temeinice cunoștințe ingineresti de către utilizator. Sub aceste aspecte, unele dintre etapele laborioase precizate anterior sunt parcurse în mod automat, iar în acest fel sarcina utilizatorului se rezumă doar la transpunerea modelului cu ajutorul modulului CAD (Computer-Aided Design, proiectare asistată de calculator) pus la dispoziție de către program, introducerea datelor inițiale și interpretarea corectă a rezultatelor [S6][G1].



O analiză amănunțită a mașinilor electrice cu MEF este prezentată în numeroase lucrări și studii științifice, precum [H5] de exemplu, în care este examinată o mașină de inducție prin intermediul MEF și din care reies concluzii importante precum necesitatea utilizării unui model 2D pentru curenți turbionari atunci când este luată în considerare variația sinusoidală a acestora, posibilitatea construirii celui mai complet model de calcul pentru obținerea directă a câmpurilor armonice în timp și spațiu de unde mai departe pot fi determinate și alte fenomene fizice precum zgomote electrice, vibrații, variații neliniare ale cuplului, etc. În lucrarea [S7] este utilizată MEF în spațiul dimensional 2D pentru determinarea distribuției câmpului electromagnetic și localizarea vectorilor densității fluxului local în scopul determinării performanțelor și evidențierii potențialului unei mașini sincrone cu magneți permanenți destinată aplicațiilor pentru vehicule electrice micro-hibride.

Etapele parcurse în rezolvarea numerică a unei structuri cu ajutorul softurilor dedicate MEF sunt următoarele [G1]:

1. **pre-procesarea** reprezintă prima fază, cea în care utilizatorul trasează cu ajutorul elementelor CAD schița grafică a modelului ce urmează a fi analizat, introduce proprietățile materialelor care compun modelul, definește elementele și mărimile necesare specifice acestora, impune condițiile la limită, precizează tipul analizei (statică, dinamică, termică, mișcare liniară, demagnetizare, etc.);
2. **procesarea** este etapa în care are loc discretizarea modelului prin procedeele precizate mai sus și rezolvarea numerică a sistemului de ecuații liniare sau a ecuației matricei globale printr-un proces complet automatizat;
3. **post-procesarea** oferă posibilitatea afișării grafice și interpretării unor mărimi fizice calculate pe baza MEF care oferă informații asupra câmpului magnetic precum densitatea fluxului magnetic, potențialul magnetic vector, intensitatea câmpului magnetic, energie, forță, cuplu, inductanță.

Utilizarea MEF nu este avantajoasă pentru a fi folosită în stadiul de proiectare propriu-zisă a unui produs, însă îndeplinește o sarcină indispensabilă în validarea sau îmbunătățirea rezultatelor din lucrările de proiectare analitică [H4]. Utilitatea MEF se dovedește atunci când un produs se află într-un stadiu conceptual având o formă definită care urmează să fie apoi testată, analizată, optimizată și validată înspre fabricare, procesul fiind descris de schema logică din figura 3.2 [S8].

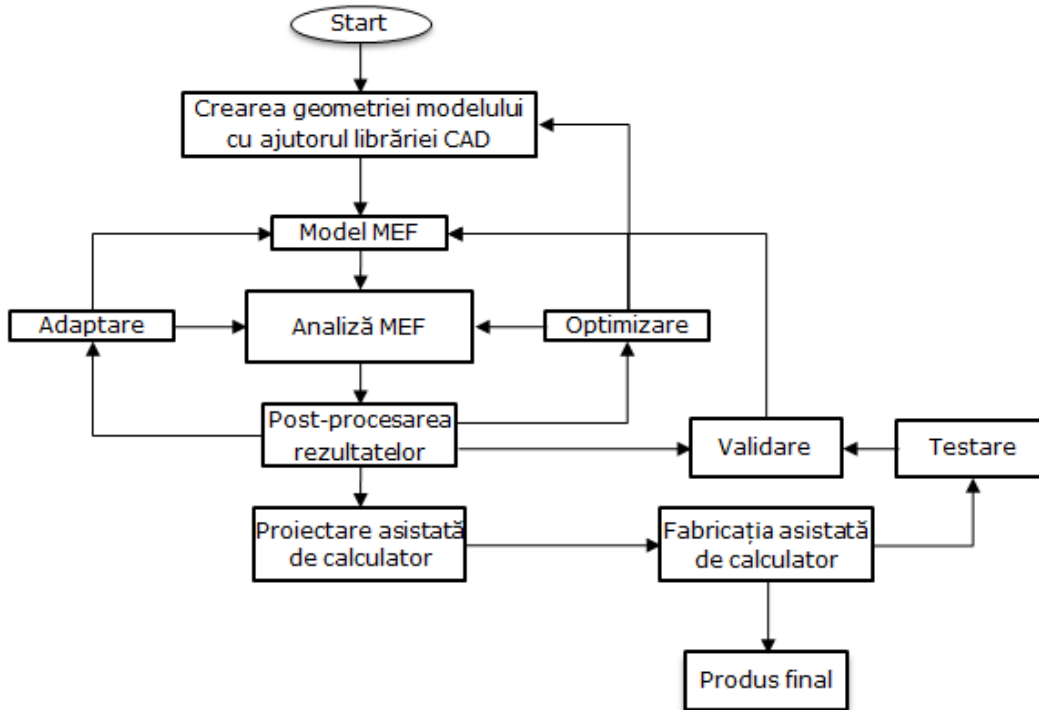


Fig. 3.2. Procesul de analizare și validare al unui produs cu ajutorul MEF

Până în prezent au fost dezvoltate o mulțime de programe de calcul deosebit de performante care utilizează MEF și care permit astfel analiza chiar și a celor mai sofisticate și complexe structuri, indiferent de dimensiunea, domeniul de utilizare, geometria, tipul de analiză, etc. ale acestora. Cele mai cunoscute și folosite pachete software moderne bazate pe MEF sunt *Opera*, dezvoltat de către compania Vector Fields Ltd. din Marea Britanie, *Maxwell* oferit de către americanii de la Ansoft Co., *MagNet* de la compania Infolytica Co. din Canada, și *Flux* dezvoltat de către Magsoft Co. din Statele Unite [G6].

### 3.3 Mediul OPERA – descriere generală

În decursul anilor, dar mai ales în ultimele trei decenii, au fost concepute numeroase programe de calcul pentru proiectarea asistată de calculator (CAD), bazate pe conceptul MEF și pe relațiile matematice descrise în subcapitolul anterior, în scopul rezolvării numerice a câmpului electromagnetic. Unul dintre aceste programe este *Opera*, software utilizat în această lucrare în scopul analizei numerice a câmpului electromagnetic al unui generator sincron cu magneți permanenți în spațiul 2D.

Aflat într-o continuă dezvoltare de către *Vector Fields/COBHAM* din Marea Britanie începând cu anul 1984, *Opera* este instrumentul cheie folosit în aplicațiile industriale și științifice din întreaga lume (industria automotive, industria aerospațială, energie, bunuri de consum, echipament și mașini industriale, marină, dispozitive medicale, cercetări științifice). Acest pachet software poate fi utilizat pe platforme de 32 de biți sau 64 de biți Windows și 64 de biți Linux, punând la dispoziție un set complet de instrumente pentru studii de proiectare asistată de calculator și analiză în spațiul 2D și 3D, oferind soluții numerice exacte pentru probleme din următoarele domenii și aplicații [W22]:

- electrostatică;
- magnetostatică;
- electromagnetism;
- electromagnetism de înaltă frecvență;
- analiză termică;
- analiza solicitărilor structurilor;
- magnetizarea/demagnetizarea magneților permanenți;
- conversia energiei și dispozitive electromecanice;
- ingineria sistemelor de putere;
- transporturi;
- fizică medicală și științe aplicate;
- etc.

Filozofia mediului OPERA, așa cum s-a precizat, se bazează pe conceptul MEF. Această metodă este aplicabilă oricărui tip de problemă cu orice tip de neliniaritate. Unul dintre obiectivele cheie ale metodei este împărțirea domeniului de analiză în elemente finite de volum mic pentru care se aplică un polinom simplu pentru aproximarea soluției, după care urmează reasamblarea elementelor. Pentru descrierea matematică a câmpului magnetic este nevoie de obținerea soluțiilor pentru ecuațiile diferențiale cu derivate parțiale și ecuațiile cu integrale, însă acest lucru nu poate fi realizat prin metode analitice, astfel devin avantajoase metodele numerice, dintre care cea mai utilizată este metoda elementului finit. Ecuațiile diferențiale cu derivate parțiale descriu variația în spațiu și timp a câmpului magnetic fie în mod direct în ceea ce privește variabila câmpului, de exemplu densitatea fluxului magnetic, fie cel mai des printr-o funcție potențială care este legată de câmpul vectorial printr-un gradient ( $\nabla$ ) sau un rotor ( $\nabla \times$ ). Aceste lucruri asociate cunoștințelor și experienței dobândite de-a lungul anilor de către experții în mașini electrice ai Cobham reprezintă ceea ce înseamnă mediul software OPERA. Cobham are o experiență de peste 25 de ani de colaborare cu producătorii de mașini electrice având ca și scop perfecționarea continuă a unuia dintre cele mai precise, rapide și eficiente programe software pentru proiectarea și optimizarea mașinilor electrice [V2][O1].

Procesul de desfășurare al analizei unei structuri cu ajutorul pachetului *Opera* în scopul obținerii unei soluții complete pentru o problemă inginerescă este prezentat în figura 3.3 [W22]. Acest proces este caracteristic celui care se aplică de obicei tuturor interfețelor software de analiză pe baza MEF, cuprinzând etapa de pre-procesare și pregătire a datelor, în care este apoi inclusă procesarea și analizarea tuturor acestor date și a condițiilor impuse de către utilizator, urmând etapa de post-procesare și

## 76 Metoda elementului finit utilizată la studiul câmpului magnetic – mediul “OPERA” - 3

afișare a rezultatelor, fiecare dintre acestea având caracteristici specifice și fiind prezentate într-un mod cât mai interactiv utilizatorului. Unul dintre avantajele Opera este că permite utilizatorului revenirea și modificarea datelor imediat după pre-procesare, ori de câte ori dorește.

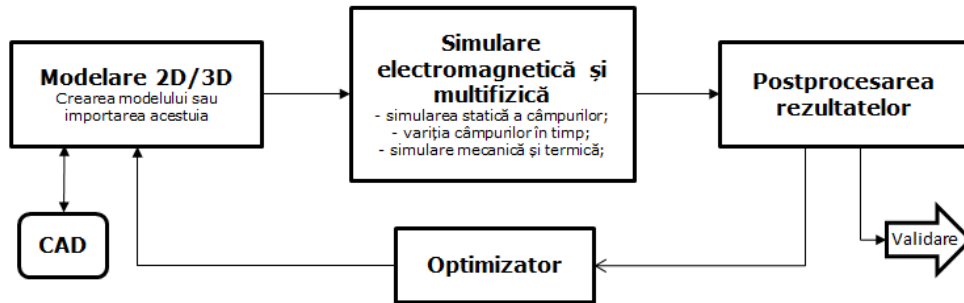


Fig. 3.3. Procesul analizei unei structuri cu ajutorul MEF în *Opera*

Pentru etapa de **pre-procesare** softul pune la dispoziția utilizatorului o interfață grafică de tip CAD în care este creată o schiță a structurii pe care utilizatorul dorește să o analizeze. Tot în cadrul acestei etape sunt precizate datele de intrare, definițiile materialelor, tipul analizei (statică, dinamică, termică, de stabilitate, etc.), forma, numărul, tipul și dimensiunile elementelor finite folosite, numărul de noduri, condițiile la limită și apoi este efectuată procesarea lor. Din acest proces face parte și discretizarea și generarea rețelei de discretizare care se realizează în mod automat, cu posibilitatea de adaptare a acesteia pentru obținerea unei soluții precise. Discretizarea unui domeniu de analiză în elemente finite și calculele aferente formează baza metodelor utilizate în programele de calcul [V2].

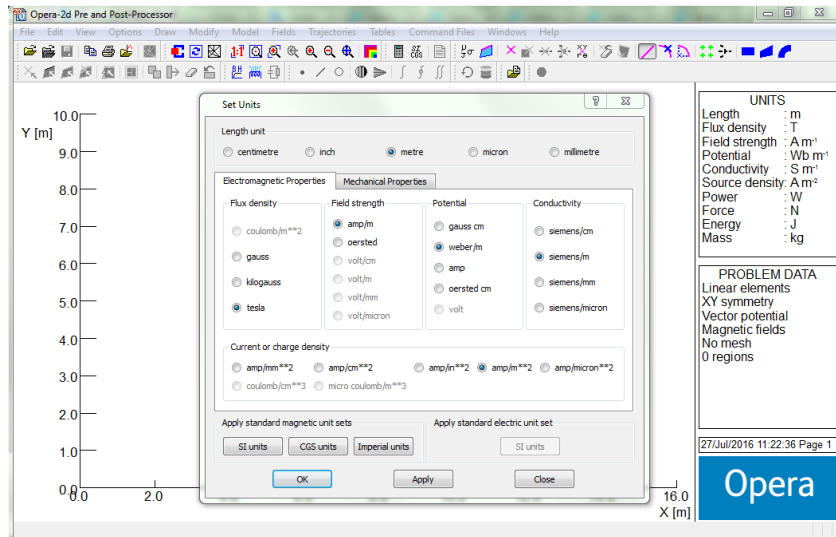


Fig. 3.4. Meniul de comandă, ecranul grafic și textul afișat în pre-procesorul *Opera 2D*

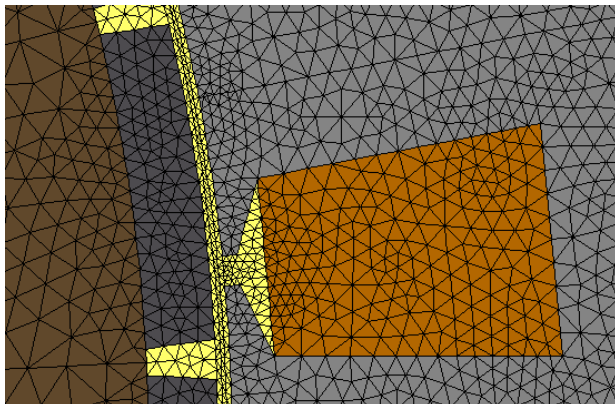


Fig. 3.5. Rețeaua de discretizare a unui generator sincron cu magneți permanenți în pre-procesorul *Opera 2D*

După înregistrarea datelor de intrare și procesarea acestora este efectuată simularea, iar rezultatele sunt puse la dispoziție într-un **post-procesor** interactiv care permite utilizatorilor vizualizarea, analizarea acestora și eventual efectuarea calculelor sau ajustarea parametrilor pentru investigații suplimentare sau pentru optimizarea modelului. Schițele pot fi îmbunătățite manual sau automat cu ajutorul instrumentului opțional de optimizare „Opera’s Optimiser”. Rezultatele pot fi stocate în fișiere sub formă grafică sau tabelară de unde pot fi apoi apelate și interpretate înspre validarea structurii.

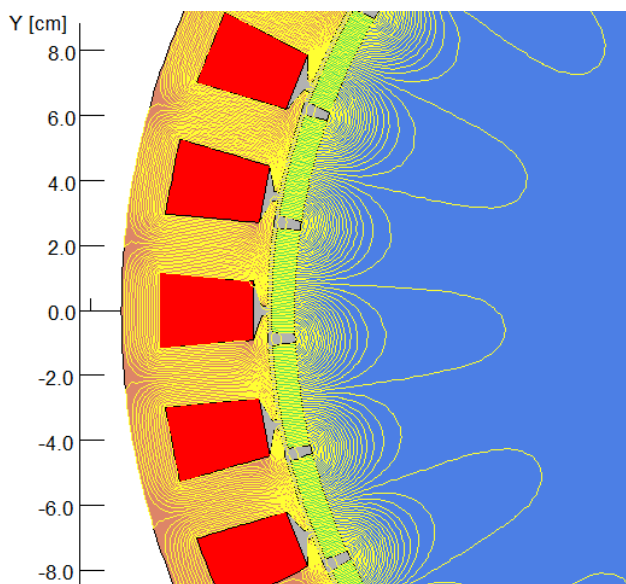


Fig. 3.6. Densitatea fluxului magnetic a unui generator sincron cu magneți permanenți afișată în pre-procesorul *Opera 2D*

În ceea ce privește domeniul mașinilor electrice, OPERA include algoritmi de ultimă generație pentru calcularea câmpurilor electromagnetice și proceduri avansate de analiză numerică a elementelor finite pentru a oferi o modelare cât mai precisă, indiferent de tipul sau topologia mașinii. Acest pachet cuprinde printre altele și opțiuni de modelare a materialelor (inclusiv magnetizarea și demagnetizarea în timpul exploatării) și de definire ușoară a circuitelor externe care facilitează procesul de proiectare al mașinilor electrice. Printre facilitățile și avantajele sale generale oferite pentru analize din diferite domenii, în cazul analizei mașinilor electrice se regăsesc următoarele [W22]:

- facilități avansate de creare a modelelor în 2D și 3D pe baza puternicului său nucleu de modelare geometrică ACIS;
- bibliotecă proprie de modele CAD care pot fi importate;
- rezolvarea ecuațiilor fundamentale care descriu comportamentul câmpului electromagnetic al oricărui tip de mașină electrică precizând cu exactitate performanțele sale în orice condiții de funcționare;
- generarea automată a rețelei de discretizare;
- calculul câmpului magnetic în orice punct de pe domeniul de analiză și afișarea acestuia sub diferite forme (linii 3D în planul geometric, proiecții pe planurile de coordonate principale, puncte intersectate pe un plan 2D, hărți de densitate de curent sau de putere);
- editor al curbei BH, bibliotecă de materiale și capacitatea de a trata o gamă largă a proprietăților materialelor, de la cele mai simple materiale liniare până la modele întregi de histereză a materialelor magnetice moi și demagnetizarea magneților permanenți prin evoluția analizei de magnetizare de-a lungul caracteristicii proprii până în momentul în care câmpul de magnetizare începe să scadă;
- crearea circuitului extern al mașinii electrice analizate;
- conductori parametrizați în 3D pentru precizie maximă;
- evaluarea pierderilor în fier (incluzând aici pierderile prin efectul curenților turbionari, pierderile prin histerezis, pierderile componentelor rotative) pe baza metodelor Fourier; orice pierdere se poate utiliza ca sursă de căldură în analize termice;
- efectuarea unor simulări tranzitorii cu modele de pulsuri definite de către utilizator pentru curentul sau tensiunea circuitului bobinelor;
- rezolvarea problemelor electromagnetice și structurale și intercalarea acestora; de exemplu cuplul poate să fie mărit prin îmbunătățirea raportului reactanțelor după axa  $d$  și axa  $q$  a mașinii, astfel se dorește modificarea dimensiunilor magneților, însă acest lucru poate afecta integritatea mecanică a rotorului; pentru îmbunătățirea structurală se poate recurge la introducerea pieselor polare, fără ca acest lucru să afecteze prea mult circuitul magnetic;
- etc.

### 3.4 Concluzii

În acest capitol au fost prezentate noțiuni generale referitoare la influența calculului ingineresc și a metodelor numerice ca și componente esențiale ale procesului de proiectare în evoluția tehnologiei și a progresului omenirii. De asemenea, este realizată o prezentare de ansamblu asupra metodei elementului finit și a mediului software OPERA.

Se constată că în zilele noastre metodele numerice de calcul implementate pe computere a căror putere de calcul a fost îmbunătățită vertiginos au condus la apariția pachetelor software dedicate, care la ora actuală reprezintă instrumente puternice utilizate pe scară largă în aplicații industriale și științifice datorită avantajelor pe care le prezintă. Printre cele mai importante avantaje pe care le facilitează acestea sunt scăderea timpului de calcul, mărirea preciziei precum și diversificarea semnificativă a mărimilor și a caracteristicilor care se pot determina.

Majoritatea acestor medii software au la bază principiul metodei elementului finit, metodă extrem de utilă și eficientă pentru rezolvarea problemelor de la cele mai simple până la cele mai complexe, indiferent de tipul constructiv al structurii analizate, materialul utilizat, tipul de analiză, etc. Filozofia de calcul abordată de către aceasta, principalele legi și teoreme, etapele care sunt parcurse la construirea și rezolvarea unui model și principalele domenii de aplicabilitate ale metodei au fost prezentate în acest capitol. Au fost prezentate de asemenea cele mai importante teorii ale electromagnetismului pe baza cărora se pot determina soluțiile ecuațiilor ce descriu câmpul electromagnetic al mașinilor electrice.

În zilele noastre, majoritatea mașinilor electrice sunt proiectate, analizate sau optimizate cu ajutorul mediilor software care au la bază tehnici numerice de calcul, în special metoda elementului finit. Unul dintre acestea a fost descris pe scurt în acest capitol, iar utilitatea lui practică în câteva aplicații va fi prezentată în capitolul următor care se referă la analiza performanțelor unui generator sincron cu magneți permanenți.

## 4. ANALIZA NUMERICĂ A UNUI GENERATOR SINCRO CU MAGNEȚI PERMANENȚI 5kVA CU TURAȚIE SCĂZUTĂ – PROTOTIP 1

Principiul de funcționare a mașinii sincrone în regim de generator presupune producerea de către rotor unui câmp magnetic învârtitor inductor care prin tensiunile induse și curenții aferenți din stator generează un câmp magnetic de reacție, iar prin compunerea celor două se obține câmpul magnetic învârtitor rezultat din mașină.

Câmpul magnetic învârtitor poate să fie generat de către înfășurarea de excitație parcursă de curent continuu sau de magneți permanenți repartizați uniform la periferia rotorului mașinii. În cazul excitației cu magneții permanenți aceștia asigură un flux de excitație constant, tensiunea produsă de generator fiind proporțională cu turația.

În acest capitol sunt prezentate datele tehnice ale unui prototip de generator sincron cu magneți permanenți (GSMP) și flux radial cu aplicabilitate pentru agregate eoliene și topologia sa constructivă. Cu ajutorul pachetului software OPERA, modulul 2D, bazat pe metoda elementului finit este definită geometria generatorului cu materialele aferente și sunt calculate și determinate principalele performanțe și caracteristici ale sale.

### 4.1 Datele constructive ale GSMP de 5 kVA – varianta $N_c = 33$ creștături

Evaluarea construcției generatoarelor cu magneți permanenți și flux radial, bazată pe metode de analiză 2D și 3D cu elemente finite a câmpului magnetic demonstrează că această topologie oferă o bună performanță și este rentabilă din punct de vedere al costurilor, reprezentând o soluție pentru sistemele de conversie a energiei eoliene de putere mică, atât conectate la rețea cât și cu funcționare autonomă [C1].

Pentru determinarea dimensiunilor principale în cadrul proiectării preliminare a generatorului a fost utilizat un model analitic bazat pe teoria mașinii electrice convenționale, pe considerentul că astfel de modele oferă rezultate rezonabile într-un timp scurt de calcul [M8].

Datele nominale ale generatorului sincron studiat sunt:

- puterea nominală:  $S_n = 5 \text{ kVA}$ ;
- curentul nominal:  $I_n = 12 \text{ A}$ ;
- turația nominală:  $n_N = 120 \text{ rpm}$ ;
- frecvența nominală:  $f_n = 32 \text{ Hz}$ ;
- numărul de perechi de poli:  $p = 16$ ;
- cuplul nominal:  $M_n = 400 \text{ Nm}$ ;
- lungimea axială a generatorului:  $L = 120 \text{ mm}$ .



Topologia utilizată la acest generator sincron cu magneți permanenți este cea în care magneții permanenți sunt așezați radial pe suprafața rotorului rezultând din acest lucru printre altele o structură mecanică simplă a acestuia, performanțe bune și eficiență ridicată [M8]. Statorul mașinii conține un număr de creștături statorice  $N_c = 33$  în care sunt plasate înfășurările de curent alternativ.

Este cunoscut faptul că generatoarele sincrone cu magneți permanenți oferă o serie de avantaje, printre care eliminarea multiplicatorului de viteză, crescându-i astfel eficiența. Acest lucru îi oferă avantaje pentru funcționare la turații joase, însă pentru acest regim de funcționare, generatoarele sincrone cu magneți permanenți necesită [S5]:

1. număr mare de poli pentru a obține o frecvență adecvată a tensiunii electrice cuprinsă într-un interval de 25-90 [Hz] la turații mici [C1];
2. diametru mare al rotorului pentru obținerea unui cuplu mare al turbinei eoliene.

În ceea ce privește modalitatea de plasare a magneților permanenți asociați sistemului rotoric există diferite alternative, nefiind recomandabil să se aplice aceeași metodă generală de control pentru toate generatoarele sincrone cu magneți permanenți, metoda de control fiind stabilită individual în funcție de configurația mașinii [P3].

Rotorul generatorului electric studiat conține un număr mare de perechi de poli  $p = 16$ , deci implicit un pas polar mic, lucru care este fundamental pentru funcționarea eficientă și performantă la turație scăzută a generatoarelor sincrone cu magneți permanenți [R1]. Cei 32 de magneți permanenți sunt realizați din material de tip NdFeB, cu o lățime  $l_m = 32 \text{ mm}$  și o grosime  $g_m = 7 \text{ mm}$ .

Dimensiunile geometrice ale magneților permanenți au fost determinate pe baza evaluării întrefierului efectiv,  $\delta_e$ , dat de relația (4.1) în care  $k_c$  reprezintă factorul Carter pentru creștăturile statorice,  $k_s$  este factorul ce reprezintă nivelul de saturație al fierului în miezul magnetic al statorului,  $\delta$  este întrefierul mecanic existent,  $g_m$  grosimea necunoscută a magnetului, iar  $\mu_{rm}$  este permeabilitatea magnetică relativă. Înălțimea magnetului poate fi calculată cu relația (4.2) dacă sunt cunoscute: densitatea de flux remanent a magnetului  $B_{rm}$ , pasul polar  $\tau$  și lățimea magnetului  $l_m$  [M8].

$$\delta_e = k_c \cdot k_s \cdot \left( \delta + \frac{g_m}{\mu_{rm}} \right) \quad (4.1)$$

$$g_m = \frac{\mu_{rm} \cdot k_c \cdot k_s \cdot \delta}{\frac{B_{rm}}{B_\delta} - \frac{\tau}{l_m}} \quad (4.2)$$

Definirea geometriei generatorului în mediul OPERA are loc în pre-procesorul acestui software, primul lucru fiind selectarea unităților de măsură (figura 4.1) cu ajutorul opțiunii "Set units". Până la începerea construcției modelului propriu-zis mai sunt realizate o serie de operațiuni precum setările pentru afișarea optimă pe ecran cu ajutorul butonului "Set view", pentru tipului soluției din fereastra "Solution type" și pentru proprietățile materialelor utilizate afișate în fereastra "Set Region Properties" (figura 4.2).

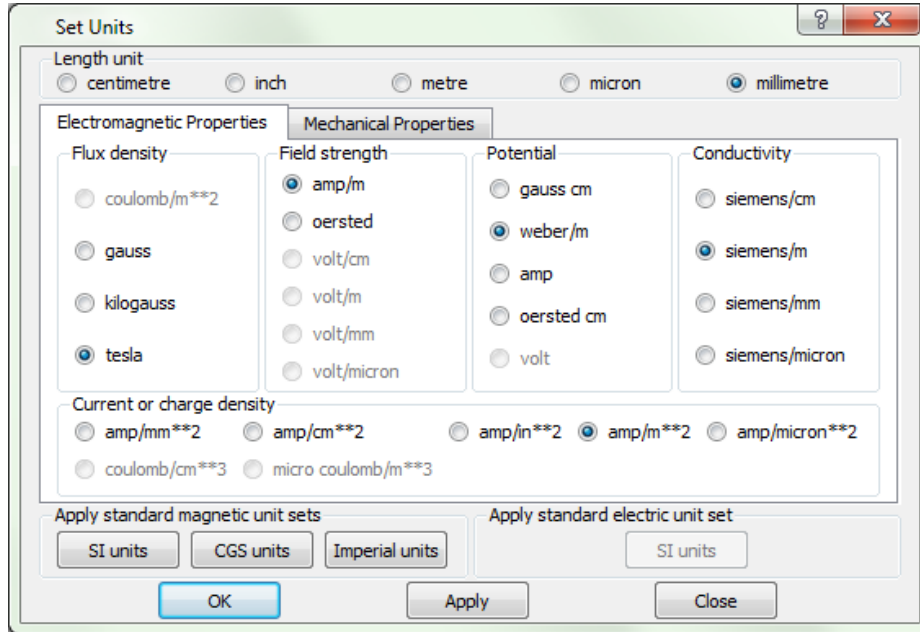


Fig. 4.1. Stabilirea unităților de măsură

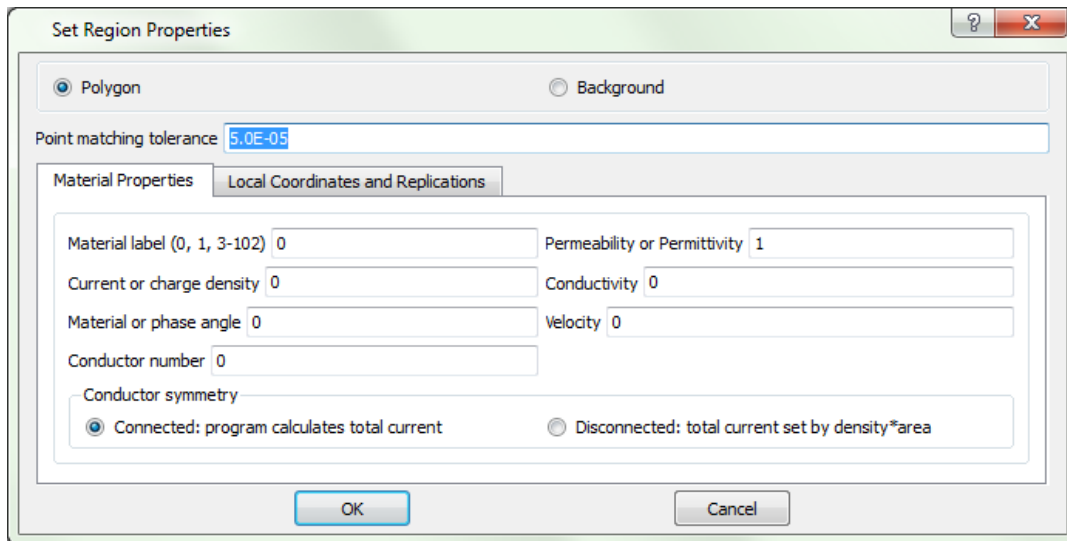


Fig. 4.2. Stabilirea proprietăților materialelor

Cu ajutorul instrumentelor de tip CAD puse la dispoziție de către *Opera* este creat modelul pe baza dimensiunilor geometrice ale generatorului real. De exemplu în figura 4.3 este afișată fereastra de dialog pentru trasarea liniilor și a arcelor de cerc cu

ajutorul căreia este generată o jumătate de dinte statoric. Pentru trasarea statorului este construită prima regiune din model și anume o jumătate de dinte statoric (figura 4.4).

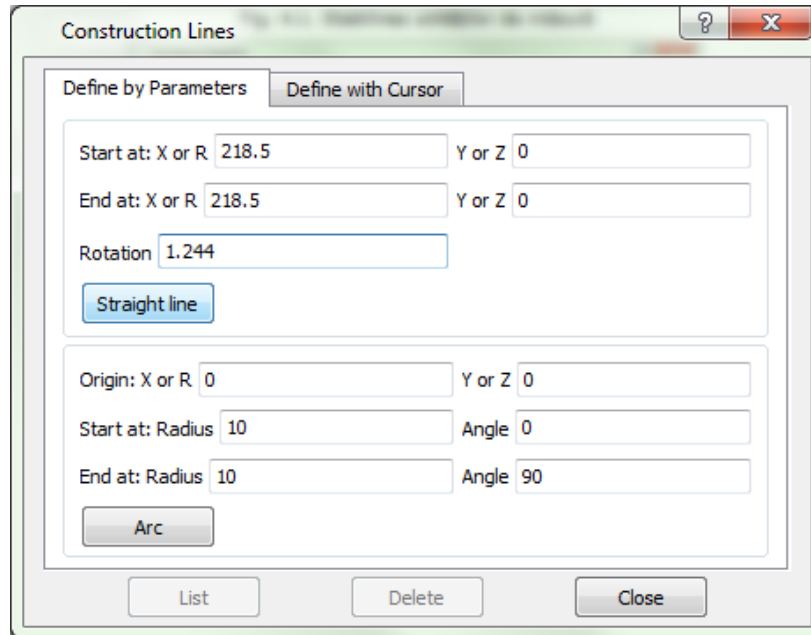


Fig. 4.3. Fereastra de dialog pentru dimensionarea modelului

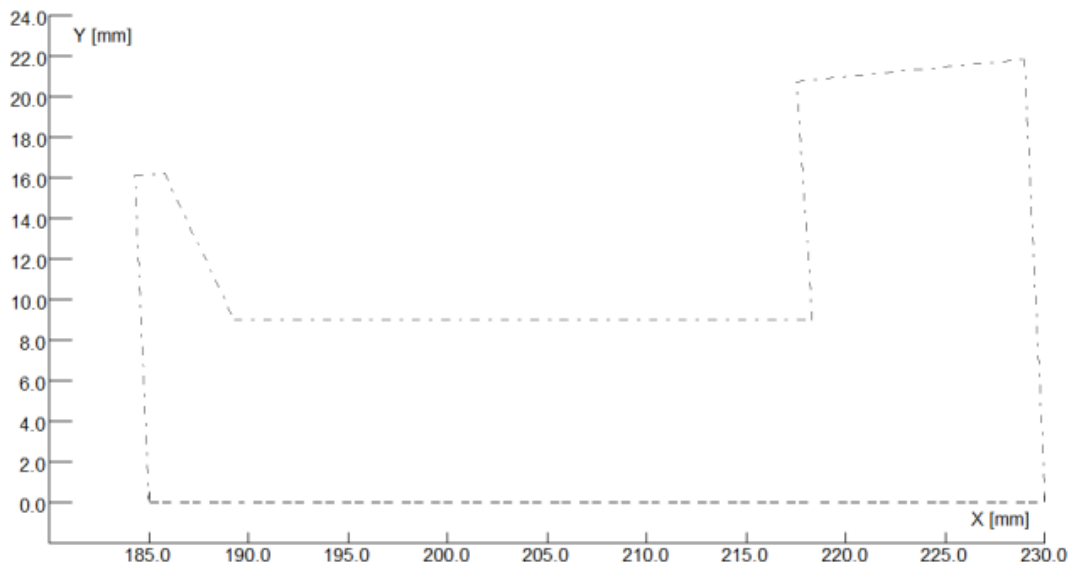


Fig. 4.4. Trasarea unei jumătăți de dinte statoric

După trasarea liniilor (figura 4.5) și a arcelor de cerc pe baza coordonatelor obținute în urma calculelor în Mathcad, cu ajutorul opțiunii "Pick at Nearest Construction Line Intersection" sunt trasate punctele de intersecție, iar prin conectarea acestora, ajustările necesare realizate din fereastra "Modify Side Properties" și impunerea condițiilor la limită este obținut modelul unei jumătăți de dinte statoric (figura 4.6).

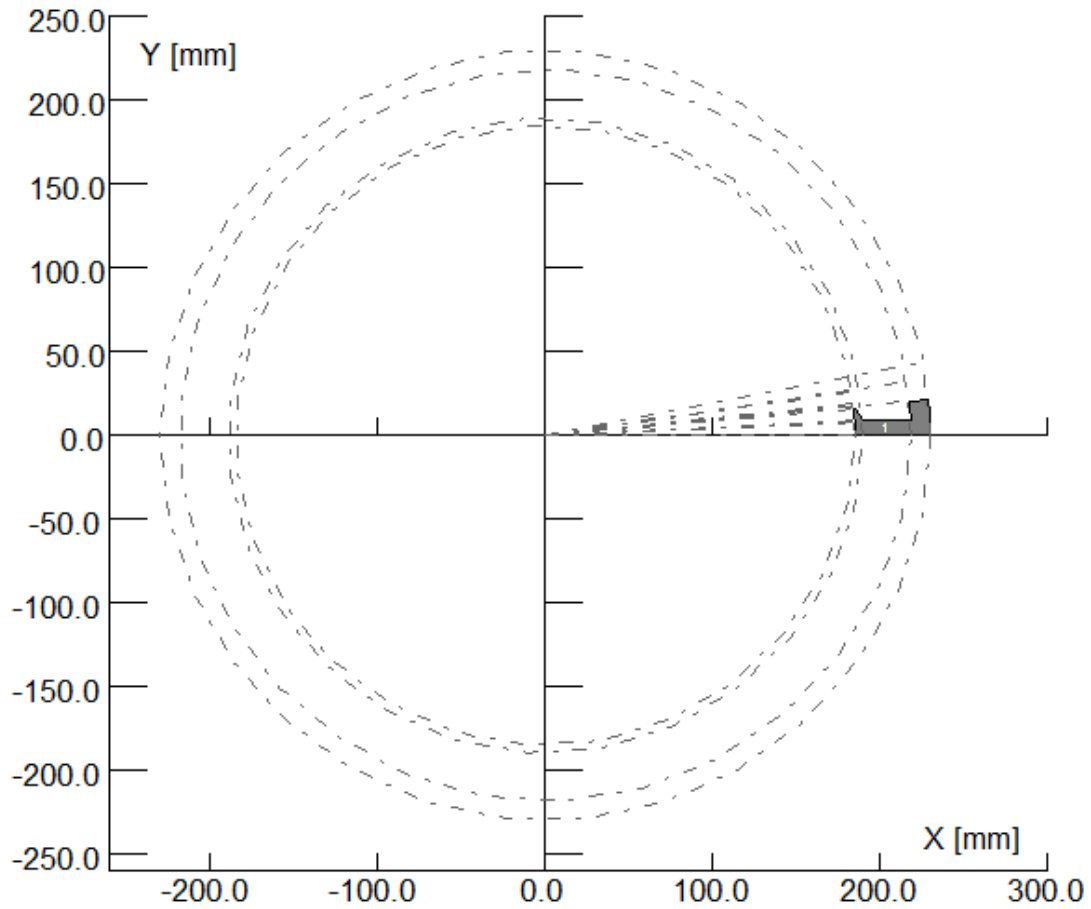


Fig. 4.5. Trasarea liniilor și a arcelor de cerc pentru definirea geometriei transversale a GS

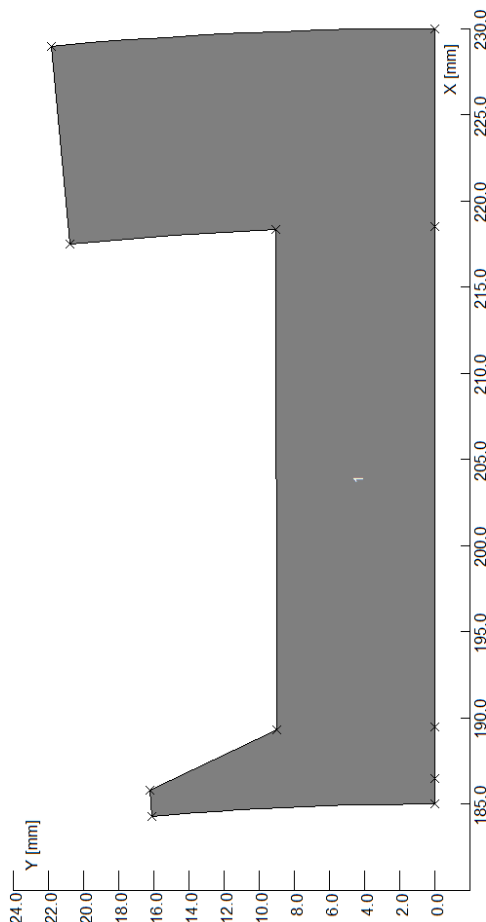


Fig. 4.6. Prima regiune construită – jumătatea unui dinte statoric

În continuare, pentru realizarea construcției statorului pe baza figurii geometrice create anterior există două variante puse la dispoziție de către OPERA, conform [V3]. Prima opțiune se referă la copierea regiunii existente și crearea pe baza sa a unei noi regiuni independente căreia  $i$  se atribuie un număr nou. În acest fel regiunea nou creată poate să fie modificată sau chiar ștearsă fără să influențeze ori să afecteze regiunea inițială care stă la baza sa.

Cea de-a doua variantă presupune replicarea, producerea unor clone pe baza regiunii originale și crearea unor noi regiuni dependente de aceasta. Orice modificare întreprinsă asupra unei regiuni, inclusiv ștergerea, va avea impact automat și în regiunea din care a fost reprodusă. Fereastra "Modify Properties" (figura 4.7) permite crearea acestor replici, astfel că pe baza modelului geometric din figura 4.6 este creată întâi reflexia sa, fiind astfel obținută o crestătură statorică, iar ulterior pe baza acesteia sunt create replicile care formează întregul stator (figura 4.8 / anexa 2).

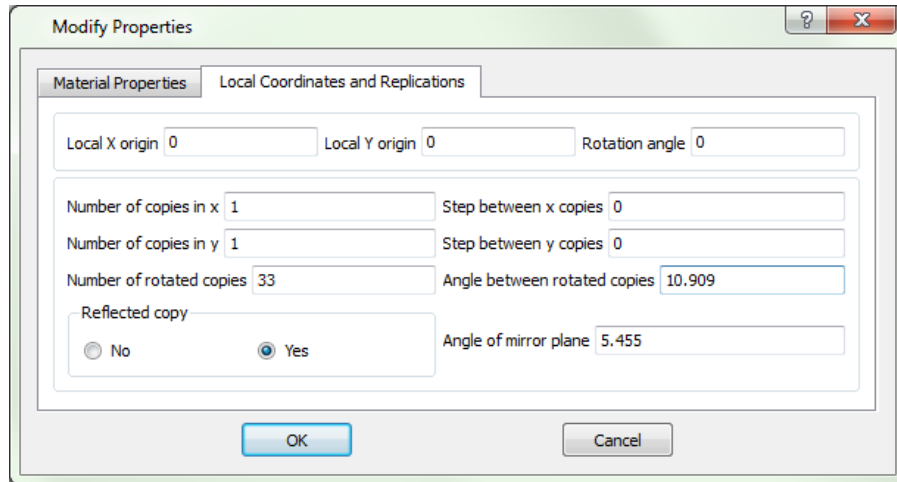


Fig. 4.7. Fereastra de dialog pentru crearea replicilor geometrice

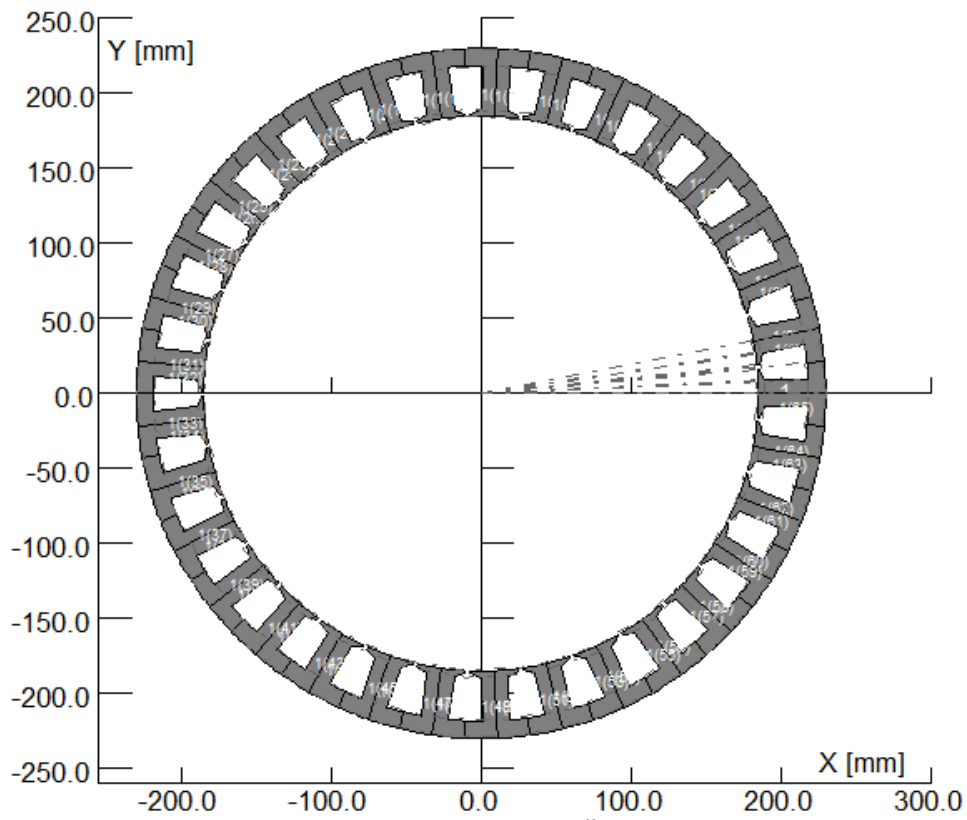


Fig. 4.8. Construcția geometrică a statorului

După trasarea statorului sunt realizate înfășurările statorice de curent alternativ care sunt reprezentate de regiunea numărul 2 din figura 4.9. În această operațiune sunt luate în considerare puncte existente anterior de la crearea crestăturilor statorului.

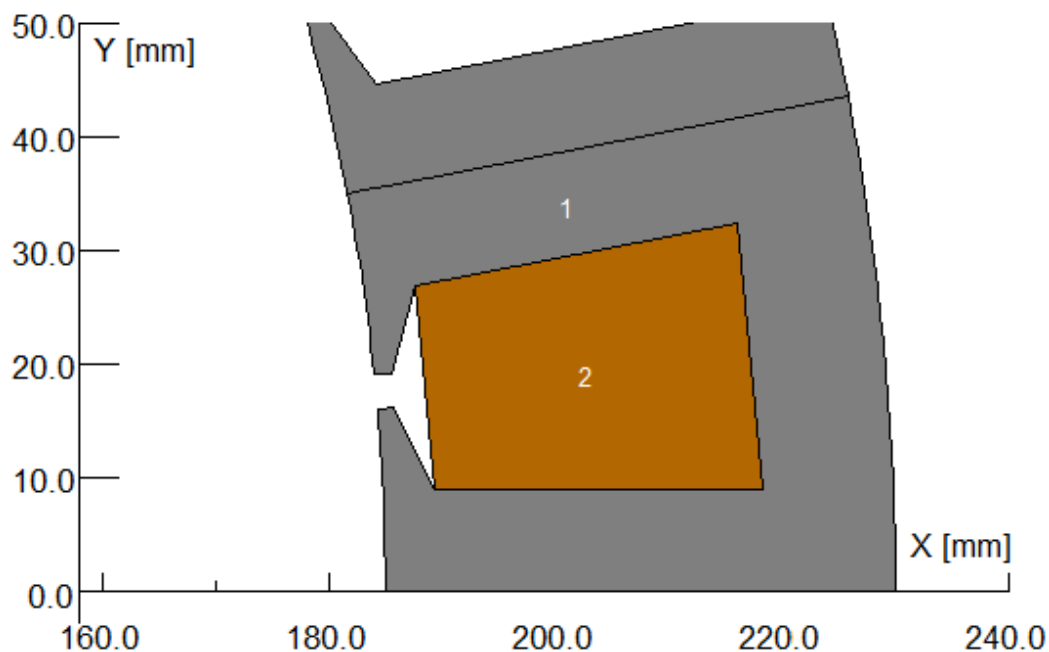


Fig. 4.9. Înfășurare statorică

Regiunea numărul 2 este luată ca și referință pentru crearea celorlalte înfășurări din stator, doar că de această dată nu este folosită replicarea sa, ci vor fi folosite copii ale acesteia deoarece schema de bobinaj trebuie realizată pentru fiecare înfășurare separat. Exemplul este prezentat în figura următoare (și în anexa 3) în care este creată cea de-a doua înfășurare statorică, regiunea numărul trei, folosind copia primei înfășurări, regiunea numărul 2.

Cele 33 de crestături statorice conțin înfășurările trifazate de tip fracționat, cu schemă de bobinaj într-un singur strat și un număr  $N = 84$  spire. Rezistența unui conductor pe unitatea de lungime este  $R_c = 6 \cdot 10^{-3} \Omega/m$ . Din calculele de proiectare au rezultat un factor de bobinaj  $k_B = 0.9542$  foarte bun și un coeficient de dispersie  $\sigma_0 = 154\%$  care indică faptul că apar foarte multe armonici superioare în câmpul magnetic produse de către înfășurarea fracționată. Acest tip de înfășurare ar fi defectuoasă în cazul unui motor asincron de exemplu, producând multe cupluri parazite de tip asincron. Însă la generatoarele sincrone cu magneți permanenți armonicile superioare ale câmpului magnetic nu produc cupluri parazite, iar utilizarea înfășurărilor fracționare oferă avantaj prin faptul că nu există cuplaj mutual între faze, adică fazele nu se suprapun, iar astfel în cazul unui defect pe o fază celelalte faze nu sunt afectate. Alte avantaje oferite sunt capetele de bobină scurte și posibilitatea de realizare pe un număr mic de crestături.

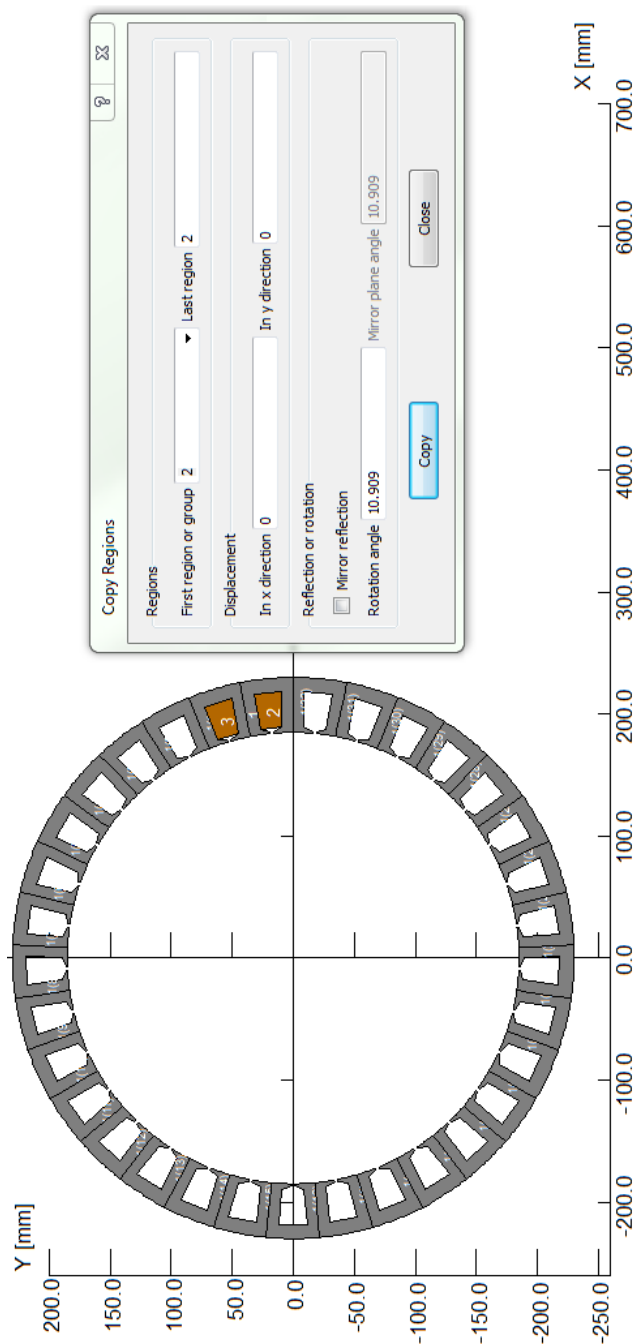


Fig. 4.10. Crearea înfășurărilor statorice



Mediul OPERA facilitează crearea circuitelor electrice ale mașinii prin opțiunea “External Circuits” în care este posibilă crearea, editarea, ștergerea, vizualizarea și verificarea circuitelor electrice ale modelului creat. În figurile 4.11, 4.12 și 4.13 sunt prezentate detalii despre schema de bobinaj a generatorului realizată în OPERA.

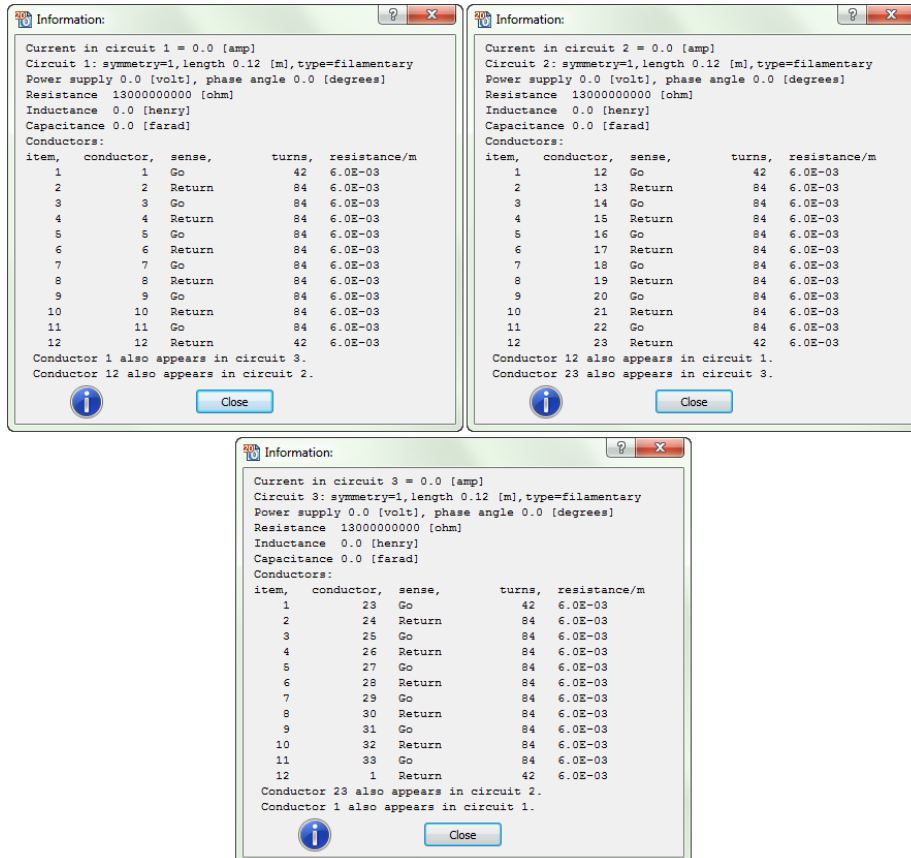


Fig. 4.11. Informații cu privire la circuitul trifazat static

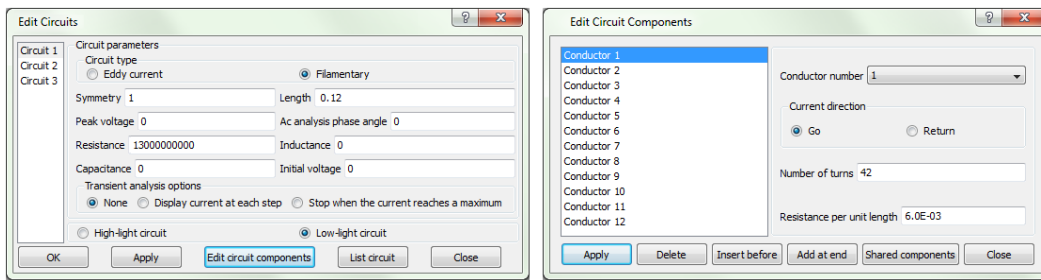


Fig. 4.12. Detalii privind crearea și editarea circuitelor electrice din schema de bobinaj

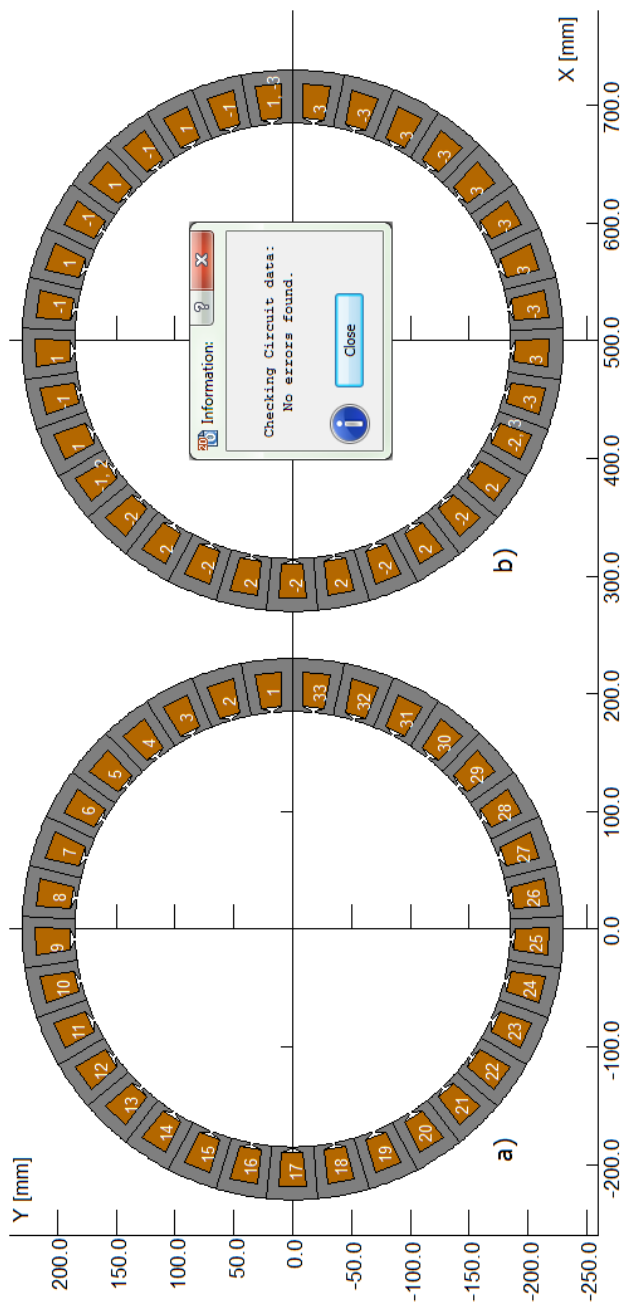


Fig. 4.13. Schema de bobinaj a generatorului

Folosind aceleași metode și principii au fost definite în continuare rotorul și cei 32 de magneți permanenți plasați pe acesta.

Fiecare magnet generează deasupra sa o densitate de flux de formă dreptunghiulară și de valoare  $B_m$ , descrisă matematic de relația (4.4). Odată cu acestea iau naștere armonici spațiale de rang  $\nu$  determinate prin analiză Fourier [M8]:

$$B_\delta^{(\nu)} = \frac{4}{\pi} \cdot B_m \cdot \sum_{\nu=1}^{\infty} \frac{1}{\nu} \cdot \sin\left(\nu \cdot \frac{l_m}{\tau} \cdot \frac{\pi}{2}\right) \cdot \sin\left(\nu \cdot \frac{x}{\tau} \cdot \pi\right) \quad (4.3)$$

$$B_m = \frac{g_m}{\mu_{rm} * \delta_e} * B_{rm} \quad (4.4)$$

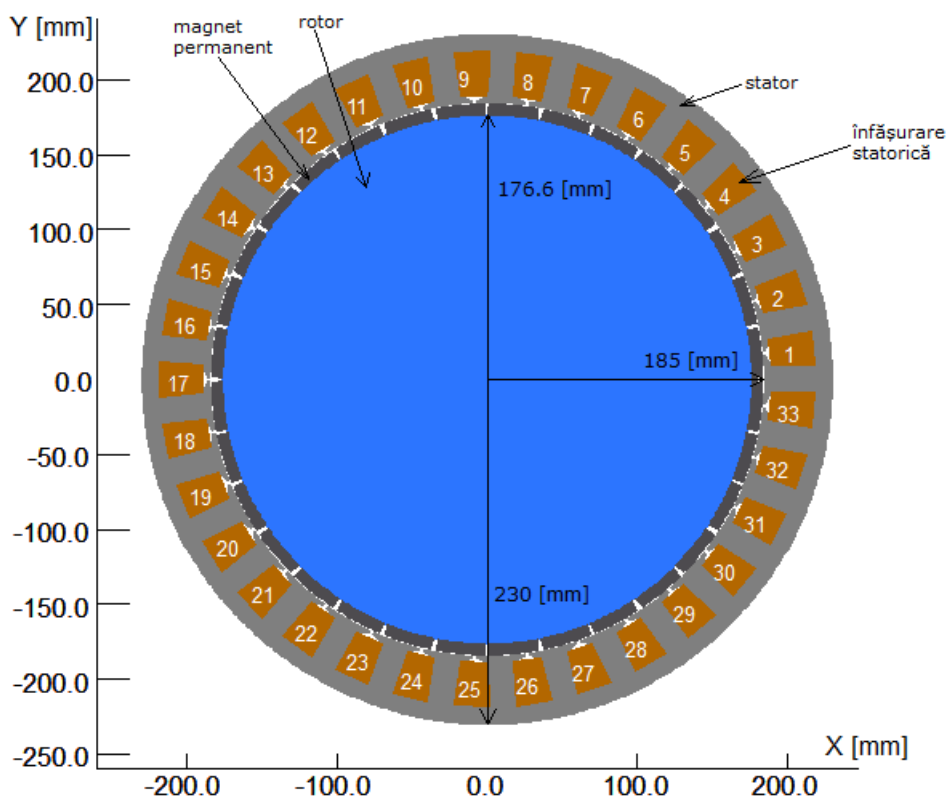


Fig. 4.14. Principalele părți constructive ale generatorului

În final ultima regiune care trebuie construită este întrefierul, spațiul liber dintre stator și rotor, respectiv magneți. Întrefierul va fi format din trei regiuni și anume două poligoane, unul pe partea statorului și unul pe partea rotorului, și o regiune intermediară care este creată automat prin opțiunea "Rotating Machine Air Gaps" prin condiții impuse de către utilizator. Prin această soluție constructivă a rețelei de discretizare cu trei straturi de elemente finite se asigură un calcul mult mai precis al cuplului electromagnetic, respectiv al cuplului magnetic parazit (cogging torque),

eroarea de calcul fiind minimizată. De asemenea, astfel este mult mai ușoară readaptarea "mesh-ului" în condițiile de analiză dinamică a mașinii când rotorul își schimbă în permanență poziția față de stator [T3].

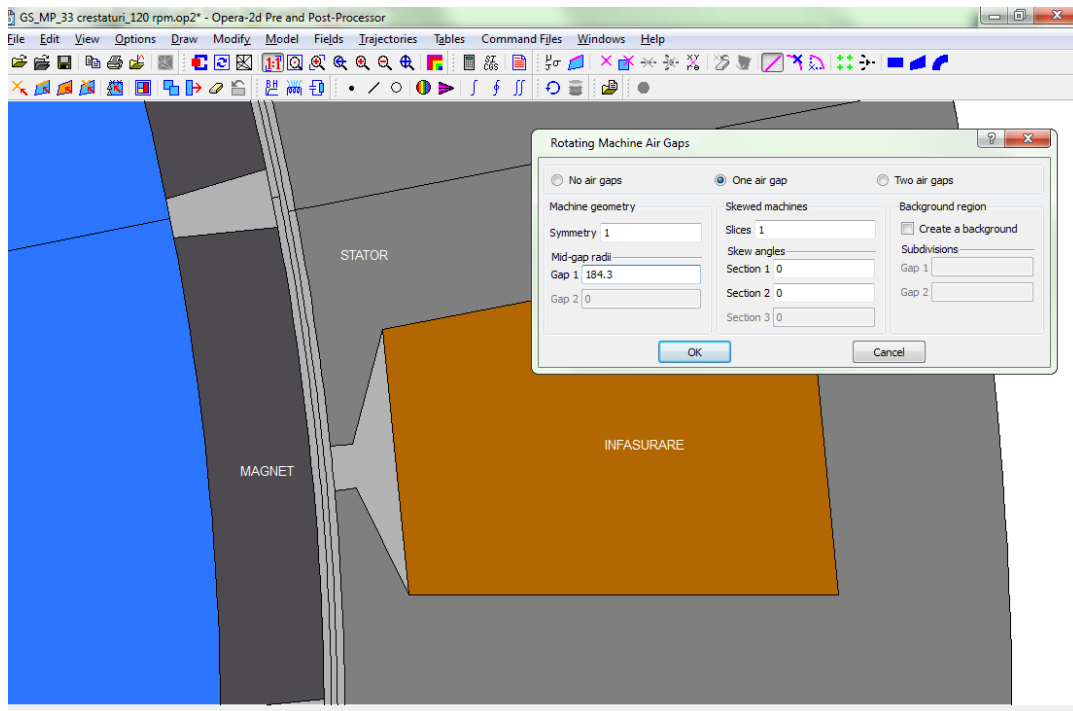


Fig. 4.15. Detaliu reprezentativ al întrefierului

## 4.2 Studiul GSMP cu metoda elementului finit – mediul OPERA

Așa cum s-a stabilit, analiza numerică a generatorului se va realiza cu ajutorul programului software OPERA, bazat pe metoda elementului finit. Pe baza prototipului real a fost creat modelul cu ajutorul căruia au fost efectuate simulări din care reies caracteristicile funcționale ale GSMP. De asemenea, vor fi prezentate și exemple care pun în evidență filozofia programului și a metodei numerice care stă la baza acestuia.

Câmpul magnetic este calculat pe un domeniu de calcul 2D reprezentat de către o secțiune transversală prin generatorul sincron studiat. După ce a fost realizat modelul geometric al generatorului, următoarea etapă înspre analizarea sa este generarea rețelei de discretizare, obținerea mesh-ului. Rețeaua de discretizare obținută este prezentată în figurile 4.16 (și anexa 4) și respectiv 4.17 (și anexa 5). OPERA afișează un număr de 80346 de elemente și 40471 de noduri care împreună alcătuiesc rețeaua de discretizare [B10].

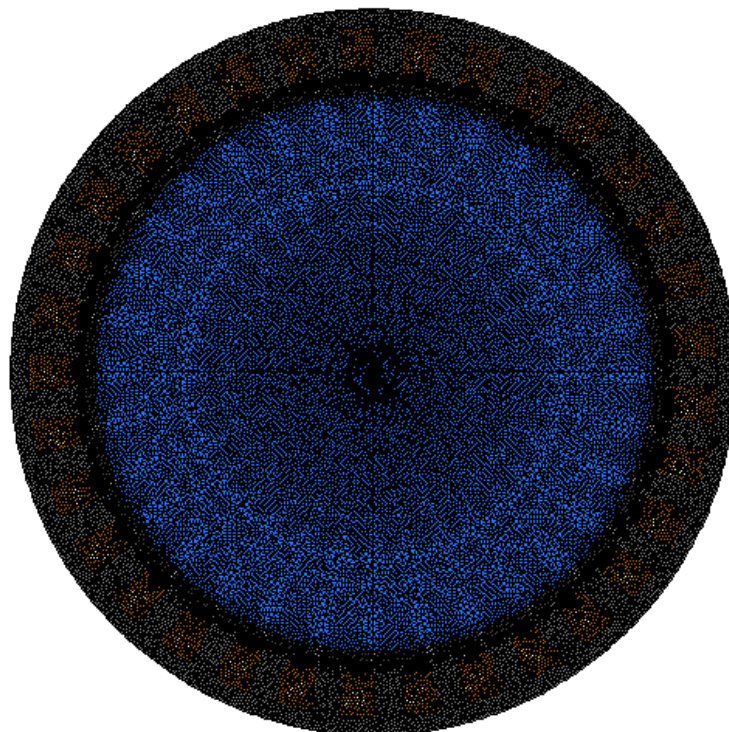


Fig. 4.16. Rețeaua de discretizare

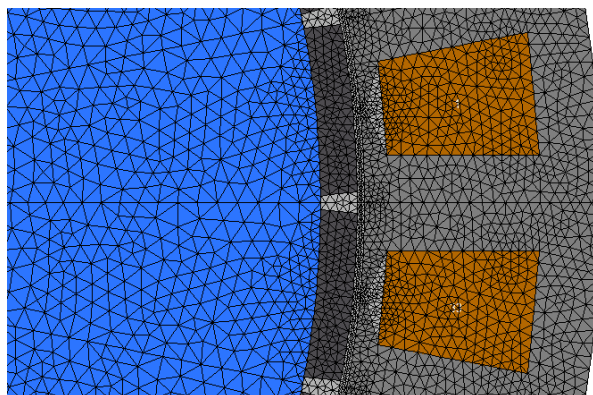


Fig. 4.17. Rețeaua de discretizare – detaliu înfășurări și magneți

După ce a fost realizat și acest detaliu, un singur lucru mai trebuie specificat înainte ca analiza să fie rulată și anume tipul analizei. Primul tip de analiză care este realizată pe acest model este analiza în regim static (ST). Din opțiunea "Model" sunt urmați pașii "Analysis Options → Static Analysis (ST)". În fereastra afișată în acest

modul utilizatorul trebuie să specifice parametrii referitori la tipul materialului și iterațiile de calcul (figura 4.18).

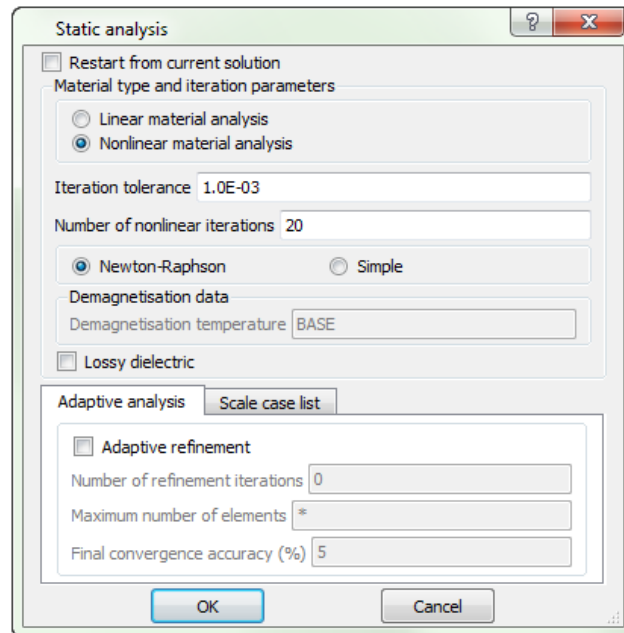


Fig. 4.18. Specificarea parametrilor necesari pentru analiza în regim static

În acest moment au fost îndeplinite toate condițiile necesare pentru realizarea unuia dintre obiectivele propuse în vederea analizării performanțelor GSMP, și anume vizualizarea spectrului câmpului magnetic. Pentru accesul la informațiile cu privire la densitatea fluxului magnetic generată de către magneții permanenți a fost efectuată o analiză de tip static, rezultatul fiind expus în figura 4.19 în care este prezentată distribuția densității fluxului magnetic generată de către magneții permanenți.

Pe baza câmpului magnetic obținut se pot dezvolta ulterior analize asupra modelului creat din care pot rezulta diferite caracteristici și performanțe precum determinarea formelor de undă ale tensiunilor electromotoare induse, caracteristica externă a generatorului, curenți, randament, cuplul parazit, etc. De asemenea, soluția câmpului magnetic oferită de către programul software în urma calculelor bazate pe metoda elementului finit permite analizarea unor aspecte legate de procesul de proiectare, respectiv de funcționare a mașinii electrice, precum identificarea eventualelor zone feromagnetice saturate pentru care este necesară revenirea asupra procesului de proiectare și calculul pierderilor în fier din circuitul magnetic principal sau din diferite regiuni adiacente.

Un aspect important cu privire la liniile de câmp ale inducției magnetice se referă la modul în care acestea formează fluxul magnetic util în funcție de poziția magnetului în raport cu dinții statorului. Se poate observa din figurile 4.19 și 4.20 alternanța fluxului magnetic generat în funcție de orientarea magnetului permanent în raport cu dinții statorici ai generatorului.

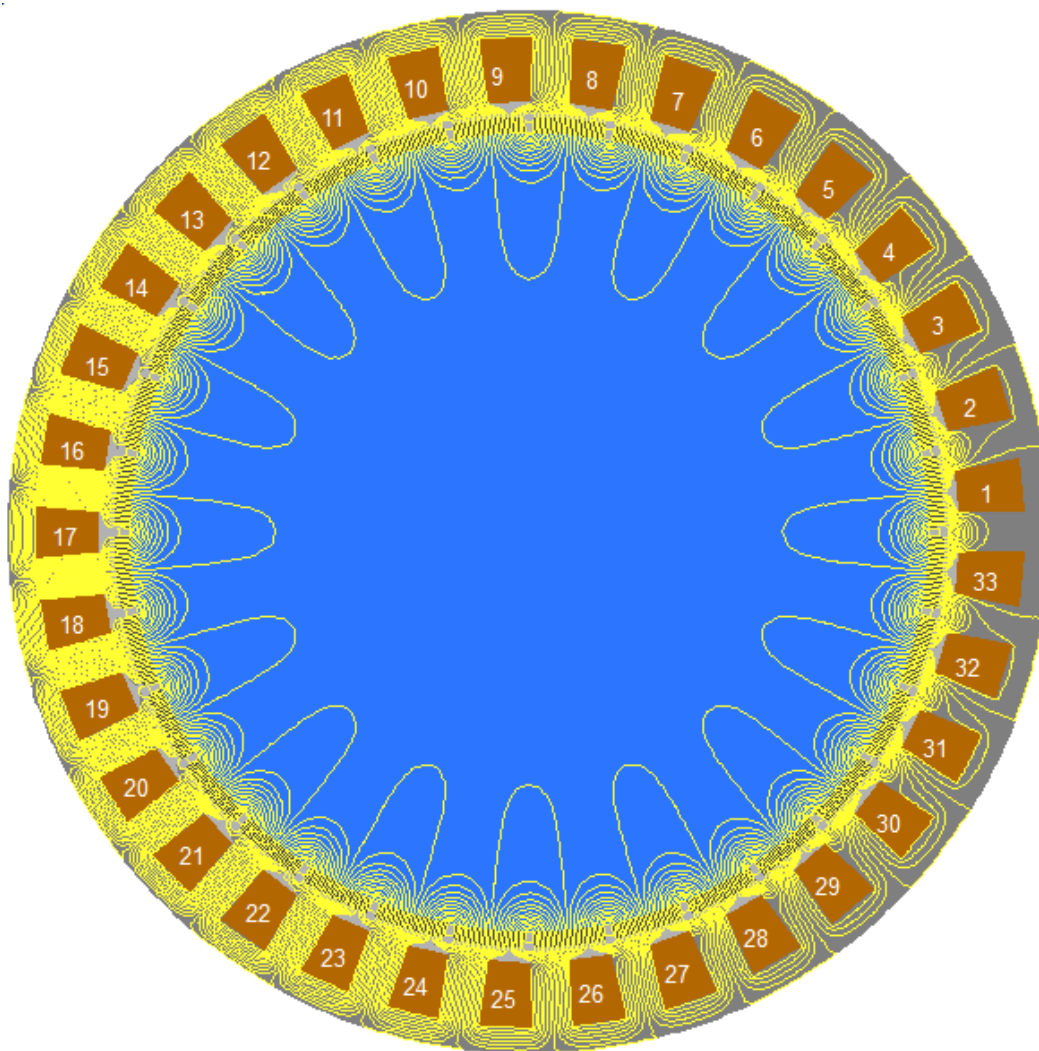


Fig. 4.19. Spectrul câmpului magnetic

Densitatea maximă a fluxului magnetic este atinsă în momentul în care magnetii se află orientați cu axa "d" suprapusă pe axa dintelui statoric, precum în figura 4.20.a), liniile de câmp fiind înlănțuite după înfășurarea statorică și formează astfel fluxul util. Cealaltă situație extremă din punct de vedere a variației câmpului cu poziția rotorului o reprezintă cazul în care densitatea fluxului magnetic este minimă în momentul în care magnetul este orientat cu axa "d" între două creștături statorice, precum în figura 4.20.b), caz în care liniile de câmp formează flux de dispersie. Cele două figuri sunt de asemenea prezentate detaliat și în anexa 6.

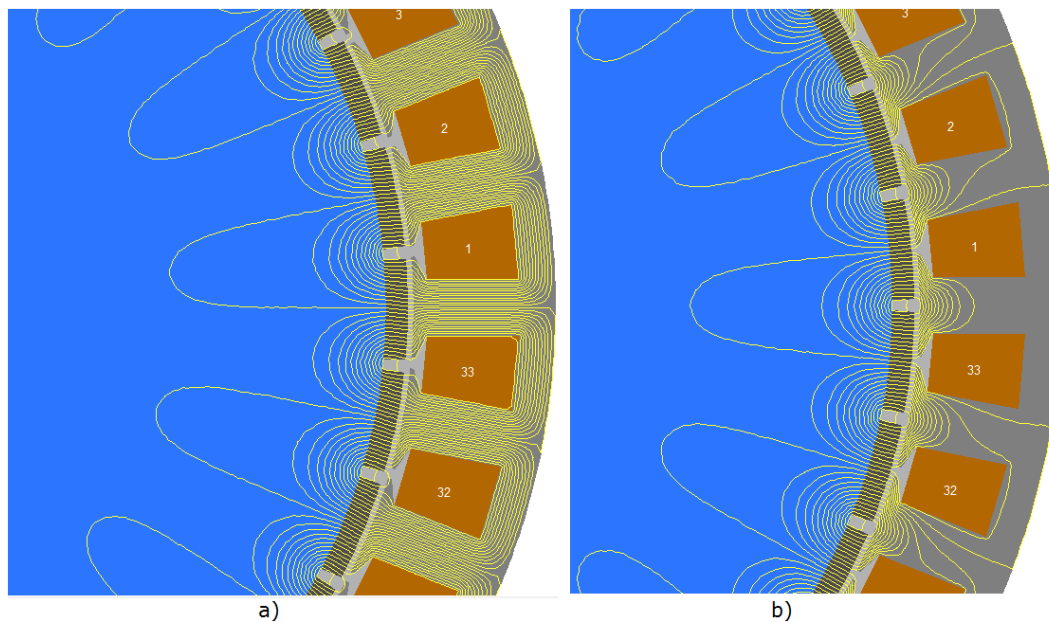


Fig. 4.20. Liniile de câmp ale inducției magnetice generate în funcție de poziția magnetului

Variația componentei normale a inducției  $B_n$  în întrefier pe întreaga mașină funcție de poziția rotorului corespunzătoare celor din figura 4.19 sau figura 4.20.b) este prezentată în figura următoare.

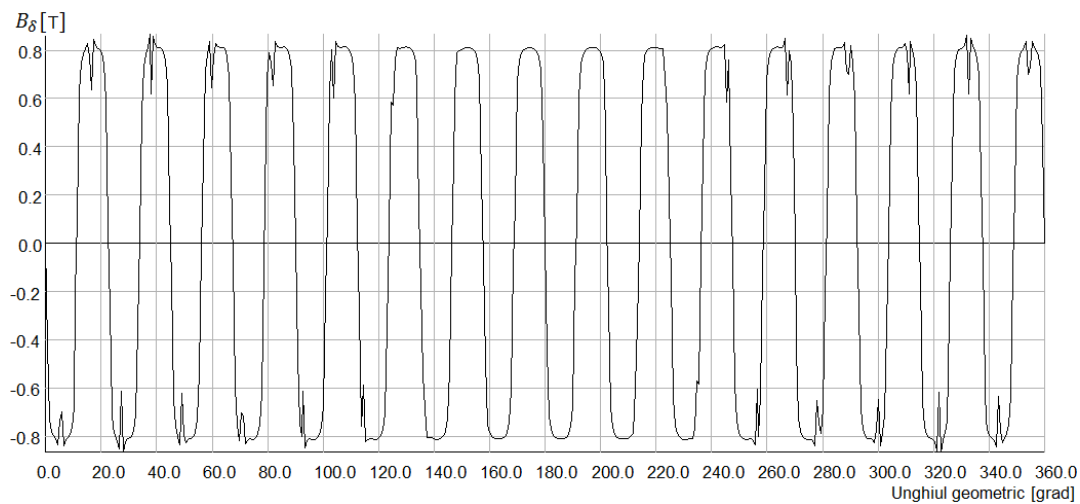


Fig. 4.21. Variația componentei normale a inducției  $B_n$  în întrefier în funcție de poziția rotorului



Un aspect important în ceea ce privește raționamentul OPERA care poate fi evidențiat pe baza liniilor de câmp ale inducției magnetice se referă la influența numărului de noduri impus de către utilizator asupra preciziei rezultatelor obținute. În cele ce urmează va fi prezentată rețeaua de discretizare pentru trei cazuri distincte și rezultatul exprimat prin spectrul câmpului magnetic obținut.

Primul caz reprezintă rețeaua de discretizare formată dintr-un număr de 40471 noduri și 80346 elemente, prezentată în figurile 4.22 a) și b).

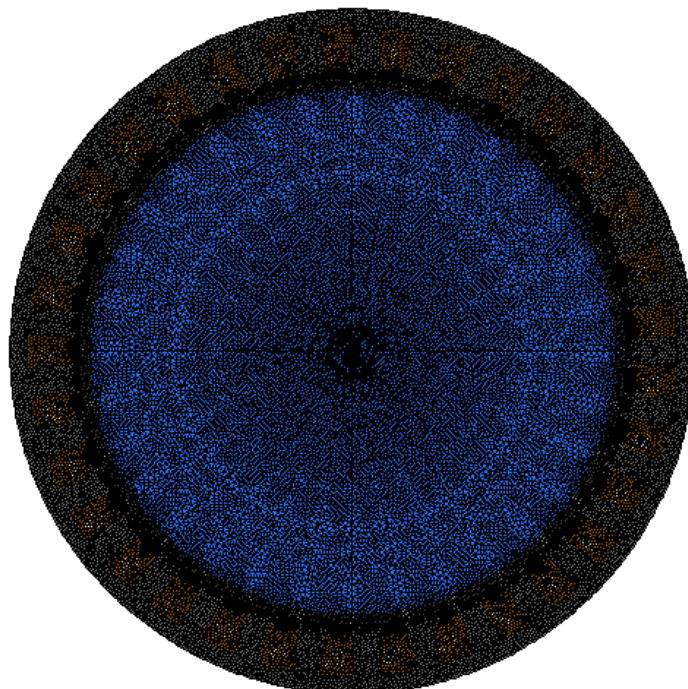


Fig. 4.22.a). Rețeaua de discretizare pentru cazul 1

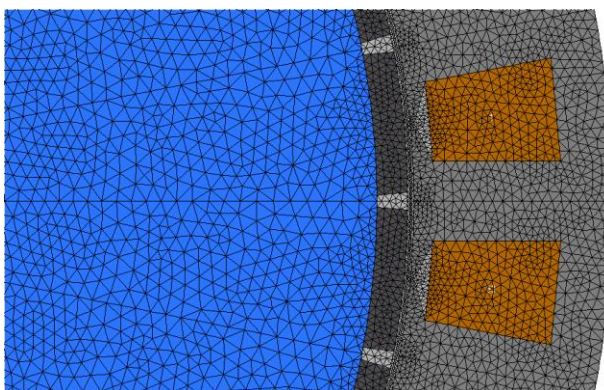


Fig. 4.22.b). Rețeaua de discretizare pentru cazul 1

Rezultatele spectrului câmpului magnetic generat pe baza nodurilor alese pentru prima rețea sunt afișate în figurile 4.23.a) (anexa 7) și 4.23.b).

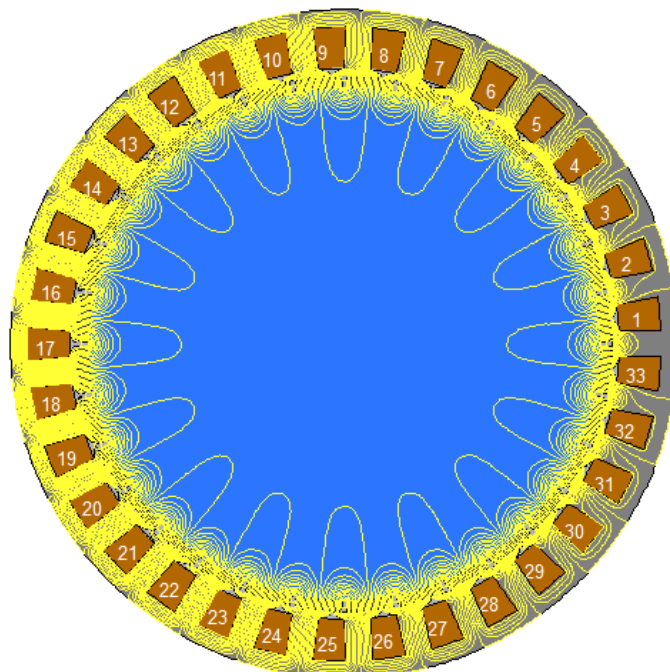


Fig. 4.23.a). Spectrul câmpului magnetic în cazul 1

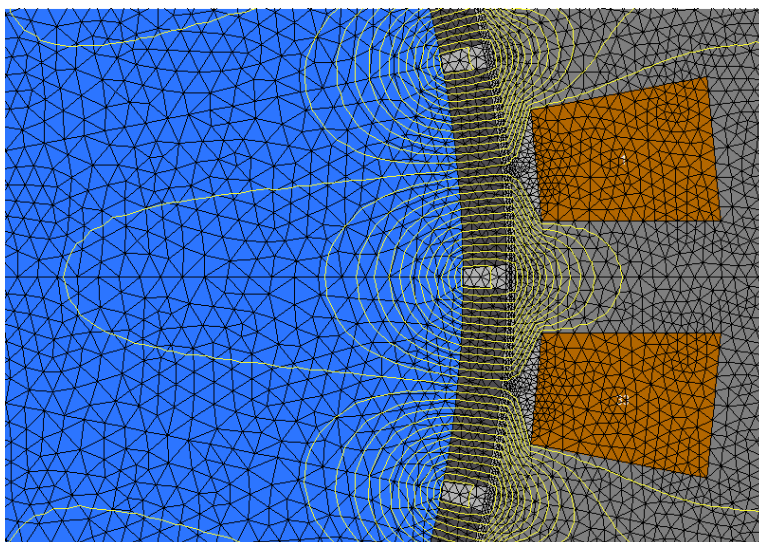


Fig. 4.23.b). Spectrul câmpului magnetic în cazul 1

În cel de-al doilea caz, rețeaua de discretizare generată este puțin mai rarefiată decât cea din primul caz, fiind constituită din 28253 noduri și 56042 elemente.

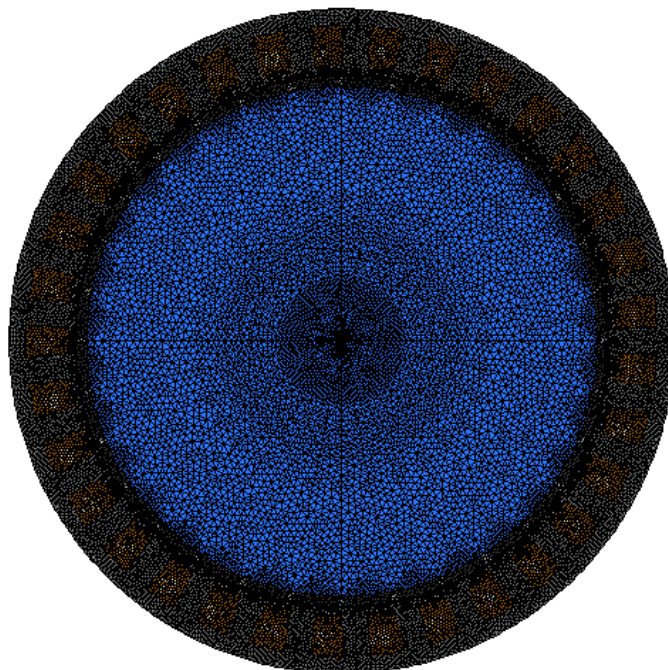


Fig. 4.24.a). Rețeaua de discretizare pentru cazul 2

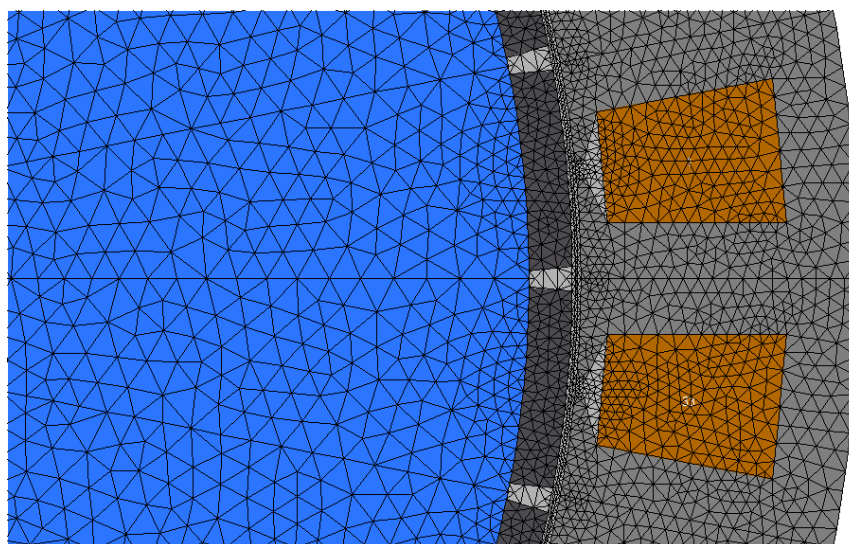


Fig. 4.24.b). Rețeaua de discretizare pentru cazul 2

Rezultatele spectrului câmpului magnetic generat pe baza nodurilor alese pentru rețea a doua sunt afișate în figurile 4.25.a) (anexa 8) și 4.25.b).

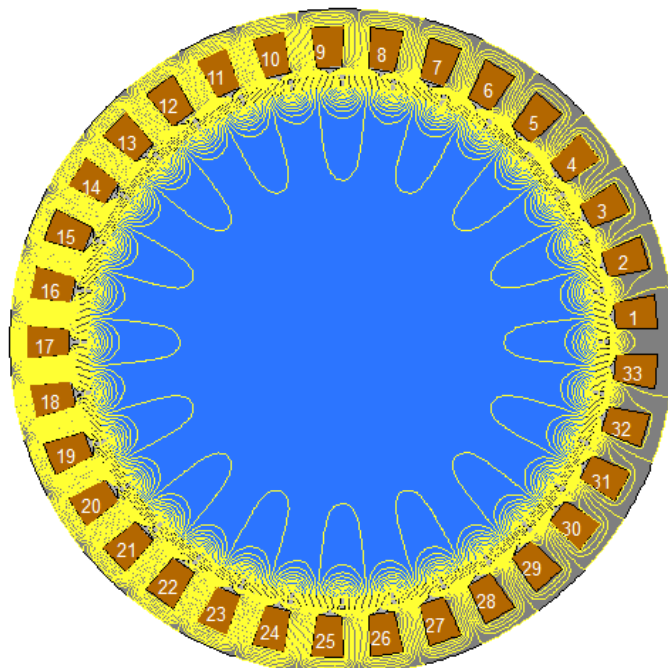


Fig. 4.25.a). Spectrul câmpului magnetic în cazul 2

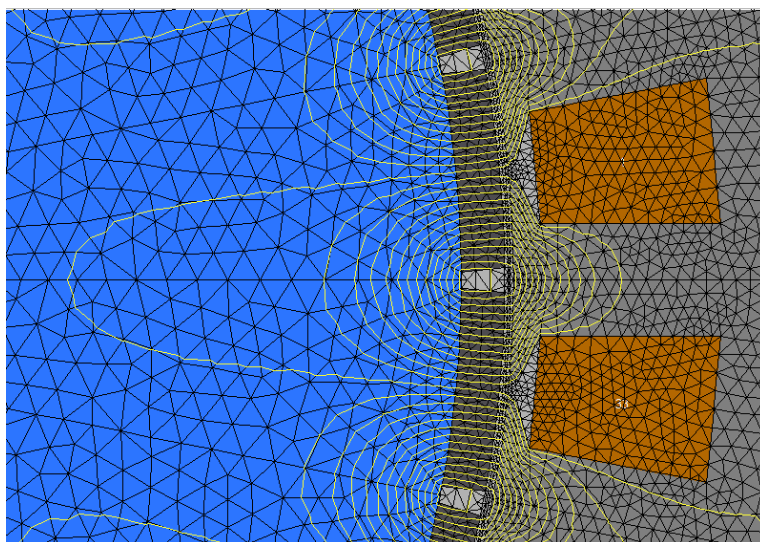


Fig. 4.25.b). Spectrul câmpului magnetic în cazul 2

În cele din urmă, în cel de-al treilea caz, pentru rețeaua de discretizare generată au fost utilizate 9996 noduri și 19924 elemente.

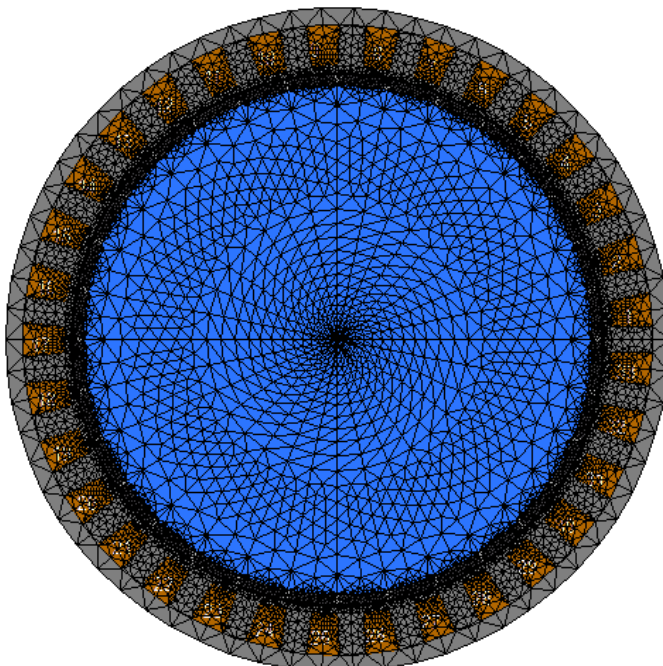


Fig. 4.26.a). Rețeaua de discretizare pentru cazul 3

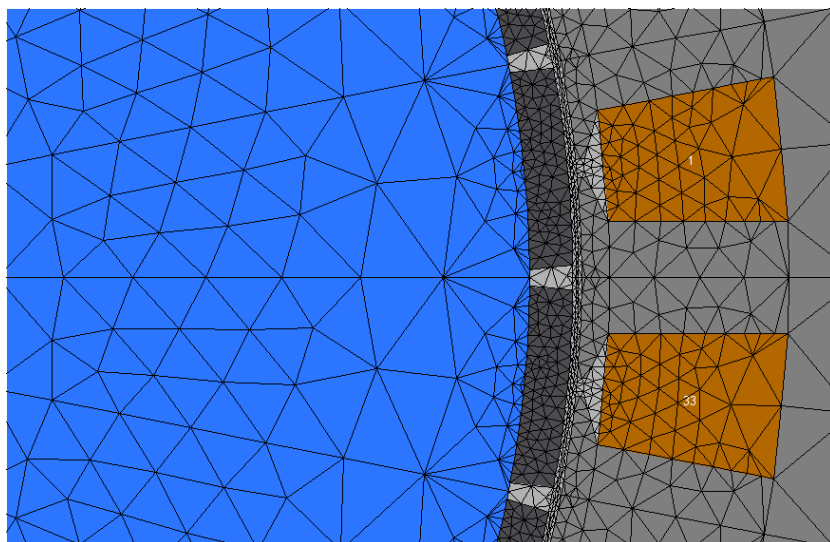


Fig. 4.26.b). Rețeaua de discretizare pentru cazul 3

Rezultatele spectrului câmpului magnetic generat pe baza nodurilor alese pentru rețeaua a treia sunt afișate în figurile 4.27.a) (anexa 9) și 4.27.b).

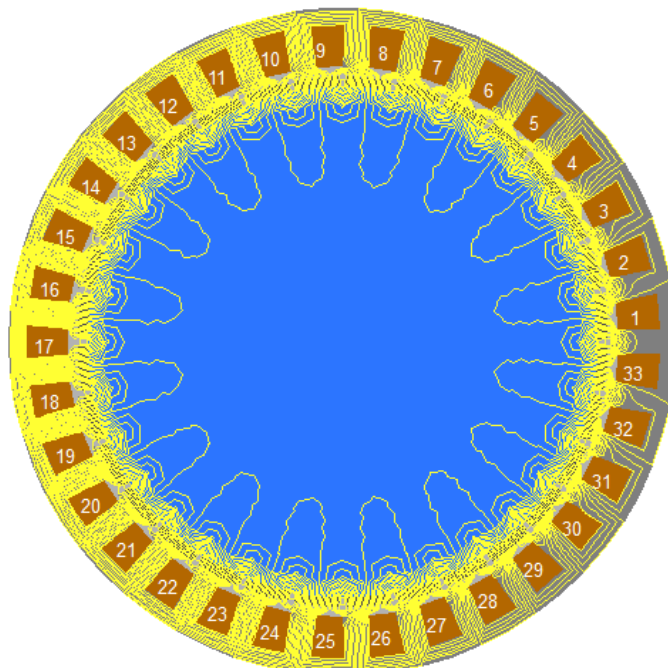


Fig. 4.27.a). Spectrul câmpului magnetic în cazul 3

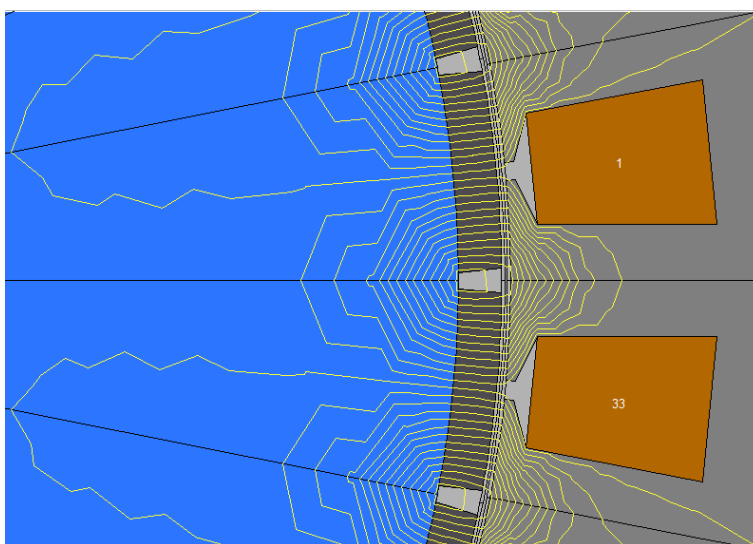


Fig. 4.27.b). Spectrul câmpului magnetic în cazul 3

În urma rezultatelor obținute în cele trei cazuri, prin compararea acestora se observă modul în care rețeaua de discretizare construită pe baza numărului de elemente finite impuse de către utilizator influențează calculele și automat rezultatele obținute. Concluzia care poate fi trasă din acest experiment de simulare este aceea că numărul de noduri trebuie ales optim astfel încât să influențeze cât mai puțin eroarea de calcul. Se observă din cazul trei, cel în care a fost utilizat un număr de noduri de aproximativ patru ori mai mic decât în primul caz, că din cauza numărului de noduri redus acestea sunt mai dispersate, iar rezultatele exprimate prin liniile de câmp magnetic sunt mai afectate de erori decât cele obținute în ambele cazuri anterioare.

După simularea câmpului magnetic realizată cu poziția rotorului în repaus se poate face trecerea la următoarea etapă și anume analiza mașinii în mișcare de rotație pentru determinarea tensiunilor electromotoare induse. În acest sens va fi setată în programul OPERA opțiunea de analiză urmându-se pașii "Model → Analysis Options → Rotating Machine Analysis (RM)". După ce sunt realizate setările necesare, rezultatele solicitate de către utilizator sunt calculate automat și exportate într-un fișier de tip text. Din acest fișier rezultatele pot fi importate și afișate numeric sau grafic.

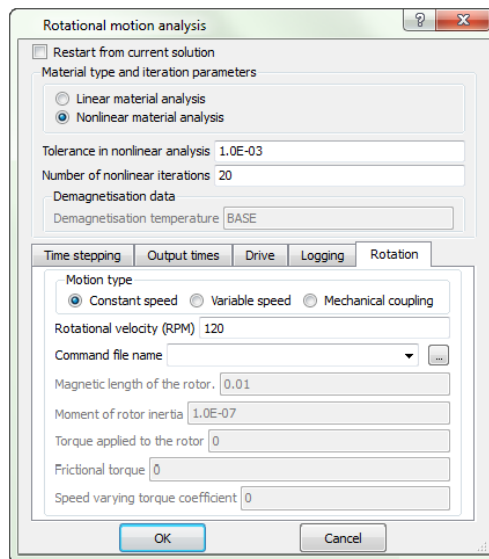


Fig. 4.28. Efectuarea setărilor pentru analiza mașinii în mișcare de rotație

Calculul tensiunii electromotoare induse de către magneții permanenți în înfășurările statorice la funcționare în gol reprezintă ecuația de proiectare de bază a generatorului. Valoarea efectivă a componentei fundamentale a tensiunii electromotoare poate fi calculată pe baza relației (4.5) în care  $\xi_1$  reprezintă factorul de înfășurare al armonicii fundamentale,  $W_s$  numărul de spire al bobinajului pe o fază,  $\Omega$  viteza unghiulară mecanică a rotorului,  $l_1$  lungimea statorului, iar  $B_\delta^{(1)}$  este armonica fundamentală de spațiu a inducției magnetice în întrefier [M9][F1].

$$E_0 = \sqrt{2} \cdot \xi_1 \cdot W_s \cdot \Omega \cdot \frac{D}{2} \cdot l_1 \cdot B_\delta^{(1)} \quad (4.5)$$

În cadrul analizei în mișcare de rotație a generatorului sincron cu magneți permanenți studiat ca și prim obiectiv a fost obținerea formelor de undă ale tensiunii electromotoare induse. Astfel au fost efectuate simulări pentru determinarea formelor de undă ale tensiunilor electromotoare induse în înfășurările statorice pentru funcționarea la turația nominală a rotorului,  $n_N = 120 \text{ rpm}$ , reprezentate în figura 4.29.

Valorile frecvenței și ale amplitudinii tensiunii electromotoare indusă sunt dependente de turația mașinii. La o turație precum cea nominală de exemplu, din egalitatea  $120 \text{ rot/min} = 2 \text{ rot/s}$  rezultă o perioadă  $T_s = 1/2 = 0.5 \text{ [s]}$ . Astfel, cu ajutorul relației (4.6) se poate calcula viteza unghiulară a rotorului,  $\Omega_s$ .

$$\Omega_s = \frac{2\pi}{T_s} = 12.57 \text{ [rad/s]} \quad (4.6)$$

Fiind determinată valoarea perioadei mecanice și cunoscând numărul de perechi de poli ai generatorului, pe baza relației (4.7) se poate calcula perioada tensiunii electromotoare induse:

$$T = \frac{T_s}{p} = \frac{0.5}{16} \cdot 10^3 = 31.25 \text{ [ms]} \quad (4.7)$$

Așadar se poate ajunge în final la determinarea frecvenței tensiunilor electromotoare induse folosind rezultatele obținute anterior în relația de mai jos:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{31.25} \cdot 10^3 = 32 \text{ [Hz]} \quad (4.8)$$

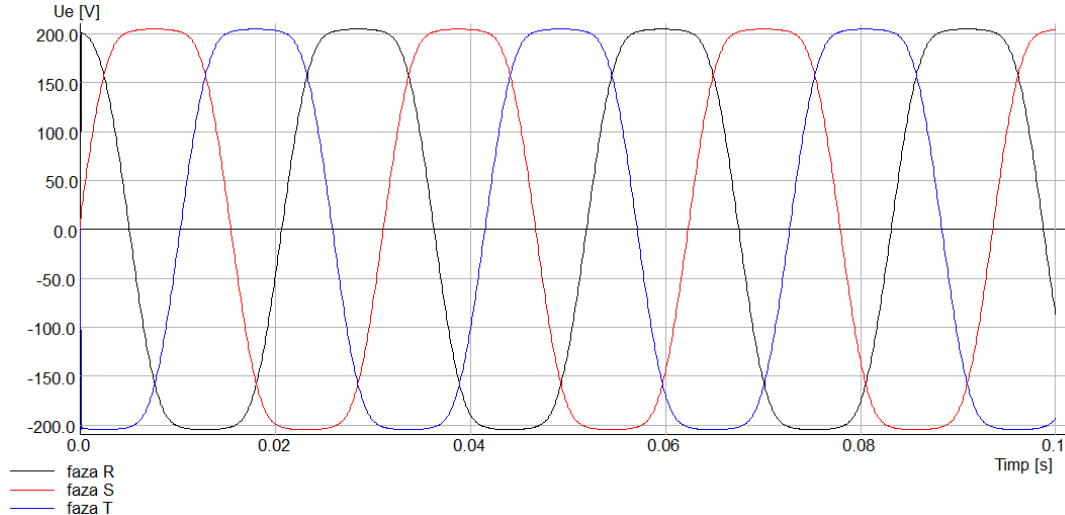


Fig. 4.29. Formele de undă ale tensiunii electromotoare induse pentru cele trei faze la turația  $n_N = 120 \text{ rpm}$

Valorile efective ale tensiunilor electromotoare induse pe fiecare fază pot fi calculate cu relația (4.9). Prin urmare, cu ajutorul relației (4.9) și a facilităților puse la dispoziție de către programul OPERA a fost determinată valoarea tensiunii



electromotoare pe faza R de exemplu,  $U_{R120} = 170.11 V$ , la turația nominală a rotorului,  $n_N = 120 rpm$ , pe o perioadă de rotație completă  $T = 0.03125 [s]$ .

$$U_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_e^2(t) dt} \quad (4.9)$$

De asemenea, a fost simulată situația pentru cazul în care turația scade la jumătate din turația nominală, adică pentru  $n = 60 rpm$ . În această situație perioada mecanică este  $T_s = 1 [s]$ , iar pe baza relațiilor (4.6) și (4.7) pot fi determinate valoarea perioadei și a frecvenței tensiunilor electromotoare induse la fel ca și pentru funcționarea la turația nominală  $n_N = 120 rpm$ . Astfel, la o turație de 60 rpm rezultă o valoare mai mare a perioadei tensiunii electromotoare decât la turația de 120 rpm,  $T = 62.5 [ms]$ , dar o valoare a frecvenței scăzută la jumătate și anume  $f = 16 [Hz]$ .

Prin urmare rezultă și o valoare a tensiunii electromotoare pe faza R de exemplu,  $U_{R120} = 85.06 V$ .

Aceste calcule sunt confirmate și de către rezultatele obținute în urma simulărilor, din figura 4.30 putându-se observa diferența dintre amplitudinea și frecvența tensiunii electromotoare în cazul în care turația mașinii scade la jumătate față de turația nominală.

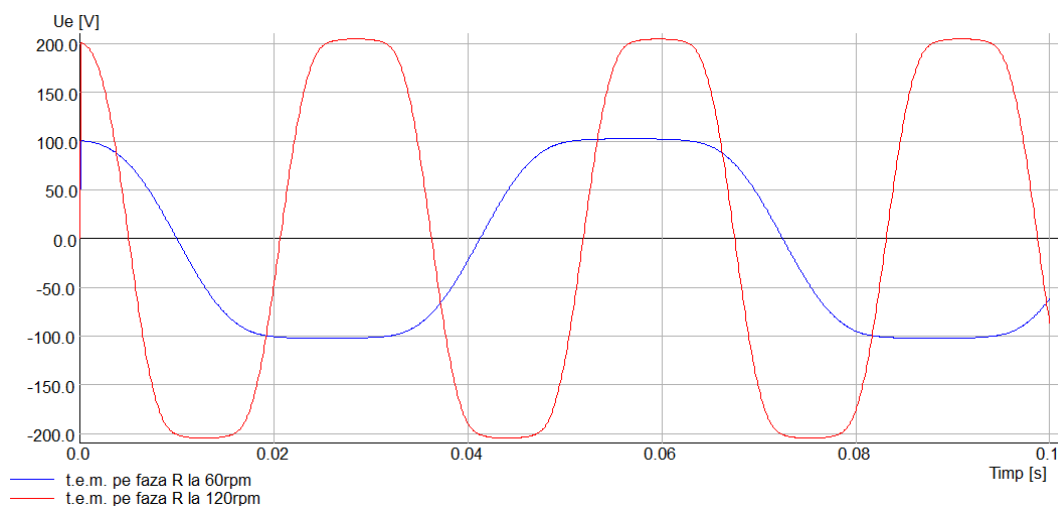


Fig. 4.30. Formele de undă ale tensiunii electromotoare induse pe faza R pentru funcționarea la diferite turații

Un parametru de proiectare foarte important al generatoarelor sincrone cu magneți permanenți este cuplul parazit. Acesta este produs de interacțiunea câmpului magnetic generat de către magneții permanenți și are ca efect tendința rotorului de a se alinia într-o poziție de echilibru în raport cu statorul. Valoarea sa este determinată de către unghiul geometric, indiferent de turația generatorului care poate să fie nulă sau cea nominală. Reducerea cuplului parazit este un obiectiv foarte important deoarece acesta nu contribuie la valoarea cuplului util și mai mult decât atât are efecte negative

asupra funcționării mașinii deoarece poate să producă fenomene tranzitorii și să inducă vibrații [Z1].

Se poate demonstra [Z1] că valoarea instantanee a cuplului parazit într-un generator sincron cu magneți permanenți este nulă în două situații, și anume prima situație când axele interpolare se aliniază cu centrul dinților statorici, iar cea de-a doua situație când axele interpolare se aliniază cu centrul creștăturilor.

În figura următoare este ilustrat cuplul parazit al generatorului sincron cu magneți permanenți studiat.

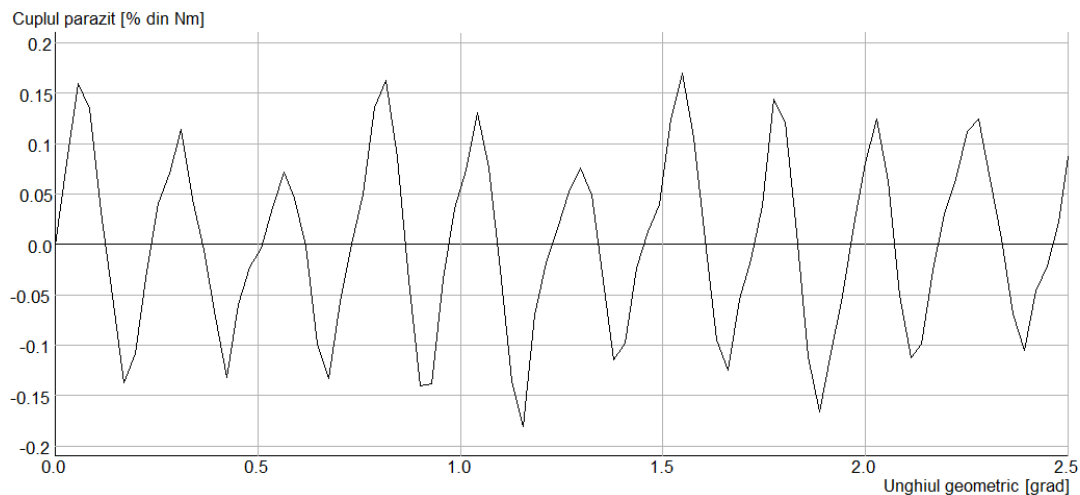


Fig. 4.31. Cuplul parazit al prototipului GSMP studiat obținut pe baza metodei elementului finit cu ajutorul OPERA

Din calculul bazat pe metoda elementului finit se observă din figura 4.31 că pentru generatorul sincron studiat cuplul parazit înregistrează valori maxime relativ scăzute, reprezentând aproximativ 0.17% din cuplul nominal. Astfel este demonstrat faptul că generatorul poate să fie eficient și în zonele cu potențial eolian mai redus, deoarece este cunoscut faptul că pentru valori ridicate ale cuplului parazit pot fi afectate funcționarea normală și pornirea ansamblului eolian la viteze mici ale vântului, fiind afectat astfel randamentul generatorului [T3][Z1].

### 4.3 Caracteristicile funcționale ale generatoarelor sincrone

În cadrul proiectării mașinilor electrice sunt stabilite inițial dimensiunile mașinii și ulterior performanțele tehnico-economice ale acestora care trebuie să fie apropiate de cele impuse. Aceste necunoscute sunt analizate pe baza datelor nominale și de proiectare, iar răspunsurile sunt oferite pe baza calculului electromagnetic. Așadar, valorile care oferă indicații cu privire la corectitudinea dimensiunilor stabilite și a performanțelor mașinii sunt determinate, în urma calculului electromagnetic, de către caracteristicile de funcționare ale mașinii [C4][N1][D5].

Caracteristicile generatorului sincron trifazat în regim staționar simetric se pot determina fie în mod direct pe cale experimentală, fie prin calcul dacă se cunoaște caracteristica de magnetizare a mașinii și valorile parametrilor care la rândul lor se determină experimental sau analitic. Caracteristicile de funcționare sunt reprezentate de către relațiile dintre mărimi precum: tensiunea generată la borne  $U$ , tensiunea electromotoare indusă  $E_0$ , curentul de sarcină  $I$ , curentul de excitație  $I_e$ , puterea primită la arbore  $P_1$ , puterea electromagnetică  $P_e$ , factorul de putere  $\cos \varphi$ , unghiul intern  $\vartheta$  și frecvența  $f$ . De obicei, aceste caracteristici se studiază pentru frecvență, respectiv turație constantă, fiind analizată dependența dintre aceste mărimi luate câte două, iar celelalte sunt considerate constante [B10][D5][B3][N1].

Din punct de vedere al sarcinii, un generator sincron poate funcționa în mai multe situații. Cea mai comună situație este aceea în care un generator sincron, de obicei de putere medie sau mare, face parte dintr-un sistem electroenergetic. În acest caz acesta reprezintă doar un element dintr-o rețea considerată de putere infinită alcătuită dintr-un număr mare de centrale electrice în care generatoarele sincrone funcționează conectate în paralel pe un sistem de bare colectoare. La rândul lor centralele sunt interconectate prin linii de transport a energiei electrice. Sistemului electroenergetic i se adaugă și consumatorii, aceștia reprezentând sarcina. În cadrul unui astfel de sistem, orice modificare de valoare finită a sarcinii produce o modificare insensibilă a tensiunii sau a frecvenței care caracterizează acea rețea [B3].

Un tip de configurație mai simplă este întâlnită atunci când un generator sincron, de putere relativ mică, funcționează pe o rețea proprie. În acest caz despre generatorul respectiv se spune că funcționează în regim autonom. Acesta este cazul în care un singur generator sincron alimentează o rețea de receptoare cu o impedanță echivalentă dată. Tensiunea la bornele generatorului, frecvența și curentul debitat sunt strict dependente de parametrii generatorului (rezistențe, reactanțe), de curentul de excitație și de puterea mecanică.

În continuare sunt enumerate cele mai impotante caracteristici pe baza cărora poate fi studiat un generator sincron care funcționează în regim autonom [B3]:

- caracteristica de mers în gol:  $E_0 = f(I_e)$ , pentru  $I = 0$ ;
- caracteristicile de scurtcircuit:  $I_{sc} = f(I_e)$ , pentru  $U = 0$ ;
- caracteristicile în sarcină:  $U = f(I_e)$ , pentru  $I = ct.$  și  $\cos \varphi = ct.$ ;
- caracteristicile externe:  $U = f(I)$ , pentru  $I_e = ct.$  și  $\cos \varphi = ct.$ ;
- caracteristicile de reglaj:  $I_e = f(I)$ , pentru  $U = ct.$  și  $\cos \varphi = ct.$ ;

Pentru situația în care generatorul sincron funcționează pe o rețea de putere mare, caracterizată de tensiune și frecvență constante, fiind conectat în paralel cu alte generatoare, caracterizarea funcționării sale este descrisă de către caracteristicile enumerate anterior la care se mai adaugă încă două [B3]:

- caracteristica unghiulară:  $P_e = f(\vartheta)$ , pentru  $U = ct.$  și  $I_e = ct.$ ;
- caracteristicile în V:  $I = f(I_e)$  și  $\cos \varphi = f(I_e)$  pentru  $U = ct.$  și  $P_e = ct.$

#### 4.4 Caracteristica externă a generatorului sincron cu magneți permanenți în regim autonom

Caracteristicile externe ale generatorului sincron reprezintă dependența variației tensiunii la bornele sale în funcție de curentul de sarcină, adică  $U = f(I)$ . Această variație este reprezentată de către modificarea câmpului rezultat din mașină datorită efectului de reacție al curentului din indus. Trasarea caracteristicilor externe se realizează de obicei pentru generatoarele sincrone cu funcționare în regim autonom.

Condițiile impuse pentru trasarea caracteristicilor externe sunt reprezentate de antrenarea și menținerea generatorului la o turație constantă și egală cu cea nominală, adică  $n = n_n = ct.$  și la factor de putere constant,  $\cos \varphi = ct.$  Mai mult decât atât, variația tensiunii la borne trebuie să se desfășoare în absența reglajului excitației la generator, lucru care conduce la impunerea unui curent de excitație constant,  $I_e = ct.$  Această condiție este îndeplinită automat la generatoarele la care lipsește înfășurarea de excitație, precum în cazul generatorului sincron cu magneți permanenți studiat în cazul de față. Deoarece curentul de excitație este constant rezultă faptul că tensiunea electromotoare indusă  $E_0$  este constantă [D5][B3].

Dacă toate condițiile impuse sunt îndeplinite atunci se poate trece la pasul următor și anume măsurarea mărimilor electrice cu ajutorul cărora este apoi reprezentată dependența dintre tensiunea la borne în funcție de curent pentru trei tipuri de sarcină (figura 4.32), și anume: sarcină rezistivă (a), sarcină rezistiv-inductivă (b) și sarcină rezistiv-capacitivă (c). Reacția indusului are acțiune diferită, demagnetizantă sau magnetizantă, de aici rezultând faptul că la creșterea curentului de sarcină la un consumator cu factor de putere variabil, tensiunea la borne scade în cazul sarcinilor rezistivă și inductivă, iar la sarcină capacitivă crește.

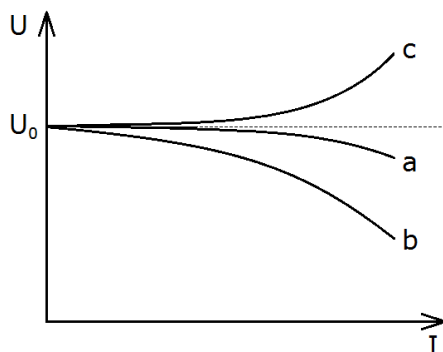


Fig. 4.32. Caracteristicile externe ale generatorului sincron

Caracteristica externă se poate determina experimental relativ simplu utilizând un sistem de achiziție și prelucrare a datelor dedicat, așa cum se va prezenta în partea experimentală a tezei. Determinarea analitică a caracteristicii externe pentru generatorul sincron cu magneți permanenți studiat a fost trasată pe baza calculelor realizate cu metoda elementului finit în OPERA.

Pentru determinarea caracteristicii externe a generatorului sincron cu magneți permanenți de 5 kVA studiat au fost efectuate simulări pe baza modelului construit în

OPERA. Simulările au fost efectuate la o turație constantă egală cu cea nominală,  $n_n = 120 \text{ rpm}$ , pentru tip de sarcină pur rezistivă. Astfel au fost efectuate o serie de simulări în gol și în sarcină pentru valorile rezistențelor din tabelul 4.1, iar tensiunea și curentul obținute pentru fiecare valoare a sarcinii sunt expuse în același tabel, pe baza lor fiind obținută puterea activă utilă  $P_2$  debitată de către generator la exterior.

Tabelul 4.1. Parametrii generatorului sincron la variația unei sarcini rezistive

Nr. crt.	R [ $\Omega$ ]	U [V]	I [A]	P <sub>2</sub> [kW]
1	6.5	119.18	18.336	6.556
2	9.1	133.63	14.685	5.887
3	13	145.64	11.203	4.895
4	19.5	155.29	7.964	3.71
5	23.4	158.45	6.771	3.219
6	26	159.97	6.153	2.953
7	52	166.11	3.194	1.592
8	13000	170.12	0.013	0.007

În situația încărcării generatorului cu o sarcină pur rezistivă, tensiunea la borne se poate calcula utilizând diagrama fazorială reprezentată în figura 4.33 [M9].

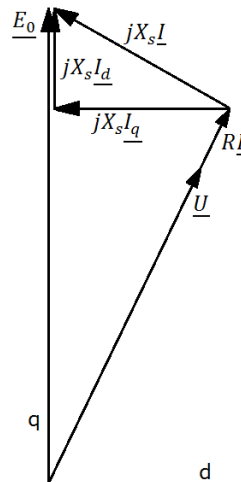


Fig. 4.33. Diagrama fazorială a GSMP reprezentată pentru una dintre faze în condiții de încărcare cu sarcină rezistivă

Conform diagramei fazoriale ilustrată anterior, se poate scrie ecuația (4.10) care exprimă relația matematică pentru tensiunea electromotoare indusă  $E_0$ , iar din această relație rezultă egalitatea (4.11) care descrie tensiunea la bornele generatorului. Celelalte mărimi fizice pe care se bazează aceste relații sunt  $R$  - rezistența înfășurării statorice pe fază, curentul de sarcină  $I$  și  $X_s$  - reactanța sincronă pe fază [M9].

$$E_0^2 = (U + R \cdot I)^2 + (X_s \cdot I)^2 \quad (4.10)$$

$$U = \sqrt{E_0^2 - (X_s \cdot I)^2} - R \cdot I \quad (4.11)$$

Variația tensiunii la bornele generatorului în funcție de curentul de sarcină este prezentată în figura următoare și în anexa 10. Această curbă reprezintă caracteristica externă a generatorului studiat determinată pe baza rezultatelor din tabelul 4.1 obținute din calculul pe baza metodei elementului finit în urma simulărilor în OPERA.

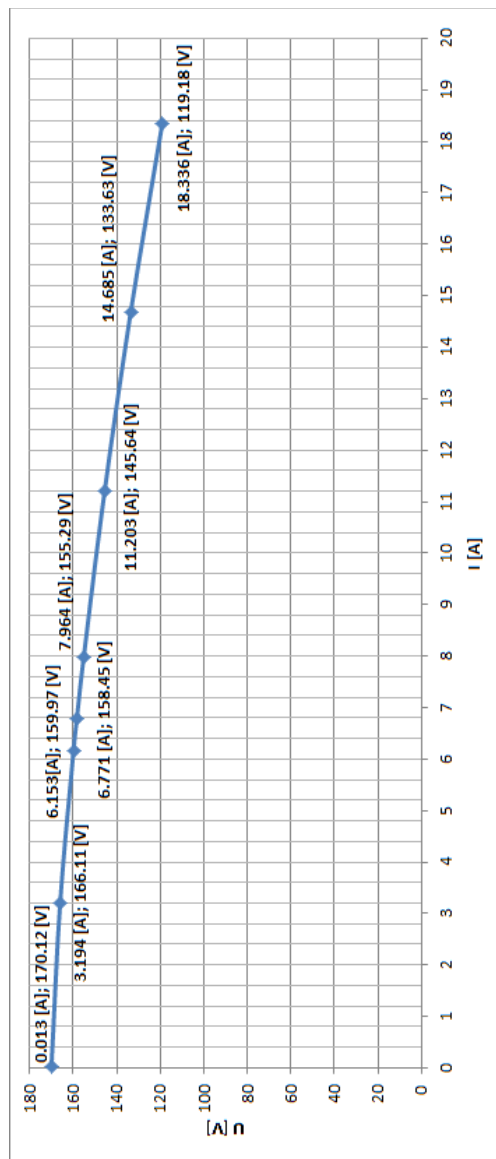


Fig. 4.34. Caracteristica externă  $U = f(I)$  la sarcină rezistivă obținută pe baza simulărilor din OPERA

## **4.5 Îmbunătățirea caracteristicii externe a GSMP cu funcționare în regim autonom prin metode constructive**

Pentru funcționarea generatorului sincron cu magneți permanenți în regim autonom în aplicații eoliene caracteristica externă reprezintă un factor foarte important care oferă informații despre calitatea energiei electrice livrate, indicând în mod direct dependența dintre variația tensiunii la bornele generatorului și curentul de sarcină.

Astfel menținerea aproximativ constantă a tensiunii de alimentare a consumatorilor este o cerință impusă importantă. Aceasta este dependentă de topologia constructivă a generatorului, de viteza de rotație a câmpului magnetic învârtitor, de curentul de excitație și de caracterul electric al consumatorilor. Pentru sisteme eoliene autonome, cel mai la îndemână lucru pentru menținerea tensiunii în banda admisă este ajustarea curentului din circuitul de excitație [H3].

Este cunoscut faptul că utilizarea magneților permanenți ca sursă de excitație la generatoarele sincrone nu reprezintă un concept nou, însă deși există de mulți ani aplicațiile lor sunt limitate. Această constrângere este cauzată de către efectul constant al câmpului de excitație generat de către magneții permanenți. Acest lucru face ca excitația la generatoarele sincrone cu magneți permanenți să nu poată fi ajustată, iar în consecință tensiunea la borne nu rămâne constantă la variații ale sarcinii de încărcare, valoarea sa modificându-se în funcție de curentul de sarcină. În lipsa unui curent exterior necesar pentru stimularea câmpului magnetic învârtitor, posibilitățile de îmbunătățire ale caracteristicii externe se referă la utilizarea echipamentelor de electronică de putere și prin metode constructive eficiente [B10][D1].

O modalitate de reglare a mărimilor electrice de ieșire ar mai fi prin controlul densității fluxului magnetic din întrefier, însă aceasta reprezintă cazul particular al unui tip de generator sincron cu magneți permanenți studiat în [G4].

Un exemplu de control cu ajutorul echipamentelor de electronică de putere pentru parametrii de ieșire ai unui generator sincron cu magneți permanenți de 5 kVA ce echipează un sistem eolian autonom este realizat prin intermediul unui redresor și al unui sistem bazat pe metoda de urmărire a punctului maxim de putere. Un studiu pentru acest tip de sistem este prezentat în [D4]. Din concluziile acestui studiu a rezultat faptul că acest tip de sistem maximizează conversia energiei eoliene prin reglarea tensiunii de ieșire la bornele generatorului sincron cu magneți permanenți.

S-a observat din mai multe studii [S5][S7][B4][H4][E2][G1][S4][D3][R3][D2][W1] că utilizarea magneților permanenți la generatoarele sincrone permite utilizarea a numeroase configurații ale rotorului și statorului mașinii. Cea mai obișnuită topologie a generatoarelor sincrone cu magneți permanenți este configurația cu magneții permanenți montați pe suprafața exterioară a rotorului asigurându-se astfel performanțe bune și eficiență ridicată, precum și o structură mecanică mai simplă a rotorului [G5].

Zhu și Howe au studiat [Z1] influența parametrilor de proiectare asupra performanțelor mașinilor cu magneți permanenți, unul dintre aceștia fiind lățimea magneților permanenți. Pornind de la această ipoteză este propus în continuare un studiu referitor la modificarea lățimii magneților permanenți pentru prototipul generatorului sincron avut în vedere. Cu ajutorul mediului OPERA va fi redefinită

geometria inițială a magneților permanenți. Vor fi astfel efectuate simulări în OPERA la aceiași parametri și aceleași condiții de încărcare similare cu cele în care a fost testat inițial generatorul sincron a cărui lățime a magneților este  $l_m = 32 \text{ mm}$ . Vor fi efectuate simulări pentru magneți cu următoarele lățimi:  $l_m = 34 \text{ mm}$ ,  $l_m = 28 \text{ mm}$  și  $l_m = 24 \text{ mm}$ .

Rezultatele obținute în urma simulărilor pentru lățimi diferite ale magneților permanenți demonstrează, așa cum era de așteptat, faptul că valoarea efectivă a tensiunii induse este dependentă direct proporțional cu valoarea lungimii acestora.

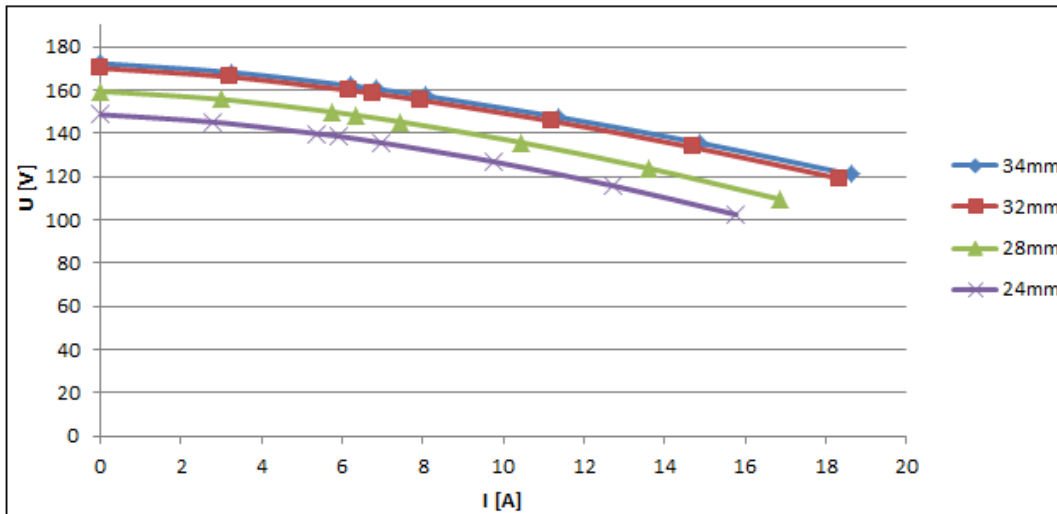
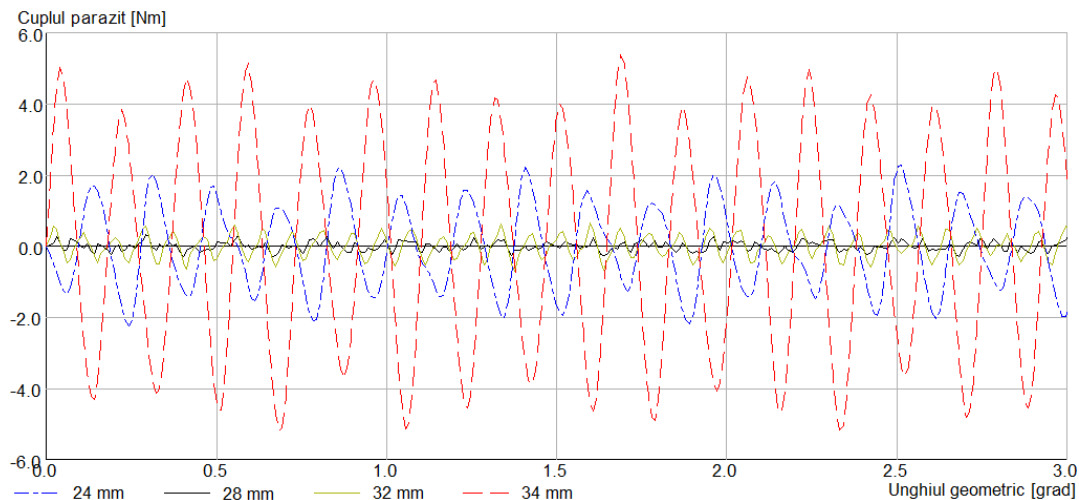


Fig. 4.35. Dependența caracteristicii externe a GSMP în funcție de lățimea magneților permanenți

Lățimea magneților permanenți are influență directă și asupra cuplului parazit, acesta fiind produs de interacțiunea câmpului magnetic generat de către magneții permanenți. Valoarea sa este determinată de către unghiul geometric, indiferent de turația generatorului care poate să fie atât nulă, cât și cea nominală. Reducerea cuplului parazit reprezintă un obiectiv foarte important în proiectarea generatoarelor sincrone, acesta având un efect negativ asupra acestora, mai ales la funcționarea la turații scăzute [Z1].

În figura următoare este ilustrat cuplul parazit al generatorului sincron cu magneți permanenți studiat, fiind efectuate simulări în aceleași condiții pentru diferite lățimi ale magneților permanenți.





Conform figurii 4.36 se observă că valoarea cea mai mare a cuplului parazit corespunde în cazul magnetilor de lățime  $l_m = 34 \text{ mm}$ . Odată cu micșorarea lățimii scade semnificativ și amplitudinea cuplului parazit, aceasta fiind minimă pentru o lățime a magnetului de aproximativ 28 – 32 mm, după care se observă din nou creșterea cuplului.

Pe baza rezultatelor obținute în urma simulărilor în OPERA este demonstrat faptul că lățimea optimă pentru magneții permanenți este  $l_m = 32 \text{ mm}$ , deși din punct de vedere al cuplului parazit se observă din figura 4.36 că acesta are valoarea cea mai mică pentru  $l_m = 28 \text{ mm}$ . Însă un lucru foarte important pentru care magneții permanenți  $l_m = 32 \text{ mm}$  sunt superiori celor  $l_m = 28 \text{ mm}$  îl reprezintă caracteristica externă, observându-se din figura 4.35 faptul că aceștia oferă performanțe mult mai bune pentru sarcini de încărcare identice. Spre exemplu valoarea tensiunii electromotoare indusă pentru funcționarea la mers în gol reprezintă  $U_{l_m 28} = 159.38 \text{ V}$ , iar pentru  $U_{l_m 32} = 170.12 \text{ V}$ .

Un mare dezavantaj al GSMP reiese din natura câmpului de excitație care este constant, astfel că tensiunea la borne variază în funcție de sarcina de încărcare. La generatoarele sincrone convenționale, reactanța sincronă longitudinală  $d$  este mai mare decât reactanța sincronă transversală  $q$ , astfel că gradul de saliență are un efect nesemnificativ asupra tensiunii la borne și a puterii în plaja normală de funcționare. S-a dovedit însă faptul că generatoarele sincrone cu magneți permanenți îngropați în rotor oferă un efect de saliență inversă în comparație cu generatoarele sincrone convenționale cu magneți proeminenți, ceea ce înseamnă că reactanța axei  $q$  poate fi în unele situații mai mare decât reactanța axei  $d$  [D1][C5][D6].

Chan și Dutta au prezentat în articolele lor [C5][D1] această metodă constructivă a unui generator sincron cu magneții permanenți inserați în rotor, reprezentând o perspectivă nouă pentru acest tip de generatoare. Cu ajutorul metodei elementului finit au demonstrat prin efectul produs de către acest model constructiv că acesta poate fi exploatat pentru îmbunătățirea caracteristicii externe.

Performanța la acest tip de generatoare este analizată de obicei în regim staționar prin utilizarea teoriei convenționale a celor două axe, longitudinală și transversală. Densitatea fluxului magnetic definește axa d cu orientare radială pe direcția centrului magnetului permanent, iar axa q este definită în regiunea interpolară. În axa d, liniile de câmp ale inducției magnetice trebuie să traverseze cei doi magneți dispuși consecutiv, plus întrefierul de două ori. Deoarece permeabilitatea magneților de pământuri rare este apropiată de cea a aerului din întrefier, spațiul ocupat de către magnet în axa d apare ca și o serie de întrefieruri în calea fluxului din axa d, iar de-a lungul axei q întrefierul este mai mic decât în axa d, iar fluxul axei q poate trece prin piesele polare fără a traversa magnetul. În consecință, reactanța sincronă în axa q este mai mare decât reactanța axei d. Această proprietate de „saliență inversă” al acestui tip de generator sincron cu magneți permanenți poate fi exploatată pentru îmbunătățirea caracteristicii externe, trecând peste dezavantajul absenței controlului asupra câmpului electromagnetic [D1][C5][G7].

Modul de amplasare a magneților permanenți la această topologie de generatoare sincrone face ca liniile de câmp ale densității fluxului magnetic să fie concentrate în polii rotorului și forțate înspre direcția întrefierului [C1].

Pornind de la aceste considerente a fost modificată în OPERA structura rotorului generatoului sincron analizat, Prototip 1, prin introducerea mai multor straturi de piese interpolate între magneții dispuși radial pe suprafața rotorului, conform figurii 4.37.

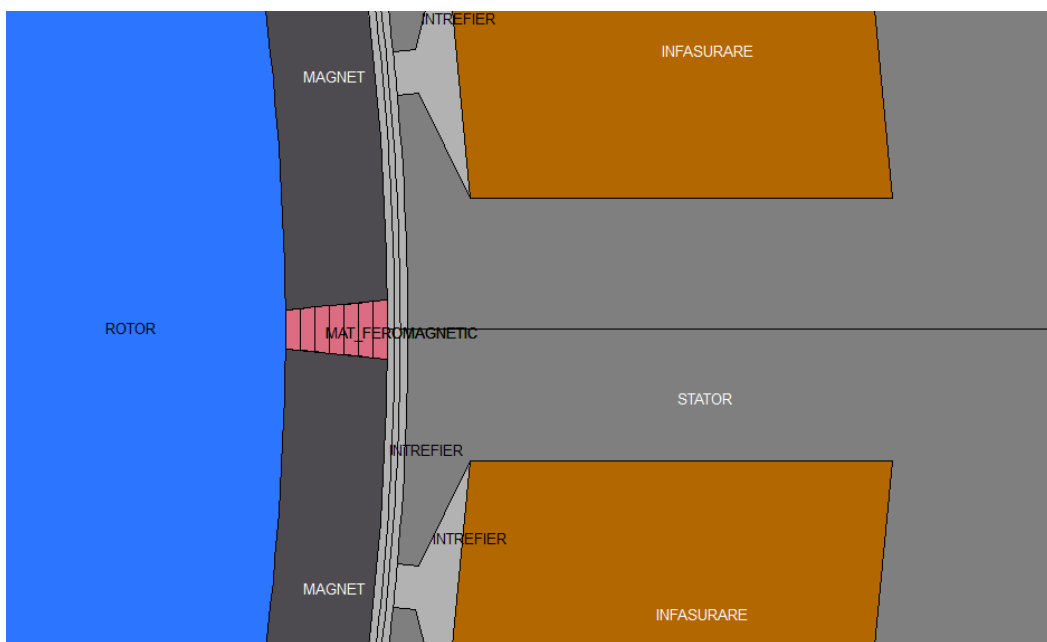


Fig. 4.37. Prezentarea GS cu piese feromagnetice introduse în spațiul interpolar

Rezultatele obținute în urma modificărilor sunt comparate cu cele obținute la Prototipul 1. Se observă din figura 4.38 (și anexa 11, respectiv anexa 12) că în ceea ce privește spectrul câmpului magnetic acesta nu se modifică vizibil.

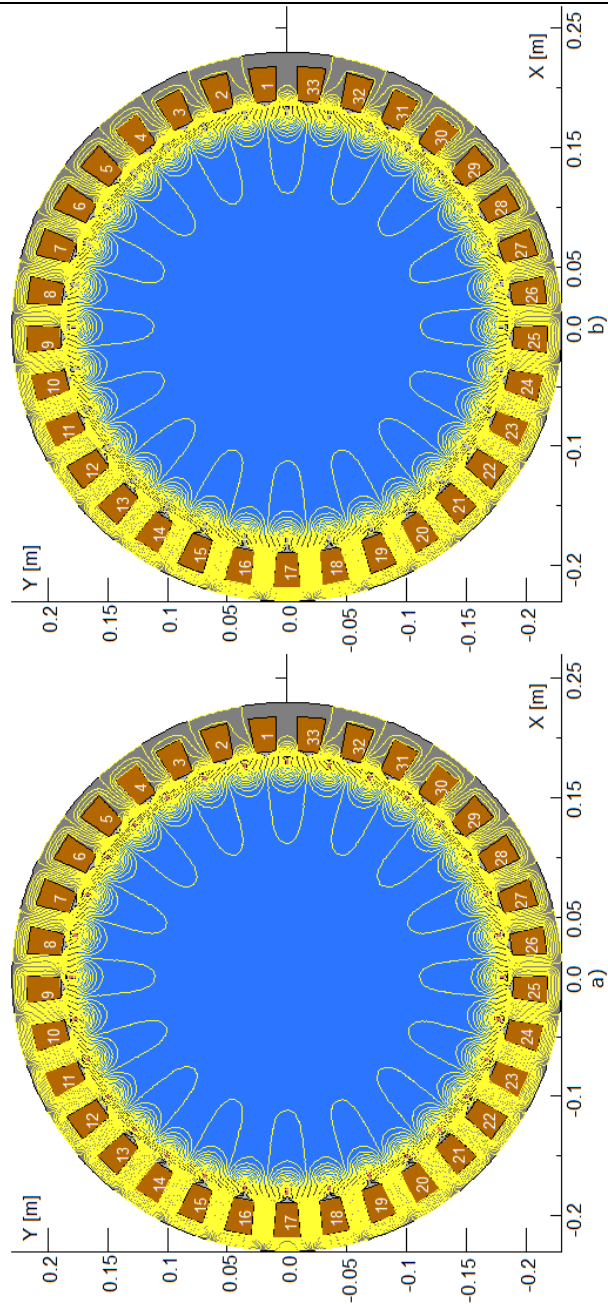


Fig. 4.38. Spectrul câmpului magnetic al generatorului pentru cele două cazuri: a) cu piese feromagnetice; b) fără piese feromagnetice în spațiul interpolar;

O mică diferență apare la distribuția densității inducției magnetice în întrefier. În figura 4.39 este reprezentată distribuția inducției magnetice pentru cazul generatorului fără piese feromagnetice în spațiul interpolar. Se observă din figura 4.40 că atunci când sunt introduse piesele feromagnetice în spațiul interpolar se modifică distribuția inducției magnetice în axa q, cea care are ca și corespondență zona A. Ambele reprezentări sunt valabile pentru starea de repaus a rotorului.

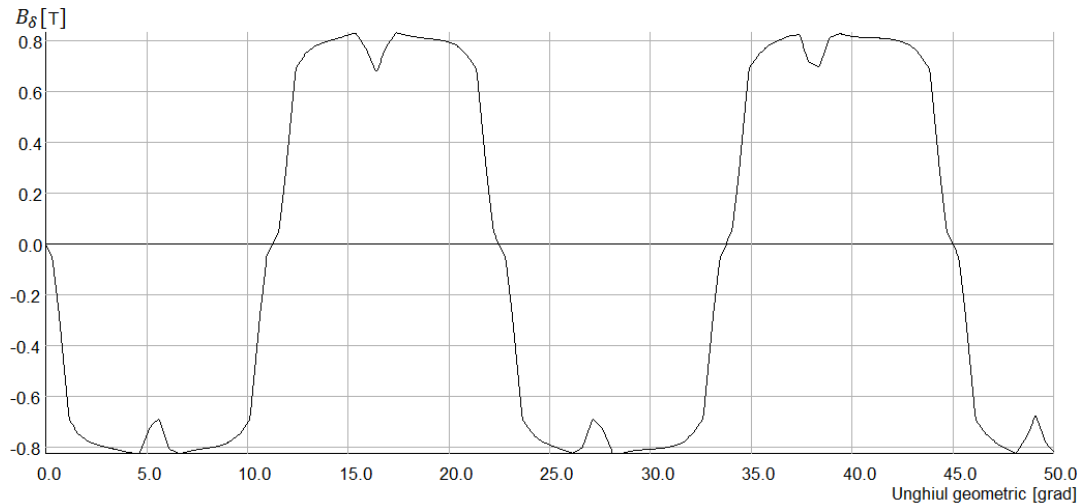


Fig. 4.39. Distribuția inducției magnetice fără piese interpolare

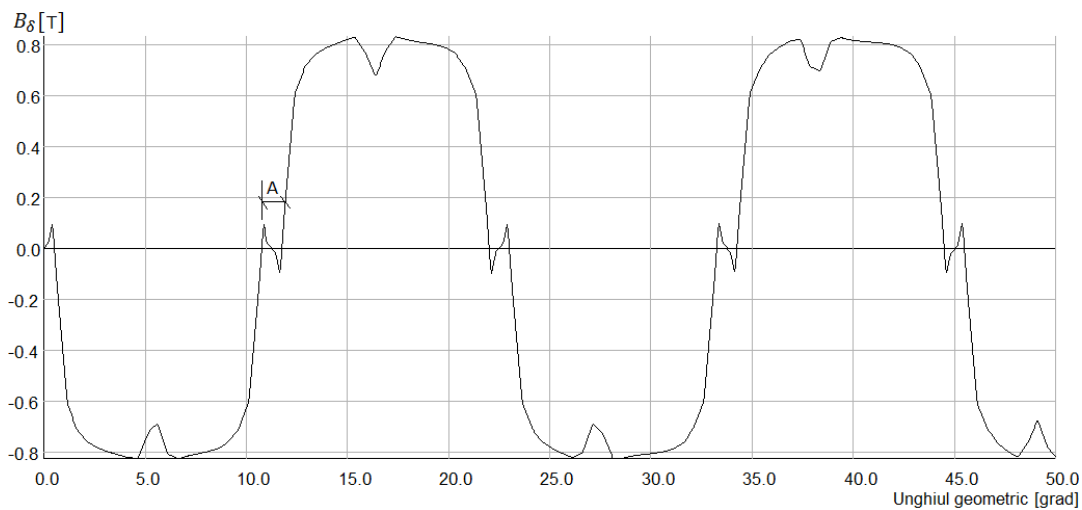


Fig. 4.40. Distribuția inducției magnetice cu piese interpolare

Modificări semnificative nu apar nici în ceea ce privește comparația caracteristicilor externe obținute pentru cele două cazuri, reprezentate în figura 4.41.

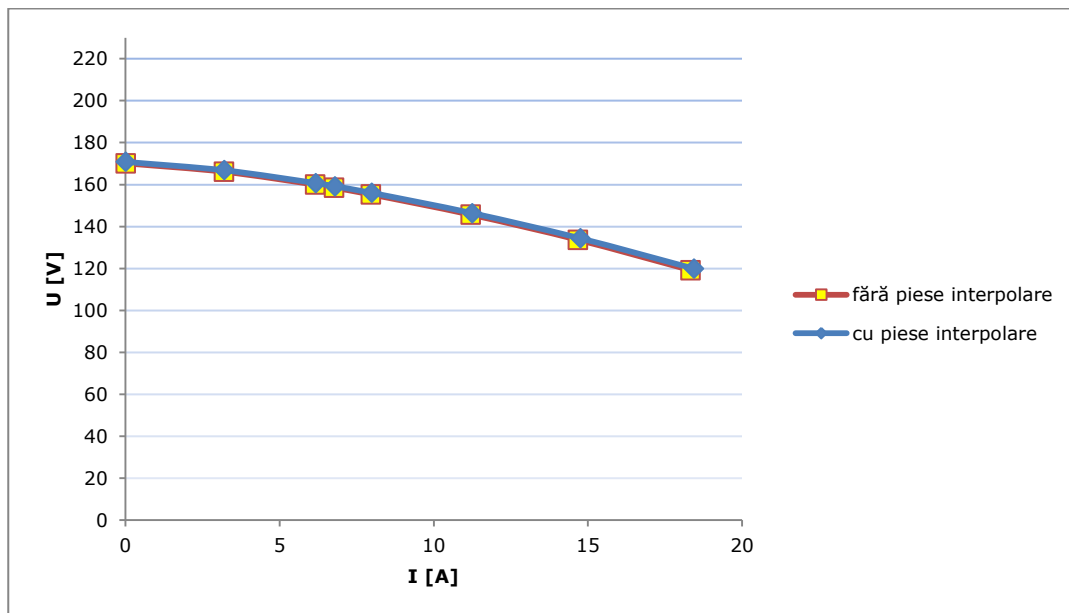


Fig. 4.41. Caracteristicile externe pentru cele două cazuri

În urma acestor comparații se poate concluziona faptul că introducerea pieselor feromagnetice în spațiul interpolar nu are o influență semnificativă în ceea ce privește îmbunătățirea performanțelor generatorului sincron studiat. Acest lucru se întâmplă deoarece generatorul are un număr mare de poli și în consecință un pas polar mic, astfel că această soluție devine avantajoasă doar în cazul generatoarelor cu un număr mic de poli. Acest lucru este demonstrat în capitolul 7 care este dedicat analizei unui generator sincron cu magneți permanenți cu un număr mic de poli pentru evidențierea efectului de saliență inversă.

## 4.6 Concluzii

În acest capitol au fost prezentate topologia generatorului sincron cu magneți permanenți studiat, datele de proiectare și construirea pe baza acestora a modelului în mediul software OPERA. Au fost prezentați și ilustrați prin figuri descriptive toți pașii esențiali care trebuie urmați în acest proces.

După construirea modelului a fost realizată atât analiza în regim static a generatorului, cât și analiza în mișcare de rotație. La analiza în regim static a fost îndeplinit unul dintre principalele obiective propuse pentru analiza performanțelor generatorului sincron cu magneți permanenți studiat și anume obținerea spectrului câmpului magnetic. Determinarea acestuia reprezintă punctul de plecare pentru analiza performanțelor generatorului, rezultând mai departe diferite caracteristici și diferiți parametri precum formele de undă ale tensiunilor electromotoare induse, caracteristica

externă a generatorului, curenți, randament, cuplul parazit, etc. De asemenea, soluția câmpului magnetic oferită de către mediul OPERA permite analizarea unor aspecte legate de procesul de proiectare, respectiv de funcționare a mașinii electrice, precum identificarea eventualelor zone feromagnetice saturate pentru care este necesară revenirea asupra procesului de proiectare și calculul pierderilor în fier din circuitul magnetic principal sau din diferite regiuni adiacente. Tot referitor la distribuția câmpului magnetic a fost evidențiată cu ajutorul simulărilor în OPERA variația fluxului magnetic util și al fluxului de dispersie în funcție de poziția magnetului în raport cu dinții statorului și de asemenea variația componentei normale a inducției  $B_n$  în întrefier pe întreaga mașină pentru o poziție oarecare a rotorului.

Un alt aspect important evidențiat în acest capitol a fost influența numărului de noduri impus de către utilizator asupra preciziei rezultatelor obținute în OPERA, impactul acestora fiind oglindit asupra liniilor câmpului magnetic. Acest lucru a fost exemplificat prin afișarea spectrului câmpului magnetic calculat în OPERA pe baza a trei rețele de discretizare distincte din punct de vedere al numărului de noduri. Din acest exemplu s-a constatat faptul că numărul de elemente finite impuse de către utilizator influențează în mod direct calculele și automat și rezultatele obținute, astfel că numărul de noduri trebuie ales optim astfel încât să influențeze cât mai puțin eroarea de calcul.

În cadrul analizei în mișcare de rotație a generatorului sincron cu magneți permanenți studiat au fost obținute în primă fază formele de undă ale tensiunii electromotoare induse pentru funcționarea în gol la turația nominală. De asemenea, a fost determinat grafic unul dintre parametrii importanți de proiectare la generatoarele sincrone cu magneți permanenți și anume cuplul parazit. Deoarece acesta nu contribuie la valoarea cuplului util și mai mult decât atât poate avea efecte negative asupra funcționării mașinii, manifestate prin fenomene tranzitorii și inducerea vibrațiilor, este importantă cunoașterea valorii acestuia. Pe baza calculelor cu metoda elementului finit în OPERA s-a constatat că pentru generatorul sincron studiat cuplul parazit determinat grafic reprezintă valori relativ scăzute, încadrându-se undeva la aproximativ 0.17% din cuplul nominal. Este cunoscut faptul că pentru valori ridicate ale cuplului parazit poate fi afectată funcționarea normală și pornirea ansamblului eolian la viteze mici ale vântului, fiind afectat astfel și randamentul generatorului. În acest caz, cunoașterea acestui parametru este deosebit de utilă pentru generatorul sincron cu magneți permanenți studiat, valoarea sa scăzută garantând în primul rând faptul că acesta poate să fie eficient și în zonele cu potențial eolian mai redus.

Analiza generatorului sincron cu magneți permanenți pe baza modelului de câmp magnetic reprezentat 2D cu ajutorul OPERA bazat pe calculul cu metoda elementului finit se dovedește a fi deosebit de utilă, mai ales în procesul de proiectare, deoarece permite atât modelarea regimului de funcționare în gol, cât și optimizarea constructiv-funcțională a generatorului.

Tot în cadrul acestui capitol au fost amintite pe scurt caracteristicile de funcționare ale generatoarelor sincrone. Deoarece generatorul sincron cu magneți permanenți studiat este dedicat în special aplicațiilor eoliene și funcționării în regim autonom, este foarte important a se cunoaște caracteristica sa externă, aceasta fiind un parametru care oferă informații cu privire la calitatea energiei electrice. În acest sens au fost efectuate o serie de simulări în OPERA pentru diferite sarcini de încărcare

rezistivă, fiind obținute rezultate calculate pe baza metodei elementului finit cu ajutorul cărora a fost construită caracteristica externă.

Pornind de la ipoteze abordate în articole din literatura de specialitate a fost efectuată o cercetare experimentală referitoare la influența lățimii magneților permanenți asupra caracteristicii externe pentru prototipul generatorului sincron studiat. Cu ajutorul mediului OPERA a fost redefinită geometria inițială a magneților permanenți și au fost efectuate mai multe simulări pentru diferite lățimi ale acestora. Pe baza rezultatelor obținute au fost trasate caracteristicile externe pentru fiecare caz și comparate între ele, fiind concluzionat faptul că valoarea efectivă a tensiunii induse este dependentă direct proporțional cu valoarea lungimii acestora.

De asemenea au fost realizate o serie de simulări în OPERA pentru determinarea influenței lățimii magneților permanenți asupra cuplului parazit. S-a constatat faptul că valoarea cea mai mare a cuplului parazit corespunde pentru magneți cu lățimea  $l_m = 34 \text{ mm}$ . S-a observat că odată cu reducerea lățimii magneților permanenți la valori cuprinse între  $28 - 32 \text{ mm}$  amplitudinea cuplului parazit a scăzut semnificativ. Scăzând în continuare lățimea magneților la valoarea  $l_m = 24 \text{ mm}$  se observă o creștere a valorii cuplului.

Ținând cont de rezultatele obținute în urma simulărilor în OPERA s-a demonstrat faptul că în ceea ce privește caracteristica externă și cuplul parazit lățimea optimă pentru magneții permanenți este cea aleasă și în datele de proiectare,  $l_m = 32 \text{ mm}$ . Deși din punct de vedere al cuplului parazit acesta are valoarea cea mai mică pentru  $l_m = 28 \text{ mm}$ , magneții permanenți cu lățimea  $l_m = 32 \text{ mm}$  sunt superiori celor de  $l_m = 28 \text{ mm}$  din punct de vedere al comparației caracteristicilor externe obținute în cele două cazuri la sarcini de încărcare identice. Spre exemplu valoarea tensiunii electromotoare indusă pentru funcționarea la mers în gol cu  $l_m = 28 \text{ mm}$  este  $U_{l_m,28} = 159.38 \text{ V}$ , iar pentru  $l_m = 32 \text{ mm}$  valoarea tensiunii este  $U_{l_m,32} = 170.12 \text{ V}$ .

Un alt studiu experimental realizat în acest capitol se referă la posibilitatea obținerii unui efect de saliență inversă prin introducerea unor piese feromagnetice în spațiul interpolar din rotor în scopul îmbunătățirii caracteristicii externe și realizării unui reglaj a tensiunii trecând peste dezavantajul absenței controlului asupra câmpului magnetic. Pornind de la aceste considerente a fost modificată în OPERA structura rotorului Prototipului 1 prin introducerea mai multor straturi de piese interpolate între magneții dispuși radial pe suprafața rotorului. Rezultatele obținute în urma modificărilor sunt comparate cu cele obținute la prototipul inițial. Din punct de vedere al spectrului câmpului magnetic, al distribuției densității fluxului magnetic în întrefier la starea de repaus a rotorului și al caracteristicilor externe obținute și comparate pentru cele două cazuri s-a concluzionat faptul că introducerea pieselor feromagnetice în spațiul interpolar nu are un efect semnificativ în ceea ce privește îmbunătățirea performanțelor generatorului sincron studiat deoarece generatorul are un număr mare de poli și în consecință un pas polar mic, această soluție fiind avantajoasă doar în cazul generatoarelor cu un număr mic de poli [D6][G7].

Rezultatele acestui studiu cu metoda elementului finit se constituie într-o contribuție a tezei și anume că îmbunătățirea caracteristicii externe la GSMP prin introducerea de piese interpolate, care de regulă produc efectul de „saliență inversă”, nu se poate aplica în cazul analizat și în general nici pentru GSMP cu turație scăzută și număr mare de poli.

## 5. DETERMINĂRI EXPERIMENTALE ȘI COMPARAȚII CU MĂRIMILE CALCULATE

În general, calitatea unei mașini electrice din punct de vedere al exploatării este dată în funcție de satisfacerea cerințelor prevăzute în standardele în vigoare și în fișa de condiții tehnice.

Înainte de punerea în funcțiune a unui generator construit este necesară determinarea experimentală și verificarea parametrilor și a performanțelor care definesc funcționarea sa în regim staționar și tranzitoriu. Ulterior, după ce au fost efectuate încercările conform prevederilor menționate în standardele în vigoare și în literatura de specialitate, rezultatele obținute sunt înscrise în buletinele de verificare sau certificatele de garanție.

Pentru o viziune mai amplă asupra performanțelor prototipului generatorului sincron cu magneți permanenți studiat, după ce a fost realizată o primă etapă de validare a rezultatelor pe baza metodei elementului finit pornind de la datele inițiale de proiectare, urmează etapa de încercări experimentale pe standul de probă. Generatorul sincron cu magneți permanenți cu 33 de creștături statorice a fost integrat într-un stand de probă destinat pentru testarea prototipului, rezultatele experimentale obținute urmând a fi apoi comparate cu cele obținute din simulările în programul *Opera*.

### 5.1 Stand experimental de testare

Prototipul studiat este destinat aplicațiilor de conversie a energiei eoliene, dar și a energiei hidraulice în energie electrică. Ca mod de funcționare, acesta poate funcționa atât conectat la rețea, dar se pretează în special pentru funcționarea în regim autonom. Pentru generatoarele destinate funcționării în regim autonom interesul încercărilor experimentale îl reprezintă determinarea caracteristicilor de funcționare, acest lucru reprezentând și scopul principal pentru care a fost conceput acest stand experimental.

Circuitul de forță al standului experimental prezentat în figura 5.1, și în anexa 13, a fost conceput pentru alimentarea cu energie electrică a unui motor de curent continuu (Mcc) cu stator basculant care permite măsurarea directă a cuplului la arbore și care este utilizat pentru antrenarea generatorului sincron cu magneți permanenți. Așadar din componența circuitului de forță fac parte următoarele elemente principale:

1. Generator sincron cu magneți permanenți – GSMP
2. Motor de curent continuu – Mcc
3. Transformator reglabil de alimentare –  $T_1$  – a redresorului  $Rd_1$  pentru alimentarea indusului Mcc
4. Transformator de adaptare –  $T_A$
5. Punte redresoare pentru alimentarea înfășurării rotorice a motorului de curent continuu –  $Rd_1$



6. Transformator reglabil de alimentare a înfășurării de excitație a motorului de curent continuu –  $T_2$
7. Punte redresoare pentru alimentarea înfășurării de excitație a motorului de curent continuu–  $Rd_2$

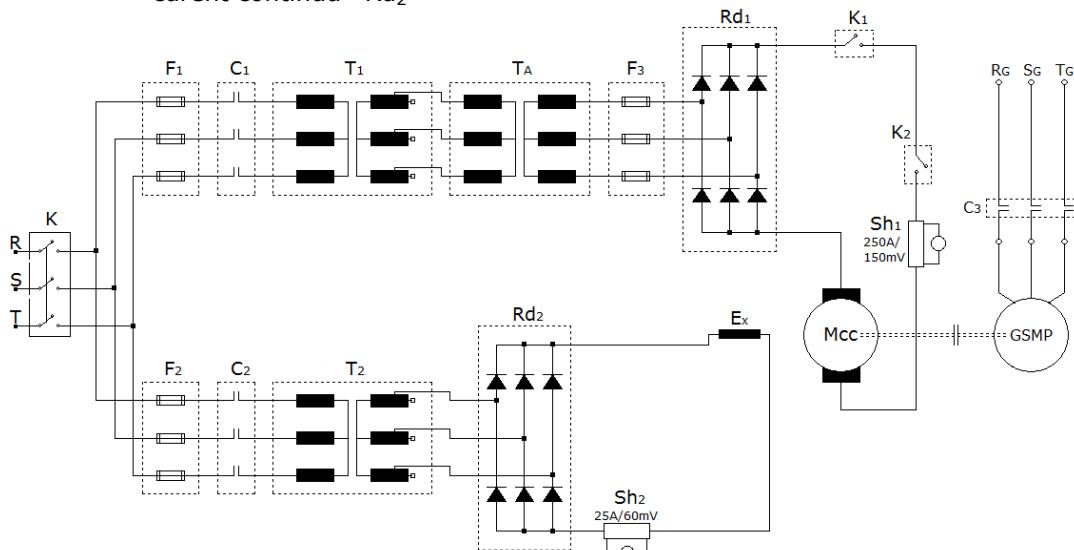


Fig. 5.1. Schema circuitului de forță al standului experimental

După cum se observă, schema de forță a standului experimental cuprinde trei circuite electrice, un circuit electric pentru alimentarea înfășurării rotorice a Mcc, un circuit electric pentru alimentarea înfășurării de excitație ( $E_x$ ) a Mcc și circuitul de forță al GSMP. Primele două circuite menționate deservesc Mcc și sunt alimentate de la rețeaua trifazată de 400V prin intermediul unui întreruptor general (K) de curent nominal  $I_n = 400 A$  care are și rolul de separare completă a circuitelor de excitație.

Pentru antrenarea GSMP s-a dorit utilizarea unui Mcc în construcție specială, cu stator basculant, din dotarea laboratorului. Această mașină permite și măsurarea directă a cuplului la arbore, dar are turații uzuale mai mari decât turația nominală a GSMP. Ca urmare configurația standului experimental a rezultat din necesitatea de adaptare funcțională a motorului de curent continuu caracterizat de parametrii din tabelul 5.1 la regimul de funcționare impus de către parametrii generatorului sincron cu magneți permanenți, pentru antrenarea sa la parametrii nominali. Având în vedere că generatorul sincron este caracterizat de turația nominală  $n_N = 120 rpm$ , care este mult mai mică decât turația nominală minimă de funcționare a Mcc, fiind exclusă utilizarea cutiei de viteze, se impune realizarea unei instalații de alimentare modificată față de soluția inițială pentru alimentarea motorului la tensiune scăzută cu posibilitate de reglaj fin și curent mare. Astfel este impusă condiția de funcționare a Mcc într-un regim care se regăsește în afara plajei de funcționare normală pentru care a fost proiectat, fiind pusă la îndoială stabilitatea sa. Pentru adaptarea turației motorului la turația impusă de  $120 rpm$  s-a constatat că este necesară alimentarea sa la o tensiune  $U = 35 V_{cc}$ , un curent  $I = 210 A$  și o putere activă  $P = 7,35 kW$ . Deși Mcc funcționează conform caracteristicilor

de proiectare la putere mare și turație ridicată, s-a constatat că acesta funcționează stabil și după adaptarea la parametri de alimentare aflați în jurul valorilor precizate, oferind astfel posibilitatea de funcționare la turații scăzute și flexibilitatea de utilizare a standului pentru diverse măsurători, inclusiv măsurarea cuplului. În figura 5.2 este prezentat ansamblul motor de curent continuu – generator sincron cu magneți permanenți din cadrul standului de probă.

Tabel 5.1. Datele nominale ale Mcc

Puterea nominală	90/10 kW
Tensiunea nominală	460/62 V
Curentul nominal din rotor	218 A
Turația nominală	2700-4500/300 rpm
Clasa de izolație rotor	F2
Tensiunea de excitație	176/220 V
Curentul de excitație	7,3 A



Fig. 5.2. Ansamblul Mcc – GS din cadrul standului experimental

Inițial alimentarea Mcc a fost concepută prin intermediul unui transformator de alimentare reglabil ( $T_1$ ) de putere nominală  $S_n = 15 \text{ kVA}$ , tensiune nominală în primar

$U_1 = 400\text{ V}$  și tensiune nominală în secundar  $U_2 = 0 - 400\text{ V}$ . S-a constatat ulterior că acest transformator care furnizează în secundar curentul nominal  $I_2 = 75\text{ A}$  nu este suficient pentru funcționarea motorului la parametri dorți, adică la turație scăzută. Acest motiv explică introducerea în circuitul de forță a unui transformator de adaptare ( $T_A$ ), prezentat în figurile 5.3 și 5.4, cu raport de transformare fix care este conectat între secundarul transformatorului de alimentare și puntea redresoare  $Rd_1$ .



Fig. 5.3. Transformatorul de adaptare

Transformatorul de adaptare trebuie să fie caracterizat de un raport de transformare ridicat și să susțină în secundar un curent suficient de mare încât să permită flexibilitatea de alimentare a  $M_{cc}$  pentru determinări experimentale la turații scăzute. Astfel, transformatorul de adaptare  $T_A$  nu este un transformator uzual, acesta

fiind proiectat și realizat în mod special pentru acest stand de testare. Transformatorul de adaptare a fost prevăzut cu prize atât în primar cât și în secundar, permițând o gamă largă de conexiuni și ca urmare asigurând o flexibilitate mai mare într-un sistem de alimentare reglabil. Acesta deține următoarele date nominale: putere nominală  $S_n = 10 \text{ kVA}$ , tensiune nominală în primar  $U_1 = 400 \text{ V}$ , tensiune nominală în secundar  $U_2 = 35 \text{ V}$  și curentul nominal din secundar  $I_2 = 220 \text{ A}$ .



Fig. 5.4. Transformatorul de adaptare – panoul frontal

Prin tandemul  $T_1 - T_{A_v}$ , prezentat în figura 5.5, este posibil reglajul fin al tensiunii de alimentare prin intermediul  $T_1$  și furnizarea unui curent de alimentare mare asigurat de către  $T_{A_v}$ , fiind astfel îndeplinite condițiile impuse pentru realizarea unui stand experimental flexibil și stabil din punct de vedere funcțional.

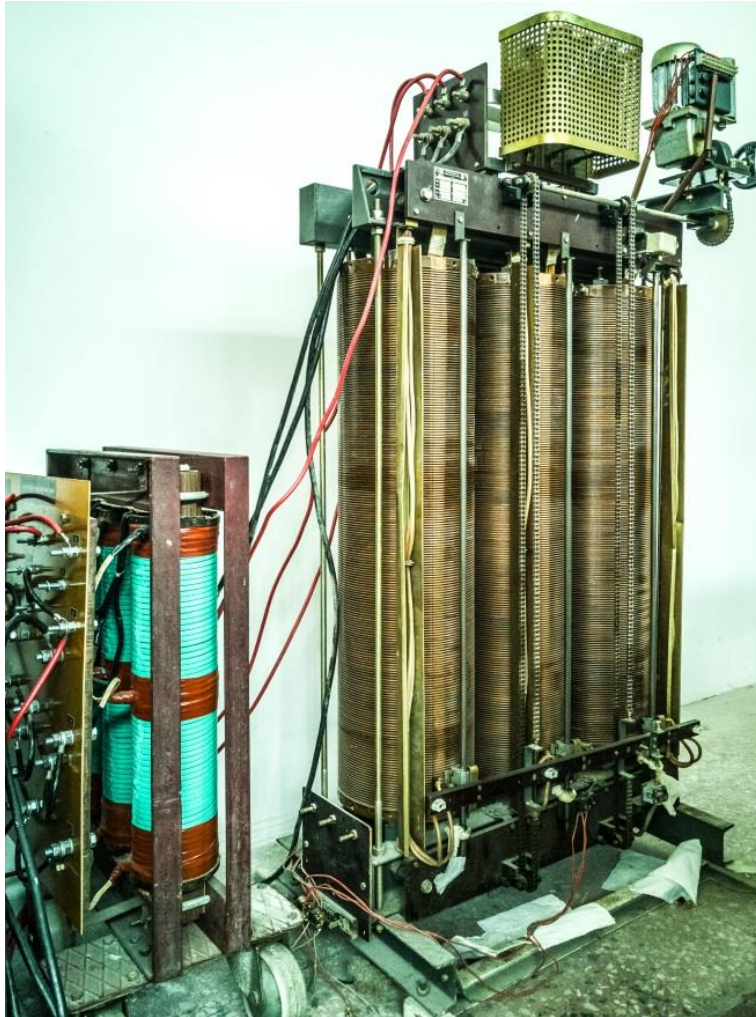


Fig. 5.5. Transformatorul de adaptare și transformatorul de alimentare din circuitul de forță al Mcc

Circuitul de alimentare este acționat prin intermediul contactorului  $C_1$  înaintea căruia este amplasat blocul de protecție  $F_1$  format din siguranțe automate de 63A. Pe lângă cele două transformatoare  $T_1$  și  $T_A$ , din circuitul de alimentare a înfășurării rotorice a Mcc face parte și puntea redresoare  $Rd_1$  de 250A necesară pentru alimentarea motorului la tensiune continuă. Puntea redresoare este realizată în construcție trifazată cu diode de tip D35N1800B67 cu tensiunea nominală  $U_n = 1800 V$  și curentul nominal  $I_n = 355 A$ , protecția acesteia fiind asigurată de către blocul  $F_3$  de siguranțe MPR de 250A.

Alimentarea înfășurării de excitație a Mcc este asigurată prin intermediul transformatorului cu secundar reglabil  $T_2$ , prezentat în figura 5.6, de putere nominală  $S_n = 15 \text{ kVA}$ , tensiune nominală în primar  $U_1 = 380 \text{ V}$  și tensiune nominală în secundar  $U_2 = 0 - 400 \text{ V}$  și a punții redresoare  $Rd_2$  trifazată realizată din diode de tip D251600 cu tensiunea nominală  $U_n = 1600 \text{ V}$  și curentul nominal  $I_n = 25 \text{ A}$ . Circuitul de alimentare al înfășurării de excitație este acționat prin intermediul contactorului  $C_2$ , iar protecția circuitului este asigurată prin blocul de siguranțe automate  $F_3$  de 35A.

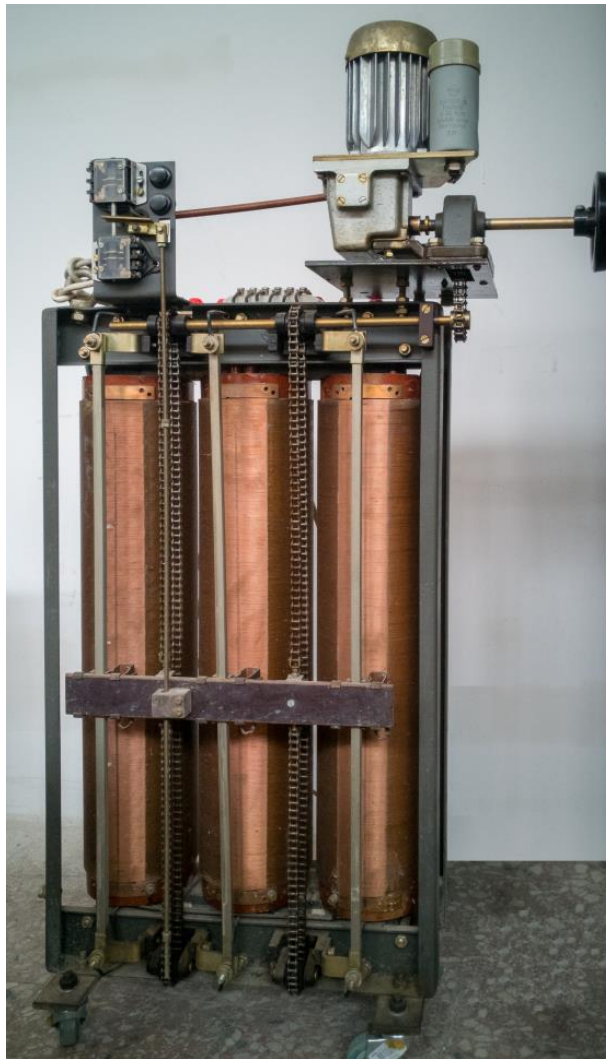


Fig. 5.6. Transformatorul de alimentare a înfășurării de excitație a Mcc

Toate elementele care asigură comanda și protecția Mcc sunt incluse în dulapul de comandă prezentat în figura 5.7.

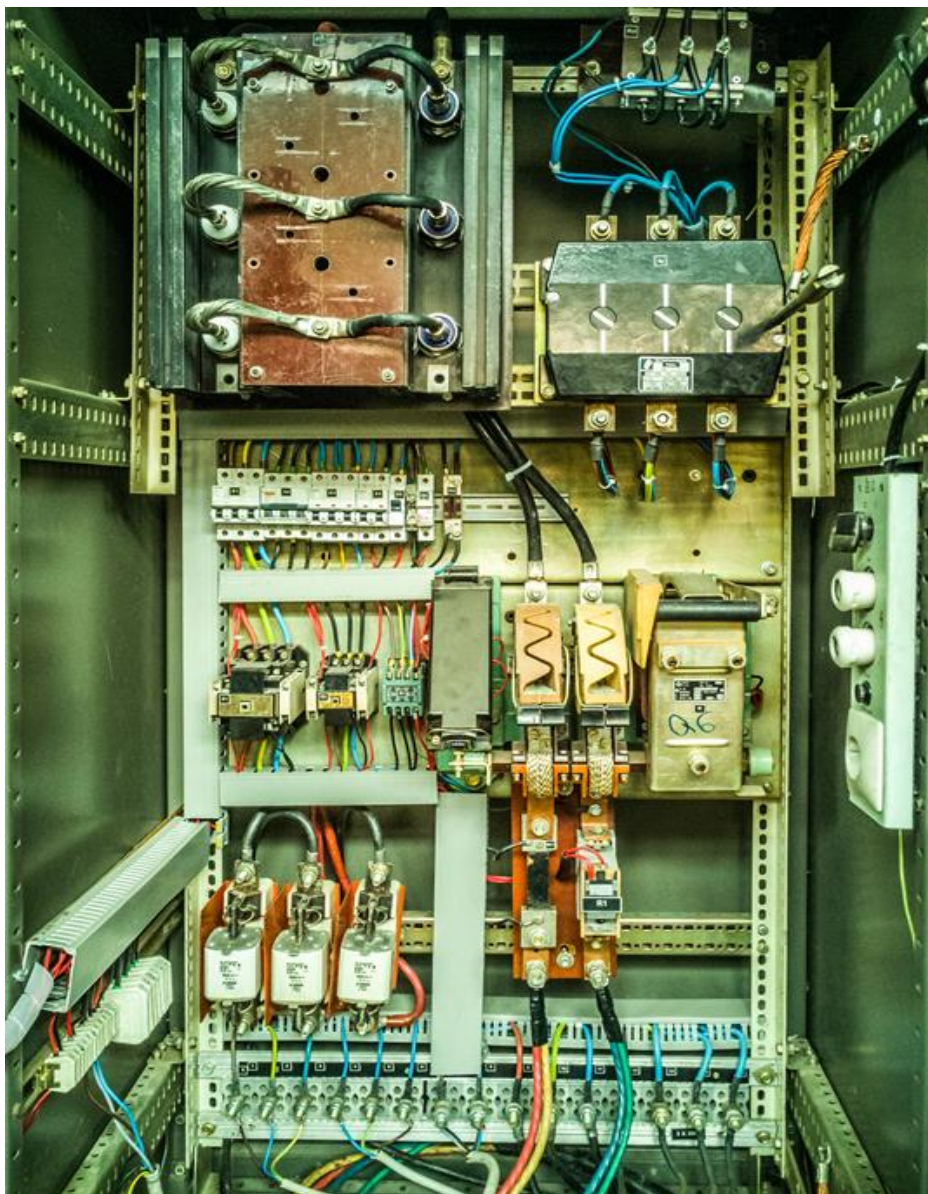


Fig. 5.7. Dulapul de comandă și protecție al Mcc

## **5.2 Sistem de achiziție și de prelucrare a datelor bazat pe mediul LabView și utilizat în cadrul măsurătorilor**

Odată cu dezvoltarea și progresul calculatoarelor, precum și a cunoștințelor în domeniul electronicii și al informaticii au ajuns să fie puse la îndemâna inginerilor echipamente performante moderne și flexibile capabile să realizeze în mod automat măsurarea, achiziția și prelucrarea numerică a datelor.

Calculatoarele personale dotate cu sisteme de operare performante pun la dispoziție o putere de calcul foarte mare, fiind astfel posibilă o prelucrare complexă a semnalelor și în același timp oferind flexibilitate și ușurință de modificare a relațiilor între măsurile culese și algoritmi creați pentru comandă și control. Culegerea măsurilor de tip analogic sau digital este realizată prin intermediul unei plăci de achiziție de date care este adaptată în funcție de cerințele utilizatorului și care are rolul de preluare, prelucrare și transformare a măsurilor de intrare în mărimi numerice, generând semnale analogice sau digitale de comandă [B11][B12][G9].

Prin intermediul unor protocoale de comunicație poate fi realizată asocierea unui calculator cu o placă de achiziție de date fiind astfel constituit un sistem de achiziție și prelucrare de date. Aceste sisteme de achiziție și prelucrare a datelor sunt utilizate pe scară largă în zilele noastre atât în domeniul industrial pentru supraveghere și reglaj în instalații, cât și în domeniul cercetării științifice pentru măsurarea unui domeniu larg de mărimi electrice și neelectrice și prelucrarea acestora. Interfața dintre aceste sisteme și utilizator este asigurată prin intermediul instrumentației virtuale, reprezentată de o gamă vastă de medii de programare software, ca de exemplu mediul LabVIEW dezvoltat de către firma National Instruments [G10].

Pentru efectuarea determinărilor numerice experimentale din cadrul acestei teze a fost utilizat sistemul de achiziție și prelucrare automată a datelor bazat pe mediul de programare LabVIEW disponibil în laboratorul de Mașini Electrice D109 a Facultății de Electrotehnică și Electroenergetică din Universitatea „Politehnica” din Timișoara, dezvoltat în cadrul unei teze de doctorat anterioare [P5]. Acesta este dedicat unei game largi de mașini electrice, inclusiv testării mașinilor electrice de puteri mari, dar și testării mașinilor electrice de puteri mici, cu posibilitate de utilizare atât în mediul academic, cât și în mediul industrial [B13].

De asemenea au fost folosite echipamentele și experiența laboratorului menționat anterior în domeniul sistemelor de achiziție și prelucrare a datelor dedicate testării mașinilor electrice [B6][G8][G9].

Modulul de ansamblu a sistemului de achiziție a fost conceput și realizat în cadrul Laboratorului de Testare mașini electrice și înglobează într-un ansamblu compact atât adaptoarele de proces cât și plăcile de achiziție de date.

Din punct de vedere conceptual, sistemul de achiziție și prelucrare de date a fost realizat în ideea de a pune la dispoziția utilizatorului o gamă largă de domenii și mărimi ce se regăsesc în mediul industrial. În ceea ce privește structura hardware a sistemului de achiziție și prelucrare a datelor realizat practic în cadrul [P5] acesta are în componență următoarele elemente:

- Modul de achiziție de date bazat pe platformă alcătuită din componente NI din seria Compact DAQ care conferă flexibilitate și un ansamblu de peste 50 de



module intrare-ieșire pentru măsurarea diferitelor tipuri de semnale (electrice, mecanice, acustice);

- Modul adaptor de proces care are rolul de adaptare a mărimilor măsurate la nivelul admisibil domeniului de intrare al plăcilor de achiziție;
- Traductoare dedicate diferitelor metode pentru testarea mașinilor electrice.



Fig. 5.8. Panoul frontal de conexiuni al sistemului de achiziție și prelucrare de date dedicat testării mașinilor electrice de putere mare realizat în cadrul P5

Structura software a sistemului de achiziție și prelucrare a datelor a fost dezvoltată pe baza mediului LabVIEW 2013 de la National Instruments și actualizată conform versiunii LabVIEW 2015, fiind alcătuită din două niveluri de achiziție și prelucrare a datelor pentru testarea mașinilor electrice, conform [P5]. Nivelul principal conține peste 30 de instrumente virtuale dezvoltate în cadrul [P5] plus încă 100 de subinstrumente virtuale existente în biblioteca LabVIEW dedicate achiziției de date monofazate sau trifazate, atât pentru regimuri periodice cu frecvență constantă, cât și pentru regimuri tranzitorii. În cadrul testării unei mașini electrice achiziția valorilor momentane ale tensiunii și curentului de pe fiecare fază aferentă circuitului de forță este realizată pe baza acestor instrumente virtuale care ulterior, în funcție de frecvența semnalelor achiziționate, calculează valorile efective și valorile medii, puterea activă, puterea reactivă și factorul de putere [B13][G10].

Prin corelarea diverselor mărimi determinate experimental pot fi construite caracteristicile de funcționare ale mașinilor electrice testate, precum caracteristica externă, caracteristica de mers în gol, caracteristica de scurtcircuit, etc. Determinarea acestor caracteristici și a unor parametri specifici mașinilor sincrone de puteri mari sunt realizate în cel de-al doilea nivel de prelucrare pe baza unor seturi de teste și metode specifice de prelucrare de date.

### 5.3 Prezentarea măsurătorilor experimentale

Beneficiind de resursele existente în laborator și anume standul de probă experimental și sistemul de achiziție și prelucrare a datelor au fost realizate o serie de măsurători experimentale. Aceste măsurători au fost efectuate plecând de la două aspecte principale, și anume: tipul de aplicație pentru care este întrebuițat și regimul de funcționare al generatorului.

În figura 5.9 și anexa 14 este prezentată schema electrică de montaj utilizată la determinările experimentale pe standul de probă. Notațiile utilizate în figura prezentată au următoarele semnificații:

- Mcc – motor de curent continuu;
- GSMP – generator sincron cu magneți permanenți;
- TT – traductor de turație;
- TI – traductor de curent;
- TT – traductor de tensiune;
- K – contactor;
- R – rezistență de sarcină variabilă;
- $i_R, i_S, i_T$  – curentul pe faza R, pe faza S, respectiv pe faza T;
- $u_R, u_S, u_T$  – tensiunea pe faza R, pe faza S, respectiv pe faza T;
- AI – adaptor de curent;
- AU – adaptor de tensiune;
- MAD – modul de achiziție de date;
- PC – calculator;
- $P_1$  – putere mecanică de intrare;
- $P_2$  – putere electrică utilă de ieșire.

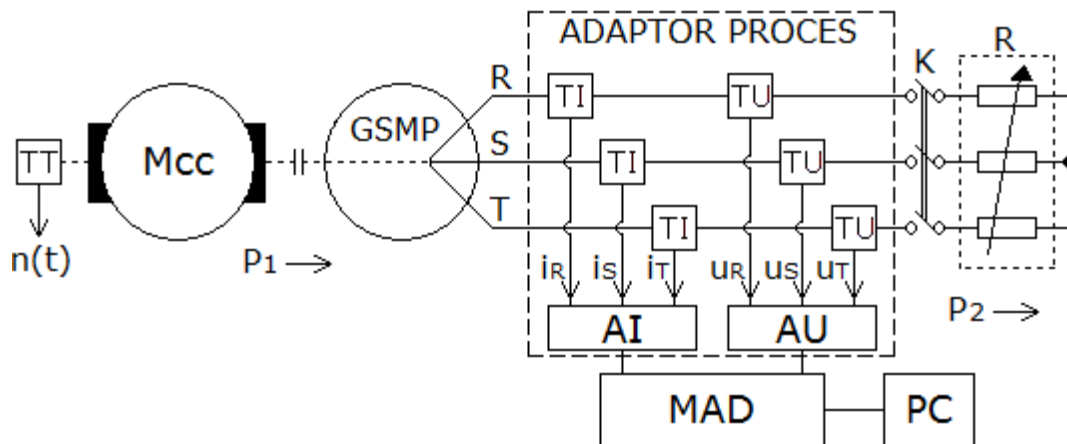


Fig. 5.9. Schema de montaj pentru sistemul de achiziție și prelucrare de date

Pe baza acestei scheme de montaj au fost efectuate determinările experimentale pe standul de probă avute în vedere, precum caracteristica externă și caracteristica de mers în gol, dar cu ajutorul aceleiași scheme se pot determina experimental și alte caracteristici ale GSMP, de exemplu caracteristica randamentului sau determinarea conținutului de armonici din forma de undă a tensiunii.

Deoarece generatorul a fost construit să deservească o turbină eoliană acesta funcționează într-o plajă largă de turație, astfel că este importantă determinarea valorilor pentru tensiunea de fază la diferite valori ale turației. În acest sens a fost realizată proba de mers în gol pentru domeniul de turație  $47 \div 152 \text{ rpm}$ , valorile  $U_0 = f(n)$  obținute experimental fiind expuse în tabelul 5.2.

Tabel 5.2. Variația tensiunii de fază a generatorului în raport cu turația

Nr. Crt.	$n$ [rot/min]	$U_0$ [V]
1.	0	0
2.	47	71,02
3.	60	78,77
4.	80	116,98
5.	93	134,01
6.	109	161,57
7.	117	170,32
8.	122	178,45
9.	131	187,16
10.	136	197,98
11.	144	207,25
12.	152	224,06

Caracteristica de funcționare în gol a generatorului sincron cu magneți permanenți determinată experimental este reprezentată grafic în figura 5.10.

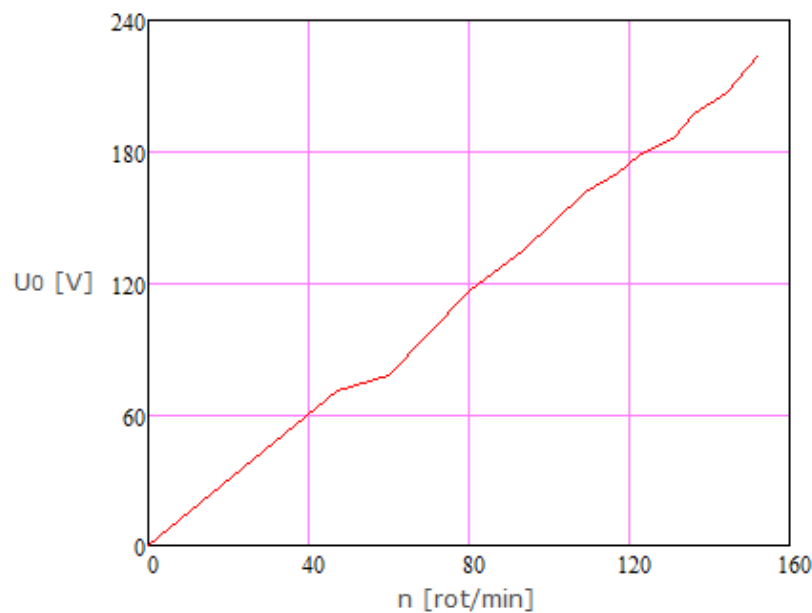


Fig. 5.10. Caracteristica de funcționare în gol a generatorului sincron cu magneți permanenți

Pentru proba de funcționare în gol au fost determinate experimental formele de undă ale tensiunilor electromotoare pe faze pentru funcționarea la turația nominală a rotorului,  $n_N = 120 \text{ rpm}$ . Acestea sunt reprezentate în figura 5.11, figura 5.12, respectiv figura 5.13, iar comparativ cu figura 4.29 și figura 4.30 care au fost prezentate anterior

se observă că formele de undă ale tensiunilor electromotoare obținute experimental sunt similare cu cele obținute prin simularea în OPERA.

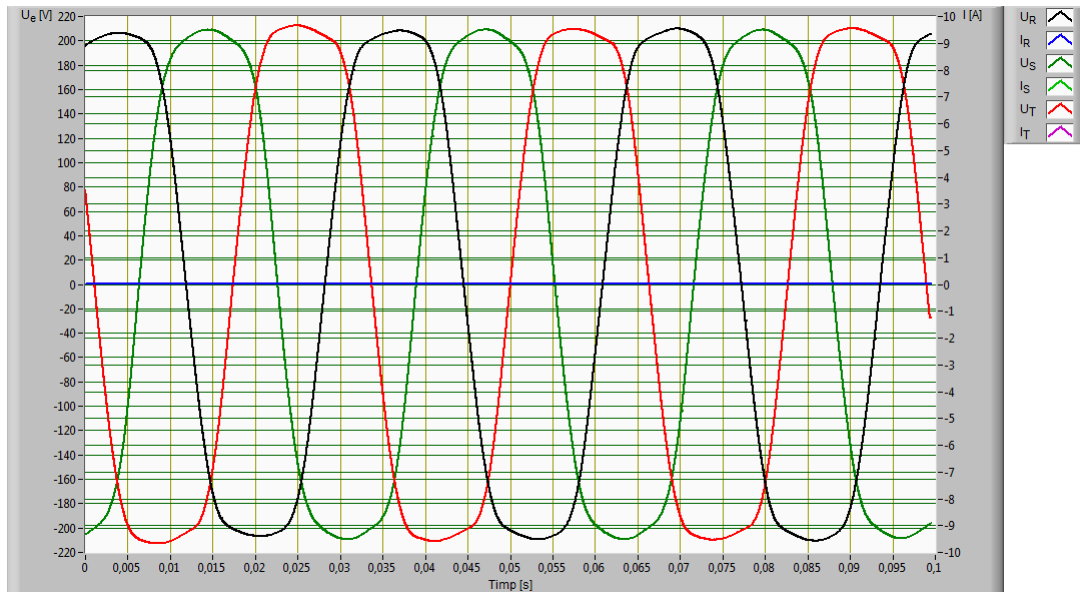


Fig. 5.11. Formele de undă ale tensiunilor electromotoare induse și a curenților pe cele trei faze la funcționarea în gol

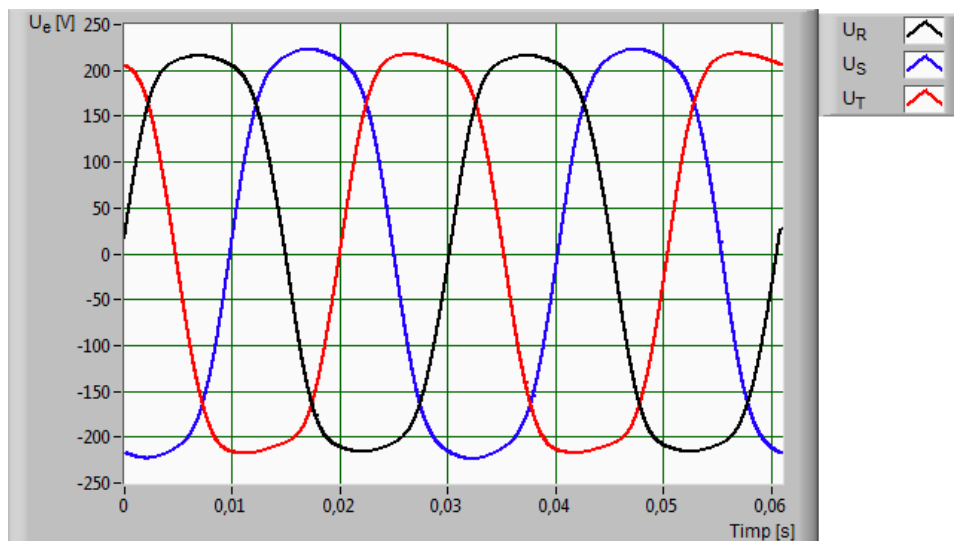


Fig. 5.12. Detaliu privind formele de undă ale tensiunilor electromotoare induse pentru cele trei faze la funcționarea în gol

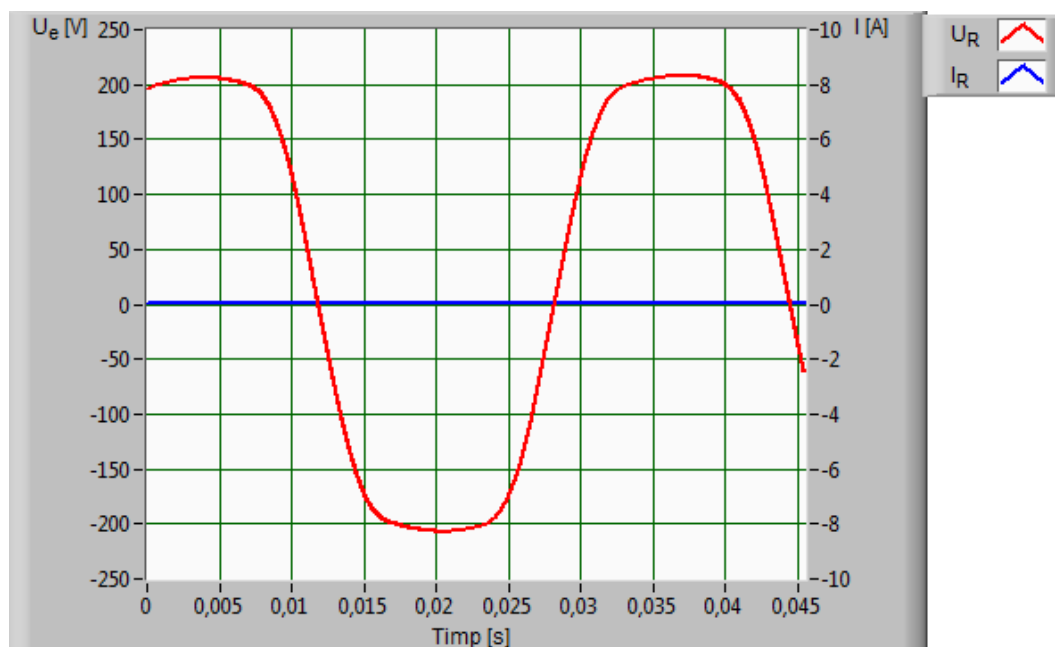


Fig. 5.13. Detaliu pentru forma de undă a tensiunii electromotoare induse pe faza R la funcționarea în gol

Având în vedere regimurile de funcționare ale generatorului sincron cu magneți permanenți studiat este cunoscut faptul că acesta poate funcționa atât interconectat la sistemul energetic în paralel cu alte generatoare, cât și pe o rețea proprie în regim autonom. Pentru regimul autonom de funcționare generatorul trebuie să prezinte o stabilitate funcțională foarte bună în ceea ce privește modificarea tensiunii la bornele sale în raport cu variațiile impedanței de sarcină. Ținând cont că generatorul este destinat în special acestui regim de funcționare este foarte important și necesar ca din programul de încercări să facă parte determinarea caracteristicii externe. Aceasta oferă în mod direct o viziune clară asupra modului în care tensiunea la bornele generatorului variază în raport cu valoarea curentului de sarcină. Astfel au fost efectuate o serie de măsurători pe standul de probă din laborator pentru determinarea valorii tensiunii la borne în raport cu modificarea unei sarcini rezistive. Acestea au fost realizate prin antrenarea generatorului sincron la turația nominală  $n_n = 120 \text{ rot/min}$  care a fost menținută constantă. Sarcina rezistivă utilizată a fost asigurată cu ajutorul unui rezistor de putere trifazat cu reglaj în trepte care permite realizarea mai multor combinații de rezistențe simetrice pe cele 3 faze. În tabelul 5.3 sunt prezentate rezultatele obținute pentru tensiunea de fază  $U$  corespunzătoare unui anumit curent pe fază  $I$  și puterea activă  $P_2$  debitată pe rezistență, aceasta reprezentând în același timp puterea utilă la bornele generatorului [B11][B12].

Tabel 5.3. Valorile  $U = f(I)$  la variații ale sarcinii rezitive

Nr. Crt.	$I$ [A]	$U$ [V]	$P_2$ [kW]
1.	1,486	174,757	0,779
2.	1,496	175,993	0,790
3.	2,290	172,045	1,231
4.	2,867	167,966	1,431
5.	3,628	168,780	1,837
6.	5,035	164,760	2,482
7.	5,688	163,747	2,787
8.	6,346	160,643	3,058
9.	7,121	160,135	3,491
10.	7,770	157,564	3,787
11.	9,260	150,883	4,127
12.	9,852	150,973	4,402
13.	10,153	148,327	4,485
14.	10,760	148,340	4,740
15.	12,215	148,272	5,447

În continuare sunt reprezentate în figura 5.14 variațiile în timp ale tensiunilor și curenților pe fazele R, S, T ale generatorului la sarcină rezistivă, pentru valoarea efectivă a curentului pe fază de 4,5A. Figurile 5.15, 5.16 și 5.17 prezintă detalii pentru datele experimentale din figura 5.14.

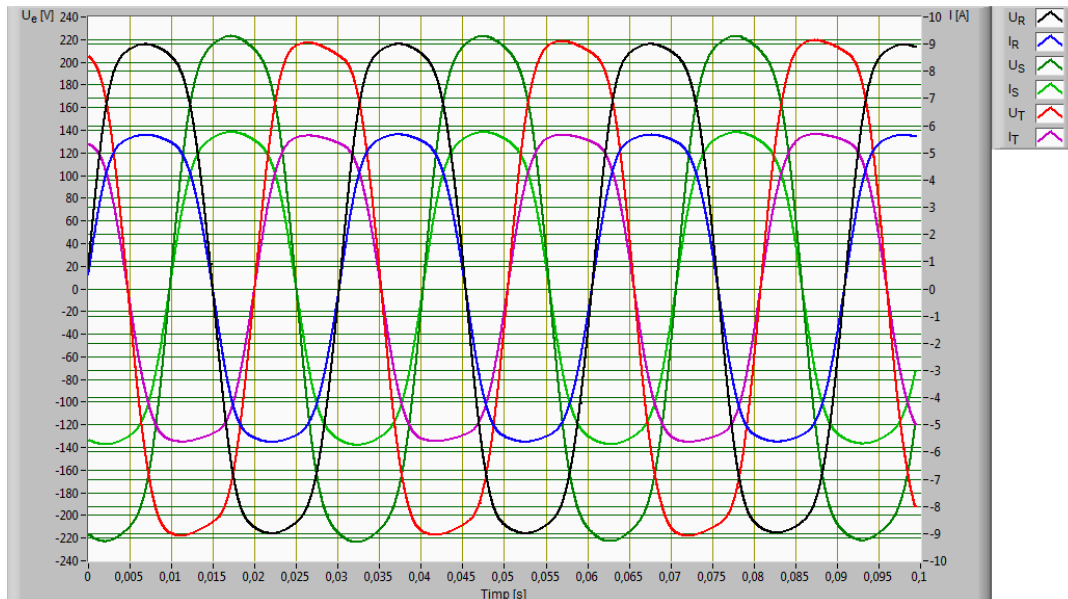


Fig. 5.14. Variația în timp a tensiunilor și a curenților pe fazele R, S, T la sarcină rezistivă – mediul LabVIEW

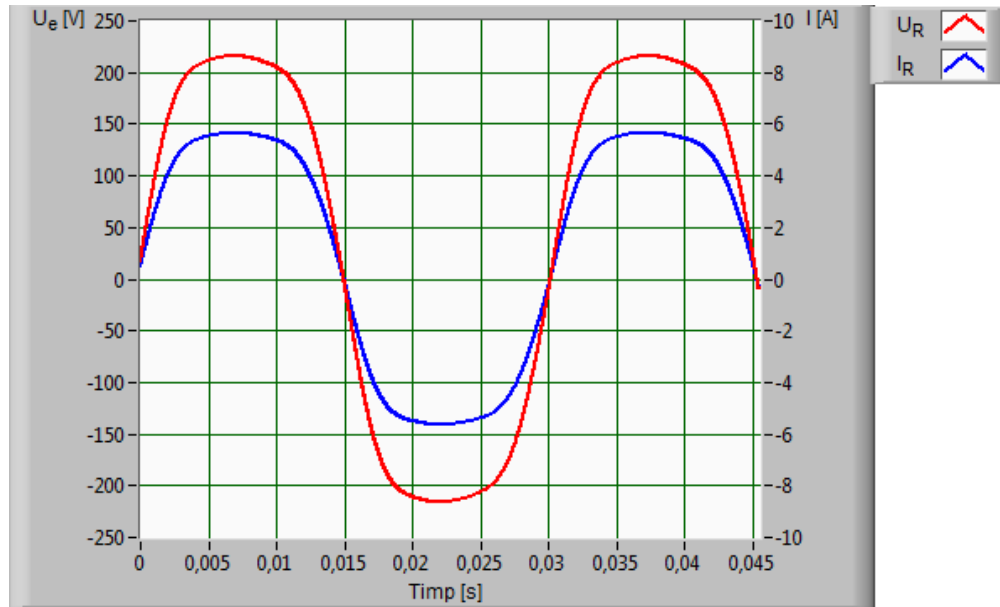


Fig. 5.15. Tensiunea, respectiv curentul pe faza R la sarcină rezistivă

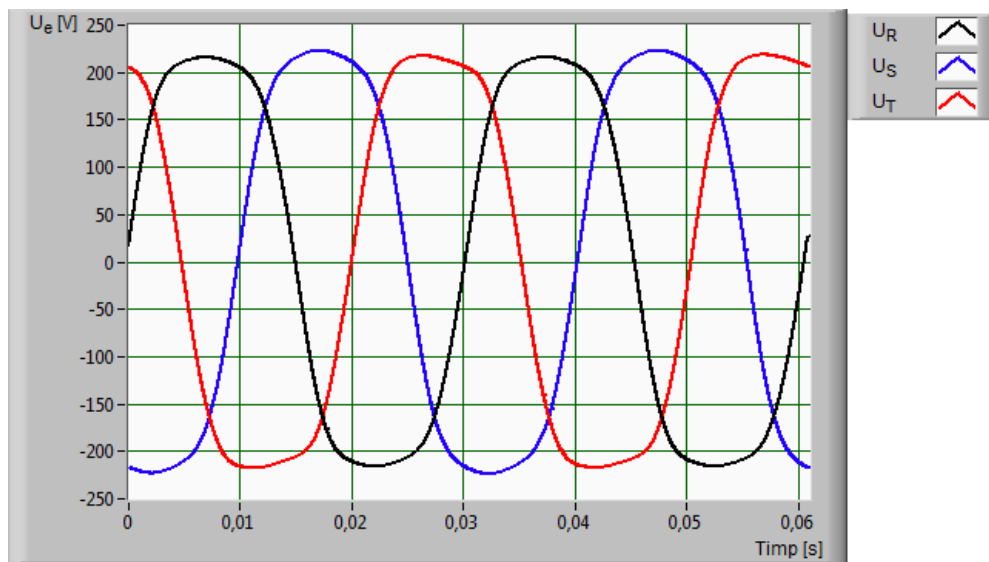


Fig. 5.16. Detaliu privind variația în timp a tensiunilor pe cele trei faze la sarcină rezistivă

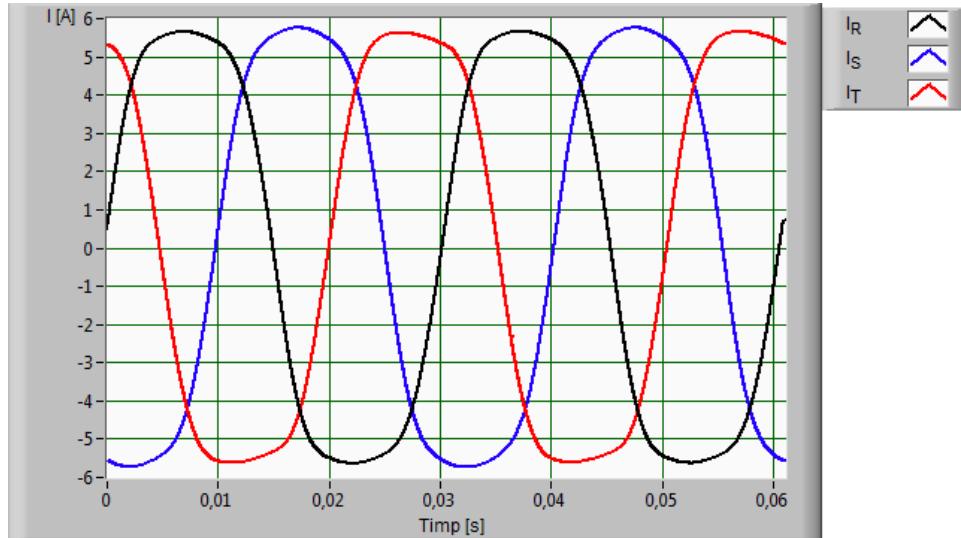


Fig. 5.17. Detaliu privind variația în timp a curenților pe cele trei faze la sarcină rezistivă

Pe baza rezultatelor obținute în urma probelor pe stand a fost întocmită caracteristica externă a generatorului sincron la sarcină rezistivă, expusă în figura 5.18. De asemenea, în aceeași figură a fost realizată comparația între caracteristica externă determinată experimental pe standul de probă și caracteristica externă determinată pe baza calculului cu metoda elementului finit în urma simulărilor în OPERA [B12][G11].

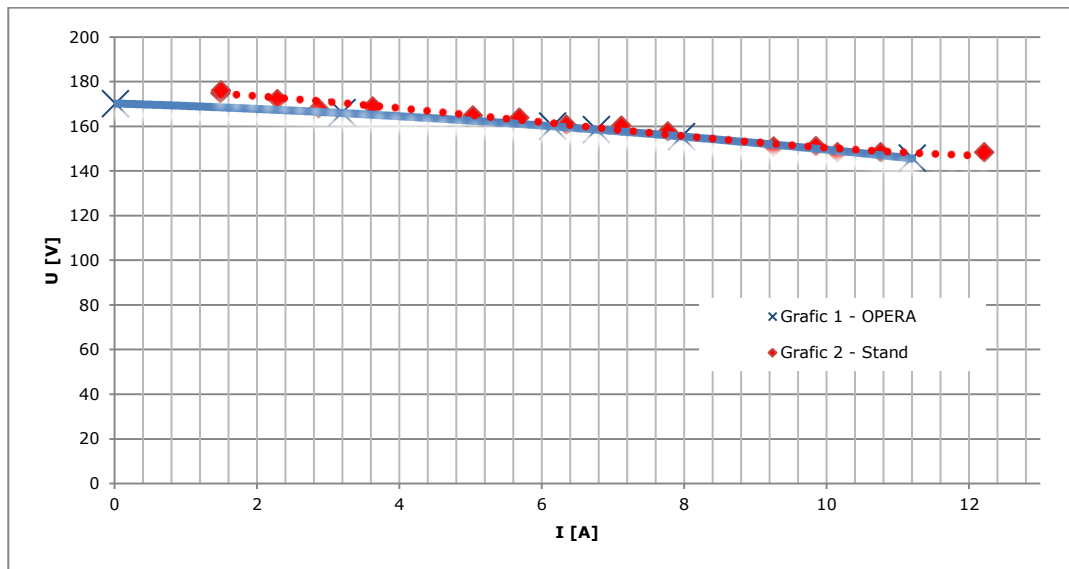


Fig. 5.18. Comparație între caracteristica externă a GSMP studiat obținută pe baza simulărilor în OPERA și cea obținută din probele efectuate în laborator



O direcție de dezvoltare ulterioară a studiului experimental al generatorului sincron cu magneți permanenți poate fi cea referitoare la testele de regim tranzitoriu cu rotorul în repaus [B4][B5][G7][ST1][ST2].

## **5.4 Concluzii**

În acest capitol au fost prezentate standul experimental și sistemul de achiziție și prelucrare a datelor cu ajutorul cărora au putut fi realizate determinările experimentale propuse pentru generatorul sincron cu magneți permanenți studiat. Astfel au fost prezentate valorile parametrilor rezultați din determinările experimentale pe standul de probă. De asemenea a fost realizată analiza comparativă a rezultatelor obținute experimental cu cele obținute pe cale analitică din calculul bazat pe metoda elementului finit în mediul OPERA. În urma comparației s-a constatat faptul că există o bună similitudine între valorile parametrilor obținute din simulări și cele obținute în urma încercărilor pe standul de probă, precum și între formele de undă ale tensiunilor rezultate din calculul numeric și cele din măsurători directe.

## 6. ANALIZA UNEI VARIANTE CONSTRUCTIVE DE GENERATOR SINCRON CU MAGNEȚI PERMANENȚI 5kVA – PROTOTIP 2

Acest capitol vizează prezentarea unui alt prototip de generator sincron cu magneți permanenți cu turație scăzută, Prototipul 2, de aceeași putere nominală ca și primul prototip analizat, ale cărui performanțe vor fi comparate ulterior cu cele ale Prototipului 1. Deosebirea dintre cele două prototipuri reiese la nivel constructiv prin numărul de creștături statorice, Prototipul 2 fiind caracterizat de un număr de 63 de creștături, spre deosebire de Prototipul 1 la care numărul creștăturilor este de 33. Această modificare constructivă conduce evident la alți parametri și alte caracteristici ale generatorului de 5 kVA, aspecte care vor fi analizate în continuare.

### 6.1 Construcție, date nominale – varianta $N_c=63$ creștături

Principalele date nominale și dimensiuni geometrice ale generatorului sincron cu magneți permanenți cu 63 de creștături – Prototip 2 – sunt asemănătoare, unele chiar identice cu cele ale generatorului sincron cu 33 de creștături – Prototip 1 – și anume:

- puterea nominală:  $S_n = 5 \text{ kVA}$ ;
- curentul nominal:  $I_n = 10 \text{ A}$ ;
- turația nominală:  $n_N = 120 \text{ rpm}$ ;
- frecvența nominală:  $f_n = 32 \text{ Hz}$ ;
- numărul de perechi de poli:  $p = 16$ ;
- cuplul nominal:  $M_n = 400 \text{ Nm}$ ;
- lungimea axială a generatorului:  $L = 120 \text{ mm}$ .

Din punct de vedere al topologiei constructive rotorul este identic cu cel al Prototipului 1. Acesta conține 32 de magneți permanenți din NdFeB cu o lățime  $l_m = 32 \text{ mm}$  și grosime  $g_m = 7 \text{ mm}$  așezați radial la distanțe egale pe suprafața sa, caracterizat de un pas poalar mic. Statorul Prototipului 2 este diferit față de cel al Prototipului 1, fiind caracterizat de un număr de 63 de creștături ale căror dimensiuni geometrice sunt prezentate în figura 6.1 realizată în pre-procesorul mediului OPERA. Prin utilizarea opțiunii "Modify Properties" au fost create în OPERA replici după creștătura din figura 6.1 și astfel a fost realizat statorul a cărui secțiune transversală este prezentată în figura 6.2.

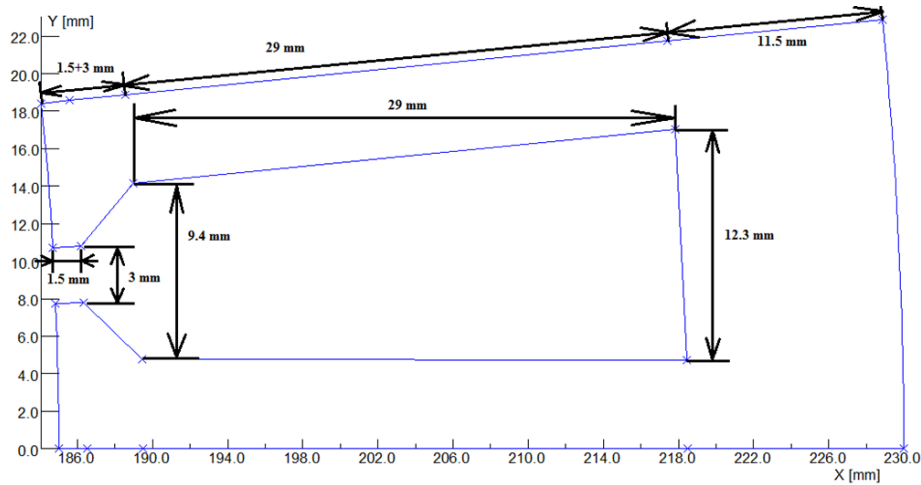


Fig. 6.1. Representarea unei crestături statorice pentru Prototipul 2 în OPERA

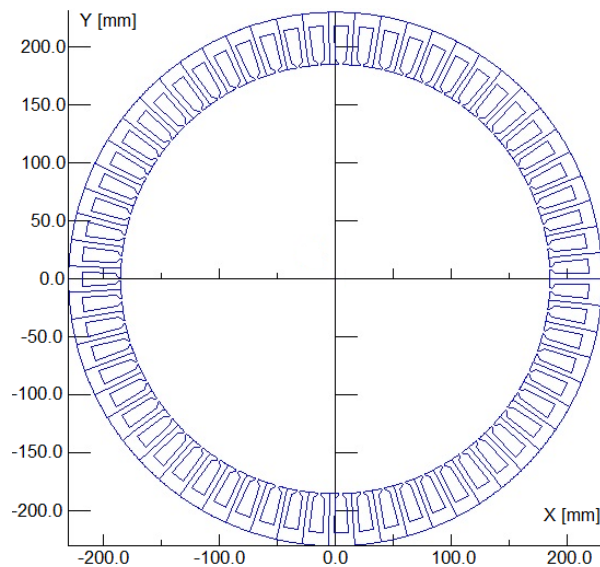


Fig. 6.2. Representarea crestăturilor statorice ale Prototipului 2 în OPERA

În cele 63 de crestături statorice sunt plasate înfășurările de curent alternativ trifazate. Schema de bobinaj a fost realizată în două straturi, iar bobinele utilizate conțin un număr de 21 spire/bobine cu o rezistență a conductorului pe unitatea de lungime  $R_c = 5,4 \cdot 10^{-3} \Omega/\text{m}$ .

În figura următoare este prezentată distribuția înfășurărilor în crestăturile statorice în OPERA. De asemenea, în figura 6.12 și în figura 6.13 este redată câte o vedere frontală a înfășurărilor pentru Prototipul 1, respectiv Prototipul 2.

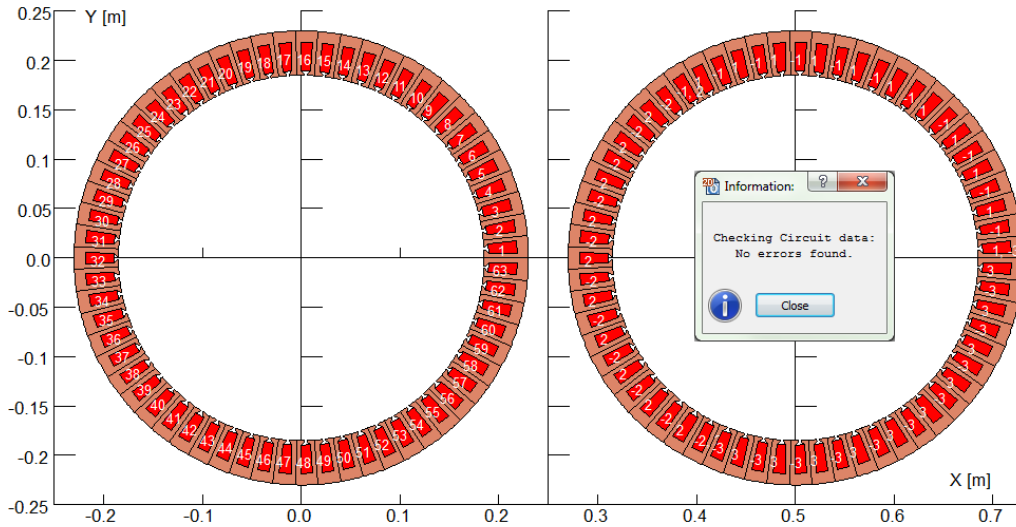


Fig. 6.3. Schema de bobinaj a generatorului

Rotorul generatorului, circuitul magnetic și întrefierul sunt identice cu cele ale Prototipului 1. Un număr de 32 de magneți permanenți cu o lățime  $l_m = 32 \text{ mm}$  și o grosime  $g_m = 7 \text{ mm}$  din material NdFeB sunt lipiți pe suprafața rotorului. Așadar rotorul conține un număr mare de perechi de poli  $p = 16$  necesar pentru funcționarea la turație scăzută. În figura 6.4 este prezentat modelul Prototipului 2 construit în OPERA.

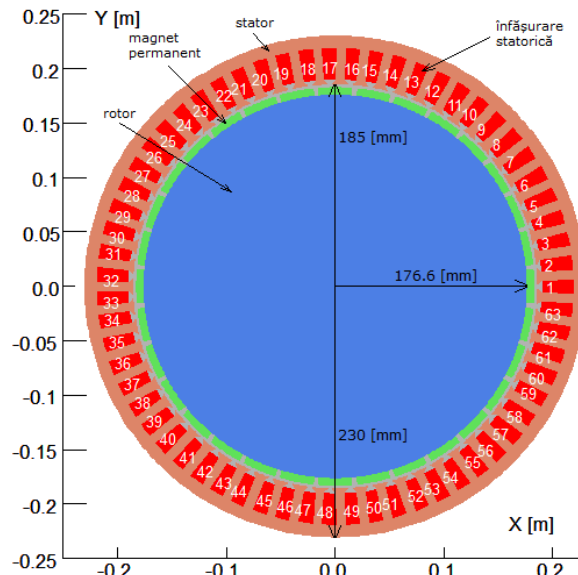


Fig. 6.4. Prezentarea generală a GSMP cu 63 de creștături

## 6.2 Simularea numerică în mediul OPERA

Ca și prim demers pentru analiza numerică a generatorului sincron cu magneți permanenți, se realizează generarea rețelei de discretizare. Pentru modelul creat, rețeaua de discretizare obținută este alcătuită dintr-un număr de 45890 elemente și 23135 de noduri.

O prima analiză realizată în OPERA este calculul câmpului magnetic al generatorului pe baza metodei elementului finit. Spectrul câmpului magnetic asociat Prototipului 2 cu rotorul generatorului în stare de repaus este reprezentat în figura 6.5.

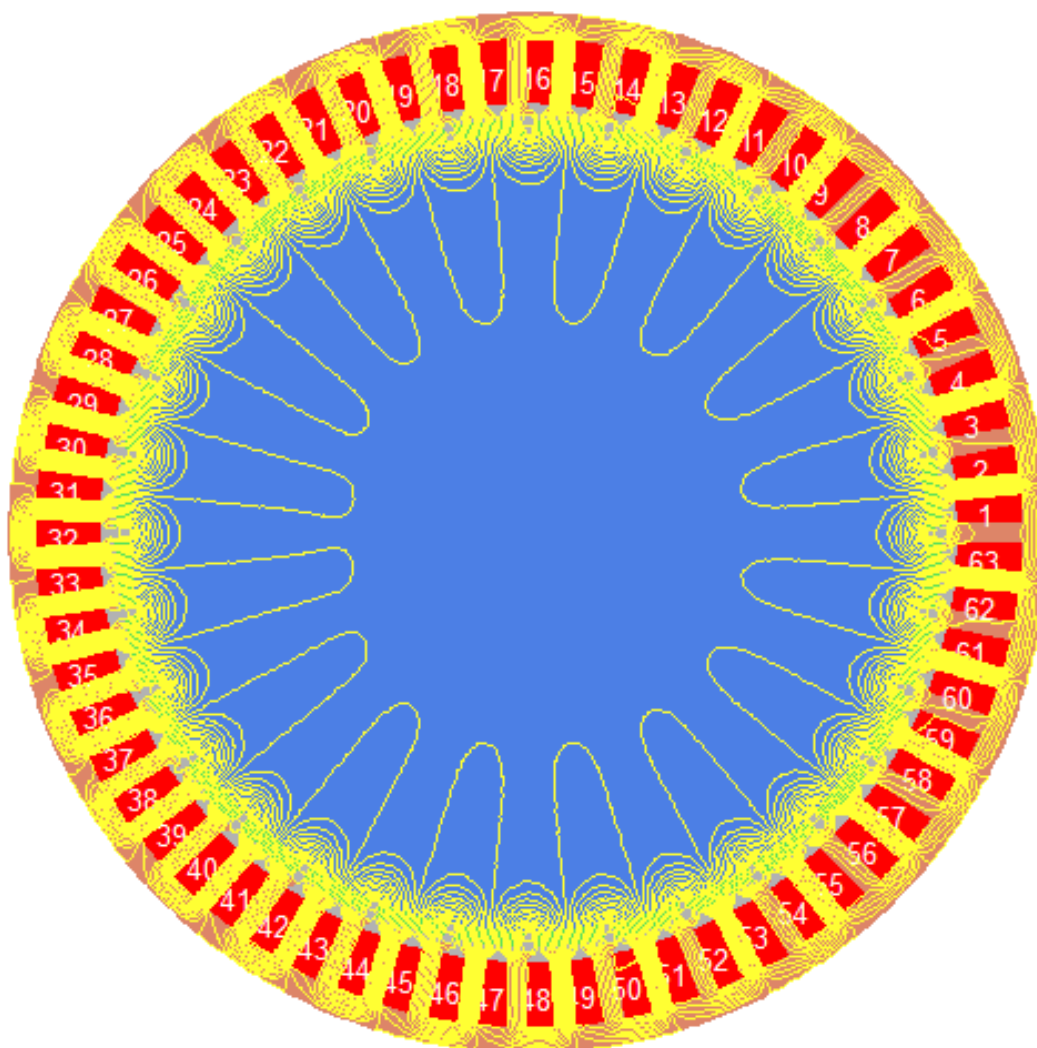


Fig. 6.5. Spectrul câmpului magnetic pentru Prototipul 2

Distribuția densității fluxului magnetic este dată de către poziția magneților permanenți în raport cu creșturile rotorice. Astfel se poate observa din figura următoare că densitatea maximă a fluxului util este atinsă atunci când axa d este suprapusă pe axa unei înfășurări statorice (figura 6.6-a), iar densitatea minimă este obținută atunci când axa d este orientată pe axa unui dinte statoric (figura 6.6-b).

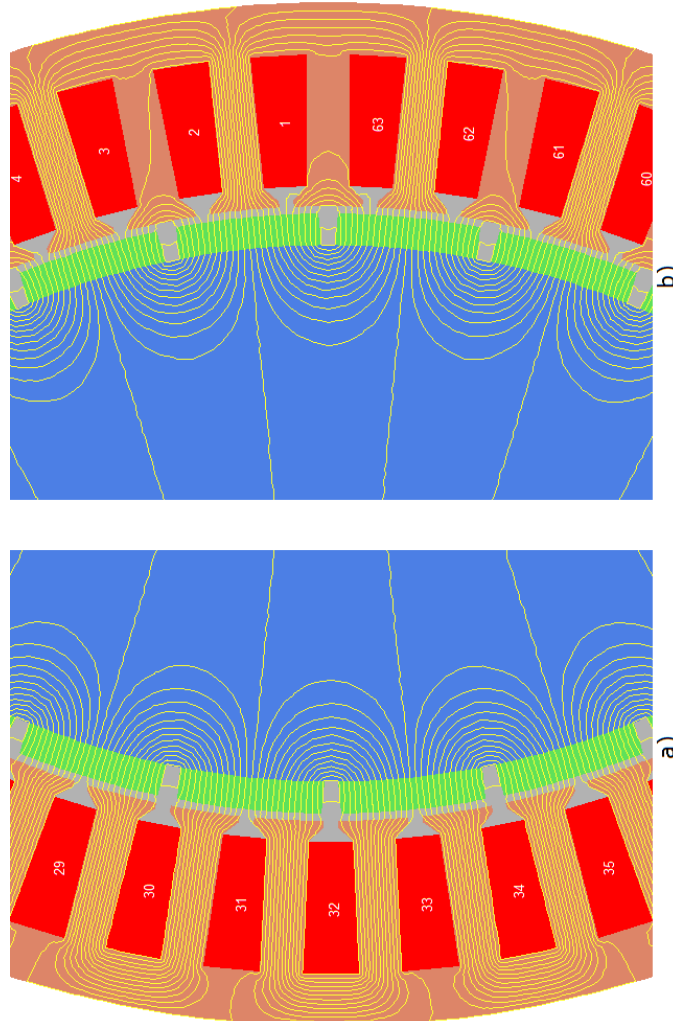


Fig. 6.6. Distribuția densității fluxului magnetic în funcție de poziția rotorului în raport cu statorul

Cu ajutorul OPERA se poate reda grafic valoarea inducției magnetice în funcție de valoarea unghiului geometric. De exemplu pentru o poziție a rotorului corespunzătoare cu cea din figura 6.5, interpretarea grafică a variației componente normale a inducției  $B_n$  în întrefier pe întreaga mașină este prezentată în figura

următoare. Se observă de pe grafic că valoarea maximă calculată în OPERA a inducției este aproximativ  $B_n \cong 0.8 [T]$ .

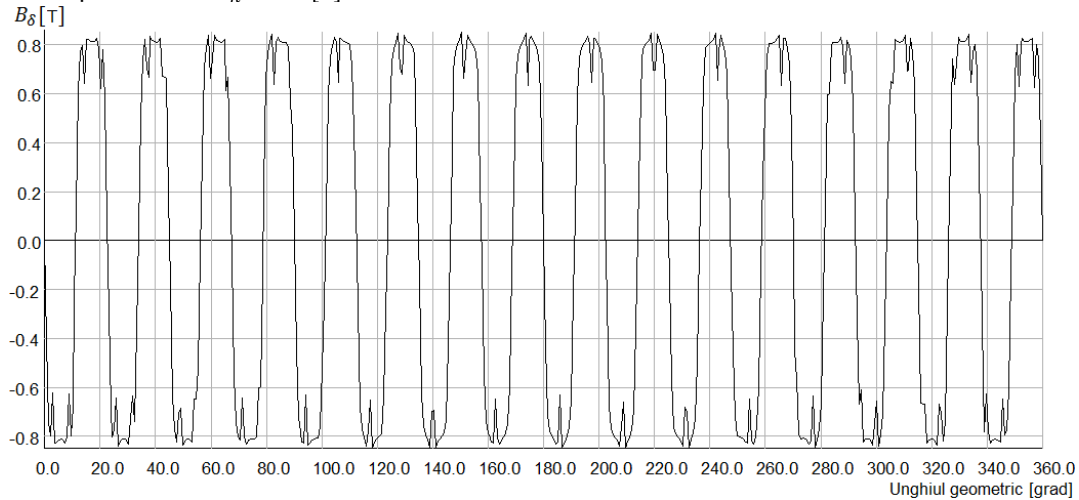


Fig. 6.7. Variația componentei normale a inducției  $B_n$  în întrefier

După ce au fost prezentate câteva rezultate importante obținute la analiza în regim static urmează determinarea performanțelor generatorului în mișcare de rotație. Primul pas este stabilirea datelor de intrare, după care urmează procesarea mărimilor calculate. În urma simulărilor au fost determinate formele de undă pentru tensiunea electromotoare indusă în înfășurările statorice și cuplul parazit al generatorului sincron cu magneți permanenți pentru turația nominală  $n_N = 120 \text{ rpm}$ .

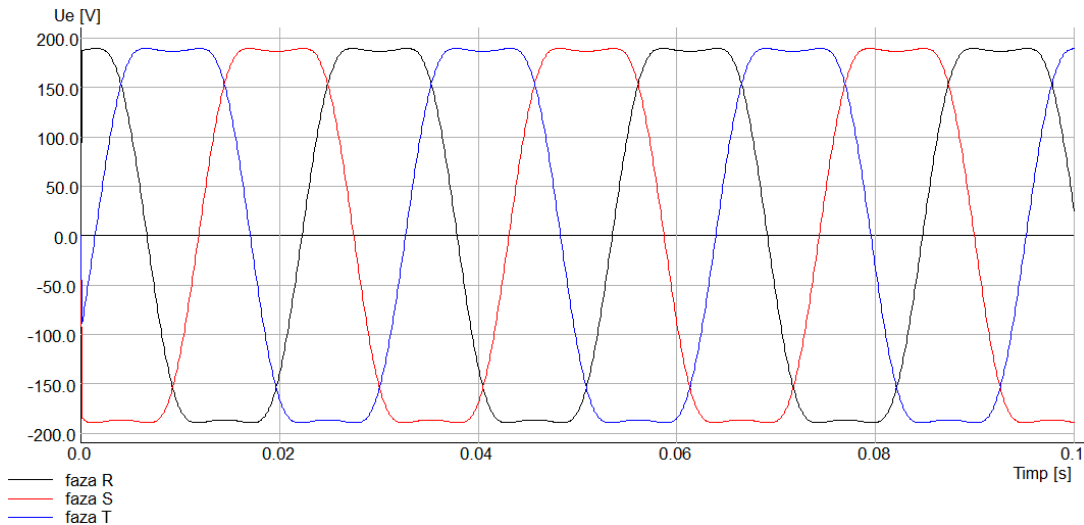


Fig. 6.8. Formele de undă ale tensiunii electromotoare induse pentru cele trei faze la turația  $n_N = 120 \text{ rpm}$  (Prototip 2)

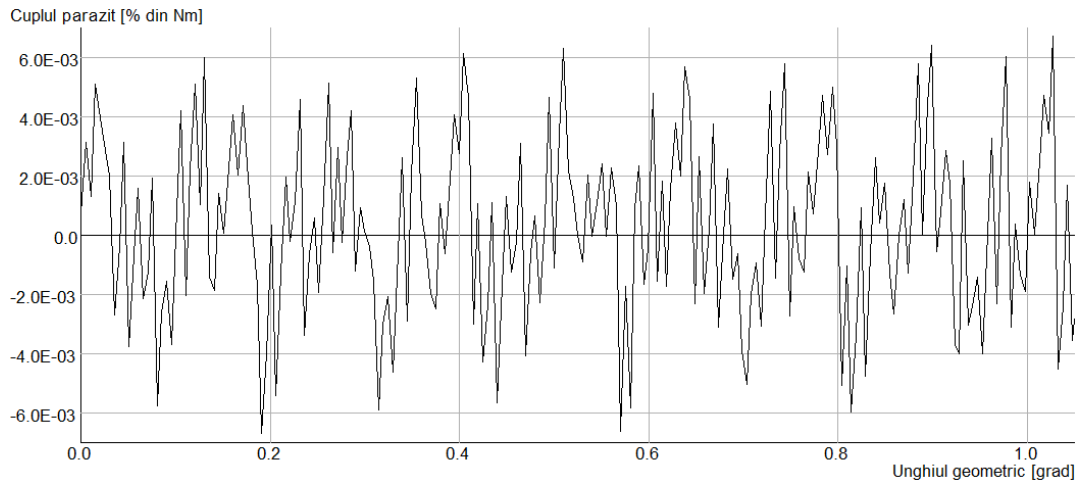


Fig. 6.9. Cuplul parazit al GSMP Prototip 2 obținut pe baza metodei elementului finit cu ajutorul OPERA

În ceea ce privește determinarea caracteristicii externe a Prototipului 2 au fost efectuate simulări pe baza modelului construit în OPERA. Simulările au fost efectuate la o turație constantă egală cu cea nominală,  $n_n = 120 \text{ rpm}$ , pentru sarcină rezistivă. Astfel au fost efectuate o serie de simulări pentru valorile rezistențelor din tabelul 6.1, iar tensiunea și curentul obținute pentru fiecare valoare a sarcinii sunt expuse în același tabel, pe baza lor fiind obținută puterea activă utilă  $P_2$  debitată de către generator la exterior. De asemenea, caracteristica externă a Prototipului 2 obținută pe baza simulărilor este prezentată în figura 6.10.

Tabel 6.1. Datele obținute din simularea încărcării cu sarcină rezistivă a GSMP Prototip 2

Nr. crt.	R [ $\Omega$ ]	U [V]	I [A]	$P_2$ [kW]
1	6.5	131.18	20.182	7.942
2	9.1	145.13	15.948	6.944
3	13	157.84	12.142	5.749
4	19.5	166.21	8.524	4.250
5	23.4	169.02	7.223	3.663
6	26	170.72	6.566	3.363
7	52	175.43	3.374	1.776
8	13000	179.25	0.014	0.007



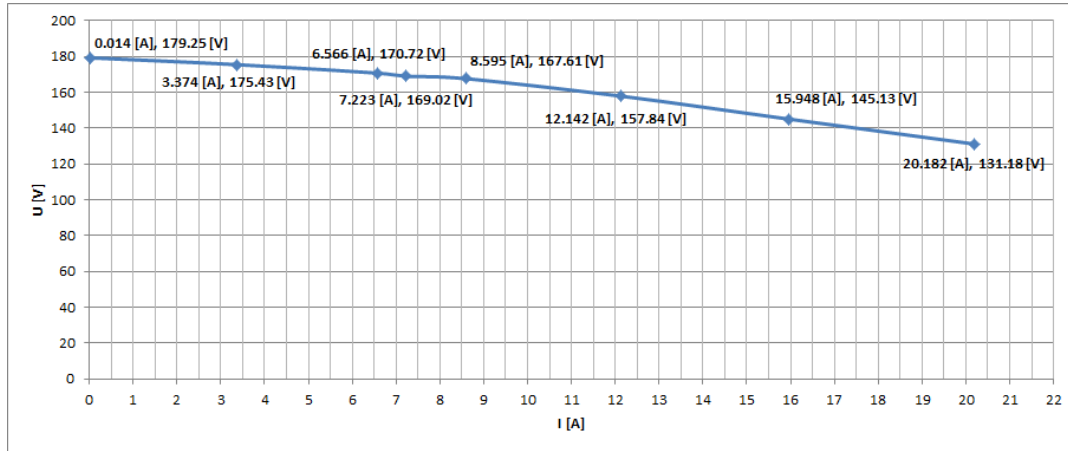


Fig. 6.10. Caracteristica externă  $U = f(I)$  la sarcină rezistivă a Prototipului 2 obținută pe baza simulărilor în OPERA

Având la dispoziție o serie de rezultate experimentale pentru Prototipul 2, a fost întocmită grafic o comparație între caracteristica externă obținută pe cale analitică în OPERA și caracteristica externă obținută pe cale experimentală. Această comparație este expusă în figura 6.11.

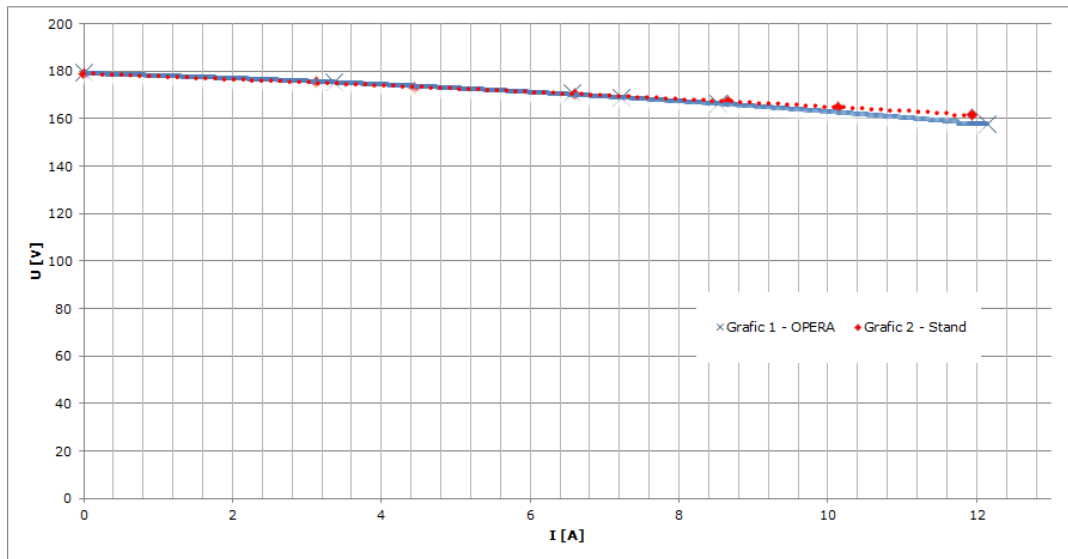


Fig. 6.11. Comparație între caracteristica externă a Prototipului 2 obținută pe baza simulărilor în OPERA și cea obținută pe cale experimentală

### 6.3 Comparație între cele două prototipuri

Așa cum s-a prezentat în capitolele anterioare, după descoperirea beneficiilor și performanțelor magneților permanenți utilizarea acestora la generatoarele sincrone oferă posibilități multiple de abordare a diferitor configurații constructive. Din acest motiv există numeroase studii în care autorii analizează diferite structuri ale generatoarelor sincrone cu magneți permanenți în scopul optimizării și creșterii performanțelor acestora. Astfel nu există o trasabilitate clară a unui anumit șablon constructiv, fiecare generator fiind proiectat pentru tipul de aplicație și condițiile în care urmează a fi folosit, oferind o oarecare libertate proiectantului. În acest fel acesta are posibilitatea să aleagă ce performanțe vrea să obțină de la generatorul dorit, dar în același timp să aibă în vedere compromisul în ceea ce privește scăderea altor performanțe.

În ceea ce privește construirea celor două generatoare, Prototipul 1, respectiv Prototipul 2, scopul urmărit de la bun început a fost obținerea unei structuri simple, a unor performanțe generale bune și a unui cuplu parazit redus. Astfel au fost construite și testate două prototipuri de putere 5 kVA cu parametri nominali și structuri constructive asemănătoare pentru aplicații eoliene la turație nominală  $n_N = 120 \text{ rpm}$ .

Tabel 6.2. Specificațiile tehnice ale celor două prototipuri

Parametru	Specificație tehnică	
	Prototip 1	Prototip 2
Crestături statorice	33	63
Perechi de poli	16	16
Materialul magneților permanenți	NdFeB	NdFeB
Lățimea magneților permanenți	32 [mm]	32 [mm]
Grosimea magneților permanenți	7 [mm]	7 [mm]
Dimensiunea întrefirului	1.4 [mm]	1.4 [mm]
Lungimea transversală a generatorului	120 [mm]	120 [mm]
Puterea nominală	5 [kVA]	5 [kVA]
Curentul nominal	12 [A]	10 [A]
Turația nominală	120 [rpm]	120 [rpm]
Frecvența nominală	32 [Hz]	32 [Hz]
Cuplul nominal	400 [Nm]	400 [Nm]
Numărul de spire	84	42
C.m.m.m.c.	1056	2016

Indicele comparativ c.m.m.m.c. reprezintă cel mai mic multiplu comun dintre numărul de poli și numărul de creștături statorice  $N_c$ . Este necesar ca acest indice să fie introdus ca element comparativ, deoarece, așa cum se va arăta în continuare, valoarea lui influențează semnificativ cuplul parazit.

Rotorul celor două generatoare este identic și conține un număr mare de perechi de poli  $p = 16$ , deci implicit un pas polar mic, lucru care este fundamental pentru funcționarea eficientă și performantă la turație scăzută a generatoarelor sincrone cu magneți permanenți [R1]. Cei 32 de magneți permanenți sunt realizați din material de tip NdFeB, cu o lățime  $l_m = 32 \text{ mm}$  și o grosime  $g_m = 7 \text{ mm}$  și sunt lipiți pe suprafața rotorului, încadrând astfel generatorul în clasa celor cu poli proeminenți. Această

topologie oferă o structură mecanică simplă și în același timp performanțe bune și eficiență ridicată [G8].

Principala deosebire dintre cele două prototipuri o reprezintă construcția statorului. Primul prototip este caracterizat de un număr de 33 de creștături statorice în care sunt plasate înfășurările trifazate de curent alternativ într-un singur strat (figura 6.12). La cel de-al doilea prototip, statorul prezintă 63 de creștături în care sunt plasate înfășurările trifazate de curent alternativ în două straturi (figura 6.13).

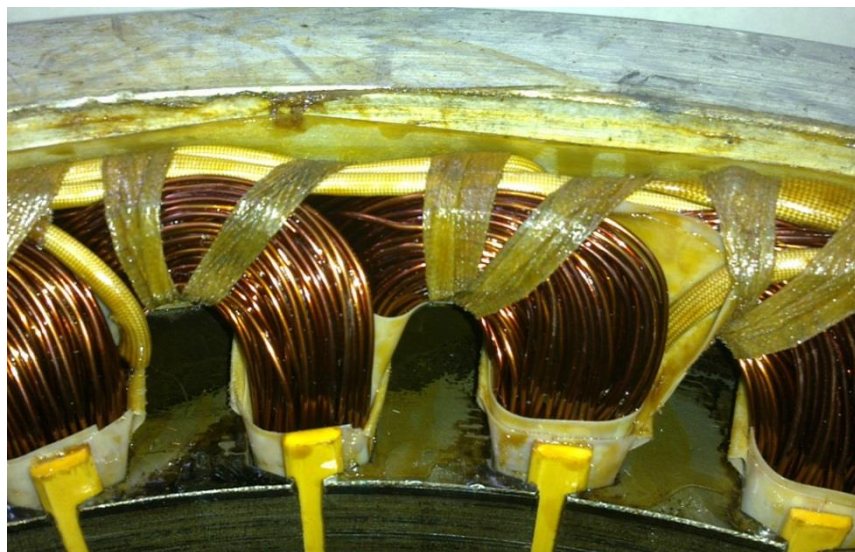


Fig. 6.12. Înfășurările statorice – Prototip 1

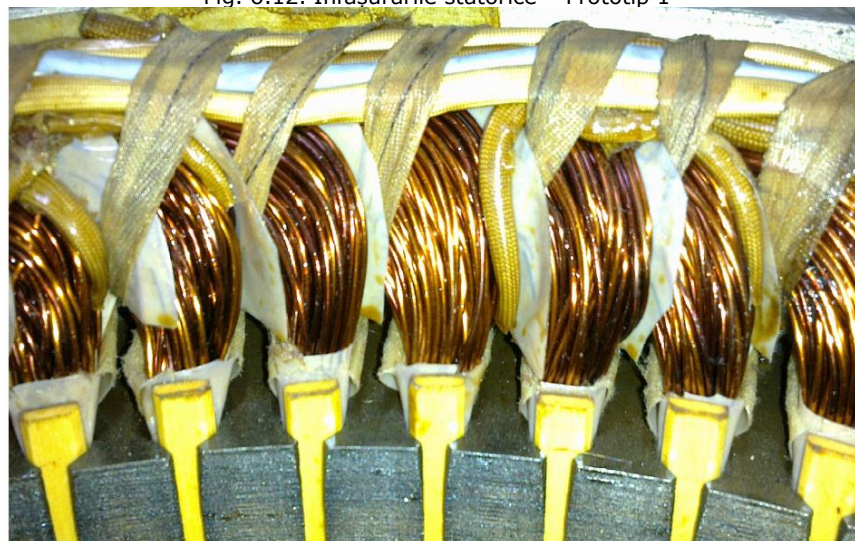


Fig. 6.13. Înfășurările statorice – Prototip 2

Analizarea performanțelor și comparația acestora pentru cele două generatoare a fost facilitată de către OPERA cu ajutorul căruia au fost efectuate numeroase simulări. În primă instanță a fost analizat câmpul magnetic al celor două generatoare. În figura 6.14 (și anexa 15) este reprezentată în detaliu repartitia fluxului magnetic la cele două generatoare atunci când generatorul funcționează în gol.

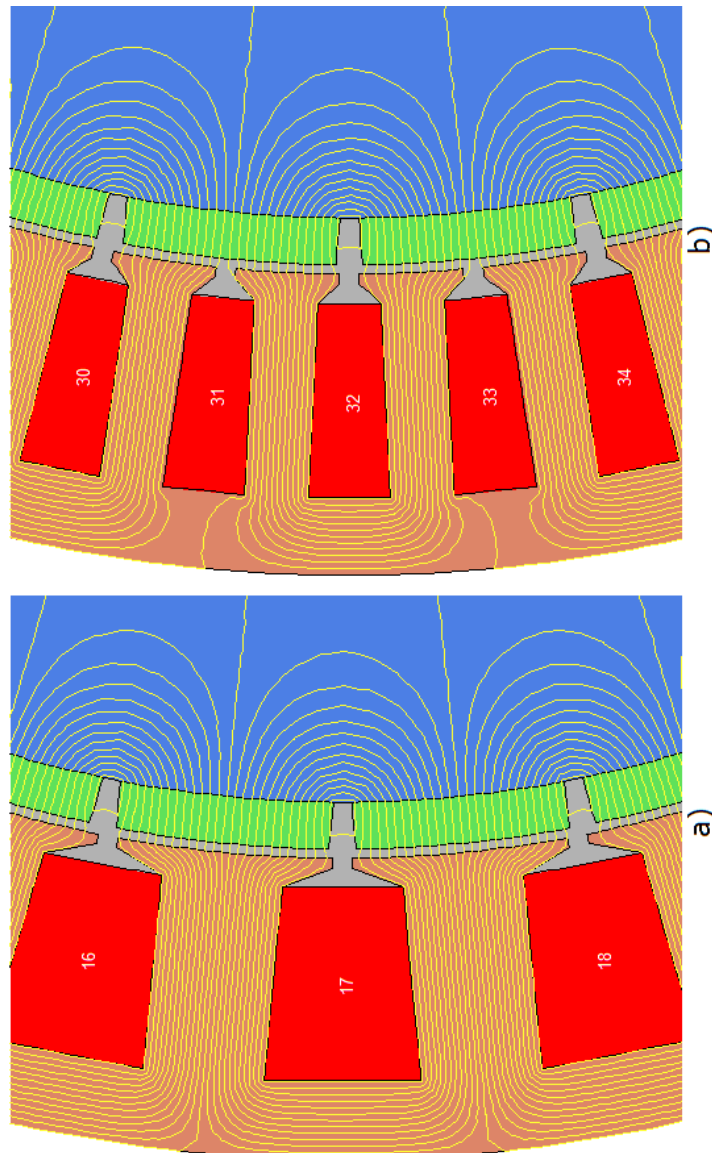


Fig. 6.14. Distribuția fluxului magnetic calculat la funcționare în gol:  
a) Prototip 1; b) Prototip 2.

Pentru o poziție a rotorului corespunzătoare cu cea din figura anterioară densitatea fluxului magnetic din creștăturile statorului este maximă.

Un parametru de mare interes pentru cele două prototipuri îl reprezintă tensiunea electromotoare indusă, care oferă informații importante în ceea ce privește performanța unui generator. Pe baza câmpului magnetic calculat au fost determinate în urma simulărilor, formele de undă ale tensiunilor electromotoare induse în înfășurările statorice. În figura 6.15 sunt reprezentate grafic formele de undă ale tensiunii electromotoare indusă pe faza R pentru Prototipul 1, respectiv Prototipul 2, la funcționare în gol și turație nominală a rotorului,  $n_N = 120 \text{ rpm}$ .

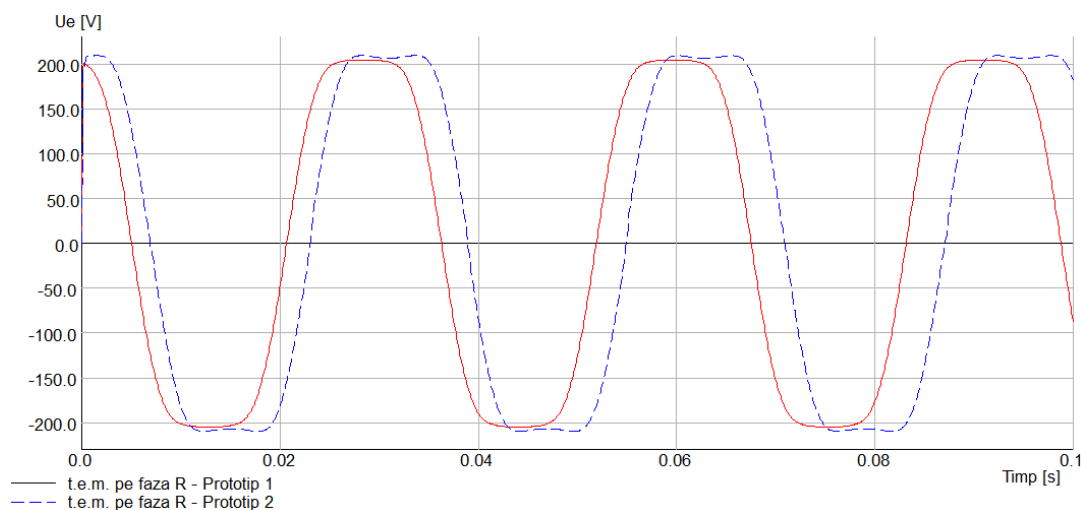


Fig. 6.15. Comparație între formele de undă ale tensiunii electromotoare indusă pe faza R la cele două prototipuri

Se observă din figura anterioară că pentru funcționarea în gol și la turație nominală a rotorului pentru o perioadă de rotație completă amplitudinea tensiunii electromotoare induse este puțin mai mică la Prototipul 1, comparativ cu amplitudinea tensiunii electromotoare indusă corespunzătoare Prototipului 2. Pentru Prototipul 1 s-a obținut cu ajutorul *Opera* o valoare calculată a tensiunii electromotoare indusă pe faza R egală cu  $U_{R120} = 170.11 \text{ V}$ , în timp ce pentru Prototipul 2 valoarea tensiunii electromotoare indusă pe faza R calculată în OPERA este egală cu  $U_{R120} = 179.25 \text{ V}$ . Așadar din acest punct de vedere Prototipul 2 se dovedește a fi mai performant decât Prototipul 1.

Stabilitatea generatoarelor sincrone la variații ale sarcinilor reprezintă o temă de studiu însemnată, mai ales în cazul în care generatoarele sunt destinate pentru funcționarea în regim autonom, așa cum este și cazul celor două prototipuri abordate în această teza. De aici a rezultat motivul pentru care acest aspect nu a rămas neglijat și ca urmare au fost efectuate simulări cu cele două prototipuri pentru diferite sarcini de încărcare de tip rezistiv. Astfel au fost obținute caracteristicile externe pentru cele două prototipuri fiind expuse în figura 6.16.

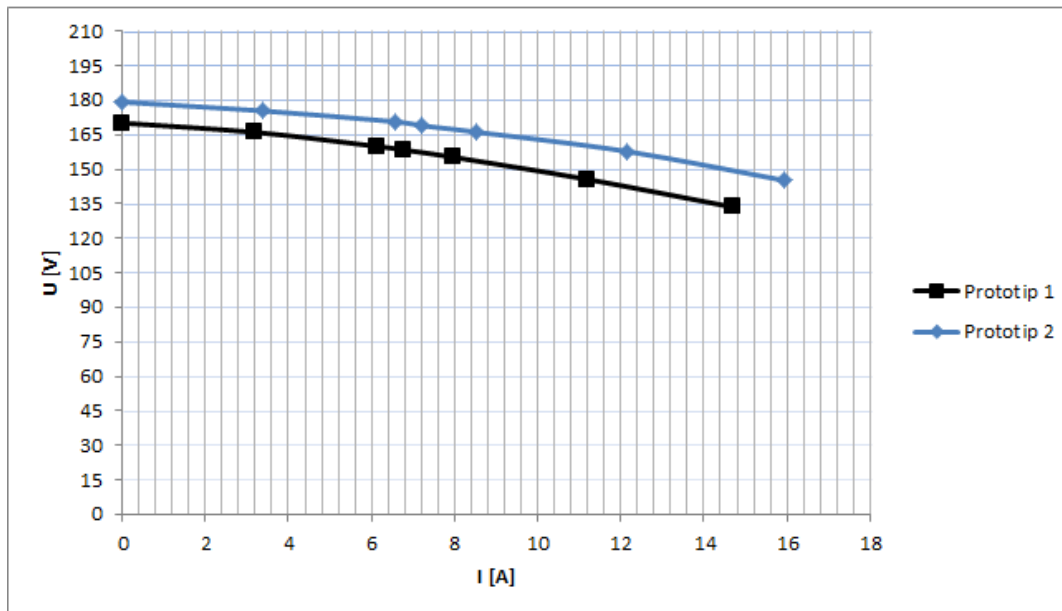


Fig. 6.16. Caracteristicile externe  $U = f(I)$  la sarcină rezistivă ale celor două prototipuri

Se observă din figura 6.16 că valoarea tensiunii la bornele Prototipului 1 este mai mică decât valoarea tensiunii la bornele Prototipului 2 pentru aceeași sarcină de încărcare. De asemenea se observă că la Prototipul 1 tensiunea la borne scade mai accentuat pe măsură ce curentul de încărcare crește, comparativ cu Prototipul 2.

Un aspect comun întâlnit la cele două prototipuri îl reprezintă faptul că sunt caracterizate de către o valoare mare a indicelui dat de către cel mai mic multiplu comun dintre numărul de poli și numărul de creștături ale mașinii. Conform literaturii de specialitate [F2], unii autori recomandă determinarea acestui indice care se află în legătură directă cu cuplul parazit, fiind constatat faptul că cu cât c.m.m.m.c. are valori mai mari cu atât cuplul parazit este mai redus. Astfel acest indice reprezintă un aspect important de care trebuie ținut cont în stadiul de proiectare a generatoarelor sincrone cu magneți permanenți.

Cuplul parazit reprezintă o valoare dependentă de unghiul geometric al generatorului, adică de poziția relativă dintre rotor și stator, indiferent dacă rotorul se află în stare de mișcare sau în stare de repaus, iar frecvența sa este de regulă dată de către indicele c.m.m.m.c. Acest fenomen se manifestă în special la generatoarele care funcționează la turație scăzută, având ca și efect trepidațiile. Este cunoscut faptul că pentru valori ridicate ale cuplului parazit pot fi afectate funcționarea normală și pornirea ansamblului eolian la viteze mici ale vântului, fiind afectat astfel randamentul generatorului. Pentru evitarea problemelor create de către cuplul parazit, în stadiul de proiectare se urmărește posibilitatea de realizare a unei frecvențe mari a cuplului parazit care duce la scăderea amplitudinii acestuia [T3][Z1][G5].

În figura 6.17 este prezentată comparația între cele două generatoare din punct de vedere al cuplului parazit calculat cu ajutorul OPERA. Din punct de vedere a valorilor calculate pe baza metodei elementului finit, Prototipul 2 oferă un avantaj față de Prototipul 1, prezentând un cuplu parazit mult mai redus. Pentru Prototipul 1 care este caracterizat de c.m.m.c.=1056, s-a determinat o valoare a cuplului parazit de aproximativ 0,17% din cuplul nominal, în timp ce la Prototipul 2 care este caracterizat de c.m.m.c.=2016, pe baza metodei elementului finit s-a determinat o valoare a cuplului parazit de aproximativ 0,01% din cuplul nominal.

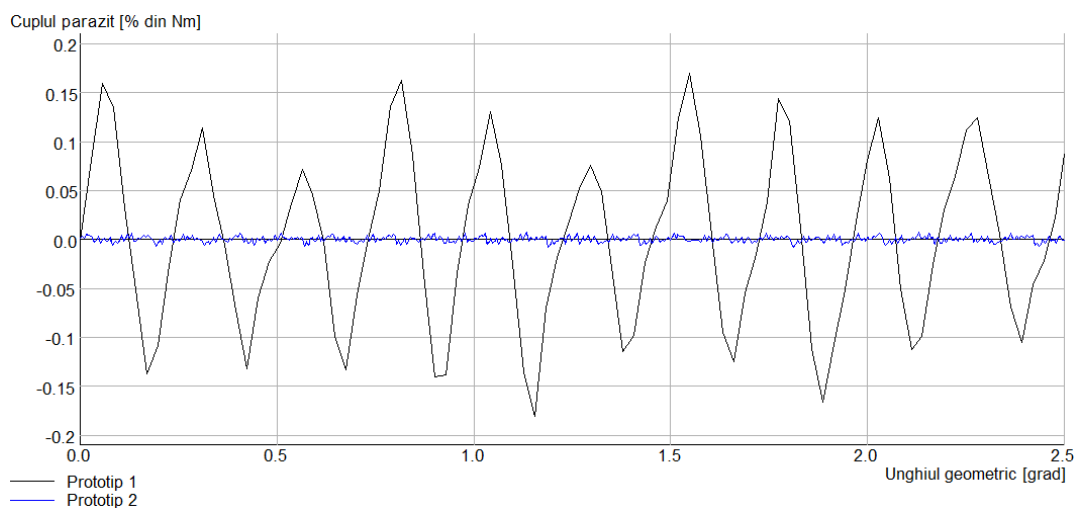


Fig. 6.17. Cuplul parazit manifestat la cele două GSMP obținut pe baza metodei elementului finit în OPERA

Figura anterioară confirmă faptul că pentru ambele prototipuri a fost ales un indice c.m.m.c. bun în procesul de proiectare din punct de vedere al cuplului parazit rezultat la cele două generatoare, raportul dintre numărul de creștături statorice și numărul de poli magnetici conducând la valori reduse ale acestuia în raport cu cuplul nominal.

În mod obișnuit, la funcționarea în sarcină, datorită interacțiunii dintre câmpul magnetic generat de către magneții permanenți și câmpul de reacție al armăturii apar componente armonice scăzute ale forțelor radiale și în consecință vibrații și zgomote de ordin scăzut. Pe lângă obținerea unui cuplu parazit redus, trebuie ținut cont în stadiul de proiectare și de menținerea acestor componente în limitele rezonabile. În cazul celor două generatoare analizate s-a constatat în realitate apariția unor forțe de atracție magnetică unilaterală care generează zgomot. Însă având în vedere faptul că ambele prototipuri sunt mașini de putere mică, aceste efecte parazite precum forțele magnetice dezechilibrante și zgomotele acustice prezintă niveluri acceptabile. Cu toate acestea, Prototipul 1 prezintă un nivel de zgomot acustic și de vibrații mai ridicat, comparativ cu Prototipul 2 [B10][G8].

## 6.4 Concluzii

În acest capitol a fost prezentat cel de-al doilea prototip de generator sincron cu magneți permanenți cu turație scăzută care este diferit față de primul prototip studiat din punct de vedere constructiv prin numărul de creștături statorice. Modelul Prototipului 2 caracterizat de un număr de 63 de creștături a fost construit în OPERA și au fost apoi determinate analitic distribuția fluxului magnetic, valoarea inducției magnetice în întrefier, formele de undă pentru tensiunea electromotoare indusă în înfășurările statorice și cuplul parazit al generatorului pentru turația nominală  $n_N = 120 \text{ rpm}$ .

De asemenea a fost prezentată o analiză comparativă între două generatoare cu magneți permanenți și turație scăzută, de aceeași putere nominală, asemănătoare din punct de vedere constructiv, caracterizate de o structură simplă, principala deosebire fiind topologia statorului.

Din punct de vedere al performanțelor funcționale ambele generatoare oferă rezultate bune. Prin comparația tensiunilor electromotoare induse la funcționarea în gol și la turație nominală a rotorului s-a dovedit că Prototipul 2 este mai performant decât Prototipul 1. În ceea ce privește stabilitatea celor două generatoare la variații ale sarcinilor, în urma comparației caracteristicilor externe ale celor două prototipuri s-a constatat că valoarea tensiunii la bornele Prototipului 2 este mai mare decât valoarea tensiunii la bornele Prototipului 1 pentru aceeași valoare a rezistenței de sarcină. Deci și din acest punct de vedere Prototipul 2 are o comportare mai bună.

În ceea ce privește un alt parametru important al generatoarelor sincrone cu magneți permanenți, și anume cuplul parazit, s-a constatat faptul că ambele prototipuri sunt caracterizate de valori mici ale acestuia. Comparativ, pe baza valorilor obținute în OPERA, Prototipul 2 oferă un avantaj față de Prototipul 1, prezentând un cuplu parazit mult mai redus și automat un nivel de zgomot acustic și de vibrații mai scăzut. Deoarece ambele prototipuri sunt mașini de putere mică, efectele parazite precum forțele magnetice dezechilibrante și zgomotele acustice cauzate de către cuplul parazit se încadrează la niveluri acceptabile. Ca urmare și din acest punct de vedere al valorii cuplului parazit Prototipul 2 este mai bun.

O altă concluzie importantă care reiese din această analiza confirmă faptul că valorile c.m.m.m.c. reprezintă un indiciu foarte bun pentru faza de proiectare a unui generator sincron cu magneți permanenți în ceea ce privește controlul cuplului parazit. În cazul de față se consideră că valorile c.m.m.m.c. alese pentru cele două generatoare sunt prea mari, și chiar dacă au condus la diminuarea aproape completă a cuplului parazit au apărut în consecință forțe magnetice unilaterale. Din acest punct de vedere se consideră că valori cuprinse între 500-800 ale c.m.m.m.c. sunt suficient de mari pentru menținerea unui cuplu parazit la un nivel acceptabil. Astfel la alegerea numărului de creștături trebuie avută în vedere menținerea unui echilibru în ceea ce privește obținerea unui cuplu parazit la nivel acceptabil și apariția altor efecte parazite precum forțele de atracție magnetică unilaterală.



## **7. ANALIZA PERFORMANTELOR UNUI GENERATOR SINCRON TRIFAZAT CU MAGNEȚI PERMANENȚI ȘI PIESE FEROMAGNETICE INTERPOLARE**

Acest capitol este dedicat analizei unui generator sincron trifazat cu magneți permanenți de NdFeB inserați în rotor având ca scop evidențierea efectului de saliență inversă al rotorului în cazul în care acesta este construit cu un număr mic de poli.

Datorită numărului mic de poli se dorește a se demonstra faptul că la acest tip de structură a rotorului are loc efectul de saliență inversă, caz în care reactanța sincronă transversală  $X_q$  este mai mare decât reactanța sincronă longitudinală  $X_d$ . Ca urmare a acestui efect, generatorul prezintă o capacitate de compensare proprie a tensiunii pentru menținerea tensiunii la borne aproape constantă la diferite încărcări de sarcină, aspect benefic pentru funcționarea în regim autonom.

Vor fi prezentate în continuare câteva caracteristici și performanțe obținute cu ajutorul OPERA pe baza metodei elementului finit și evidențiate beneficiile acestui tip de generator pentru aplicațiile în care este necesară menținerea tensiunii de ieșire aproape constantă, indiferent de sarcină de încărcare, cum ar fi de exemplu funcționarea generatorului în regim autonom.

### **7.1 Prezentarea topologiei constructive a generatorului sincron cu magneți permanenți cu 4 poli**

Structura generatorului sincron cu magneți permanenți cu 4 poli magnetici studiat în acest capitol este ilustrată în figura 7.1. Rotorul conține patru poli magnetici între care sunt inserate piesele feromagnetice. În stator sunt așezate bobine trifazate conectate în stea, cu număr întreg de creștături pe pol pe fază ( $q=3$ ) și un singur strat: 6 bobine conectate în serie pe o fază cu 42 de spire pe bobină. Secțiunea transversală a conductorului este de  $1.1\text{mm}^2$ .

Datele nominale ale generatorului sincron studiat sunt:

- puterea nominală:  $S_n = 4\text{ kVA}$ ;
- număr de poli:  $p = 4$ ;
- grosimea magnetului permanent:  $g_m = 5\text{ mm}$ ;
- grosimea întrefierului:  $\delta = 1\text{ mm}$ ;
- lungimea axilă a generatorului:  $L = 120\text{ mm}$ ;
- numărul de creștături statorice:  $N_c = 36$ .

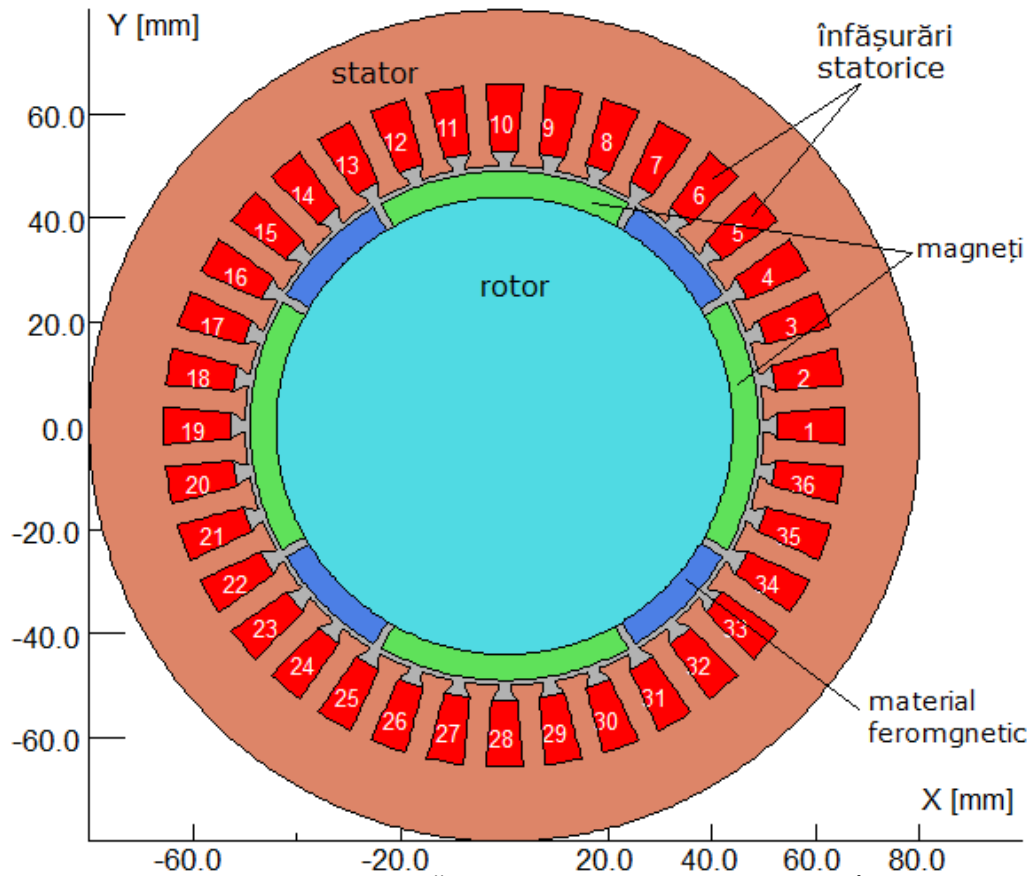


Fig. 7.1. Secțiunea transversală a GS cu magneți permanenți inserați în rotor

## 7.2 Analiza numerică a performanțelor generatorului cu metoda elementului finit

Analiza performanțelor generatorului sincron prezentat în figura 7.1 a fost realizată pe baza metodei elementului finit cu ajutorul mediului software OPERA. Au fost efectuate numeroase simulări pentru valori diferite ale arcului polar al magneților permanenți și diferite valori ale arcului polar al pieselor feromagnetice așezate între magneții permanenți.

Primul aspect tratat îl reprezintă spectrul câmpului magnetic. Liniile de câmp magnetic sunt descrise în figurile 7.2 și 7.3 ținând cont de următoarele caracteristici ale generatorului:

- arcul polar al magneților:  $58^\circ$  (unghi geometric);

- arcul pieselor feromagnetice interpolare:  $28^\circ$  (unghi geometric);
- turația rotorului:  $n = 1500 \text{ rot/min}$ ;
- generatorul este încărcat simetric pe cele trei faze la o sarcină maximă rezistivă de  $50\Omega$ .

Figura 7.2 reprezintă cazul în care rotorul este fără piesele interpolare, rezultând un spațiu liber de întrefier cu o grosime de 5 mm între magneți. Acest caz descrie tipul constructiv al generatorului sincron cu magneți proeminenți, adică magneții sunt montați pe suprafața rotorului.

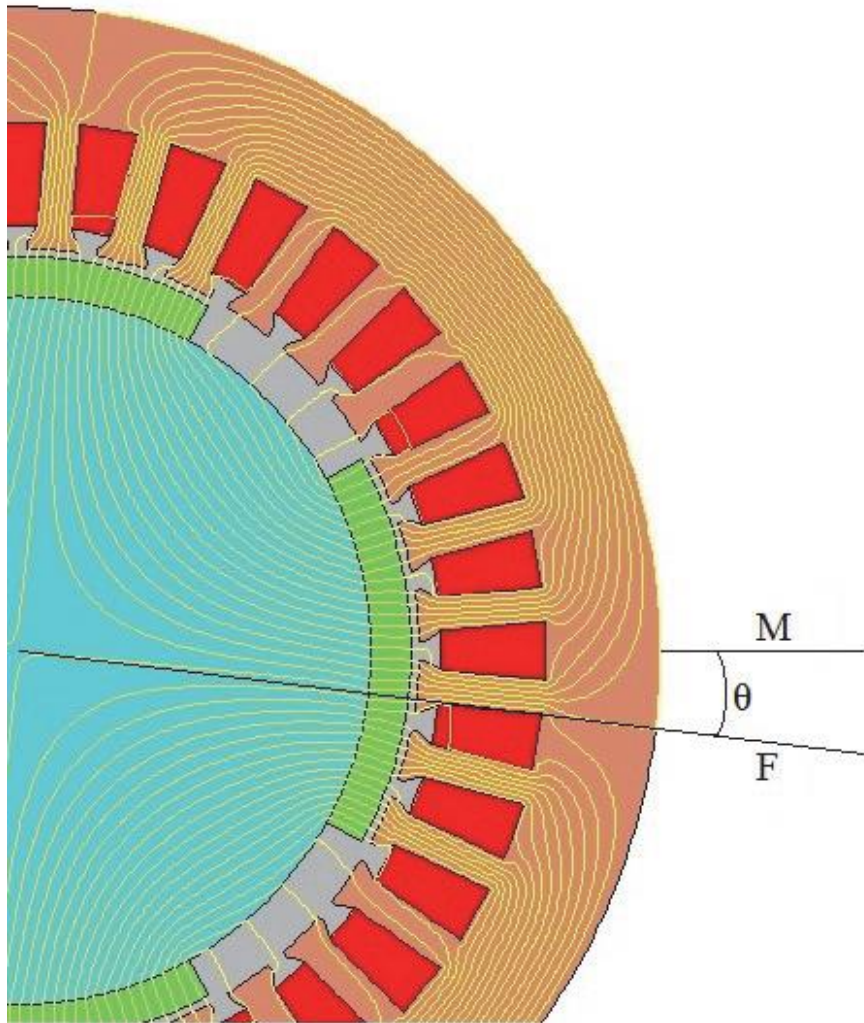


Fig. 7.2. Distribuția fluxului magnetic pentru cazul fără piese interpolare (rotor cu magneți proeminenți)

În figura 7.3 este prezentat fluxul magnetic al generatorului sincron pentru cazul în care sunt introduse piese de material feromagnetic în spațiul interpolar, în acest caz întrefierul fiind mult mai mic în axa q, sub 1 mm. Acest tip constructiv reprezintă de fapt un generator sincron cu magneți permanenți inserați în rotor.

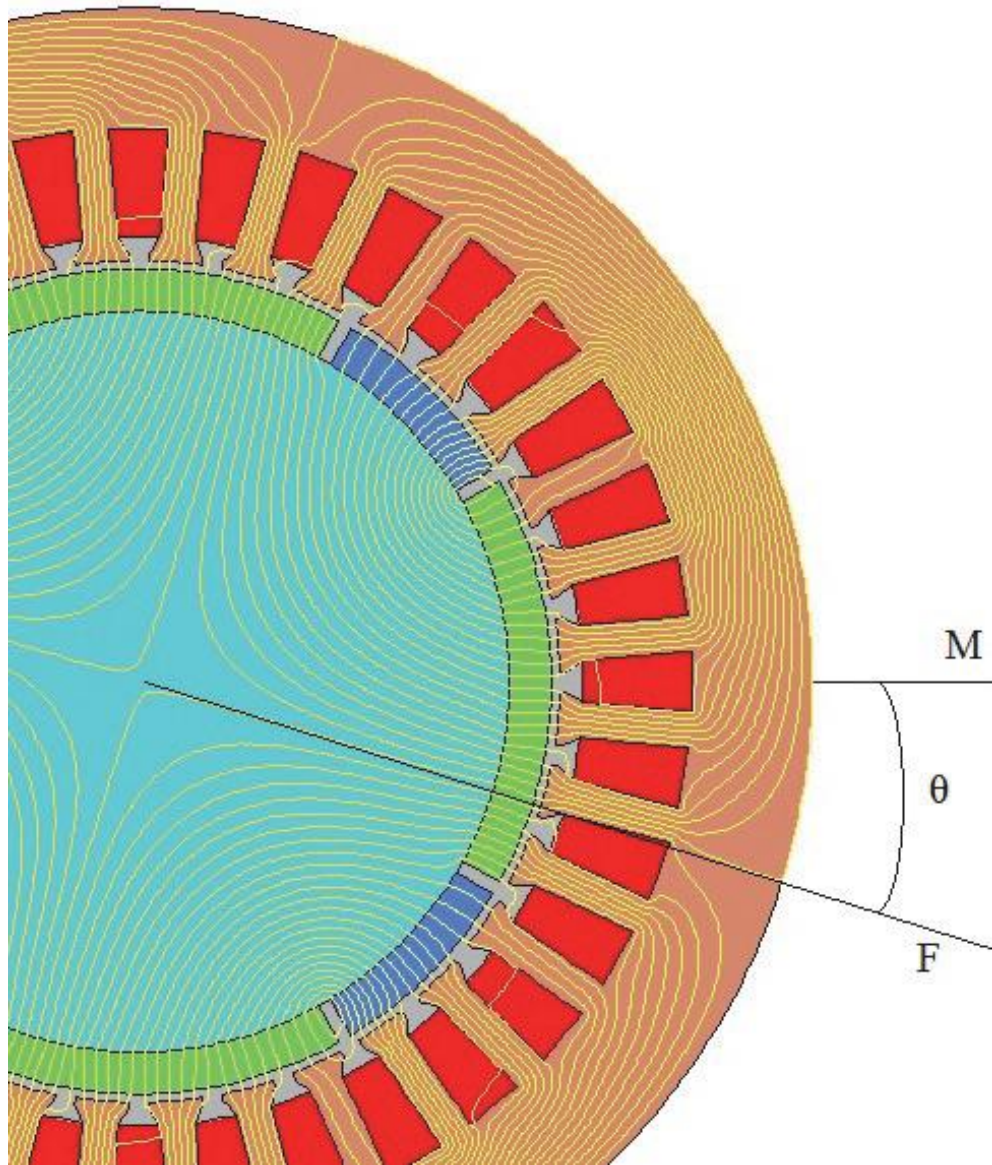


Fig. 7.3. Distribuția fluxului magnetic pentru cazul cu piese interpolare (rotor cu magneți inserați)

Cu generatorul sub sarcină, între axa F care corespunde câmpului magnetic rezultat și axa M corespunzătoare magneților permanenți se formează unghiul de sarcină  $\theta$ . Datorită efectului de saliență, se poate observa din figurile 7.2 și 7.3 că unghiul  $\theta$  corespunzător rotorului cu magneți permanenți inserați este mai mare decât unghiul  $\theta$  corespunzător rotorului cu magneți permanenți proeminenți, la același curent de sarcină.

Se poate observa de asemenea din figurile anterioare 7.2 și 7.3 că în cazul rotorului cu magneți permanenți inserați, liniile de câmp ale inducției magnetice sunt mai numeroase în axa q decât în cazul rotorului cu magneți permanenți proeminenți, formând astfel un câmp mai dens. Acest lucru se datorează pieselor feromagnetice prin introducerea cărora este redus întrefierul, modificându-se astfel proprietățile magnetice ale spațiului interpolar.

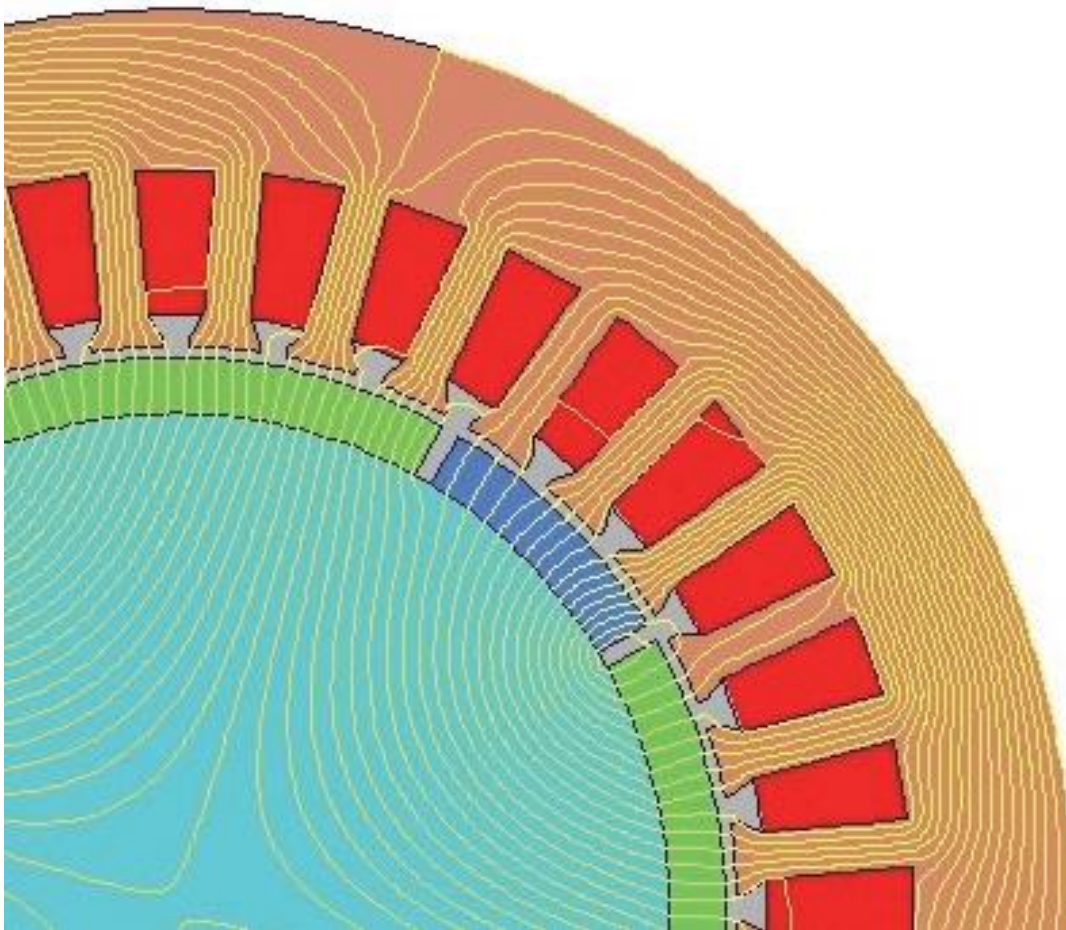


Fig. 7.4. Distribuția fluxului magnetic prin piesele feromagnetice (detaliu)

## 158 Analiza performanțelor unui GS trifazat cu MP și piese feromagnetice interpolare -7

Distribuția densității fluxului magnetic în întrefier este reprezentată grafic în figura 7.5. În această reprezentare densitatea fluxului magnetic este datorată numai magneților permanenți, cu rotorul în stare de repaus, fără curent în stator, adică fără câmp de reacție a armăturii. Se observă că în zona A, cea corespunzătoare axei  $q$ , densitatea fluxului magnetic este egală cu zero. Este interesant de remarcat faptul că acest lucru se respectă indiferent dacă în spațiul interpolar există aer sau piese feromagnetice.

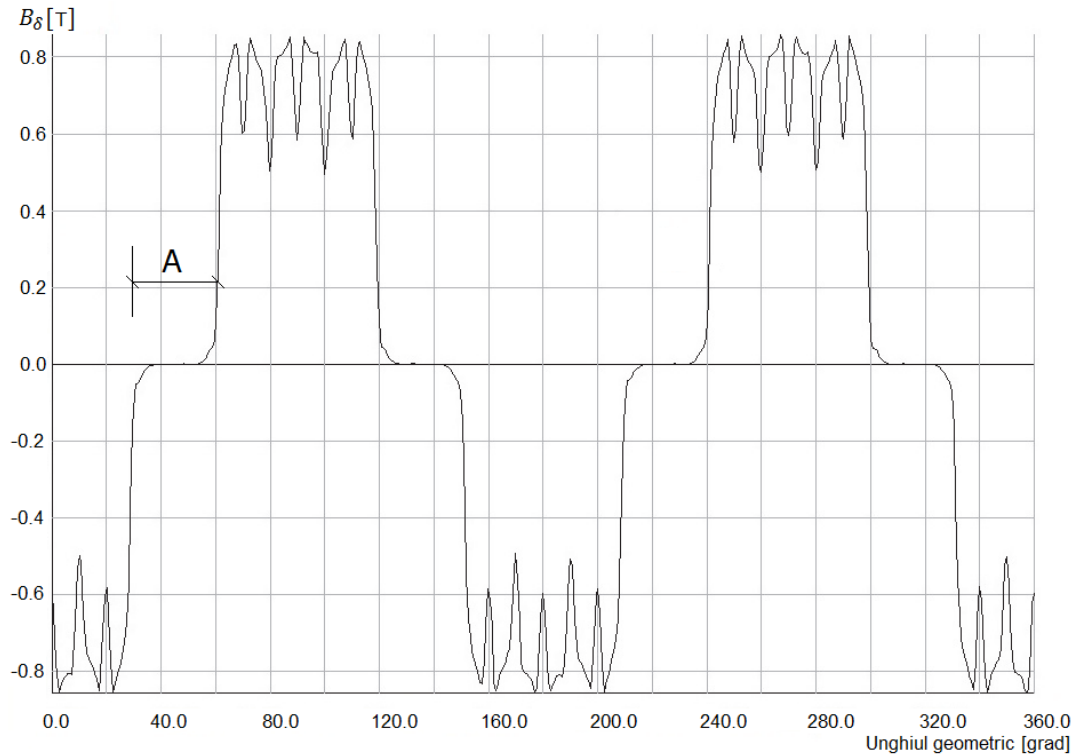


Fig. 7.5. Distribuția densității fluxului magnetic în întrefier (datorat magneților permanenți)

Pentru o mai bună înțelegere a diverselor fenomene care se petrec în interiorul generatorului este reprezentată în figura 7.6 și densitatea fluxului magnetic în întrefier datorată doar reacției indusului, fără magneți și fără piese feromagnetice. În acest caz densitatea fluxului are valori mici deoarece permeabilitatea magneților se află la o valoare apropiată de permeabilitatea aerului, iar prin urmare spațiul de 5mm ocupat de către magneți se comportă ca întrefier.

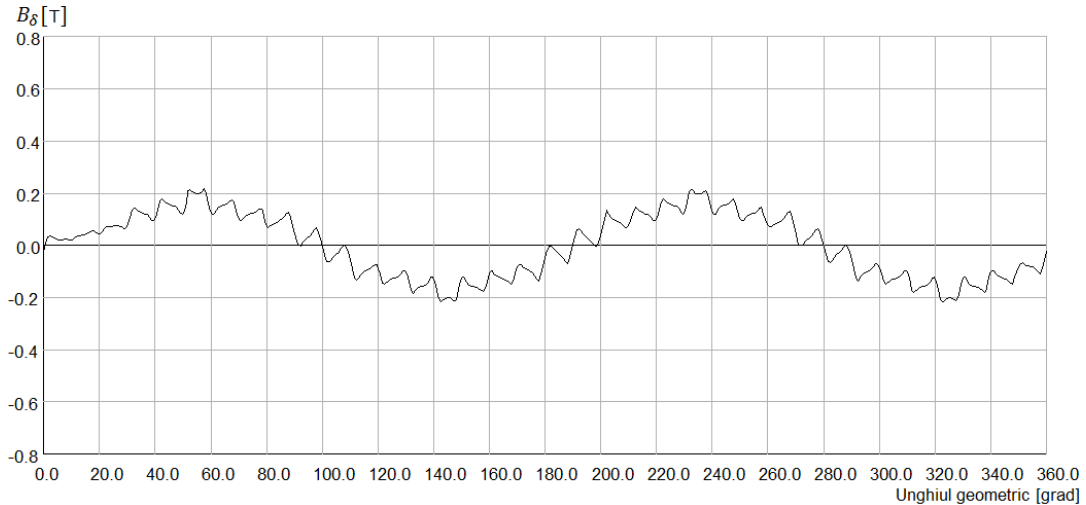


Fig. 7.6. Densitatea fluxului magnetic în întrefier datorată curentului din stator (6A), cazul fără piese feromagnetice

Efectul introducerii pieselor feromagnetice în spațiul interpolar este evidențiat în figura 7.7, unde în urma simulărilor pe acest tip de generator poate fi observată influența acestor piese în caracteristica densității fluxului magnetic în întrefier.

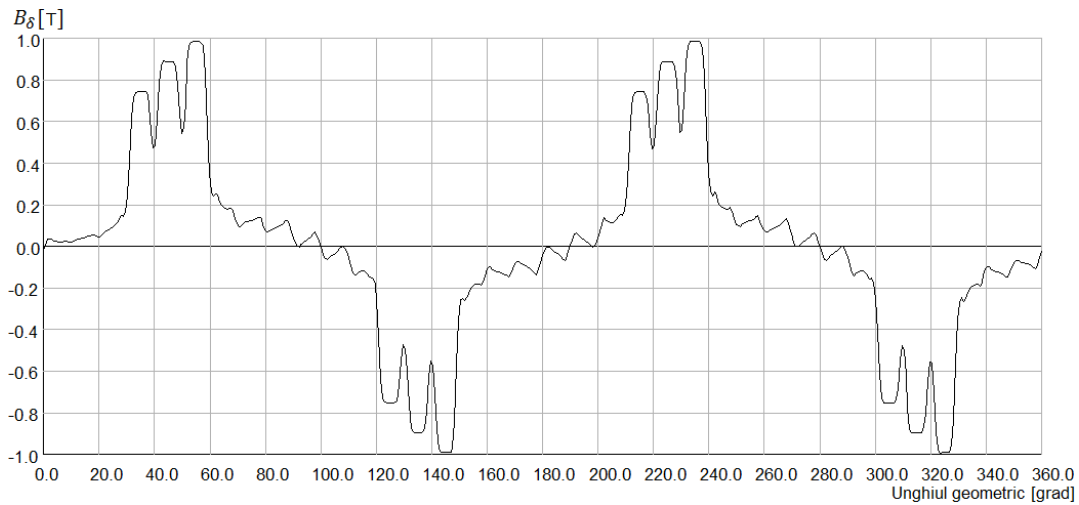


Fig. 7.7. Densitatea fluxului magnetic în întrefier datorată curentului din stator (6A), cazul cu piese feromagnetice

Mergând mai departe cu comparația între cele două tipuri de generatoare, sunt prezentate rezultate simulate cu generatorul în sarcină. Așadar în figura 7.8 este reprezentată distribuția densității fluxului magnetic, în sarcină, pentru generatorul cu poli proeminenți, în lipsa pieselor interpolate. Rezultatele prezentate sunt asociate

## 160 Analiza performanțelor unui GS trifazat cu MP și piese feromagnetice interpolare -7

pentru o viteză de rotație a rotorului de 1500 rot/min și un curent de sarcină maxim. Se poate observa că reacția după axa q, corespunzătoare zonei A, este slabă cu toate că în această zonă există o anumită densitate de flux magnetic, dar nesemnificativă din cauză că întrefierul este mare.

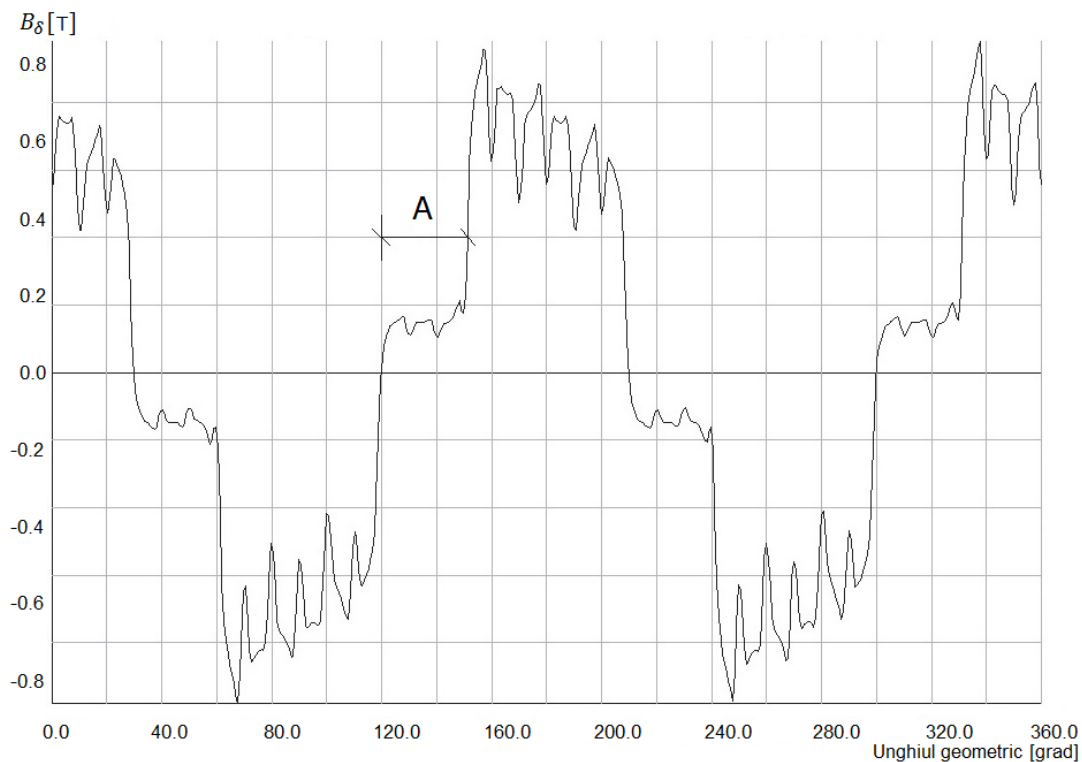


Fig. 7.8. Distribuția densității fluxului magnetic în întrefier în lipsa pieselor feromagnetice, la viteză de 1500 rot/min și sub sarcină

În figura 7.9 este reprezentată distribuția densității fluxului magnetic în întrefier obținută în urma simulărilor în condiții identice, în sarcină, după introducerea pieselor feromagnetice în spațiul interpolar. În această situație întrefierul se reduce la 1mm, iar astfel, după cum se poate observa și din figura următoare, densitatea fluxului magnetic în zona A crește, reacția după axa q fiind puternică.



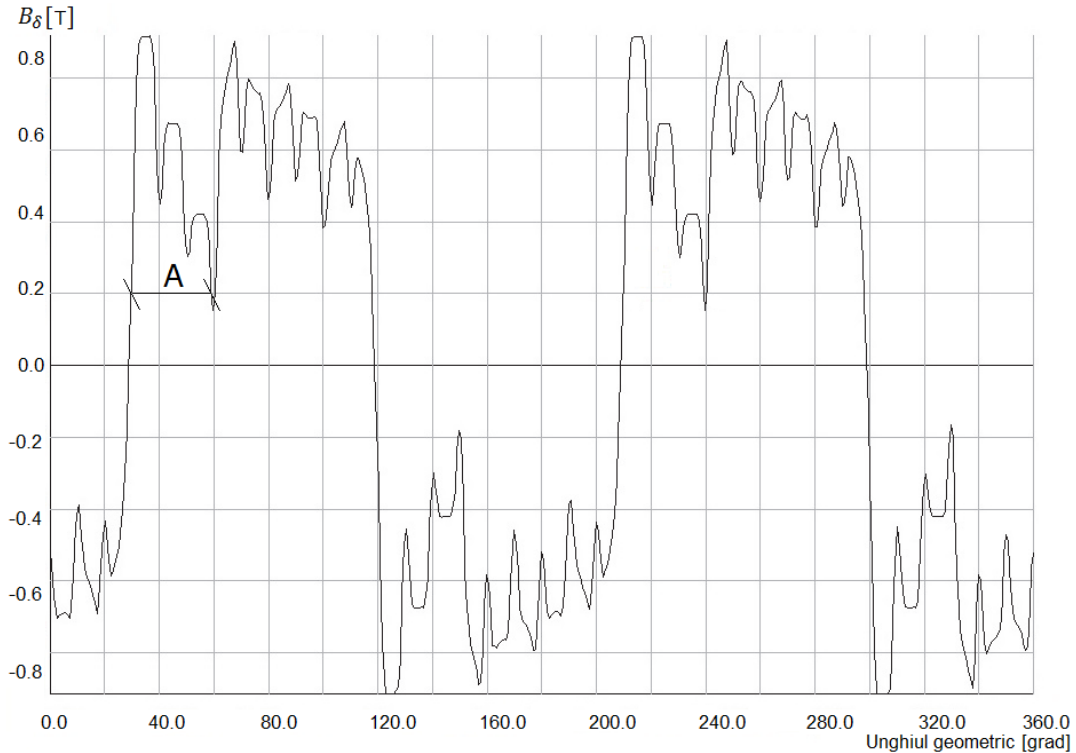


Fig. 7.9. Distribuția densității fluxului magnetic în întrefier în prezența pieselor feromagnetice, la viteză de 1500 rot/min și în sarcină

În figura 7.10 sunt prezentate formele de undă pentru variația în timp a tensiunii la borne în prezența pieselor feromagnetice, pentru un arc polar de  $66^\circ$  (geometrice) a magnetului permanent și o turație a rotorului de 1500 rot/min. Curba numărul 1 este corespunzătoare formei de undă a tensiunii la borne atunci când generatorul funcționează în gol, iar curba numărul 2 este corespunzătoare formei de undă a tensiunii la borne atunci când generatorul funcționează în condiții de încărcare maximă.

## 162 Analiza performanțelor unui GS trifazat cu MP și piese feromagnetice interpolare -7

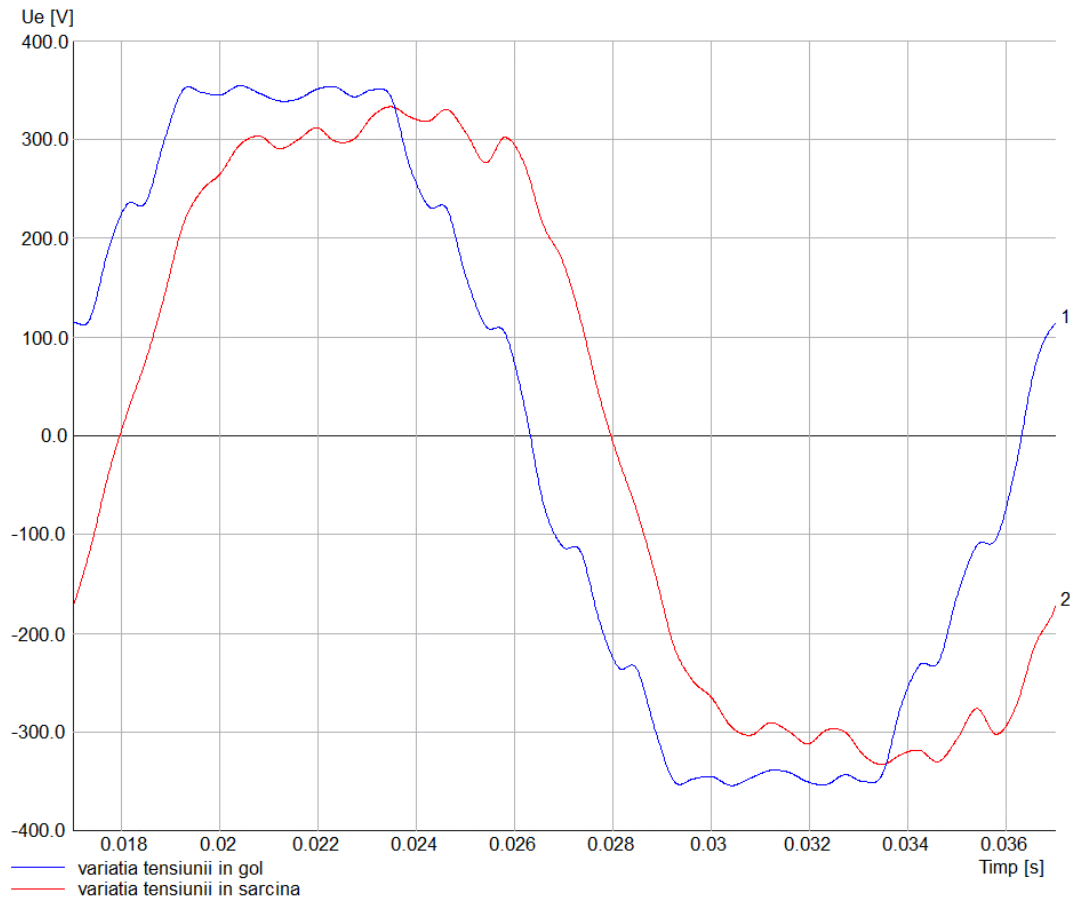


Fig. 7.10. Variația în timp a tensiunii de fază în prezența pieselor feromagnetice la o turație a rotorului de 1500 rot/min: 1. în gol; 2. la sarcină maximă

De asemenea a fost studiat efectul lățimii magneților permanenți asupra formei de undă a tensiunii generatorului la o turație de 1500 rot/min. Astfel au fost efectuate simulări pentru diferite valori ale arcului polar, rezultatele fiind expuse în figura 7.11.

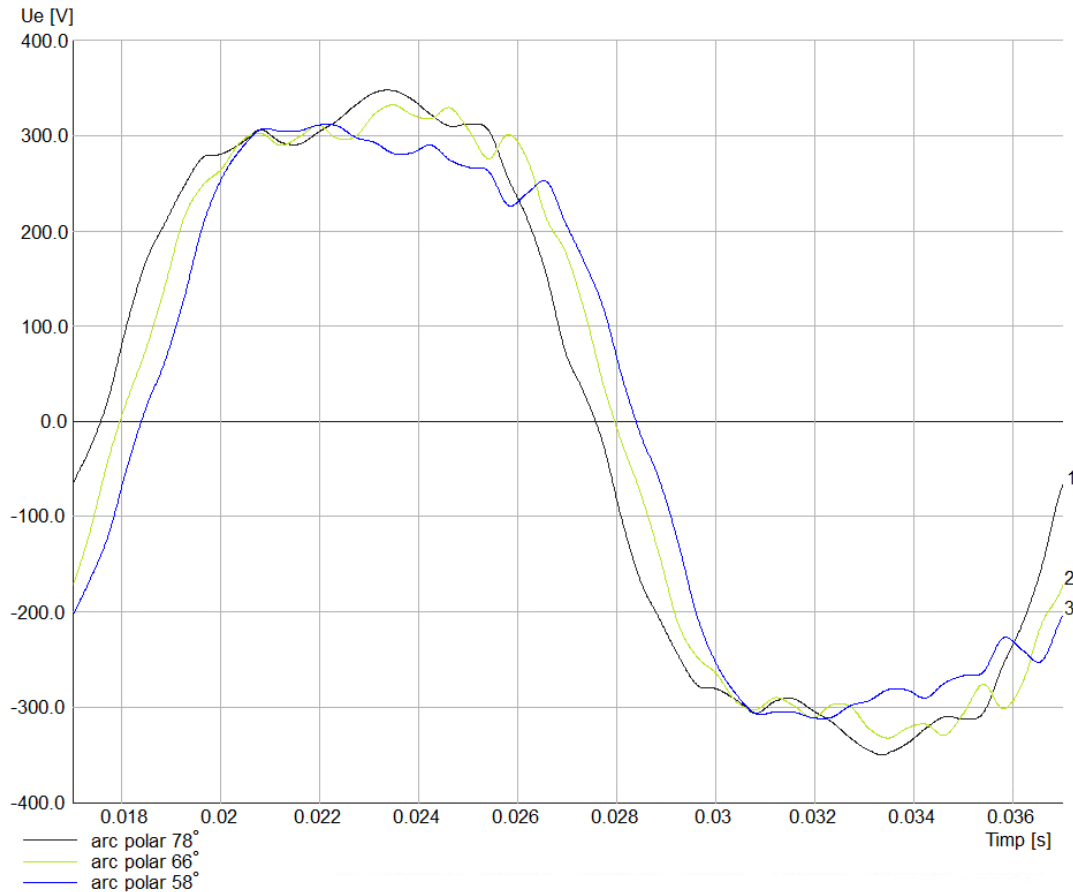


Fig. 7.11. Tensiunea de fază la turația de 1500 rot/min în prezența pieselor feromagnetice pentru diferite dimensiuni geometrice ale arcului polar: 1. 78°; 2. 66°; 3. 58°

Așadar, din cele prezentate anterior reiese capabilitatea proprie a generatorului de compensare a tensiunii. Pentru întărirea acestei demonstrații a fost calculată valoarea RMS pentru fiecare undă de tensiune simulată. Astfel, în figura 7.12 este prezentată variația tensiunii la bornele generatorului în funcție de curentul de sarcină. Liniile solide reprezintă cazul generatorului cu piese feromagnetice în spațiul interpolar, pentru diferite dimensiuni ale arcului polar în grade geometrice: 74°, 66° și 58°. Liniile întrerupte reprezintă cazul generatorului fără piese feromagnetice.

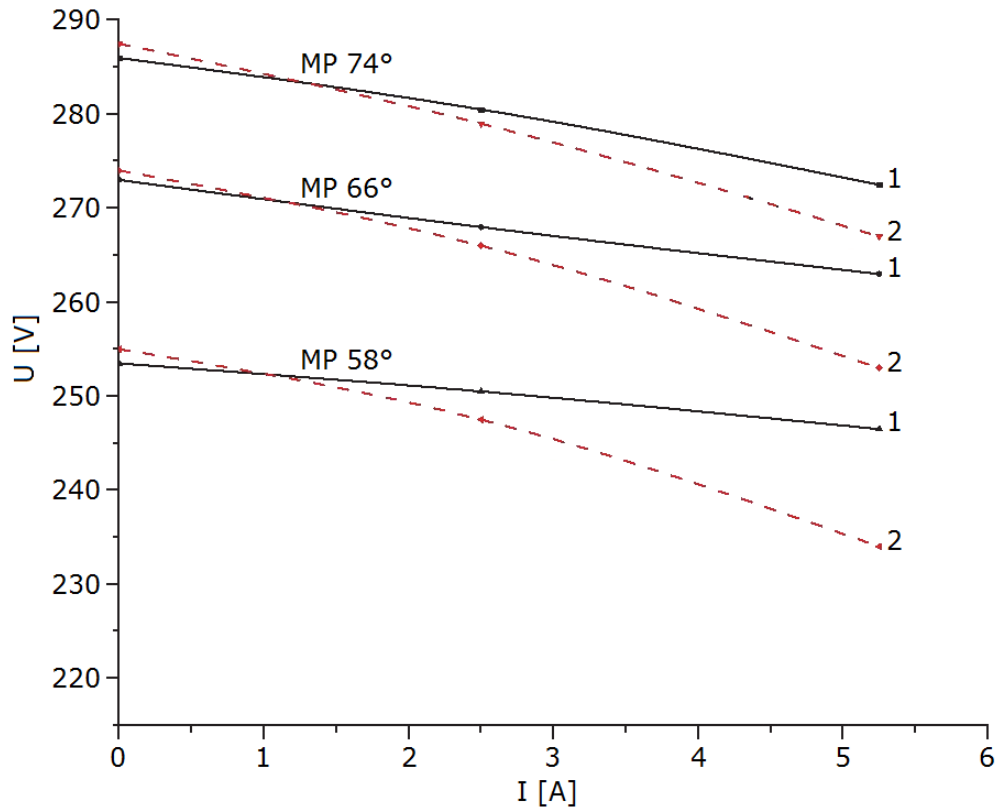


Fig. 7.12. Caracteristicile externe ale generatorului la turația de 1500 rot/min pentru diferite dimensiuni ale arcului polar: 74°; 66°; 58°; 1 – cazul cu piese feromagnetice; 2 – cazul fără piese feromagnetice

Această reprezentare întărește afirmația că prin introducerea pieselor feromagnetice în spațiul interpolar sunt îmbunătățite performanțele generatorului, însă se observă că acest efect depinde de arcul polar al magneților permanenți. Cu cât arcul polar al magneților permanenți este mai mic, cu atât este mai mare spațiul ocupat de către piesele feromagnetice, dar cu toate acestea este cunoscut faptul că arcul polar al unui magnet trebuie să fie mai mare de 60% din pasul polar, adică mai mult de 58° în cazul de față [D6][G7].

În urma analizei s-a constatat că raportul optim între arcul polar al magneților permanenți și cel al pieselor feromagnetice este obținut pentru valori ale arcului polar al magneților permanenți cuprinse între 58° - 62° (geometrice). În aceste condiții, scăderea tensiunii la borne este mai mică de 3% pentru orice valoare a curentului de sarcină cuprins între zero și valoarea sa maximă.

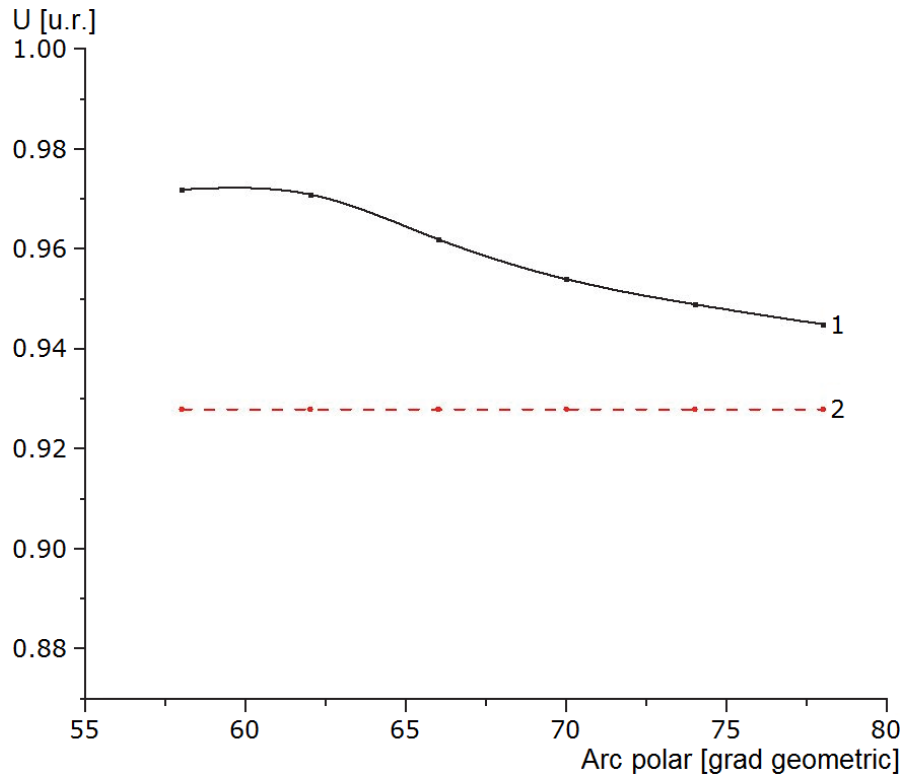


Fig. 7.13. Variația raportului tensiunii nominale la tensiunea de mers în gol a GS în funcție de valoarea arcului polar al magneților permanenți pentru turația de 1500 rot/min și curent de sarcină maxim (5.25 A);  
1 – cazul cu piese feromagnetice; 2 – cazul fără piese feromagnetice

### 7.3 Concluzii

În acest capitol au fost analizate performanțele unui generator sincron cu magneți permanenți inserați în rotor la care, prin această metodă constructivă, se produce un efect de saliență inversă, oferind astfel o capacitate de compensare proprie utilă pentru menținerea tensiunii la borne aproape constantă la diferite variații ale sarcinii. Prin numeroasele simulări efectuate s-a dovedit faptul că introducerea pieselor feromagnetice în spațiul interpolar are efect pozitiv doar în cazul generatoarelor sincrone cu un număr mic de poli, cazul analizat în acest capitol, spre deosebire de GS cu număr mare de poli precum este cazul Prototipului 1 studiat, cu 33 de creștături, unde s-a observat că această soluție produce un efect nesemnificativ în ceea ce privește caracteristica externă a generatorului.

Rezultatele prezentate demonstrează că acest tip de generator sincron cu magneți permanenți inserați în rotor prezintă o capacitate de compensare proprie a tensiunii, performanțele sale reprezentând un avantaj semnificativ al generatorului

#### 166 Analiza performanțelor unui GS trifazat cu MP și piese feromagnetice interpolare -7

pentru utilizarea în aplicații cu funcționare autonomă. În acest caz un astfel de GS devine o soluție adecvată și economică într-un sistem de alimentare, în special la cele cu factor de putere unitar, deoarece nu necesită un sistem suplimentar de reglare a tensiunii.

Concluzia practică finală care rezultă din acest capitol este că în cazul prototipurilor studiate 1 și 2 nu se poate obține o îmbunătățire a caracteristicii externe prin introducerea de piese feromagnetice în spațiul interpolar, deoarece aceste două prototipuri au un număr prea mare de poli. Așadar, în general în cazul generatoarelor sincrone cu magneți permanenți cu turație scăzută nu este recomandabilă această soluție constructivă.

## 8. CONCLUZII, CONTRIBUȚII ȘI DIRECȚII DE DEZVOLTARE ULTERIOARĂ

În prezenta teză a fost realizată analiza numerică a unui generator sincron cu magneți permanenți cu flux radial de putere 5 kVA, generator fabricat în premieră în două variante constructive (Prototip 1 și Prototip 2), destinat utilizării în aplicații cu turație relativ scăzută, precum turbine eoliene sau turbine hidro.

De asemenea în teză sunt subliniate avantajele analizei bazate pe metoda elementului finit utilizată în procesul de proiectare și de evaluare a performanțelor mașinilor electrice, în caz concret a generatoarelor cu magneți permanenți. Utilizarea acestui procedeu de analiză numerică a generatoarelor sincrone cu magneți permanenți încă din timpul procesului de proiectare constituie un avantaj în ceea ce privește preîntâmpinarea și evitarea unor erori. De asemenea prin acest tip de analiză este permisă optimizarea performanțelor mașinii prin corecții asupra geometriei modelului analizat. Posibilele îmbunătățiri și ajustări necesare realizate în urma acestei analize în procesul de proiectare pot să conducă la beneficii economice considerabile.

### 8.1 Concluzii generale

Având în vedere principala întrebuintare a generatorului sincron cu magneți permanenți studiat, și anume cea de conversie a energiei eoliene în energie electrică, în **capitolul 1** al tezei a fost realizată o sinteză privitoare la consumul de energie la nivel global, precum și premisele pentru interesul de acoperire a acestui consum din resurse regenerabile. S-a constatat astfel că la finele anului 2017, 28% din consumul de energie la nivel global era acoperit din energii regenerabile. De asemenea au fost prezentate principalele surse de energie alternativă și modul prin care acestea pot fi valorificate.

Un accent deosebit a fost pus pe evoluția în timp a utilizării energiei eoliene, pe dezvoltarea și pe progresele din acest domeniu. S-a constatat că utilizarea energiei eoliene a prezentat interes încă din cele mai vechi timpuri, iar în procesul de evoluție s-a ajuns ca în zilele noastre principala sa întrebuintare să fie în sectorul energiei electrice. De-a lungul timpului au fost construite și dezvoltate diferite tipuri și concepte de turbine eoliene în funcție de generatorul electric utilizat. Au fost prezentate astfel configurații moderne de turbine eoliene și rolul generatorului electric în acest ansamblu. S-a constatat că un rol deosebit în acest proces de dezvoltare l-au avut și îl au în continuare generatoarele sincrone, motiv pentru care acestea reprezintă un domeniu de studiu și de analiză foarte important având ca scop îmbunătățirea performanțelor, oferirea unui randament cât mai ridicat în procesul de conversie a energiei și furnizarea de energie electrică la calitatea cerută, maximizarea conversiei de energie eoliană în energie electrică în raport cu minimizarea costurilor de producție și de întreținere,

creșterea eficienței și a fiabilității. De exemplu primele prototipuri de turbine eoliene conectate la rețea funcționau la viteză fixă și au fost echipate cu generatoare sincrone, însă la scurt timp a fost adoptată ca soluție mai puțin costisitoare și mai simplă din punct de vedere tehnologic generatorul de inducție cu rotor în colivie. În jurul anilor '90 a fost introdus la sistemele eoliene generatorul de inducție cu alimentare dublă care a permis un control mult mai bun al transferului de putere electrică înspre consumatori. Un rol important în acest proces l-a avut și îl are în continuare electronica de putere prin intermediul căreia sunt facilitate controlul și optimizarea conversiei energiei eoliene. În prezent mulți producători de turbine eoliene se axează pe turbine eoliene cu viteză variabilă, deși sistemul electric pentru funcționarea în această configurație este mult mai complicat în comparație cu sistemul turbinelor eoliene cu viteză fixă. Însă unul dintre avantajele turbinelor eoliene cu viteză variabilă îl reprezintă faptul că acestea pot fi folosite pentru o gamă largă de viteze ale vântului, astfel viteza vântului poate fi controlată și randamentul turbinei eoliene poate fi maximizat. Ca performanțe în ceea ce privește puterea nominală, s-a ajuns la conceperea unor turbine eoliene cu o putere nominală de 9,5 MW.

Conform rapoartelor anuale producția de energie electrică arată că aceasta se află pe un trend ascendent de la an la an. Conform *BP Statistical Review of World Energy June 2018*, în anul 2017 producția de energie electrică la nivel mondial se situează la valoarea de 25551,3 TWh, înregistrând un procent mediu de creștere anual de 2,8% calculat în intervalul anilor 1985 - 2017.

În ceea ce privește conversia energiei eoliene în energie electrică, rata de creștere anuală în acest sector a fost una ridicată, mai ales pentru perioada 2006 - 2016, în care s-a înregistrat o valoare de 21,9%.

Puterea instalată în centralele eoliene la nivel global în anul 2017 se regăsește la valoarea de 514,7 GW, conform surselor *IRENA, Global Wind Energy Council și Navigant Consulting*, liderul mondial fiind China cu o putere instalată de 164,1 GW.

Conform *BP Statistical Review of World Energy June 2018* România se afla la sfârșitul anului 2017 pe locul 12 în Europa într-un clasament în ceea ce privește puterea instalată cumulată în turbinele eoliene, cu o valoare de 3038 MW.

Datorită progresului în ceea ce privește creșterea ponderii de energie eoliană în sectorul energiei electrice la nivel mondial rezultă o altă provocare, și anume integrarea turbinelor eoliene în sistemul electroenergetic și impactul lor asupra acestuia. Acesta reprezintă un domeniu de cercetare și dezvoltare vast pentru care pot fi abordate numeroase teme de studiu.

În **capitolul 2** a fost realizată o prezentare generală a mașinilor electrice rotative din punct de vedere constructiv, funcțional și fenomenologic. A fost tratată în mod special mașina sincronă. De asemenea au fost prezentate caracteristicile generatoarelor cu magneți permanenți, modurile de utilizare și consecințele asupra soluțiilor constructive, precum și avantajele și dezavantajele între diferite tipuri de generatoare sincrone care utilizează magneți permanenți, dar și comparația acestora cu generatoarele uzuale. A fost prezentată o scurtă istorie a evoluției magneților permanenți, a tipurilor acestora, a proprietăților și a avantajelor care îi recomandă pentru utilizarea în aplicații din domeniul mașinilor electrice.

S-a constatat că în ceea ce privește utilizarea generatoarelor sincrone de puteri mici la sistemele eoliene, evident acestea sunt mai puțin semnificative din punct de



vedere energetic decât generatoarele de puteri mari din cadrul sistemelor eoliene, însă avantajul generatoarelor de puteri mici îl reprezintă faptul că odată cu creșterea cererii va crește și interesul în ceea ce privește cercetarea și dezvoltarea lor, ceea ce va conduce la îmbunătățirea fiabilității, în timp ce costurile vor scădea. Un alt avantaj al sistemelor eoliene de puteri mici este utilizarea lor în regim autonom, în zonele izolate unde nu este posibilă sau nu este fiabilă din punct de vedere economic conectarea consumatorului la rețea.

S-a observat că din punct de vedere tehnic prezența electronicii de putere a produs un imbold care a dus la creșterea interesului pentru soluții de generatoare care funcționează la viteză variabilă. Aceste inovații s-au dovedit a fi utile pentru turbinele eoliene din mai multe motive printre care reducerea stresului mecanic, creșterea capacității de captare a energiei vântului, reducerea zgomotului și un control sporit.

În **capitolul 3** au fost prezentate noțiuni generale referitoare la influența calculului ingineresc și a metodelor numerice ca și părți esențiale ale procesului de proiectare în evoluția tehnologiei. De asemenea, este realizată o prezentare de ansamblu asupra metodei elementului finit și a mediului software OPERA.

S-a constatat că în prezent metodele numerice de calcul implementate armonios computerelor a căror putere de calcul a fost îmbunătățită vertiginos au condus la apariția pachetelor software care la ora actuală reprezintă instrumente puternice utilizate pe scară largă în aplicații industriale și științifice datorită avantajelor pe care le prezintă. Printre cele mai importante avantaje pe care le facilitează acestea sunt scăderea volumului de muncă și a timpului de calcul.

Majoritatea acestor medii software au la bază principiul metodei elementului finit, metodă extrem de utilă și eficientă pentru rezolvarea problemelor de la cele mai simple până la cele mai complexe, indiferent de tipul constructiv al structurii analizate, materialul utilizat, tipul de analiză, etc. Filozofia de calcul abordată de către aceasta, principalele legi și teoreme, etapele care sunt parcurse la construirea și rezolvarea unui model și principalele domenii de aplicabilitate ale metodei au fost prezentate în acest capitol. Au fost prezentate de asemenea cele mai importante legi și teoreme ale electromagnetismului pe baza cărora se pot determina soluțiile ecuațiilor ce descriu câmpul electromagnetic al mașinilor electrice.

În prezent, majoritatea mașinilor electrice sunt proiectate, analizate sau optimizate cu ajutorul programelor software care au la bază tehnici numerice de calcul, în special metoda elementului finit. Unul dintre acestea a fost descris pe scurt în acest capitol, iar utilitatea lui practică este prezentată în capitolul următor care este dedicat analizării performanțelor unui generator sincron cu magneți permanenți.

În **capitolul 4** au fost prezentate topologia generatorului sincron cu magneți permanenți studiat, datele de proiectare și construirea pe baza acestora a modelului în mediul software OPERA. Au fost prezentați și ilustrați prin figuri descriptive toți pașii esențiali care trebuie urmați în acest proces.

După construirea modelului a fost realizată analiza în regim static a generatorului, cât și analiza mașinii în mișcare de rotație pentru determinarea tensiunilor electromotoare induse. La analiza în regim static a fost îndeplinit unul dintre principalele obiective propuse pentru analiza performanțelor generatorului sincron cu magneți permanenți studiat și anume obținerea spectrului câmpului magnetic. Determinarea acestuia reprezintă punctul de plecare pentru analiza performanțelor

generatorului, rezultând mai departe diferite caracteristici și diferiți parametri precum formele de undă ale tensiunilor electromotoare induse, caracteristica externă a generatorului, curenți, randament, cuplul parazit, etc. De asemenea, soluția câmpului magnetic oferită de către programul software permite analizarea unor aspecte legate de procesul de proiectare, respectiv de funcționare a mașinii electrice, precum identificarea eventualelor zone feromagnetice saturate pentru care este necesară revenirea asupra procesului de proiectare și calculul pierderilor în fier din circuitul magnetic principal sau din diferite regiuni adiacente. Tot referitor la distribuția câmpului magnetic a fost evidențiată cu ajutorul simulărilor în OPERA variația fluxului magnetic util și al fluxului de dispersie în funcție de poziția magnetului în raport cu dinții statorului și de asemenea variația componentei normale a inducției  $B_n$  în întrefier pe întreaga mașină pentru o poziție oarecare a rotorului.

Un alt aspect important evidențiat în acest capitol a fost influența numărului de noduri impus de către utilizator asupra preciziei rezultatelor obținute în OPERA, impactul acestora fiind oglindit asupra liniilor de câmp ale fluxului magnetic. Acest lucru a fost exemplificat prin afișarea spectrului câmpului magnetic calculat în OPERA pe baza a trei rețele de discretizare distincte din punct de vedere al numărului de noduri. Din acest exemplu s-a constatat faptul că numărul de elemente finite impuse de către utilizator influențează în mod direct calculele și automat și rezultatele obținute, astfel că numărul de noduri trebuie ales optimizat încât să nu apară evaluări grosiere ale câmpului magnetic și implicit erori (pentru noduri prea puține), pe de-o parte și nici timpi de calcul prea mari (pentru noduri prea multe), pe de altă parte.

În cadrul analizei în mișcare de rotație pentru determinarea tensiunilor electromotoare induse a generatorului sincron cu magneți permanenți studiat au fost obținute în primă fază formele de undă ale tensiunii electromotoare induse pentru funcționarea în gol la turația nominală. De asemenea, a fost determinat grafic unul dintre parametrii importanți de proiectare la generatoarele sincrone cu magneți permanenți și anume cuplul parazit. Deoarece acesta nu contribuie la valoarea cuplului util și mai mult decât atât poate avea efecte negative asupra funcționării mașinii, manifestate prin fenomene tranzitorii și inducerea vibrațiilor, este importantă cunoașterea valorii acestuia. Pe baza calculelor cu metoda elementului finit în OPERA s-a constatat că pentru generatorul sincron studiat cuplul parazit determinat reprezintă valori relativ scăzute, încadrându-se undeva la aproximativ 0.17% din cuplul nominal. Este cunoscut faptul că pentru valori ridicate ale cuplului parazit poate fi afectată funcționarea normală și pornirea ansamblului eolian la viteze mici ale vântului, fiind afectat astfel și randamentul generatorului. În acest caz, cunoașterea acestui parametru este deosebit de utilă pentru generatorul sincron cu magneți permanenți studiat, valoarea sa scăzută garantând în primul rând faptul că acesta poate să fie eficient și în zonele cu potențial eolian mai redus.

Analiza modelului generatorului sincron cu magneți permanenți pe baza modelului de câmp magnetic reprezentat 2D cu ajutorul OPERA bazat pe calculul cu metoda elementului finit se dovedește a fi deosebit de utilă, mai ales în procesul de proiectare, deoarece permite atât modelarea unui anumit regim de funcționare, cât și optimizarea constructiv-funcțională a generatorului.

Tot în cadrul acestui capitol au fost prezentate pe scurt caracteristicile de funcționare ale generatoarelor sincrone. Deoarece generatorul sincron cu magneți

permanenți studiat este dedicat aplicațiilor eoliene și funcționării în regim autonom, este foarte important a se cunoaște caracteristica sa externă, aceasta fiind un parametru care oferă informații cu privire la calitatea energiei electrice. În acest sens au fost efectuate o serie de simulări în OPERA pentru diferite sarcini de încărcare rezistivă, fiind obținute rezultate calculate pe baza metodei elementului finit cu ajutorul cărora a fost construită caracteristica externă.

Pornind de la ipoteze abordate în articole din literatura de specialitate a fost efectuată o cercetare experimentală referitoare la influența lățimii magneților permanenți asupra caracteristicii externe pentru prototipul generatorului sincron studiat. Cu ajutorul mediului OPERA a fost redefinită geometria inițială a magneților permanenți și au fost efectuate mai multe simulări pentru diferite lățimi ale acestora. Pe baza rezultatelor obținute au fost trasate caracteristicile externe pentru fiecare caz și comparate între ele, fiind concluzionat faptul că valoarea efectivă a tensiunii induse este dependentă direct proporțional cu valoarea lățimii acestora.

De asemenea au fost realizate o serie de simulări în OPERA pentru determinarea influenței lățimii magneților permanenți asupra cuplului parazit. S-a constatat faptul că valoarea cea mai mare a cuplului parazit corespunde pentru magneți cu lățimea  $l_m = 34 \text{ mm}$ . S-a observat că odată cu reducerea lățimii magneților permanenți la valori cuprinse între  $28 - 32 \text{ mm}$  amplitudinea cuplului parazit a scăzut semnificativ. Scăzând în continuare lățimea magneților la valoarea  $l_m = 24 \text{ mm}$  se observă o creștere a valorii cuplului.

Ținând cont de rezultatele obținute în urma simulărilor în OPERA s-a demonstrat faptul că pentru prototipul analizat, în ceea ce privește caracteristica externă și cuplul parazit, lățimea optimă pentru magneții permanenți este cea aleasă și în datele de proiectare,  $l_m = 32 \text{ mm}$ . Deși din punct de vedere al cuplului parazit acesta are valoarea cea mai mică pentru  $l_m = 28 \text{ mm}$ , magneții permanenți cu lățimea  $l_m = 32 \text{ mm}$  sunt superiori celor de  $l_m = 28 \text{ mm}$  din punct de vedere al comparației caracteristicilor externe obținute în cele două cazuri la sarcini de încărcare identice. Spre exemplu valoarea tensiunii electromotoare indusă pentru funcționarea la mers în gol cu  $l_m = 28 \text{ mm}$  este  $U_{l_m 28} = 159.38 \text{ V}$ , iar pentru  $l_m = 32 \text{ mm}$  valoarea tensiunii este  $U_{l_m 32} = 170.12 \text{ V}$ .

Un alt studiu experimental realizat în acest capitol a fost despre posibilitatea obținerii unui efect de saliență inversă prin introducerea unor piese feromagnetice în spațiul interpolar din rotor în scopul îmbunătățirii caracteristicii externe și realizării unui reglaj al tensiunii compensând dezavantajul absenței controlului asupra câmpului magnetic. Pornind de la aceste considerente a fost modificată în OPERA structura rotorului generatorului sincron analizat inițial prin introducerea mai multor straturi de piese interpolare între magneții dispuși radial pe suprafața rotorului. Rezultatele obținute în urma modificărilor sunt comparate cu cele obținute la prototipul inițial. Din punct de vedere al distribuției densității fluxului magnetic în întrefier la starea de repaus a rotorului și al caracteristicilor externe obținute și comparate pentru cele două cazuri s-a concluzionat faptul că introducerea pieselor feromagnetice în spațiul interpolar nu are un efect semnificativ în ceea ce privește îmbunătățirea performanțelor generatorului sincron studiat deoarece generatorul are un număr mare de poli și în consecință un pas polar mic, această soluție fiind avantajoasă doar în cazul generatoarelor cu un număr mic de poli.

În **capitolul 5** au fost prezentate standul experimental și sistemul de achiziție și prelucrare a datelor cu ajutorul cărora au fost făcute determinările experimentale propuse pentru generatorul sincron cu magneți permanenți studiat. Astfel au fost prezentate caracteristicile și valorile parametrilor rezultați din determinările experimentale pe standul de probă. De asemenea a fost realizată analiza comparativă a rezultatelor obținute experimental cu cele obținute pe cale analitică din calculul bazat pe metoda elementului finit în mediul OPERA. În urma comparației s-a constatat faptul că există o bună similitudine între caracteristicile obținute din simulări și cele obținute în urma încercărilor pe standul de probă.

În **capitolul 6** a fost prezentat cel de-al doilea prototip de generator sincron cu magneți permanenți cu turație scăzută care este diferit față de primul prototip studiat din punct de vedere constructiv prin numărul de creștături statorice. Modelul Prototipului 2 caracterizat de un număr de 63 de creștături a fost construit în OPERA și au fost apoi determinate analitic distribuția fluxului magnetic, valoarea inducției fluxului magnetic în întrefier, formele de undă pentru tensiunea electromotoare indusă în înfășurările statorice și cuplul parazit al GSMP pentru turația nominală  $n_N = 120 \text{ rpm}$ .

De asemenea a fost prezentată o analiză comparativă între caracteristicile celor două prototipuri de generatoare sincrone cu magneți permanenți și turație scăzută, de aceeași putere nominală, asemănătoare din punct de vedere constructiv, caracterizate de o structură simplă, principala deosebire constructivă fiind topologia statorului.

Din punct de vedere al performanțelor funcționale ambele generatoare oferă rezultate bune. Prin comparația tensiunilor electromotoare induse la funcționarea în gol și la turație nominală a rotorului s-a dovedit că Prototipul 2 este mai performant decât Prototipul 1. În ceea ce privește comportarea celor două generatoare la variații ale sarcinilor, în urma comparației caracteristicilor externe ale celor două prototipuri s-a constatat că valoarea tensiunii la bornele Prototipului 2 este mai mare decât valoarea tensiunii la bornele Prototipului 1 pentru aceeași valoare a rezistenței de sarcină.

În ceea ce privește un alt parametru important al generatoarelor sincrone cu magneți permanenți, și anume cuplul parazit, s-a constatat faptul că ambele prototipuri sunt caracterizate de valori mici ale acestuia. Comparativ, pe baza valorilor obținute în OPERA, Prototipul 2 oferă un avantaj față de Prototipul 1, prezentând un cuplu parazit mult mai redus și automat un nivel de zgomot și de vibrații mai scăzut. Deoarece ambele prototipuri sunt mașini de putere mică, efectele dezavantajoase precum forțele magnetice dezechilibrante și zgomotele cauzate de către cuplul parazit se încadrează la niveluri acceptabile.

O altă concluzie importantă care reiese din această analiza confirmă faptul că valorile c.m.m.m.c. între numărul de creștături statorice și numărul de poli reprezintă un indiciu foarte bun pentru faza de proiectare a unui generator sincron cu magneți permanenți în ceea ce privește controlul cuplului parazit. În cazul de față se consideră că valorile c.m.m.m.c. alese pentru cele două generatoare sunt prea mari, și chiar dacă au condus la diminuarea aproape completă a cuplului parazit au apărut în consecință forțe magnetice unilaterale. Din acest punct de vedere se consideră că valori cuprinse între 500-800 ale c.m.m.m.c. sunt suficient de mari pentru menținerea unui cuplu parazit la un nivel acceptabil. Astfel la alegerea numărului de creștături trebuie avută în vedere menținerea unui echilibru în ceea ce privește obținerea unui cuplu parazit la

nivel acceptabil și apariția altor efecte negative precum forțele de atracție magnetică unilaterală.

În **capitolul 7** au fost analizate performanțele unui generator sincron cu magneți permanenți inserați în rotor cu piese magnetice interpolate. Prin această metodă constructivă se produce un efect de saliență inversă, oferind astfel o capacitate de compensare proprie utilă pentru menținerea tensiunii la borne aproape constantă la diferite variații ale sarcinii. Prin numeroasele simulări efectuate s-a dovedit faptul că introducerea pieselor feromagnetice în spațiul interpolar are efect pozitiv doar în cazul generatoarelor cu un număr mic de poli, spre deosebire de generatoarele cu număr mare de poli precum este și cazul celor două prototipuri studiate unde s-a observat că această soluție produce un efect nesemnificativ în ceea ce privește îmbunătățirea caracteristicii externe a generatorului.

Rezultatele prezentate demonstrează că acest tip de generator sincron cu magneți permanenți inserați în rotor cu piese interpolate prezintă o capacitate de compensare proprie a tensiunii, performanțele sale reprezentând un avantaj semnificativ al generatorului pentru utilizarea în aplicații cu funcționare autonomă. În acest caz un astfel de generator devine o soluție adecvată și economică într-un sistem de alimentare, în special la cele cu factor de putere unitar, deoarece nu necesită un sistem suplimentar de reglare a tensiunii la borne.

În ansamblu rezultatele teoretice și experimentale obținute în cadrul prezentei lucrări pot fi utile pentru proiectarea și realizarea unor variante de generatoare sincrone de putere mică având performanțe îmbunătățite.

## 8.2 Contribuții

Ca urmare a activităților și cercetărilor desfășurate în domeniul abordat, se consideră faptul că au fost aduse următoarele contribuții:

1. Analiza teoretică și verificarea experimentală a unui prototip de generator sincron cu magneți permanenți montați pe suprafața rotorului și un număr foarte mic de creștături pe pol și fază în stator ( $q=0.34$ ) – Prototip 1.
2. Analiza teoretică și verificarea experimentală a unui prototip de generator sincron cu magneți permanenți montați pe suprafața rotorului și un număr mic de creștături pe pol și fază în stator ( $q=0.65$ ) – Prototip 2.
3. Verificarea experimentală a influenței numărului de creștături asupra cuplurilor parazite de tip "cogging" la generatorul sincron cu magneți permanenți montați pe suprafața rotorului.
4. Comparație între Prototipul 1 și Prototipul 2 și formularea unor concluzii utile pentru proiectarea de serie a generatoarelor sincrone cu magneți permanenți.
5. Studiul posibilităților de îmbunătățire a caracteristicilor externe prin metode constructive, precum introducerea de piese feromagnetice în spațiul dintre magneții de pe rotor.

### **8.3 Direcții de dezvoltare**

Cercetările prezentate în teză pot fi dezvoltate în continuare în următoarele direcții:

- studiul forțelor unilaterale prin metoda elementului finit pentru GSMP cu număr mic de creștături pe pol și fază;
- determinarea unui criteriu de alegere a înfășurării statorice (a numărului de creștături pe pol și fază) care să constituie un compromis pentru valori acceptabile ale cuplului parazit "cogging" și ale forțelor unilaterale;
- studiul funcționării GSMP în sarcină nesimetrică; caracteristici de funcționare;
- simularea numerică și studiul experimental al regimurilor tranzitorii [B4][B5][G7][ST1][ST2].

## ANEXE

### **A1. Lucrări științifice publicate pe parcursul stagiului doctoral**

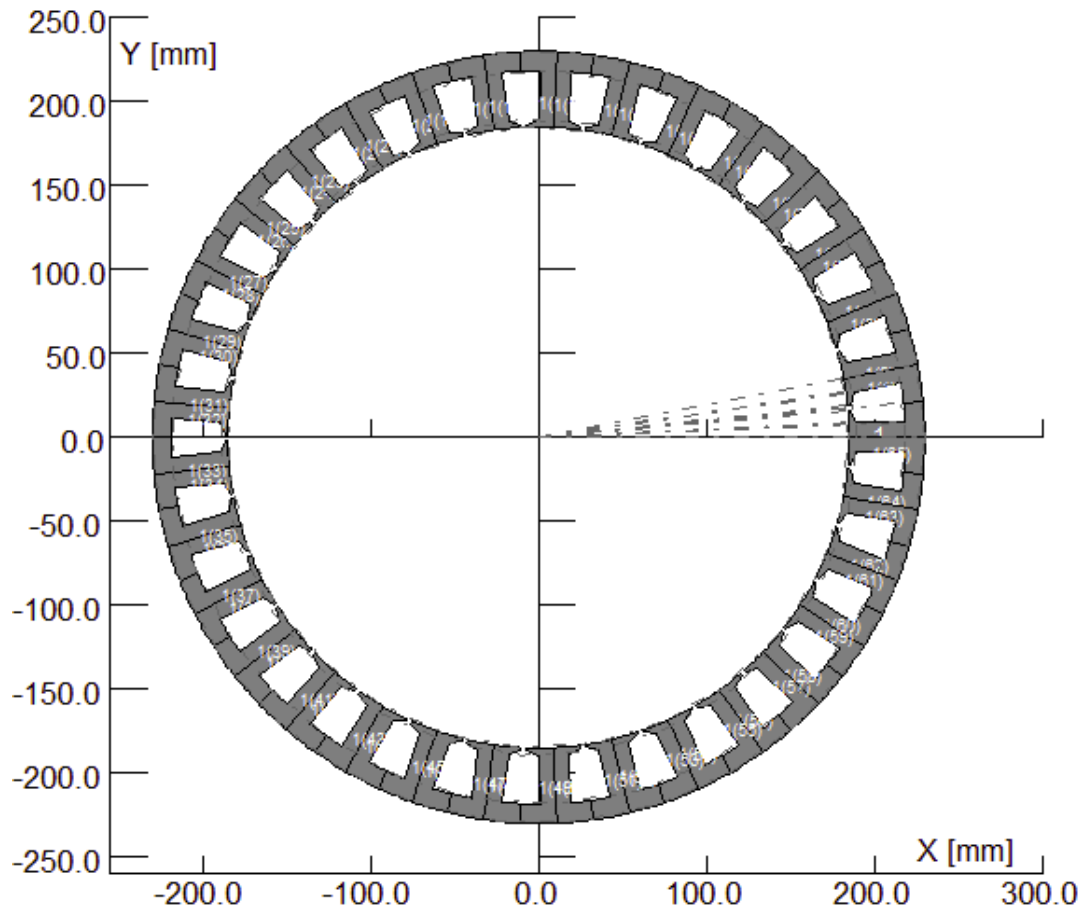
#### **a) Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice indexate Web of Science-Wos (ISI) Proceedings:**

- 1) Constantin Gabriel Dobrean, Marius Biriescu, Laurențiu Pădeanu, Traian Jurca, Jurcu Marcel-Romulus, Ioan Pădureanu, *Centring in magnetic field of synchronous generators rotor using virtual instrumentation*, 2016 International Conference on Information and Digital Technologies (IDT), DOI: 10.1109/DT.2016.7557151, ©2016 IEEE, Rzeszow, Poland
- 2) Constantin Dobrean, Marian Greconici, Gheorghe Madescu, Marțian Moț, Marius Biriescu, *FEM Analysis of a Synchronous Generator with Inset Permanent Magnet Rotor*, International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), 978-1-5090-4488-7/17/\$31.00 ©2017 IEEE, Brașov

#### **b) Lucrări științifice publicate în volumele unor manifestări științifice:**

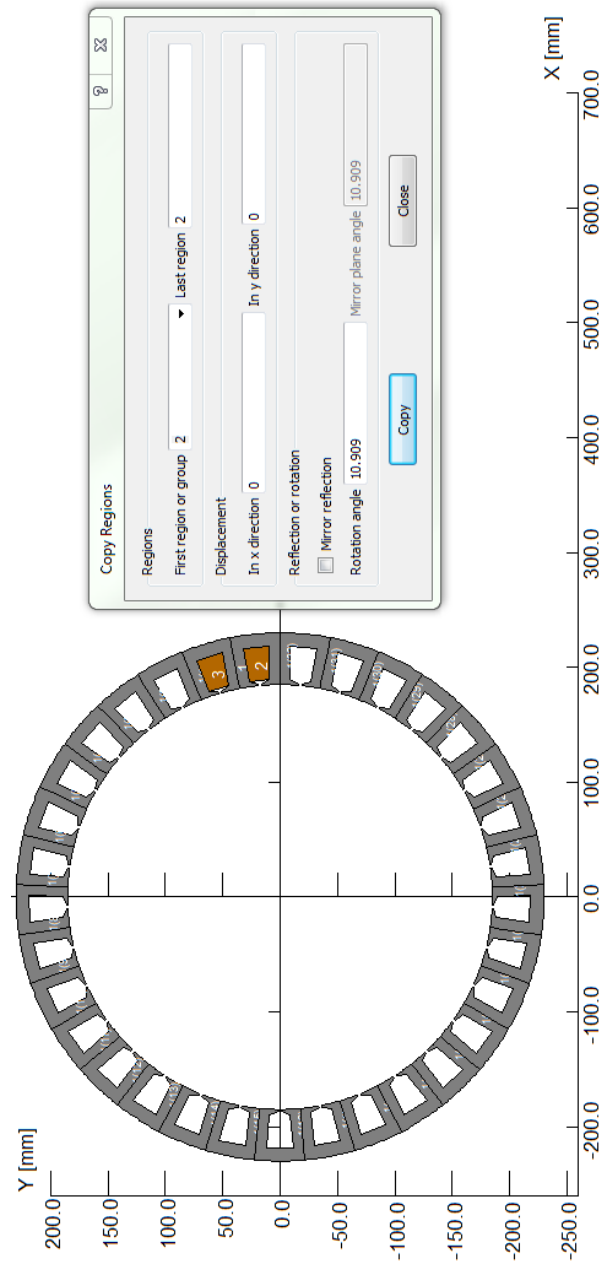
- 1) Constantin Gabriel Dobrean, Marius Biriescu, Marțian Moț, Gheorghe Madescu, Marian Greconici, *Study of the Magnetic Field of a Permanent Magnet Synchronous Generator by using the Finite Element Method*, Analele Universității 'Eftimie Murgu', 2016, Vol. 23 Issue 1, p73-88. 16p.

## A2. Construcția geometrică a statorului - definirea geometriei prin replicarea unei regiuni

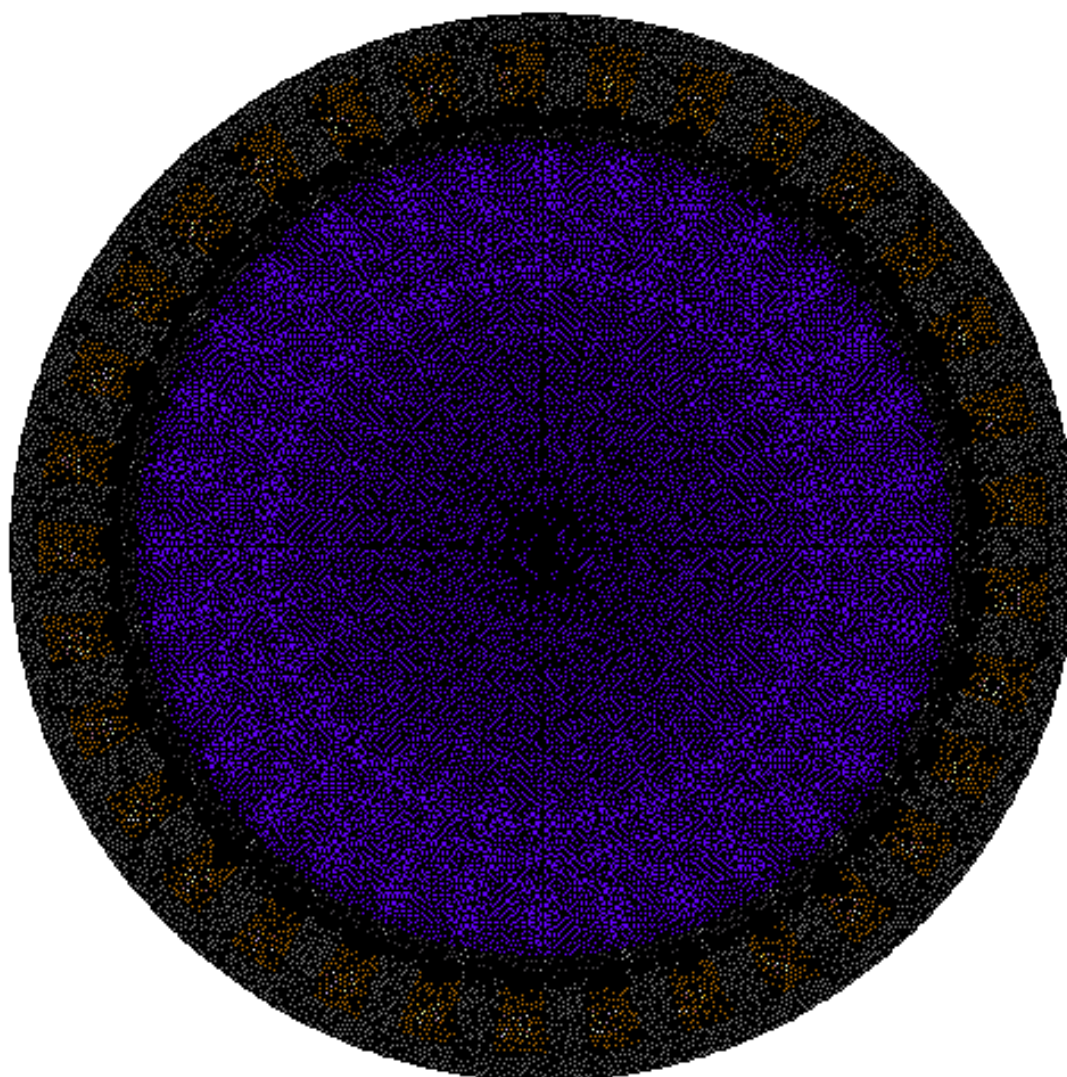




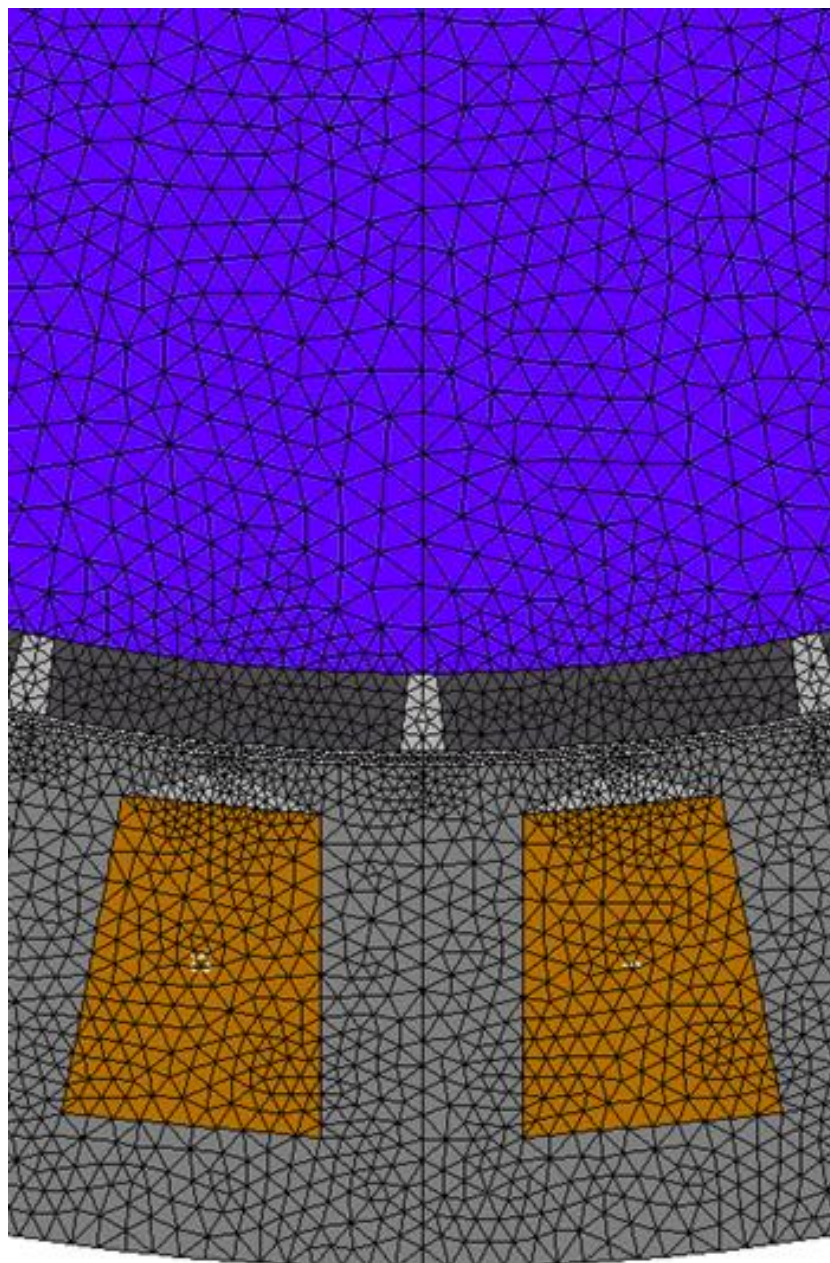
### A3. Crearea înfășurărilor statorice



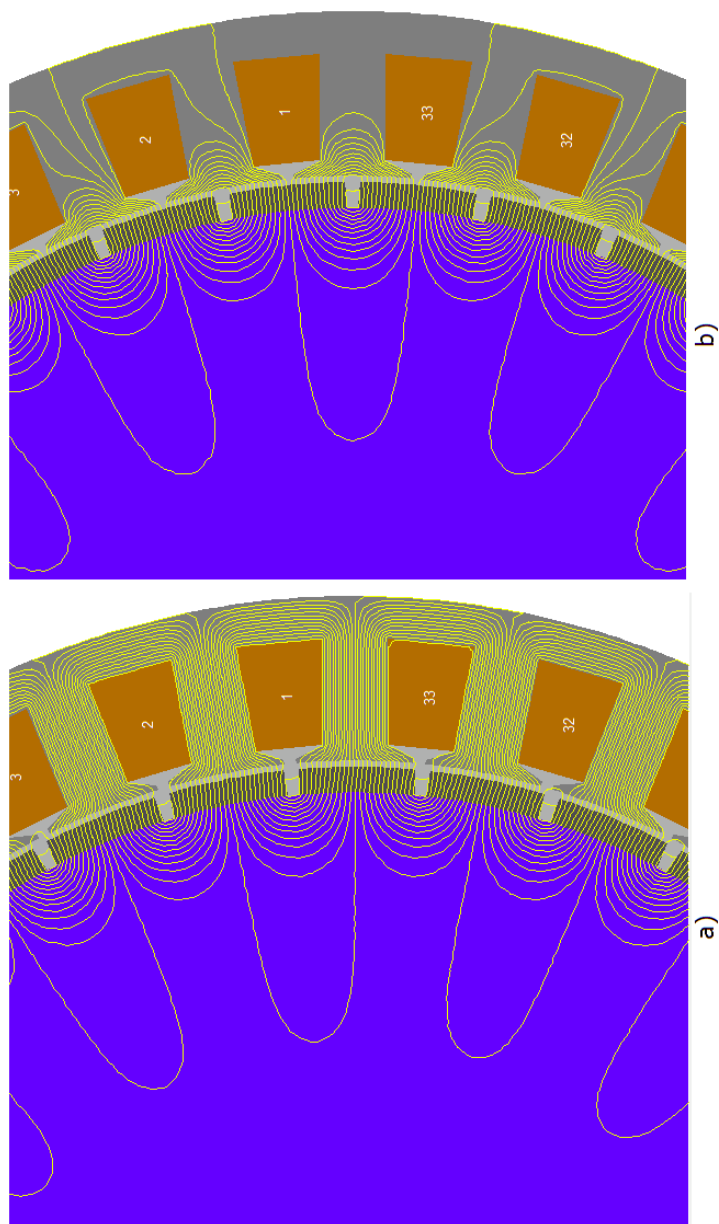
#### A4. Rețeaua de discretizare



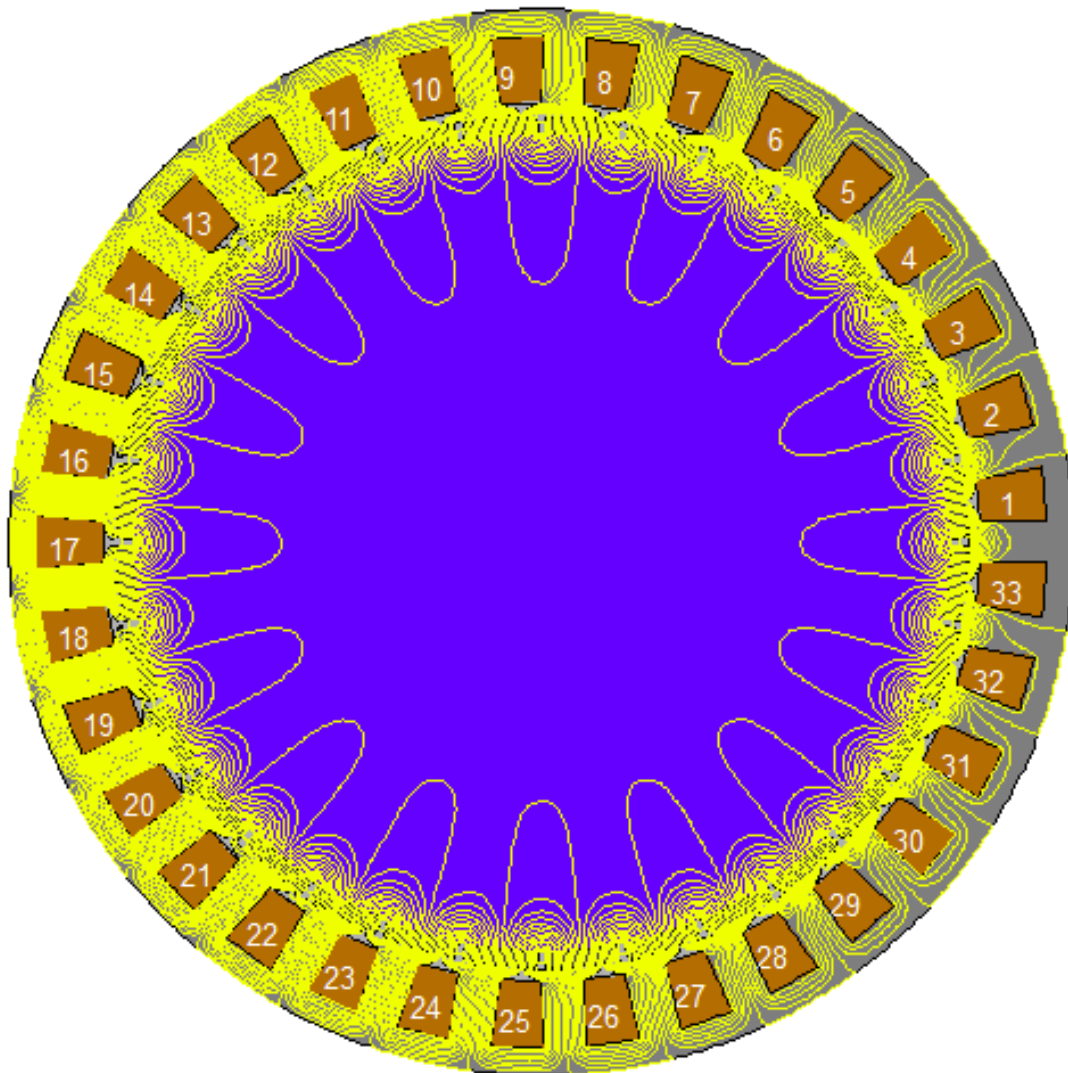
**A5. Rețeaua de discretizare – detaliu înfășurări și magneți**



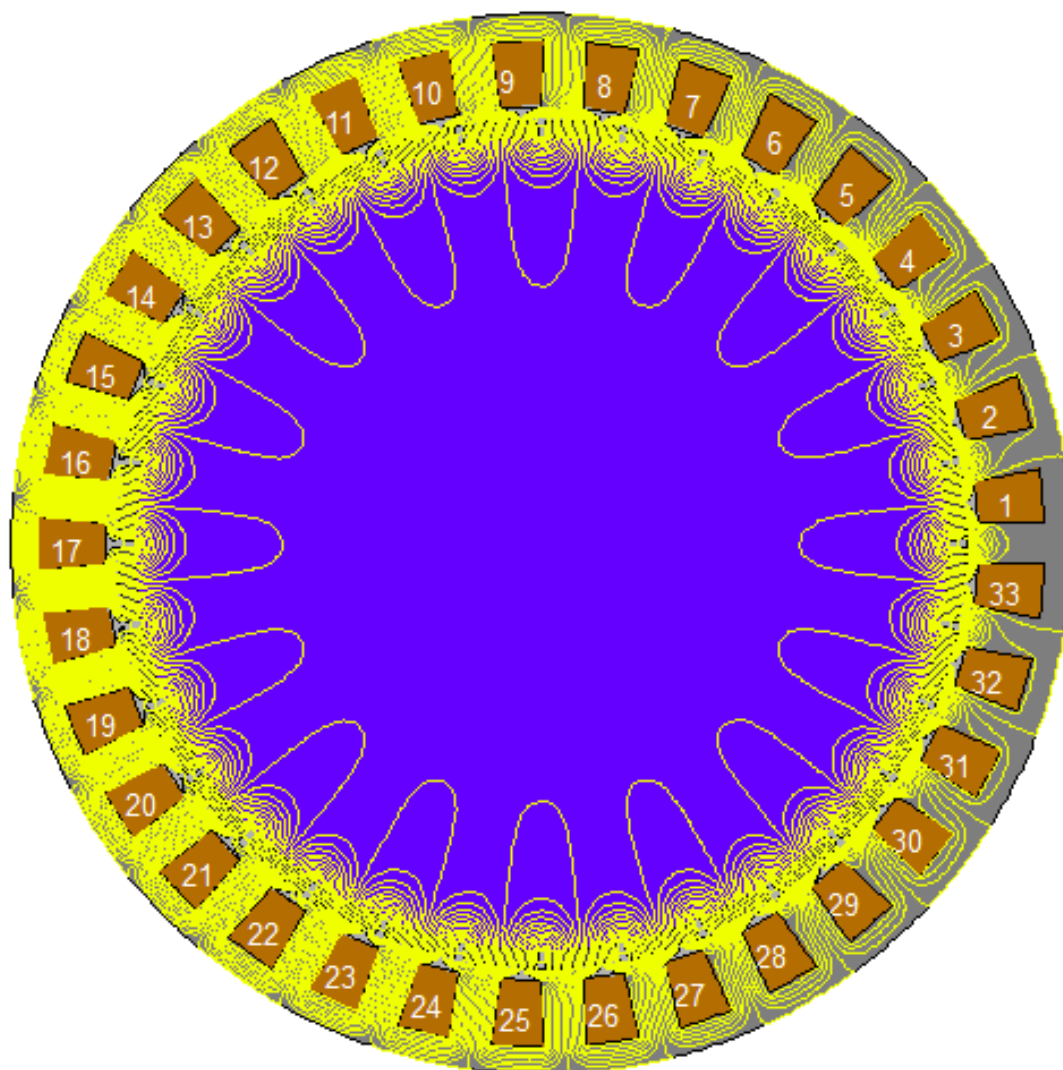
**A6. Liniile de câmp ale inducției magnetice generate în funcție de poziția magnetului**



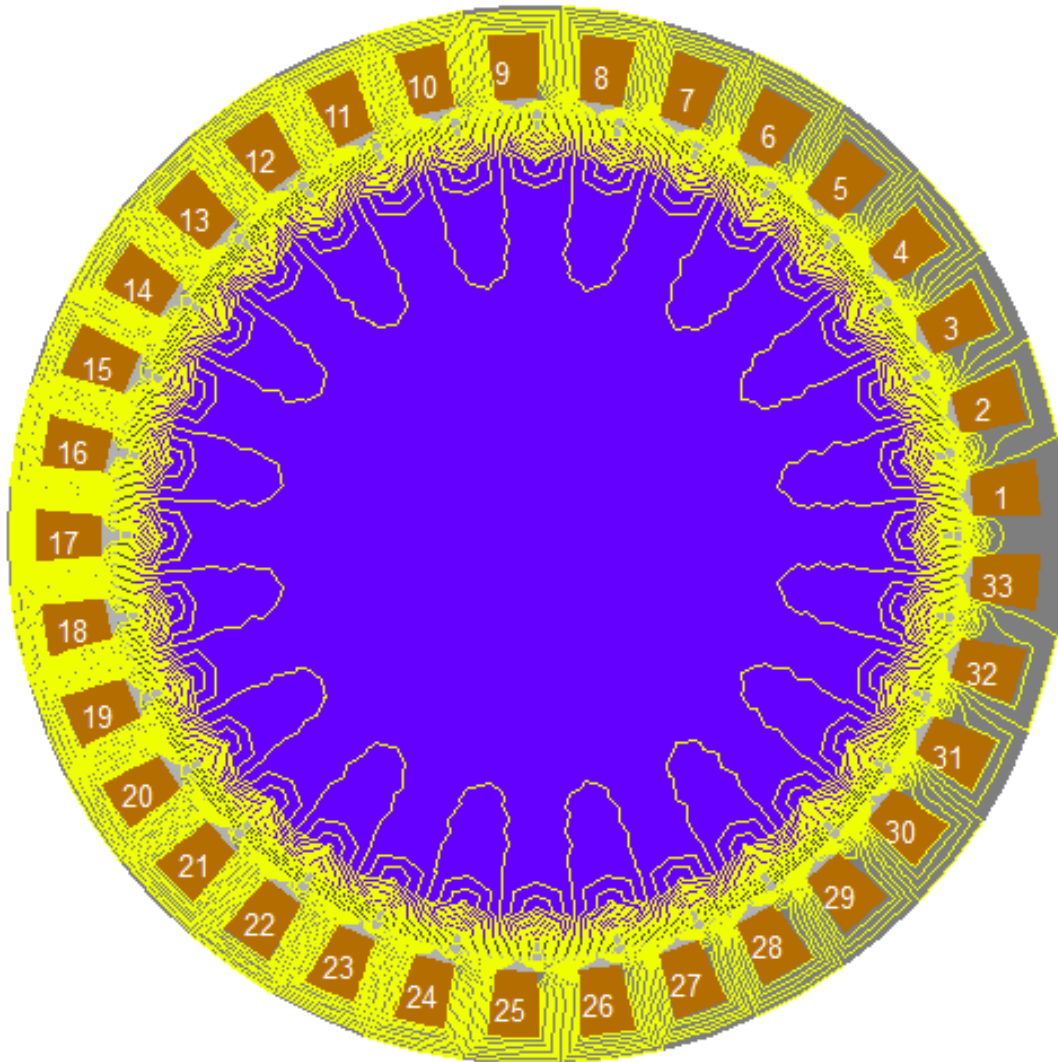
**A7. Spectrul câmpului magnetic pentru rețeaua de discretizare formată din 40471 noduri și 80346 elemente**

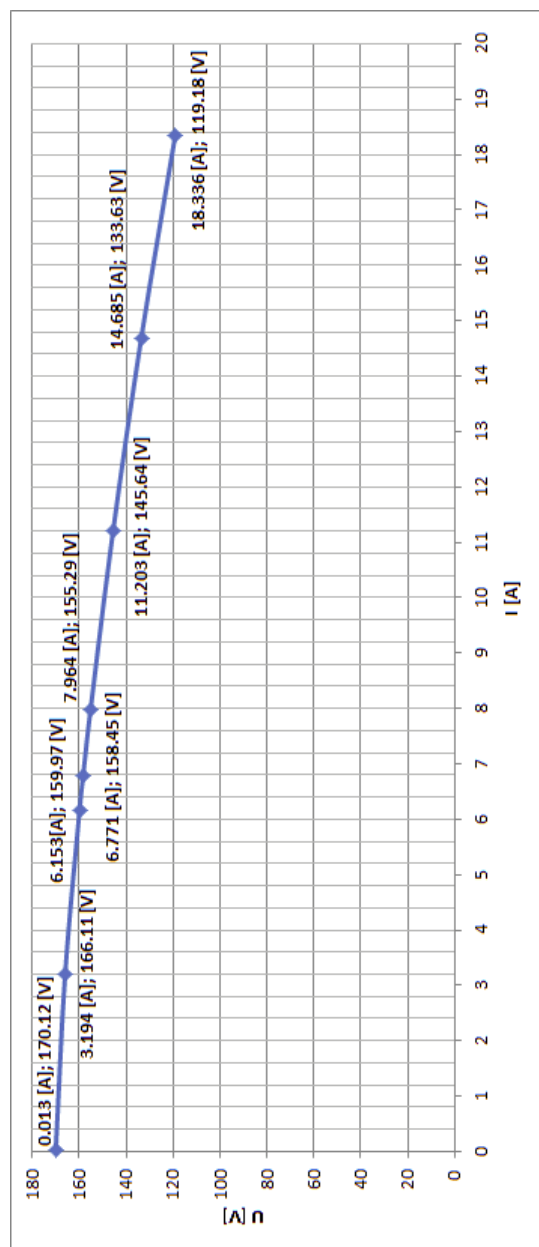


**A8. Spectrul câmpului magnetic pentru rețeaua de discretizare formată din 28253 noduri și 56042 elemente**



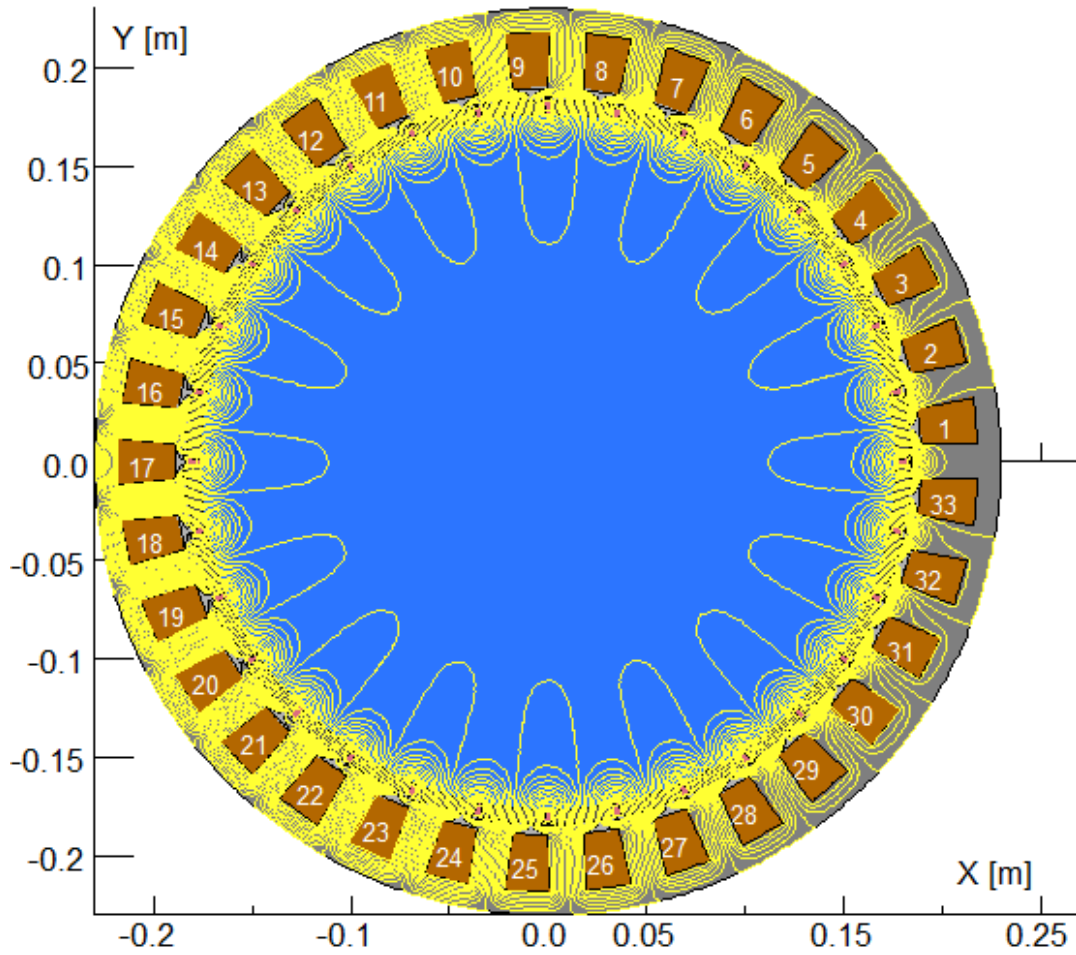
**A9. Spectrul câmpului magnetic pentru rețeaua de discretizare formată din 9996 noduri și 19924 elemente**



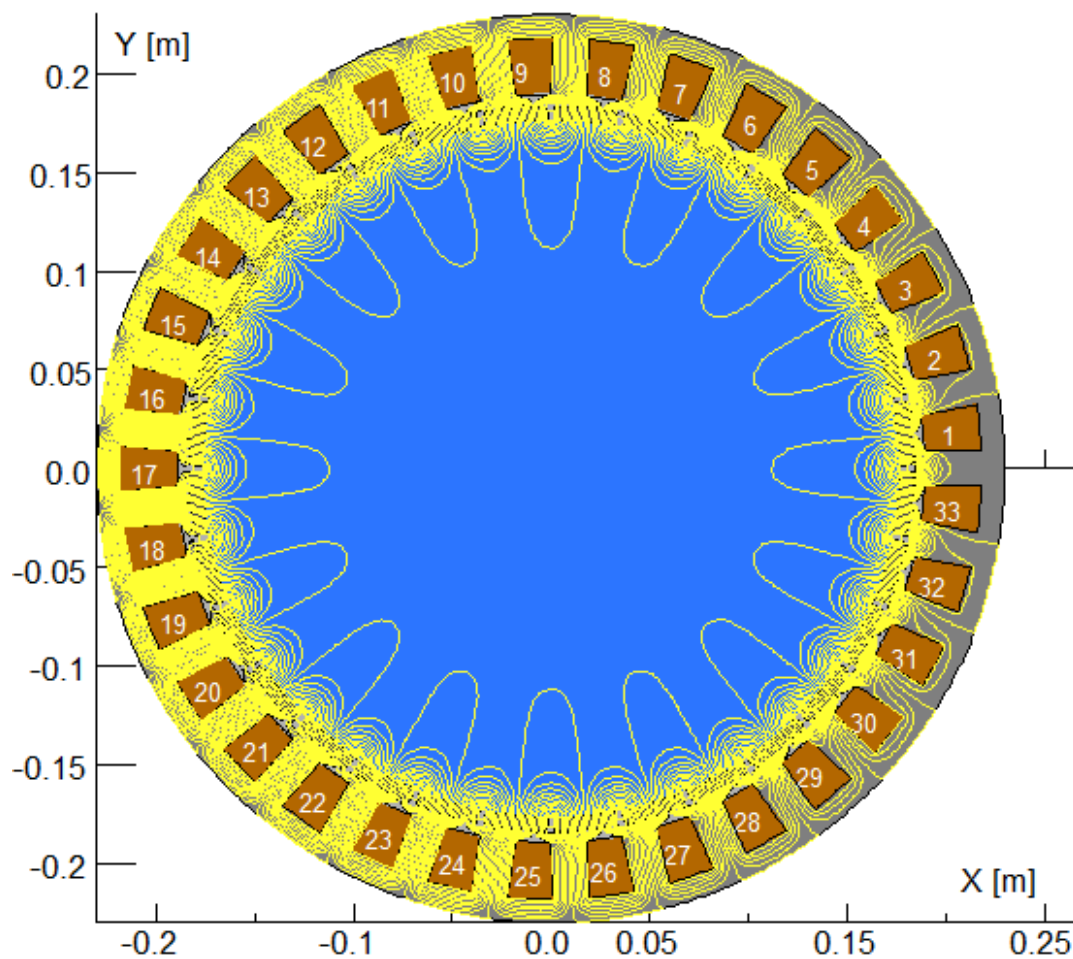
**A10. Caracteristica externă  $U=f(I)$  la sarcină rezistivă obținută pe baza simulărilor din OPERA**



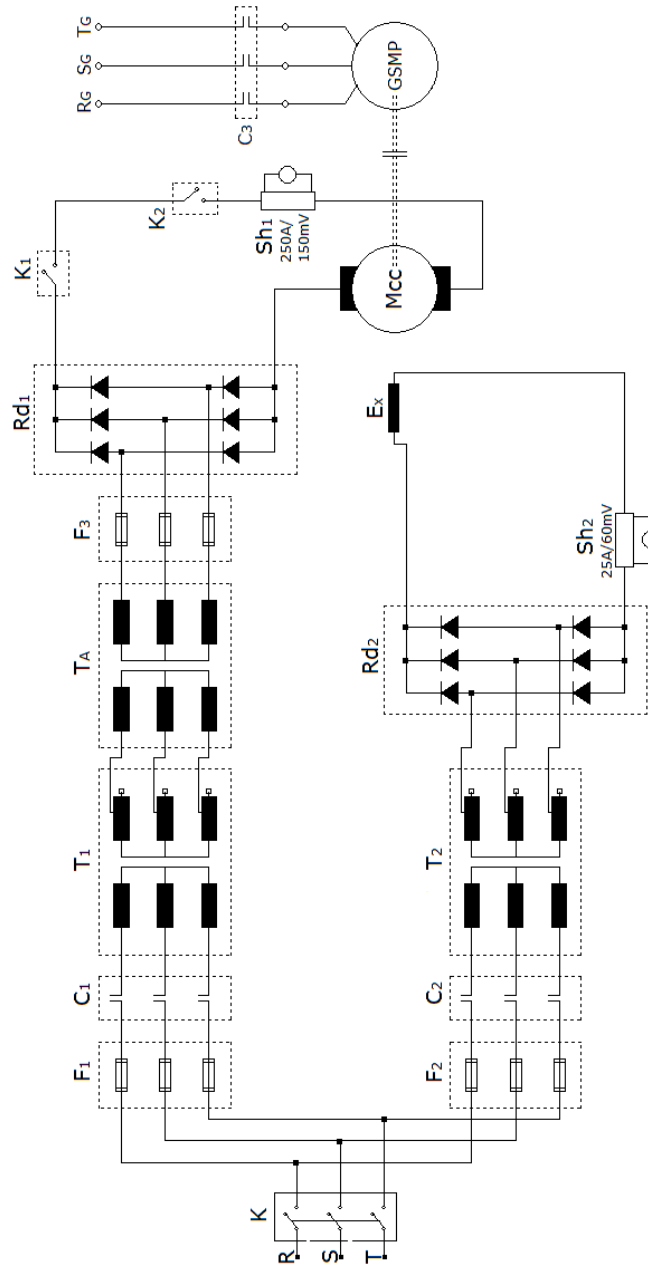
**A11. Spectrul câmpului magnetic al GSMP pentru cazul cu  
piese feromagnetice în spațiul interpolar**



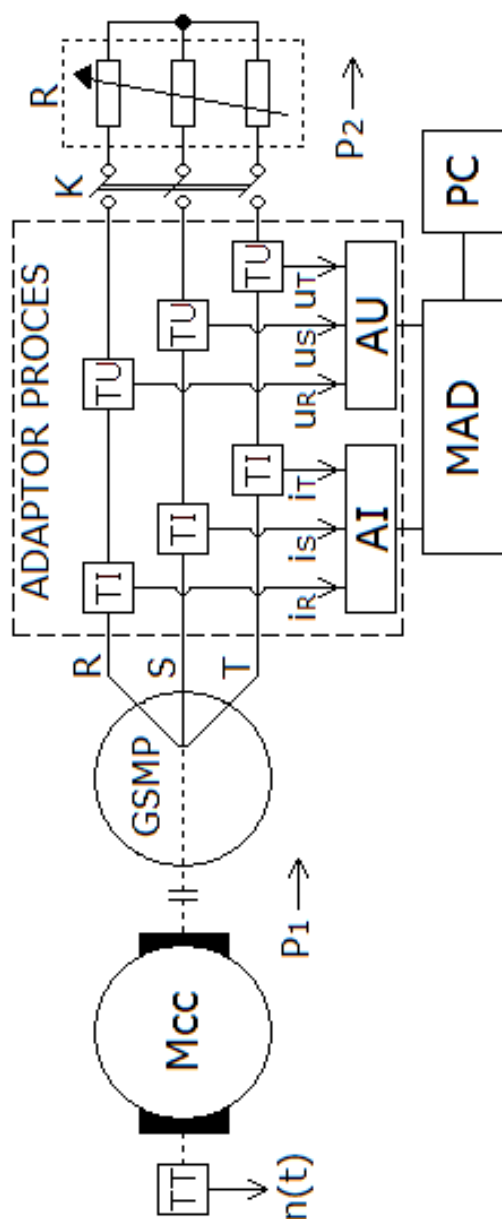
**A12. Spectrul câmpului magnetic al GSMP pentru cazul fără piese feromagnetice în spațiul interpolar**



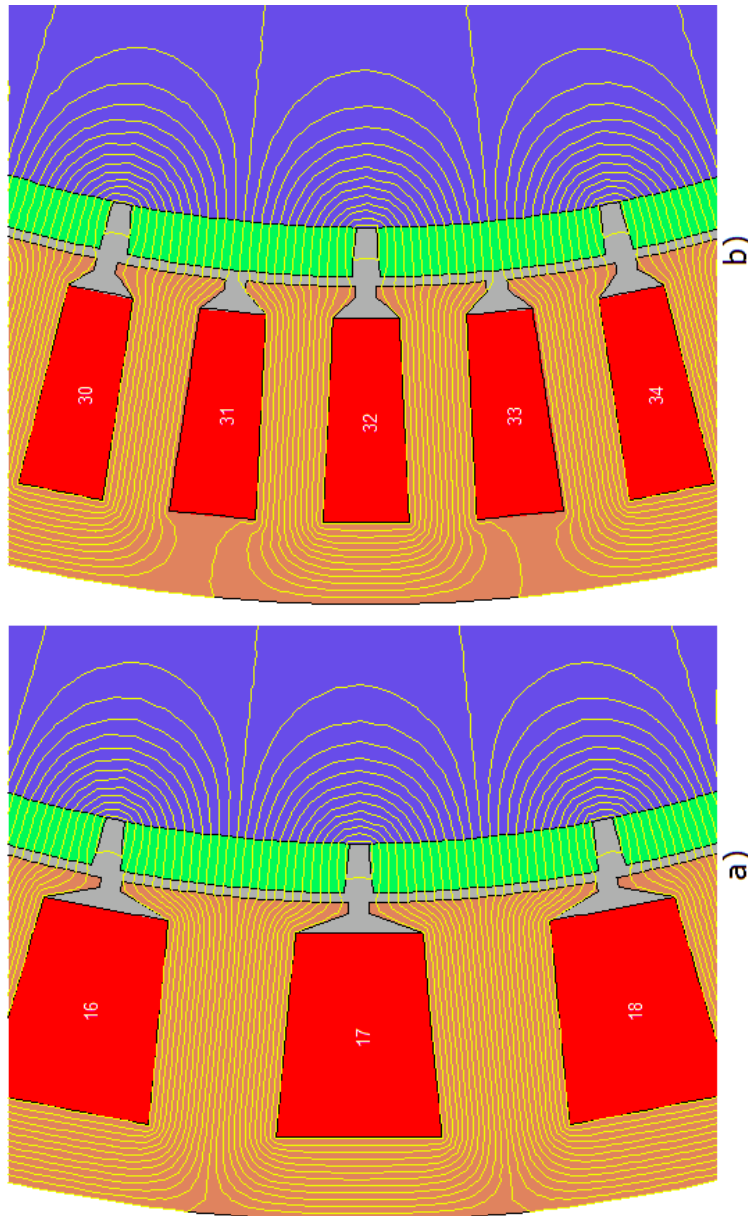
### A13. Schema circuitului de forță al standului experimental



**A14. Detaliu la schema de montaj pentru sistemul de achiziție și prelucrare de date**



**A15. Distribuția fluxului magnetic calculat la funcționarea în gol:  
a) Prototip 1; b) Prototip 2**



## BIBLIOGRAFIE

- [A1] Mohammadali Abbasian, Arash Hassanpour Isfahani, *Optimal Design of a Direct-Drive Permanent Magnet Synchronous Generator for Small-Scale Wind Energy Conversion Systems*, Journal of Magnetics 16(4), 379-385, 2011
- [A2] T.R. Ayodele, A.A. Jimoh, J.L Munda, J.T Agee, *Challenges of Grid Integration of Wind Power on Power System Grid Integrity: A Review*, INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH T.R. Ayodele et al., Vol.2, No.4, 2012
- [B1] John Bird, *Electrical and Electronic Principles and Technology – Fifth edition*, Routledge, Taylor&Francis Group, London and New York, 2014
- [B2] BP Statistical Review of World Energy, June 2018
- [B3] Năstase Bichir, Constantin Răduți, Ana-Sofia Diculescu, *Mașini electrice*, Editura didactică și pedagogică, București 1979
- [B4] D. Bang, H.Polinder, G. Shrestha, J.A. Ferreira, *Review of Generator Systems for Direct-Drive Wind Turbines*, Proceedings of the European Wind Energy Conference and Exhibition, Belgium, 2008
- [B5] Ion Boldea, *Synchronous Generators (Second Edition)*, CRC, Taylor&Francis Group, 2016
- [B6] Frede Blaabjerg, Ke Ma, *Future on Power Electronics for Wind Turbine Systems*, IEEE JOURNAL OF EMERGING AND SELECTED TOPICS IN POWER ELECTRONICS, VOL. 1, NO. 3, SEPTEMBER 2013
- [B7] N.R. Bhasme, W.Z. Gandhare, *Power Converters for Grid Integration of Wind Power Systems*, International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) ISSN: 2248-9622, Vol. 2, Issue4, pp.2181-2185, July-August 2012
- [B8] Ramón Bargallo, *Finite elements for electrical engineering*, Universitat Politècnica de Catalunya, Electrical Engineering Department, 2006
- [B9] Ion Boldea, Lucian Tutelea, *Electric machines – Steady State, Transients and Design with MATLAB*, CRC Press, Taylor & Francis Group, 2010
- [B10] Marius Biriescu, Gheorghe Madescu, *Modele de câmp și modele de circuit în analiza mașinilor electrice*, Editura Politehnica Timișoara – 2014
- [B11] M. Biriescu, Gh. Liuba, *Identification of Reactances of Synchronous Machines Including the Saturation Influences*, Proceedings of International Conference on the Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines, Zürich 27-29 aug., 1991
- [B12] M. Biriescu, Gh. Liuba, M. Moț, V. Olărescu, V. Groza, *Identification of synchronous machine reactances from direct current decay at standstill test*, International Conference on Electrical Machines, Helsinki 2000, Vol. IV, pag. 1914-1916
- [B13] Marius Biriescu, Voicu Groza, Vladimir Crețu, Octavian Proștean, Gheorghe Madescu and Marțian Moț, *Computer Aided Testing of Electrical Machines*,

- EUROCON 2007 The International Conference on "Computer as a Tool", Warsaw, September 9-12
- [C1] Mihai Chirca, Claudiu Oprea, Petre-Dorel Teodosescu, Ștefan Breban, *Optimal Design of a Radial Flux Spoke-Type Interior Rotor Permanent Magnet Generator for Micro-Wind Turbine Applications*, Department of Electrical Machines and Drives Technical University of Cluj-Napoca, Romania, 2016
- [C2] Vasile-Simion Crăciun, Kiwoo Park, Haishun Sun, Viorel Trifa, *Modeling of a small permanent magnet synchronous generator wind energy conversion system for a smart building*, Conferința Națională de Acționări Electrice, ediția XVI, Suceava, 2012
- [C3] Dan-Sorin Comșa, *Metoda elementelor finite – curs introductiv*, Editura U.T. PRES, Cluj-Napoca, 2007
- [C4] Ion Cioc, Nicolae Cristea, Năstase Bichir, *Mașini electrice – Îndrumar de proiectare VOL. III*, Scrisul Românesc, Craiova, 1985
- [C5] T.F. Chan, L.L. Lai, Lie-Tong Yan, *Performance of a Three-phase AC Generator With Inset NdFeB Permanent-Magnet Rotor*, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol.19, no.1, pp.88-94, March 2004
- [D1] R. Dutta, F. Rahman, *Interior Permanent Magnet Generator: Generator of New Millennium*, International Energy Journal: Vol. 6, No. 1, Part 1, June 2005
- [D2] Richard C. Dorf, *The Electrical Engineering Handbook*, CRC Press LLC, 2000
- [D3] M. R. Dubois, H. Polinder, J.A. Ferreira, *Prototype of a new Transverse-Flux Permanent Magnet (TFPM) Machine with Toothed Rotor*, Laboratory of Electrical Power Processing, Delft University of Technology
- [D4] M. Drugă, C. Nichita, G. Barakat, B. Dakyo, E. Ceangă, *A Peak Power Tracking Wind System Operating with a Controlled Load Structure for Stand-Alone Applications*, 13th European Conference on Power Electronics and Applications, IEEE, Barcelona, 2009
- [D5] Dordea T., *Mașini electrice*, Editura Didactică și Pedagogică București, 1977
- [D6] Constantin Doborean, Marian Greconici, Gheorghe Madescu, Marțian Moț, Marius Biriescu, *FEM Analysis of a Synchronous Generator with Inset Permanent Magnet Rotor*, International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) & Intl Aegean Conference on Electrical Machines and Power Electronics (ACEMP), 978-1-5090-4488-7/17/\$31.00 ©2017 IEEE, Brașov, 2017
- [E1] Youssef Errami, Mohammed Ouassaid, Mohamed Maaroufi, *Modelling and optimal power control for permanent magnet synchronous generator wind turbine system connected to utility grid with fault conditions*, World Journal of Modelling and Simulation, Vol. 11 (2015) No. 2, pp. 123-135, ISSN 1 746-7233, England, UK
- [E2] Gaber El Saady, El-Nobi A. Ibrahim, Hamdy Ziedan, Mohammed M. Soliman, *Analysis of Wind Turbine Driven Permanent Magnet Synchronous Generator under Different Loading Conditions*, Innovative Systems Design and Engineering, ISSN 2222-1727 (Paper) ISSN 2222-2871 (Online), Vol.4, No.14, 2013
- [F1] M. Fatu, C. Lascu, G. D. Andreescu, R. Teodorescu, F. Blaabjerg, I. Boldea, *Voltage Sags Ride-Through of Motion Sensorless Controlled PMSG for Wind Turbines*, IEEE 42nd IAS Annual Meeting Conference, pp.171-178, September, 2007

- [F2] F. Magnussen, H. Lendenmann, *Parasitic Effects in PM Machines with Concentrated Windings*, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 43, no. 5, September 2007, pp. 1223 - 1232
- [G1] Jacek F. Gieras, Mitchell Wing, *Permanent Magnet Motor Technology*, Marcel Dekker Inc., 2002
- [G2] R. Gasch, J. Twele, *Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation*, ISBN:978-3-642-22937-7, Springer, 2012
- [G3] Jacek F. Gieras, Rong-Jie Wang, Maarten J. Kamper, *Axial Flux Permanent Magnet Brushless Machines*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht/ Boston/ London, 2004
- [G4] Delvis A. González-Lopez, Juan A. Tapia, Rogel Wallace, Anibal Valenzuela, *Design and Test of an Axial Flux Permanent-Magnet Machine With Field Control Capability*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 44, No. 9, September 2008
- [G5] Marian Greconici, Gheorghe Madescu, Marțian Moț, Danijela Milosevici, Marius Biriescu, *Influence of Rotor Structure on Cogging Torque in Surface-Mounted PM-Generator*, International Conference on Applied Electromagnetics – PES 2019, August 26-28, 2019, Niš, Serbia, ISBN 978-86-6125-211-2
- [G6] Jacek F. Gieras, Zbigniew J. Piech, Bronislaw Tomczuk, *Linear Synchronous Motors: Transportation and Automation Systems, Second Edition*, CRC, Taylor&Francis Group, 2012
- [G7] Marian Greconici, Gheorghe Madescu, Marțian Moț, Marius Biriescu, Danijela Milosevici, *Analysys of a PM Generator with Inset Magnets*, 2018 International Symposium on Electronics and Telecommunications (ISETC), Timisoara, Romania, DOI: 10.1109/ISETC.2018.8583943
- [G8] G. Madescu, M. Moț, M. Biriescu, M. Greconici, C. Koch, *Low Speed PM Generator for Direct-Drive Wind Applications*, International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.), Vol. xx, n. x, 2007
- [G9] V. Groza, M. Biriescu, V. Crețu, I. Șora, M. Moț, *Testing of Electrical Machines in Periodical and Quasi-Periodical conditions, Using a Data Acquisitions and Procesing System*, Proceedings of 1998 IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference 68CH3622, St. Paul, Minnesota, pag. 766-769
- [G10] Voicu Groza, Marius Biriescu, Vladimir Crețu, Gheorghe Liuba, Marțian Moț, Gheorghe Madescu, *Testing of Electrical Machines with a Dedicated System for Data Acquisition and Processing*, ICEM 2006, XVII International Conference on Electrical Machines, Chania, Crete Island, Greece, September 2-5, 2006
- [G11] V. Groza, M. Biriescu, G. Liuba, *Measurement of reactance of synchronous machines at standstill*, IEEE International Electrical Machines and Drives Conference, Seattle may 1999, pag 171-173
- [H1] George C. V. Holmes, *Ancient and Modern Ships*, Produced by Chris Curnow, Turgut Dincer and the Online Distributed Proofreading Team, 2010
- [H2] Mohammad Salim Hossain, *Influence of Design Parameter on Output Torque of Inset Type Flux Reversal Machine*, Politecnico di Milano, 2013
- [H3] Siegfried Heier, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, John Wiley & Sons Ltd, Chichester 1998
- [H4] Duane Hanselman, *Brushless Permanent Magnet Motor Design (Second Edition)*, Magna Physics Publishing, University of Maine, Orono, ME 04469, USA, 2006



- [H5] Siu-Lau Ho, *Finite-element analysis of machines*, Hong Kong Polytechnic University, China, *Electrical engineering Vol. III*, Eolss Publishers Co. Ltd., Oxford, UK, 2009
- [I1] F. Iov, M. Ciobotaru, F. Blaabjerg, *Power Electronics Control of Wind Energy in Distributed Power Systems*, PEDS'07 Conference, Thailand, 2007
- [I2] Zoran Ivanovski Msc., *Direct - Drive Wind Turbines*, International Journal of Scientific & Engineering Research Volume 2, Issue 10, ISSN 2229-5518, October 2011
- [L1] Lin T.Y., Zhang B.C., Lu D.M., Sun L., Zhang Z.Z., *On the mechanism analysis of the vertical shaft type wind-power Chinese square-pallet chain-pump*, "Proceedings of International Symposium on History of Machines and Mechanisms", Tainan, Taiwan, pp. 309-324, November 10-14, 2008
- [M1] Mihaela Morega, *Mașini și acționări electrice - Note de curs*, Universitatea "Politehnica" din București, Facultatea de Electrotehnică, 2006-2007
- [M2] Saurabh Kumar Mukerji, Ahmad Shahid Khan, Yatendra Pal Singh, *Electromagnetics for Electrical Machines*, CRC, Taylor&Francis Group, 2015
- [M3] G. Madescu, M. Biriescu, O. Proștean, T. Mihuț, M. Greconici, M. Moț, L. Augustinov, *Low speed synchronous generator with PM excitation*, The XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, 6-8 Sept. 2010, Rome Italy, DOI: 10.1109/ICELMACH.2010.5608283
- [M4] J. Morren and S. W. de Hann, *Ride through of wind turbines with doubly-fed induction generator during a voltage dip*, IEEE Trans. Energy Convers., vol. 20, no. 2, pp. 435-441, June, 2005
- [M5] H. Mellah, K.E. Hemsas, *Simulation Analysis with Comparative Study of a PMSG Performances for Small WT Application by FEM*, Department of Electrical engineering, Setif University, Algeria, International Journal of Energy Engineering 2013, 3(2):55-64
- [M6] Cornel Marin, Anton Hadar, Ion Florin Popa, Laurențiu Albu, *Modelarea cu elemente finite a structurilor mecanice*, Editura Academiei Române și Editura Agir, București, 2002
- [M7] Ștefan I. Maksay, Diana A. Bistrrian, *Introducere în metoda elementelor finite*, Editura Cermi, Iași 2008
- [M8] G. Madescu, M. Biriescu, M. Greconici, M. Moț, *Low Speed PM Generator for Wind Turbines Applications*, 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), Novi Sad, 2012
- [M9] G. Madescu, M. Biriescu, M. Greconici, M. Moț, *Performances Comparison of Two Surface-Mounted Permanent Magnet Generators With Fractional - Slot Windings*, IEEE EUROCON - International Conference on Computer as a Tool, 2011
- [N1] Andrei Nicolaide, *Mașini electrice - teorie, proiectare*, Editura Scrisul Românesc Craiova - 1975
- [O1] Opera Simulation Software - Cobham Technical Services, *Electrical Machines Design*, Kidlington, Oxfordshire, UK, 2015
- [P1] Trevor J. Price, *James Blith - Britain's First Modern Wind Pioneer*, School of Technology, University of Glamorgan, Pontypridd, Wales, 2005
- [P2] Long Pham, *A Review of Full Scale Converter for Wind Turbines*, Electrical and Renewable Energy Engineering Department, Oregon Institute of Technology, Wilsonville
- [P3] Juha Pyrhönen, *Electrical Drives*, LUT, Department of Electrical Engineering
- [P4] Popovici Diana, Lolea Marius, *Tehnica tensiunilor înalte - curs universitar*, Facultatea de Energetică din Oradea, 2011

- [P5] L. Pădeanu, *Contribuții la testarea și îmbunătățirea hidrogenatoarelor sincrone verticale de putere mare folosind instrumentația virtuală*, Teză de doctorat, Universitatea "Politehnica" din Timișoara, 2016
- [R1] Muhammad H. Rashid, *Power Electronics Handbook*, Academic Press, 2001
- [R2] Djamilia Rekioua, *Wind Power Electric Systems – Modeling, Simulation and Control*, Green Energy and Technology, Springer-Verlag London 2014
- [R3] Reportbuyer.com, *Wind Gearbox and Direct-Drive, Update 2017-Global Market Size, Competitive Landscape, and Key Country Analysis to 2021*, Report ID: 5089145, 2017
- [R4] Njål Rotevatn, *Design and testing of Flux Switched Permanent Magnet (FSPM) Machines*, Norwegian University of Science and Technology, 2009
- [S1] R. Saou, M. E. Zaim, K. Alitouche, *Modelling and Design of a Low Speed Flux Reversal Machine*, Journal of Electrical Systems, pp. 18-23, 2009
- [S2] David A. Spera, *Wind turbine technology; Fundamental concepts of wind turbine engineering – Second edition*, ASME, Three Park Avenue, New York, NY 10016, USA, 2009
- [S3] Pawan Sharma, T. S. Bhatti, K. S. S. Ramakrishnan, *Permanent-Magnet Induction Generators: An Overview*, Journal of Engineering Science and Technology, Vol. 6, No. 3 (2011) 332 – 338
- [S4] Jung Moo Seo, Jong-Suk Ro, Se-Hyun Rhyu, In-Soung Jung, Hyun-Kyo Jung, *Novel Hybrid Radial and Axial Flux Permanent-Magnet Machine Using Integrated Windings for High-Power Density*, IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 51, No. 3, March 2015
- [S5] Ankit Kumar Singh, Ram Krisham, Yograj Sood, *Modeling and Control of Grid Connected Variable Speed PMSG Based Wind Energy System*, Conference on Advances in Communication and Control Systems 2013
- [S6] Ștefan Sorohan, Cristian Cătălin Petre, *Programe și aplicații cu elemente finite*, Editura PRINTECH, București, 2004 (revizuită 2007)
- [S7] Bojan Stumberger, Miralem Hadziselimovic, *Design of permanent magnet synchronous machine for micro-hybrid electric vehicle operation*, PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R. 87 NR 12b/2011
- [S8] Șt. Sorohan, I. N. Constantinescu, *Practica modelării și analizei cu elemente finite*, Editura Politehnica Press, București, 2003
- [ST1] IEEE Std. 115-1995, IEEE, Part II, Sec. 12, *Standstill frequency – respons testing*
- [ST2] BS 4999: Part 104: 1988, British Standard, *General Requirement for rotating electrical machines. Part 104. Methods of test for determining synchronous machines quantities*
- [T1] Pierre Tchakoua, René Wamkeue, Mohand Ouhrouche, Tommy Andy Tameghe, Gabriel Ekemb, *New Approach for Modeling Darrieus-Type Vertical Axis Wind Turbine Rotors Using Electrical Equivalent Circuit Analogy: Basis of Theoretical Formulations and Model Development*, Energies 2015
- [T2] Î. Tarimer, C. Ocak, *Performance Comparison of Internal and External Rotor Structured Wind Generators Mounted From Same Permanent Magnets on Same Geometry*, Electronics And Electrical Engineering, Sins 1392 – 1215 2009
- [T3] T. Tudorache, M. Popescu, *Modelarea numerică a unui generator eolian în construcție sincronă, cu magneți permanenți, utilizând metoda elementului finit*, Electrotehnică, Electronică, Automatică, 56 (2008), Nr. 3

- [U1] Universitatea "Politehnica" din Timișoara, Catedra de electrotehnică, Constantin Sora, Ioan De Sabata, Nicolae Bogoevici, Avram Heler, Dumitru Daba, Ioan Vetreș, Dumitru Radu, Dumitru Toader, Ștefan Hărăguș, Ioan Bere, Mariana Titihăzan, Dumitru Irimia, Eugen Bărbulescu, Constantin Blaj, Marian Greconici, *Bazele electrotehnicii. Teorie și aplicații*, Editura Politehnica, Timișoara 2008
- [V1] K. Vanitha, Ch. Shrivani, *Permanent Magnet Synchronous Generator with Fuzzy Logic Controller for Wind Energy Conversion System*, International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT), ISSN: 2278-0181, Vol. 2 Issue 11, November – 2013
- [V2] Vector Fields, *Opera, Opera-2D - Reference manual*, Version 12.025, Oxford, 2008
- [V3] Vector Fields, *Opera, Opera-2d – User Guide*, Version 12, Oxford, May, 2008
- [W1] Tong Wei, *Wind Power Generation and Wind Turbine Design*, WIT Press, Southampton, UK, 2010
- [W2] [https://ro.wikipedia.org/wiki/Energie\\_geotermic%C4%83](https://ro.wikipedia.org/wiki/Energie_geotermic%C4%83)
- [W3] <https://ro.wikipedia.org/wiki/V%C3%A2nt>
- [W4] <http://www.descopera.ro/mari-intrebari/10677180-de-unde-vine-vantul>
- [W5] [https://www.123rf.com/photo\\_92832159\\_stock-vector-junk-boat-illustration-drawing-engraving-ink-line-art-vector-illustration-.html](https://www.123rf.com/photo_92832159_stock-vector-junk-boat-illustration-drawing-engraving-ink-line-art-vector-illustration-.html)
- [W6] <http://www.madehow.com/Volume-7/Windmill.html>
- [W7] [https://en.wikipedia.org/wiki/Wind\\_turbine](https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_turbine)
- [W8] <http://www.mhivestastoffshore.com/>, MHI Vestas Offshore Wind, 2018
- [W9] [https://en.wikipedia.org/wiki/Vestas\\_V164](https://en.wikipedia.org/wiki/Vestas_V164)
- [W10] [https://en.wikipedia.org/wiki/Burbo\\_Bank\\_Offshore\\_Wind\\_Farm](https://en.wikipedia.org/wiki/Burbo_Bank_Offshore_Wind_Farm)
- [W11] World Energy Council, *Energy Trilemma Index*, Report 2017
- [W12] [https://ro.wikipedia.org/wiki/Joseph\\_Henry](https://ro.wikipedia.org/wiki/Joseph_Henry)
- [W13] [https://ro.wikipedia.org/wiki/Legea\\_induc%C8%9Biei\\_electromagnetice](https://ro.wikipedia.org/wiki/Legea_induc%C8%9Biei_electromagnetice)
- [W14] James D. Widmer, Rochard Martin, Mohammed Kimiabeigi, *Electric vehicle traction motors without rare earth magnets*, Centre for Advanced Electrical Drives, School of Electrical and Electronic Engineering, Newcastle University, Newcastle-upon-Tyne, UK, 2015
- [W15] <https://www.magnax.com/magnax-blog/axial-flux-vs-radial-flux-for-direct-drive-generators>
- [W16] <https://www.electricalcaeasy.com/2014/03/salient-pole-rotor-vs-non-salient-pole.html>
- [W17] David Wood, *Small Wind Turbines – Analysis, Design, and Application*, Springer, London, 2011
- [W18] <https://ro.wikipedia.org/wiki/Electromagnetism>
- [W19] [https://ro.wikipedia.org/wiki/C%C3%A2mp\\_electric](https://ro.wikipedia.org/wiki/C%C3%A2mp_electric)
- [W20] [https://ro.wikipedia.org/wiki/C%C3%A2mp\\_magnetic](https://ro.wikipedia.org/wiki/C%C3%A2mp_magnetic)
- [W21] [http://ro.math.wikia.com/wiki/C%C3%A2mp\\_electromagnetic](http://ro.math.wikia.com/wiki/C%C3%A2mp_electromagnetic)
- [W11] <https://operafea.com/product/>
- [Z1] Z.Q. Zhu, D. Howe, *Influence of design parameters on cogging torque in permanent magnet machines*, IEEE Trans. on Energy Conversion, 15(4): 407-412. [doi 10.1109/60.900501]