

STUDIUL POLUĂRII SISTEMELOR ELECTROENERGETICE DE CĂTRE MAȘINILE ELECTRICE SATURATE DE PUTERE MEDIE ȘI MICĂ

Teză destinată obținerii
titlului științific de doctor inginer
la
Universitatea „Politehnica” din Timișoara
în domeniul INGINERIE ELECTRICĂ
de către

Ing. Marian Bobocea

Conducător științific:
Referenți științifici:

Prof.dr.ing Ioan Novac
Prof.dr.ing Petru Chioncel
Prof.dr.ing Marius Babescu
Prof.dr.ing Valentin Müller

Ziua susținerii tezei: 28.01.2008

UNIV. "POLITEHNICA"	
TIMIȘOARA	
BIBLIOTECA CENTRALĂ	
Nr. volum	4670/08
Dulap	Lit.

Seriile Teze de doctorat ale UPT sunt:

- | | |
|------------------------|---|
| 1. Automatică | 7. Inginerie Electronică și Telecomunicații |
| 2. Chimie | 8. Inginerie Industrială |
| 3. Energetică | 9. Inginerie Mecanică |
| 4. Ingineria Chimică | 10. Știința Calculatoarelor |
| 5. Inginerie Civilă | 11. Știința și Ingineria Materialelor |
| 6. Inginerie Electrică | |

Universitatea „Politehnica” din 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 Politehnica – Timișoara, 2008

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 „Politehnica” din Timișoara. Toate încălcările acestor drepturi vor fi penalizate potrivit Legii române a drepturilor de autor.

România, 300159 Timișoara, Bd. Republicii 9,
tel. 0256 403823, fax. 0256 403221
e-mail: editura@edipol.upt.ro

Cuvânt înainte

Teza de doctorat a fost elaborată în cadrul catedrei de Mașini, Acționări și Utilizări Electrice.

Tema prezentei teze de doctorat constă în analiza poluării armonice a sistemelor electroenergetice de către mașinile electrice asincrone și sincrone.

Se analizează factorii importanți ce determină saturația magnetică la mașinile electrice.

Caracteristicile de magnetizare se apreciază prin polinoame sau drepte și astfel se pot calcula indicatorii fundamentali ai regimului deformant.

Cunoscând forma de variație în timp a curentului de la funcționarea în gol se poate determina gradul de saturație al mașinii.

Pentru diverse valori ale tensiunii de alimentare se calculează spectrul armonicilor la mașina asincronă și sincronă.

Se face remarcă că la mașina sincronă chiar la funcționarea în gol ponderea armonicilor în curent poate fi modificată prin alegerea potrivită a curentului de excitație.

În lucrare se fac o serie de încercări experimentale. Rezultatele experimentale obținute validează modelele matematice folosite în analiza saturației la mașinile electrice.

Cunoscând valorile armonicilor cele mai importante se pot lua măsuri de dimensionare a filtrelor pentru a reduce poluarea armonică a sistemului electroenergetic.

Prin grija profesorului Ioan Novac, conducătorul științific, teza a fost finalizată în condiții optime din punct de vedere al timpului și al nivelului științific și pentru aceasta autorul îi este recunoscător.

Întregului colectiv de la catedra de Mașini, Acționări și Utilizări Electrice, autorul le mulțumeste pentru ajutorul acordat în decursul anilor de pregătire a tezei de doctorat.

Timișoara, decembrie 2007

Marian Bobocea

Bobocea, Marian

Studiul poluării sistemelor electroenergetice de către mașinile electrice saturate de putere medie și mică

Teze de doctorat ale UPT, Seria 6, Nr. 7, Editura Politehnica, 2008, 172 pagini, 105 figuri, 3 tabele.

ISSN: 1842-7022

ISBN: 978-973-625-585-4

Cuvinte cheie:

mașină asincronă, armonici, caracteristică de magnetizare, compoziție armonică, mașină sincronă, caracteristică de magnetizare din axa d, caracteristică de magnetizare din axa q, caracteristică de magnetizare rezultantă, grad de saturație, aproximare polinomială, aproximare prin drepte, determinarea grad saturație, metode experimentale pentru calculul fluxului.

Rezumat:

Folosirea mașinilor electrice asincrone și sincrone, proiectate la limită din punct de vedere magnetic, devin saturate magnetic la orice depășire a valorii tensiunii de alimentare. În acest fel mașinile proiectate la 280/380V și puse să funcționeze la 230/400 V devin saturate magnetic și poluează armonic rețeaua de alimentare.

Se evaluează saturația magnetică și se determină armonicile superioare în curba curentului absorbit din rețea pe baza caracteristicilor de magnetizare deduse experimental și apoi evaluate în calcul prin aproximări polinomiale sau prin drepte. La baza rezultatelor obținute privind evaluarea saturației magnetice se calculează indicatorii regimului deformant (nivelul armonicilor, reziduu deformant, factori de distorsiune, putere deformantă).

Lucrarea cuprinde și măsurători experimentale la diverse grade de saturație pentru mașini asincrone și sincrone, obținându-se rezultate care confirmă modelele matematice folosite în estimarea saturației magnetice la aceste tipuri de mașini.

CUPRINS

1. INTRODUCERE	7
1.1. Regimul deformant la mașinile electrice saturate	9
1.1.1. Elemente teoretice. Definiții	10
1.1.2. Indicatori ai regimului deformant	12
1.2. Mașinile electrice funcționând în regim deformant	15
1.3. Conținutul lucrării	18
2. EVALUAREA SATURAȚIEI MAGNETICE	20
2.1. Saturația magnetică la mașina asincronă	20
2.1.1. Modelul matematic al MA saturate	20
2.1.2. Determinarea curbei de magnetizare $\Psi_m = f(I_m)$	21
2.1.3. Determinarea compoziției armonice a curentului de magnetizare	26
2.2. Saturația magnetică la mașina sincronă	32
2.2.1. Modelul matematic al MS saturate	32
2.2.2.1. Determinarea experimentală a curbelor de magnetizare	38
2.2.2. Determinarea armonicilor la MS	36
2.2.3. Determinarea numerică a armonicilor superioare la MS	46
2.3. Concluzii	52
3. DETERMINAREA ARMONICILOR LA MA ȘI MS	54
3.1. Mașina asincronă	54
3.1.1. Compoziția armonică la motorul asincron	55
3.1.2. Compoziția armonică a curentului la tensiune la borne variabilă și cuplu rezistent constant	55
3.1.3. Compoziția armonică a curentului la cuplu variabil și tensiune constantă	60
3.2. Mașina sincronă	62
3.2.1. Determinarea caracteristicii magnetice rezultante	64
3.2.2. Determinarea compoziției armonice prin optimizări polinomiale a caracteristicii magnetice rezultante	69
3.2.3. Determinarea compoziției armonice în regim de motor la MS	72
3.2.4. Compoziția armonică a curentului la tensiune la borne variabilă, cuplu rezistent și curent de excitație fiind constanți	73
3.2.5. Compoziția armonică a curentului la tensiune la borne constantă, cuplu rezistent constant și curent de excitație variabil	76
3.2.6. Compoziția armonică a curentului la tensiune la borne constantă, curent de excitație constant și cuplu variabil	82
3.3. Concluzii	85
4. LINEARIZAREA CARACTERISTICILOR DE MAGNETIZARE	86
4.1. Saturația la MA	87
4.2. Saturația la MS	99
4.2.1. Compoziția armonică la MS la curent de excitație nul	101
4.2.2. Compoziția armonică la MS la diverse valori ale curentului de excitație	110
4.3. Concluzii	117

5.	DETERMINAREA GRADULUI DE SATURAȚIE A MIEZULUI DIN COMPOZIȚIA ARMONICĂ A CURENTULUI	120
5.1.	Problema determinării saturației din curba curentului la MA la funcționare în gol	120
5.2.	Problema determinării saturației din curba curentului la MS la funcționare în gol	126
5.2.1.	Determinarea saturației la curent de excitație nul	129
5.2.2.	Determinarea saturației la diverse valori ale curentului de excitație	133
5.3.	Concluzii	137
6.	DETERMINĂRI EXPERIMENTALE ȘI FILTRE	139
6.1.	Determinarea curbei de magnetizare $\Psi_m = f(I_m)$ la MA	139
6.2.	Determinarea curbelor de magnetizare $\Psi_{md_1} = f_1(I_m)$ și $\Psi_{mq_1} = f_2(I_m)$ la MS	140
6.3.	Verificări experimentale la funcționarea în gol privind compoziția armonică a curentului de alimentare	142
6.4.	Verificări experimentale la MS la curent de excitație nul	146
6.5.	Verificări experimentale la MS la diverse valori ale curentului de excitație	150
6.6.	Înregistrări experimentale ale tensiunii	153
6.7.	Măsuri de filtrare pentru eliminarea armonicilor superioare	157
7.	CONCLUZII FINALE	161
7.1.	Concluzii	161
7.2.	Contribuții originale	162
7.3.	Perspective	163
	BIBLIOGRAFIE	164

1. INTRODUCERE

Tema prezentei teze de doctorat constă în analiza poluării armonice a sistemului electroenergetic de către mașinile electrice saturate.

Teoria clasică a mașinilor electrice are în vedere, în principal, regimul sinusoidal cu miezul magnetic nesaturat [A3, B14, B18, B22, C1, C2, D2, R2, S2, V1].

Pe baza acestei teorii s-au proiectat [D3], realizat și exploatat mașini electrice cu performanțe ridicate, avându-se în vedere o experiență în acest domeniu de peste o sută de ani.

Deoarece, însă, unele mașini electrice au fost dimensionate la limita solicitărilor magnetice a zonei nesaturate [J1], prin modificări ale tensiunii și frecvenței, valorile inducției magnetice în miez depășesc valoarea maximă a zonei liniare (trec peste „cotul” curbei de magnetizare) și astfel mașina devine saturată magnetic, injectând în rețea putere deformantă.

Se iau în considerare doar mașinile asincrone și sincrone deoarece mașinile de curent continuu, din cauza colectorului, se fabrică din ce în ce mai puțin [D3, K1].

Metodele de calcul a compoziției armonice la mașinile asincrone se pot folosi și la transformatoarele electrice, dat fiind faptul că la turația zero mașina asincronă și transformatorul electric au aceleași ecuații [N2, N3].

Actualitatea temei rezultă din numeroasele lucrări apărute în literatura de specialitate [A1, A2, A4, A5, B13, B15, B16, B22, B24, B25, D8, I1], lucrări care pun diferite aspecte legate de poluarea armonică generată de consumatorii neliniari care devin din ce în ce mai numeroși :

- mașinile electrice saturate;
- echipamente electrice cu electronică de putere (redresoare, invertoare);
- calculatoarele;
- consumatorii casnici (cuptoare cu microunde, radio – TV, roboți de bucătărie, iluminat cu tuburi).

Ca urmare a creșterii poluării armonice, în ultima perioadă de timp (după anul 2000) au apărut pe plan local și regional diverse normative care încearcă să micșoreze gradul de poluare [Normativ1, Normativ2, Normativ3, Normativ4, Normativ5, Normativ6].

Pentru a micșora nivelul armonicilor generate de mașinile electrice saturate este necesar, însă, a se putea evalua cât mai corect gradul de saturație magnetic la care funcționează mașina și eventual reducerea tensiunii de alimentare pentru a funcționa în zona nesaturată [G1].

În elaborarea lucrării s-au avut în vedere următoarele obiective:

- selectarea din literatură a modelului matematic al mașinii asincrone și sincrone saturate [B1, B6, B11, L3, L4, S4, T3] ;
- determinarea experimentală a inductanțelor de dispersie , -necesare în calculul fluxului util;
- determinarea experimentală a caracteristicilor de magnetizare a miezului, inclusiv în zona saturată;

- folosirea caracteristicilor de magnetizare în analiza funcționării MA și MS în regim saturat;
- determinarea compoziției armonice a curentului în diverse variante de calcul pentru caracteristicile de magnetizare;
- calcularea indicatorilor regimului deformant care apare ca urmare a funcționării în zona saturată a miezului magnetic;
- selectarea mărimilor ce influențează compoziția armonică a curentului ;
- estimarea gradului de saturație din analiza variației în timp a curentului statoric absorbit atât la MA cât și la MS ;
- prelucrarea armonică a curentului înregistrat experimental și determinarea pe această cale a gradului de saturație.

Cunoscându-se valoarea armonicilor superioare se pot lua măsuri de filtrare și în acest mod lucrarea fiind deosebit de utilă specialiștilor din domeniul electroenergetic.

În acest fel obiectivul lucrării este atât teoretic – cercetare fundamentală, cât și practic – soluții privind determinarea ordinului și mărimea armonicilor importante.

În literatura de specialitate se dau diverse normative sau limitări la indicatorii specifici regimului nesinusoidal Normativ[1,2,3,4,5,6]. Aceste limitări sunt în cazul general valabile și pentru mașinile electrice.

Puține sunt, însă, lucrările care abordează poluarea armonică a sistemului electroenergetic de către mașinile electrice saturate [B1, B8, B9, B10, B16, B21F1, O1, T1].

Este foarte important de a fi cunoscute mărimile ce influențează saturația magnetică(ca de exemplu: valoarea tensiunii de alimentare, a sarcinii, a curentului la excitație, în cazul mașinii sincrone, etc.) și a putea determina armonicile cele mai semnificative pentru a se filtra [C4, E1, I2, M2].

În general mașinile electrice au fost dimensionate la limita solicitărilor magnetice [D3] (în cotul curbei de magnetizare) la tensiunea 220/380V.

Prin trecerea la tensiunea 230 / 400 V (existentă în Uniunea Europeană), foarte multe mașini electrice funcționează în zona saturată [T4, V3] și poluează cu armonici sistemul energetic.

Determinarea compoziției armonice a curentului ce alimentează aceste mașini electrice este scopul acestei lucrări.

Se urmăresc ,în capitolele 3 și 4, factorii ce determină nivelul armonicilor superioare la diferite regimuri de funcționare a mașinilor electrice saturate.

Se determină gradul de saturație din compoziția armonică a curentului absorbit din rețea, putându-se astfel ca la o nouă rebobinare a mașinii să se reducă nivelul de saturație și deci a poluării cu armonici.

Problema tratată în prezenta teză de doctorat (saturația magnetică) este deosebit de utilă la proiectarea și exploatarea mașinilor electrice asincrone și sincrone.

Funcționarea în zona saturată duce la o poluare cu armonici a sistemului energetic și deci la o funcționare defectuoasă pentru unii din consumatorii electrici racordați la sistem .

Abordarea acestor aspecte prezintă o importanță teoretică și practică deosebită prin :

- faptul că se pot calcula ,armonicile superioare ce apar la o mașină electrică

saturată ;

- cunoașterea nivelului de saturație din spectrul armonicilor curentului absorbit din rețea.
- metodele de determinare experimentală a caracteristicilor magnetice ;
- metodele de calcul a armonicilor bazate pe determinările experimentale amintite mai înainte ;
- stabilirea expresiilor de calcul matematic pentru diversele metode de aproximare a caracteristicilor magnetice și realizarea unor modele matematice corespunzătoare.

1.1. Regimul deformant la mașinile electrice saturate

Componentele unui sistem electroenergetic (generatoare, motoare, transformatoare, diverse echipamente electrice ,etc) sunt concepute și realizate pentru a funcționa la tensiune sinusoidală de valoare și frecvență fixe (50 Hz sau 60 Hz).

Datorită surselor poluante (mașinile electrice saturate, echipamente electronice de putere puternic neliniare, transformatoare puternic saturate etc), în sistemul electroenergetic apar și se propagă unde periodice și neperiodice diferite de cele ale fundamentalei[B25, D8, G1].

După rangul armonicii definit ca raport între frecvența armonicii și cea fundamentală, curbele de curent sau tensiune generate de sursele poluante se grupează în:

- armonici, dacă rangul lor este un număr întreg;
- subarmonici, dacă rangul lor este subunitar;
- interarmonici, dacă rangul lor nu este un multiplu întreg al frecvenței fundamentalei.

Sursele poluante generează unde de frecvență în domeniul $1\div 10\text{KHz}$ [S1, T1, T2].

Principalele surse poluante sunt [N,5P3]:

- redresoare monofazate-armonici de rang par și impar;
- motoare electrice saturate-armonici de rang impar;
- televizoarele-armonici de rang par și impar;
- cuptoare cu arc electric-armonici de rang par și impar;
- locomotivele electrice-armonici impare.

Suprapunerea undelor de tensiune sau curent armonice peste cea a fundamentalei determină apariția unei unde rezultante nesinusoidale, deformată, deci funcționarea într-un regim deformant.

Creșterea nivelului de poluare cu armonici a sistemului electric impune adoptarea unor strategii antipoluante care să impună nivelul maxim admis pentru diverse armonici.

1.1.1. Elemente teoretice. Definiții.

O funcție periodică $f(t)$, nesinusoidală, pe intervalul unei perioade, se poate descompune în serie Fourier sub forma[A4,S5,]:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t)$$

sau

$$f(t) = c_0 + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(n\omega t + \alpha_n)$$

unde:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos n\omega t dt$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin n\omega t dt$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) dt$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad c_0 = \frac{a_0}{2}$$

$$\alpha_n = \arctg \frac{a_n}{b_n}$$

Amplitudinea armonicii de rang n , în complex este:

$$\underline{F}_n = b_n + ja_n = \frac{2j}{T} \int_0^T f(t) e^{-jn\omega t} dt = F_n e^{j\alpha_n}$$

În cazul funcțiilor pare:

$$f(t) = f\left(t + \frac{T}{2}\right)$$

se obține:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos n\omega t$$

iar în cazul funcțiilor impare:

$$f(t) = -f\left(t + \frac{T}{2}\right)$$

rezultă:

$$f(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin n\omega t$$

La un sistem trifazat simetric și echilibrat curenții se scriu sub forma:

-pentru faza A

$$i_1(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \alpha_n)$$

-pentru faza B

$$i_2(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \alpha_n - \frac{2\pi}{3}n)$$

-pentru faza C

$$i_3(t) = \sum_{n=1}^{\infty} I_n \sin(n\omega t + \alpha_n + \frac{2\pi}{3}n)$$

sau în complex:

$$\begin{aligned} \underline{I}_n^1 &= I_n e^{j\alpha_n} \\ \underline{I}_n^2 &= I_n e^{j(\alpha_n - \frac{2\pi}{3}n)} \\ \underline{I}_n^3 &= I_n e^{j(\alpha_n + \frac{2\pi}{3}n)} \end{aligned}$$

Curentul prin conductorul de nul este:

$$\underline{I} = \underline{I}_n^1 + \underline{I}_n^2 + \underline{I}_n^3 = \underline{I}_n e^{j\alpha_n} (1 + e^{-j\frac{2\pi}{3}n} + e^{j\frac{2\pi}{3}n})$$

și are valoarea:

-pentru $n = 3K$

$$(1 + e^{-j2\pi K} + e^{j2\pi K} = 1 + \cos 2\pi K - j \sin 2\pi K + \cos 2\pi K + j \sin 2\pi K = 3)$$

$$\underline{I} = 3 \underline{I}_n e^{j\alpha_n} = 3 \underline{I}_n^1$$

-pentru $n = 3K \pm 1$

$$(1 + e^{-j(2\pi K \pm \frac{2\pi}{3})} + e^{j(2\pi K \pm \frac{2\pi}{3})}) = 1 + 1(\cos \frac{2\pi}{3} \pm j \sin \frac{2\pi}{3}) + 1(\cos \frac{2\pi}{3} \pm j \sin \frac{2\pi}{3}) = 1 + 2 \cos \frac{2\pi}{3} = 1 - 1 = 0$$

$$\underline{I} = 0$$

Valoarea medie a funcției nesinusoidale de perioadă T este:

$$F_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{a_0}{2}$$

Valoarea efectivă se determină din relația:

$$F_{ef} = \sqrt{\sum_{n=0}^{\infty} F_{efn}^2}$$

În sistemele trifazate simetrice, echilibrate dar nesinusoidale raportul între tensiunea de linie și cea de fază (valori efective) nu mai este $\sqrt{3}$ așa cum era în cazul regimului sinusoidal și cum se va arăta în cele ce urmează.

Pentru tensiunile de fază se pot scrie relațiile:

$$u_1(t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin(n\omega t + \beta_n)$$

$$u_2(t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin(n\omega t + \beta_n - \frac{2\pi}{3}n)$$

$$u_3(t) = \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin(n\omega t + \beta_n + \frac{2\pi}{3}n)$$

Tensiunea de linie U_{1-2} rezultă din diferența:

$$\begin{aligned} U_{1-2} &= \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin(n\omega t + \beta_n) - \sum_{n=1}^{\infty} U_n \sin(n\omega t + \beta_n - \frac{2\pi}{3}n) = \\ &= 2 \sin \frac{\pi}{3} n \cos(n\omega t + \beta_n - \frac{\pi}{3}n) U_n \end{aligned}$$

deoarece: $\sin \alpha - \sin \beta = 2 \sin \frac{\alpha - \beta}{2} \cos \frac{\alpha + \beta}{2}$

Pentru $n = 3p$ rezultă: $\sin \frac{\pi}{3} 3p = \sin \pi p = 0$ și deci:

$$U_{1-2} = 0$$

și pentru $n = 3p \pm 1$ rezultă: $\sin \frac{\pi}{3} (3p \pm 1) = \sin(\pi p \pm \frac{\pi}{3}) = (-1)^p \frac{\sqrt{3}}{2}$ și $\cos[(3p \pm 1)\omega t + \beta_n - \pi p \pm \frac{\pi}{3}] = (-1)^p \cos[(3p \pm 1)\omega t + \beta_n \pm \frac{\pi}{3}]$ și deci:

$$U_{1-2} = \sqrt{3} U_n \cos[(3p \pm 1)\omega t + \beta_n \pm \frac{\pi}{3}]$$

Având în vedere cele de mai sus rezultă următoarele concluzii:

- 1) tensiunile între faze nu conțin armonici de rang $3p$;
- 2) tensiunile între faze conțin armonicile de rang $3p \pm 1$ și amplitudinea acestora este de $\sqrt{3}$ ori mai mare decât cea corespunzătoare tensiunii pe fază.

Valoarea efectivă a tensiunii de linie U_{1-2} se calculează prin însumare cu relația [A4]:

$$U_{ef1-2} = \sqrt{3} \sqrt{\sum_{p=0}^{\infty} U_{ef,3p\pm 1}^2}$$

și prin urmare raportul: tensiune de linie/tensiune de fază (valori efective), este:

$$\frac{U_{ef1-2}}{U_{ef1}} = \sqrt{3} \sqrt{\frac{\sum_{p=0}^{\infty} U_{ef,3p\pm 1}^2}{\sum_{n=1}^{\infty} U_{efn}^2}} < \sqrt{3}$$

și scade față de $\sqrt{3}$ cu cât crește numărul armonicilor conținute în unda tensiunii.

Reziduul deformant F_d se definește ca o diferență între valoarea efectivă a undei nesinusoidale și valoarea efectivă a fundamentalei, sub forma:

$$F_d = \sqrt{F_{ef}^2 - F_{ef1}^2}$$

Valoarea sa crește odată cu mărirea numărului de armonici.

1.1.2. Indicatori ai regimului deformant [A4].

Poluarea cu armonici a sistemului electric este sistematizată prin indicatorii ce definesc toate abaterile de la forma sinusoidală.

Principalii indicatori ai regimului deformant sunt:

- coeficientul de formă;
- coeficientul de vârf;
- coeficientul de distorsiune;
- nivelul armonicilor;
- coeficientul de deviație.

1) Coeficientul de formă K_f este definit ca raportul dintre valoarea efectivă și valoarea medie a undei nesinusoidale:

$$K_f = \frac{F_{ef}}{F_{med}}$$

Valoarea medie, pe o jumătate de perioadă, se determină prin integrala:

$$F_{med} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} \left[\frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \right] dt = \frac{a_0}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n}{n}$$

Rezultatul obținut este valabil numai pentru armonici impare ($n = 2p + 1$) deoarece pentru cele pare valoarea medie pe o semiperioadă este nulă. Deoarece în cazul funcțiilor impare valoarea efectivă se scrie sub forma:

$$F_{efn}^2 = \frac{b_n^2 + a_n^2}{2} = \frac{b_n^2}{2}$$

pentru coeficientul de formă se obține expresia:

$$K_f = \frac{\sqrt{\left(\frac{a_0}{2}\right)^2 + \sum_{n=1}^{\infty} F_{efn}^2}}{\frac{a_0}{2} + \frac{2}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n}{n}} = \frac{\sqrt{(a_0)^2 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} b_n^2}}{a_0 + \frac{4}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{b_n}{n}}$$

În cazul sistemului electric perfect sinusoidal $f(t) = \sqrt{2} U \sin \omega t = b_1 \sin \omega t$ coeficientul

de formă are valoarea cunoscută:

$$K_f = \frac{\sqrt{2} b_1}{\frac{4}{\pi} b_1} = \frac{\pi \sqrt{2}}{4} = 1,11$$

2) Coeficientul de vârf K_v este definit ca fiind raportul dintre valoarea maximă și cea efectivă:

$$K_v = \frac{F_{\max}}{F_{ef}}$$

La o undă sinusoidală $F_{ef} = \frac{F_{\max}}{\sqrt{2}}$ și coeficientul de vârf are cunoscuta valoare de $\sqrt{2}$. Deoarece coeficientul de vârf este determinat de valoarea maximă F_{\max} , el este deosebit de important în dimensionarea izolației la mașinile electrice.

Defazajul armonicilor (comparativ cu fundamentala) influențează hotărâtor valoarea lui K_v în sensul următor: armonica de ordinul trei dacă este în fază cu fundamentala, valoarea maximă este:

$$F_{\max} = b_1 + b_3$$

unde: b_1 -amplitudinea fundamentalei; b_3 -amplitudinea armonicii de ordinul trei, iar dacă este în opoziție de fază valoarea minimă este:

$$F_{\max} = b_1 - b_3$$

(observația aparține autorului și este semnificativă: arată insuficiențele ce sunt în definiția coeficientului de vârf).

3) Coeficientul de distorsiune K_d ține seama de efectele termice și este definit ca raportul dintre reziduul deformant F_d și valoarea efectivă a unei nesinusoidale:

$$K_d = \frac{F_d}{F_{ef}}$$

Defazajul armonicilor componente în raport cu fundamentala nu influențează valoarea lui K_d deoarece două curbe cu aceeași compoziție armonică au aceleași valori

pentru F_d și F_{ef} , având aceleași valori efective. (autorul consideră aceasta ca fiind un fapt negativ).

4) Nivelul armonicilor se exprimă prin raportul dintre valoarea efectivă a armonicii de rang n , F_{efn} și cea a fundamentalei, F_{ef1} :

$$\gamma_n = \frac{F_{efn}}{F_{ef1}}$$

Acest nivel al armonicilor γ_n este impus în diverse țări alături de coeficientul de distorsiune K_d și trebuie să fie sub valorile date mai jos [Normativ3,5,6]:

$$\gamma_n < 0,03;$$

$$K_d < 0,05$$

Propagarea armonicilor de curent I_n în rețeaua electrică depinde de impedanța echivalentă Z_n : $U_n = Z_n I_n$ și este în funcție de nivelul de tensiune al liniei.

5) Coeficientul de deviație se definește prin relația:

$$K_{dev} = \frac{1}{F_{ef1}} \sum_{n=2}^{\infty} F_{efn}$$

și depinde numai de valorile efective ale armonicilor.

Normele [Normativ2,3,4] CEI (Comitetul Electrotehnic Internațional 34-1) impun

la mașinile electrice indicatorul global privind regimul deformant:

$$\frac{100}{\sqrt{2} U_{ef}} \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left(\frac{U_n}{n}\right)^2} \leq 3,5$$

PUTERILE într-un sistem electric poluat armonhic

Definirea puterilor în regim deformant este o problemă ce încă mai suferă modificări și interpretări [A1, B23, B24].

Academicianul C. Budeanu [B23, B24], a sugerat separarea puterii aparente $S = U_{ef} I_{ef}$ în trei componente:

P -puterea activă;

Q -puterea reactivă;

D -puterea deformantă;

cu legătura:

$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2$$

Puterea activă este definită ca fiind valoarea medie pe o perioadă a puterii instantanee:

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt = \frac{1}{T} \int_0^T [U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} U_{efn} \sin(n\omega t + \alpha_n)] [I_0 + \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{efn} \sin(n\omega t + \beta_n)] dt \\ &= U_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_{efn} I_{efn} \cos \varphi_n = U_0 I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} P_n \end{aligned}$$

Puterea reactivă într-un circuit monofazat poluat armonhic este definită ca sumă a puterilor reactive sub forma:

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} U_{efn} I_{efn} \sin \varphi_n = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n$$

și a avut la bază definiția puterii reactive în regim sinusoidal:

$$Q = U_{ef} I_{ef} \sin \varphi$$

Puterea aparentă definită ca fiind:

$$\begin{aligned} S^2 &= \sum_{n=0}^{\infty} U_{efn}^2 \sum_{n=0}^{\infty} I_{efn}^2 = \sum_{n=0}^{\infty} U_{efn}^2 \sum_{n=0}^{\infty} (I_{efn}^2 \cos^2 \varphi_n + I_{efn}^2 \sin^2 \varphi_n) = \\ &= \left(\sum_{n=0}^{\infty} U_{efn} I_{efn} \cos \varphi_n \right)^2 + \left(\sum_{n=1}^{\infty} U_{efn} I_{efn} \sin \varphi_n \right)^2 + \\ &+ \sum_{K \neq J=1, K \neq J}^{\infty} (U_{efK}^2 I_{efJ}^2 + U_{efJ}^2 I_{efK}^2 - 2U_{efK} U_{efJ} \cos \varphi_{KJ}) \end{aligned}$$

se poate descompune în trei componente: P , Q , și D .

Puterea deformantă D va avea, deci, expresia:

$$D^2 = \sum_{K \neq J=1, K \neq J}^{\infty} (U_{efK}^2 I_{efJ}^2 + U_{efJ}^2 I_{efK}^2 - 2U_{efK} U_{efJ} \cos \varphi_{KJ})$$

În cazul mașinilor electrice cu tensiunea la borne sinusoidală de valoare efectivă:

U_{ef} , puterea deformantă este:

$$D = U_{ef} I_d$$

unde I_d este valoarea efectivă a rezidului deformant.

La mașinile electrice unde tensiunea nu mai este sinusoidală puterea deformantă este dată de expresia:

$$D = U_{ef} I_d + U_d I_{ef}$$

unde U_d , I_d sunt valorile efective ale reziduurilor deformante pentru tensiune, respectiv curent;

U_{ef} , I_{ef} sunt valorile efective ale tensiunii, respectiv curentului.

Funcționarea mașinilor electrice în regim deformant presupune absorbția din rețeaua electrică a unor puteri active și reactive, pe fundamentală, mai mari decât cele efectiv necesare, diferența fiind restituită rețelei sub formă de putere deformantă.

Deci mașina electrică funcționând ca și motor puternic saturat devine un furnizor de putere deformantă care ajunge astfel și la alți consumatori care pot fi "curați,, din punct de vedere armonic.

Reziduul deformant al puterii active este suma puterilor active ale armonicilor componente:

$$P_d = \sum_{n=2}^{\infty} P_n$$

Reziduul deformant al puterii reactive este, la fel, suma puterilor reactive date de armonicile superioare:

$$Q_d = \sum_{n=2}^{\infty} Q_n$$

Se observă că factorul de putere definit ca fiind raportul:

$$K = \frac{P_{faz\bar{a}}}{S_{faz\bar{a}}} = \frac{P_{faz\bar{a}}}{\sqrt{P_{faz\bar{a}}^2 + Q_{faz\bar{a}}^2 + D_{faz\bar{a}}^2}}$$

nu mai poate fi dat prin " $\cos\varphi_n$ ", la mașinile electrice ce funcționează în regim deformant. La tensiuni sinusoidale și curenți nesinusoidali se obține: [A4]

$$K = \frac{P_{faz\bar{a}}}{S_{faz\bar{a}}} = \frac{U_{ef} I_{ef} \cos\varphi_1}{U_{ef} I_{ef}} = \sqrt{1 - K_{di}^2} \cos\varphi_1$$

unde K_{di} -coeficientul de distorsiune al curentului.

1.2. Mașinile electrice funcționând în regim deformant.

Miezul feromagnetic al mașinilor electrice este un element neliniar și conduce la un regim deformant cu atât mai pronunțat cu cât este mai saturat circuitul magnetic.

Fluxul magnetic total se descompune în două componente:

-fluxul util Ψ_u și

-fluxul de dispersie Ψ_σ .

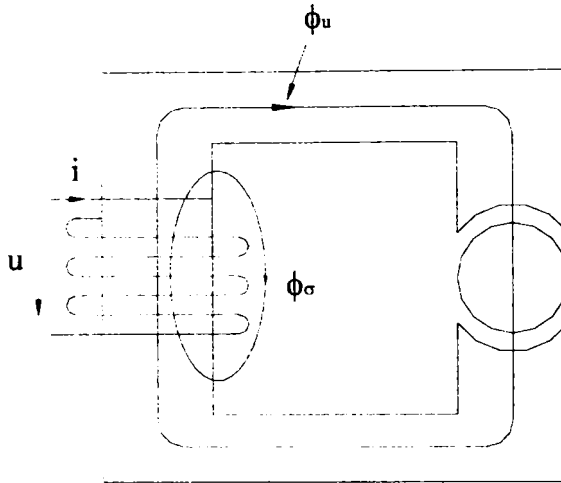


Fig1.1. Masina electrica saturata

Fluxul util depinde de gradul de saturație pe când cel de dispersie este independent de acesta și se poate scrie sub forma:

$$\Psi_\sigma = L_\sigma i$$

unde L_σ este inductivitatea de dispersie

Fluxul util fiind :

$$\Psi_u = BSN$$

unde B -inducția magnetică

S -suprafața miezului

N -numărul de spire

depinde de gradul de saturație prin valoarea inducției magnetice B .

Fluxul util este în legea inducției electromagnetice: $\oint \vec{E} d\vec{l} = -\frac{d\Psi_u}{dt}$, sub forma:

$$u = Ri + L_\sigma \frac{di}{dt} + \frac{d\Psi_u}{dt}$$

și se calculează din legea circuitului magnetic: $\oint \vec{H} d\vec{l} = Ni$, sau:

$$\sum_{K=1}^n H_K l_K = Ni$$

Dependența dintre inducția magnetică B și câmpul magnetic H este neliniară în zona saturată (figura 1.2) și aproximativ liniară în zona nesaturată.

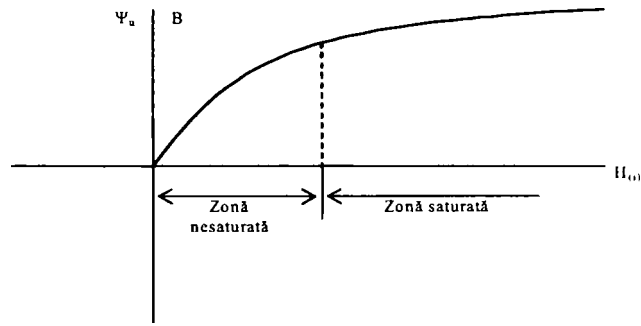


Fig.1.2. Dependenta dintre inducția magnetică și câmpul magnetic
Circuitul magnetic saturat se poate descompune în două părți:

- o parte nesaturată cu o înfășurare de rezistență R și inductivitate L_σ și
- o parte saturată numai cu flux util Ψ_u .

În acest sens legea inducției se pune sub forma:

$$u = \frac{d\Psi_u}{dt} + Ri + L_\sigma \frac{di}{dt}$$

circuit circuit
neliniar liniar

Presupunând o tensiune la borne sinusoidală și cum pe circuitul liniar tensiunea este tot sinusoidală rezultă că și pe circuitul neliniar va fi o tensiune sinusoidală și deci

$$\frac{d\Psi_u}{dt} = A \sin \omega t$$

Aceasta impune o variație sinusoidală a fluxului util Ψ_u (figura 1.3).

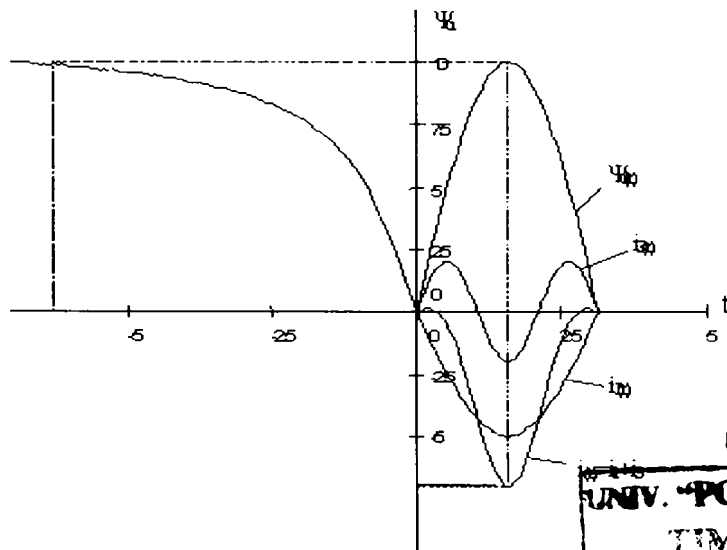


Fig.1.3. Apariția armonicilor de curent

Analiza curbei de curent din figura 1.3 pune în evidență armonica de ordinul 3 și

cu o pondere mai redusă armonică de ordinul 5:

$$i(t) = I_1 \sin \omega t - I_3 \sin 3\omega t + I_5 \sin 5\omega t$$

Mașina sincronă în regim de generator este o sursă cu tensiunea sinusoidală și deci schema electrică pentru fundamentală conține tensiunea electromotoare indusă U_{ef} înseriată cu rezistența și reactanța sincronă.

Pentru armonicile superioare tensiunea electromotoare indusă este zero și schema electrică conține numai rezistențe și reactanțe.

1.3. Conținutul lucrării

Lucrarea este structurată pe 7 capitole și bibliografia consultată de autor.

În capitolul 2 folosind modelul ortogonal al mașinii asincrone [B6] și pe cel al mașinii sincrone [B1] se determină caracteristicile magnetice : $\Psi_{m(I_a)}$ flux – curent de magnetizare .

Pentru determinarea caracteristicii de magnetizare la MA se efectuează probe de funcționare în gol la diverse valori ale tensiunii de alimentare.

Pentru determinarea fluxului util din fluxul total se impune cunoașterea inductanței de dispersie statorice . Aceasta se determină dintr-o probă specială, cu fazele statorice înseriate.

La MS, datorită nesimetriei, se impun cunoașterea a două caracteristici de magnetizare $-\Psi_{md(I_a)}$ - după axa longitudinală și $\Psi_{mq(I_a)}$ - după axa transversală. Aceasta impune cunoașterea inductanțelor de dispersie după cele două axe . În lucrare se dau metodele de determinare a acestor inductanțe.

În capitolul 3 se determină compoziția armonică a curentului de magnetizare la diverse tensiuni și încărcări (cuplu).

La MS se indică în plus față de MA o metodă originală de determinare a caracteristicii de magnetizare rezultante : $\Psi_{m(I_a)}$.

Se analizează cum sunt influențate valorile nivelurilor armonicilor de către curentul de excitație .

Capitolul 4 este consacrat analizei saturației magnetice prin liniarizare, în zona saturată, a caracteristicilor de magnetizare : $\Psi_{m(I_a)}$ - la MA, $\Psi_{md(I_a)}$ și $\Psi_{mq(I_a)}$ - la MS.

Printr-un calcul analitic se evaluează valorile amplitudinilor armonicilor 3 – 15 și pe baza lor se calculează indicatorii regimului deformant la diverse tensiuni, comparându-se cu normele impuse.

La MS se studiază în plus influența curentului de excitație asupra indicatorilor regimului deformant. Prin creșterea valorii tensiunii de alimentare în general, cresc și amplitudinile armonicilor superioare, cu precizarea că , de exemplu, la armonicile 7 și 11 amplitudinile sunt mai mici la $U = 236$ [V], față de varianta cu $U = 214$ [V].

În capitolul 5 se determină gradul de saturație a miezului din compoziția armonică a curentului. Cunoscându-se variația în timp a curentului absorbit , la funcționarea în gol, se poate determina zona de funcționare : saturată sau nesaturată.

Capitolul 6 este consacrat determinărilor experimentale. Se deduc: inductanțele de dispersie, caracteristicile de magnetizare și se compară variația în timp a

curenților, înregistrată cu cea calculată, validându-se astfel modelul matematic propus și utilizat de autor.

Caracteristicile de magnetizare: $\Psi_{m(I_m)}$ - la MA și $\Psi_{md(I_m)}$, $\Psi_{mq(I_m)}$ -la MS se determină prin înregistrarea stingerilor de tensiune de la bornele înfășurărilor.

Capitolul 7 conține concluziile generale și contribuțiile originale ale autorului.

Bibliografia analizată de autor încheie prezenta teză de doctorat.

Obiectivele lucrării sunt atinse prin determinarea gradului de poluare a sistemelor electroenergetice de către mașinile electrice saturate.

Calculul ponderii armonicilor superioare este absolut necesar în vederea evaluării nivelului de poluare electroenergetică.

2. EVALUAREA SATURAȚIEI MAGNETICE

Ecuțiile modelului ortogonal atât la MA cât și la MS sunt scrise pe bază de fluxuri [C5,C6]. Fluxul total fiind suma fluxului util și a celui de dispersie, pentru determinarea caracteristicii de magnetizare $\Psi_m(I_m)$ se impun a fi calculate inductanțele de dispersie statorice.

Se dă în acest capitol o metodă originală de calcul a inductanței statorice la MA, prin conectarea potrivită a fazelor.

Pe baza caracteristicii de magnetizare $\Psi_m(I_m)$ se determină compoziția armonică a curentului de magnetizare.

La MS sunt necesare două curbe de magnetizare, după cele două axe $-\Psi_{md}(I_m)$ după axa longitudinală și $\Psi_{mq}(I_m)$ -după axa transversală. Ca și la MA, pentru determinarea fluxurilor utile Ψ_{md} și Ψ_{mq} din fluxurile totale Ψ_d și Ψ_q , sunt necesare calcularea inductanțelor de dispersie statorice după cele două axe. În acest sens se prezintă două metode de calcul a inductanțelor de dispersie: din datele experimentale sau pe baza datelor de catalog.

În finalul capitolului se dau tabelele celor două curbe de magnetizare după cele două axe.

Evaluarea saturației magnetice la mașinile electrice impune cunoașterea dependenței neliniare a fluxului magnetic de curentul de magnetizare.

2.1. Saturația magnetică la mașina asincronă

Mașina asincronă fiind o mașină simetrică este suficientă cunoașterea unei singure caracteristici de magnetizare, care este aceeași indiferent de poziția rotorului.

2.1.1. Modelul matematic al MA saturate

Modelul matematic are la bază modelul ortogonal[H1]. Având în vedere variația inductanțelor cu gradul de saturație, modelul matematic conține ecuațiile pe bază de fluxuri așa cum se poate vedea în continuare[L8,M1]

Regimul staționar la MA

În regimul staționar cu notațiile următoare:

$$s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}$$

$$\omega_1 = 2\pi f$$

ω -viteza unghiulară rotorică

sistemul devine.:

$$U = R_1 I_d - \omega_1 (\Psi_{mq} + L_{1\sigma} I_q)$$

$$0 = R_1 I_q + \omega_1 (\Psi_{md} + L_{1\sigma} I_d)$$

$$0 = R_2 I_{dr} - s\omega_1 (\Psi_{mq} + L_{2\sigma} I_{qr})$$

$$0 = R_2 I_{qr} + s\omega_1 (\Psi_{md} + L_{2\sigma} I_{dr})$$

$$\Psi_m = f(I_m) - \text{tabelar}$$

$$\Psi_m = \sqrt{\Psi_{md}^2 + \Psi_{mq}^2}$$

$$\Psi_{md} = \frac{\Psi_m}{I_m} I_{md}$$

$$\Psi_{mq} = \frac{\Psi_m}{I_m} I_{mq}$$

$$M_{elmag} = p_1 (I_q \Psi_{md} - I_d \Psi_{mq}) - \text{ecuația cuplului}$$

În scriere complexă ecuațiile sunt[V1]:

$$\underline{U}_s = R_1 \underline{I}_s + j\omega_1 \underline{\Psi}_s$$

$$0 = R_2 \underline{I}_r + j\omega_1 s \underline{\Psi}_r$$

cu:

$$\underline{U}_s = U_d + jU_q$$

$$\underline{I}_s = I_d + jI_q$$

$$\underline{I}_r = I_{dr} + jI_{qr}$$

$$\underline{\Psi}_s = \Psi_d + j\Psi_q = \underline{\Psi}_m + L_{1\sigma} \underline{I}_s$$

$$\underline{\Psi}_r = \Psi_{dr} + j\Psi_{qr} = \underline{\Psi}_m + L_{2\sigma} \underline{I}_r$$

$$\underline{\Psi}_m = \Psi_{md} + j\Psi_{mq}$$

$$\Psi_{md} = \frac{\Psi_m}{I_m} I_{md}$$

$$\Psi_{mq} = \frac{\Psi_m}{I_m} I_{mq}$$

Curba de magnetizare $\Psi_m = f(I_m)$ se cunoaște tabelar din încercări experimentale.

2.1.2. Determinarea curbei de magnetizare $\Psi_m = f(I_m)$

Determinarea curbei de magnetizare la MA se face având în vedere funcționarea în gol a mașinii la diverse tensiuni de alimentare, astfel ca să se obțină atât zona nesaturată cât și zona saturată.

Mașina asincronă (MA) funcționează în gol idea[L6] (este antrenată de un motor sincron cu același număr de perechi de poli ca și ai mașinii asincrone) așa ca în figură:

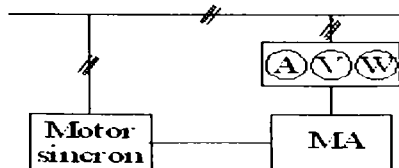


Fig. 2.1. MA funcționând în gol ideal

Deoarece $s = 0$, $I_r = 0$, $I_s = I_0$, rezultă:

$$\underline{U}_s = R_1 \underline{I}_0 + j\omega \underline{\Psi}_s$$

obținându-se următoarea diagramă fazorială:

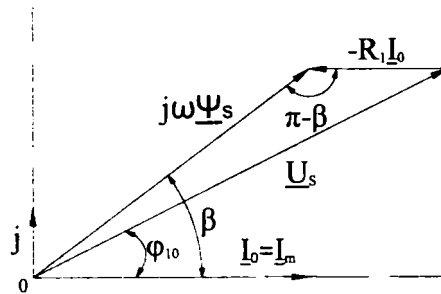


Fig.2.2. Funcționarea în gol

Defazajul φ_{10} se calculează din puterea activă P_0 măsurată cu wattmetrul:

$$\cos\varphi_{10} = \frac{P_0}{3U I_0}$$

și astfel fazorul tensiunii \underline{U}_s se poate reprezenta în planul complex. În triunghiul astfel obținut, aplicând teorema lui Pitagora generalizată, rezultă:

$$(\omega\Psi_s)^2 = U_s^2 + (R_1 I_0)^2 - 2U_s R_1 I_0 \cos\varphi_{10}$$

și deci fluxul statoric Ψ_s este dat de relația:

$$\Psi_s = \frac{1}{\omega} \sqrt{U_s^2 + (R_1 I_0)^2 - 2U_s R_1 I_0 \cos\varphi_{10}}$$

Pentru diverse valori ale tensiunii la borne U_s , se poate ridica curba $\Psi_s = f(I_m)$:

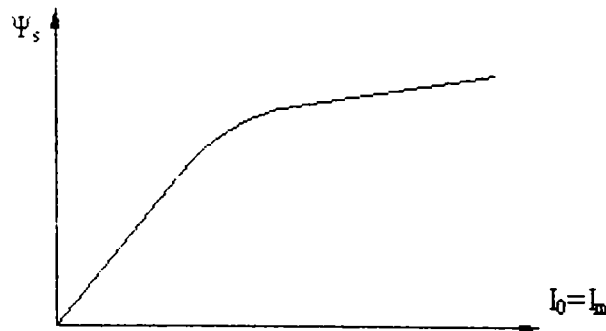


Fig. 2.3. Dependența fluxului statoric de curentul de magnetizare

Fluxul statoric Ψ_s fiind suma dintre fluxul util Ψ_m și cel de dispersie:

$$\underline{\Psi}_s = \underline{\Psi}_m + L_{1\sigma} \underline{I}_s = \underline{\Psi}_m + L_{1\sigma} \underline{I}_m$$

pentru determinarea lui Ψ_m se impune cunoașterea inductanței de dispersie statorice $L_{1\sigma}$.

Determinarea inductanței $L_{1\sigma}$ se poate face folosind o alimentare în serie a fazelor

statorice așa ca în figura 2.4 :

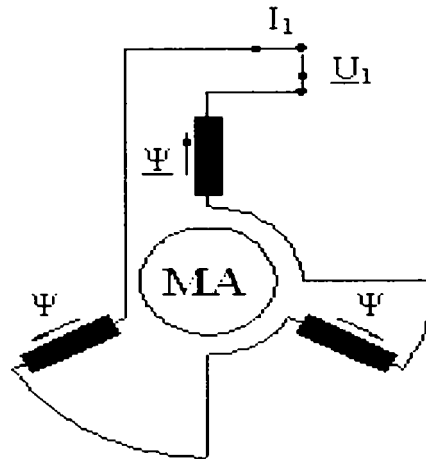


Fig.2.4. Determinarea inductanței statorice de dispersie

Suma fluxurilor utile din cele trei faze statorice este nulă deoarece ele sunt egale și decalate la un unghi de 120° în spațiu.

Din tensiunea la borne \underline{U}_1 :

$$\underline{U}_1 = \underline{I}_1(3R_1 + 3j\omega L_{1\sigma})$$

se obține valoarea inductanței de dispersie $L_{1\sigma}$:

$$L_{1\sigma} = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U_1}{3I_1}\right)^2 - R_1^2}$$

Cunoscând inductanța $L_{1\sigma}$ fluxul util Ψ_m se obține pe baza relației:

$$\underline{\Psi}_m = \underline{\Psi}_s - L_{1\sigma} \underline{I}_m$$

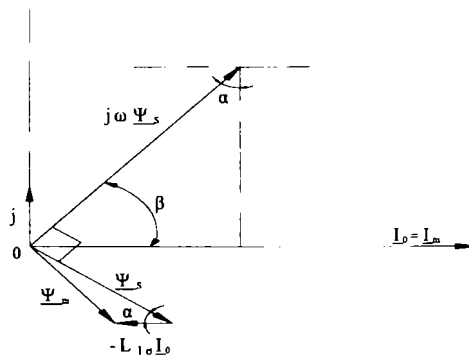


Fig.2.5. Determinarea fluxului util ψ_m

În cele de mai sus determinarea lui ψ_m presupune construirea unor diagrame fazoriale pentru fiecare tensiune la borne.

Aceste construcții grafice pot introduce erori și din acest motiv se preferă un calcul analitic așa cum este dat în continuare.

Din triunghiul fluxurilor (figura 2.5) se poate scrie:

$$\psi_m^2 = \sqrt{\psi_s^2 + (L_{1\sigma}I_0)^2 - 2\psi_s L_{1\sigma}I_0 \cos\alpha}$$

și deoarece:

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \beta$$

$$\cos\alpha = \sin\beta$$

rezultă:

$$\psi_m^2 = \sqrt{\psi_s^2 + (L_{1\sigma}I_0)^2 - 2\psi_s L_{1\sigma}I_0 \sin\beta}$$

Unghiul β se determină din figura 2.5 folosind triunghiul tensiunilor și teorema lui Pitagora generalizată:

$$U_s^2 = (\omega\psi_s)^2 + (R_1I_0)^2 + 2\omega\psi_s R_1I_0 \cos\beta$$

sau:

$$\cos\beta = \frac{1}{2\omega\psi_s R_1I_0} [U_s^2 - (\omega\psi_s)^2 - (R_1I_0)^2]$$

și deci se cunoaște $\sin\beta$:

$$\sin\beta = \sqrt{1 - \cos^2\beta}$$

În acest mod, pentru diverse tensiuni la borne se determină analitic dependența fluxului ψ_m de curentul de magnetizare I_m , pe baza probelor de laborator, la funcționarea în gol ideal a mașinii asincrone.

Prin urmare, la tensiune la borne dată se poate calcula fluxul util din mașină la funcționarea în gol. Modificând valoarea tensiunii de la borne se poate ridica curba de magnetizare $\Psi_m(I_m)$ pe zona nesaturată și saturată (figura 2.6):

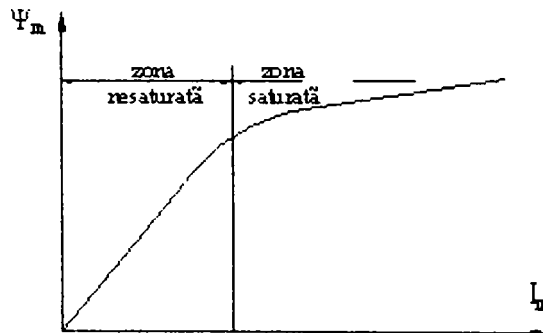


Fig.2.6. Curba de magnetizare

Curentul de magnetizare I_m este definit prin componentele sale I_{md} și I_{mq} :

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_{mq}^2, \text{ unde:}$$

$I_{md} = I_d + I_{dr}$ -curentul de magnetizare corespunzător fluxului util ψ_{md}

$I_{mq} = I_q + I_{qr}$ -curentul de magnetizare corespunzător fluxului util ψ_{mq}

$$I_m = I_{md} + jI_{mq}$$

$$I_m = I_s + I_r$$

I_d -curentul statoric din axa d;

I_q -curentul statoric din axa q;

I_{dr} -curentul rotoric din axa d;

I_{qr} -curentul rotoric din axa q;

$\Psi_d = \Psi_{md} + L_{1\sigma} I_d$ -fluxul statoric din înfașurarea din axa d;

$\Psi_q = \Psi_{mq} + L_{1\sigma} I_q$ -fluxul statoric din înfașurarea din axa q;

$\Psi_m^2 = \Psi_{md}^2 + \Psi_{mq}^2$ -fluxul util: Ψ_m ;

Observație:

Inductanțele de dispersie $L_{1\sigma}$ și $L_{2\sigma}$ sunt puțin influențate de gradul de saturație al mașinii și din acest motiv se consideră constante. Inductanța de dispersie rotorică $L_{2\sigma}$ se poate calcula din L_2 (inductanța rotorică principală) [B6] și M (inductanța mutuală) cu relația :

$$L_{2\sigma} = L_2 - M$$

Eliminând curentul rotoric I_r rezultă:

$$\underline{U}_s = R_1 \underline{I}_s + j\omega(\Psi_m + L_{1\sigma} \underline{I}_s)$$

$$0 = R_2(\underline{I}_m - \underline{I}_s) + j\omega s[\underline{\Psi}_m + L_{2\sigma}(\underline{I}_m - \underline{I}_s)]$$

funcția $\Psi_m = f(I_m)$ se deduce experimental:

$$M_{elmag} = p_1 I_{mag} [\underline{I}_s \underline{\Psi}_m^*]$$

sau după cele două axe:

$$U = R_1 I_d - \omega \Psi_{mq} - \omega L_{1\sigma} I_q$$

$$0 = R_1 I_q + \omega \Psi_{md} + \omega L_{1\sigma} I_d$$

$$0 = R_2(I_{md} - I_d) - s\omega[\Psi_{mq} + L_{2\sigma}(I_{mq} - I_q)]$$

$$0 = R_2(I_{mq} - I_q) - s\omega[\Psi_{md} + L_{2\sigma}(I_{md} - I_d)]$$

$$\Psi_m = f(I_m) - \text{tabelar}$$

$$\Psi_m = \sqrt{\Psi_{md}^2 + \Psi_{mq}^2}$$

$$\Psi_{md} = \frac{\Psi_m}{I_m} I_{md}$$

$$\Psi_{mq} = \frac{\Psi_m}{I_m} I_{mq}$$

$$M_{elmag} = p_1 (I_q \Psi_{md} - I_d \Psi_{mq}) - \text{ecuația cuplului}$$

Fiind dat punctul de funcționare P de pe curba de magnetizare $\Psi_m(I_m)$ -ridicată experimental- se cunosc valorile curentului de magnetizare I_m și a fluxului util.

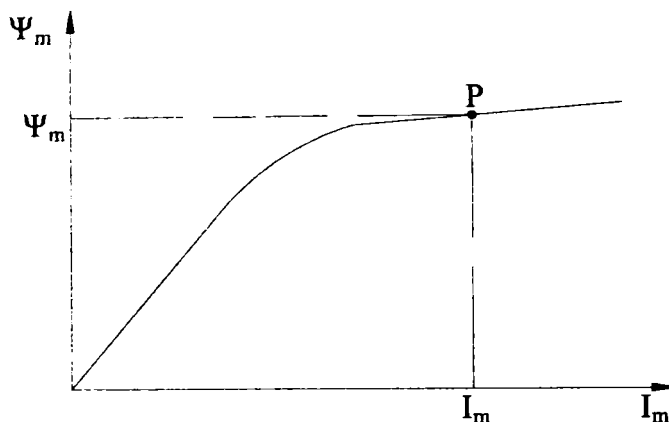


Fig.2.7. Curba de magnetizare

La o alunecare „s” cunoscută (turația fiind impusă) prin rezolvarea sistemului de 8 ecuații de mai sus se obțin necunoscutele :

$U, I_d, I_q, I_{md}, I_{mq}, \Psi_{md}, \Psi_{mq}$ și M_{elmag} .

Tabelar, curba de magnetizare este dată mai jos

MAȘINA ASINCRONĂ are datele

$$P_N = 3[kW]; U_N = 220[V]; I_N = 5[A]; n_N = 2970[rpm]$$

Tabelul 2.1. Curba de magnetizare $\Psi_m(I_m)$ la MA

Curba de magnetizare $\psi_m = f(I_m)$

$I_m [A]$	$\psi_m [Wb]$	$I_m [A]$	$\psi_m [Wb]$	$I_m [A]$	$\psi_m [Wb]$
.1732050808	0.03489088159	4.676537182	.8493175123	9.179869282	1.161499084
.3464101616	0.06978176317	4.849742262	.8722720397	9.353074363	1.16608999
.5196152424	.1046726448	5.022947343	.895226567	9.526279444	1.170680895
.6928203232	.1395635263	5.196152424	.9181810944	9.699484525	1.175271801
.866025404	.1744544079	5.369357505	.9319538108	9.872689606	1.178026344
1.039230485	.2093452895	5.542562589	.9594992436	10.04589469	1.181239978
1.212435566	.2442361711	5.715767666	.9640901491	10.21909977	1.183994521
1.385640646	.2791270527	5.888972747	.9778628655	10.39230485	1.186749065
1.558845727	.3186088398	6.062177828	.9962264874	10.56550993	1.189503608
1.732050808	.3534997213	6.235382909	1.009999204	10.73871501	1.192258151
1.905255889	.3883906029	6.40858799	1.019181015	10.91192009	1.195471785
2.07846097	.4232814845	6.58179307	1.032953731	10.99852263	1.198226328
2.25166605	.4581723661	6.754998151	1.046726448	11.08512517	1.201439962
2.424871131	.4930632477	6.928203232	1.055908259	11.25833025	1.204194505
2.598076212	.5279541293	7.101408313	1.06509007	11.43153533	1.207408139
2.771281293	.5628450109	7.274613394	1.07427188	11.60474041	1.210162682
2.944486374	.5784540895	7.447818474	1.083453691	11.77794549	1.213376316
3.117691454	.6059995223	7.621023555	1.092635502	11.95115058	1.21613086
3.290896535	.6427267661	7.794228636	1.101817313	12.12435566	1.219344493
3.464101616	.6886358208	7.967433717	1.11099124	12.29756074	1.222558127
3.637306697	.7115903482	8.140638798	1.120180935	12.47076582	1.229444485
3.810511778	.7345448755	8.313843878	1.129362746	12.6439709	1.230821757
3.983716858	.7574994029	8.487048959	1.138544557	12.81717598	1.234494481
4.156921939	.7804539302	8.66025404	1.147726368	12.99038106	1.235871753
4.33012702	.8034084576	8.833459121	1.152317273	13.16358614	1.237708115
4.503332101	.826362985	9.006664202	1.156908179	13.33679122	1.244594473

2.1.3. Determinarea compoziției armonice a curentului de magnetizare

La neglijarea rezistențelor statorice ($R_1 \rightarrow 0$) și a dispersiilor ($L_{1\sigma} \rightarrow 0, L_{2\sigma} \rightarrow 0$) se obține sistemul simplificat :

$$U = -\omega\Psi_{mq}$$

$$0 = \Psi_{md} \text{ (ceea ce impune } \Psi_{mq} \text{ și } I_{md} = 0)$$

$$0 = R_2(I_{md} - I_d) - s\omega\Psi_{mq}$$

$$0 = R_2(I_{mq} - I_q) + s\omega\Psi_{mq}$$

$$\Psi_m = \Psi_{mq} = f(I_m)$$

$$M_{elmag} = -p_1 I_d \Psi_{mq}$$

sau

$$U = -\omega\Psi_m$$

$$I_d = -\frac{s\omega\Psi_m}{R_2}$$

$$I_m = I_{mq} = I_q$$

$$I_q = I_m$$

$$\Psi_{mq} = \Psi_m$$

$$\text{Funcția : } \Psi_m = f(I_m)$$

$$M_{elmag} = -p_1 I_d \Psi_{mq}$$

La tensiunea de alimentare sinusoidală U rezultă un flux ψ_m sinusoidal și deci I_m va conține o sumă de armonici așa cum rezultă din figura 2.8. (care dă variația $I_m(t)$):

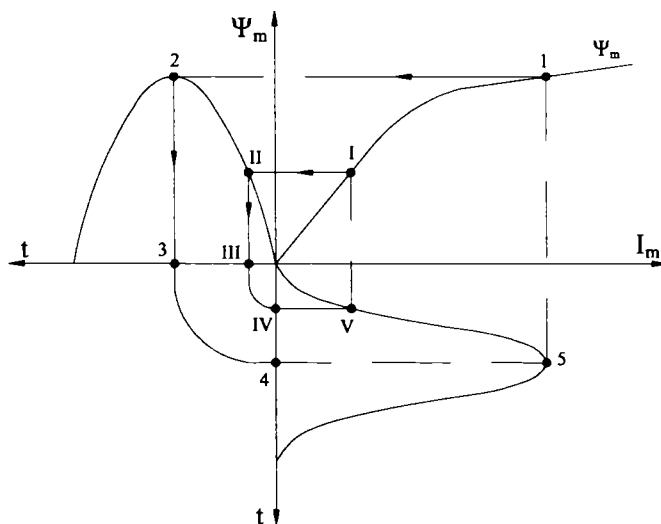


Fig.2.8. Dependenta $I_m(t)$

Rezolvarea sistemului se poate face în două moduri:

a) pornind de la fixarea punctului de pe caracteristica de magnetizare (ca și în cazul anterior) și deci ψ_m și I_m sunt dați.

Rezultă tensiunea $U = -\omega\psi_m$ și curentul:

$$I_d = -\frac{s\omega\Psi_m}{R_2}$$

Cu I_d și ψ_{mq} astfel calculați se obține cuplul electromagnetic:

$$M_{elmag} = -p_1 I_d \psi_{mq}$$

b) Cunoscând tensiunea U rezultă fluxul $\psi_m = -\frac{U}{\omega}$ și din funcția $\psi_{m(I_m)}$ se obține I_m . Curentul I_d se calculează din:

$$I_d = -\frac{s\omega\psi_m}{R_2}$$

și I_q din $I_m = I_q$ și astfel cuplul electromagnetic: $M_{elmag} = -p_1 I_d \psi_m$.

La o tensiune U sinusoidală se obține, datorită saturației, un curent nesinusoidal având următoarea compoziție armonică:

-fundamentala-

$$I_s(1) = I_d + jI_q(1) \text{ sau } i_s(1) = \sqrt{I_d^2 + I_q^2(1)} \sqrt{2} \sin\left[\omega t + \arctg\left(\frac{I_q(1)}{I_d}\right)\right]$$

-armonicile-

$$I_s(K) = jI_q(K) \text{ sau } i_s(K) = \sqrt{2} I_q(K) \sin\left(K\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

Cunoscând tabelar funcția $I_m(t)$ de forma(figura.2.9):

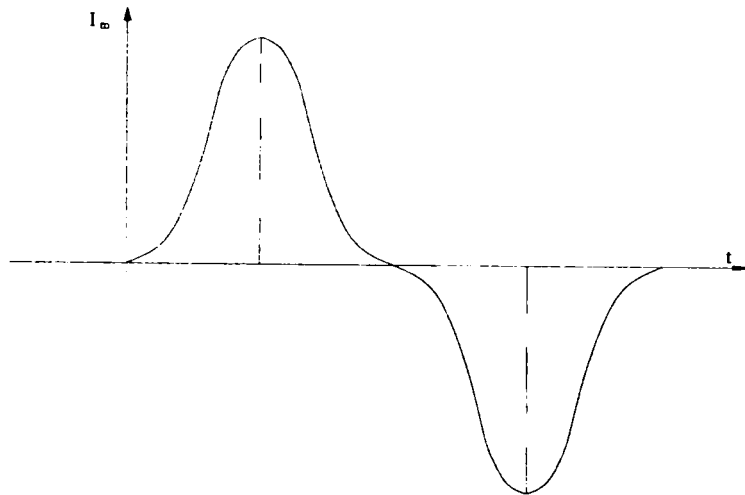


Fig.2.9. Variația în timp a curentului de magnetizare

se obține descompunerea în serie Fourier a funcției $I_m(t)$:

$$I_m(t) = I_m(1) + I_m(2) + I_m(3) + \dots$$

și apoi curentul statoric $i_s(t)$:

$$i_s(t) = i_s(1) + i_s(2) + i_s(3) + \dots$$

unde:

$$I_m(K) = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} I_m(t) \sin(K\omega t) dt$$

$$I_m(1) = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} I_m(t) \sin(\omega t) dt$$

$$I_m(1) = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} I_m(t) \sin(\omega t) dt$$

$$I_m(K) = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} I_m(t) \sin(K\omega t) dt$$

Funcția $I_m(t)$ fiind dată tabelar se impune o analiză Fourier discretă cu armonicile superioare ($K \geq 2$) calculate astfel:

$$i_m(t) = \sum_{K=2}^{\infty} I_m(K) \sin(K\omega t)$$

Funcția $I_m(\psi_m)$ se poate aproxima printr-o expresie polinomială de grad 11 de forma:

$$i_m(t) = a_1 \psi_m + a_3 \psi_m^3 + a_5 \psi_m^5 + a_7 \psi_m^7 + a_9 \psi_m^9 + a_{11} \psi_m^{11}$$

Deoarece tensiunea de alimentare are o variație sinusoidală, fluxul ψ_m se poate scrie astfel:

$$\psi_m(t) = A \sin(\omega t)$$

$$\text{unde } A = \frac{U}{\omega_1}$$

și expresia curentului $i_m(t)$ devine:

$$i_m(t) = a_1 A \sin(\omega t) + a_3 A^3 \sin^3(\omega t) + a_5 A^5 \sin^5(\omega t) + a_7 A^7 \sin^7(\omega t) + a_9 A^9 \sin^9(\omega t) + a_{11} A^{11} \sin^{11}(\omega t) = B_1 \sin(\omega t) + B_3 \sin(3\omega t) + B_5 \sin(5\omega t) + B_7 \sin(7\omega t) + B_9 \sin(9\omega t) + B_{11} \sin(11\omega t)$$

unde:

$$B_1 = a_1 A + \frac{3a_3 A^3}{4} + \frac{5a_5 A^5}{8} + \frac{35a_7 A^7}{64} + \frac{63a_9 A^9}{128} + \frac{231a_{11} A^{11}}{512}$$

$$B_3 = -\frac{a_3 A^3}{4} - \frac{5a_5 A^5}{16} - \frac{21a_7 A^7}{64} - \frac{21a_9 A^9}{64} - \frac{165a_{11} A^{11}}{512}$$

$$B_5 = \frac{5a_5 A^5}{16} + \frac{7a_7 A^7}{64} + \frac{9a_9 A^9}{64} + \frac{165a_{11} A^{11}}{1024}$$

$$B_7 = -\frac{a_7 A^7}{64} - \frac{9a_9 A^9}{256} - \frac{55a_{11} A^{11}}{1024}$$

$$B_9 = \frac{a_9 A^9}{256} + \frac{11a_{11} A^{11}}{1024}$$

$$B_{11} = -\frac{a_{11} A^{11}}{1024}$$

Deoarece funcția $i_m(t)$ este periodică și simetrică față de ordonata $t = \frac{T}{4}$ termenul liber B_0 și termenii în $\cos(K\omega t)$ sunt nuli și descompunerea în serie a lui $i_m(t)$ devine:

$$i_m(t) = \sum_{K=1}^n B_K \sin(K\omega t)$$

Determinarea coeficienților B_k ($K=1,3,5,7,9,11$)

Așa cum se observă din expresia coeficienților B_K se impune determinarea coeficienților $a_1, a_3, a_5, a_7, a_9, a_{11}$.

Coeficienții a_K se determină din curba experimentală $I_m(\psi_m)$ în felul următor:

-se aleg 6 puncte pe curba $I_m(\psi_m)$: $P_1, P_3, P_5, P_7, P_9, P_{11}$ și se formează un sistem algebric.

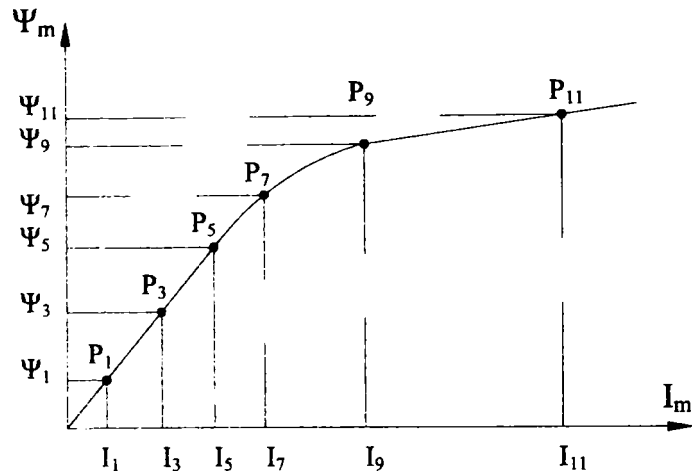


Fig.2.9.a. Curba de magnetizare la MA

-sistemul algebric:

$$I_1 = a_1\psi_1 + a_3\psi_1^3 + a_5\psi_1^5 + a_7\psi_1^7 + a_9\psi_1^9 + a_{11}\psi_1^{11}$$

$$I_3 = a_1\psi_3 + a_3\psi_3^3 + a_5\psi_3^5 + a_7\psi_3^7 + a_9\psi_3^9 + a_{11}\psi_3^{11}$$

$$I_5 = a_1\psi_5 + a_3\psi_5^3 + a_5\psi_5^5 + a_7\psi_5^7 + a_9\psi_5^9 + a_{11}\psi_5^{11}$$

$$I_7 = a_1\psi_7 + a_3\psi_7^3 + a_5\psi_7^5 + a_7\psi_7^7 + a_9\psi_7^9 + a_{11}\psi_7^{11}$$

$$I_9 = a_1\psi_9 + a_3\psi_9^3 + a_5\psi_9^5 + a_7\psi_9^7 + a_9\psi_9^9 + a_{11}\psi_9^{11}$$

$$I_{11} = a_1\psi_{11} + a_3\psi_{11}^3 + a_5\psi_{11}^5 + a_7\psi_{11}^7 + a_9\psi_{11}^9 + a_{11}\psi_{11}^{11}$$

-se rezolvă sistemul în necunoscutele $a_1, a_3, a_5, a_7, a_9, a_{11}$;

-se calculează, pentru o anumită valoare dată a coeficientului $A = \frac{U}{\omega}$, valorile coeficienților B_K .

De pe curba $\Psi_{m(I_m)}$ se obțin coordonatele punctelor $P_{(k)}$:

$$P_1: \Psi_1 = 0.07 \text{ [Wb]}; I_1 = 0.346 \text{ [A]}$$

$$P_3: \Psi_3 = 0.6 \text{ [Wb]}; I_3 = 3.118 \text{ [A]}$$

$$P_5: \Psi_5 = 0.8 \text{ [Wb]}; I_5 = 4.33 \text{ [A]}$$

$$P_7: \Psi_7 = 0.96 \text{ [Wb]}; I_7 = 5.542 \text{ [A]}$$

$$P_9: \Psi_9 = 1.1 \text{ [Wb]}; I_9 = 7.794 \text{ [A]}$$

$$P_{11}: \Psi_{11} = 1.245 \text{ [Wb]}; I_{11} = 13.337 \text{ [A]}$$

și rezultă astfel sistemul:

$$\begin{aligned}0.07a_1 + [0.07]^3a_3 + [0.07]^5a_5 + [0.07]^7a_7 + [0.07]^9a_9 + [0.07]^{11}a_{11} &= 0.34 \\0.6a_1 + [0.6]^3a_3 + [0.6]^5a_5 + [0.6]^7a_7 + [0.6]^9a_9 + [0.6]^{11}a_{11} &= 3.11 \\0.8a_1 + [0.8]^3a_3 + [0.8]^5a_5 + [0.8]^7a_7 + [0.8]^9a_9 + [0.8]^{11}a_{11} &= 4.33 \\0.96a_1 + [0.96]^3a_3 + [0.96]^5a_5 + [0.96]^7a_7 + [0.96]^9a_9 + [0.96]^{11}a_{11} &= 5.54 \\1.1a_1 + [1.1]^3a_3 + [1.1]^5a_5 + [1.1]^7a_7 + [1.1]^9a_9 + [1.1]^{11}a_{11} &= 7.79 \\1.24a_1 + [1.24]^3a_3 + [1.24]^5a_5 + [1.24]^7a_7 + [1.24]^9a_9 + [1.24]^{11}a_{11} &= 13.33\end{aligned}$$

cu soluțiile:

$$a_1 = 4.9468, a_3 = -0.84287, a_5 = 9.1345, a_7 = -18.224, a_9 = 14.264, a_{11} = -3.2797$$

Pentru coeficientul $A = \frac{380}{314} = 1.2102$ se obțin valorile coeficienților B_K :

$$B_1 = 8.82, B_3 = -1.7, B_5 = 6.69, B_7 = -0.273, B_9 = 2.29 \times 10^{-2}, B_{11} = 2.611 \times 10^{-2}$$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este de forma:

$$\begin{aligned}i_{m(t)} &= 8.8203\sin(\omega t) - 1.744\sin(3\omega t) + 6.6913\sin(5\omega t) - 0.27312\sin(7\omega t) + \\&+ 2.2940 \times 10^{-2}\sin(9\omega t) + 2.6119 \times 10^{-2}\sin(11\omega t)\end{aligned}$$

După fundamentală cea mai importantă armonică este armonică a 5-a.

Urmează apoi ca și valoare armonică a 5-a, a 3-a, a 7-a și cu un ordin de mărime mai mici armonicile 9 și 11.

Fiind date tensiunea la borne $U(U = \sqrt{3}220 = 380 \text{ [V]})$ și $M_{elmag} = M_{rez} = 20 \text{ [Nm]}$ se pot calcula mărimile:

-fluxul magnetic ψ_m :

$$\psi_m = \frac{U}{\omega} = \frac{380}{314} = 1.21 \text{ [Wb]}$$

-curentul de magnetizare I_m :

$$I_m = 11.6 \text{ [A]} \text{ (din funcția } \psi_m = f(I_m) \text{ dedusă experimental)}$$

-curentul statoric I_d :

$$I_d = -\frac{M_{elmag}}{p_1\psi_m} = -\frac{20}{2 \cdot 1.21} = -8.265 \text{ [A]}$$

-alunecarea s :

$$s = -\frac{R_2 I_d}{\omega \psi_m} = \frac{1.6 \cdot 8.265}{314 \cdot 1.21} = 0.0348$$

Curentul statoric al fundamentalei impus de cuplul rezistent este deci:

$$i_s(1) = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \arctg \frac{I_q}{I_d}\right)$$

și are valoarea:

$$i_s(1) = 8.265\sqrt{2} \sin\omega t$$

și astfel rezultă prin însumare curentul total al fundamentalei:

$$I_{s(1)} = \underbrace{8.265\sqrt{2} \sin\omega t}_{\text{cuplu}} + \underbrace{8.8203\sin\omega t}_{\text{magnetizare}} = 20.47\sin\omega t$$

Compoziția armonică a curentului statoric $I_s(t)$ este de forma:

$$I_s(t) = 20.47\sin\omega t - 1.744\sin(3\omega t) + 6.6913\sin(5\omega t) - 0.27312\sin(7\omega t) + \\ + 2.2940 \times 10^{-2}\sin(9\omega t) + 2.6119 \times 10^{-2}\sin(11\omega t)$$

2.2. Saturația magnetică la mașina sincronă

La mașina sincronă evaluarea saturației magnetice este mai dificilă având în vedere faptul că sunt necesare determinarea experimentală a două caracteristici de magnetizare după cele două axe[N1]:

$$\psi_{md} = f_1(I_m)$$

$$\psi_{mq} = f_2(I_m)$$

2.2.1. Modelul matematic al MS saturate

Analog ca și la MA modelul matematic are la bază modelul ortogonal.

Regimul staționar

În regim staționar ecuațiile M.S. sunt:

$$U_d = R_1 I_d - \omega \psi_q \text{-stator}$$

$$U_q = R_1 I_q + \omega \psi_d \text{-stator}$$

$$U_E = R_E I_E \text{-rotor}$$

sau

$$U_d = R_1 I_d - \omega L_q I_q \text{-stator}$$

$$U_q = R_1 I_q + \omega L_d I_d + \omega M_E I_E \text{-stator}$$

$$U_E = R_E I_E \text{-rotor}$$

$$p_1[(L_d - L_q)I_d I_q + M_E I_E I_q] = M_{rez} \text{-ecuația mișcării}$$

Parametrii MS influențați de saturație sunt:

L_d -inductanța proprie înfășurării statorice d;

L_q -inductanța proprie înfășurării statorice q;

M_E -inductanța de cuplaj dintre înfășurarea statorică și cea de excitație.

Inductanțele de dispersie $L_{d\sigma}$, $L_{q\sigma}$, $M_{E\sigma}$ nu se modifică semnificativ cu saturația și de aceea se consideră constante.

Cu creșterea gradului de saturație inductanțele proprii și de cuplaj scad și depind esențial de curentul de magnetizare, așa cum se observa din curba de magnetizare.

Cum această curbă de magnetizare este cunoscută experimental sub forma $\psi_m(I_m)$ (ψ_m - fluxul util; I_m - curentul de magnetizare), se impune a scrie sistemul de mai sus într-o formă în care să apară fluxurile utile ψ_{md} și ψ_{mq} , după cele două axe.

Fluxul statoric ψ_d se poate scrie sub forma:

$$\psi_d = \psi_{md} + L_{d\sigma} I_d$$

sau

$$\psi_d = L_d I_d + M_E I_E$$

În mod analog fluxul statoric ψ_q este:

$$\psi_q = \psi_{mq} + L_{q\sigma} I_q$$

sau

$$\psi_q = L_q I_q$$

Cu aceste precizări sistemul inițial devine:

$$U_d = R_1 I_d - \omega \psi_{mq} - \omega L_{q\sigma} I_q \text{ -stator}$$

$$U_q = R_1 I_q + \omega \psi_{md} + \omega L_{d\sigma} I_d \text{ -stator}$$

$$U_E = R_E I_E \text{ -rotor}$$

$$M_{elmag} = p_1 (I_q \psi_d - I_d \psi_q) = p_1 [I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq} + I_d I_q (L_{d\sigma} - L_{q\sigma})]$$

Observație:

La M.S. cu poli aparenti $L_{q\sigma} > L_{d\sigma}$ deoarece dispersia întrefierului este mai mare la înfășurarea din axa q față de cea din axa d, așa cum se poate observa din explicativa de mai jos.

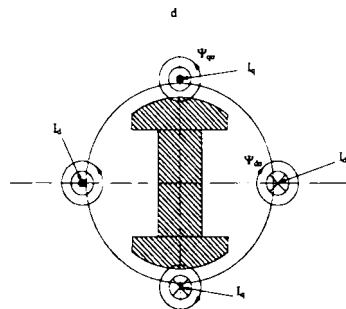


Fig.2.9.b. Explicativă privind inductanțele de dispersie statorice $L_{d\sigma}, L_{q\sigma}$

$$\psi_{q\sigma} > \psi_{d\sigma}; L_{q\sigma} > L_{d\sigma}$$

Observație:

Inductanțele de dispersie statorice $L_{d\sigma}, L_{q\sigma}$ sunt puțin influențate de gradul de saturație al mașinii și din acest motiv se consideră constante

Determinarea inductanței de dispersie $L_{d\sigma}$

Inductanțele proprii L_d, L_q se pot determina prin metodele cunoscute [B12]. Pentru determinarea inductanței mutuale (utile) L_{md} se folosește montajul din figura 2.10.

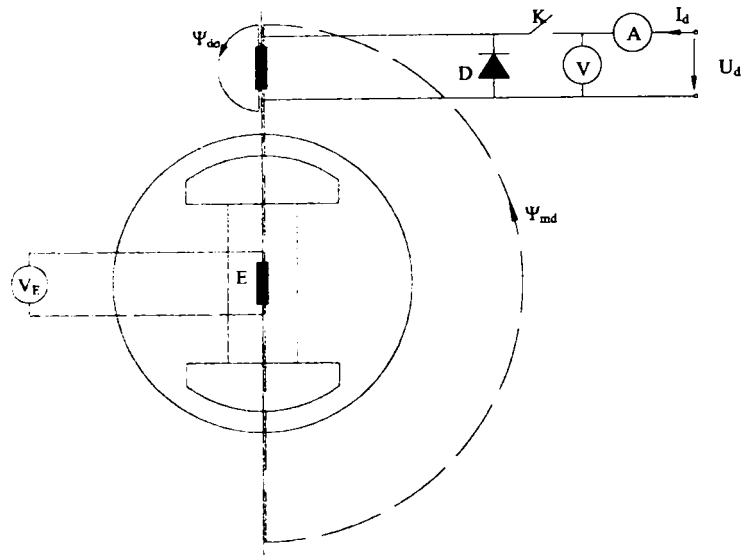


Fig.2.10. Magnetizarea longitudinală cu înfășurare

Alimentând înfășurarea statorică la tensiunea continuă U_d , prin această înfășurare trece curentul I_d , care determină fluxul total ψ_d :

$$\psi_d = \psi_{md} + \psi_{d\sigma}$$

Inductanța de dispersie $L_{d\sigma}$ este raportul:

$$L_{d\sigma} = \frac{\psi_{d\sigma}}{I_d} = \frac{\psi_d - \psi_{md}}{I_d}$$

Fluxul util ψ_{md} se determină prin înregistrarea în timp a tensiunii u_E la bornele înfășurării de excitație E , după ce se deschide întrerupătorul K (se întrerupe alimentarea fazei statorice), conform celor de mai jos:

$$u_E(t) = -\frac{N_E}{N_d} \frac{d\psi_{md}}{dt} \text{ -legea inducției electromagnetice}$$

sau prin integrare:

$$\psi_{md} = \frac{N_d}{N_E} \int_0^{\infty} u_E(t) dt$$

unde:

N_d -numărul de spire din înfășurarea statorică;

N_E -numărul de spire din înfășurarea de excitație.

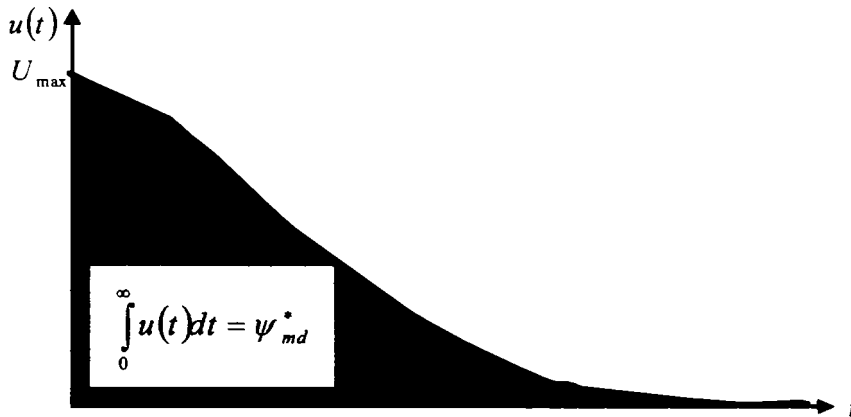


Fig.2.11. Variația tensiunii prin înfășurarea de excitație

Determinarea raportului $\frac{N_d}{N_E}$ se face printr-o determinare experimentală, măsurând, în gol, tensiunile U_d și U_E și deci $\frac{N_d}{N_E} = \frac{U_d}{U_E}$.

Înregistrând, acum, curentul ce trece prin înfășurarea statorică și dioda de scurgere D după deschiderea întreruptorului K, se poate determina fluxul total ψ_d având în vedere cele de mai jos:

$$R_d i_d + \frac{d\psi_d}{dt} = 0$$

sau prin integrare:

$$\psi_d = R_d \int_0^{\infty} i_d dt$$

Cunoscând fluxurile ψ_d și ψ_{md} se poate calcula inductanța de dispersie longitudinală $L_{d\sigma}$:

$$L_{d\sigma} = \frac{\psi_d - \psi_{md}}{I_d}$$

Determinarea inductanței de dispersie $L_{q\sigma}$

Inductanțele L_q , L_Q și M_{Qq} fiind:

$$M_{Qq} = \frac{N_Q N_q}{R_{mag}}$$

$$L_Q = \frac{N_Q^2}{R_{mag}}$$

$$L_q = \frac{N_q^2}{R_{mag}}$$

inductanța utilă L_{mq} se obține din $L_{mq} = \sqrt{\frac{L_q}{L_Q}} M_{Qq}$, rezultând inductanța de dispersie $L_{q\sigma}$ din relația:

$$L_{q\sigma} = L_q - L_{mq}$$

Inductanțele L_q , L_Q , M_{Qq} sunt cunoscute din datele de catalog .

2.2.2. Determinarea armonicilor la MS

La neglijarea rezistențelor statorice și a dispersiilor ($R_1, L_{d\sigma}, L_{q\sigma} \rightarrow 0$) se obține sistemul simplificat:

$$\text{stator} : U_d = -\omega\psi_{mq};$$

$$\text{stator} : U_q = -\omega\psi_{md}$$

$$\text{cuplu} : M_{eimag} = p_1(I_q\psi_{md} - I_d\psi_{mq})$$

$$\text{saturatia} : \psi_{md} = \frac{\psi_{md1}}{I_m}(I_d + K_E I_E);$$

$$\text{saturatia} : \psi_{mq} = \frac{\psi_{mq1}}{I_m} I_q$$

$$U_d = -U\sqrt{3} \sin\theta$$

$$U_q = U\sqrt{3} \cos\theta$$

$$K_E = \frac{N_E}{N_d} = \sqrt{\frac{L_E}{L_d}}$$

sau:

$$-U\sqrt{3} \sin\theta = -\omega \frac{\psi_{mq1}}{I_m} I_q$$

$$U\sqrt{3} \cos\theta = \omega \frac{\psi_{md1}}{I_m} (I_d + K_E I_E)$$

$$M_{eimag} = p_1 \left[I_q \frac{\psi_{md1}}{I_m} (I_d + K_E I_E) - I_d \frac{\psi_{mq1}}{I_m} I_q \right]$$

sau:

$$3U^2 = \left(\frac{\omega}{I_m} \right)^2 \left[(\psi_{mq1} I_q)^2 + \psi_{md1}^2 (I_d + K_E I_E)^2 \right]$$

$$M_{eimag} = \frac{p_1}{I_m} I_q [\psi_{md1} (I_d + K_E I_E) - I_d \psi_{mq1}]$$

$$I_m^2 = (I_d + K_E I_E)^2 + I_q^2$$

$$\psi_{md1} = f(I_m) \text{ - experimental}$$

$$\psi_{mq1} = g(I_m) \text{ - experimental}$$

Datele inițiale sunt:

-tensiunea U ;

-curentul de excitație I_E ;

-cuplul electromagnetic = cuplul rezistent.

Din sistem rezultă necunoscutele:

-curentul statoric I_d ;

-curentul statoric I_q ;

-curentul statoric al fundamentalei:

$$i_s(1) = \sqrt{\frac{2}{3}} [I_d \cos(\omega t) - I_q \sin(\omega t)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{I_q}{I_d}\right)$$

-curentul de magnetizare I_m .

Așa cum s-a menționat la MA consumatorul neliniar (MS) primește din rețeaua de tensiune sinusoidală putere activă pe fundamentală: $P_1 = u_{(t)} i_{s(1)}$ din care consumă o parte, restul de putere activă ($\sum_{K=2} P_K$) o debitează prin armonici în rețeaua de alimentare, adică la alți consumatori care pot fi liniari sau neliniari.

Fluxurile utile ψ_{md} , ψ_{mq} fiind determinate de tensiunile U_d și U_q continue în model și sinusoidale în mașina reală:

$$\psi_{md} = \frac{U_q}{\omega}$$

$$\psi_{mq} = \frac{U_d}{\omega}$$

$$\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2 = 3 \left(\frac{U}{\omega} \right)^2$$

rezultă o variație sinusoidală în mașina reală pentru fluxurile ψ_{md} , ψ_{mq} și

$$\psi_m = \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = U \frac{\sqrt{3}}{\omega}$$

sau

$$\psi_{m(t)} = U \frac{\sqrt{3}}{\omega} \sin \omega t = A \sin \omega t$$

Din curbele experimentale $\psi_{md1}(I_m)$, $\psi_{mq1}(I_m)$ rezultă $\psi_m(I_m)$ și la o variație sinusoidală pentru Ψ_m (figura 2.12) se obține compoziția armonică a curentului statoric formată dintr-o sumă de armonici impare, așa cum s-a demonstrat și la MA saturată.

Aceste armonici determină putere deformantă care apare la funcționarea mașinii sincrone în regim neliniar, saturat magnetic.

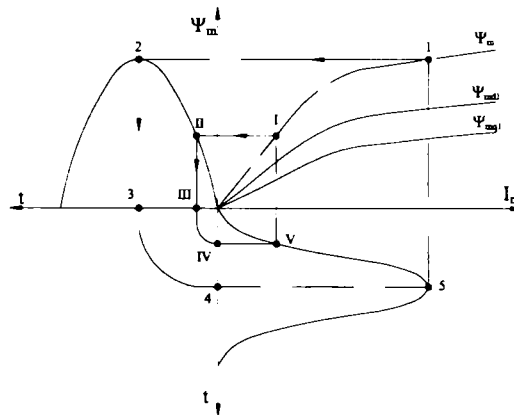


Fig.2.12. Variația curentului I_m în timp

La $U = 220$ [V] rezultă $I_m = 13.337$ [A] și deci se obțin coordonatele punctelor $P(K)$:

$$P_1: \Psi_1 = 0.09 \text{ [Wb]}; I_1 = 0.3464 \text{ [A]}$$

$$P_3: \Psi_3 = 0.7826 \text{ [Wb]}; I_3 = 3.1176 \text{ [A]}$$

$$P_5: \Psi_5 = 1.033 \text{ [Wb]}; I_5 = 4.33 \text{ [A]}$$

$$P_7: \Psi_7 = 1.225 \text{ [Wb]}; I_7 = 5.542 \text{ [A]}$$

$$P_9: \Psi_9 = 1.417 \text{ [Wb]}; I_9 = 7.794 \text{ [A]}$$

$$P_{11}: \Psi_{11} = 1.618 \text{ [Wb]}; I_{11} = 13.337 \text{ [A]}$$

și rezultă astfel sistemul:

$$0.09a_1 + [0.09]^3 a_3 + [0.09]^5 a_5 + [0.09]^7 a_7 + [0.09]^9 a_9 + [0.09]^{11} a_{11} = 0.34$$

$$0.78a_1 + [0.78]^3 a_3 + [0.78]^5 a_5 + [0.78]^7 a_7 + [0.78]^9 a_9 + [0.78]^{11} a_{11} = 3.11$$

$$1.03a_1 + [1.03]^3 a_3 + [1.03]^5 a_5 + [1.03]^7 a_7 + [1.03]^9 a_9 + [1.03]^{11} a_{11} = 4.33$$

$$1.22a_1 + [1.22]^3 a_3 + [1.22]^5 a_5 + [1.22]^7 a_7 + [1.22]^9 a_9 + [1.22]^{11} a_{11} = 5.54$$

$$1.41a_1 + [1.41]^3 a_3 + [1.41]^5 a_5 + [1.41]^7 a_7 + [1.41]^9 a_9 + [1.41]^{11} a_{11} = 7.79$$

$$1.61a_1 + [1.61]^3 a_3 + [1.61]^5 a_5 + [1.61]^7 a_7 + [1.61]^9 a_9 + [1.61]^{11} a_{11} = 13.33$$

cu soluțiile:

$$a_{11} = -9.2275 \times 10^{-2}, a_7 = -1.6555, a_5 = 1.6081, a_3 = -0.2988, a_1 = 3.8468, a_9 = 0.74955$$

Pentru coeficientul $A = \frac{\sqrt{3}U}{\omega} = \frac{\sqrt{3}220}{314} = \frac{380}{314} = 1.2102$ se obțin valorile coeficienților B_K :

$$B_1 = 5.13, B_3 = -0.23, B_5 = 1.08, B_7 = -7.96 \times 10^{-3}, B_9 = 8.21 \times 10^{-3}, B_{11} = 7.34 \times 10^{-4}$$

Curentul de magnetizare are următoarea compoziție armonică :

$$i_m(t) = 5.13 \sin(\omega t) - 0.233 \sin(3\omega t) + 1.08 \sin(5\omega t) - 7.9671 \times 10^{-3} \sin(7\omega t) + \\ + 8.2197 \times 10^{-3} \sin(9\omega t) + 7.3487 \times 10^{-4} \sin(11\omega t)$$

Cea mai importantă armonică este armonica a 5-a.

2.2.2.1. Determinarea experimentală a curbelor de magnetizare

MAȘINA SINCRONĂ are datele

$$U_N = 220[V]; I_N = 5[A]; n_N = 1500[rpm]; I_{Emax} = 1,5[A]$$

Testele s-au efectuat pe o M.S. trifazată cu poli aparenti.

Curba de magnetizare:

$$\Psi_{md} = f(I_m)$$

se poate ridica în două variante:

- alimentând înfășurarea de excitație E;
 - alimentând numai înfășurarea statorică.
- a) Se aliniază rotorul în axa d (figura 2.13.)

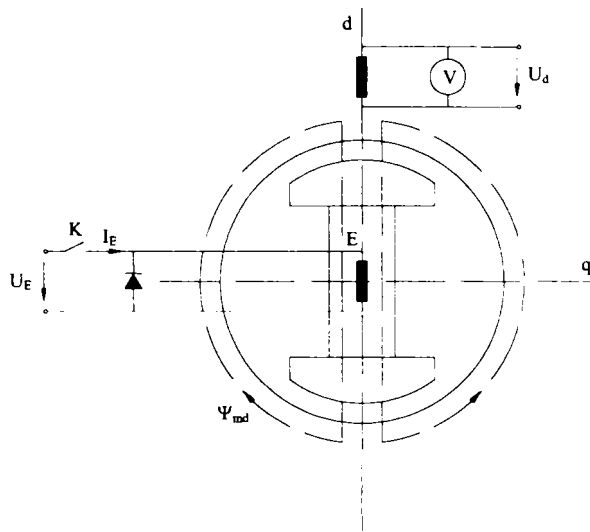
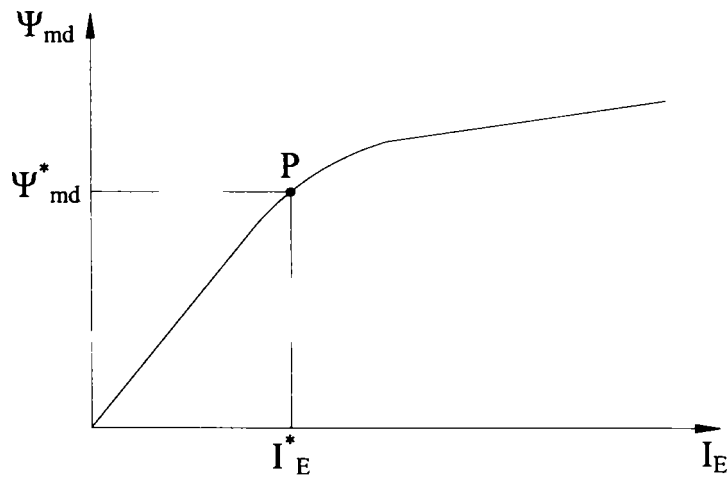


Fig.2.13. Magnetizarea longitudinală cu înfășurare

Înfășurarea de excitație E este parcursă de curentul continuu I_E și astfel apare fluxul ψ_{md} util ce străbate atât rotorul cât și statorul. Pe curba de magnetizare $\psi_m = f(I_m)$ punctul de funcționare este P.

Fig.2.14. Curba de magnetizare $\psi_{md} = f(I_m)$

Determinarea fluxului ψ_{md}^* se face prin înregistrarea tensiunii induse în înfășurarea statorică din axa d, după ce se deschide întrerupătorul K.

$$u(t) = -\frac{d\psi_{md}}{dt} \text{ -legea inducției electromagnetice aplicată înfășurării}$$

statorice din axa d;

sau prin integrare:

$$\int_0^{\infty} u(t)dt = \psi_{md}^*$$

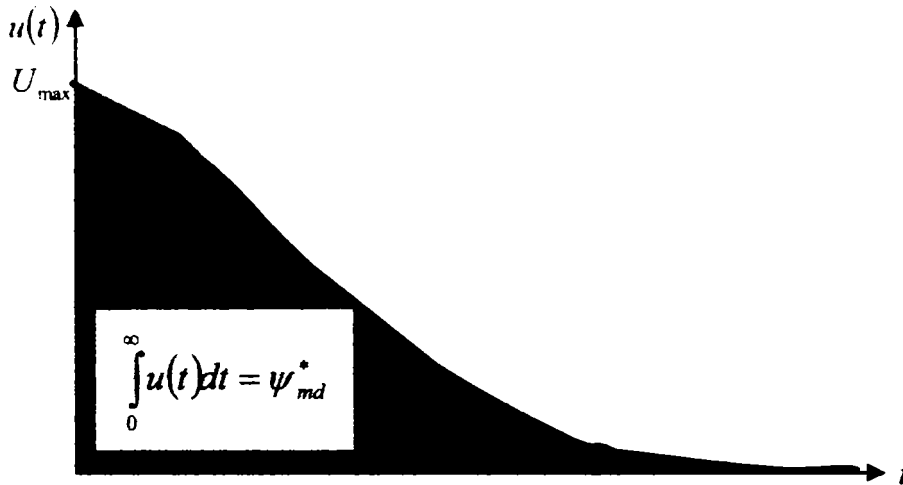


Fig.2.15. Variația tensiunii statorice

Reducerea curentului I_E la stator (I_E^*) se face printr-o determinare experimentală a raportului numărului de spire N_E/N_d prin măsurarea tensiunilor, în curent alternativ, U_E și U (figura 2.16.).

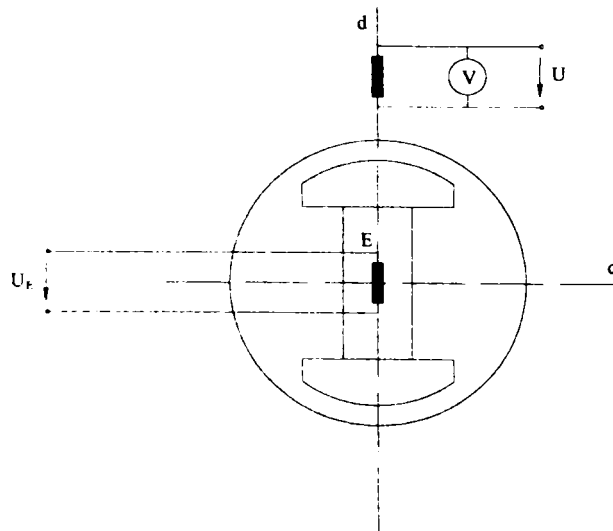


Fig2.16. Determinarea raportului $\frac{N_E}{N_d}$

N_E -numărul de spire din înfășurarea de excitație ;

N_d -numărul de spire din înfășurarea statorică din axa d ;

$$\frac{N_E}{N_d} = \frac{U_E}{U}$$

și deci

$$I_E^* = I_{md} = \frac{N_E}{N_d} I_E$$

b) Se alimentează mașina așa ca în figura 2.17.:

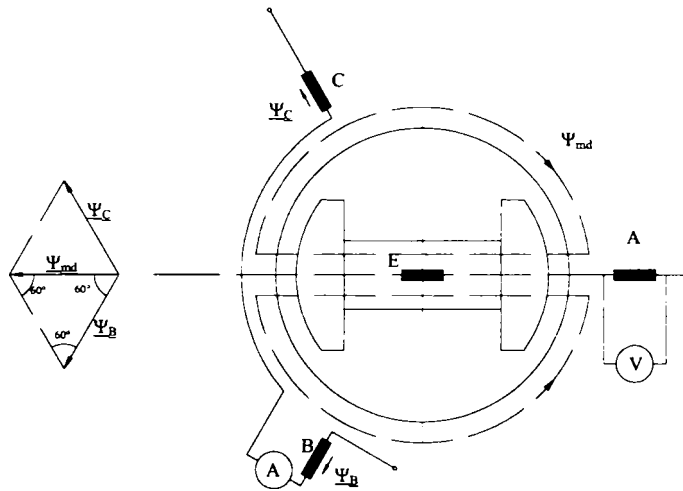


Fig.2.17. Magnetizarea longitudinală cu fazele B,C alimentate

Curentul de magnetizare I_m se măsoară cu ampermetrul A montat în circuitul fazelor statorice B și C

$$I_m = I_B = I_C$$

Tensiunea înregistrată la voltmetrul V montat la bornele înfășurării A va determina fluxul ψ_{md} , așa ca și în cazul anterior :

$$\psi_{md} = \int_0^{\infty} U_A(t) dt$$

Observație:

Este foarte importantă, la înregistrare, valoarea perioadei de eșantionare, pentru a prinde vârful U_{max} al tensiunii $U(t)$.

Se obține, astfel, curba de magnetizare $\psi_{md} = f(I_m)$, dată tabelar alăturat.

Tabelul 2.2. Curba de magnetizare $\Psi_{md1}(I_m)$ la MS

Curba de magnetizare din axa longitudinală
 $\Psi_{md1} = f(I_m)$

I_m [A]	Ψ_{md1} [Wb]	I_m [A]	Ψ_{md1} [Wb]	I_m [A]	Ψ_{md1} [Wb]
.1732050808	0.03489088159	5.369357505	.9319538108	10.56550993	1.189503608
.3464101616	0.06978176317	5.542562589	.9594992436	10.73871501	1.192258151
.5196152424	.1046726448	5.715767666	.9640901491	10.91192009	1.195471785
.6928203232	.1395635263	5.888972747	.9778628655	10.99852263	1.198226328
.866025404	.1744544079	6.062177828	.9962264874	11.08512517	1.201439962
1.039230485	.2093452895	6.235382909	1.009999204	11.25833025	1.204194505
1.212435566	.2442361711	6.40858799	1.019181015	11.43153533	1.207408139
1.385640646	.2791270527	6.58179307	1.032953731	11.60474041	1.210162682
1.558845727	.3186088398	6.754998151	1.046726448	11.77794549	1.213376316
1.732050808	.3534997213	6.928203232	1.055908259	11.95115058	1.21613086
1.905255889	.3883906029	7.101408313	1.06509007	12.12435566	1.219344493
2.07846097	.4232814845	7.274613394	1.07427188	12.29756074	1.222558127
2.25166605	.4581723661	7.447818474	1.083453691	12.47076582	1.229444485
2.424871131	.4930632477	7.621023555	1.092635502	12.6439709	1.230821757
2.598076212	.5279541293	7.794228636	1.101817313	12.81717598	1.234494481
2.771281293	.5628450109	7.967433717	1.11099124	12.99038106	1.235871753
2.944486374	.5784540895	8.140638798	1.120180935	13.16358614	1.237708115
3.117691454	.6059995223	8.313843878	1.129362746	13.33679122	1.244594473
3.290896535	.6427267661	8.487048959	1.138544557	14.0	1.2560
3.464101616	.6886358208	8.66025404	1.147726368	14.2	1.2598
3.637306697	.7115903482	8.833459121	1.152317273	14.4	1.2636
3.810511778	.7345448755	9.006664202	1.156908179	14.6	1.2674
3.983716858	.7574994029	9.179869282	1.161499084	14.8	1.2712
4.156921939	.7804539302	9.353074363	1.16608999	15.0	1.2720
4.33012702	.8034084576	9.526279444	1.170680895	15.2	1.2788
4.503332101	.826362985	9.699484525	1.175271801	15.4	1.2826
4.676537182	.8493175123	9.872689606	1.178026344	15.6	1.2864
4.849742262	.8722720397	10.04589469	1.181239978	15.8	1.2902
5.022947343	.895226567	10.21909977	1.183994521	16.0	1.2940
5.196152424	.9181810944	10.39230485	1.186749065		

Aproximarea liniară în zona saturată se face cu relația:

$$\Psi_{md1} = 0.019I_m + 0.99$$

Curba de magnetizare:

$$\Psi_{mq} = f(I_m)$$

Se aliniază rotorul în axa q (figura 2.18.). Prin alimentarea fazelor B și C în c.c. așa ca în figură se obține un flux rezultat Ψ_{mq} dat de curentul $I_q = I_m$.

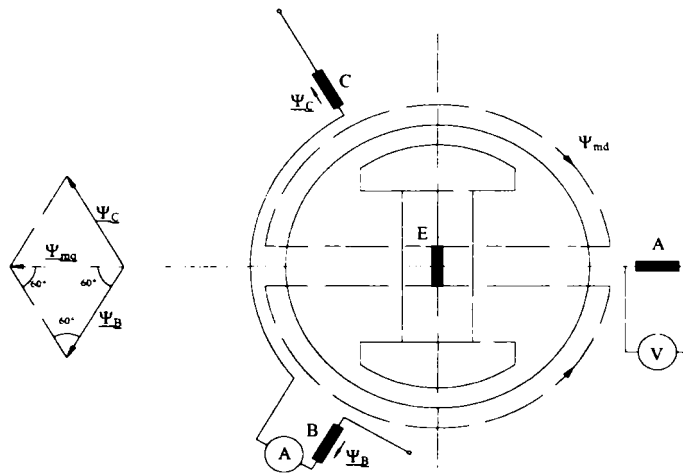
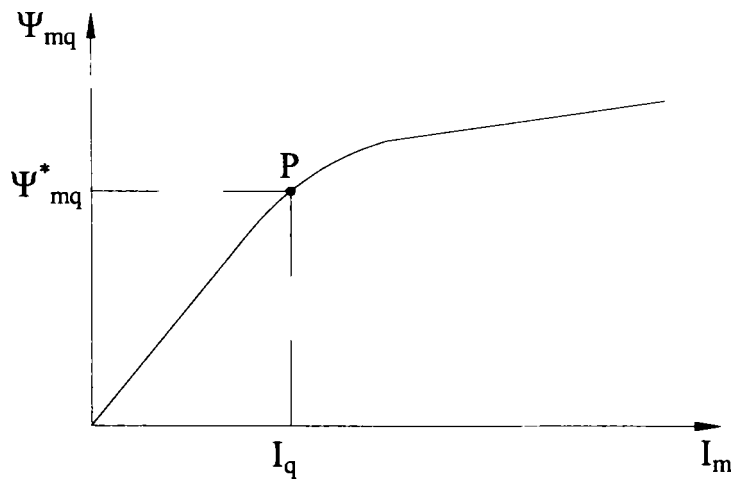


Fig.2.18. Magnetizarea transversală cu fazele B,C alimentate

Tensiunea înregistrată la voltmetrul V după întreruperea alimentării fazelor B și C va determina valoarea fluxului ψ_{mq} așa ca și în cazul anterior. Pe curba de magnetizare $\psi_{mq} = f(I_m)$ punctul de funcționare este P.

Fig.2.19. Curba de magnetizare $\psi_{mq} = f(I_m)$

Legea inducției electromagnetice aplicată înfășurării statorice q este:

$$u_{(t)} = -\frac{d\psi_{mq}}{dt}$$

sau prin integrare:

$$\int_0^{\infty} u_{(t)} dt = \psi_{mq}^*$$

În concluzie se cunosc din măsurători curbele de magnetizare $\Psi_{md} = f(I_m)$ și $\Psi_{mq} = f(I_m)$ după cele două axe (figura 2.20.).

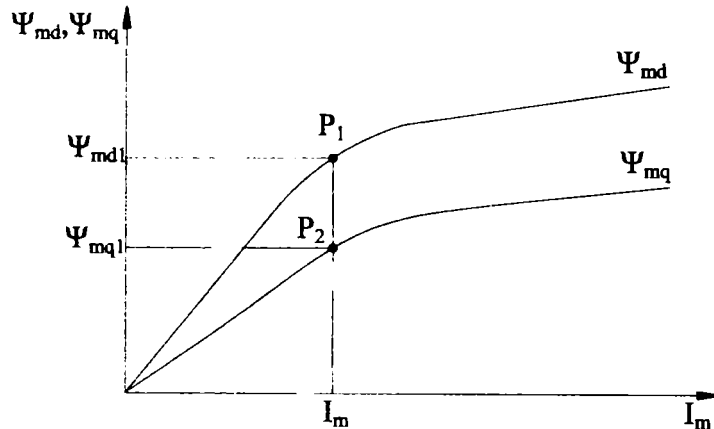


Fig.2.20. Curbele de magnetizare Ψ_{md}, Ψ_{mq}

Curba de magnetizare $\Psi_{mq}(I_m)$ este dată tabelar alăturat.

Tabelul 2.3. Curba de magnetizare $\Psi_{mq}(I_m)$ la MS

Curba de magnetizare din axa transversală
 $\Psi_{mq} = f(I_m)$

I_m [A]	Ψ_{mq} [Wb]	I_m [A]	Ψ_{mq} [Wb]	I_m [A]	Ψ_{mq} [Wb]
1.732050808	0.02873414806	5.369357505	.7410950714	10.56550993	.979503608
.3464101616	0.05746829611	5.542562589	.7624837707	10.73871501	.982258151
.5196152424	0.08620244422	5.715767666	.7609179427	10.91192009	.985471785
.6928203232	.1149365922	5.888972747	.7685339255	10.99852263	.988226328
.866025404	.1436707403	6.062177828	.7807408139	11.08512517	.991439962
1.039230485	.1724048883	6.235382909	.799999204	11.25833025	.994194505
1.212435566	.2011390364	6.40858799	.809181015	11.43153533	.9907408139
1.385640646	.2298731845	6.58179307	.822953731	11.60474041	1.000162682
1.558845727	.2631982381	6.754998151	.836726448	11.77794549	1.003376316
1.732050808	.291932386	6.928203232	.845908259	11.95115058	1.00613086
1.905255889	.3206665341	7.101408313	.85509007	12.12435566	1.009344493
2.07846097	.3494006822	7.274613394	.86427188	12.29756074	1.012558127
2.25166605	.3781348303	7.447818474	.873453691	12.47076582	1.019444485
2.424871131	.4068689783	7.621023555	.882635502	12.6439709	1.020821757
2.598076212	.4356031264	7.794228636	.891817313	12.81717598	1.024494481
2.771281293	.4643372744	7.967433717	.900999124	12.99038106	1.025871753
2.944486374	.4737896195	8.140638798	.910180935	13.16358614	1.027708115
3.117691454	.4951783188	8.313843878	.919362746	13.33679122	1.034594473
3.290896535	.5257488291	8.487048959	.928544557	13.6	1.0384
3.464101616	.5655011502	8.66025404	.937726368	13.8	1.0422
3.637306697	.5822989441	8.833459121	.942317273	14.0	1.0460
3.810511778	.5990967379	9.006664202	.946908179	14.2	1.0498
3.983716858	.6158945318	9.179869282	.951499084	14.4	1.0536
4.156921939	.6326923255	9.353074363	.95608999	14.6	1.0574
4.33012702	.6494901194	9.526279444	.960680895	14.8	1.0612
4.503332101	.6662879133	9.699484525	.965271801	15.0	1.0650
4.676537182	.683085707	9.872689606	.968026344	15.2	1.0688
4.849742262	.6998835009	10.04589469	.971239978	15.4	1.0726
5.022947343	.7166812947	10.21909977	.973994521	15.6	1.0764
5.196152424	.7334790886	10.39230485	.976749065	15.8	1.0802
				16.0	1.0840

Aproximarea liniară în zona saturată se face cu relația:

$$\psi_{mq1} = 0.019I_m + 0.78$$

Curentul de magnetizare echivalent în regim staționar este :

$$I_m = \sqrt{(I_d + I_E^*)^2 + I_q^2}$$

Precizări:

1. Pentru determinarea curbelor ψ_{md1} și ψ_{mq1} este suficientă alimentarea în stator a două faze (B și C) și înregistrarea tensiunii pe cealaltă fază (A), cu rotorul :

a) în axa fazei A rezultă curba ψ_{md} (la bornele înfășurării de excitație tensiunea este maximă poziția

rotorului fiind cea indicată în desenul de mai jos prin rotor plin);

b) perpendicular pe axa fazei A rezultă curba ψ_{mq} (la bornele înfășurării de excitație tensiunea este nulă, poziția rotorului fiind cea indicată în desenul de mai jos prin linie punctată) așa ca în figura 2.21:

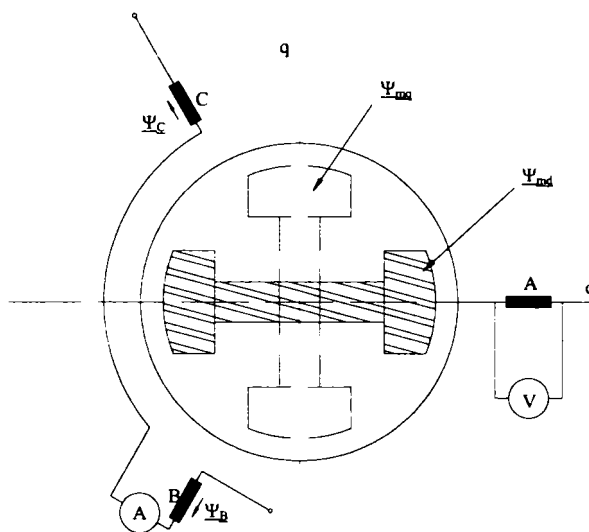


Fig.2.21. Determinarea curbelor ψ_{md} și ψ_{mq}

Gradul de saturație este dat de valoarea curentului I ce trece prin fazele B și C.

2. În ecuațiile MS se va opera cu relațiile:

$$\psi_{md} = \frac{\psi_{md1}}{I_m} (I_d + K_E I_E)$$

$$\psi_{mq} = \frac{\psi_{mq1}}{I_m} I_q$$

Curbele experimentale ψ_{md1} și ψ_{mq1} se cunosc tabelar.

2.2.3. Determinarea numerică a armonicilor superioare la MS

La neglijarea rezistențelor statorice ($R_1 \rightarrow 0$) și a dispersiilor ($L_{1\sigma}, L_{2\sigma} \rightarrow \infty$) se obține sistemul simplificat:

$$\begin{aligned}
 -U\sqrt{3}\sin\theta &= -\omega\psi_{mq} \\
 U\sqrt{3}\cos\theta &= \omega\psi_{md} \\
 U_E &= R_E I_E \\
 M_{elmag} &= p_1(I_q\psi_{md} - I_d\psi_{mq}) \\
 \psi_{md} &= \frac{\psi_{md1}}{I_m} I_{md} \\
 \psi_{mq} &= \frac{\psi_{mq1}}{I_m} I_{mq} \\
 I_m^2 &= I_{md}^2 + I_{mq}^2 \\
 I_{md} &= I_d + K_E I_E = I_d + I_E^* \\
 I_{mq} &= I_q \\
 \psi_{mq1} &= f_1(I_m) \text{-curbe experimentale} \\
 \psi_{md1} &= f_2(I_m) \text{-curbe experimentale}
 \end{aligned}$$

sau

$$\begin{aligned}
 3U^2 &= \omega^2(\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2) \\
 \psi_{md} &= \frac{\psi_{md1}}{I_m} I_{md} \\
 \psi_{mq} &= \frac{\psi_{mq1}}{I_m} I_{mq} \\
 I_m^2 &= I_{md}^2 + I_{mq}^2 \\
 I_{md} &= I_d + I_E^* \\
 I_{mq} &= I_q \\
 M_{elmag} &= p_1(I_q\psi_{md} - I_d\psi_{mq}) = M_{rez} \\
 \psi_{mq1} &= f_1(I_m) \text{-curbe experimentale} \\
 \psi_{md1} &= f_2(I_m) \text{-curbe experimentale}
 \end{aligned}$$

Curentul prin excitație I_E este cunoscut și deci $I_E^* = K_E I_E$ ($I_E^* = 12$ [A]) este dat. Prin urmare:

- U, M_{rez} -sunt date și

- $\psi_{md}, \psi_{mq}, \psi_{md1}, \psi_{mq1}, I_m, I_{md}, I_{mq}, I_d, I_q$ -sunt necunoscute.

Valoarea tensiunii U ($U_0 = 220$ [V]) și a cuplului rezistent ($M_{rez} = 20$ [Nm]) impune nivelul de saturație așa cum rezultă în continuare:

$$\begin{aligned}
 3(220)^2 &= (314)^2(\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2) \\
 \psi_{md} &= \frac{\psi_{md1}}{I_m} I_{md} \\
 \psi_{mq} &= \frac{\psi_{mq1}}{I_m} I_{mq} \\
 I_m^2 &= I_{md}^2 + I_{mq}^2 \\
 I_{md} &= I_d + I_E^* \\
 2(I_q\psi_{md} - I_d\psi_{mq}) &= 20
 \end{aligned}$$

sau:

$$1,4726 = \psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2$$

$$\psi_{md} = \frac{\psi_{md1}}{I_m} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{\psi_{mq1}}{I_m} I_{mq}$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_{mq}^2$$

$$I_{md} = I_d + I_E^*$$

$$I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq} = 10$$

Deoarece funcțiile neliniare $\psi_{mq1} = f_1(I_m)$ și $\psi_{md1} = f_2(I_m)$ sunt date tabelar rezolvarea sistemului se poate face fie printr-un procedeu iterativ fie liniarizând curbele de magnetizare ψ_{md1} , ψ_{mq1} în zona saturată.

1) Prin liniarizarea curbelor de magnetizare în zona saturată.

În zona saturată liniarizarea curbelor de magnetizare se poate face prin dreptele:

$$\psi_{md1} = 0.019I_m + 0.99$$

$$\psi_{mq1} = 0.019I_m + 0.78$$

și astfel sistemul de ecuații devine:

$$1,4726 = \psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2$$

$$\psi_{md} I_m = (0.019I_m + 0.99) I_{md}$$

$$\psi_{mq} I_m = (0.019I_m + 0.78) I_q$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_{mq}^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq} = 10$$

Se obțin necunoscutele: ψ_{md} , ψ_{mq} , I_m , I_{md} , I_d , I_q .

$$\psi_{mq} = 0.69505, I_{md} = 12.338, I_m = 16.065, \psi_{md} = 0.99474, I_d = 0.33812,$$

$$I_q = 10.289$$

2) Iterativ

Se aleg minimum 3 valori pentru I_m (de exemplu $I_m = 7; 7,5; 8$ [A]).

a) La $I_m = 7$ [A] din $f_1(I_m)$ și $f_2(I_m)$ rezultă $\psi_{md1} = 1.06$ [Wb] și

$\psi_{mq1} = 0.85$ [Wb] și deci sistemul devine:

$$\psi_{md} = \frac{1.06}{7} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{0.85}{7} I_q$$

$$49 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq} = 10$$

având soluția: $I_q = 6.5233$, $\psi_{md} = 0.38441$, $\psi_{mq} = 0.79193$,

$$I_{md} = 2.5391,$$

$$I_d = -9.4609$$

b) La $I_m = 7,5$ [A] din $f_1(I_m)$ și $f_2(I_m)$ rezultă $\psi_{md1} = 1.085$ [Wb] și $\psi_{mq1} = 0.878$ [Wb] și deci sistemul devine:

$$\psi_{md} = \frac{1.085}{7,5} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{0.878}{7,5} I_q$$

$$56,25 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq} = 10$$

având soluția: $I_d = -8.5735$, $I_q = 6.6715$, $\psi_{md} = 0.49582$, $\psi_{mq} = 0.78056$, $I_{md} = 3.4265$

c) La $I_m = 8$ [A] din $f_1(I_m)$ și $f_2(I_m)$ rezultă $\psi_{md1} = 1.115$ [Wb] și

$\psi_{mq1} = 0.905$ [Wb] și deci sistemul devine:

$$\psi_{md} = \frac{1.115}{8} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{0.905}{8} I_q$$

$$64 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq} = 10$$

având soluția: $\psi_{mq} = 0.77086$, $I_q = 6.8142$, $\psi_{md} = 0.58415$, $I_d = -7.8088$, $I_{md} = 4.1912$

Pentru cele trei cazuri se calculează tensiunea la borne cu relația:

$$3U^2 = 314^2(\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2)$$

În cazul a) cu $I_m = 7$ [A] valoarea tensiunii este:

$$U = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{0.38441^2 + 0.79193^2} = 159.40[V]$$

În cazul b) cu $I_m = 7.5$ [A] valoarea tensiunii este:

$$U = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{0.49582^2 + 0.78056^2} = 167.44[V]$$

În cazul c) cu $I_m = 8$ [A] valoarea tensiunii este:

$$U = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{0.58415^2 + 0.77086^2} = 175.13[V]$$

Deoarece valoarea tensiunii este sub 220 [V] se mai adaugă încă patru puncte cu $I_m = 9; 11; 13; 15$ [A].

d) La $I_m = 9$ [A] din $f_1(I_m)$ și $f_2(I_m)$ rezultă $\psi_{md1} = 1.157$ [Wb] și

$\psi_{mq1} = 0.947$ [Wb] și deci sistemul devine:

$$\psi_{md} = \frac{1.157}{9} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{0.947}{9} I_q$$

$$81 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq} = 10$$

având soluția: $I_{md} = 5.3982$, $\psi_{md} = 0.69400$, $I_q = 7.2013$, $I_d = -6.6018$,

$\psi_{mq} = 0.75772$

e) La $I_m = 11$ [A] din $f_1(I_m)$ și $f_2(I_m)$ rezultă $\psi_{md1} = 1.2$ [Wb] și $\psi_{mq1} = 0.99$ [Wb] și deci sistemul devine:

$$\psi_{md} = \frac{1.2}{11} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{0.99}{11} I_q$$

$$121 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq} = 10$$

având soluția: $I_d = -4.6639$, $\psi_{md} = 0.80030$, $I_{md} = 7.3361$, $I_q = 8.1964$,
 $\psi_{mq} = 0.73768$

f) La $I_m = 13$ [A] din $f_1(I_m)$ și $f_2(I_m)$ rezultă $\psi_{md1} = 1.23$ [Wb] și $\psi_{mq1} = 1.026$ [Wb] și deci sistemul devine:

$$\psi_{md} = \frac{1.23}{13} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{1.026}{13} I_q$$

$$169 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq} = 10$$

având soluția: $I_{md} = 9.2259$, $I_q = 9.1588$, $\psi_{mq} = 0.72284$, $I_d = -2.7741$,
 $\psi_{md} = 0.87291$

g) La $I_m = 15$ [A] din $f_1(I_m)$ și $f_2(I_m)$ rezultă $\psi_{md1} = 1.272$ [Wb] și $\psi_{mq1} = 1.065$ [Wb] și deci sistemul devine:

$$\psi_{md} = \frac{1.272}{15} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{1.065}{15} I_q$$

$$225 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq} = 10$$

având soluția: $\psi_{md} = 0.95345$, $I_q = 9.9289$, $I_{md} = 11.244$, $I_d = -0.75647$,
 $\psi_{mq} = 0.70495$

Pentru ultimele patru cazuri tensiunea are valoarea:

-în cazul d) cu $I_m = 9$ [A] valoarea tensiunii este:

$$U = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{0.69400^2 + 0.75772^2} = 186.06[V]$$

-în cazul e) cu $I_m = 11$ [A] valoarea tensiunii este:

$$U = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{0.80030^2 + 0.73768^2} = 197.08[V]$$

-în cazul f) cu $I_m = 13$ [A] valoarea tensiunii este:

$$U = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{0.87291^2 + 0.72284^2} = 205.21[V]$$

-în cazul g) cu $I_m = 15$ [A] valoarea tensiunii este:

$$U = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{0.95345^2 + 0.70495^2} = 214.71 [V]$$

Se poate trasa astfel graficul funcției $U(I_m)$ de unde rezultă I_m .

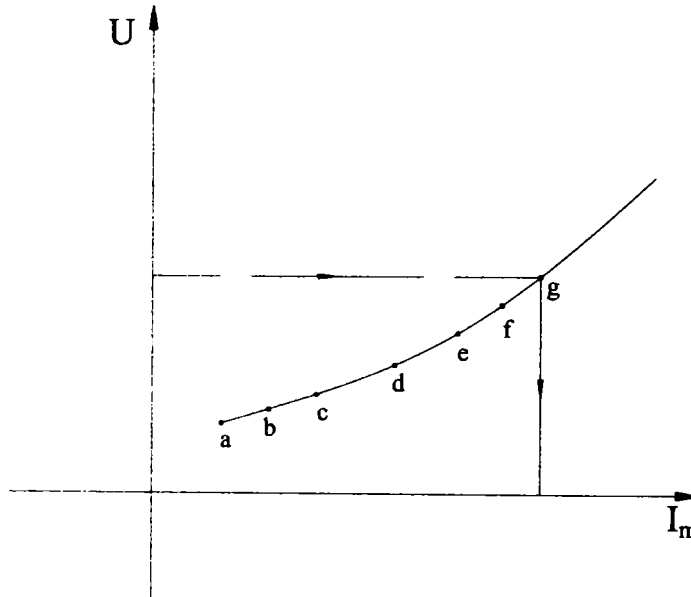


Fig.2.22. Dependența tensiunii U de curentul de

La $U = 220$ [V] rezultă $I_m = 16.1$ [A] și deci $\psi_{md1} = 1.296$ [Wb] $\psi_{mq1} = 1.085$ [Wb] obținându-se sistemul:

$$\psi_{md} = \frac{1.296}{16.1} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{1.085}{16.1} I_q$$

$$259.21 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq} = 10$$

cu soluțiile:

$$\psi_{md} = 0.99608, I_d = 0.37411, \psi_{mq} = 0.69413, I_{md} = 12.374, I_q = 10.3$$

De pe curba $\Psi_m(I_m)$ (figura 2.9.a) se obțin coordonatele punctelor $P(K)$:

$$P_1: \Psi_1 = 0.09 \text{ [Wb]}; I_1 = 0.3464 \text{ [A]}$$

$$P_3: \Psi_3 = 0.7826 \text{ [Wb]}; I_3 = 3.1176 \text{ [A]}$$

$$P_5: \Psi_5 = 1.033 \text{ [Wb]}; I_5 = 4.33 \text{ [A]}$$

$$P_7: \Psi_7 = 1.225 \text{ [Wb]}; I_7 = 5.542 \text{ [A]}$$

$$P_9: \Psi_9 = 1.417 \text{ [Wb]}; I_9 = 7.794 \text{ [A]}$$

$$P_{11}: \Psi_{11} = 1.618 \text{ [Wb]}; I_{11} = 13.337 \text{ [A]}$$

și rezultă astfel sistemul:

$$0.09a_1 + [0.09]^3 a_3 + [0.09]^5 a_5 + [0.09]^7 a_7 + [0.09]^9 a_9 + [0.09]^{11} a_{11} = 0.34$$

$$0.78a_1 + [0.78]^3 a_3 + [0.78]^5 a_5 + [0.78]^7 a_7 + [0.78]^9 a_9 + [0.78]^{11} a_{11} = 3.11$$

$$1.03a_1 + [1.03]^3 a_3 + [1.03]^5 a_5 + [1.03]^7 a_7 + [1.03]^9 a_9 + [1.03]^{11} a_{11} = 4.33$$

$$1.22a_1 + [1.22]^3 a_3 + [1.22]^5 a_5 + [1.22]^7 a_7 + [1.22]^9 a_9 + [1.22]^{11} a_{11} = 5.54$$

$$1.41a_1 + [1.41]^3 a_3 + [1.41]^5 a_5 + [1.41]^7 a_7 + [1.41]^9 a_9 + [1.41]^{11} a_{11} = 7.79$$

$$1.61a_1 + [1.61]^3 a_3 + [1.61]^5 a_5 + [1.61]^7 a_7 + [1.61]^9 a_9 + [1.61]^{11} a_{11} = 13.33$$

cu soluțiile:

$$a_{11} = -9.2275 \times 10^{-2}, a_7 = -1.6555, a_5 = 1.6081, a_3 = -0.2988, a_1 = 3.848, a_9 = 0.74955$$

Pentru coeficientul $A = \frac{\sqrt{3}U}{\omega} = \frac{\sqrt{3}220}{314} = \frac{380}{314} = 1.2102$ se obțin valorile coeficienților B_K :

$$B_1 = 5.139, B_3 = -0.23, B_5 = 1.08, B_7 = -7.96 \times 10^{-3}, B_9 = 8.21 \times 10^{-3}, B_{11} = 7.34 \times 10^{-4}$$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este de forma:

$$i_m(t) = 5.1399\sin(\omega t) - 0.23385\sin(3\omega t) + 1.0818\sin(5\omega t) -$$

$$-7.9671 \times 10^{-3}\sin(7\omega t) + 8.2197 \times 10^{-3}\sin(9\omega t) + 7.3487 \times 10^{-4}\sin(11\omega t)$$

După fundamentală cea mai importantă armonică este armonică a 5-a.

Urmează apoi ca și valoare armonică a 3-a, a 7-a și cu un ordin de mărime mai mici armonicile 9 și 11.

Fundamentală curentului statoric $i_s(1)$ are valoarea:

-în cazul 1) -liniarizarea curbelor de magnetizare -

$$\begin{aligned} i_s(1) &= \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{I_q}{I_d}\right) = \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{3.6253^2 + 7.5965^2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{7.5965}{-3.6253}\right) = \\ &= 6.872\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} - 1.1255\right) = 6.872\sin(\omega t + 0.4445) \end{aligned}$$

În final compoziția armonică este:

$$\begin{aligned} i_s(t) &= 11.7\sin(\omega t + 0.26) - 0.23385\sin(3\omega t) + 1.0818\sin(5\omega t) - \\ &- 7.9671 \times 10^{-3}\sin(7\omega t) + 8.2197 \times 10^{-3}\sin(9\omega t) + 7.3487 \times 10^{-4}\sin(11\omega t) \end{aligned}$$

-în cazul 2) -iterativ -

$$\begin{aligned} i_s(1) &= \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{I_q}{I_d}\right) = \\ &= \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{0.37411^2 + 10.3^2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{10.3}{0.37411}\right) = \\ &= 8.4172\sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + 1.5345\right) = 8.4172\sin(\omega t + 3.1045) \end{aligned}$$

În final compoziția armonică este:

$$\begin{aligned} i_s(t) &= -8.3\sin(\omega t - 0.0036) - 0.23385\sin(3\omega t) + 1.0818\sin(5\omega t) - \\ &- 7.9671 \times 10^{-3}\sin(7\omega t) + 8.2197 \times 10^{-3}\sin(9\omega t) + 7.3487 \times 10^{-4}\sin(11\omega t) \end{aligned}$$

La alte valori ale tensiunii U compoziția armonică se schimbă și ponderea diferitelor armonici este alta.

Metoda prezentată oferă posibilitatea calculării armonicilor curentului absorbit din rețea la diferite valori ale tensiunii de alimentare considerată sinusoidală.

Este posibil a se avea în considerare și alimentarea mașinii saturate prin curenți

sinusoidali și în acest caz armonicile superioare apar în tensiunea de la borne.

Concluzii.

- 1) Atât la MA cât și la MS prin modificarea tensiunii de alimentare U se poate crește gradul de saturație al circuitului magnetic.
- 2) Circuitul magnetic saturat generează armonici superioare calculate în funcție de gradul de saturație.
- 3) Așa cum se observă, la o aceeași tensiune la borne U , saturația magnetică la MA generează un curent statoric $i_s(t)$ cu următoarea compoziție armonică:

$$i_s(t) = 20.47\sin\omega t - 1.744\sin(3\omega t) + 6.6913\sin(5\omega t) - 0.27312\sin(7\omega t) + \\ + 2.2940 \times 10^{-2}\sin(9\omega t) + 2.6119 \times 10^{-2}\sin(11\omega t)$$

iar la MS compoziția armonică este:

$$i_s(t) = 11.7\sin(\omega t + 0.26) - 0.23385\sin(3\omega t) + 1.0818\sin(5\omega t) - \\ - 7.9671 \times 10^{-3}\sin(7\omega t) + 8.2197 \times 10^{-3}\sin(9\omega t) + \\ + 7.3487 \times 10^{-4}\sin(11\omega t)$$

4) Deoarece cuplul electromagnetic depinde de U^2 la MA și de U la MS, modificările tensiunii de alimentare se manifestă mai pregnant la MA față de MS atât în cuplu cât și în gradul de saturație al mașinii, observându-se că amplitudinile armonicilor superioare la MA sunt mai mari față de MS.

5) Așa cum era cunoscut în literatura de specialitate [D2; S1] consumatorul neliniar (motorul asincron) primește din rețeaua de tensiune sinusoidală putere activă pe fundamentală:

$$P_1 = UI_s(1)\cos\varphi_1$$

din care consumă o parte, restul de putere activă ($\sum_{K=2}^{\infty} P_K$) o debitează prin armonici în rețeaua de alimentare, adică la alți consumatori care pot fi liniari sau neliniari.

MA

- 8) Modelul matematic la MS este scris în fluxuri și nu în inductanțe ,deoarece acestea sunt variabile ,depinzând de curentul de magnetizare.
- 9) Se folosește caracteristica de magnetizare neliniară $\psi_m = f(I_m)$ dată tabelar.
- 10) Pentru determinarea caracteristicii de magnetizare este necesară cunoașterea inductivității de dispersie statorice ,care se face printr-o alimentare adecvata a MA.
- 11) Cunoscând caracteristica de magnetizare $\psi_m = f(I_m)$, la o tensiune la borne dată ,sinusoidală și la funcționarea în gol se determină compoziția armonică a curentului de magnetizare.
- 12) Această compoziție armonică a curentului de magnetizare nu se modifică în sarcină deoarece fluxul ψ_m rămâne constant, dacă tensiunea nu se modifică.
- 13) Caracteristica de magnetizare $\psi_m = f(I_m)$ se aproximează printr-un polinom de gradul 15 sau 11 rezultând astfel armonici până la ordinul 15 sau 11.

MS

- 14) La MS sunt necesare două caracteristici de magnetizare $\psi_{md} = f(I_m)$ și $\psi_{mq} = f(I_m)$, după cele două axe ortogonale ale mașinii.
- 15) Inductanțele de dispersie care intervin în relația de calcul a cuplului sunt puțin

influențate de gradul de saturație și în acest capitol se dau metodele de calcul al lor.

16) Cunoscând caracteristica de magnetizare $\psi_m = f(I_m)$ rezultanta se poate calcula compoziția armonică a curentului de magnetizare.

17) Determinarea caracteristicii de magnetizare rezultante $\psi_m = f(I_m)$ este o problemă complexă și se dă în capitolele următoare o metodologie de calcul a ei.

3. DETERMINAREA ARMONICILOR LA MA ȘI MS

Cunoscând mărimile de intrare: tensiune, cuplu electromagnetic și curent de excitație (la MS), în acest capitol, se indică modul de calcul al armonicilor curentului de magnetizare, deduse din caracteristica de magnetizare, $\Psi_m = f(I_m)$ dedusă experimental în capitolul anterior.

Caracteristica de magnetizare $\Psi_m = f(I_m)$ se aproximează prin polinoame de gradul 11, obținându-se armonici de ordinul 1-11.

Se analizează compoziția armonică a curentului de magnetizare la diverse valori ale tensiunii de alimentare și la încărcări variabile. Dacă tensiunea nu se modifică compoziția armonică este aceeași indiferent de valoarea cuplului.

La MS problema fundamentală este determinarea caracteristicii magnetice rezultante din caracteristicile deduse experimental $\Psi_{md} = f(I_m)$ și $\Psi_{mq} = f(I_m)$ și cunoscând datele de intrare: tensiune, cuplu, curent de excitație.

Dacă la MA această caracteristică $\Psi_m = f(I_m)$ este fixă și se poate deduce experimental, la MS caracteristica $\Psi_m = f(I_m)$ depinde de încărcare și se modifică o dată cu aceasta.

Este prezentată în acest capitol o metodă originală de calcul a acestei caracteristici.

Forma de variație în timp a curentului statoric este nesinusoidală la o mașină electrică saturată. Forma de variație în timp a curentului statoric oferă o cunoaștere destul de precisă a distribuției câmpului magnetic din întrefier și a **gradului de saturație**.

La **motoarele electrice saturate** se impune o analiză a compoziției armonice a **curentului absorbit** care dă o informație asupra gradului de saturație a miezului feromagnetic.

3.1 Mașina asincronă

La tensiunea la borne dată, **U**, se poate calcula fluxul util din mașină la funcționarea în gol. Modificând valoarea tensiunii de la borne se poate ridica curba de magnetizare $\Psi_m(I_m)$ pe zona nesaturată și saturată.

Funcția $I_m(t)$ fiind dată tabelar se impune o analiză Fourier discretă cu armonicile superioare ($K \geq 2$) calculate astfel:

$$i_m(t) = \sum_{K=2}^{\infty} I_m(K) \sin(K\omega t)$$

Precizări:

1) Așa cum era cunoscut în literatura de specialitate [D2; S1] consumatorul neliniar (motorul asincron) primește din rețeaua de tensiune sinusoidală putere

activă pe fundamentală:

$$P_1 = UI_s(1)\cos\varphi_1$$

din care consumă o parte, restul de putere activă ($\sum_{K=2}^{\infty} P_K$) o debitează prin armonici în rețeaua de alimentare, adică la alți consumatori care pot fi liniari sau neliniari.

SATURAȚIA MAGNETICĂ LA MAȘINA ASINCRONĂ

Rezultate numerice pentru o MA cu datele: $P_N = 3[kW]$,

$$U_N = 380/220[V], I_N = 6[A], n_N = 2970[rpm]$$

Curba experimentală $\psi_m(I_m)$ s-a dedus la capitolul anterior și din ea se obține curentul de magnetizare I_m .

3.1.1 Compoziția armonică la motorul asincron

Calculul performanțelor la un MA saturat, alimentat de la tensiunea U și la un cuplu electromagnetic M_{elmg} dat se bazează pe următorul procedeu:

1) din

$$U = \omega\psi_m$$

se obține fluxul util ψ_m ;

2) din curbă experimentală $\psi_m(I_m)$ se obține curentul de magnetizare I_m ;

3) din sistemul de 7 ecuații:

$$0 = R_2(I_{md} - I_d) - s\omega_1[\Psi_{mq}]$$

$$0 = R_2(I_{mq} - I_q) - s\omega_1[\Psi_{md}]$$

$$\Psi_m = \sqrt{\Psi_{md}^2 + \Psi_{mq}^2}$$

$$\Psi_{md} = \frac{\Psi_m}{I_m} I_{md}$$

$$\Psi_{mq} = \frac{\Psi_m}{I_m} I_{mq}$$

$$I_m = \sqrt{I_{md}^2 + I_{mq}^2}$$

$$M_{elmg} = p_1(I_q\Psi_{md} - I_d\Psi_{mq}) - \text{ecuația cuplului}$$

se obțin necunoscutele: $\Psi_{md}, I_{md}, \Psi_{mq}, I_{mq}, s, I_q, I_d$.

4) se obține curentul real din relația precizată anterior:

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$$

3.1.2 Compoziția armonică a curentului la tensiune la borne variabilă și cuplu rezistent constant

U - variabil

$$M_{elmg} = M_{rez} = ct$$

La modificarea tensiunii la borne U compoziția armonică a curentului se schimbă. Calculul armonicilor curentului absorbit de **MA** are în vedere că la acest tip de motor există o singură curbă de magnetizare $\psi_m(I_m)$

Cazul 1

$$\mathbf{U} = 220 [\mathbf{V}]$$

Fiind date tensiunea la borne \mathbf{U} ($U = \sqrt{3} 220 = 380[V]$) și $M_{elmag} = M_{rez} = 20[Nm]$ cu relațiile 80 și 81 se pot calcula mărimile:

-fluxul magnetic ψ_m :

$$\psi_m = \frac{U}{\omega_1} = \frac{380}{314} = 1.21[Wb]$$

-curentul de magnetizare I_m : $I_m = 11.6[A]$ (din funcția $\psi_m = f(I_m)$ dedusă experimental)

-curentul statoric I_d :

$$I_d = -\frac{M_{elmag}}{p_1 \psi_m} = -\frac{20}{2 * 1.21} = -8.265[A]$$

-alunecarea s :

$$s = -\frac{R_2 I_d}{\omega_1 \psi_m} = \frac{1.6 * 8.265}{314 * 1.21} = 0.0348$$

Curentul statoric al fundamentalei impus de cuplul rezistent este:

$$i_s(1) = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sqrt{2} \sin(\omega t + \arctg \frac{I_q}{I_d})$$

și are valoarea:

$$i_s = 8.265 \sqrt{2} \sin \omega t$$

Numeric, sistemul în necunoscutele a_k , cu relațiile din paragraful 3.1.2, devine:

$$0.07a_1 + [0.07]^3 a_3 + [0.07]^5 a_5 + [0.07]^7 a_7 + [0.07]^9 a_9 + [0.07]^{11} a_{11} = 0.34$$

$$0.6a_1 + [0.6]^3 a_3 + [0.6]^5 a_5 + [0.6]^7 a_7 + [0.6]^9 a_9 + [0.6]^{11} a_{11} = 3.11$$

$$0.8a_1 + [0.8]^3 a_3 + [0.8]^5 a_5 + [0.8]^7 a_7 + [0.8]^9 a_9 + [0.8]^{11} a_{11} = 4.33$$

$$0.96a_1 + [0.96]^3 a_3 + [0.96]^5 a_5 + [0.96]^7 a_7 + [0.96]^9 a_9 + [0.96]^{11} a_{11} = 5.54$$

$$1.1a_1 + [1.1]^3 a_3 + [1.1]^5 a_5 + [1.1]^7 a_7 + [1.1]^9 a_9 + [1.1]^{11} a_{11} = 7.79$$

$$1.21a_1 + [1.21]^3 a_3 + [1.21]^5 a_5 + [1.21]^7 a_7 + [1.21]^9 a_9 + [1.21]^{11} a_{11} = 11.6$$

cu soluțiile:

$$a_1 = 4.9468, a_3 = -0.84287, a_5 = 9.1345, a_7 = -18.224, a_9 = 14.264, a_{11} = -3.2797$$

Pentru coeficientul $A = \frac{380}{314} = 1.2102$ se obțin valorile coeficienților B_k :

$$B_1 = 8.8203, B_3 = -1.744, B_5 = 6.6913, B_7 = -0.27312, B_9 = 2.2940 \times 10^{-2}, B_{11} = 2.6119 \times 10^{-2}$$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este de forma:

$$i_m(t) = 8.8203 + \sin(\omega t) - 1.744 \sin(3\omega t) + \\ 6.6913 \sin(5\omega t) - 0.27312 \sin(7\omega t) + \\ 2.2940 \times 10^{-2} \sin(9\omega t) + 2.6119 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

După fundamentală cea mai importantă armonică este armonica a 5-a.

Cazul 2

$$\mathbf{U} = 230 [\mathbf{V}]$$

Fiind date tensiunea la borne \mathbf{U} ($U = \sqrt{3} 230 = 398.37[V]$) și $M_{elmag} = M_{rez} = 20[Nm]$ se pot calcula marimile, ca și în cazul anterior.

-fluxul magnetic ψ_m :

$$\psi_m = \frac{U}{\omega_1} = \frac{398.37}{314} = 1.2687[\text{Wb}]$$

-curentul de magnetizare I_m :

$I_m = 13.5[\text{A}]$ (din funcția $\psi_m = f(I_m)$ dedusă experimental)

-curentul statoric I_d :

$$I_d = -\frac{M_{elmag}}{p_1 \psi_m} = -\frac{20}{2 * 1.26} = -7.93[\text{A}]$$

-alunecarea s :

$$s = -\frac{R_2 I_d}{\omega_1 \psi_m} = \frac{1.6 * 7.93}{314 * 1.26} = 0.032$$

Curentul statoric al fundamentalei impus de cuplul rezistent este:

$$i_s(1) = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sqrt{2} \sin(\omega t + \arctg \frac{I_q}{I_d})$$

și are valoarea:

$$i_s = 15.657 \sqrt{2} \sin \omega t$$

Sistemul în necunoscutele a_k fiind:

$$0.07a_1 + [0.07]^3 a_3 + [0.07]^5 a_5 + [0.07]^7 a_7 + [0.07]^9 a_9 + [0.07]^{11} a_{11} = 0.34$$

$$0.6a_1 + [0.6]^3 a_3 + [0.6]^5 a_5 + [0.6]^7 a_7 + [0.6]^9 a_9 + [0.6]^{11} a_{11} = 3.11$$

$$0.8a_1 + [0.8]^3 a_3 + [0.8]^5 a_5 + [0.8]^7 a_7 + [0.8]^9 a_9 + [0.8]^{11} a_{11} = 4.33$$

$$0.96a_1 + [0.96]^3 a_3 + [0.96]^5 a_5 + [0.96]^7 a_7 + [0.96]^9 a_9 + [0.96]^{11} a_{11} = 5.54$$

$$1.1a_1 + [1.1]^3 a_3 + [1.1]^5 a_5 + [1.1]^7 a_7 + [1.1]^9 a_9 + [1.1]^{11} a_{11} = 7.79$$

$$1.26a_1 + [1.26]^3 a_3 + [1.26]^5 a_5 + [1.26]^7 a_7 + [1.26]^9 a_9 + [1.26]^{11} a_{11} = 13.5$$

are soluțiile:

$$a_{11} = -4.4302, a_5 = 11.002, a_3 = -1.1475, a_7 = -22.242, a_9 = 17.873, a_1 = 4.9482$$

Pentru coeficientul $A = \frac{398.4}{314} = 1.2688$ se obțin valorile coeficienților B_k :

$$B_1 = 10.287, B_3 = -2.4767, B_5 = 10.053, B_7 = -0.25059, B_9 = -0.05792,$$

$$B_{11} = 5.9354 \times 10^{-2}$$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este de forma:

$$i_m(t) = 10.287 \sin(\omega t) - 2.4767 \sin(3\omega t) + 10.053 \sin(5\omega t) - \\ -0.25059 \sin(7\omega t) - 0.05792 \sin(9\omega t) + 5.9354 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Cea mai importantă armonică este armonica a 5-a.

Urmează apoi ca și valoare armonică a 3-a, a 7-a și cu un ordin de mărime mai mici armonicile 9 și 11.

Cazul 3

$$U = 240 [\text{V}]$$

La tensiunea la borne U ($U = \sqrt{3} 240 = 415.69[\text{V}]$) și $M_{elmag} = M_{rez} = 20[\text{Nm}]$ se pot calcula mărimile:

-fluxul magnetic ψ_m :

$$\psi_m = \frac{U}{\omega_1} = \frac{415.7}{314} = 1.32[\text{Wb}]$$

-curentul de magnetizare I_m :

$I_m = 14.144[A]$ (din funcția $\psi_m = f(I_m)$ dedusă experimental)

-curentul statoric I_d :

$$I_d = -\frac{M_{elmag}}{p_1 \psi_m} = -\frac{20}{2 * 1.32} = -7.575[A]$$

-alunecarea s :

$$s = -\frac{R_2 I_d}{\omega_1 \psi_m} = \frac{1.6 * 7.575}{314 * 1.32} = 0.0292$$

Curentul statoric al fundamentalei impus de cuplul rezistent este:

$$i_s(1) = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sqrt{2} \sin(\omega t + \arctg \frac{I_q}{I_d})$$

și are valoarea:

$$i_s = 16.045 \sqrt{2} \sin \omega t$$

Sistemul în necunoscutele a_k devine:

$$0.07a_1 + [0.07]^3 a_3 + [0.07]^5 a_5 + [0.07]^7 a_7 + [0.07]^9 a_9 + [0.07]^{11} a_{11} = 0.34$$

$$0.6a_1 + [0.6]^3 a_3 + [0.6]^5 a_5 + [0.6]^7 a_7 + [0.6]^9 a_9 + [0.6]^{11} a_{11} = 3.11$$

$$0.8a_1 + [0.8]^3 a_3 + [0.8]^5 a_5 + [0.8]^7 a_7 + [0.8]^9 a_9 + [0.8]^{11} a_{11} = 4.33$$

$$0.96a_1 + [0.96]^3 a_3 + [0.96]^5 a_5 + [0.96]^7 a_7 + [0.96]^9 a_9 + [0.96]^{11} a_{11} = 5.54$$

$$1.1a_1 + [1.1]^3 a_3 + [1.1]^5 a_5 + [1.1]^7 a_7 + [1.1]^9 a_9 + [1.1]^{11} a_{11} = 7.79$$

$$1.32a_1 + [1.32]^3 a_3 + [1.32]^5 a_5 + [1.32]^7 a_7 + [1.32]^9 a_9 + [1.32]^{11} a_{11} = 14.14$$

cu soluțiile:

$$a_3 = -1.4971, a_5 = 13.145, a_7 = -26.853, a_9 = 4.9499, a_{11} = 22.013,$$

$$a_{11} = -5.7504$$

Pentru coeficientul $A = \frac{415.7}{314} = 1.3239$ se obțin valorile coeficienților B_k :

$$B_1 = 11.232, B_3 = -2.6923, B_5 = 14.156, B_7 = 8.5393 \times 10^{-2},$$

$$B_9 = -0.27836, B_{11} = 0.12297$$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este de forma:

$$i_m(t) = 11.232 \sin(\omega t) - 2.6923 \sin(3\omega t) + 14.156 \sin(5\omega t) +$$

$$+ 8.5393 \times 10^{-2} \sin(7\omega t) - 0.27836 \sin(9\omega t) + 0.12297 \sin(11\omega t)$$

După fundamentală cea mai importantă armonică este armonică a 5-a.

Cazul 4

$$U = 250 [V]$$

Fiind date tensiunea la borne U ($U = \sqrt{3} 250 = 433.01[V]$) și $M_{elmag} = M_{rez} = 20[Nm]$ se calculează mărimile:

-fluxul magnetic ψ_m :

$$\psi_m = \frac{U}{\omega_1} = \frac{433}{314} = 1.377[Wb]$$

-curentul de magnetizare I_m :

$I_m = 14.755[A]$ (din funcția $\psi_m = f(I_m)$ dedusă experimental)

-curentul statoric I_d :

$$I_d = -\frac{M_{elmag}}{p_1 \psi_m} = -\frac{20}{2 * 1.377} = -7.26[A]$$

-alunecarea s :

$$s = -\frac{R_2 I_d}{\omega_1 \psi_m} = \frac{1.6 * 7.26}{314 * 1.37} = 0.0268$$

Curentul statoric al fundamentalei impus de cuplul rezistent este:

$$i_s(1) = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sqrt{2} \sin(\omega t + \arctg \frac{I_q}{I_d})$$

și are valoarea:

$$i_s = 16.444 \sqrt{2} \sin \omega t$$

Numeric sistemul în necunoscutele a_k devine:

$$0.07a_1 + [0.07]^3 a_3 + [0.07]^5 a_5 + [0.07]^7 a_7 + [0.07]^9 a_9 + [0.07]^{11} a_{11} = 0.34$$

$$0.6a_1 + [0.6]^3 a_3 + [0.6]^5 a_5 + [0.6]^7 a_7 + [0.6]^9 a_9 + [0.6]^{11} a_{11} = 3.11$$

$$0.8a_1 + [0.8]^3 a_3 + [0.8]^5 a_5 + [0.8]^7 a_7 + [0.8]^9 a_9 + [0.8]^{11} a_{11} = 4.33$$

$$0.96a_1 + [0.96]^3 a_3 + [0.96]^5 a_5 + [0.96]^7 a_7 + [0.96]^9 a_9 + [0.96]^{11} a_{11} = 5.54$$

$$1.1a_1 + [1.1]^3 a_3 + [1.1]^5 a_5 + [1.1]^7 a_7 + [1.1]^9 a_9 + [1.1]^{11} a_{11} = 7.79$$

$$1.37a_1 + [1.37]^3 a_3 + [1.37]^5 a_5 + [1.37]^7 a_7 + [1.37]^9 a_9 + [1.37]^{11} a_{11} = 14.75$$

cu soluțiile:

$$a_1 = 4.9495, a_{11} = -5.4351, a_7 = -25.751, a_5 = 12.633, a_3 = -1.4136, a_9 = 21.024$$

Pentru coeficientul $A = \frac{433}{314} = 1.379$ se obțin valorile coeficienților B_k :

$$B_1 = 12.386, B_3 = -2.97, B_5 = 16.26, B_7 = 0.497, B_9 = -0.52, B_{11} = 0.182$$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este de forma:

$$i_m(t) = 12.386 \sin(\omega t) - 2.97 \sin(3\omega t) + 16.261 \sin(5\omega t) + 0.49764 \sin(7\omega t) + \\ -0.5212 \sin(9\omega t) + 0.18202 \sin(11\omega t)$$

Cea mai importantă armonică este armonică a 5-a.

Cazul 5

$$U = 260 [V]$$

Fiind date tensiunea la borne U ($U = \sqrt{3} 260 = 450.33 [V]$) și $M_{elmag} = M_{rez} = 20 [Nm]$ se pot calcula mărimile:

-fluxul magnetic ψ_m :

$$\psi_m = \frac{U}{\omega_1} = \frac{450.33}{314} = 1.434 [Wb]$$

-curentul de magnetizare I_m :

$$I_m = 15.35 [A] \text{ (din funcția } \psi_m = f(I_m) \text{ dedusă experimental)}$$

-curentul statoric I_d :

$$I_d = -\frac{M_{elmag}}{p_1 \psi_m} = -\frac{20}{2 * 1.434} = -6.98 [A]$$

-alunecarea s :

$$s = -\frac{R_2 I_d}{\omega_1 \psi_m} = \frac{1.6 * 6.98}{314 * 1.434} = 0.0248$$

Curentul statoric al fundamentalei impus de cuplul rezistent este:

$$i_s(1) = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sqrt{2} \sin(\omega t + \arctg \frac{I_q}{I_d})$$

și are valoarea:

$$i_s = 16.842 \sqrt{2} \sin \omega t$$

Funcția $I_m(\psi_m)$ se poate aproxima printr-o expresie polinomială de grad 11 de forma:

$$i_m(t) = a_1\psi_m + a_2\psi_m^2 + a_3\psi_m^3 + a_4\psi_m^4 + a_5\psi_m^5 + a_6\psi_m^6 + a_7\psi_m^7 + a_8\psi_m^8 + \\ + a_9\psi_m^9 + a_{10}\psi_m^{10} + a_{11}\psi_m^{11}$$

Numeric sistemul în necunoscutele a_k devine:

$$0.07a_1 + [0.07]^3a_3 + [0.07]^5a_5 + [0.07]^7a_7 + [0.07]^9a_9 + [0.07]^{11}a_{11} = 0.34$$

$$0.6a_1 + [0.6]^3a_3 + [0.6]^5a_5 + [0.6]^7a_7 + [0.6]^9a_9 + [0.6]^{11}a_{11} = 3.11$$

$$0.8a_1 + [0.8]^3a_3 + [0.8]^5a_5 + [0.8]^7a_7 + [0.8]^9a_9 + [0.8]^{11}a_{11} = 4.33$$

$$0.96a_1 + [0.96]^3a_3 + [0.96]^5a_5 + [0.96]^7a_7 + [0.96]^9a_9 + [0.96]^{11}a_{11} = 5.54$$

$$1.1a_1 + [1.1]^3a_3 + [1.1]^5a_5 + [1.1]^7a_7 + [1.1]^9a_9 + [1.1]^{11}a_{11} = 7.79$$

$$1.43a_1 + [1.43]^3a_3 + [1.43]^5a_5 + [1.43]^7a_7 + [1.43]^9a_9 + [1.43]^{11}a_{11} = 15.35$$

cu soluțiile:

$$a_9 = 19.414, a_3 = -1.2776, a_1 = 4.9488, a_{11} = -4.9215, a_5 = 11.800, a_7 = -23.958$$

Pentru coeficientul $A = \frac{450.33}{314} = 1.4342$ se obțin valorile coeficienților B_k :

$$B_1 = 13.55, B_3 = -3.1038, B_5 = 17.882, B_7 = 1.1089, B_9 = -0.84490, B_{11} = 0.25381$$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este de forma:

$$i_{m(t)} = 13.55\sin(\omega t) - 3.1038\sin(3\omega t) + 17.882\sin(5\omega t) + 1.1089\sin(7\omega t) + \\ -0.84490\sin(9\omega t) + 0.25381\sin(11\omega t)$$

După fundamentală cea mai importantă armonică este armonică a 5-a.

Observație importantă: **metoda aproximărilor polinomiale introduce erori mari deoarece ,în realitate ,armonicile superioare sunt mult mai mici așa cum se va vedea în capitolele următoare.**

3.1.3 Compoziția armonică a curentului la cuplu variabil și tensiune constantă

La modificarea cuplului, compoziția armonică a curentului se schimbă.

Calculul armonicilor curentului absorbit de **MA** are în vedere diverse valori ale cuplului.

$$U = 200[V]$$

M_{elmg} - variabil

Cazul 1:

$$M_{elmg} = 10 [Nm]$$

$$\psi_m = \frac{380}{314} = 1.21 [Wb]$$

$$I_q = I_m = 11.6 [A]$$

$$I_d = \frac{10}{2 \cdot 1.21} = 4.132 [A]$$

$$s = 0.017$$

Sistemul în necunoscutele a_k devine:

$$0.07a_1 + [0.07]^3 a_3 + [0.07]^5 a_5 + [0.07]^7 a_7 + [0.07]^9 a_9 + [0.07]^{11} a_{11} = 0.346$$

$$0.6a_1 + [0.6]^3 a_3 + [0.6]^5 a_5 + [0.6]^7 a_7 + [0.6]^9 a_9 + [0.6]^{11} a_{11} = 3.118$$

$$0.8a_1 + [0.8]^3 a_3 + [0.8]^5 a_5 + [0.8]^7 a_7 + [0.8]^9 a_9 + [0.8]^{11} a_{11} = 4.33$$

$$0.96a_1 + [0.96]^3 a_3 + [0.96]^5 a_5 + [0.96]^7 a_7 + [0.96]^9 a_9 + [0.96]^{11} a_{11} = 5.542$$

$$1.1a_1 + [1.1]^3 a_3 + [1.1]^5 a_5 + [1.1]^7 a_7 + [1.1]^9 a_9 + [1.1]^{11} a_{11} = 7.794$$

$$1.21a_1 + [1.21]^3 a_3 + [1.21]^5 a_5 + [1.21]^7 a_7 + [1.21]^9 a_9 + [1.21]^{11} a_{11} = 11.6$$

cu soluțiile:

$$a_9 = 14.104, a_3 = -0.82936, a_1 = 4.9467, a_{11} = -3.2287, a_5 = 9.0517, a_7 = -18.046$$

Pentru coeficientul $A = \frac{220 \cdot 1.73}{314} = 1.2121$ se obțin valorile coeficienților B_k :

$$B_1 = 8.8714, B_3 = -1.7728, B_5 = 6.698, B_7 = -0.27752, B_9 = 0.023366,$$

$$B_{11} = 0.026161$$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este de forma:

$$i_m(t) = 8.8714 \sin(\omega t) - 1.7728 \sin(3\omega t) + 6.698 \sin(5\omega t) - 0.27752 \sin(7\omega t) + \\ + 0.023366 \sin(9\omega t) + 0.026161 \sin(11\omega t)$$

Amplitudinea curentului fundamentalei datorat sarcinii are valoarea:

$$I_1 = \sqrt{2} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = 1.41 \sqrt{11.6^2 + 4.132^2} = 17.363[A]$$

Compoziția armonică a curentului rezultat este

$$i_m(t) = 26.1 \sin(\omega t) - 1.7728 \sin(3\omega t) + 6.698 \sin(5\omega t) - 0.27752 \sin(7\omega t) + \\ + 0.023366 \sin(9\omega t) + 0.026161 \sin(11\omega t)$$

Cazul 2:

$$\mathbf{M}_{elmg} = 20[\text{Nm}]$$

$$\psi_m = \frac{380}{314} = 1.21[\text{Wb}]$$

$$I_q = I_m = 11.6[A]$$

$$I_d = -8.265[A]$$

$$s = 0.0348$$

Deoarece ψ_m nu depinde de cuplu, **compoziția armonică a curentului de magnetizare este aceeași la diverse valori ale cuplului:**

$$i_m(t) = 8.8714 \sin(\omega t) - 1.7728 \sin(3\omega t) + 6.698 \sin(5\omega t) - \\ - 0.27752 \sin(7\omega t) + 0.023366 \sin(9\omega t) + 0.026161 \sin(11\omega t)$$

Amplitudinea curentului fundamentalei are valoarea:

$$I_1 = \sqrt{2} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = 1.41 \sqrt{11.6^2 + 8.265^2} = 20.083[A]$$

Cazul 3:

$$\mathbf{M}_{elmg} = 30[\text{Nm}]$$

$$\psi_m = \frac{380}{314} = 1.21[\text{Wb}]$$

$$I_q = I_m = 11.6[A]$$

$$I_d = 12.4[A]$$

$$s = 0.052$$

Amplitudinea curentului fundamentalei are valoarea:

$$I_1 = \sqrt{2} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = 1.41 \sqrt{11.6^2 + 12.4^2} = 23.942[A]$$

Cazul 4:

$$M_{elm\grave{a}} = 40[Nm]$$

$$\psi_m = \frac{380}{314} = 1.21[Wb]$$

$$I_q = I_m = 11.6[A]$$

$$I_d = 16.529[A]$$

$$s = 0.07$$

Amplitudinea curentului fundamentalei are valoarea:

$$I_1 = \sqrt{2} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = 1.41 \sqrt{11.6^2 + 16.529^2} = 22.472[A]$$

Cazul 5:

$$M_{elm\grave{a}} = 50[Nm]$$

$$\psi_m = \frac{380}{314} = 1.21[Wb]$$

$$I_q = I_m = 11.6[A]$$

$$I_d = 20.66[A]$$

$$s = 0.087$$

Amplitudinea curentului fundamentalei are valoarea:

$$I_1 = \sqrt{2} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} = 1.41 \sqrt{11.6^2 + 20.66^2} = 33.408[A]$$

În concluzie, amplitudinea curentului fundamentalei depinde de valorile cuplului, compoziția armonică a curentului de magnetizare fiind aceeași la diverse valori ale cuplului.

3.2 Mașina sincronă

La neglijarea rezistențelor statorice și a dispersiilor ($R_1, L_{d\sigma}, L_{q\sigma} \rightarrow 0$) se obține sistemul simplificat, sau:

$$-U\sqrt{3} \sin\theta = -\omega \frac{\psi_{mq1}}{I_m} I_q$$

$$U\sqrt{3} \cos\theta = \omega \frac{\psi_{md1}}{I_m} (I_d + K_E I_E)$$

$$M_{elmag} = p_1 \left[I_q \frac{\psi_{md1}}{I_m} (I_d + K_E I_E) - I_d \frac{\psi_{mq1}}{I_m} I_q \right]$$

sau:

$$3U^2 = \left(\frac{\omega}{I_m} \right)^2 \left[(\psi_{mq1} I_q)^2 + \psi_{md1}^2 (I_d + K_E I_E)^2 \right]$$

$$M_{elmag} = \frac{p_1}{I_m} I_q \left[\psi_{md1} (I_d + K_E I_E) - I_d \psi_{mq1} \right]$$

$$I_m^2 = (I_d + K_E I_E)^2 + I_q^2$$

$$\psi_{md} = f(I_m) - \text{experimental}$$

$$\psi_{mq} = g(I_m) - \text{experimental}$$

Datele inițiale sunt:

- tensiunea U ;
- curentul de excitație I_E ;
- cuplul electromagnetic = cuplul rezistent.

Din sistem rezultă necunoscutele:

- curentul statoric I_d ;
- curentul statoric I_q ;
- curentul statoric al fundamentalei:

$$i_s(1) = \sqrt{\frac{2}{3}} [I_d \cos(\omega t) - I_q \sin(\omega t)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2} + \arctg \frac{I_q}{I_d}\right)$$

- curentul de magnetizare I_m .

Așa cum s-a menționat la MA consumatorul neliniar (MS) primește din rețeaua de tensiune sinusoidală putere activă pe fundamentală: $P_1 = u(t)i_s(t)$,

din care consumă o parte, restul de putere activă ($\sum_{K=2} P_K$) o debitează prin armonici în rețeaua de alimentare, adică la alți consumatori care pot fi liniari sau neliniari.

Fluxurile utile ψ_{md} , ψ_{mq} fiind determinate de tensiunile U_d și U_q continue în model și sinusoidale în mașina reală:

$$\psi_{md} = \frac{U_q}{\omega}$$

$$\psi_{mq} = \frac{U_d}{\omega}$$

$$\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2 = 3\left(\frac{U}{\omega}\right)^2$$

rezultă o variație sinusoidală în mașina reală pentru fluxurile ψ_{md} , ψ_{mq} și

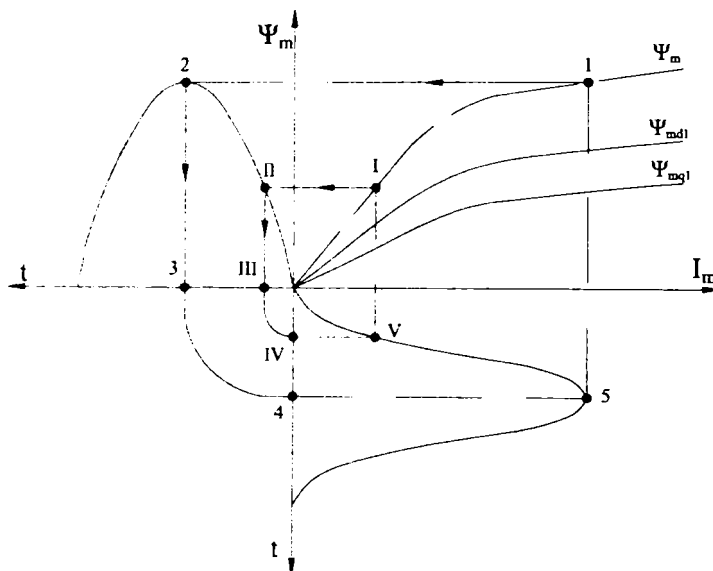
$$\psi_m = \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = U \frac{\sqrt{3}}{\omega}$$

sau

$$\psi_{m(t)} = U \frac{\sqrt{3}}{\omega} \sin \omega t = A \sin \omega t$$

La o variație sinusoidală pentru ψ_m se obține compoziția armonică a curentului statoric formată dintr-o sumă de armonici impare, așa cum s-a demonstrat și la MA saturată (figura 3.1).

Aceste armonici determină puterea deformată care apare la funcționarea mașinii sincrone în regim neliniar, saturată magnetic (L7).

Fig.3.1. Variația curentului I_m în timp

3.2.1 Determinarea caracteristicii magnetice rezultante

Problema determinării funcției $\psi_m(I_m)$ la MS este complexă și nu se poate determina experimental așa ca la MA.

Experimental, așa cum s-a arătat anterior, funcțiile $\psi_{md1(I_m)}$, $\psi_{mq1(I_m)}$ se găsesc pe baza unui procedeu clar.

Pentru determinarea caracteristicii magnetice rezultante se aleg diverse valori pentru tensiunea de alimentare U (57[V]..314[V])

A-zona saturată

Valoarea tensiunii U și a cuplului rezistent impune nivelul de saturație așa cum rezultă în continuare:

$$1 \quad U=220 \text{ [V]}$$

$$3(220)^2 = (314)^2(\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2)$$

$$\psi_{md} = \frac{\psi_{md1}}{I_m} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{\psi_{mq1}}{I_m} I_{mq}$$

$$\psi_{md1} = 0.058 I_m + 0.648$$

$$\psi_{mq1} = 0.058 I_m + 0.438$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_{mq}^2$$

$$I_{md} = I_d + I_E^*$$

$$2(I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq}) = 10$$

Cu notațiile

$\psi_{md} = a, \psi_{mq} = b, \psi_{md1} = c, \psi_{mq1} = d, I_{md} = f, I_m = g, I_d = l, I_q = m$; sistemul devine:

$$a^2 + b^2 = 1.4726$$

$$ag = cf$$

$$bg = dm$$

$$c = 0.058g + 0.648$$

$$d = 0.058g + 0.438$$

$$f^2 + m^2 = g^2$$

$$l + 12 = f$$

$$m * a - l * b = 5$$

și are soluțiile: $\left\{ \begin{array}{l} f = 9.5188, b = 0.35852, c = 1.2371, l = -2.4812, \\ d = 1.0271, a = 1.1593, g = \mathbf{I_m = 10.158}, m = 3.5455 \end{array} \right\}$

$$\mathbf{I_m = 10.158[A]}$$

$$\Psi_m = \sqrt{1.4726} [Wb]$$

2 U=242 [V]

Sistemul:

$$a^2 + b^2 = 1.8$$

$$ag = cf$$

$$bg = dm$$

$$c = 0.058g + 0.648$$

$$d = 0.058g + 0.438$$

$$f^2 + m^2 = g^2$$

$$l + 12 = f$$

$$m * a - l * b = 5$$

are soluțiile: $\left\{ \begin{array}{l} f = 11.682, b = 0.35378, m = 3.7767, l = -0.31767, \\ d = 1.1501, a = 1.2942, g = 12.78, c = 1.3601 \end{array} \right\}$

$$\mathbf{I_m = 12.278[A]}$$

$$\Psi_m = \sqrt{1.8} [Wb]$$

3 U=256 [V]

Din sistemul:

$$a^2 + b^2 = 2$$

$$ag = cf$$

$$bg = dm$$

$$c = 0.058g + 0.648$$

$$d = 0.058g + 0.438$$

$$f^2 + m^2 = g^2$$

$$l + 12 = f$$

$$m * a - l * b = 5$$

$$\text{se obțin soluțiile: } \left\{ \begin{array}{l} d = 1.2205, m = 3.8859, l = 0.91875, f = 12.919, \\ c = 1.4305, b = 0.35155, g = 13.491, a = 1.3698 \end{array} \right\}$$

$$\mathbf{I}_m = 13.491[A]$$

$$\Psi_{md} = \sqrt{2} [Wb]$$

4 U=286 [V]

Sistemul:

$$a^2 + b^2 = 2.5$$

$$ag = cf$$

$$bg = dm$$

$$c = 0.058g + 0.648$$

$$d = 0.058g + 0.438$$

$$f^2 + m^2 = g^2$$

$$l + 12 = f$$

$$m * a - l * b = 5$$

$$\text{are soluțiile: } \left\{ \begin{array}{l} l = 3.7805, a = 1.5425, b = 0.34734, c = 1.5936, \\ f = 15.78, d = 1.3836, m = 4.0927, g = 16.303 \end{array} \right\},,$$

$$\mathbf{I}_m = 16.303[A]$$

$$\Psi_m = \sqrt{2.5} [Wb]$$

5 U=314[V]

Rezolvând sistemul:

$$a^2 + b^2 = 3$$

$$ag = cf$$

$$bg = dm$$

$$c = 0.058g + 0.648$$

$$d = 0.058g + 0.438$$

$$f^2 + m^2 = g^2$$

$$l + 12 = f$$

$$m * a - l * b = 5$$

$$\text{se obțin soluțiile: } \left\{ \begin{array}{l} b = 0.34437, l = 6.3802, c = 1.7421, g = 18.863, \\ m = 4.2399, d = 1.5321, a = 1.6975, f = 18.38 \end{array} \right\}$$

$$\mathbf{I}_m = 18.863[A]$$

$$\Psi_m = \sqrt{3} [Wb]$$

B-zona nesaturată

1 La U=181[V] se obține:

$$a^2 + b^2 = 1$$

$$ag = cf$$

$$bg = dm$$

$$c = \frac{g}{6}$$

$$d = \frac{0.786g}{6}$$

$$f^2 + m^2 = g^2$$

$$l + 12 = f$$

$$m * a - l * b = 5$$

$$\text{având soluțiile: } \left\{ \begin{array}{l} b = 0.36988, m = 2.8235, a = 0.92908, f = 5.5745, \\ l = -6.4255, c = 1.0415, g = 6.2488, d = 0.81859 \end{array} \right\}$$

$$\mathbf{I}_m = 6.2488$$

$$\Psi_m = \sqrt{1}$$

2 U=128[V]

Din sistemul:

$$a^2 + b^2 = 0.5$$

$$ag = cf$$

$$bg = dm$$

$$c = \frac{g}{6}$$

$$d = \frac{0.786g}{6}$$

$$f^2 + m^2 = g^2$$

$$l + 12 = f$$

$$m * a - l * b = 5$$

$$\text{rezultă: } \left\{ \begin{array}{l} c = 0.76939, g = 4.6164, d = 0.60474, m = 2.9432, \\ l = -8.4435, b = 0.38556, a = 0.59275, f = 3.5565 \end{array} \right\}$$

$$\mathbf{I}_m = 4.6164$$

$$\Psi_m = \sqrt{0.5}$$

3 U=81[V]

Rezolvând sistemul:

$$a^2 + b^2 = 0.2$$

$$ag = cf$$

$$bg = dm$$

$$c = \frac{g}{6}$$

$$d = \frac{0.786g}{6}$$

$$f^2 + m^2 = g^2$$

$$l + 12 = f$$

$$m * a - l * b = 5$$

$$\text{se obține: } \left\{ \begin{array}{l} g = 3.2981, d = 0.43205, c = 0.54968, b = 0.40633, \\ a = 0.18680, f = 1.1208, l = -10.879, m = 3.1018 \end{array} \right\}$$

$$I_m = 3.2981$$

$$\psi_m = \sqrt{0.2}$$

4 U=57[V]

Sistemul:

$$a^2 + b^2 = 0.1$$

$$ag = cf$$

$$bg = dm$$

$$c = \frac{g}{6}$$

$$d = \frac{0.786g}{6}$$

$$f^2 + m^2 = g^2$$

$$l + 12 = f$$

$$m * a - l * b = 5$$

are soluțiile complexe.

S-a obținut astfel funcția $\psi_m = f(I_m)$ (figura 3.2)

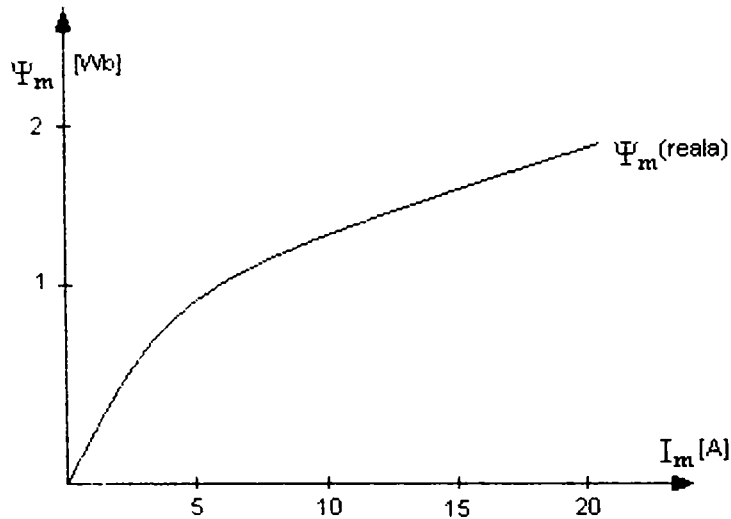


Fig.3.2.Caracteristica de magnetizare rezultantă $\psi_m(I_m)$

Caracteristica de magnetizare rezultantă $\psi_m(I_m)$, la funcționarea în sarcină, depinde de valoarea curentului de excitație (figura 3.3.) și a cuplului.

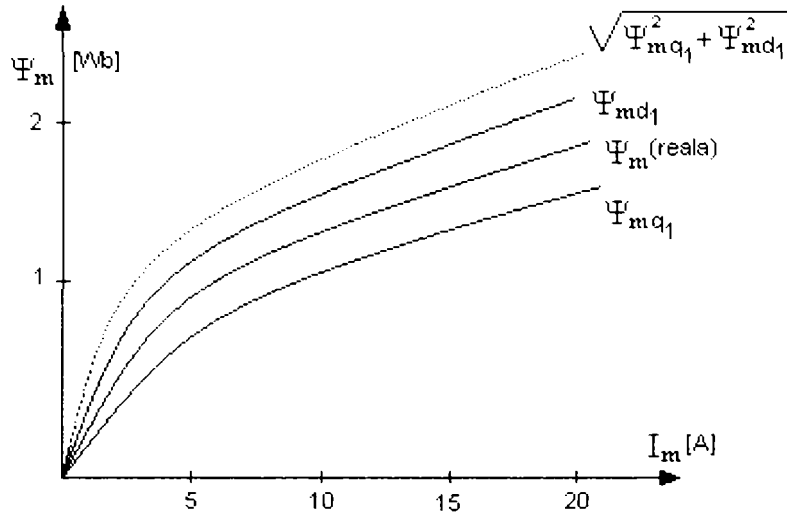


Fig.3.3.Caracteristicile de magnetizare la MS

3.2.2 Determinarea compoziției armonice prin aproximări polinomiale a caracteristicii magnetice rezultante

Tensiunea de alimentare este: $U = 220$ [V] și cuplul rezistent:

$M_{elmag} = 20$ [Nm]

Așa ca la MA funcția $I_m(\psi_m)$ se poate aproxima printr-o expresie polinomială de grad 11 de forma:

$$i_m(t) = a_1\psi_m + a_3\psi_m^3 + a_5\psi_m^5 + a_7\psi_m^7 + a_9\psi_m^9 + a_{11}\psi_m^{11}$$

La tensiune de alimentare de formă sinusoidală, fluxul ψ_m se poate scrie astfel:

$$\psi_m = A \sin(\omega t)$$

și expresia curentului $i_m(t)$ devine:

$$i_m(t) = B_1 \sin(\omega t) + B_3 \sin(3\omega t) + B_5 \sin(5\omega t) + B_7 \sin(7\omega t) + B_9 \sin(9\omega t) + B_{11} \sin(11\omega t)$$

unde coeficienții B_k se determină ca la MA.

La neglijarea rezistențelor statorice ($R_1 \rightarrow 0$) și a dispersiilor ($L_{1\sigma}, L_{2\sigma} \rightarrow \infty$) se obține sistemul simplificat:

$$-U\sqrt{3} \sin\theta = -\omega\psi_{mq}$$

$$U\sqrt{3} \cos\theta = \omega\psi_{md}$$

$$U_E = R_E I_E$$

$$M_{elmag} = p_1 (I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq})$$

$$\psi_{md} = \frac{\Psi_{md1}}{I_m} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{\Psi_{mq1}}{I_m} I_{mq}$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_{mq}^2$$

$$I_{md} = I_d + K_E I_E = I_d + I_E^*$$

$$I_{mq} = I_q$$

$\psi_{mq1} = f_1(I_m)$ -curbe experimentale

$\psi_{md1} = f_2(I_m)$ -curbe experimentale

sau:

$$3U^2 = \omega^2(\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2)$$

$$\psi_{md} = \frac{\psi_{md1}}{I_m} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{\psi_{mq1}}{I_m} I_{mq}$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_{mq}^2$$

$$I_{md} = I_d + I_E^*$$

$$I_{mq} = I_q$$

$$M_{el\text{mag}} = p_1(I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq}) = M_{rez}$$

$\psi_{mq1} = f_1(I_m)$ -curbe experimentale

$\psi_{md1} = f_2(I_m)$ -curbe experimentale

Curentul prin excitație I_E este cunoscut și deci $I_E^* = K_E I_E$ ($I_E^* = 12$ [A]) este dat. Prin urmare:

- U, M_{rez} -sunt date și

- $\psi_{md}, \psi_{mq}, \psi_{md1}, \psi_{mq1}, I_m, I_{md}, I_{mq}, I_d, I_q$ -sunt necunoscute.

Valoarea tensiunii U ($U = 220$ [V]) și a cuplului rezistent ($M_{rez} = 20$ [Nm]) impun nivelul de saturație așa cum rezultă în continuare:

$$3(220)^2 = (314)^2(\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2)$$

$$\psi_{md} = \frac{\psi_{md1}}{I_m} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{\psi_{mq1}}{I_m} I_{mq}$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_{mq}^2$$

$$I_{md} = I_d + I_E^*$$

$$2(I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq}) = 20$$

Deoarece funcțiile neliniare $\psi_{mq1} = f_1(I_m)$ și $\psi_{md1} = f_2(I_m)$ sunt date tabelar rezolvarea sistemului se poate face fie printr-un procedeu iterativ, fie liniarizând curbele de magnetizare ψ_{md1}, ψ_{mq1} în zona saturată.

De pe curba $\psi_m(I_m)$ (figura 2.9.a) la $\Psi_m = 1.618$ [Wb] :

$$I_m = a_1 \psi_m + a_3 \psi_m^3 + a_5 \psi_m^5 + a_7 \psi_m^7 + a_9 \psi_m^9 + a_{11} \psi_m^{11}$$

se obțin coordonatele punctelor $P(K)$:

$$P_1: \Psi_1 = 0.09 \text{ [Wb]}; I_1 = 0.3464 \text{ [A]}$$

$$P_3: \Psi_3 = 0.7826 \text{ [Wb]}; I_3 = 3.1176 \text{ [A]}$$

$$P_5: \Psi_5 = 1.033 \text{ [Wb]}; I_5 = 4.33 \text{ [A]}$$

$$P_7: \Psi_7 = 1.225 \text{ [Wb]}; I_7 = 5.542 \text{ [A]}$$

$$P_9: \Psi_9 = 1.417 \text{ [Wb]}; I_9 = 7.794 \text{ [A]}$$

$$P_{11}: \Psi_{11} = 1.618 [Wb]; I_{11} = 13.337 [A]$$

și rezultă astfel sistemul:

$$0.09a_1 + [0.09]^3 a_3 + [0.09]^5 a_5 + [0.09]^7 a_7 + [0.09]^9 a_9 + [0.09]^{11} a_{11} = 0.34$$

$$0.78a_1 + [0.78]^3 a_3 + [0.78]^5 a_5 + [0.78]^7 a_7 + [0.78]^9 a_9 + [0.78]^{11} a_{11} = 3.11$$

$$1.03a_1 + [1.03]^3 a_3 + [1.03]^5 a_5 + [1.03]^7 a_7 + [1.03]^9 a_9 + [1.03]^{11} a_{11} = 4.33$$

$$1.22a_1 + [1.22]^3 a_3 + [1.22]^5 a_5 + [1.22]^7 a_7 + [1.22]^9 a_9 + [1.22]^{11} a_{11} = 5.54$$

$$1.41a_1 + [1.41]^3 a_3 + [1.41]^5 a_5 + [1.41]^7 a_7 + [1.41]^9 a_9 + [1.41]^{11} a_{11} = 7.79$$

$$1.61a_1 + [1.61]^3 a_3 + [1.61]^5 a_5 + [1.61]^7 a_7 + [1.61]^9 a_9 + [1.61]^{11} a_{11} = 13.33$$

cu soluțiile

$$a_{11} = -9.2275 \times 10^{-2}, a_7 = -1.6555, a_5 = 1.6081, a_3 = -0.2988, a_1 = 3.8468, a_9 = 0.74955$$

Pentru coeficientul $A = \frac{\sqrt{3}U}{\omega} = \frac{\sqrt{3}220}{314} = \frac{380}{314} = 1.2102$ se obțin valorile coeficienților B_K :

$$B_1 = 5.139, B_3 = -0.233, B_5 = 1.08, B_7 = -7.96 \times 10^{-3}, B_9 = 8.21 \times 10^{-3}, B_{11} = 7.34 \times 10^{-4}$$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este de forma:

$$i_m(t) = 5.139\sin(\omega t) - 0.233\sin(3\omega t) + 1.081\sin(5\omega t) - 7.967 \times 10^{-3}\sin(7\omega t)$$

$$+ 8.2197 \times 10^{-3}\sin(9\omega t) + 7.3487 \times 10^{-4}\sin(11\omega t)$$

După fundamentală cea mai importantă armonică este armonica a 5-a.

Urmează apoi ca și valoare armonică a 3-a, a 7-a și cu un ordin de mărime mai mici armonicile 9 și 11.

La alte valori ale tensiunii U compoziția armonică se schimbă și ponderea diferitelor armonici este alta.

Metoda prezentată oferă posibilitatea calculării armonicilor curentului absorbit din rețea la diferite valori ale tensiunii de alimentare considerată sinusoidală.

Concluzii

1) Atât la MA cât și la MS prin modificarea tensiunii de alimentare U se poate crește gradul de saturație al circuitului magnetic.

2) Circuitul magnetic saturat generează armonici superioare calculate în funcție de gradul de saturație.

3) Așa cum se observă, la o aceeași tensiune la borne U , saturația magnetică la MA generează un curent statoric $i_s(t)$ cu următoarea compoziție armonică:

$$i_s(t) = 20.47\sin\omega t - 1.744\sin(3\omega t) + 6.6913\sin(5\omega t) - 0.27312\sin(7\omega t) + 2.2940 \times 10^{-2}\sin(9\omega t) + 2.6119 \times 10^{-2}\sin(11\omega t)$$

iar la MS compoziția armonică este:

$$i_s(t) = 11.7\sin(\omega t + 0.26) - 0.23385\sin(3\omega t) + 1.0818\sin(5\omega t) - 7.9671 \times 10^{-3}\sin(7\omega t) + 8.2197 \times 10^{-3}\sin(9\omega t) + 7.3487 \times 10^{-4}\sin(11\omega t)$$

4) Deoarece cuplul electromagnetic depinde de U^2 la MA și de U la MS, modificările tensiunii de alimentare se manifestă mai pregnant la MA față de MS atât în cuplu cât și în gradul de saturație al mașinii, observându-se că amplitudinile armonicilor superioare la MA sunt mai mari față de MS.

3.2.3 Determinarea compoziției armonice în regim de motor la MS MS cu poli plini:

Calculul performanțelor la un MS saturat, aliment de la tensiunea U și la un:

- cuplul electromagnetic M_{elm} dat;
 - curentul de excitație I_E fiind cunoscut,
- se bazează pe următorul procedeu:

1) fiindcă:

$$\Psi_{md1} = \Psi_{mq1} = \Psi_m$$

din

$$U = \omega \Psi_m$$

se obține fluxul util Ψ_m ;

2) din curba experimentală $\Psi_m(I_m)$ se obține curentul de magnetizare I_m ;

3) din cuplul electromagnetic M_{elm} se obține curentul statoric I_q :

$$I_q = \frac{I_m M_{elm}}{p_1 \Psi_m K_E I_E}$$

4) se obține curentul I_{mq} din relația precizată anterior:

$$I_{mq} = I_m$$

5) analog se obține curentul I_{md} din I_m :

$$I_{md} = \sqrt{I_m^2 - I_{mq}^2}$$

6) curentul I_d se obține din:

$$I_d = I_{md} - K_E I_E$$

7) în final se poate calcula curentul absorbit de MS saturat:

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$$

MS cu poli aparenti:

Calculul performanțelor la un MS saturat, aliment de la tensiunea U și la un :

- cuplul electromagnetic M_{elm} dat;
- curentul de excitație I_E fiind cunoscut,

se bazează pe următorul procedeu:

1) se alege un curent I_m în zona saturată și deci se cunosc experimental funcțiile $\Psi_{md1}(I_m)$ și $\Psi_{mq1}(I_m)$

2) din sistemul

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_{mq}^2$$

$$I_{md} = I_d + K_E I_E$$

$$I_{mq} = I_q$$

$$M_{elm} = \frac{p_1}{I_m} (I_q \Psi_{md1} I_{md} - I_d \Psi_{mq1} I_{mq}) \quad \text{- la MS cu poli aparenti}$$

se obțin necunoscutele: I_{md}, I_{mq}, I_d și I_q (curentul real $I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2}$)

3) se obțin fluxurile utile ψ_{md} și ψ_{mq} :

$$\psi_{md} = \frac{\Psi_{md1}}{I_m} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{\Psi_{mq1}}{I_m} I_{mq}$$

4) se calculează tensiunea la borne $U^2 = \omega^2(\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2)$

3.2.4 Compoziția armonică a curentului la tensiune la borne variabilă, cuplul rezistent și curentul de excitație fiind constanți

U – variabil

$$I_E = ct$$

$$M_{elm} = M_{rez} = 10 Nm$$

La modificarea tensiunii U compoziția armonică a curentului se schimbă. Calculul armonicilor curentului absorbit de **MS** are în vedere procedeul dat în continuare. În zona liniară se aproximează fluxul după cele două axe cu relațiile:

$$\Psi_{md1} = K_1 I_m$$

$$\Psi_{mq1} = K_2 I_m$$

și rezultă:

$$\Psi_{md} = K_1 I_{md}$$

$$\Psi_{mq} = K_2 I_{mq}$$

$$I_{md} = I_d + K_E I_E$$

$$I_{mq} = I_q$$

$$I_q \Psi_{md} - I_d \Psi_{mq} = M_{rez}$$

Tensiunea la borne este dată de relația:

$$U^2 = \omega^2(\Psi_{md}^2 + \Psi_{mq}^2) = \omega^2[K_1^2(I_d + K_E I_E)^2 + (K_2 I_q)^2]$$

și în această zona liniară pentru orice valoare a curentului de magnetizare nu apar armonici.

În general, pentru un **MS** caracteristicile magnetice $\Psi_{md1}(I_m)$ $\Psi_{mq1}(I_m)$ sunt de forma:

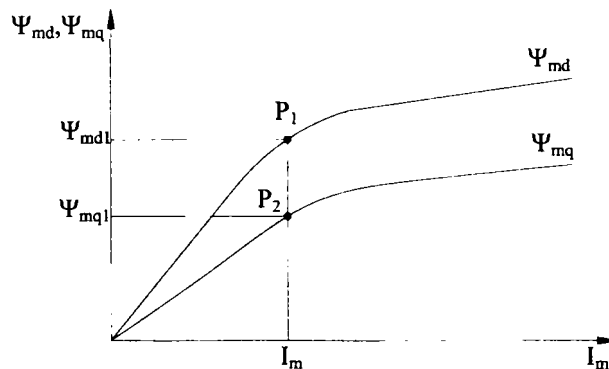


Fig.3.4. Caracteristicile de magnetizare

O aproximare liniară în zona saturată, se poate face prin ecuațiile:

$$\psi_{md1} = 0.019I_m + 0.99$$

$$\psi_{mq1} = 0.019I_m + 0.79$$

Cazul 1:

$$I_m = 13[A]$$

La $I_m = 13[A]$ din sistemul:

$$\psi_{md} = \frac{1.23}{13} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{1.026}{13} I_q$$

$$169 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq} = 10$$

se obține:

$$U = 205.21[V]$$

$$\Psi_m = \Psi_{md} \sqrt{\Psi_{md}^2 + \Psi_{mq}^2} = \frac{205.21 \sqrt{3}}{314} = 1.13[Wb]$$

$$I_d = -2.774[A]$$

$$I_q = 9.1588[A]$$

Fiind în zona liniară (nesaturată) curentul absorbit este sinusoidal:

$$i(A) = \sqrt{2} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sin(\omega t + \arctg \frac{I_q}{I_d}) = 9.57 \sin(\omega t - 2,45)$$

Cazul 2:

$$I_m = 15[A]$$

La $I_m = 15[A]$ din $f_1(I_m)$ și $f_2(I_m)$ rezultă $\psi_{md1} = 1.272[Wb]$ și $\psi_{mq1} = 1.065[Wb]$ și deci sistemul devine:

$$\psi_{md} = \frac{1.272}{15} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{1.065}{15} I_q$$

$$225 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq} = 10$$

având soluția: $\psi_{md} = 0.95345, I_q = 9.9289, I_{md} = 11.244, I_d = -0.75467,$

$\psi_{mq} = 0.70495$

Valorile tensiunii fluxului și curentului sunt:

$$U = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{0.95345^2 + 0.70495^2} = 214.71[V]$$

$$\Psi_m = \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = 1.179[Wb]$$

$$i_1(t) = \sqrt{2} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sin(\omega t)$$

Pentru coeficientul $A = \frac{\sqrt{3} 214.71}{314} = 1.183$ se obțin valorile coeficienților B_K :

$$B_1 = 5.3454, B_3 = 0.352, B_5 = 1.61, B_7 = 1.75, B_9 = 0.408, B_{11} = 3.05 \times 10^{-2}$$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este de forma:

$$i_m(t) = 5.3454 \sin(\omega t) + 0.35287 \sin(3\omega t) + 1.61 \sin(5\omega t) + 1.7508 \sin(7\omega t) + 0.30863 \sin(9\omega t) + 3.0524 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Cazul 3:

$$I_m = 20[\text{A}]$$

La $I_m = 20[\text{A}]$ din $f_1(I_m)$ și $f_2(I_m)$ rezultă $\psi_{md1} = 1.37$ [Wb] și $\psi_{mq1} = 1.16$ [Wb] și deci sistemul devine:

$$\psi_{md} = \frac{1.37}{20} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{1.16}{20} I_q$$

$$400 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq} = 10$$

având soluția: $\psi_{md} = 1.1196, I_q = 11.526, I_{md} = 16.345, I_d = 11.526,$

$$\psi_{mq} = 0.66849$$

Tensiunea, fluxul și curentul, au valorile:

$$U = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{1.1196^2 + 0.66849^2} = 236.39[\text{V}]$$

$$\psi_m = \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = 1.304[\text{Wb}]$$

$$i_1(t) = \sqrt{2} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sin(\omega t)$$

Pentru coeficientul $A = \frac{\sqrt[3]{3} 236.39}{314} = 1.3039$ se obțin valorile coeficienților B_K :

$$B_1 = 6.2942, B_3 = -5.5485 \times 10^{-2}, B_5 = 1.74$$

$$B_7 = 2.1941, B_9 = 0.80781, B_{11} = 8.9021 \times 10^{-2}$$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este de forma:

$$i_m(t) = 6.2942 \sin(\omega t) - 5.5485 \times 10^{-2} \sin(3\omega t) + 1.74 \sin(5\omega t) + 2.1941 \sin(7\omega t) + 0.80781 \sin(9\omega t) + 8.9021 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Cazul 4:

$$I_m = 40[\text{A}]$$

La $I_m = 40[\text{A}]$ din $f_1(I_m)$ și $f_2(I_m)$ rezultă $\psi_{md1} = 1.76$ [Wb] și $\psi_{mq1} = 1.54$ [Wb] și deci sistemul devine:

$$\psi_{md} = \frac{1.76}{40} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{1.54}{40} I_q$$

$$1600 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq} = 10$$

având soluția: $\psi_{md} = 1.6313, I_q = 15.017, I_{md} = 37.074, I_d = 25.074,$

$$\psi_{mq} = 0.57816$$

Valorile tensiunii, fluxului și curentului sunt:

$$U = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{1.6313^2 + 0.57816^2} = 313.76[V]$$

$$\psi_m = \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = 1.7307[Wb]$$

$$i_1(t) = \sqrt{2} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sin(\omega t)$$

Pentru coeficientul $A = \frac{\sqrt[3]{3} 313.76}{314} = 1.7307$ se obțin valorile coeficienților B_K :

$$B_1 = 11.728, B_3 = -2.3175, B_5 = 7.48$$

$$B_7 = 1.7636, B_9 = 0.79078, B_{11} = 2.0056$$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este de forma:

$$i_m(t) = 11.728 \sin(\omega t) - 2.3175 \sin(3\omega t) + 7.48 \sin(5\omega t) + 1.7636 \sin(7\omega t) + 0.79078 \sin(9\omega t) + 2.0056 \sin(11\omega t)$$

Cazul 5:

$$I_m = 60[A]$$

La $I_m = 60 [A]$ din $f_1(I_m)$ și $f_2(I_m)$ rezultă $\psi_{md1} = 2.15 [Wb]$ și

$\psi_{mq1} = 1.92 [Wb]$ și deci sistemul devine:

$$\psi_{md} = \frac{2.15}{60} I_{md}$$

$$\psi_{mq} = \frac{1.92}{60} I_q$$

$$3600 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq} = 10$$

având soluția: $\psi_{md} = 1.2535, I_q = 19.34, I_{md} = 35.014, I_d = 23.014, \psi_{mq} = 0.61889$

Tensiunea, fluxul și curentul au valorile:

$$U = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = \frac{314}{\sqrt{3}} \sqrt{1.2535^2 + 0.61889^2} = 253.43[V]$$

$$\psi_m = \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = 1.3980[Wb]$$

$$i_1(t) = \sqrt{2} \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sin(\omega t)$$

Pentru coeficientul $A = \frac{\sqrt[3]{3} 253.43}{314} = 1.3979$ se obțin valorile coeficienților B_K :

$$B_1 = 6.8111, B_3 = -0.09981, B_5 = 2.72$$

$$B_7 = 2.2197, B_9 = 1.2378, B_{11} = 0.19144$$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este de forma:

$$i_m(t) = 6.8111 \sin(\omega t) - 0.09981 \sin(3\omega t) + 2.72 \sin(5\omega t) + 2.2197 \sin(7\omega t) + 1.2378 \sin(9\omega t) + 0.19144 \sin(11\omega t)$$

3.2.5 Compoziția armonică a curentului la tensiune la borne constantă, cuplu rezistent constant și curent de excitație variabil

I_E - variabil

$$U = ct$$

$$M_{elm} = M_{rez} = 10[Nm]$$

La modificarea curentului de excitație I_E compoziția armonică a curentului se

schimbă. Calculul armonicilor curentului absorbit de **MS** are în vedere procedeul descris anterior.

Cazul 1

$$K_E I_E = 12 \text{ [A]}$$

Prin liniarizare, în zona saturată, se obține sistemul:

$$\varphi_{md} = \frac{0.019I_m + 0.99}{I_m} I_{md}$$

$$\varphi_{md} = \frac{0.019I_m + 0.78}{I_m} I_q$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$10 = I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq}$$

$$U^2 = \omega^2 (\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2)$$

sau la $\omega = 314(50\text{Hz})$, $K_E I_E = 12$ rezultă

$$\psi_{md} = (0.019 + \frac{0.99}{I_m}) I_{md}$$

$$\psi_{mq} = (0.019 + \frac{0.78}{I_m}) I_q$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$10 = I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq}$$

$$1.4 = \psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2$$

având soluțiile: $I_{md} = 11.066$, $I_q = 9.829$, $I_d = -1$, $I = 9.85$, $I_m = 14.801$, $\psi_{md} = 0.95045$, $\psi_{mq} = 0.70473$, $\psi_m = 1.1828$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este de forma:

$$i_{m(t)} = 2.3567 \sin(\omega t) - 1.3401 \sin(3\omega t) - 3.1501 \sin(5\omega t) - 0.1506 \sin(7\omega t) + 0.10172 \sin(9\omega t) - 3.9467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Compoziția armonică a curentului absorbit este:

$$i(t) = (9.85\sqrt{2} + 2.35) \sin(\omega t) + 0.35409 \sin(3\omega t) + 115.52 \sin(5\omega t) + 17498 \sin(7\omega t) + 0.40812 \sin(9\omega t) + 3.0467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

sau

$$i(t) = 16.14 \sin(\omega t) + 0.35409 \sin(3\omega t) + 115.52 \sin(5\omega t) + 17498 \sin(7\omega t) + 0.40812 \sin(9\omega t) + 3.0467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Cazul 2

$$K_E I_E = 20 \text{ [A]}$$

Prin liniarizare, în zona saturată, se obține sistemul:

$$\varphi_{md} = \frac{0.019I_m + 0.99}{I_m} I_{md}$$

$$\varphi_{md} = \frac{0.019I_m + 0.78}{I_m} I_q$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 20$$

$$10 = I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq}$$

$$U^2 = \omega^2(\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2)$$

cu soluțiile: $I_{md} = 10.925$, $I_q = 5.4121$, $I_m = 12.192$, $\psi_{md} = 1.0947$, $\psi_{mq} = 0.44908$, $\psi_m = 1.1832$, $I_d = -9.075$, $I = 10.55$;

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este aceeași ca și în cazul 1:

Compoziția armonică a curentului absorbit este:

$$i(t) = (10.55\sqrt{2} + 2.3567) \sin(\omega t) + 0.35409 \sin(3\omega t) + 115.52 \sin(5\omega t) + 17498 \sin(7\omega t) + 0.40812 \sin(9\omega t) + 3.0467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

sau

$$i(t) = 17.23 \sin(\omega t) + 0.35409 \sin(3\omega t) + 115.52 \sin(5\omega t) + 17498 \sin(7\omega t) + 0.40812 \sin(9\omega t) + 3.0467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Cazul 3

$$K_E I_E = 30 \text{ [A]}$$

Prin liniarizare, în zona saturată, se obține sistemul:

$$\varphi_{md} = \frac{0.019I_m + 0.99}{I_m} I_{md}$$

$$\varphi_{md} = \frac{0.019I_m + 0.78}{I_m} I_q$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 30$$

$$10 = I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq}$$

$$U^2 = \omega^2(\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2)$$

cu soluțiile: $I_{md} = 10.603$, $I_q = 3.4895$, $I_m = 11.163$, $\psi_{md} = 1.1418$, $\psi_{mq} = 0.31013$, $\psi_m = 1.1832$, $I_d = -19.4$, $I = 19.8$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este aceeași:

Compoziția armonică a curentului absorbit este:

$$i(t) = (19.8\sqrt{2} + 2.3567) \sin(\omega t) + 0.35409 \sin(3\omega t) + 115.52 \sin(5\omega t) + 17498 \sin(7\omega t) + 0.40812 \sin(9\omega t) + 3.0467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

sau

$$i(t) = 30.18 \sin(\omega t) + 0.35409 \sin(3\omega t) + 115.52 \sin(5\omega t) + 17498 \sin(7\omega t) + 0.40812 \sin(9\omega t) + 3.0467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Cazul 4

$$K_E I_E = 40 \text{ [A]}$$

Prin liniarizare, în zona saturată, se obține sistemul:

$$\varphi_{md} = \frac{0.019I_m + 0.99}{I_m} I_{md}$$

$$\varphi_{md} = \frac{0.019I_m + 0.78}{I_m} I_q$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 40$$

$$10 = I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq}$$

$$U^2 = \omega^2(\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2)$$

cu soluțiile: $I_{md} = 10.440$, $I_q = 2.5875$, $I_m = 10.755$, $\psi_{md} = 1.1593$, $\psi_{mq} = 0.23681$, $\psi_m = 1.1832$, $I_d = -29.56$, $I = 29.7$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este aceeași:

Compoziția armonică a curentului absorbit este:

$$i(t) = (29.7\sqrt{2} + 2.3567) \sin(\omega t) + 0.35409 \sin(3\omega t) + 115.52 \sin(5\omega t) + 17498 \sin(7\omega t) + 0.40812 \sin(9\omega t) + 3.0467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

sau

$$i(t) = 44.2 \sin(\omega t) + 0.35409 \sin(3\omega t) + 115.52 \sin(5\omega t) + 17498 \sin(7\omega t) + 0.40812 \sin(9\omega t) + 3.0467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Cazul 5

$$K_E I_E = 50 \text{ [A]}$$

Prin liniarizare, în zona saturată, se obține sistemul:

$$\varphi_{md} = \frac{0.019I_m + 0.99}{I_m} I_{md}$$

$$\varphi_{md} = \frac{0.019I_m + 0.78}{I_m} I_q$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 50$$

$$10 = I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq}$$

$$U^2 = \omega^2(\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2)$$

cu soluțiile: $I_{md} = 10.352$, $I_q = 2.0615$, $I_m = 10.555$, $\psi_{md} = 1.1676$, $\psi_{mq} = 0.19151$, $\psi_m = 1.1832$, $I_d = -39.648$, $I = 39.7$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este aceeași:

Compoziția armonică a curentului absorbit este:

$$i(t) = (39.7\sqrt{2} + 2.3567) \sin(\omega t) + 0.35409 \sin(3\omega t) + 115.52 \sin(5\omega t) + 17498 \sin(7\omega t) + 0.40812 \sin(9\omega t) + 3.0467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

sau

$$i(t) = 57.93 \sin(\omega t) + 0.35409 \sin(3\omega t) + 115.52 \sin(5\omega t) + 17498 \sin(7\omega t) + 0.40812 \sin(9\omega t) + 3.0467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Cazul 6

$$K_E I_E = 60 \text{ [A]}$$

Prin liniarizare, în zona saturată, se obține sistemul:

$$\varphi_{md} = \frac{0.019I_m + 0.99}{I_m} I_{md}$$

$$\varphi_{md} = \frac{0.019I_m + 0.78}{I_m} I_q$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 60$$

$$10 = I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq}$$

$$U^2 = \omega^2 (\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2)$$

cu soluțiile: $I_{md} = 10.300$, $I_q = 1.7155$, $I_m = 10.442$, $\psi_{md} = 1.1722$, $\psi_{mq} = 0.16074$,
 $\psi_m = 1.1832$, $I_d = -49.7$, $I = 49.8$

Compoziția armonică a curentului absorbit este :

$$i(t) = (49.8\sqrt{2} + 2.3567) \sin(\omega t) - 1.3401 \sin(3\omega t) - 3.1501 \sin(5\omega t) -$$

$$-0.1506 \sin(7\omega t) + 0.10172 \sin(9\omega t) - 3.9467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

sau

$$i(t) = 72.36 \sin(\omega t) - 1.3401 \sin(3\omega t) - 3.1501 \sin(5\omega t) - 0.1506 \sin(7\omega t)$$

$$+ 0.10172 \sin(9\omega t) - 3.9467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

La funcționarea în gol

$$M_{elmg} = 0$$

și rezultă

$$I_q = 0$$

$$\psi_{mq} = 0$$

$$\psi_{md} = \psi_m = \frac{\psi_m}{I_m} I_m$$

$$I_m = I_{md} = I_d + K_E I_E$$

$$1.18 = \psi_m$$

sau

$$I_m = I_d + K_E I_E$$

$$1.18 = \psi_m$$

$$I_m = 5.3$$

sau

$$I_d = 5.3 - K_E I_E$$

cu: $K_E I_E = 12, 20, 30, 40, 50, 60$

Cazul 1

$$K_E I_E = 12 \text{ [A]}$$

Rezultă

$$I_d = 5.3 - K_E I_E = -6.7 \text{ [A]}$$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare la $\psi_m = 1.18.7 \text{ [Wb]}$ este de forma:

$$i_m(t) = 2.3567 \sin(\omega t) - 1.3401 \sin(3\omega t) - 3.1501 \sin(5\omega t) - 0.1506 \sin(7\omega t) +$$

$$+ 0.10172 \sin(9\omega t) - 3.9467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

și a curentului absorbit este:

$$i(t) = (-6.7\sqrt{2} + 2.3567) \sin(\omega t) - 1.3401 \sin(3\omega t) - 3.1501 \sin(5\omega t) -$$

$$-0.1506 \sin(7\omega t) + 0.10172 \sin(9\omega t) - 3.9467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

sau

$$i(t) = 7.1 \sin(\omega t) - 1.3401 \sin(3\omega t) - 3.1501 \sin(5\omega t) - 0.1506 \sin(7\omega t) + \\ + 0.10172 \sin(9\omega t) - 3.9467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Cazul 2

$$K_E I_E = 20 \text{ [A]}$$

Rezultă

$$I_d = 5.3 - K_E I_E = -14.7 \text{ [A]}$$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare la este aceeași ca și în cazul anterior:

Amplitudinea fundamentalei devine:

$$i_1 = 2.3567 - 14.7\sqrt{2} = 18.37 \text{ [A]}$$

și deci curentul absorbit este:

$$i(t) = 18.37 \sin(\omega t) - 1.3401 \sin(3\omega t) - 3.1501 \sin(5\omega t) - 0.1506 \sin(7\omega t) + \\ + 0.10172 \sin(9\omega t) - 3.9467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Cazul 3

$$K_E I_E = 30 \text{ [A]}$$

Rezultă

$$I_d = 5.3 - K_E I_E = -24.7 \text{ [A]}$$

Amplitudinea fundamentalei devine:

$$i_1 = 2.3567 - 24.7\sqrt{2} = -32.4 \text{ [A]}$$

și a curentului absorbit este:

$$i(t) = -32.4 \sin(\omega t) - 1.3401 \sin(3\omega t) - 3.1501 \sin(5\omega t) - 0.1506 \sin(7\omega t) + \\ + 0.10172 \sin(9\omega t) - 3.9467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Cazul 4

$$K_E I_E = 40 \text{ [A]}$$

Rezultă

$$I_d = 5.3 - K_E I_E = -34.7 \text{ [A]}$$

Amplitudinea fundamentalei fiind:

$$i_1 = 2.3567 - 34.7\sqrt{2} = 46.3 \text{ [A]}$$

curentul absorbit se scrie sub forma:

$$i(t) = 46.3 \sin(\omega t) - 1.3401 \sin(3\omega t) - 3.1501 \sin(5\omega t) - 0.1506 \sin(7\omega t) + \\ + 0.10172 \sin(9\omega t) - 3.9467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Cazul 5

$$K_E I_E = 50 \text{ [A]}$$

Rezultă

$$I_d = 5.3 - K_E I_E = -44.7 \text{ [A]}$$

Amplitudinea fundamentalei devine:

$$i_1 = 2.3567 - 44.7\sqrt{2} = 60.4 \text{ [A]}$$

și curentul statornic este:

$$i(t) = 60.4 \sin(\omega t) - 1.3401 \sin(3\omega t) - 3.1501 \sin(5\omega t) - 0.1506 \sin(7\omega t) + 0.10172 \sin(9\omega t) - 3.9467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Cazul 6

$$K_E I_E = 60 \text{ [A]}$$

Rezultă

$$I_d = 5.3 - K_E I_E = -54.7 \text{ [A]}$$

Amplitudinea fundamentalei devine:

$$i_1 = 2.3567 - 54.7\sqrt{2} = 74.5 \text{ [A]}$$

și curentul statornic este:

$$i(t) = 74.5 \sin(\omega t) - 1.3401 \sin(3\omega t) - 3.1501 \sin(5\omega t) - 0.1506 \sin(7\omega t) + 0.10172 \sin(9\omega t) - 3.9467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

3.2.6 Compoziția armonică a curentului la tensiune la borne constantă, curent de excitație constant și cuplu variabil

La modificarea cuplului M_{elmg} compoziția armonică a curentului se schimbă. Calculul armonicilor curentului absorbit de **MS** are în vedere procedeul descris anterior.

$$K_E I_E = 12 \text{ [A]}$$

$$U = ct$$

Cazul 1

$$K_E I_E = 12 \text{ [A]}$$

$$U = ct$$

$$M_{elmg} = 1 \text{ [Nm]}$$

Se rezolvă sistemul:

$$\psi_{md} = (0.019 + \frac{0.99}{I_m}) I_{md}$$

$$\psi_{mq} = (0.019 + \frac{0.78}{I_m}) I_q$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$1 = I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq}$$

$$1.4 = \psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2$$

având soluția: $\psi_{md} = 1.1811$, $I_q = 0.73903$, $I_{md} = 10.195$, $I_d = -1.8048$, $\psi_{mq} = 7.0434 \times 10^{-2}$, $\psi_m = \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = 1.1832$

Pentru coeficientul $A = 1.1832$ se obțin valorile coeficienților B_K :

$$B_1 = 2.3567, B_3 = -1.3401, B_5 = -3.1501$$

$$B_7 = -0.1506, B_9 = 0.10172, B_{11} = -3.0012 \times 10^{-2}$$

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este de forma:

$$i_m(t) = 2.3567 \sin(\omega t) - 1.3401 \sin(3\omega t) - 3.1501 \sin(5\omega t) - 0.1506 \sin(7\omega t) + 0.10172 \sin(9\omega t) - 3.9467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Amplitudinea fundamentalei devine:

$$i_1 = 2.3567 + \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sqrt{2} = 4.2[A]$$

și curentul absorbit se scrie sub forma:

$$i(t) = 4.2 \sin(\omega t) - 1.3401 \sin(3\omega t) - 3.1501 \sin(5\omega t) - 0.1506 \sin(7\omega t) + 0.10172 \sin(9\omega t) - 3.9467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Cazul 2

$$\mathbf{K}_E \mathbf{I}_E = \mathbf{12} \text{ [A]}$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{c}t$$

$$\mathbf{M}_{elmg} = \mathbf{4} \text{ [Nm]}$$

Se rezolvă sistemul:

$$\psi_{md} = (0.019 + \frac{0.99}{I_m}) I_{md}$$

$$\psi_{mq} = (0.019 + \frac{0.78}{I_m}) I_q$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$4 = I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq}$$

$$1.4 = \psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2$$

având soluția: $\psi_{md} = 1.1494$, $I_q = 3.1222$, $I_{md} = 10.536$, $I_d = -1.4642$, $\psi_{mq} = 0.28095$, $I_m = 10.989$, $\psi_m = \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = 1.1832$

Pentru coeficientul $A = 1.1832$ se obțin valorile coeficienților B_K ca și în cazul anterior:

Compoziția armonică a curentului de magnetizare este de forma:

$$i_m(t) = 2.3567 \sin(\omega t) - 1.3401 \sin(3\omega t) - 3.1501 \sin(5\omega t) - 0.1506 \sin(7\omega t) + 0.10172 \sin(9\omega t) - 3.9467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Amplitudinea fundamentalei devine:

$$i_1 = 2.3567 + \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sqrt{2} = 5.7[A]$$

și curentul absorbit se pune sub forma:

$$i(t) = 5.7 \sin(\omega t) - 1.3401 \sin(3\omega t) - 3.1501 \sin(5\omega t) - 0.1506 \sin(7\omega t) + 0.10172 \sin(9\omega t) - 3.9467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

Cazul 3

$$\mathbf{K}_E \mathbf{I}_E = \mathbf{12} \text{ [A]}$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{c}t$$

$$\mathbf{M}_{elmg} = \mathbf{8} \text{ [Nm]}$$

Se rezolvă sistemul:

$$\psi_{md} = (0.019 + \frac{0.99}{I_m}) I_{md}$$

$$\psi_{mq} = (0.019 + \frac{0.78}{I_m}) I_q$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$8 = I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq}$$

$$1.4 = \psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2$$

obținându-se soluțiile: $\psi_{md} = 1.0418$, $I_q = 7.1975$, $I_{md} = 11.106$, $I_d = -0.89450$,
 $\psi_{mq} = 0.56097$, $I_m = 13.234$, $\psi_m = \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = 1.1832$

Amplitudinea fundamentalei devine:

$$i_1 = 2.3567 + \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sqrt{2} = 9.4[A]$$

și curentul absorbit este:

$$i(t) = 9.4 \sin(\omega t) - 1.3401 \sin(3\omega t) - 3.1501 \sin(5\omega t) - 0.1506 \sin(7\omega t) +$$

$$+ 0.10172 \sin(9\omega t) - 3.9467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

$$i_t = 9.4 \sin \omega t - 1.34 \sin 3\omega t$$

Cazul 4

$$\mathbf{K_E I_E = 12 [A]}$$

$$\mathbf{U = ct}$$

$$\mathbf{M_{eimg} = 12 [Nm]}$$

Se rezolvă sistemul:

$$\psi_{md} = (0.019 + \frac{0.99}{I_m}) I_{md}$$

$$\psi_{mq} = (0.019 + \frac{0.78}{I_m}) I_q$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_q^2$$

$$I_{md} = I_d + 12$$

$$12 = I_q \psi_{md} - I_d \psi_{mq}$$

$$1.4 = \psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2$$

având soluția: $\psi_{md} = 0.81517$, $I_q = 13.046$, $I_{md} = 10.408$, $I_d = -1.5916$, $\psi_{mq} = 0.85761$,
 $I_m = 16.690$, $\psi_m = \sqrt{\psi_{md}^2 + \psi_{mq}^2} = 1.1832$

Amplitudinea fundamentalei devine:

$$i_1 = 2.3567 + \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \sqrt{2} = 15.5[A]$$

și curentul $i(t)$ este:

$$i(t) = 15.5 \sin(\omega t) - 1.3401 \sin(3\omega t) - 3.1501 \sin(5\omega t) - 0.1506 \sin(7\omega t) +$$

$$+ 0.10172 \sin(9\omega t) - 3.9467 \times 10^{-2} \sin(11\omega t)$$

$$i_t = 15.5 \sin \omega t - 1.34 \sin 3\omega t$$

3.3 Concluzii

MA

1. MA fiind o mașină simetrică are o singură caracteristică de magnetizare $\psi_m(I_m)$, obținută pe cale experimentală, și care nu depinde de sarcină, ca la MS.

2. Aproximarea polinomială a caracteristicii de magnetizare $\psi_m(I_m)$ s-a făcut cu un polinom de grad 11, obținându-se astfel armonici superioare de ordin 11.

3. La o aproximare printr-un polinom cu grad mai mare (n) se obțin armonici superioare de ordin n .

4. S-a demonstrat dependența directă dintre valoarea tensiunii de alimentare U și nivelul de saturație la MA.

5. Dacă tensiunea de alimentare U rămâne fixă, la modificarea cuplului, compoziția armonică nu se modifică, deoarece fluxul depinde de tensiunea de alimentare

MS

6. La MS, obținerea caracteristicii de magnetizare $\psi_m(I_m)$ este o problemă complexă ce se rezolvă prin folosirea celor două caracteristici de magnetizare deduse experimental, $\psi_{mq1}(I_m)$ și $\psi_{md1}(I_m)$, la cunoașterea valorilor curentului de excitație și a cuplului la arbore.

7. Se demonstrează și la MS **dependența directă dintre valoarea tensiunii de alimentare și gradul de saturație.**

8. La funcționarea la tensiune la borne constantă și curent de excitație variabil sau cuplu la arbore variabil și la MS ca și la MA, compoziția armonică nu se modifică (în sensul armonicilor superioare)

9. Prin modificarea curentului de excitație sau al cuplului, se poate mări valoarea amplitudinii fundamentalei curentului și prin aceasta, valoarea rangului armonicilor superioare poate fi scăzută.

10. Aproximarea polinomială, chiar și de grad 11 sau 15, a caracteristicii de magnetizare, din cauza erorilor cumulative de calcul, se poate folosi doar pentru obținerea unor rezultate parțiale calitative și nu cantitative, așa cum reiese din datele experimentale.

4. LINIARIZAREA CARACTERISTICILOR DE MAGNETIZARE

Aproximarea caracteristicilor de magnetizare prin polinoame de gradul 15 introduce, uneori, erori inadmisibile la calculul compoziției armonice a curentului. Aceste erori apar ca urmare a aproximărilor succesive și ele se acumulează, mai ales la puteri mari și astfel coeficienții a_k și B_k devin foarte mari.

Curentul de magnetizare, fiind o sumă de armonici, cu coeficienți pozitivi și negativi, nu mai reflectă valoarea reală a armonicilor din curba curentului absorbit.

Din acest motiv **metoda aproximărilor prin polinoame a caracteristicilor de magnetizare se propune a fi folosită rar și numai în cazul în care se operează cu valori ale curentului de magnetizare în vecinătatea valorii curentului de magnetizare pentru care s-a făcut aproximarea polinomială**, deoarece în acea zonă coeficienții a_k și B_k devin acceptabili.

O **soluție mai exactă este cea a liniarizării caracteristicilor de magnetizare**. Metoda este simplă și destul de bine aproximează fenomenul real, așa cum rezultă din verificările experimentale (capitolul 6). Până în cotul curbei de magnetizare aproximarea se face printr-o dreaptă ce trece prin origine.

În zona saturată aproximarea se face tot printr-o dreaptă, însă de pantă mult mai mică.

Se obțin astfel rezultate foarte apropiate de cele măsurate pe motoarele saturate așa cum se demonstrează în capitolul al 6-lea [experimentări].

Interesant este de observat ponderea diverselor armonici în compoziția armonică a curentului de magnetizare.

Armonica de ordinul 3 este cea mai importantă, urmând apoi armonica 5, 7, 9, 13, 15, 11.

Tensiunea de alimentare impune, prin valoarea sa, gradul de saturație. Au fost alese tensiuni în domeniul $206[V] \div 386[V]$, interval întâlnit frecvent în exploatare.

La valori mici ale tensiunii de alimentare (sub 220 [V]) mașinile sunt nesaturate, iar la valori mari (peste 230 [V]) se intră în zona saturată.

Descompunerea în serii Fourier, prin liniarizare, se face ușor și exact, amplitudinile armonicilor calculate fiind foarte apropiate de cele experimentale.

Cunoscând compoziția armonică a curentului de alimentare se pot calcula indicatorii prevăzuți în normele ANSI/IEE – 1982.

4.1 Saturatia la MA

LINIARIZARE LA MA

La MA liniarizarea se face pentru curba de magnetizare unică, ridicată experimental și dată în capitolele anterioare sub formă de tabel.

La funcționarea în gol la MA compoziția armonică a curentului nu se poate modifica așa cum se poate face la MS prin mărirea (sau micșorarea) curentului de excitație.

La funcționarea în sarcină, datorită creșterii valorii curentului pe fundamentală, ponderea armonicilor superioare scade și deci poluarea armonică se diminuează.

Caracteristica de magnetizare $\Psi_m = f(I_m)$ prezintă două

zone distincte (figura 4.1):

- zona liniară OA ($\Psi_m = K_1 I_m$) - nesaturată și
- zona liniară AB ($\Psi_m = K_2 I_m + c$) - saturată.

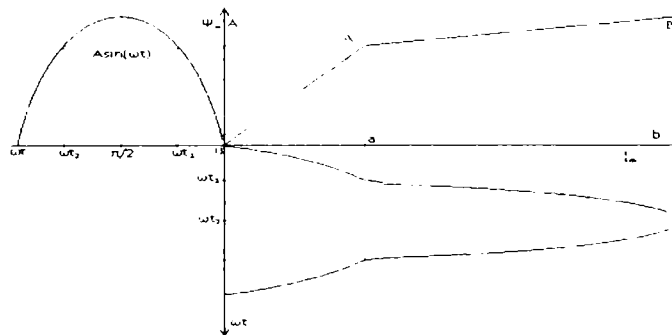


Fig.4.1.Liniarizarea caracteristicii de magnetizare

Sistemul simplificat al MA, folosit și anterior se scrie sub forma:

$$U = -\omega_1 \Psi_m$$

$$I_d = -\frac{s\omega_1 \Psi_m}{R_2}$$

$$I_m = I_{mq} = I_q$$

$$\Psi_m = \Psi_{mq} = \Psi_q$$

$$\Psi_m = K_1 I_m \quad (\text{zona OA})$$

$$\Psi_m = K_2 I_m + c \quad (\text{zona AB})$$

$$Melm_g = -p_1 I_d \Psi_m$$

La o tensiune la borne sinusoidală:

$$U = U_1 \sin \omega t$$

se obține o variație sinusoidală pentru flux:

$$\Psi_m = A \sin \omega t$$

așa cum rezultă din relația

$$U = \omega_1 \Psi_m$$

Determinarea variației în timp a curentului de magnetizare

Caracteristica de magnetizare fiind aproximată prin două segmente de dreaptă (OA și OB), curentul de magnetizare se calculează astfel:

Zona OA

Din:

$$\Psi_m = K_1 I_m$$

rezultă:

$$I_m = \frac{\Psi_m}{K_1} = \frac{A \sin \omega t}{K_1} \quad (\text{pentru } t \in (0 \div t_1))$$

Zona AB

Din:

$$\Psi_m = K_2 I_m + c$$

rezultă:

$$I_m = \frac{\Psi_m - c}{K_2} = \frac{A \sin \omega t - c}{K_2} \quad (\text{pentru } t \in (t_1 \div t_2))$$

Curentul de magnetizare $i_m(t)$, descompus în serie Fourier, cu notațiile:

$$\omega t = x$$

$$\omega t_1 = x_1$$

se scrie sub forma:

$$\begin{aligned} i_m(t) &= I_1 \sin \omega t + I_3 \sin 3\omega t + I_5 \sin 5\omega t + I_7 \sin 7\omega t + I_9 \sin 9\omega t + \\ &\quad + I_{11} \sin 11\omega t + I_{13} \sin 13\omega t + I_{15} \sin 15\omega t \\ &= I_1 \sin x + I_3 \sin 3x + I_5 \sin 5x + I_7 \sin 7x + I_9 \sin 9x + \\ &\quad + I_{11} \sin 11x + I_{13} \sin 13x + I_{15} \sin 15x \end{aligned}$$

unde amplitudinile curenților $I_1, I_3, I_5, I_7, I_9, I_{11}, I_{13}, I_{15}$ se obțin din relațiile:

$$\begin{aligned} I_1 &= \frac{4}{\pi} \int_0^{x_1} \frac{A \sin x}{K_1} \sin x dx + \frac{4}{\pi} \int_{x_1}^{\frac{\pi}{2}} \frac{A \sin x - c}{K_2} \sin x dx \\ I_3 &= \frac{4}{\pi} \int_0^{x_1} \frac{A \sin x}{K_1} \sin 3x dx + \frac{4}{\pi} \int_{x_1}^{\frac{\pi}{2}} \frac{A \sin x - c}{K_2} \sin 3x dx \\ I_5 &= \frac{4}{\pi} \int_0^{x_1} \frac{A \sin x}{K_1} \sin 5x dx + \frac{4}{\pi} \int_{x_1}^{\frac{\pi}{2}} \frac{A \sin x - c}{K_2} \sin 5x dx \\ I_7 &= \frac{4}{\pi} \int_0^{x_1} \frac{A \sin x}{K_1} \sin 7x dx + \frac{4}{\pi} \int_{x_1}^{\frac{\pi}{2}} \frac{A \sin x - c}{K_2} \sin 7x dx \end{aligned}$$

$$I_9 = \frac{4}{\pi} \int_0^{x_1} \frac{A \sin x}{K_1} \sin 9x dx + \frac{4}{\pi} \int_{x_1}^{\frac{\pi}{2}} \frac{A \sin x - c}{K_2} \sin 9x dx$$

$$I_{11} = \frac{4}{\pi} \int_0^{x_1} \frac{A \sin x}{K_1} \sin 11x dx + \frac{4}{\pi} \int_{x_1}^{\frac{\pi}{2}} \frac{A \sin x - c}{K_2} \sin 11x dx$$

$$I_{13} = \frac{4}{\pi} \int_0^{x_1} \frac{A \sin x}{K_1} \sin 13x dx + \frac{4}{\pi} \int_{x_1}^{\frac{\pi}{2}} \frac{A \sin x - c}{K_2} \sin 13x dx$$

$$I_{15} = \frac{4}{\pi} \int_0^{x_1} \frac{A \sin x}{K_1} \sin 15x dx + \frac{4}{\pi} \int_{x_1}^{\frac{\pi}{2}} \frac{A \sin x - c}{K_2} \sin 15x dx$$

sau, efectuând integralele:

$$I_1 = \frac{A}{3.14} \left[\frac{2x_1 - \sin 2x_1}{K_1} + \frac{3.14 - 2x_1 + \sin 2x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \cos x_1$$

$$I_3 = \frac{A}{6.28} \left[\frac{2 \sin 2x_1 - \sin 4x_1}{K_1} + \frac{\sin 4x_1 - 2 \sin 2x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 3x_1}{3}$$

$$I_5 = \frac{A}{18.84} \left[\frac{3 \sin 4x_1 - 2 \sin 6x_1}{K_1} + \frac{2 \sin 6x_1 - 3 \sin 4x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 5x_1}{5}$$

$$I_7 = \frac{A}{37.68} \left[\frac{4 \sin 6x_1 - 3 \sin 8x_1}{K_1} + \frac{3 \sin 8x_1 - 4 \sin 6x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 7x_1}{7}$$

$$I_9 = \frac{A}{62.8} \left[\frac{5 \sin 8x_1 - 4 \sin 10x_1}{K_1} + \frac{4 \sin 10x_1 - 5 \sin 8x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 9x_1}{9}$$

$$I_{11} = \frac{A}{94.2} \left[\frac{6 \sin 10x_1 - 5 \sin 12x_1}{K_1} + \frac{5 \sin 12x_1 - 6 \sin 10x_1}{K_2} \right] -$$

$$- \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 11x_1}{11}$$

$$I_{13} = \frac{A}{131.88} \left[\frac{7 \sin 12x_1 - 6 \sin 14x_1}{K_1} + \frac{6 \sin 14x_1 - 7 \sin 12x_1}{K_2} \right] -$$

$$- \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 13x_1}{13}$$

$$I_{15} = \frac{A}{175.84} \left[\frac{8 \sin 14x_1 - 7 \sin 16x_1}{K_1} + \frac{7 \sin 16x_1 - 8 \sin 14x_1}{K_2} \right] -$$

$$- \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 15x_1}{15}$$

NUMERIC

La MA analizată, caracteristica de magnetizare pe zone se pune astfel:

ZonaOA

$$\Psi_m = 0.164I_m$$

$$a = I_m = 6.1[A]$$

$$\Psi_m(a) = 1.0018[Wb]$$

ZonaAB

$$\Psi_m = 0.058I_m + 0.64$$

cu

$$A \sin x_1 = 1.0018 [Wb]$$

$$A \sin \omega t_1 = 1.0018 [Wb]$$

$$A = \frac{U\sqrt{3}}{\omega}$$

$$K_1 = 0.164$$

$$K_2 = 0.058$$

$$c = 0.64$$

Pentru a estima gradul de poluare cu armonici a sistemului, dar și în scopul limitării acestei poluări au fost elaborate standarde care trebuie să fie cuprinse în normele de fabricare ale mașinilor, aparatelor și echipamentelor, dar care se referă și la modul de exploatare al acestora.

Aceste normative au la bază indicatori caracteristici regimului nesinusoidal periodic și sunt prevăzuți în standarde naționale și europene [STAS.1, 2] sau sunt recomandați de CEI. [STAS.3].

Cei mai importanți indicatori sunt:

$$\text{Nivelul armonicii de rang } k \text{ se definește ca fiind } \gamma_k = \frac{I_k}{I_1}$$

$$\text{Reziduuul deformant } I_d = \sqrt{\sum_{k=2} I_k^2}$$

$$\text{Coeficientul de distorsiune } \delta_0 = \frac{I_d}{I_1} 100$$

$$\text{Coeficientul ponderat de distorsiune } \delta_p = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} k^2 I_k^2}}{I_1} 100$$

$$\text{Coeficientul de deviație } k_{dev} = \frac{\sum_{k=2} I_k}{I_1}$$

$$\text{Coeficientul de vârf } k_v = \frac{I_{max}}{I_1}$$

$$\text{Coeficientul de formă } k_f = \frac{I_d}{I_{mediu}}$$

1.

$$U = 206 [V]$$

La tensiunea de valoare $U = 206 [V]$, rezultă:

$$A = \frac{U\sqrt{3}}{\omega} = \frac{206\sqrt{3}}{314} = 1.135 [Wb]$$

și deci

$$\Psi_m = 0.058 I_m + 0.64$$

$$I_m = \frac{A - 0.64}{0.058} = 8.53 [A]$$

Cu aceste date se obțin coeficienții Fourier:

$$x_1 = 1.0815$$

$$A = 1.135$$

$$K_1 = 0.164$$

$$K_2 = 0.058$$

$$C = 0.648$$

$$I_1 = \frac{A}{3.14} \left[\frac{2x_1 - \sin 2x_1}{K_1} + \frac{3.14 - 2x_1 + \sin 2x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \cos x_1$$

$$I_3 = \frac{A}{6.28} \left[\frac{2 \sin 2x_1 - \sin 4x_1}{K_1} + \frac{\sin 4x_1 - 2 \sin 2x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 3x_1}{3}$$

$$I_5 = \frac{A}{18.84} \left[\frac{3 \sin 4x_1 - 2 \sin 6x_1}{K_1} + \frac{2 \sin 6x_1 - 3 \sin 4x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 5x_1}{5}$$

$$I_7 = \frac{A}{37.68} \left[\frac{4 \sin 6x_1 - 3 \sin 8x_1}{K_1} + \frac{3 \sin 8x_1 - 4 \sin 6x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 7x_1}{7}$$

$$I_9 = \frac{A}{62.8} \left[\frac{5 \sin 8x_1 - 4 \sin 10x_1}{K_1} + \frac{4 \sin 10x_1 - 5 \sin 8x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 9x_1}{9}$$

$$I_{11} = \frac{A}{94.2} \left[\frac{6 \sin 10x_1 - 5 \sin 12x_1}{K_1} + \frac{5 \sin 12x_1 - 6 \sin 10x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 11x_1}{11}$$

$$I_{13} = \frac{A}{131.88} \left[\frac{7 \sin 12x_1 - 6 \sin 14x_1}{K_1} + \frac{6 \sin 14x_1 - 7 \sin 12x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 13x_1}{13}$$

$$I_{15} = \frac{A}{175.84} \left[\frac{8 \sin 14x_1 - 7 \sin 16x_1}{K_1} + \frac{7 \sin 16x_1 - 8 \sin 14x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 15x_1}{15}$$

$$I_d = \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{15}^2}$$

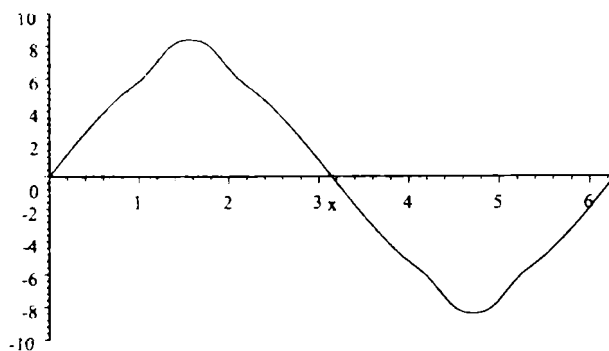
$$\delta_P = \frac{\sqrt{9I_3^2 + 25I_5^2 + 49I_7^2 + 81I_9^2 + 121I_{11}^2 + 169I_{13}^2 + 225I_{15}^2}}{I_1}$$

$$\text{Solution is: } \left\{ \begin{array}{l} C = 0.648, I_{15} = 1.3565 \times 10^{-2}, I_d = 0.60278, I_1 = 7.5091, \\ A = 1.135, x_1 = 1.0815, \\ I_5 = 0.31688, \delta_P = 0.33354, I_{11} = 4.6877 \times 10^{-2}, \\ K_1 = 0.164, K_2 = 0.058, \\ I_{13} = -4.4499 \times 10^{-2}, I_7 = -0.14005, \\ I_9 = 1.1059 \times 10^{-2}, I_3 = -0.4887 \end{array} \right.$$

Curentul de magnetizare $i_m(t)$ se scrie sub forma:

$$i_m(t) = 7.509 \sin \omega t - 0.4887 \sin 3\omega t + 0.31688 \sin 5\omega t - 0.14005 \sin 7\omega t + 1.1059 \times 10^{-2} \sin 9\omega t + 4.6877 \times 10^{-2} \sin 11\omega t + 1.3565 \times 10^{-2} \sin 15\omega t$$

având o variație în timp așa ca în figura alăturată.

Fig.4.2. Variația în timp a curentului la $U = 206$ [V].

Precizare: în toate graficele pe abscisă este variabila $x=\omega t$ în [rad/s], iar pe ordonată este funcția, curentul în [A].

Având în vedere aceste rezultate, rezultă:

- Nivelul armonicii de rang 3 : $(\sin \omega t) \quad \gamma_3 = \frac{I_3}{I_1} 100 = 6.5\%$
- Nivelul armonicii de rang 5 : $(\sin 5t) \quad \gamma_5 = \frac{I_5}{I_1} 100 = 4\%$
- Nivelul armonicii de rang 7 : $(\sin 7t) \quad \gamma_7 = \frac{I_7}{I_1} 100 = 1.86\%$
- Nivelul armonicii de rang 9 : $(\sin 9t) \quad \gamma_9 = \frac{I_9}{I_1} 100 = 0.146\%$
- Nivelul armonicii de rang 11 : $(\sin 11t) \quad \gamma_{11} = \frac{I_{11} 100}{I_1} = 0.63\%$
- Nivelul armonicii de rang 13 : $(\sin 13t) \quad \gamma_{13} = \frac{I_{13}}{I_1} 100 = 0.59\%$
- Nivelul armonicii de rang 15 : $(\sin 15t) \quad \gamma_{15} = \frac{I_{15}}{I_1} 100 = 1.2\%$

**(Sub normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 7, 9, 11, 13, 15)
(Peste normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 3, 5)**

$$\text{- Reziuul deformant: } I_d = \sqrt{\sum_{k=2} I_k^2} = 0.60278$$

$$\text{- Coeficientul de distorsiune: } \delta_0 = \frac{I_d}{I_1} 100 = 8\%$$

admisibil 5% -

norme ANSI/IEEE519/82

$$\text{- Coeficientul ponderat de distorsiune: } \delta_p = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} k^2 I_k^2}}{I_1} 100 = 33.354\%$$

- Coeficientul de deviație: $k_{dev} = \frac{\sum_{k=2} I_k}{I_1} = 0.15$
- Coeficientul de vârf: $k_v = \frac{I_{max}}{I_1} = 0.666$
- Coeficientul de formă: $k_f = \frac{I_d}{I_{mediu}} = 0.126$

2

$$\mathbf{U} = 214[\mathbf{V}]$$

La tensiunea de valoare $\mathbf{U} = 214[\mathbf{V}]$, rezultă:

$$A = \frac{U\sqrt{3}}{\omega} = \frac{214\sqrt{3}}{314} = 1.18 [\text{Wb}]$$

și deci

$$\Psi_m = 0.058I_m + 0.64$$

$$I_m = \frac{A - 0.64}{0.058} = 9.3 [\text{A}]$$

$$\sin \omega t_1 = \frac{1.0018}{A} = 0.85$$

$$x_1 = \omega t_1 = 1.01536 [\text{rad}]$$

Cu:

$$x_1 = 1.01536$$

$$A = 1.18$$

$$K_1 = 0.164$$

$$K_2 = 0.058$$

$$C = 0.648$$

se obțin coeficienții Fourier:

$$C = 0.648, K_1 = 0.164, K_2 = 0.058, x_1 = 1.0154,$$

$$I_3 = -0.69585, A = 1.18,$$

$$I_9 = -5.0237 \times 10^{-2}, I_1 = 8.0883,$$

$$I_{11} = 7.4376 \times 10^{-2},$$

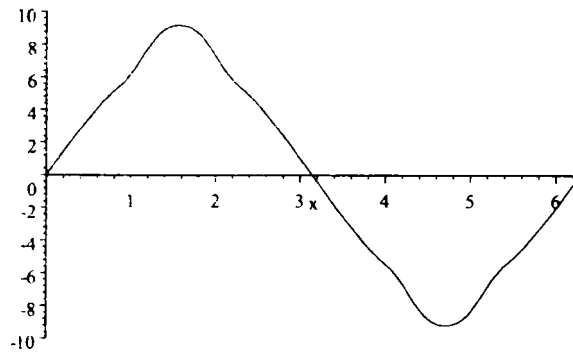
$$I_{15} = -2.1924 \times 10^{-2}, I_5 = 0.38620,$$

$$I_{13} = -2.5824 \times 10^{-2}, I_7 = -0.10626$$

Curentul de magnetizare $i_m(t)$ se scrie sub forma:

$$i_m(t) = 8.088 \sin \omega t - 0.69585 \sin 3\omega t + 0.38620 \sin 5\omega t - 0.10626 \sin 7\omega t - 5.0237 \times 10^{-2} \sin 9\omega t + 7$$

având o variație în timp așa ca în figura alăturată.

Fig.4.3. Variația în timp a curentului la $U = 214[V]$.

Având în vedere aceste rezultate, rezultă nivelurile armonicilor:

$$\begin{aligned}\gamma_3 &= \frac{I_3}{I_1} 100 = 8.75\%, \gamma_5 = \frac{I_5}{I_1} 100 = 4.8\%, \gamma_7 = \frac{I_7}{I_1} 100 = 1.25\%, \\ \gamma_9 &= \frac{I_9}{I_1} 100 = 0.62\%, \gamma_{11} = \frac{I_{11}}{I_1} 100 = 0.94\%, \gamma_{13} = \frac{I_{13}}{I_1} 100 = 0.3\%, \\ \gamma_{15} &= \frac{I_{15}}{I_1} 100 = 0.25\%\end{aligned}$$

(Sub normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 7, 9, 11, 13, 15)
(Peste normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 3, 5)

$$\text{Reziduul deformant } I_d = \sqrt{\sum_{k=2} I_k^2} = 0.8$$

$$\text{Coeficientul de distorsiune } \delta_0 = \frac{I_d}{I_1} 100 = 10\%$$

admisibil 5% -

norme ANSI/IEEE519/82

$$\text{Coeficientul ponderat de distorsiune } \delta_p = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} k^2 I_k^2}}{I_1} 100 = 38\%$$

$$\text{Coeficientul de deviație } k_{dev} = \frac{\sum_{k=2} I_k}{I_1} = 0.163$$

$$\text{Coeficientul de vârf } k_v = \frac{I_{max}}{I_1} = 0.087$$

$$\text{Coeficientul de formă } k_f = \frac{I_d}{I_{mediu}} = 0.157$$

3

U=236[V]

La tensiunea de valoare **U = 236[V]**, rezultă:

$$A = \frac{U\sqrt{3}}{\omega} = \frac{236\sqrt{3}}{314} = 1.3 \text{ [Wb]}$$

$$\Psi_m = 0.058I_m + 0.64$$

$$I_m = \frac{A - 0.64}{0.058} = 11.38 \text{ [A]}$$

și deci

$$\sin \omega t_1 = \frac{1.0018}{A} = 0.77$$

$$x_1 = \omega t_1 = 0.87957 \text{ [rad]}$$

Cu

$$x_1 = 0.87957$$

$$A = 1.3$$

$$K_1 = 0.164$$

$$K_2 = 0.058$$

$$C = 0.648$$

$$I_3 = -1.2239, I_5 = 0.43033, I_1 = 9.7569$$

se obțin coeficienții Fourier:

$$I_{15} = -2.8133 \times 10^{-2}, I_7 = 7.0894 \times 10^{-2},$$

$$I_9 = -0.14791, I_{13} = 6.5712 \times 10^{-2}$$

$$I_{11} = 1.5069 \times 10^{-2}$$

Curentul de magnetizare $i_m(t)$ se scrie sub forma:

$$i_m(t) = 9.7569 \sin \omega t - 1.2239 \sin 3\omega t + 0.43033 \sin 5\omega t +$$

$$+ 7.0894 \times 10^{-2} \sin 7\omega t - 0.14791 \sin 9\omega t +$$

$$+ 1.5069 \times 10^{-2} \sin 11\omega t + 6.5712 \times 10^{-2} \sin 13\omega t -$$

$$- 2.8133 \times 10^{-2} \sin 15\omega t$$

având o variație în timp așa ca în figura alăturată.

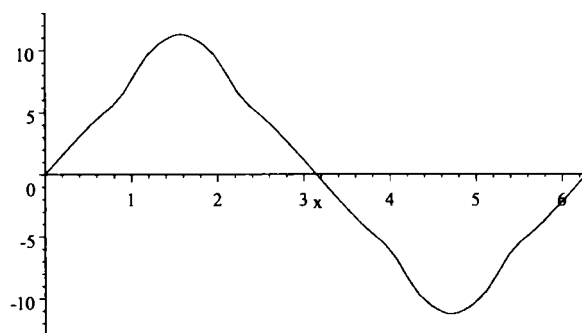


Fig.4.4. Variația în timp a curentului la $U = 236$ [V].

Rezultă nivelurile armonicilor:

$$\gamma_3 = \frac{I_3 100}{I_1} = 12.57\%, \gamma_5 = \frac{I_5}{I_1} 100 = 4.4\%, \gamma_7 = \frac{I_7}{I_1} 100 = 0.72\%,$$

$$\gamma_9 = \frac{I_9}{I_1} 100 = 1.52\%, \gamma_{11} = \frac{I_{11} 100}{I_1} = 0.15\%, \gamma_{13} = \frac{I_{13}}{I_1} 100 = 0.67\%,$$

$$\gamma_{15} = \frac{I_{15}}{I_1} 100 = 0.288\%$$

**(Sub normele impuse de ANSI/IEEE519/82-armonicile 7, 9, 11, 13, 15)
(Peste normele impuse de ANSI/IEEE519/82-armonicile 3, 5)**

$$\text{Reziduul deformant } I_d = \sqrt{\sum_{k=2} I_k^2} = 1.3$$

$$\text{Coeficientul de distorsiune } \delta_0 = \frac{I_d}{I_1} 100 = 13.4\%$$

**admisibil 5% -
norme ANSI/IEEE519/82**

$$\text{Coeficientul ponderat de distorsiune } \delta_p = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} k^2 I_k^2}}{I_1} 100 = 47\%$$

$$\text{Coeficientul de deviație } k_{dev} = \frac{\sum_{k=2} I_k}{I_1} = 0.193$$

$$\text{Coeficientul de vârf } k_v = \frac{I_{max}}{I_1} = 0.047$$

$$\text{Coeficientul de formă } k_f = \frac{I_d}{I_{mediu}} = 0.13$$

4

U=313[V]

La tensiunea de valoare **U = 313[V]**, rezultă:

$$A = \frac{U\sqrt{3}}{\omega} = \frac{313\sqrt{3}}{314} = 1.7245 \text{ [Wb]}$$

$$\Psi_m = 0.058I_m + 0.64$$

$$I_m = \frac{A - 0.64}{0.058} = 18.69 \text{ [A]}$$

și deci

$$\sin \omega t_1 = \frac{1.0018}{A} = 0.581$$

$$x_1 = \omega t_1 = 0.619865 \text{ [rad]}$$

Cu:

$$x_1 = 0.619865$$

$$A = 1.7245$$

$$K_1 = 0.164$$

$$K_2 = 0.058$$

$$C = 0.648$$

se obțin coeficienții Fourier:

$$I_{13} = -0.11730$$

$$I_5 = -0.15133, I_{11} = -7.6285 \times 10^{-2}, I_7 = 0.37166,$$

$$I_9 = 0.17544, I_3 = -2.5554, I_{15} = -1.4735 \times 10^{-2},$$

$$I_1 = 16.349$$

Curentul de magnetizare $i_m(t)$ se scrie sub forma:

$$i_m(t) = 16.349 \sin \omega t - 2.5554 \sin 3\omega t - 0.15133 \sin 5\omega t + 0.37166 \sin 7\omega t + 0.17544 \sin 9\omega t - 7.6285 \cdot 10^{-2} \sin 15\omega t$$

având o variație în timp așa ca în figura alăturată.

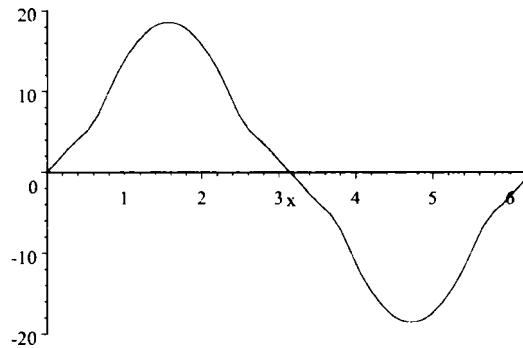


Fig.4.5. Variația în timp a curentului la $U = 313$

Având în vedere aceste rezultate, rezultă nivelurile armonicilor:

$$\gamma_3 = \frac{I_3}{I_1} 100 = 15.6\%, \gamma_5 = \frac{I_5}{I_1} 100 = 0.95\%, \gamma_7 = \frac{I_7}{I_1} 100 = 2.26\%,$$

$$\gamma_9 = \frac{I_9}{I_1} 100 = 1.07\%, \gamma_{11} = \frac{I_{11}}{I_1} 100 = 0.46\%,$$

$$\gamma_{13} = \frac{I_{13}}{I_1} 100 = 0.71\%, \gamma_{15} = \frac{I_{15}}{I_1} 100 = 0.09\%$$

**(Sub normele impuse de ANSI/IEEE519/82-armonicile 7, 9, 11, 13, 15, 5)
(Peste normele impuse de ANSI/IEEE519/82-armonica 3)**

$$\text{Reziduu deformatant } I_d = \sqrt{\sum_{k=2} I_k^2} = 2.5965$$

$$\text{Coeficientul de distorsiune } \delta_0 = \frac{I_d}{I_1} 100 = 15.88\%$$

admisibil 5% -

norme ANSI/IEEE519/82

$$\text{Coeficientul ponderat de distorsiune } \delta_p = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} k^2 I_k^2}}{I_1} 100 = 51\%$$

$$\text{Coeficientul de deviație } k_{dev} = \frac{\sum_{k=2} I_k}{I_1} = 0.183$$

$$\text{Coeficientul de vârf } k_v = \frac{I_{max}}{I_1} = 0.15$$

$$\text{Coeficientul de formă } k_f = \frac{I_d}{I_{mediu}} = 0.26$$

5

$$U=386[V]$$

La tensiunea de valoare $U = 386[V]$, rezultă:

$$A = \frac{U\sqrt{3}}{\omega} = \frac{386\sqrt{3}}{314} = 2.126688 \text{ [Wb]}$$

și deci

$$\Psi_m = 0.058I_m + 0.64$$

$$I_m = \frac{A - 0.64}{0.058} = 25.6 \text{ [A]}$$

$$\sin \omega t_1 = \frac{1.0018}{A} = 0.471$$

$$x_1 = \omega t_1 = 0.49 \text{ [rad]}$$

Cu:

$$x_1 = 0.49$$

$$A = 2.126688$$

$$K_1 = 0.164$$

$$K_2 = 0.058$$

$$C = 0.648$$

se obțin coeficienții Fourier:

$$I_9 = 0.31278, I_{11} = 0.17832, I_1 = 22.981, I_7 = 0.12059,$$

$$I_{13} = -9.1071 \times 10^{-3}, I_{15} = -0.10286, I_5 = -0.79536, I_3 = -3.2541$$

Curentul de magnetizare $i_m(t)$ se scrie sub forma:

$$i_m(t) = 22.981 \sin \omega t - 3.254 \sin 3\omega t - 0.79536 \sin 5\omega t + 0.12059 \sin 7\omega t + 0.31278 \sin 9\omega t + 0.17832 \sin 11\omega t - 9.1071 \times 10^{-3} \sin 13\omega t - 0.10286 \sin 15\omega t$$

având o variație în timp așa ca în figura alăturată.

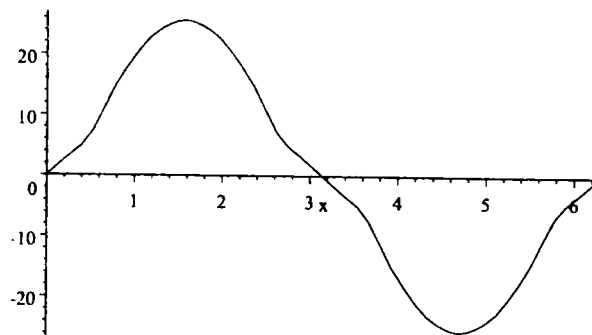


Fig.4.6. Variația în timp a curentului la $U = 386 [V]$.

Rezultă:

$$\gamma_3 = \frac{I_3}{I_1} = 13.9\%, \gamma_5 = \frac{I_5}{I_1} = 3.4\%, \gamma_7 = \frac{I_7}{I_1} = 0.52\%, \gamma_9 = \frac{I_9}{I_1} = 1.35\%$$

$$\gamma_{11} = \frac{I_{11}}{I_1} = 0.78\%, \gamma_{13} = \frac{I_{13}}{I_1} = 0.039\%, \gamma_{15} = \frac{I_{15}}{I_1} = 0.43\%$$

(Sub normele impuse de ANSI/IEEE519/82-armonicile 7, 9, 11, 13, 15, 5)
(Peste normele impuse de ANSI/IEEE519/82-armonica 3)

$$\text{Reziduul deformant } I_d = \sqrt{\sum_{k=2} I_k^2} = 3.3729$$

$$\text{Coeficientul de distorsiune } \delta_0 = \frac{I_d}{I_1} 100 = 14.68\%$$

admisibil 5% -

norme ANSI/IEEE519/82

$$\text{Coeficientul ponderat de distorsiune } \delta_p = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} k^2 I_k^2}}{I_1} 100 = 48.8\%$$

$$\text{Coeficientul de deviație } k_{dev} = \frac{\sum_{k=2} I_k}{I_1} = 0.2$$

$$\text{Coeficientul de vârf } k_v = \frac{I_{max}}{I_1} = 0.14$$

$$\text{Coeficientul de formă } k_f = \frac{I_d}{I_{mediu}} = 0.23$$

4.2 Saturația la MS

LINIARIZARE LA MS

La MS liniarizarea se face pentru curbele de magnetizare $\Psi_{md1} = f_1(I_m)$ și $\Psi_{mq1} = f_2(I_m)$, ridicate experimental și date în capitolele anterioare sub formă de tabele.

La funcționarea în gol la MS compoziția armonică a curentului se poate modifica prin alegerea potrivită a valorilor curentului de magnetizare.

La funcționarea în sarcină, datorită creșterii curentului I_q (componenta activă a curentului de alimentare), ponderea armonicilor superioare scade și deci poluarea armonică se diminuează.

Caracteristicile de magnetizare $\Psi_{md1} = f_1(I_m)$ și $\Psi_{mq1} = f_2(I_m)$ prezintă două zone distincte (figura 4.7) :

- zona liniară OA ($\Psi_m = K_1 I_m$) și
- zona liniară AB ($\Psi_m = K_2 I_m + c$)

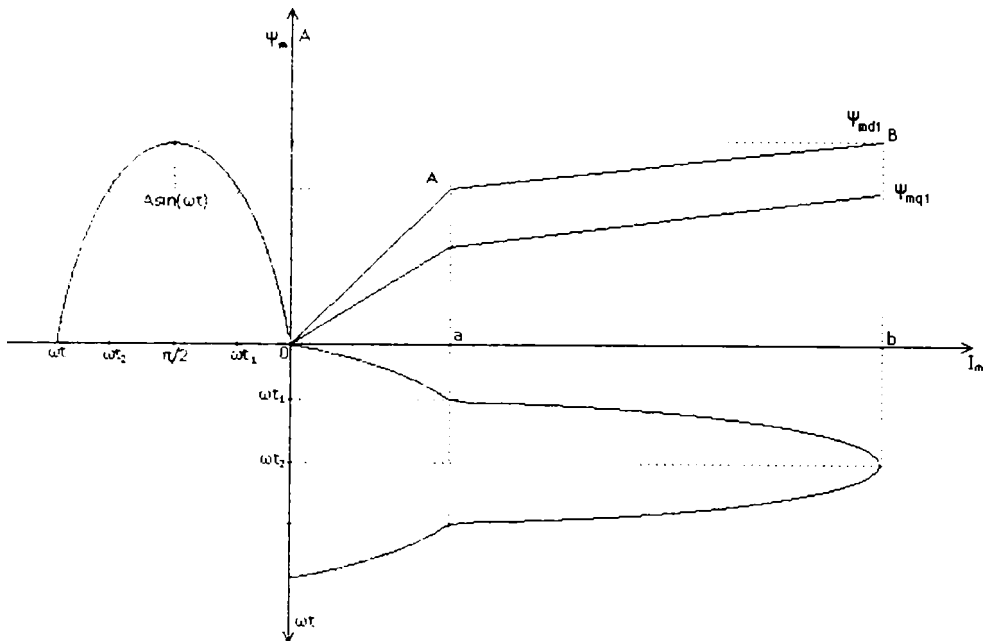


Fig.4.7. Linearizarea caracteristicilor de magnetizare la MS.

Sistemul simplificat al MS, folosit și anterior, (relațiile 117..119), se scrie sub forma:

$$\text{stator: } U_d = -\omega \Psi_{mq};$$

$$\text{stator: } U_q = -\omega \Psi_{md}$$

$$\text{cuplu: } M_{elmag} = p_1 (I_q \Psi_{md} - I_d \Psi_{mq})$$

$$\text{saturația: } \Psi_{md} = \frac{\Psi_{md1}}{I_m} (I_d + K_E I_E);$$

$$\text{saturația: } \Psi_{mq} = \frac{\Psi_{mq1}}{I_m} I_q$$

$$\Psi_{md1} = K_1 I_m \text{ (zona OA)}$$

$$\Psi_{md1} = K_2 I_m + c \text{ (zona AB)}$$

$$K_E = \frac{N_E}{N_d} = \sqrt{\frac{L_E}{L_d}}$$

La o tensiune la borne sinusoidală:

$$U = U_1 \sin \omega t$$

se obține o variație sinusoidală pentru flux:

$$\Psi_m = A \sin \omega t$$

așa cum rezultă din sistemul simplificat al MS la funcționarea în gol scris sub forma:

$$U = \omega \cdot \Psi_m;$$

$$\text{saturația : } \Psi_{md} = \frac{\Psi_{md1}}{I_m} (I_d + I_E^*);$$

$$I_E^* = \frac{N_E}{N_d} I_E$$

$$\Psi_{md1} = K_1 I_m \text{ (zona OA)}$$

$$\Psi_{md1} = K_2 I_m + c \text{ (zona AB)}$$

4.2.1 Compoziția armonica la MS la curent de excitație nul

La curent de excitație zero se obține sistemul:

$$U = \omega \cdot \Psi_m$$

$$\Psi_m = \Psi_{md1}$$

$$\Psi_{md1} = K_1 I_m \text{ (zona OA)}$$

$$\Psi_{md1} = K_2 I_m + c \text{ (zona AB)}$$

$$I_m = I_d$$

și rezultatele sunt identice cu cele de la MA.

Determinarea variației în timp a curentului de magnetizare

NUMERIC

La MS analizată, caracteristica de magnetizare $\Psi_m = \Psi_{md1}$, pe zone, se pune astfel:

ZonaOA

$$\Psi_m = 0.164 I_m$$

ZonaAB

$$\Psi_m = 0.058 I_m + 0.64$$

cu

$$a = I_m = 6.1 [A]$$

$$A \sin x_1 = 1.0018 [Wb]$$

$$A \sin \omega t_1 = 1.0018 [Wb]$$

$$A = \frac{U\sqrt{3}}{\omega}$$

$$K_1 = 0.164$$

$$K_2 = 0.058$$

$$c = 0.64$$

1

$$U = 206 [V]$$

La tensiunea de valoare $U = 206 [V]$, rezultă:

$$A = \frac{U\sqrt{3}}{\omega} = \frac{206\sqrt{3}}{314} = 1.135 [Wb]$$

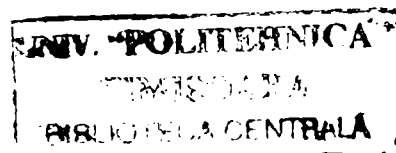
și deci

$$\Psi_m = 0.058 I_m + 0.64$$

$$I_m = \frac{A - 0.64}{0.058} = 8.53 [A]$$

$$\sin \omega t_1 = \frac{1.0018}{A} = 0.88$$

$$x_1 = \omega t_1 = 1.0815 [\text{rad}]$$



Curentul de magnetizare $i_m(t)$ se scrie sub forma:

$i_m(t) = 7.509 \sin \omega t - 0.4887 \sin 3\omega t + 0.31688 \sin 5\omega t - 0.14005 \sin 7\omega t + 1.1059 \times 10^{-2} \sin 9\omega t + 4.68$
având o variație în timp așa ca în figura alăturată

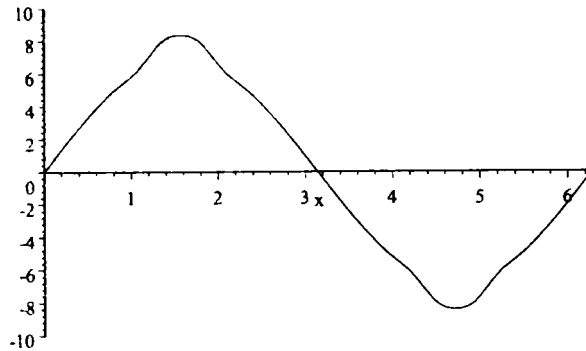


Fig.4.8. Variația în timp a curentului la $U = 206$ [V].

Coefficienții Fourier se obțin din:

$$x_1 = 1.0815$$

$$A = 1.135$$

$$K_1 = 0.164$$

$$K_2 = 0.058$$

$$C = 0.648$$

$$I_1 = \frac{A}{3.14} \left[\frac{2x_1 - \sin 2x_1}{K_1} + \frac{3.14 - 2x_1 + \sin 2x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \cos x_1$$

$$I_3 = \frac{A}{6.28} \left[\frac{2 \sin 2x_1 - \sin 4x_1}{K_1} + \frac{\sin 4x_1 - 2 \sin 2x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 3x_1}{3}$$

$$I_5 = \frac{A}{18.84} \left[\frac{3 \sin 4x_1 - 2 \sin 6x_1}{K_1} + \frac{2 \sin 6x_1 - 3 \sin 4x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 5x_1}{5}$$

$$I_7 = \frac{A}{37.68} \left[\frac{4 \sin 6x_1 - 3 \sin 8x_1}{K_1} + \frac{3 \sin 8x_1 - 4 \sin 6x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 7x_1}{7}$$

$$I_9 = \frac{A}{62.8} \left[\frac{5 \sin 8x_1 - 4 \sin 10x_1}{K_1} + \frac{4 \sin 10x_1 - 5 \sin 8x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 9x_1}{9}$$

$$I_{11} = \frac{A}{94.2} \left[\frac{6 \sin 10x_1 - 5 \sin 12x_1}{K_1} + \frac{5 \sin 12x_1 - 6 \sin 10x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 11x_1}{11}$$

$$I_{13} = \frac{A}{131.88} \left[\frac{7 \sin 12x_1 - 6 \sin 14x_1}{K_1} + \frac{6 \sin 14x_1 - 7 \sin 12x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 13x_1}{13}$$

$$I_{15} = \frac{A}{175.84} \left[\frac{8 \sin 14x_1 - 7 \sin 16x_1}{K_1} + \frac{7 \sin 16x_1 - 8 \sin 14x_1}{K_2} \right] - \frac{4C}{3.14K_2} \frac{\cos 15x_1}{15}$$

$$I_d = \sqrt{I_3^2 + I_5^2 + I_7^2 + I_9^2 + I_{11}^2 + I_{13}^2 + I_{15}^2}$$

$$\delta_P = \frac{\sqrt{9I_3^2 + 25I_5^2 + 49I_7^2 + 81I_9^2 + 121I_{11}^2 + 169I_{13}^2 + 225I_{15}^2}}{I_1}$$

$$\text{Solution is: } \left\{ \begin{array}{l} C = 0.648, I_{15} = 1.3565 \times 10^{-2}, I_d = 0.60278, \\ I_1 = 7.5091, A = 1.135, x_1 = 1.0815, \\ I_5 = 0.31688, \delta_P = 0.33354, I_{11} = 4.6877 \times 10^{-2}, \\ K_1 = 0.164, K_2 = 0.058, I_{13} = -4.4499 \times 10^{-2}, \\ I_7 = -0.14005, I_9 = 1.1059 \times 10^{-2}, I_3 = -0.4887 \end{array} \right\}$$

Având în vedere aceste rezultate, rezultă:

- Nivelul armonicilor de rang 3: $(\sin 3t) \quad \gamma_3 = \frac{I_3}{I_1} = 6.5\%$
- Nivelul armonicilor de rang 5: $(\sin 5t) \quad \gamma_5 = \frac{I_5}{I_1} = 4\%$
- Nivelul armonicilor de rang 7: $(\sin 7t) \quad \gamma_7 = \frac{I_7}{I_1} = 1.86\%$
- Nivelul armonicilor de rang 9: $(\sin 9t) \quad \gamma_9 = \frac{I_9}{I_1} = 0.146\%$
- Nivelul armonicilor de rang 11: $(\sin 11t) \quad \gamma_{11} = \frac{I_{11}}{I_1} = 0.63\%$
- Nivelul armonicilor de rang 13: $(\sin 13t) \quad \gamma_{13} = \frac{I_{13}}{I_1} = 0.59\%$
- Nivelul armonicilor de rang 15: $(\sin 15t) \quad \gamma_{15} = \frac{I_{15}}{I_1} = 5.2\%$

(Sub normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 7, 9, 11, 13)

(Peste normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 3,5,15)

$$\text{Reziduu deformant } I_d = \sqrt{\sum_{k=2} I_k^2} = 0.60278$$

$$\text{Coeficientul de distorsiune } \delta_0 = \frac{I_d}{I_1} 100 = 8\%$$

admisibil 5% -

norme ANSI/IEEE519/82

$$\text{Coeficientul ponderat de distorsiune } \delta_P = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} k^2 I_k^2}}{I_1} 100 = 33.354\%$$

$$\text{Coeficientul de deviație } k_{dev} = \frac{\sum_{k=2} I_k}{I_1} = 0.15$$

$$\text{Coeficientul de vârf } k_v = \frac{I_{max}}{I_1} = 0.666$$

$$\text{Coeficientul de formă } k_f = \frac{I_d}{I_{mediu}} = 0.126$$

2

$$\mathbf{U=214[V]}$$

La tensiunea de valoare $\mathbf{U = 214[V]}$, rezultă:

$$A = \frac{U\sqrt{3}}{\omega} = \frac{214\sqrt{3}}{314} = 1.18 \text{ [Wb]}$$

și deci

$$\Psi_m = 0.058I_m + 0.64$$

$$I_m = \frac{A - 0.64}{0.058} = 9.3 \text{ [A]}$$

$$\sin \omega t_1 = \frac{1.0018}{A} = 0.85$$

$$x_1 = \omega t_1 = 1.01536 \text{ [rad]}$$

Cu

$$x_1 = 1.01536$$

$$A = 1.18$$

$$K_1 = 0.164$$

$$K_2 = 0.058$$

$$C = 0.648$$

se obțin coeficienții Fourier:

$$I_3 = -0.69585, A = 1.18, I_9 = -5.0237 \times 10^{-2}, I_1 = 8.0883,$$

$$\delta_p = 0.38575, I_{11} = 7.4376 \times 10^{-2}, I_{15} = -2.1924 \times 10^{-2}$$

$$I_5 = 0.38620, I_{13} = -2.5824 \times 10^{-2}, I_7 = -0.10626$$

Curentul de magnetizare $i_m(t)$ se scrie sub forma:

$$i_m(t) = 8.088 \sin \omega t - 2.5824 \times 10^{-2} \sin 3\omega t + 0.38620 \sin 5\omega t - \\ -0.10626 \sin 7\omega t - 5.0237 \times 10^{-2} \sin 9\omega t + 7.4376 \times 10^{-2} \sin 11\omega t - \\ -2.5824 \times 10^{-2} \sin 13\omega t - 2.1924 \times 10^{-2} \sin 15\omega t$$

având o variație în timp așa ca în figura alăturată.

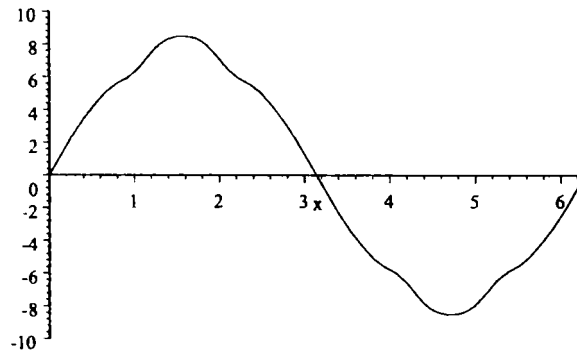


Fig.4.9. Variația în timp a curentului la $U = 214 \text{ [V]}$

Având în vedere aceste rezultate, rezultă:

-nivelurile armonicilor:

$$\gamma_3 = \frac{I_3}{I_1} = 8.75\%, \gamma_5 = \frac{I_5}{I_1} = 4.8\%, \gamma_7 = \frac{I_7}{I_1} = 1.25\%,$$

$$\gamma_9 = \frac{I_9}{I_1} = 0.62\%, \gamma_{11} = \frac{I_{11}}{I_1} = 0.94\%, \gamma_{13} = \frac{I_{13}}{I_1} = 0.3\%,$$

$$\gamma_{15} = \frac{I_{15}}{I_1} = 0.25\%$$

(Sub normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 7, 9, 11, 13, 15)
(Peste normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 3, 5)

$$\text{– Reziuuul deformant } I_d = \sqrt{\sum_{k=2} I_k^2} = 0.8$$

$$\text{– Coeficientul de distorsiune } \delta_0 = \frac{I_d}{I_1} 100 = 10\%$$

admisibil 5% -

norme ANSI/IEEE519/82

$$\text{– Coeficientul ponderat de distorsiune } \delta_p = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} k^2 I_k^2}}{I_1} 100 = 38\%$$

$$\text{– Coeficientul de deviație } k_{dev} = \frac{\sum_{k=2} I_k}{I_1} = 0.163$$

$$\text{– Coeficientul de vârf } k_v = \frac{I_{max}}{I_1} = 0.087$$

$$\text{– Coeficientul de formă } k_f = \frac{I_d}{I_{mediu}} = 0.157$$

3

$$\mathbf{U=236[V]}$$

La tensiunea de valoare $\mathbf{U = 236[V]}$, rezultă:

$$A = \frac{U\sqrt{3}}{\omega} = \frac{236\sqrt{3}}{314} = 1.3 \text{ [Wb]}$$

$$\Psi_m = 0.058I_m + 0.64$$

$$I_m = \frac{A - 0.64}{0.058} = 11.38 \text{ [A]}$$

și deci

$$\sin \omega t_1 = \frac{1.0018}{A} = 0.77$$

$$x_1 = \omega t_1 = 0.87957 \text{ [rad]}$$

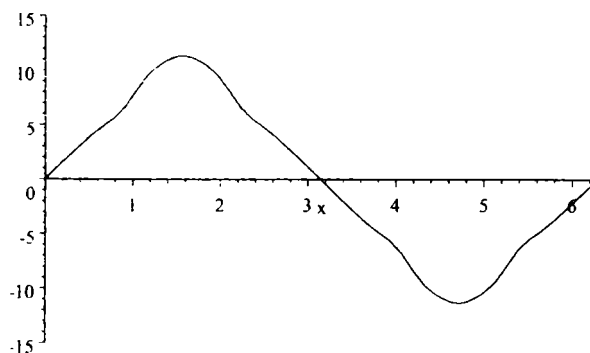
Cu aceste date se obțin coeficienții Fourier:

$$\text{Solution is: } \left\{ \begin{array}{l} C = 0.648, K_1 = 0.164, K_2 = 0.058, I_d = 1.3097, \\ I_3 = -1.2239, I_5 = 0.43033, I_1 = 9.759, \\ \delta_p = 0.47039, x_1 = 0.87957, I_{15} = -2.8133 \times 10^{-2}, \\ I_7 = 7.0894 \times 10^{-2}, I_9 = -0.14791, I_{13} = 6.5712 \times 10^{-2}, \\ A = 1.3, I_{11} = 1.5069 \times 10^{-2} \end{array} \right\}$$

Curentul de magnetizare $i_m(t)$ se scrie sub forma:

$$i_m(t) = 9.759 \sin \omega t - 1.2239 \sin 3\omega t + 0.43033 \sin 5\omega t + 7.0894 \times 10^{-2} \sin 7\omega t - 0.14791 \sin 9\omega t + 1.5069$$

având o variație în timp așa ca în figura alăturată

Fig.4.10. Variația în timp a curentului la $U = 236$ [V]

Având în vedere aceste rezultate, rezultă:

-nivelul armonicilor

$$\begin{aligned}\gamma_3 &= \frac{I_3}{I_1} 100 = 12.57\%, \gamma_5 = \frac{I_5}{I_1} 100 = 4.4\%, \gamma_7 = \frac{I_7}{I_1} 100 = 0.72\%, \\ \gamma_9 &= \frac{I_9}{I_1} 100 = 1.52\%, \gamma_{11} = \frac{I_{11}}{I_1} 100 = 0.15\%, \\ \gamma_{13} &= \frac{I_{13}}{I_1} 100 = 0.67\%, \gamma_{15} = \frac{I_{15}}{I_1} 100 = 0.288\%\end{aligned}$$

(Sub normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 7, 9, 11, 13, 15)
(Peste normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 3,5)

$$\text{– Reziduul deformant } I_d = \sqrt{\sum_{k=2} I_k^2} = 1.3$$

$$\text{– Coeficientul de distorsiune } \delta_0 = \frac{I_d}{I_1} 100 = 13.4\%$$

admisibil 5% -

norme ANSI/IEEE519/82

$$\text{– Coeficientul ponderat de distorsiune } \delta_p = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} k^2 I_k^2}}{I_1} 100 = 47\%$$

$$\text{– Coeficientul de deviație } k_{dev} = \frac{\sum_{k=2} I_k}{I_1} = 0.193$$

$$\text{– Coeficientul de vârf } k_v = \frac{I_{max}}{I_1} = 0.047$$

$$\text{– Coeficientul de formă } k_f = \frac{I_d}{I_{mediu}} = 0.13$$

4

U=313[V]

La tensiunea de valoare **U = 313[V]**, rezultă:

$$A = \frac{U\sqrt{3}}{\omega} = \frac{313\sqrt{3}}{314} = 1.7245 \text{ [Wb]}$$

$$\Psi_m = 0.058I_m + 0.64$$

$$I_m = \frac{A - 0.64}{0.058} = 18.69[\text{A}]$$

și deci

$$\sin \omega t_1 = \frac{1.0018}{A} = 0.581$$

$$x_1 = \omega t_1 = 0.619865[\text{rad}]$$

Cu aceste date se obțin coeficienții Fourier:

$$\text{Solution is: } \left\{ \begin{array}{l} C = 0.648, I_{13} = -0.11730, I_d = 2.5965, \\ I_5 = -0.15133, I_{11} = -7.6285 \times 10^{-2}, I_7 = 0.37166, \\ I_9 = 0.17544, I_3 = -2.5554, I_{15} = -1.4735 \times 10^{-2}, \\ x_1 = 0.61987, K_1 = 0.164, K_2 = 0.058, \\ I_1 = 16.349, \delta_p = 0.51787, A = 1.7245 \end{array} \right\}$$

Curentul de magnetizare $i_m(t)$ se scrie sub forma:

$$i_m(t) = 16.349 \sin \omega t - 2.5554 \sin 3\omega t - 0.15133 \sin 5\omega t + 0.37166 \sin 7\omega t + 0.17544 \sin 9\omega t - 7.6285 \times 10^{-2} \sin 15\omega t$$

având o variație în timp așa ca în figura alăturată.

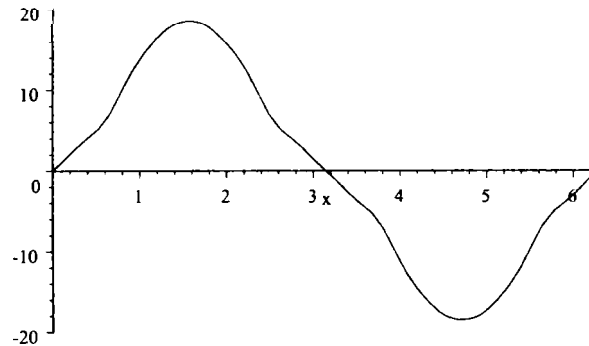


Fig.4.11. Variația în timp a curentului la $U = 313$ [V].

Având în vedere aceste rezultate, rezultă:

-nivelul armonicilor

$$\gamma_3 = \frac{I_3}{I_1} = 15.6\%, \gamma_5 = \frac{I_5}{I_1} = 0.95\%, \gamma_7 = \frac{I_7}{I_1} = 2.26\%, \gamma_9 = \frac{I_9}{I_1} = 1.07\%$$

$$\gamma_{11} = \frac{I_{11}}{I_1} = 0.46\%, \gamma_{13} = \frac{I_{13}}{I_1} = 0.71\%, \gamma_{15} = \frac{I_{15}}{I_1} = 0.09\%$$

**(Sub normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 7, 9, 11, 13, 15, 5)
(Peste normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonica 3)**

$$- \text{Reziduuul deformant } I_d = \sqrt{\sum_{k=2} I_k^2} = 2.5965$$

$$- \text{Coeficientul de distorsiune } \delta_0 = \frac{I_d}{I_1} 100 = 15.88\%$$

admisibil 5% -

norme ANSI/IEEE519/82

$$- \text{Coeficientul ponderat de distorsiune } \delta_p = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} k^2 I_k^2}}{I_1} 100 = 51\%$$

$$- \text{Coeficientul de deviație } k_{dev} = \frac{\sum_{k=2} I_k}{I_1} = 0.183$$

$$- \text{Coeficientul de vârf } k_v = \frac{I_{max}}{I_1} = 0.15$$

$$- \text{Coeficientul de formă } k_f = \frac{I_d}{I_{mediu}} = 0.26$$

5

$$\mathbf{U=386[V]}$$

La tensiunea de valoare $\mathbf{U = 386[V]}$, rezultă:

$$A = \frac{U\sqrt{3}}{\omega} = \frac{386\sqrt{3}}{314} = 2.126688 \text{ [Wb]}$$

și deci

$$\Psi_m = 0.058I_m + 0.64$$

$$I_m = \frac{A - 0.64}{0.058} = 25.6 \text{ [A]}$$

$$\sin \omega t_1 = \frac{1.0018}{A} = 0.471$$

$$x_1 = \omega t_1 = 0.49 \text{ [rad]}$$

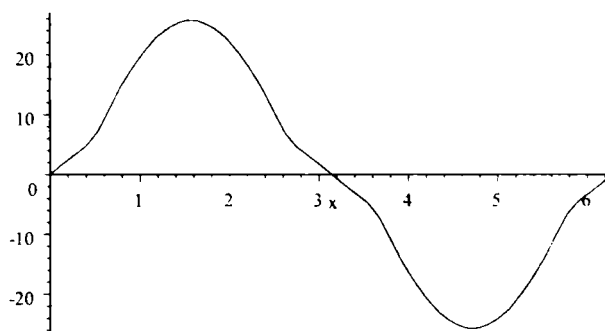
Cu aceste date se obțin coeficienții Fourier:

$$\text{Solution is: } \left\{ \begin{array}{l} I_9 = 0.31278, x_1 = 0.49, A = 2.1267, \\ I_d = 3.3729, I_{11} = 0.17832, I_1 = 22.981, I_7 = 0.1209, \\ \delta_p = 0.48844, I_{13} = -9.1071 \times 10^{-3}, I_{15} = -0.10286, \\ I_5 = -0.79536, I_3 = -3.51, C = 0.648, \\ K_1 = 0.164, K_2 = 0.058 \end{array} \right\}$$

Curentul de magnetizare $i_m(t)$ se scrie sub forma:

$$i_m(t) = 22.981 \sin \omega t - 3.51 \sin 3\omega t - 0.79536 \sin 5\omega t + 0.1209 \sin 7\omega t + 0.31278 \sin 9\omega t + 0.17832 \sin$$

având o variație în timp așa ca în figura alăturată

Fig.4.12. Variația în timp a curentului la $U = 386$ [V]

Având în vedere aceste rezultate, rezultă:

-nivelurile armonicilor sunt:

$$\gamma_3 = \frac{I_3}{I_1} 100 = 13.9\%, \gamma_5 = \frac{I_5}{I_1} 100 = 3.4\%, \gamma_7 = \frac{I_7}{I_1} 100 = 0.52\%,$$

$$\gamma_9 = \frac{I_9}{I_1} 100 = 1.35\%, \gamma_{11} = \frac{I_{11}}{I_1} 100 = 0.78\%, \gamma_{13} = \frac{I_{13}}{I_1} 100 = 0.039\%,$$

$$\gamma_{15} = \frac{I_{15}}{I_1} 100 = 0.43\%$$

(Sub normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 7, 9, 11, 13, 15, 5)
(Peste normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonica 3)

$$\text{– Reziduul deformant } I_d = \sqrt{\sum_{k=2} I_k^2} = 3.3729$$

$$\text{– Coeficientul de distorsiune } \delta_0 = \frac{I_d}{I_1} 100 = 14.68\%$$

admisibil 5% -

norme ANSI/IEEE519/82

$$\text{– Coeficientul ponderat de distorsiune } \delta_p = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} k^2 I_k^2}}{I_1} 100 = 48.8\%$$

$$\text{– Coeficientul de deviație } k_{dev} = \frac{\sum_{k=2} I_k}{I_1} = 0.2$$

$$\text{– Coeficientul de vârf } k_v = \frac{I_{max}}{I_1} = 0.14$$

$$\text{– Coeficientul de formă } k_f = \frac{I_d}{I_{mediu}} = 0.23$$

4.2.2 Compoziția armonică la MS la diverse valori ale curentului de excitație

Curentul de excitație I_E^* influențează semnificativ valoarea efectivă a fundamentalei, așa cum rezultă din sistemul alăturat.

$$U = \omega \cdot \Psi_m i$$

$$\Psi_{md} = \Psi_{md1}$$

$$I_{d(1)} = I_{m(1)} - I_E^*$$

$$\Psi_{md1} = K_1 I_m \quad (\text{zona OA-nesaturata})$$

$$\Psi_{md1} = K_2 I_m + c \quad (\text{zona AB-saturata})$$

Determinarea variației în timp a curentului de magnetizare

NUMERIC

La MS analizată, caracteristica de magnetizare $\Psi_m = \Psi_{md1}$, pe zone, se pune astfel:

Zona OA

$$\Psi_m = 0.164 I_m$$

Zona AB

$$\Psi_m = 0.058 I_m + 0.64$$

cu

$$a = I_m = 6.1 [A]$$

$$A \sin x_1 = 1.0018 [Wb]$$

$$A \sin \omega t_1 = 1.0018 [Wb]$$

$$A = \frac{U\sqrt{3}}{\omega}$$

$$K_1 = 0.164$$

$$K_2 = 0.058$$

$$c = 0.64$$

Se alege pentru analiza acestui caz valoarea tensiunii :

$$\mathbf{U} = 236 [V]$$

deoarece corespunde realității ($U_N = 230 [V]$).

La tensiunea de valoare $\mathbf{U} = 236 [V]$, rezultă:

$$A = \frac{U\sqrt{3}}{\omega} = \frac{236\sqrt{3}}{314} = 1.3 [Wb]$$

și deci

$$\sin \omega t_1 = \frac{1.0018}{A} = 0.77$$

$$x_1 = \omega t_1 = 0.87957 [\text{rad}]$$

Cu aceste date se obțin coeficienții Fourier:

$$\text{Solution is: } \left\{ \begin{array}{l} C = 0.648, K_1 = 0.164, K_2 = 0.058, \\ I_d = 1.3097, I_3 = -1.2239, I_5 = 0.43033, \\ I_1 = 9.7569, \delta_p = 0.47039, x_1 = 0.87957, \\ I_{15} = -2.8133 \times 10^{-2}, I_7 = 7.0894 \times 10^{-2}, I_9 = -0.14791, \\ I_{13} = 6.5712 \times 10^{-2}, A = 1.3, I_{11} = 1.5069 \times 10^{-2} \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned}
 i_m(t) &= I_1 \sin \omega t + I_3 \sin 3\omega t + I_5 \sin 5\omega t + I_7 \sin 7\omega t + I_9 \sin 9\omega t + \\
 &\quad + I_{11} \sin 11\omega t + I_{13} \sin 13\omega t + I_{15} \sin 15\omega t \\
 &= I_1 \sin x + I_3 \sin 3x + I_5 \sin 5x + I_7 \sin 7x + I_9 \sin 9x + \\
 &\quad + I_{11} \sin 11x + I_{13} \sin 13x + I_{15} \sin 15x
 \end{aligned}$$

cazul 1**Curent de excitație $I_E^* = 1$ [A]**

Coeficienții Fourier la tensiunea $U=236$ [V] sunt:

$$\begin{aligned}
 I_d &= 1.3097, I_3 = -1.2239, I_5 = 0.43033, I_7 = 9.7569, \delta_p = 0.47039, \\
 I_{15} &= -2.8133 \times 10^{-2}, I_9 = 7.0894 \times 10^{-2}, I_9 = -0.14791, \\
 I_{13} &= 6.57 \times 10^{-2}, I_{11} = 1.5069 \times 10^{-2}
 \end{aligned}$$

Curentul de magnetizare $i_m(t)$ se scrie sub forma:

$$\begin{aligned}
 i_m(t) &= 9.7569 \sin \omega t - 1.2239 \sin 3\omega t + 0.43033 \sin 5\omega t + \\
 &\quad + 7.0894 \times 10^{-2} \sin 7\omega t - 0.14791 \sin 9\omega t + 1.5069 \times 10^{-2} \sin 11\omega t + \\
 &\quad + 6.57 \times 10^{-2} \sin 13\omega t - 2.8133 \times 10^{-2} \sin 15\omega t
 \end{aligned}$$

având în vedere aceste rezultate, rezultă:

$$I_{m(1)} = \frac{I_1}{\sqrt{2}} = 6.92 \text{ [A]}$$

$$I_{d(1)} = I_{m(1)} - I_E^* = 6.92 - 1 = 5.92 \text{ [A]}$$

Curentul statoric $i(t)$ are următoarea formă:

$$\begin{aligned}
 i_m(t) &= 5.92\sqrt{2} \sin \omega t - 1.2239 \sin 3\omega t + 0.43033 \sin 5\omega t + \\
 &\quad + 7.0894 \times 10^{-2} \sin 7\omega t - 0.14791 \sin 9\omega t + 1.5069 \times 10^{-2} \sin 11\omega t + \\
 &\quad + 6.57 \times 10^{-2} \sin 13\omega t - 2.8133 \times 10^{-2} \sin 15\omega t
 \end{aligned}$$

Având o variație în timp așa ca în figura alăturată.

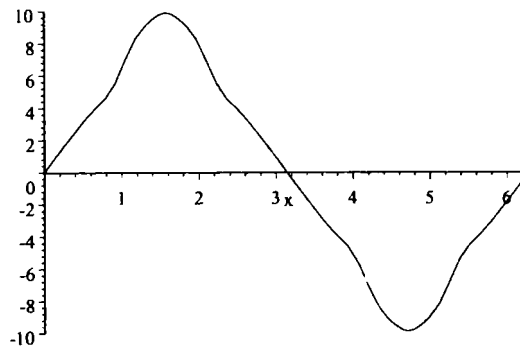


Fig.4.13. Variația în timp a curentului statoric

Nivelurile armonicilor sunt:

$$\gamma_3 = \frac{I_3}{I_{d(1)}} 100 = 14.66\%, \gamma_5 = \frac{I_5}{I_{d(1)}} 100 = 5.1\%, \gamma_7 = \frac{I_7}{I_{d(1)}} 100 = 0.8\%,$$

$$\gamma_9 = \frac{I_9}{I_{d(1)}} 100 = 1.77\%, \gamma_{11} = \frac{I_{11}}{I_{d(1)}} 100 = 0.18\%,$$

$$\gamma_{13} = \frac{I_{13}}{I_{d(1)}} 100 = 0.78\%, \gamma_{15} = \frac{I_{15}}{I_{d(1)}} 100 = 0.33\%$$

(Sub normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 7, 9, 11, 13, 15)
(Peste normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 3,5)

Se obțin următoarele rezultate

$$\text{– Reziuul deformant } I_d = \sqrt{\sum_{k=2} I_k^2} = 1.3$$

$$\text{– Coeficientul de distorsiune } \delta_0 = \frac{I_d}{I_{d(1)}} 100 = 21,9\%$$

admisibil 5% -

norme ANSI/IEEE519/82

$$\text{– Coeficientul ponderat de distorsiune } \delta_P = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} k^2 I_k^2}}{I_{d(1)}} 100 = 54.6\%$$

$$\text{– Coeficientul de deviatie } k_{dev} = \frac{\sum_{k=2} I_k}{I_{d(1)}} = 0.22$$

$$\text{– Coeficientul de varf } k_v = \frac{I_{max}}{I_{d(1)}} = 0.08$$

$$\text{– Coeficientul de forma } k_f = \frac{I_d}{I_{mediu}} = 0.115$$

cazul 2

Curent de excitație $I_E^* = 6.92$ [A]

Coeficienții Fourier la tensiunea $U=236$ [V] sunt:

$$I_d = 1.307, I_3 = -1.2239, I_5 = 0.43033, I_7 = 9.7569, \delta_P = 0.47039,$$

$$I_{15} = -2.8133 \times 10^{-2}, I_9 = 7.0894 \times 10^{-2}, I_{11} = -0.14791,$$

$$I_{13} = 6.57 \times 10^{-2}, I_{15} = 1.5069 \times 10^{-2}$$

Curentul de magnetizare $i_m(t)$ se scrie sub forma

$$i_m(t) = 9.7569 \sin \omega t - 1.2239 \sin 3\omega t + 0.43033 \sin 5\omega t +$$

$$7.0894 \times 10^{-2} \sin 7\omega t - 0.14791 \sin 9\omega t + 1.5069 \times 10^{-2} \sin 11\omega t +$$

$$+6.57 \times 10^{-2} \sin 13\omega t - 2.8133 \times 10^{-2} \sin 15\omega t$$

Având în vedere aceste rezultate, rezultă:

$$I_{m(1)} = \frac{I_1}{\sqrt{2}} = 6.92 \text{ [A]}$$

$$I_{d(1)} = I_{m(1)} - I_E^* = 6.92 - 6.92 = 0 \text{ [A]}$$

Curentul statoric $i(t)$ are următoarea formă:

$$i_m(t) = -1.2239 \sin 3\omega t + 0.43033 \sin 5\omega t + 7.0894 \times 10^{-2} \sin 7\omega t -$$

$$-0.14791 \sin 9\omega t + 1.5069 \times 10^{-2} \sin 11\omega t + 6.57 \times 10^{-2} \sin 13\omega t -$$

$$-2.8133 \times 10^{-2} \sin 15\omega t$$

având o variație în timp așa ca în figura alăturată.

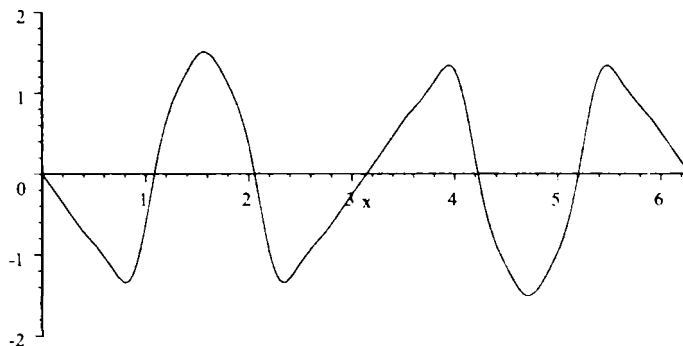


Fig.4.14. Variația în timp a curentului statoric la $I_E^* = 6.92$ [A]

-nivelurile armonicilor sunt:

$$\gamma_3 = \frac{I_3}{I_{d(1)}} = a, \gamma_5 = \frac{I_5}{I_{d(1)}} = 0.3a, \gamma_7 = \frac{I_7}{I_{d(1)}} = 0.06a, \gamma_9 = \frac{I_9}{I_{d(1)}} = 0.11a$$

$$\gamma_{11} = \frac{I_{11}}{I_{d(1)}} = 0.012a, \gamma_{13} = \frac{I_{13}}{I_{d(1)}} = 0.005a, \gamma_{15} = \frac{I_{15}}{I_{d(1)}} = 0.022a$$

(Peste normele impuse de ANSI/IEEE519/82-sunt toate armonicile deoarece "a" tinde spre infinit deoarece $I_{d(1)} = 0$)

Indicatorii regimului deformat sunt:

- Reziduul deformat $I_d = \sqrt{\sum_{k=2} I_k^2} = 1.3$

- Coeficientul de distorsiune $\delta_0 = \frac{I_d}{I_{d(1)}} \cdot 100 = a$

admisibil 5% -

norme ANSI/IEEE519/82

- Coeficientul ponderat de distorsiune $\delta_p = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} k^2 I_k^2}}{I_{d(1)}} \cdot 100 = a/2$

- Coeficientul de deviatie $k_{dev} = \frac{\sum_{k=2} I_k}{I_{d(1)}} = f' mare$

- Coeficientul de varf $k_v = \frac{I_{max}}{I_{d(1)}} = f' mare$

- Coeficientul de forma $k_f = \frac{I_d}{I_{mediu}} = 0.115$

cazul 3

Curent de excitatie $I_E^* = 10$ [A]

Coeficienții Fourier la tensiunea $U=236$ [V]sunt:

$$I_d = 1.3097, I_3 = -1.2239, I_5 = 0.43033, I_7 = 9.7569, \delta_P = 0.47039,$$

$$I_{15} = -2.8133 \times 10^{-2}, I_7 = 7.0894 \times 10^{-2}, I_9 = 7.0894 \times 10^{-2},$$

$$I_{13} = 6.57 \times 10^{-2}, I_{11} = 1.5069 \times 10^{-2}$$

Curentul de magnetizare $i_m(t)$ se scrie sub forma:

$$i_m(t) = 9.7569 \sin \omega t - 1.2239 \sin 3\omega t + 0.43033 \sin 5\omega t + \\ + 7.0894 \times 10^{-2} \sin 7\omega t + 7.0894 \times 10^{-2} \sin 9\omega t + 1.5069 \times 10^{-2} \sin 11\omega t + \\ + 6.57 \times 10^{-2} \sin 13\omega t - 2.8133 \times 10^{-2} \sin 15\omega t$$

Având în vedere aceste rezultate, rezultă:

$$I_{m(1)} = \frac{I_1}{\sqrt{2}} = 6.92 \text{ [A]}$$

$$I_{d(1)} = I_{m(1)} - I_E^* = 6.92 - 10 = -3.08 \text{ [A]}$$

Curentul statoric $i(t)$ are următoarea formă:

$$i(t) = -3.08\sqrt{2} \sin \omega t - 1.2239 \sin 3\omega t + 0.43033 \sin 5\omega t + \\ + 7.0894 \times 10^{-2} \sin 7\omega t + 7.0894 \times 10^{-2} \sin 9\omega t + 1.5069 \times 10^{-2} \sin 11\omega t + \\ + 6.57 \times 10^{-2} \sin 13\omega t - 2.8133 \times 10^{-2} \sin 15\omega t$$

având o variație în timp așa ca în figura alăturată

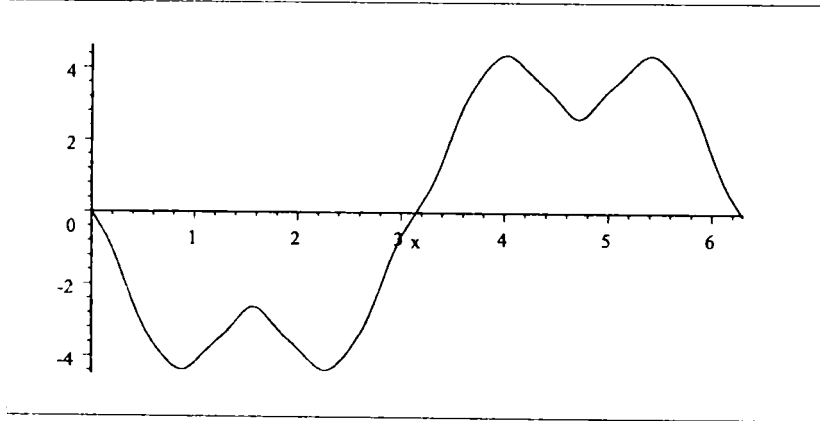


Fig.4.15. Variația în timp a curentului statoric la $I_E^* = 10 \text{ [A]}$

Nivelurile armonicilor sunt:

$$\gamma_3 = \frac{I_3}{I_{d(1)}} 100 = 28.66\%, \gamma_5 = \frac{I_5}{I_{d(1)}} 100 = 10.1\%, \gamma_7 = \frac{I_7}{I_{d(1)}} 100 = 1.6\%,$$

$$\gamma_9 = \frac{I_9}{I_{d(1)}} 100 = 3.5\%, \gamma_{11} = \frac{I_{11}}{I_{d(1)}} 100 = 0.36\%,$$

$$\gamma_{13} = \frac{I_{13}}{I_{d(1)}} 100 = 1.6\%, \gamma_{15} = \frac{I_{15}}{I_{d(1)}} 100 = 0.66\%$$

(Sub normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 7, 11, 13, 15, 9)
(Peste normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 3, 5)

Indicatorii regimului deformat sunt:

$$- \text{Reziduul deformant } I_d = \sqrt{\sum_{k=2} I_k^2} = 1.3$$

$$- \text{Coeficientul de distorsiune } \delta_0 = \frac{I_d}{I_{d(1)}} 100 = 44\%$$

admisibil 5% -

norme ANSI/IEEE519/82

$$- \text{Coeficientul ponderat de distorsiune } \delta_p = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} k^2 I_k^2}}{I_{d(1)}} 100 = 100.6\%$$

$$- \text{Coeficientul de deviatie } k_{dev} = \frac{\sum_{k=2} I_k}{I_{d(1)}} = 0.44$$

$$- \text{Coeficientul de varf } k_v = \frac{I_{max}}{I_{d(1)}} = 0.16$$

$$- \text{Coeficientul de forma } k_f = \frac{I_d}{I_{mediu}} = 0.22$$

cazul 4

Curent de excitație $I_E^* = 20$ [A]

Coeficienții Fourier la tensiunea $U=236$ [V] sunt:

$$I_d = 1.307, I_3 = -1.2239, I_5 = 0.43033, I_7 = 9.7569, \delta_p = 0.47039,$$

$$I_{15} = -2.8133 \times 10^{-2}, I_7 = 7.0894 \times 10^{-2}, I_9 = -0.14791,$$

$$I_{13} = 6.57 \times 10^{-2}, I_{11} = 1.5069 \times 10^{-2}$$

Curentul de magnetizare $i_m(t)$ se scrie sub forma:

$$i_m(t) = 9.7569 \sin \omega t - 1.2239 \sin 3\omega t + 0.43033 \sin 5\omega t +$$

$$+ 7.0894 \times 10^{-2} \sin 7\omega t - 0.14791 \sin 9\omega t +$$

$$+ 1.5069 \times 10^{-2} \sin 11\omega t + 6.57 \times 10^{-2} \sin 13\omega t -$$

$$- 2.8133 \times 10^{-2} \sin 15\omega t$$

Având în vedere aceste rezultate, rezultă:

$$I_{m(1)} = \frac{I_1}{\sqrt{2}} = 6.92 \text{ [A]}$$

$$I_{d(1)} = I_{m(1)} - I_E^* = 6.92 - 20 = -13.08 \text{ [A]}$$

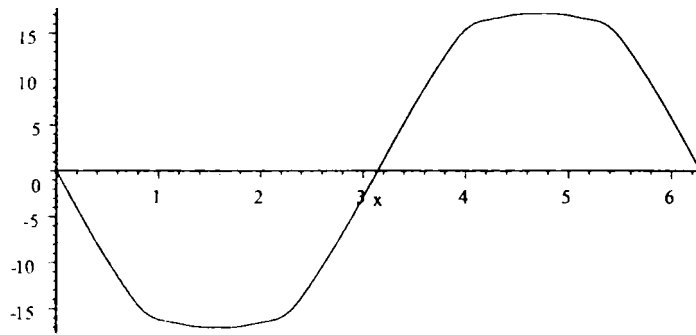
Curentul statoric $i(t)$ are următoarea formă:

$$i_m(t) = -13.08\sqrt{2} \sin \omega t - 1.2239 \sin 3\omega t + 0.43033 \sin 5\omega t +$$

$$+ 7.0894 \times 10^{-2} \sin 7\omega t - 0.14791 \sin 9\omega t + 1.5069 \times 10^{-2} \sin 11\omega t +$$

$$+ 6.57 \times 10^{-2} \sin 13\omega t - 2.8133 \times 10^{-2} \sin 15\omega t$$

având o variație în timp așa ca în figura alăturată.

Fig.4.16. Variația în timp a curentului statoric la $I_E^* = 20$ [A]

Nivelurile armonicilor sunt:

$$\gamma_3 = \frac{I_3}{I_{d(1)}} 100 = 6.6\%, \gamma_5 = \frac{I_5}{I_{d(1)}} 100 = 2.34\%, \gamma_7 = \frac{I_7}{I_{d(1)}} 100 = 0.38\%,$$

$$\gamma_9 = \frac{I_9}{I_{d(1)}} 100 = 0.08\%, \gamma_{11} = \frac{I_{11}}{I_{d(1)}} 100 = 0.082\%,$$

$$\gamma_{13} = \frac{I_{13}}{I_{d(1)}} 100 = 0.36\%, \gamma_{15} = \frac{I_{15}}{I_{d(1)}} 100 = 0.15\%$$

(Sub normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 7, 11, 13, 15, 9)
(Peste normele impuse de ANSI/IEEE519/82–armonicile 3, 5)

Indicatorii regimului deformat sunt:

$$\text{– Reziuul deformat } I_d = \sqrt{\sum_{k=2} I_k^2} = 1.3$$

$$\text{– Coeficientul de distorsiune } \delta_0 = \frac{I_d}{I_{d(1)}} 100 = 10\%$$

admisibil 5% -

norme ANSI/IEEE519/82

$$\text{– Coeficientul ponderat de distorsiune } \delta_P = \frac{\sqrt{\sum_{k=2} k^2 I_k^2}}{I_{d(1)}} 100 = 35\%$$

$$\text{– Coeficientul de deviație } k_{dev} = \frac{\sum_{k=2} I_k}{I_{d(1)}} = 0.144$$

$$\text{– Coeficientul de varf } k_v = \frac{I_{max}}{I_{d(1)}} = 0.094$$

$$\text{– Coeficientul de forma } k_f = \frac{I_d}{I_{mediu}} = 0.22$$

4.3 Concluzii

MA + MS fără excitație

1. La creșterea tensiunii de alimentare valorile amplitudinilor curentului cresc, ca și în figura 4.17

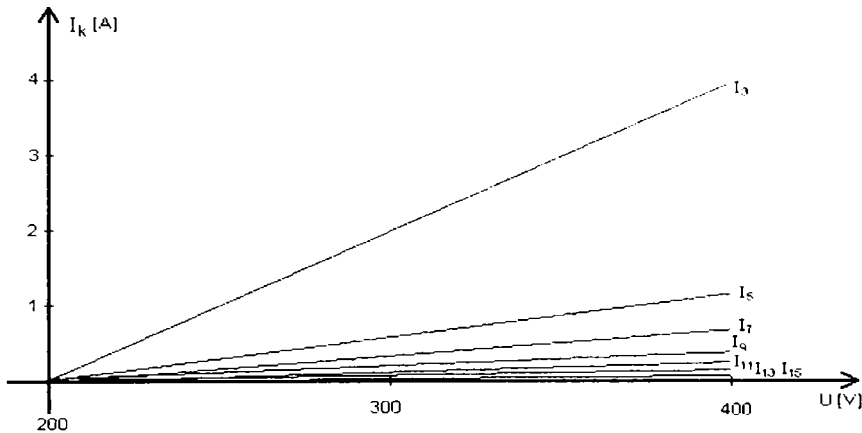


Fig. 4.17. Variația cu tensiunea a amplitudinilor armonice în curent

2. Coeficientul ponderat de distorsiune δ_p și reziduu deformant I_d se măresc cu creșterea tensiunii de alimentare (figura 4.18)

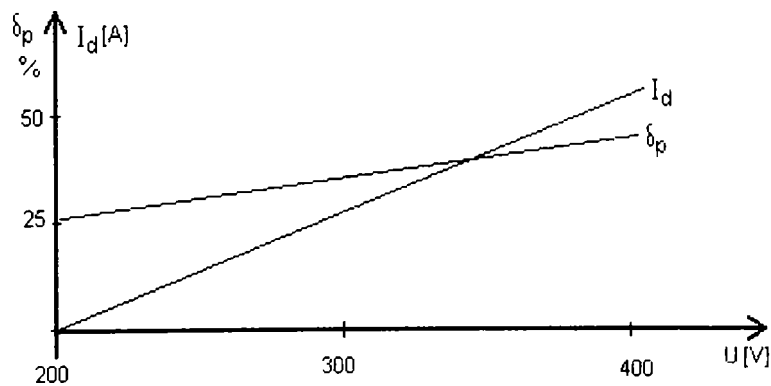


Fig. 4.18. Variația cu tensiunea a δ_p și I_d

3. Compoziția armonică la

$U = 214$ [V]; $I_1 = 8$ [A] -linie continuă

$U = 236$ [V]; $I_1 = 9.7$ [A] -linie intreruptă

este dată în figura 4.19.

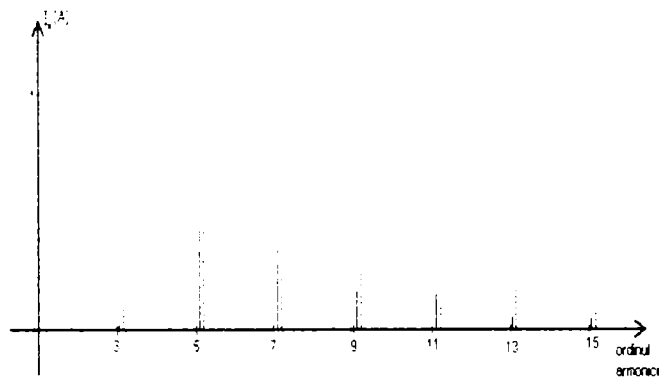


Fig.4.19. Amplitudinile armonicilor

Compoziția armonică la

$U = 313[V]$; $I_1 = 16 [A]$ -linie continuă

$U = 386 [V]$; $I_1 = 23[A]$ -linie intreruptă

este dată în figura 4.20.

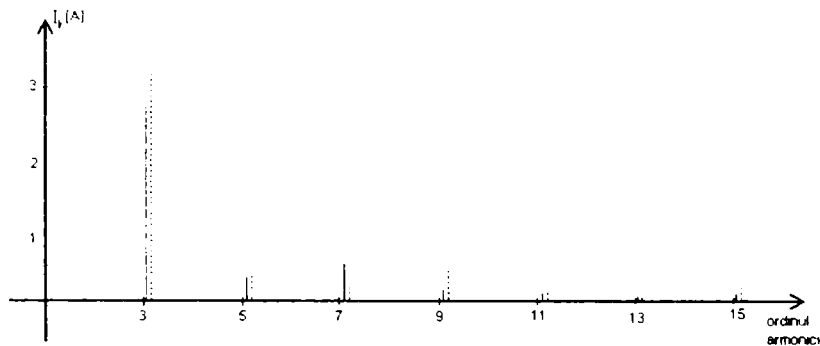


Fig.4.20. Amplitudinile armonicilor

Din analiza ultimelor două figuri rezultă că:

- amplitudinile armonicilor de rang 13, 15 sunt mai mari decât a celor de rang mai redus: 9, 11;
- la toate tensiunile analizate armonica 3 este cea mai importantă, urmată de armonica 5 (aproximativ de doua ori mai mica);
- ponderea armonicilor rămâne, aproximativ, aceeași la diversele valori ale tensiunii de alimentare.

MS cu excitație

4. La MS la care curentul de excitație este potrivit ales (în cazul de față la $U = 236[V]$; $I_E = 6.92[A]$) **amplitudinea fundamentală devine zero** și astfel nivelurile de compatibilitate sunt depășite.

5. La diverse valori pentru curentul de excitație I_E nivelurile armonicilor de ordin k (%) sunt date în figura 4.21

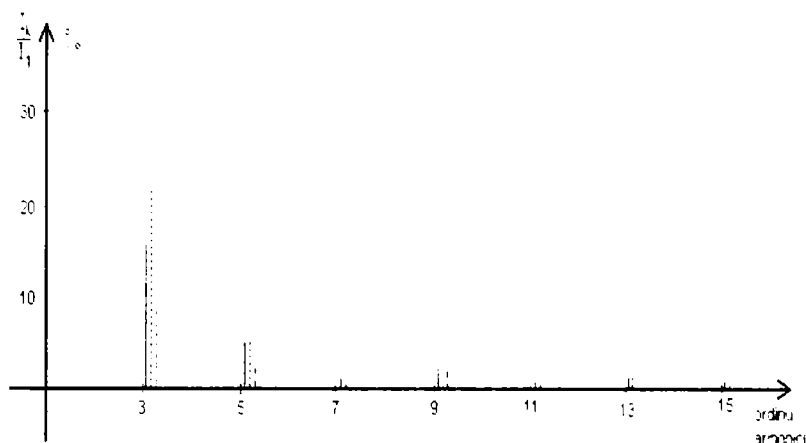


Fig.4.21. Nivelurile armonice la diverse valori ale curentului

6. Curentul de excitație I_E influențează sensibil valorile amplitudinilor armonice superioare (în principal 3 și 5), așa cum se poate observa din figura 4.21.

7. Valoarea critică a curentului de excitație I_E pentru care amplitudinea fundamentalei devine nulă depinde de valoarea tensiunii de alimentare (în cazul de față la $U = 236[V]$; $I_E = 6.92 [A]$).

8. La funcționarea în sarcină datorită măririi componentei active a curentului absorbit, ponderea armonice superioare scade.

9. La funcționarea în regim de compensator sincron (sursa de putere reactivă) trebuie evitată funcționarea la valorile critice ale curentului de excitație, caz în care compensatorul sincron devine doar o sursă de putere deformantă.

10. Deoarece **reziduul deformant I_d depinde numai de valorile amplitudinilor armonice superioare valoarea acestuia este constantă** și nu depinde de curentul de excitație I_E .

11. Rezultatele teoretice obținute în acest capitol au fost validate de cele experimentale, date în capitolul 6.

12. Coeficientul ponderat de distorsiune δ_P se modifică sensibil cu I_E și atinge valori mult peste cele admisibile (100% la $I_E = 10[A]$ și admisibil este 5% după Normativul privind limitarea regimului deformant 2004/2005- Transelectrica).

5. DETERMINAREA GRADULUI DE SATURAȚIE A MIEZULUI DIN COMPOZIȚIA ARMONICĂ A CURENTULUI

Cunoscând variația în timp a curentului statoric se calculează amplitudinea curentului de magnetizare. Valoarea amplitudinii curentului de magnetizare determină valoarea fluxului util Ψ_m și deci se cunoaște punctul de funcționare pe caracteristica de magnetizare $\Psi_m(I_m)$, adică gradul de saturație.

Se estimează gradul de saturație la diverse valori a tensiunii de alimentare.

La MS, la funcționarea în sarcină, trebuie determinată caracteristica de magnetizare. În lucrare se dă o metodă originală de calcul a caracteristicii de magnetizare rezultante $\Psi_m(I_m)$.

La funcționarea în gol a MS caracteristica de magnetizare rezultantă $\Psi_m(I_m)$ se confundă cu cea dedusă experimental după axa longitudinală : $\Psi_{md}(I_m)$.

Punctul de funcționare pe caracteristica de magnetizare rămâne fix, dacă valoarea tensiunii de alimentare nu se modifică.

Prin modificarea curentului de excitație se modifică amplitudinea fundamentale și acest fapt se poate observa foarte clar din forma de variație în timp a curentului statoric.

Gradul de saturație, caracterizat prin valoarea fluxului magnetic în punctul de funcționare, la o mașină electrică este, așa cum s-a demonstrat în capitolul 4, impus de valoarea tensiunii de alimentare. Se poate defini gradul de saturație prin raportul dintre valoarea fluxului magnetic în punctul de funcționare și valoarea fluxului magnetic în "cotul" curbei de magnetizare.

Problema determinării gradului de saturație având cunoscută compoziția armonică a curentului prezintă un interes deosebit mai ales acum când s-a trecut de la $U_N = 220[V]$ la $U_N = 230[V]$.

Foarte multe mașini electrice au fost dimensionate la limită.

Crescând tensiunea la $U_N = 230[V]$ s-a mărit inducția în miez și implicit funcționarea mașinii are loc în zona saturată.

Așadar, la $U_N = 230[V]$ curentul absorbit nu mai este sinusoidal și apar armonici impare semnificative chiar până la ordinul 15, așa cum rezultă din compoziția armonică obținută din măsurători experimentale date la capitolul 6.

5.1 Problema determinării saturației din curba curentului la MA la funcționare în gol

Din măsurători directe se cunoaște variația în timp a curentului statoric.

La funcționarea în sarcină acest curent are două componente:

- componenta activă și
- componenta reactivă.

La funcționarea în gol și la neglijarea pierderilor în fier, componenta activă devine nulă și curentul absorbit este practic curentul de magnetizare: I_m așa cum se poate vedea din sistemul de mai jos.

$$\left\{ \begin{array}{l} U = -\omega_1 \cdot \Psi_m \\ I_d = -\frac{s \cdot \omega_1 \cdot \Psi_m}{R_2} \\ I_m = I_{mq} = I_q \\ I_q = I_m \\ \Psi_{mq} = \Psi_m \\ \text{Funcția: } \Psi_m = f(I_m) \\ M_{elmag} = -p_1 \cdot I_d \cdot \Psi_{mq} \end{array} \right.$$

Deoarece $M_{elmg} = 0$ rezultă:

$$U\sqrt{3} = \omega \Psi_m$$

$$I_m = I$$

$$\Psi_m = \Psi_{mq}$$

$I_m(t)$ -curba experimentală

Cunoscând tensiunea U se poate obține valoarea fluxului Ψ_m :

$$\Psi_m = \frac{U\sqrt{3}}{\omega}$$

dar nu și dependența fluxului Ψ_m de curentul de magnetizare I_m .

Prin cunoașterea variației în timp a curentului $I_m(t)$ și la tensiune sinusoidală (deci flux sinusoidal) se poate determina dependența fluxului de curent **-caracteristica de magnetizare** $\Psi_m(I_m)$ – așa cum se poate observa din figura 5.1

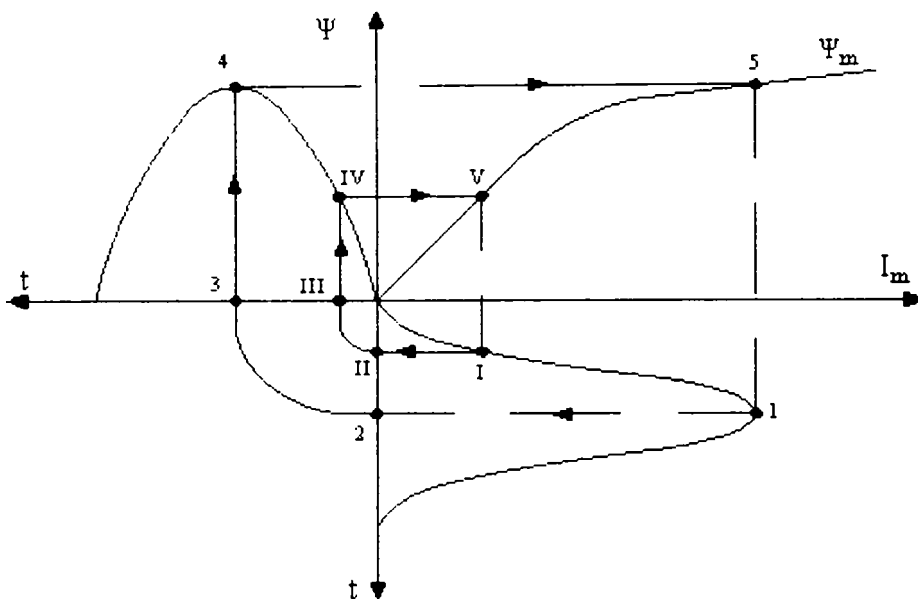


Fig 5.1 Obținerea caracteristicii de magnetizare la MA

De exemplu, punctele 5 și V de pe caracteristica $\Psi_m(I_m)$ se obțin în felul următor:
 - din punctul initial 1 (sau I) pe orizontală rezultă punctul 2 (II), apoi, la același moment de timp, rezultă punctul 3 (III) și apoi vertical punctul 4 (IV), de unde prin intersecția orizontalei din 4 (IV) cu verticala din 1 (I) se obține punctul final 5 (V).

În acest mod din curba $I_m(t)$, la $\Psi_m(I_m)$ **sinusoidal**, rezultă caracteristica de magnetizare $\Psi_m(I_m)$.

Poziția punctului final 5 pe caracteristica de magnetizare indică gradul de saturație la care funcționează în gol MA.

La funcționarea în sarcină, dacă tensiunea nu se modifică, se menține același grad de saturație.

NUMERIC MA - zona saturată

În zona saturată valorile tensiunilor de alimentare sunt uneori și peste cea nominală.

$$1 \text{ U} = 386[\text{V}]; I_m = 25.6[\text{A}]$$

Curentul la funcționarea în gol are o variație în timp așa ca în figura 5.2, cu amplitudinea $I_{\max} = 25.6[\text{A}]$. Amplitudinea curentului de magnetizare determină punctul maxim de pe caracteristica de magnetizare $\Psi_m(I_m)$ (punctul P_1 din figura 5.7), deci gradul de saturație.

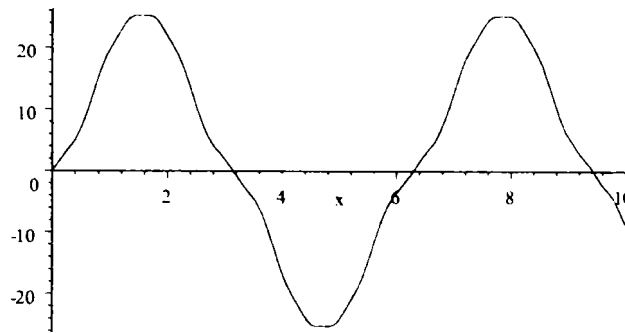


Fig 5.2. Variația în timp a curentului de magnetizare

Descompus în armonici ,curentul statoric se poate scrie sub forma:

$$i_m(t) = 22.98 \sin \omega t - 3.25 \sin 3\omega t - 0.79 \sin 5\omega t + 0.12 \sin 7\omega t + 0.312 \sin 9\omega t + \\ + 0.18 \sin 11\omega t - 0.091 \sin 13\omega t + 0.11 \sin 15\omega t$$

sau

$$i_m(t) = 22.98 \sin x - 3.25 \sin 3x - 0.79 \sin 5x + 0.12 \sin 7x + 0.312 \sin 9x + \\ + 0.18 \sin 11x - 0.091 \sin 13x + 0.11 \sin 15x$$

unde $x = \omega t$

Precizare: în toate graficele curentului pe abscisă este variabila $x = \omega t$ în [rad/s], iar pe ordonată este funcția, curentul în [A].

$$2 U = 313[V]; I_m = 18.69[A]$$

Curentul la funcționarea în gol are o variație în timp așa ca în figura 5.3, cu amplitudinea $I_{\max} = 18.69[A]$. Amplitudinea curentului de magnetizare determină punctul maxim de pe caracteristica de magnetizare $\Psi_m(I_m)$ (punctul P_2 din figura 5.7), deci gradul de saturație.

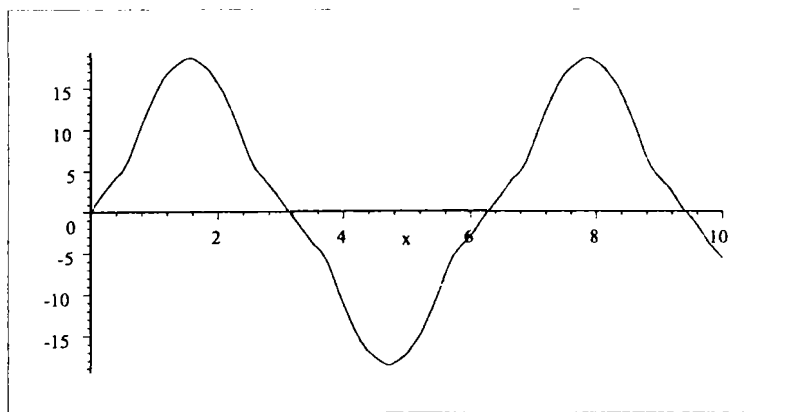


Fig 5.3. Variația în timp a curentului de magnetizare

Descompus în armonici ,curentul statoric la funcționarea în gol se poate scrie sub

forma:

$$i_m(t) = 16.34 \sin x - 2.55 \sin 3x - 0.15 \sin 5x + 0.37 \sin 7x + 0.17 \sin 9x - 0.076 \sin 11x - \\ - 0.12 \sin 13x - 0.15 \sin 15x$$

$$\mathbf{3 U = 236[V]; I_m = 11.38[A]}$$

Curentul la funcționarea în gol are o variație în timp așa ca în figura 5.4 cu amplitudinea $I_{\max} = 11.38[A]$. Amplitudinea curentului de magnetizare determină punctul maxim de pe caracteristica de magnetizare $\Psi_m(I_m)$ (punctul P_3 din figura 5.7), deci gradul de saturație.

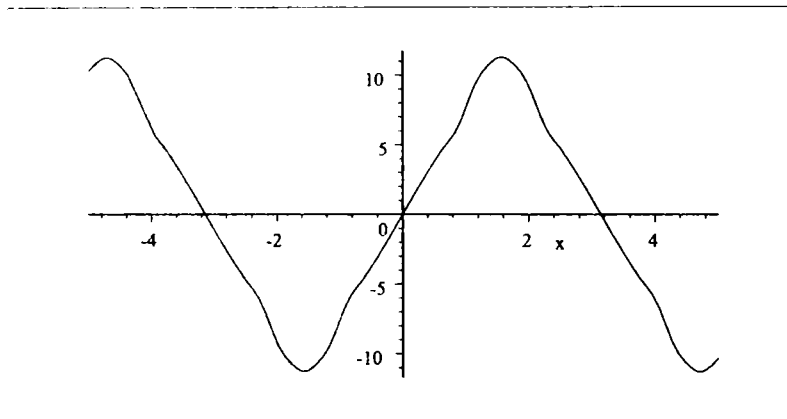


Fig 5.4. Variația în timp a curentului de magnetizare

Descompus în armonici, curentul statoric se poate scrie sub forma:

$$i_m(t) = 9.75 \sin x - 1.23 \sin 3x + 0.43 \sin 5x + 0.071 \sin 7x - 0.148 \sin 9x + 0.015 \sin 11x + \\ + 0.066 \sin 13x - 0.0282 \sin 15x$$

$$\mathbf{4 U = 214[V]; I_m = 9.3[A]}$$

Curentul la funcționarea în gol are o variație în timp așa ca în figura 5.5, cu amplitudinea $I_{\max} = 9.3[A]$. Amplitudinea curentului de magnetizare determină punctul maxim de funcționare pe caracteristica de magnetizare $\Psi_m(I_m)$ (punctul P_4 din figura 5.7), deci gradul de saturație.

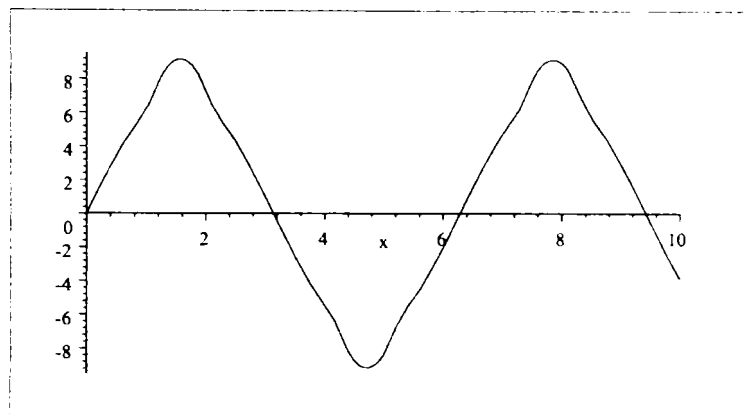


Fig 5.5. Variația în timp a curentului de magnetizare

Descompus în armonici ,curentul statoric se poate scrie sub forma:

$$i_m(t) = 8.1 \sin x - 0.7 \sin 3x + 0.386 \sin 5x - 0.1 \sin 7x - 0.05 \sin 9x + \\ + 0.074 \sin 11x - 0.025 \sin 13x - 0.022 \sin 15x$$

$$\mathbf{5 \ U = 206[V]; I_m = 8.5[A]}$$

Curentul la funcționarea în gol are o variație în timp așa ca în figura 5.6, cu amplitudinea $I_{\max} = 8.5[A]$. Amplitudinea curentului de magnetizare determină punctul maxim de pe caracteristica de magnetizare $\Psi_m(I_m)$ (punctul P_5 din figura 5.7), deci gradul de saturație

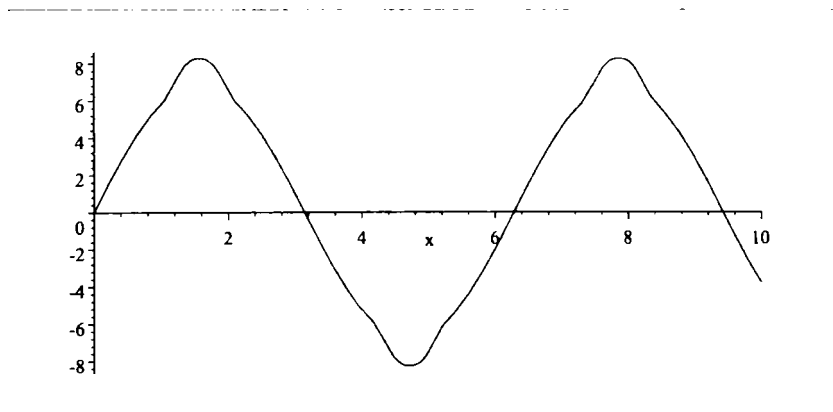


Fig5.6. Variația în timp a curentului de magnetizare

Descompus în armonici ,curentul statoric se poate scrie sub forma:

$$i_m(t) = 7.5 \sin x - 0.417 \sin 3x + 0.32 \sin 5x - 0.14 \sin 7x + 0.018 \sin 9x + 0.051 \sin 11x - \\ - 0.045 \sin 13x + 0.0136 \sin 15x$$

În concluzie, punctul de funcționare s-a deplasat pe caracteristica de magnetizare din P_1 (la tensiunea $U = 386[V]$) în P_5 (la tensiunea $U = 206[V]$) așa cum se observă din figura 5.7.

P_1 - la $U = 386[V]$

P_2 - la $U = 313[V]$

P_3 - la $U = 236[V]$

P_4 - la $U = 214[V]$

P_5 - la $U = 206[V]$

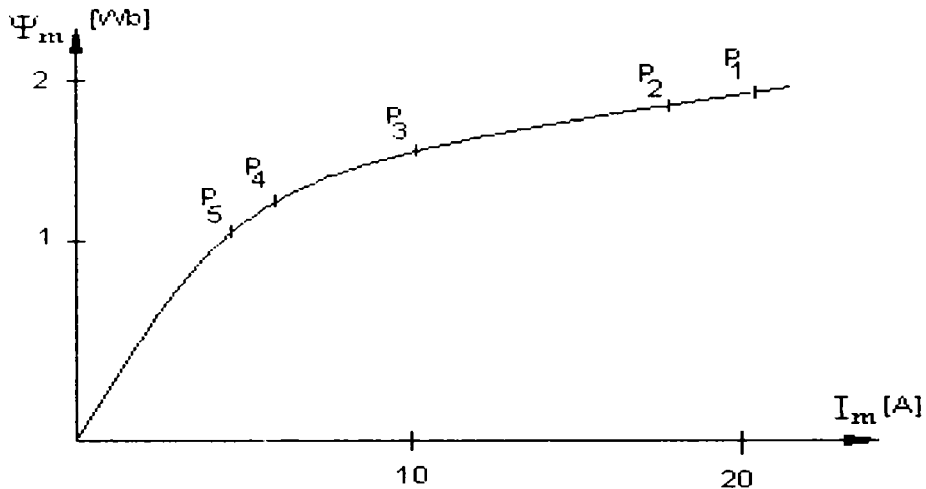


Fig 5.7. Deplasarea punctului de funcționare pe caracteristica de magnetizare

5.2 Problema determinării saturației din curba curentului la MS la funcționare în gol

La MS, spre deosebire de MA, intervine curentul de excitație I_E .

Așa ca și la MA, se analizează **gradul de saturație la funcționarea în gol**.

Din măsurători directe se cunoaște variația în timp a curentului statoric.

La funcționarea în sarcină acest curent are două componente:

- componenta activă și
- componenta reactivă

La funcționarea în gol și la neglijarea pierderilor în fier, componenta activă devine nulă și curentul absorbit $I = I_d$ este dependent de curentul de magnetizare: I_m (deci de tensiunea de alimentare U) și de curentul de excitație I_E așa cum se poate vedea din sistemul de mai jos.

$$3U^2 = \omega^2(\Psi_{md}^2 + \Psi_{mq}^2)$$

$$\Psi_{md} = \frac{\Psi_{md1}}{I_m} I_{md}$$

$$\Psi_{mq} = \frac{\Psi_{mq1}}{I_m} I_{mq}$$

$$I_m^2 = I_{md}^2 + I_{mq}^2$$

$$I_{md} = I_d + I_E^*$$

$$I_{mq} = I_q$$

$$M_{elmag} = p_1(I_q\Psi_{md} - I_d\Psi_{mq}) = M_{rez}$$

$$\Psi_{mq1} = f_1(I_m) \text{-curbe experimentale}$$

$$\Psi_{md1} = f_2(I_m) \text{-curbe experimentale}$$

Deoarece la funcționarea în gol $M_{elmg} = 0$ rezultă $I_q = 0$, $\Psi_{mq} = 0$:

$$3U^2 = \omega^2(\Psi_{md}^2 + \Psi_{mq}^2) = \omega^2\Psi_m^2$$

$$\Psi_{md} = \frac{\Psi_{md1}}{I_m} I_{md}$$

$$\Psi_{mq} = 0$$

$$I_m = I_{md}$$

$$I_{md} = I_d + I_E^*$$

$$I_q = 0$$

$$M_{elmag} = p_1(I_q\Psi_{md} - I_d\Psi_{mq}) = 0$$

$I(t)$ -curba experimentală

sau:

$$U\sqrt{3} = \omega\Psi_m$$

$$I_m = I_d + I_E^*$$

$$\Psi_m = \Psi_{md} = \Psi_{md1}$$

$I_d(t)$ -curba experimentală

Prin modificarea curentului de excitație I_E^* , la funcționarea în gol se impune valoarea pe fundamentală a curentului absorbit $I_{(t)} = I_{d(t)}$, așa cum se demonstrează în cele ce urmează.

Deoarece tensiunea de alimentare este de valoare constantă, fluxul Ψ_m nu se modifică.

Cunoscând tensiunea U se poate obține valoarea fluxului Ψ_m :

$$\Psi_m = \frac{U\sqrt{3}}{\omega}$$

dar nu și dependența fluxului Ψ_m de curentul de magnetizare I_m .

La funcționarea în gol caracteristica de magnetizare $\Psi_m = f(I_m)$ se confundă cu caracteristica de magnetizare $\Psi_{md1} = f(I_m)$.

Fluxul nemodificându-se, la $U = ct$ și deoarece

$$\Psi_m = \Psi_{md1}$$

rezultă că punctul de funcționare de pe caracteristica de magnetizare $\Psi_{md1}(I_m)$ rămâne fix indiferent de valoarea curentului de excitație I_E^* și deci valoarea pe

fundamentală a curentului de magnetizare nu se modifică:

$$I_{m(1)} = I_{d(1)} + I_E^* = ct$$

Prin modificarea curentului de excitație I_E^* se modifică componenta pe fundamentală a curentului absorbit $I_{d(1)}$, și prin aceasta ponderea, față de fundamentală, a diverselor armonici depinde de valoarea curentului de excitație I_E^* . Există o valoare a curentului de excitație I_E^* pentru care, la funcționarea în gol, curentul fundamental devine nul, caz în care MS poluează rețeaua cu armonici impare: 3,5,7,9.....

La funcționarea în sarcină caracteristica de magnetizare $\Psi_m = f(I_m)$ este sub caracteristica de magnetizare $\Psi_{md1} = f(I_m)$. (figura 5.8.)

În sarcină caracteristica de magnetizare $\Psi_m = f(I_m)$ depinde de curentul de excitație și de valoarea cuplului electromagnetic.

Prin cunoașterea variației în timp a curentului $I_m(t)$ și la tensiune sinusoidală (deci flux sinusoidal) se poate determina dependența fluxului de curent **-caracteristica de magnetizare $\Psi_m(I_m)$** – așa cum se poate observa din figura 5.8 (ca la MA).

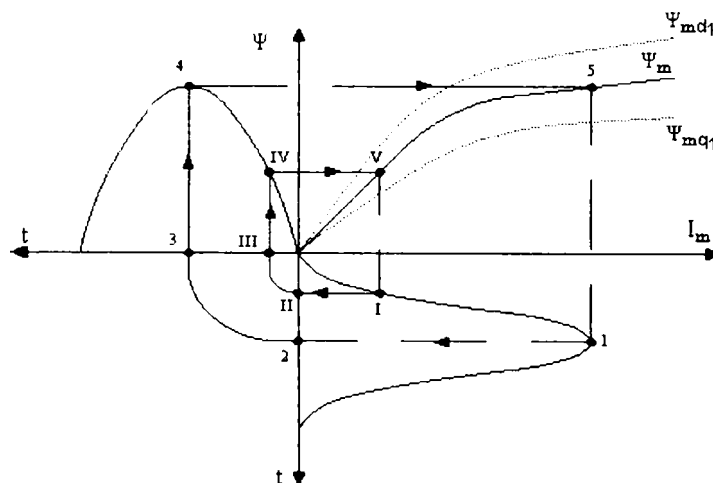


Fig 5.8. Obținerea caracteristicii de magnetizare la MS

La funcționarea în gol, deoarece curentul $I_q = 0$ și deci $\Psi_{mq} = 0$ rezultă $\Psi_{md} = \Psi_{md1}$ și caracteristica de magnetizare $\Psi_m = f(I_m)$ se confundă cu caracteristica de magnetizare $\Psi_{md1} = f(I_m)$, așa ca în figura 5.9.

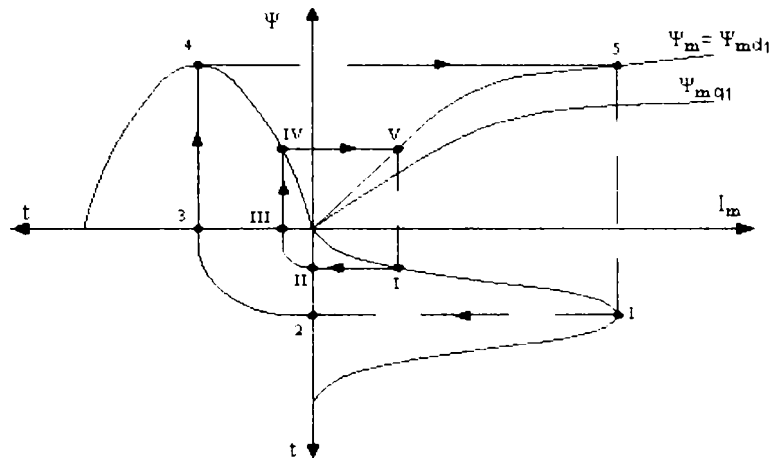


Fig 5.9. Caracteristica de magnetizare la funcționare în gol

5.2.1 Determinarea saturației la curent de excitație nul

La $I_E = 0$ (deci cu înfășurarea de excitație nealimentată), la funcționarea în gol, curentul absorbit este tocmai curentul de magnetizare:

$$I_m = I_d = I$$

Se obțin aceleași rezultate ca la MA.

La funcționarea în sarcină, dacă tensiunea nu se modifică, se menține același grad de saturație.

NUMERIC MS - zona saturată

În zona saturată valorile tensiunilor de alimentare sunt peste cea nominală.

$$1 \ U = 386[V]; I_m = 25.8[A]$$

Curentul la funcționarea în gol are o variație în timp așa ca în figura 5.10, cu amplitudinea $I_{max} = 25.8[A]$. Amplitudinea curentului de magnetizare determină punctul maxim de pe caracteristica de magnetizare $\Psi_m(I_m)$ (punctul P_1 din figura 5.15), deci gradul de saturație.

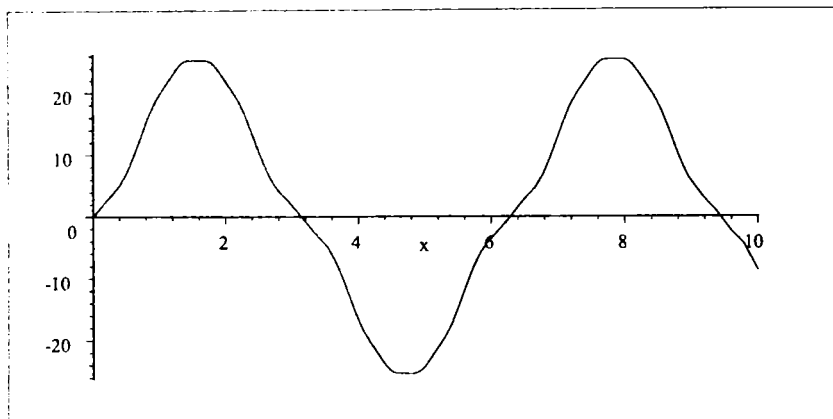


Fig 5.10. Variația în timp a curentului de magnetizare

Descompus în armonici ,curentul statoric rezultă sub forma:

$$i_m(t) = 23.08 \sin x - 3.15 \sin 3x - 0.889 \sin 5x + 0.112 \sin 7x + 0.312 \sin 9x + 0.178 \sin 11x - \\ - 0.0891 \sin 13x + 0.171 \sin 15x$$

$$\mathbf{2 U = 313[V]; I_m = 19.09[A]}$$

Curentul la funcționarea în gol are o variație în timp așa ca în figura 5.11, cu amplitudinea $I_{\max} = 19.09[A]$. Amplitudinea curentului de magnetizare determină punctul maxim de pe caracteristica de magnetizare $\Psi_m(I_m)$ (punctul P_2 din figura 5.15.), deci gradul de saturație.

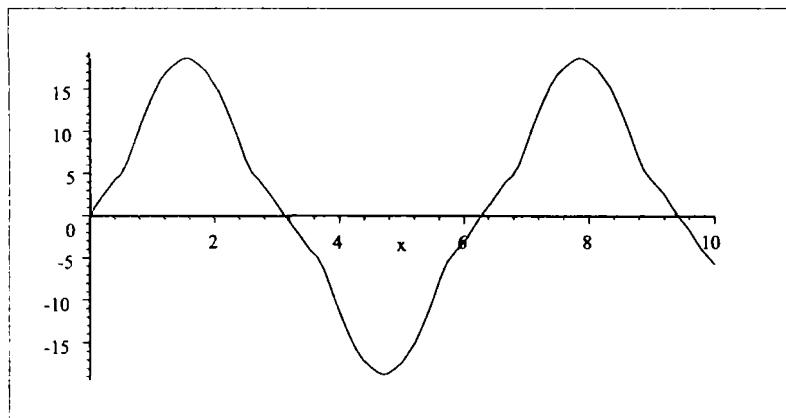


Fig 5.11. Variația în timp a curentului de magnetizare

Descompus în armonici ,curentul statoric rezultă sub forma:

$$i_m(t) = 16.234 \sin x - 2.355 \sin 3x - 0.115 \sin 5x + 0.37 \sin 7x + 0.18 \sin 9x - 0.06 \sin 11x - \\ - 0.112 \sin 13x - 0.125 \sin 15x$$

$$\mathbf{3 U = 236[V]; I_m = 12.08[A]}$$

Curentul la funcționarea în gol are o variație în timp așa ca în figura 5.12, cu amplitudinea $I_{\max} = 12.08[A]$. Amplitudinea curentului de magnetizare determină punctul maxim de pe caracteristica de magnetizare $\Psi_m(I_m)$ (punctul P_3 din figura 5.15.), deci gradul de saturație.

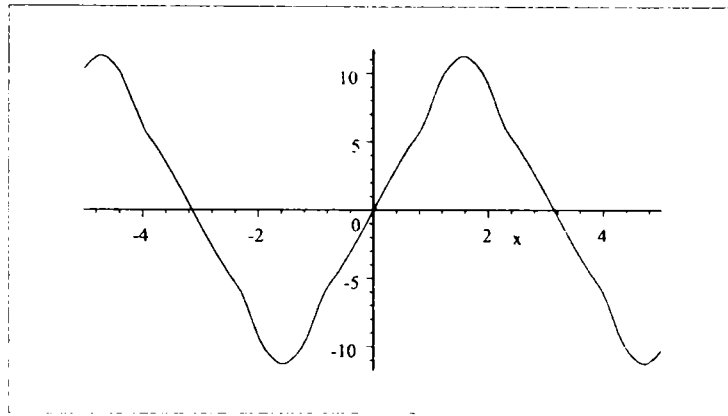


Fig 5.12 .Variația în timp a curentului de magnetizare

Descompus în armonici ,curentul statoric rezultă sub forma:

$$i_{m(t)} = 9.84 \sin x - 1.24 \sin 3x + 0.33 \sin 5x + 0.061 \sin 7x - 0.158 \sin 9x + 0.025 \sin 11x + \\ + 0.06 \sin 13x - 0.022 \sin 15x$$

$$4 \mathbf{U} = 214[\mathbf{V}]; I_m = 9.2[\mathbf{A}]$$

Curentul la funcționarea în gol are o variație în timp așa ca în figura 5.13. cu amplitudinea $I_{\max} = 9.2[\mathbf{A}]$. Amplitudinea curentului de magnetizare determină punctul maxim de pe caracteristica de magnetizare $\Psi_m(I_m)$ (punctul P_4 din figura 5.15), deci gradul de saturație.

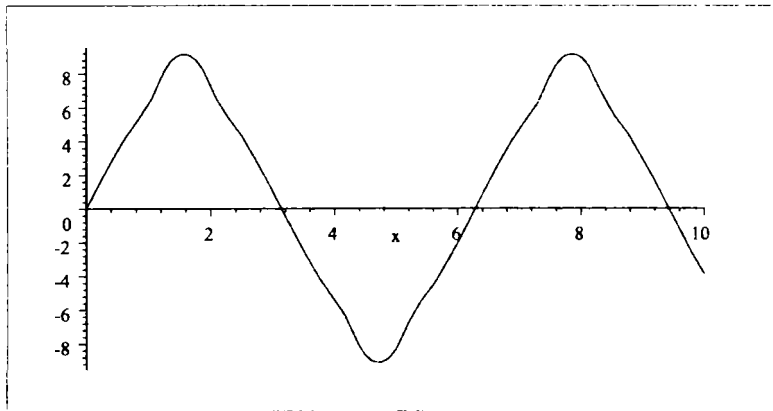


Fig 5.13. Variația în timp a curentului de magnetizare

Descompus în armonici ,curentul statoric rezultă sub forma:

$$i_{m(t)} = 8.11 \sin x - 0.67 \sin 3x + 0.36 \sin 5x - 0.11 \sin 7x - 0.04 \sin 9x + \\ + 0.064 \sin 11x - 0.035 \sin 13x - 0.02 \sin 15x$$

$$5 \mathbf{U} = 206[\mathbf{V}]; I_m = 8.6[\mathbf{A}]$$

Curentul la funcționarea în gol are o variație în timp așa ca în figura 5.14 cu amplitudinea $I_{\max} = 8.6[\mathbf{A}]$. Amplitudinea curentului de magnetizare determină punctul maxim de pe caracteristica de magnetizare $\Psi_m(I_m)$ (punctul P_5 din figura

5.15), deci gradul de saturație.

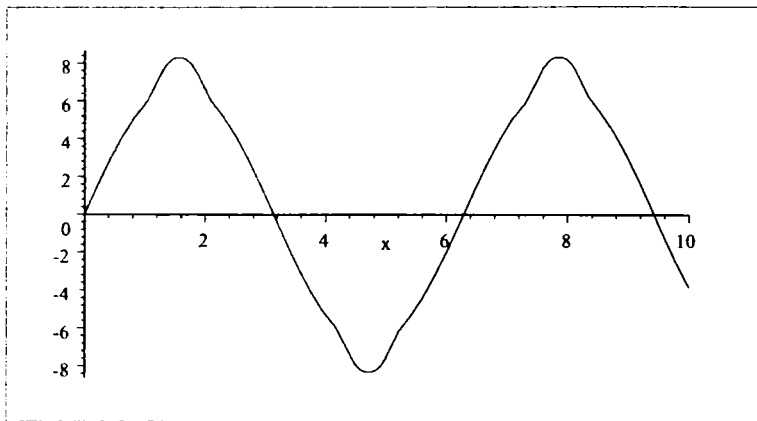


Fig5.14. Variația în timp a curentului de magnetizare

Descompus în armonici ,curentul statoric rezultă sub forma:

$$i_m(t) = 7.65 \sin x - 0.47 \sin 3x + 0.2 \sin 5x - 0.19 \sin 7x + 0.017 \sin 9x + 0.041 \sin 11x - \\ - 0.055 \sin 13x + 0.0146 \sin 15x.$$

În concluzie, punctul de funcționare s-a deplasat pe caracteristica de magnetizare din P_1 (la tensiunea $U = 386[V]$) în P_5 (la tensiunea $U = 206[V]$) așa cum se observă din figura 5.15.

P_1 - la $U = 386[V]$

P_2 - la $U = 313[V]$

P_3 - la $U = 236[V]$

P_4 - la $U = 214[V]$

P_5 - la $U = 206[V]$

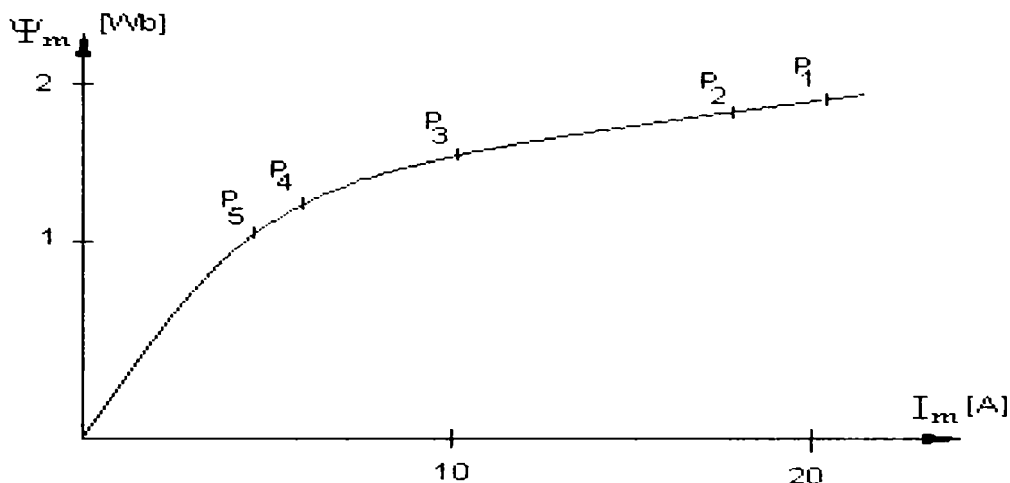


Fig 5.15. Deplasarea punctului de funcționare pe caracteristica de magnetizare la MS.

5.2.2. Determinarea saturației la diverse valori ale curentului de excitație

La diverse valori ale curentului de excitație I_E (deci cu înfășurarea de excitație alimentată), la funcționarea în gol, sistemul ce definește funcționarea MS este :

$$U\sqrt{3} = \omega\Psi_m$$

$$I_m = I_d + I_E^*$$

$$\Psi_m = \Psi_{md} = \Psi_{md1}$$

$I_d(t)$ -curba experimentală

Nu se mai obțin aceleași rezultate ca la MA.

Pentru fundamentală rezultă sistemul :

$$U\sqrt{3} = \omega\Psi_m$$

$$I_m = I_{d(1)} + I_E^*$$

$I_{d(1)}$ -din curba experimentală $I_d(t)$

NUMERIC MS - zona saturată

În zona saturată valorile tensiunilor de alimentare sunt peste cea nominală.

$$\mathbf{U} = 313[\text{V}]; \mathbf{I}_m = 19.09[\text{A}]$$

Tensiunea fiind constantă punctul de funcționare pe caracteristica de magnetizare rămâne același (P_2 din figura 5.15) indiferent de valoarea curentului de excitație.

$$\mathbf{1} \quad \mathbf{I}_E = 0[\text{A}]$$

Curentul la funcționarea în gol are o variație în timp înregistrată experimental așa ca în figura 5.16, cu amplitudinea $I_{\max} = 19.09[\text{A}]$.

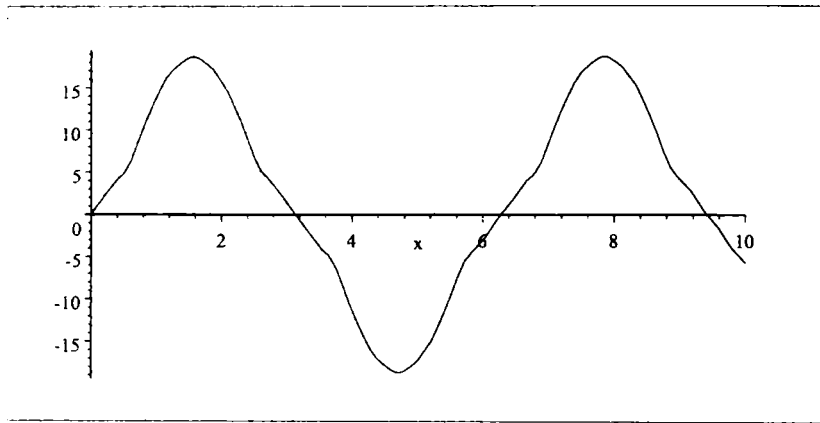


Fig 5.16. Variația în timp a curentului de magnetizare

Descompus în armonici ,curentul statoric rezultă sub forma:

$$i_{m(t)} = 16.234 \sin x - 2.355 \sin 3x - 0.115 \sin 5x + 0.37 \sin 7x + 0.18 \sin 9x - 0.06 \sin 11x - \\ - 0.112 \sin 13x - 0.125 \sin 15x$$

Valoarea efectivă a curentului fundamentalei este :

$$I_{(1)} = 11.58[A] \\ I_{d(1)} = \frac{16.234}{\sqrt{2}} = 11.58[A]$$

$$2 \mathbf{I}_{\dot{E}} = 10[A]$$

Curentul la funcționarea în gol are o variație în timp, înregistrată experimental, așa ca în figura 5.17, cu amplitudinea $I_{\max} = 4.5[A]$.

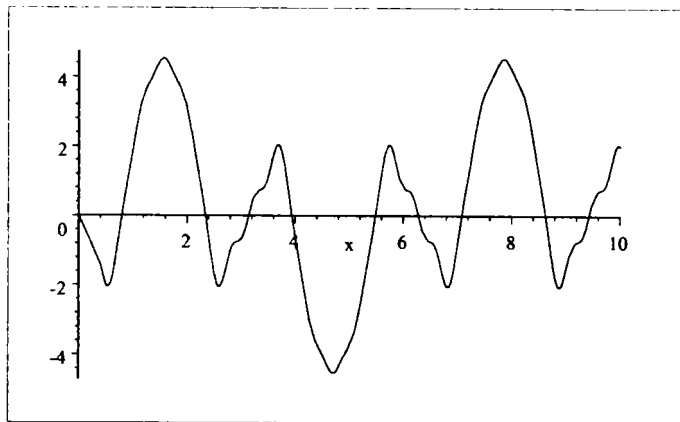


Fig 5.17. Variația în timp a curentului statoric

Descompus în armonici ,curentul statoric rezultă scrie sub forma:

$$i_{m(t)} = 2.228 \sin x - 2.55 \sin 3x - 0.15 \sin 5x + 0.37 \sin 7x + 0.17 \sin 9x - 0.076 \sin 11x - \\ - 0.12 \sin 13x - 0.15 \sin 15x$$

Valoarea efectivă a curentului fundamentalei este :

$$I_{d(1)} + I_E^* = 11.58[A]$$

$$I_{d(1)} = \frac{2.228}{\sqrt{2}} = 1.58[A]$$

$$\mathbf{3 \quad I_E^* = 20[A]}$$

Curentul la funcționarea în gol are o variație în timp, înregistrată experimental, așa ca în figura 5.18., cu amplitudinea $I_{\max} = 10[A]$.

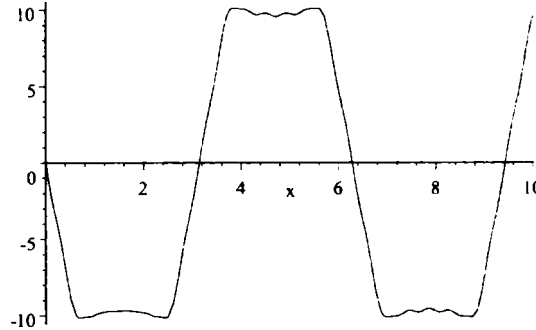


Fig 5.18. Variația în timp a curentului statoric

Descompus în armonici, curentul statoric rezultă scrie sub forma:

$$i_{m(t)} = -11.872 \sin x - 2.55 \sin 3x - 0.15 \sin 5x + 0.37 \sin 7x + 0.17 \sin 9x - 0.076 \sin 11x - 0.12 \sin 13x - 0.15 \sin 15x$$

Valoarea efectivă a curentului fundamentalei este :

$$I_{d(1)} + I_E^* = 11.58[A]$$

$$I_{d(1)} = \frac{-11.872}{\sqrt{2}} = -8.42[A]$$

$$\mathbf{4 \quad I_E^* = 40[A]}$$

Curentul la funcționarea în gol are o variație în timp, înregistrată experimental, așa ca în figura 5.19., cu amplitudinea $I_{\max} = 37.5[A]$.

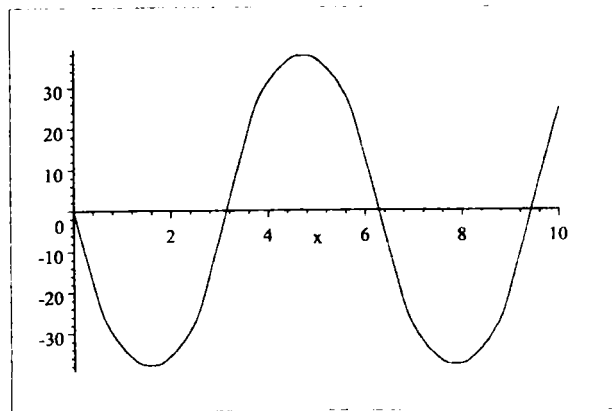


Fig 5.19. Variația în timp a curentului statoric

Descompus în armonici ,curentul statoric rezultă sub forma:

$$i_m(t) = -40 \sin x - 2.55 \sin 3x - 0.15 \sin 5x + 0.37 \sin 7x + 0.17 \sin 9x \\ - 0.076 \sin 11x - 0.12 \sin 13x - 0.15 \sin 15x$$

Valoarea efectivă a curentului fundamentalei este :

$$I_{d(1)} + I_E^* = 11.58[A] \\ I_{d(1)} = \frac{-40}{\sqrt{2}} = -28.42[A]$$

5 $I_E^* = 60[A]$

Curentul la funcționarea în gol are o variație în timp, înregistrată experimental ,așa ca în figura 5.20, cu amplitudinea $I_{\max} = 64[A]$.

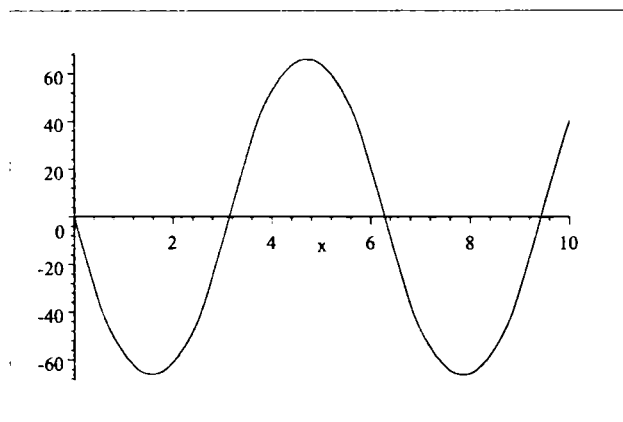


Fig 5.20. Variația în timp a curentului statoric

Descompus în armonici ,curentul statoric rezultă scrie sub forma:

$$i_m(t) = -68.27 \sin x - 2.55 \sin 3x - 0.15 \sin 5x + 0.37 \sin 7x + 0.17 \sin 9x - 0.076 \sin 11x - \\ - 0.12 \sin 13x - 0.15 \sin 15x$$

Valoarea efectivă a curentului fundamentalei este :

$$I_{d(1)} + I_E^* = 11.58[A] \\ I_{d(1)} = \frac{-68.27}{\sqrt{2}} = -48.42[A]$$

6 $I_E^* = 11.58[A]$ – caz cu poluare armonică maximă, curentul absorbit pe fundamentala fiind nul.

Curentul la funcționarea în gol are o variație în timp, înregistrată experimental ,așa ca în figura 5.21, cu amplitudinea $I_{\max} = 3.2[A]$.

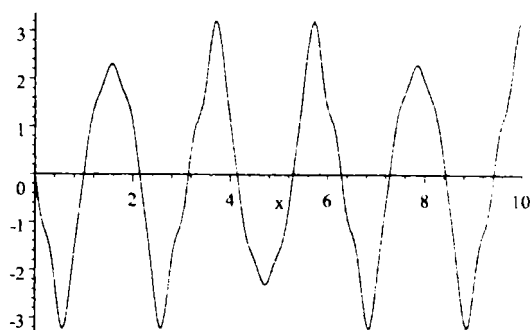


Fig 5.21. Variația în timp a curentului statoric

Descompus în armonici ,curentul statoric rezultă sub forma:

$$i_m(t) = -2.55 \sin 3x - 0.15 \sin 5x + 0.37 \sin 7x + 0.17 \sin 9x - 0.076 \sin 11x - \\ - 0.12 \sin 13x - 0.15 \sin 15x$$

Valoarea efectivă a curentului fundamentalei este :

$$I_{d(1)} + I_E^* = 11.58[A]$$

$$I_{d(1)} = \frac{0}{\sqrt{2}} = 0$$

5.3 Concluzii

a. MA

1 Compoziția armonică la MA depinde de valoarea tensiunii **U** și din ea se poate stabili, la funcționarea în gol, gradul de saturație la care funcționează MA.

2 La funcționarea în sarcină, datorită creșterii curentului pe fundamentală, ponderea armonicilor scade.

b. MS

1 Compoziția armonică la MS depinde de valoarea tensiunii **U** și din ea se poate stabili, la funcționarea în gol, și la $I_E = 0$ gradul de saturație la care funcționează MS.

2 Prin modificarea curentului de excitație I_E , la aceeași valoarea a tensiunii **U**, gradul de saturație rămâne același, deoarece valoarea fluxului, care depinde de valoarea tensiunii **U**, nu s-a modificat..

3 Valorile amplitudinilor armonicilor superioare nu depind de valoarea curentului de excitație I_E .

4 Prin valoarea curentului de excitație I_E se poate influența valoarea curentului absorbit. Deci la MS și la funcționarea în gol se poate reduce ponderea armonicilor prin valoarea curentului de excitație I_E .

Așadar MS care funcționează în gol (compensatoarele sincrone din sistemul

energetic) **nu poluează armonic sistemul energetic ca MA**, dacă valoarea curentului de excitație I_E este potrivit aleasă.

6. DETERMINĂRI EXPERIMENTALE ȘI FILTRE

Se dau în continuare metode de determinare a dependenței fluxului util de curentul de magnetizare(caracteristicile de magnetizare).

Fluxul util se determină din fluxul total, scăzând fluxul de dispersie. Fluxul de dispersie se poate calcula relativ ușor dacă se cunosc inductanțele de dispersie.

Se calculează valorile inductanțelor de dispersie atât la MA cât și la MS.

Fiind calculate inductanțele de dispersie se determină fluxul util din fluxul total și astfel se obțin caracteristicile de magnetizare.

Pe baza acestor caracteristici de magnetizare, la funcționarea în gol și cunoscând tensiunea de alimentare,se determină prin calcul și se verifică experimental curentul de magnetizare.

Determinarea curbelor de magnetizare pe cale experimentală este esențială în studiul saturației.

Cunoscând curentul de magnetizare se determină gradul de saturație al miezului.

6.1 Determinarea curbei de magnetizare $\Psi_m = f(I_m)$ la MA

Mașina asincronă (MA) funcționează în gol ideal (figura 6.1), fiind alimentată la tensiune variabilă și astfel se determină fluxul util Ψ_m .

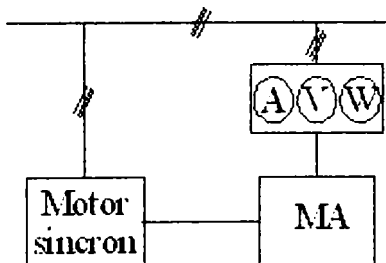


Fig. 6.1. MA funcționând în gol ideal

Pentru $U=120[V]$, $I_1=5[A]$, $R_1=5[\Omega]$ se obține

$$L_{1\sigma} = \frac{1}{\omega_1} \sqrt{\left(\frac{U_1}{3I_1}\right)^2 - R_1^2} = 0.02 [H]$$

Cunoscând inductanța $L_{1\sigma}$ fluxul util Ψ_m la MA se obține pe baza relațiilor

64→68(tabelul 2.1.).

6.2 Determinarea curbelor de magnetizare $\Psi_{md1} = f_1(I_m)$ și $\Psi_{mq1} = f_2(I_m)$ la MS

La masina sincronă evaluarea saturației magnetice este mai dificilă având în vedere faptul că sunt necesare determinarea experimentală a două caracteristici de magnetizare după cele două axe.

Determinarea inductanței de dispersie $L_{d\sigma}$

Cunoscând fluxurile Ψ_d și Ψ_{md} și folosind relațiile 108..114, se poate calcula inductanța de dispersie longitudinală $L_{d\sigma}$:

$$L_{d\sigma} = \frac{\Psi_d - \Psi_{md}}{I_d} = 0.01[H]$$

Determinarea inductanței de dispersie $L_{q\sigma}$

Inductanțele L_q , L_Q , M_{Qq} se determină, în acest caz, din datele de catalog, având valorile:

$$L_q = 0.07[H]$$

$$L_Q = 0.25[H]$$

$$M_{Qq} = 0.1[H]$$

și se obține:

$$L_{mq} = \sqrt{\frac{L_q}{L_Q}} M_{Qq} = 0.055[H]$$

și deci inductanța de dispersie $L_{q\sigma}$ se poate calcula cu relația:

$$L_{q\sigma} = L_q - L_{mq} = 0.015[H]$$

Curba de magnetizare $\Psi_{md1} = f_1(I_m)$

Curba de magnetizare $\Psi_{md1} = f_1(I_m)$ se determină din fluxul statoric Ψ_d scris sub forma:

$$\Psi_d = \Psi_{md} + L_{d\sigma} I_d$$

cunoscând inductanța de dispersie $L_{d\sigma}$.

Se obține, astfel, curba de magnetizare $\Psi_{md} = f_1(I_m)$, dată tabelar în **capitolul 2** (tabelul 2.2.).

Curba de magnetizare $\Psi_{mq} = f_2(I_m)$

Se aliniază rotorul în axa q (figura 6.2.). Prin alimentarea fazelor B și C în c.c. așa ca în figură se obține un flux rezultat Ψ_{mq} dat de curentul $I_q = I_{mq}$.

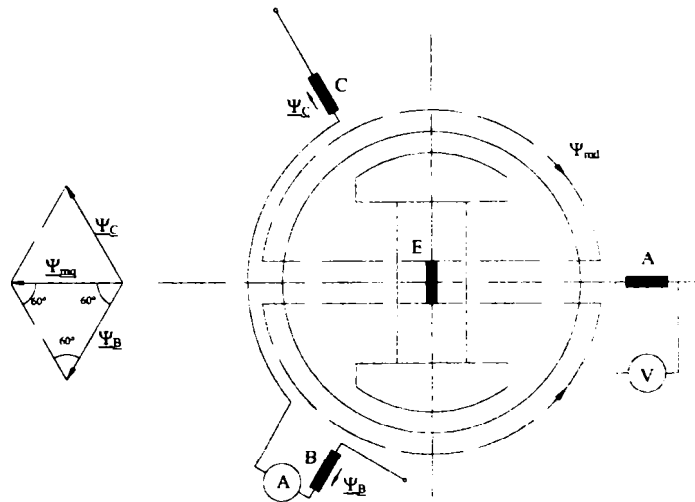
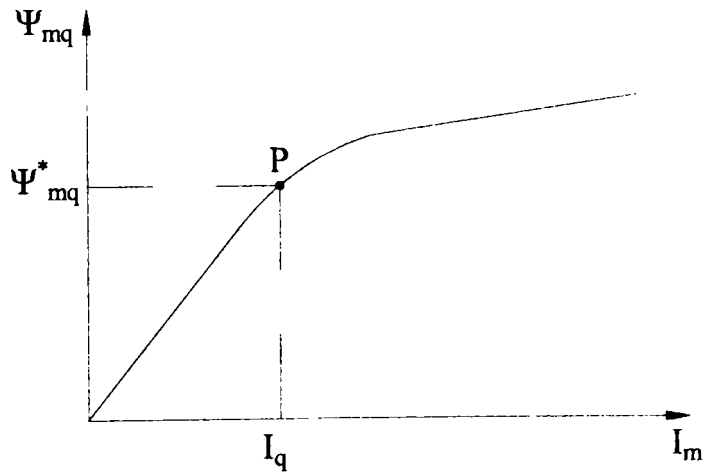


Fig.6.2. Magnetizare transversală cu fazele B,C alimentate.

Tensiunea înregistrată la voltmetrul V după întreruperea alimentării fazelor B și C va determina valoarea fluxului Ψ_{mq} așa ca și în cazul anterior. Pe curba de magnetizare $\Psi_{mq} = f(I_m)$ punctul de funcționare este P.

Fig.6.3. Curba de magnetizare $\Psi_{mq} = f(I_m)$

Legea inducției electromagnetice aplicată înfășurării statorice q este:

$$u_{(t)} = -\frac{d\Psi_{mq}}{dt}$$

sau prin integrare:

$$\int_0^{\infty} u(t) dt = \Psi_{mq}^*$$

Curba de magnetizare $\Psi_{mq}(I_m)$ este dată tabelar în **capitolul 2.**(tabelul 2.3.).

Forma curbelor de magnetizare $\Psi_{md1} = f(I_m)$ și $\Psi_{mq1} = f(I_m)$ este dată în figura 6.4.

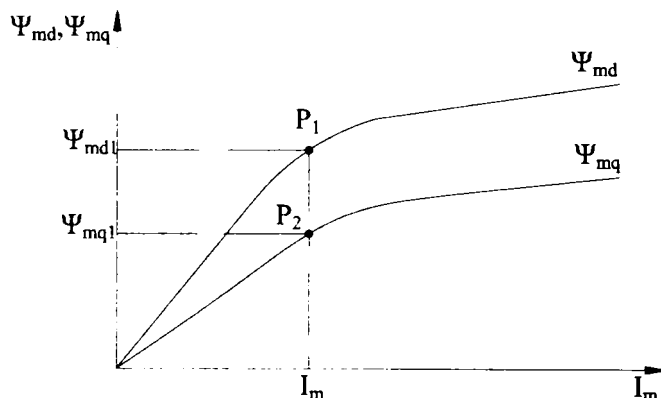


Fig.6.4. Curbele de magnetizare Ψ_{md}, Ψ_{mq} .

6.3 Verificări experimentale, la funcționarea în gol, privind compoziția armonică a curentului de alimentare la MA

Curentul de magnetizare $i_m(t)$, având în vedere armonicile 1-15 ,se scrie sub forma:

$$i_m(t) = I_1 \sin \omega t + I_3 \sin 3\omega t + I_5 \sin 5\omega t + I_7 \sin 7\omega t + \\ + I_9 \sin 9\omega t + I_{11} \sin 11\omega t + I_{13} \sin 13\omega t + I_{15} \sin 15\omega t$$

unde amplitudinile curentilor $I_1, I_3, I_5, I_7, I_9, I_{11}, I_{13}, I_{15}$ au fost calculate în capitolul 4 la diverse valori a tensiunii la borne.

Au fost înregistrați, la diverse valori ale tensiunii la borne, curenții și s-au comparat cu cei calculați în capitolul 4.

1

$$U = 206[V]$$

La tensiunea de valoare $U = 206[V]$ s-au obținut prin calcul coeficienții Fourier(paragraful4.1):

$$I_{15} = 1.3565 \times 10^{-2}, I_1 = 7.5091, I_5 = 0.31688, I_{11} = 4.6877 \times 10, \\ I_{13} = -4.4499 \times 10^{-2}, I_7 = -0.14005, I_9 = 1.1059 \times 10^{-2}, I_3 = -0.4887$$

Compoziția armonică a curentului obținută prin calcul este :

$$i(t) = 7.5 \sin \omega t - 0.4887 \sin 3\omega t + 0.31688 \sin 5\omega t - \\ - 0.14005 \sin 7\omega t - 0.14005 \sin 9\omega t + 0.046877 \sin 11\omega t \\ - 0.04499 \sin 13\omega t + 0.013565 \sin 15\omega t$$

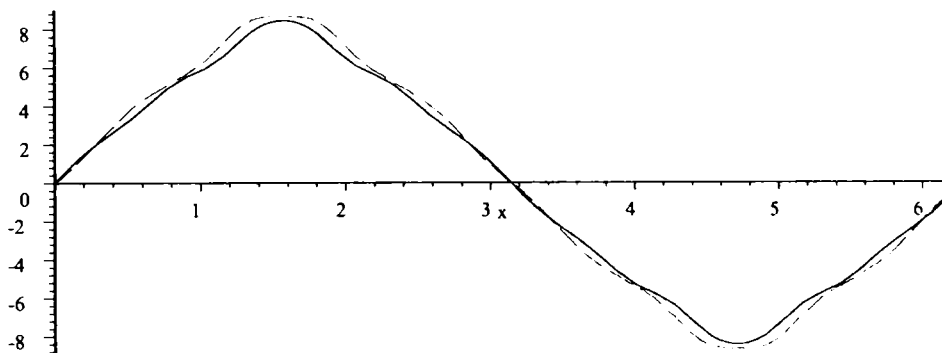


Fig 6.5. Variația în timp a curentului la $U = 206[V]$ - - - -experimental; — — —calcul

Variația în timp înregistrată experimental ,a curentului de magnetizare, este dată în figura 6.5.

2

$$U = 214[V]$$

La tensiunea de valoare $U = 214[V]$ s-au obținut prin calcul coeficienții Fourier(paragraful4.1):

$$I_3 = -0.69585, I_9 = -5.0237 \times 10^{-2}, I_1 = 8.0883, I_{11} = 7.4376 \times 10^{-2}, \\ I_{15} = -2.1924 \times 10^{-2}, I_5 = 0.38620, I_{13} = -2.5824 \times 10^{-2}, I_7 = -0.10626$$

Compoziția armonică a curentului obținută prin calcul este :

$$i(t) = 8.0883 \sin \omega t - 0.69585 \sin 3\omega t + 0.38620 \sin 5\omega t - \\ - 0.10626 \sin 7\omega t - 0.050237 \sin 9\omega t + 0.074376 \sin 11\omega t - \\ - 0.025824 \sin 13\omega t - 0.021924 \sin 15\omega t$$

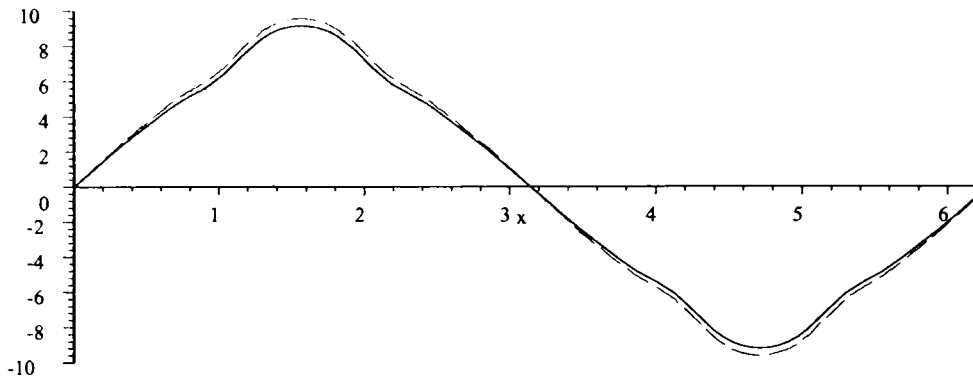


Fig 6.6. Variația în timp a curentului la $U = 214[V]$ ----experimental;—calcul

Variația în timp înregistrată experimental ,a curentului de magnetizare, este dată în figura 6.6.

3

$$U = 236[V]$$

La tensiunea de valoare $U = 236[V]$ s-au obtinut prin calcul coeficientii Fourier(paragraful4.1):

$$I_5 = 0.43033, I_1 = 9.7569, I_{15} = -2.8133 \times 10^{-2}, I_7 = 7.0894 \times 10^{-2},$$

$$I_9 = -0.14791, I_{13} = 6.5712 \times 10^{-2}, I_3 = -1.2239, I_{11} = 1.5069 \times 10^{-2}$$

Compoziția armonică a curentului obținută prin calcul este :

$$i(t) = 9.7569 \sin \omega t - 1.2239 \sin 3\omega t + 0.43033 \sin 5\omega t +$$

$$+ 0.070894 \sin 7\omega t - 0.14791 \sin 9\omega t + 0.015069 \sin 11\omega t +$$

$$+ 0.065712 \sin 13\omega t - 0.028133 \sin 15\omega t$$

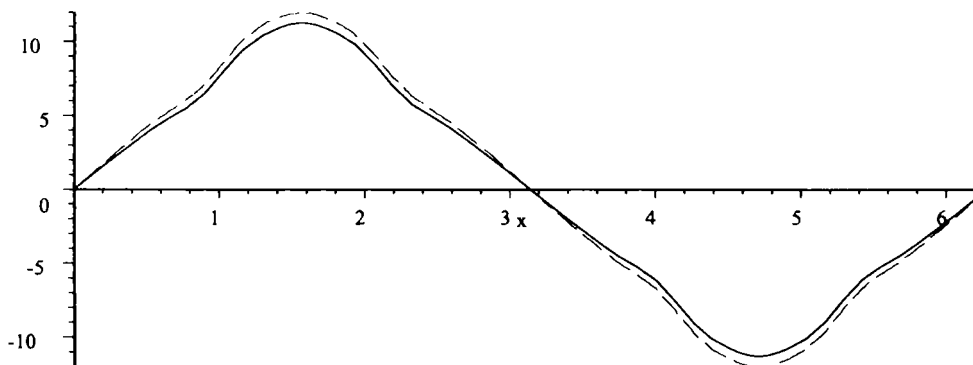


Fig 6.7. Variația în timp a curentului la $U = 236[V]$ ----experimental;—calcul

Variația în timp înregistrată experimental ,a curentului de magnetizare, este dată în figura 6.7.

4

$$U = 313[V]$$

La tensiunea de valoare $U = 313[V]$ s-au obținut prin calcul coeficienții Fourier(paragraful4.1):

$$I_{13} = -0.11730, I_5 = -0.15133, I_{11} = -7.6285 \times 10^{-2}, I_7 = 0.37166,$$

$$I_9 = 0.17544, I_3 = -2.5554, I_{15} = -1.4735 \times 10^{-2}, I_1 = 16.349$$

Compoziția armonică a curentului obținută prin calcul este :

$$\begin{aligned} i(t) = & 16.349 \sin \omega t - 2.5554 \sin 3\omega t - 0.15133 \sin 5\omega t + \\ & + 0.37166 \sin 7\omega t + 0.17544 \sin 9\omega t - 0.076285 \sin 11\omega t - \\ & - 0.11730 \sin 13\omega t - 0.014735 \sin 15\omega t \end{aligned}$$

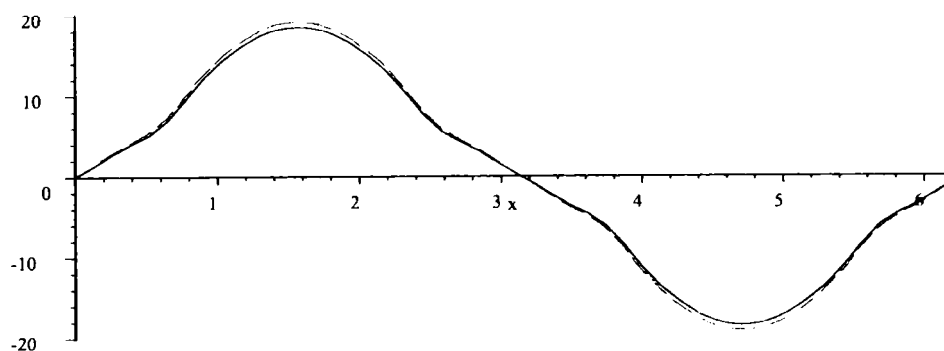


Fig 6.8. Variația în timp a curentului la $U = 313[V]$ - - - -experimental; - - - -calcul

Variația în timp înregistrată experimental ,a curentului de magnetizare, este dată în figura 6.8.

5

$$U = 386[V]$$

La tensiunea de valoare $U = 206[V]$ s-au obținut prin calcul coeficienții Fourier:(paragraful4.1)

$$I_9 = 0.31278, I_7 = 0.12059, I_{13} = -9.1071 \times 10^{-3},$$

$$I_{15} = -0.10286, I_5 = -0.79536, I_3 = -3.2541, I_1 = 22.981, I_{11} = 0.17832$$

Compoziția armonică a curentului obținută prin calcul este :

$$\begin{aligned} i(t) = & 22.981 \sin \omega t - 3.2541 \sin 3\omega t - 0.79536 \sin 5\omega t + \\ & + 0.12059 \sin 7\omega t + 0.31278 \sin 9\omega t + 0.17832 \sin 11\omega t - \\ & - 0.091071 \sin 13\omega t - 0.10286 \sin 15\omega t \end{aligned}$$

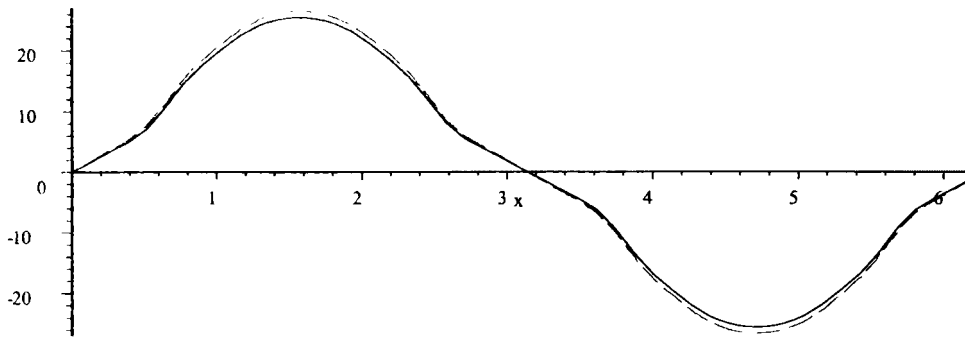


Fig 6.9. Variația în timp a curentului la $U = 386[V]$ ---experimental;—calcul

Variația în timp înregistrată experimental ,a curentului de magnetizare, este dată în figura 6.9.

6.4 Verificări experimentale la MS, la funcționarea în gol și la curent de excitație nul

La MS s-au făcut verificări experimentale la diferite valori ale curentului de excitație și tensiunii.

1

$$U = 206[V]$$

La tensiunea de valoare $U = 206[V]$, compoziția armonică a curentului obținută prin calcul este(paragraful4.2) :

$$I_{15} = 1.46 \times 10^{-2}, I_1 = 7.65, I_5 = 0.2, I_{11} = 4.1 \times 10^{-2},$$

$$I_{13} = -5.5 \times 10^{-2}, I_7 = -0.19, I_9 = 1.7 \times 10^{-2}, I_3 = -0.47$$

Având în vedere aceste rezultate, rezultă:

$$i(t) = 7.65 \sin \omega t - 0.47 \sin 3\omega t + 0.2 \sin 5\omega t -$$

$$- 0.19 \sin 7\omega t + 0.017 \sin 9\omega t + 0.041 \sin 11\omega t -$$

$$- 0.055 \sin 13\omega t + 0.0146 \sin 15\omega t$$

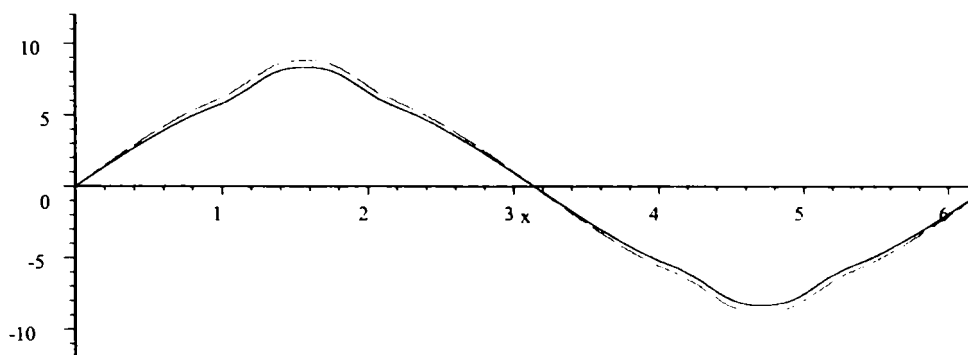


Fig 6.10. Variația în timp a curentului la $U = 206[V]$ ----experimental;—calcul

2

$$U = 214[V]$$

La tensiunea de valoare $U = 214[V]$, compoziția armonică a curentului obținută prin calcul este(paragraful4.2):

$$I_3 = -0.67, I_9 = -4 \times 10^{-2}, I_1 = 8.11, I_{11} = 6.4 \times 10^{-2},$$

$$I_{15} = -2 \times 10^{-2}, I_5 = 0.36, I_{13} = -3.5 \times 10^{-2}, I_7 = -0.11$$

Având în vedere aceste rezultate, rezultă:

$$\begin{aligned} i(t) = & 8.11 \sin \omega t - 0.67 \sin 3\omega t + 0.36 \sin 5\omega t - \\ & - 0.11 \sin 7\omega t - 0.04 \sin 9\omega t + 0.064 \sin 11\omega t - \\ & - 0.035 \sin 13\omega t - 0.02 \sin 15\omega t \end{aligned}$$

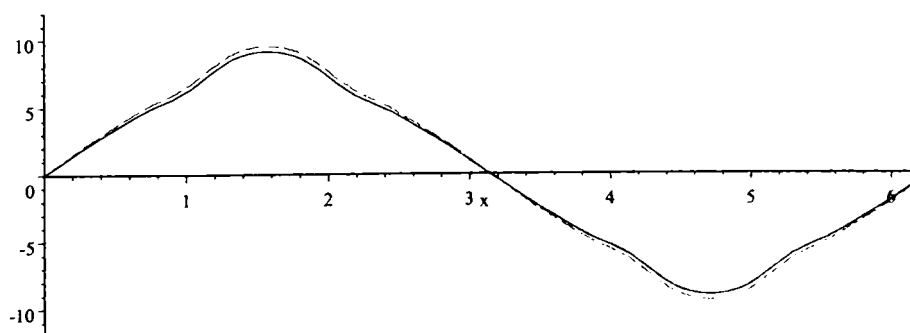


Fig 6.11. Variația în timp a curentului la $U = 214[V]$ ----experimental;—calcul

3

$$U = 236[V]$$

La tensiunea de valoare $U = 236[V]$, compoziția armonică a curentului obținută

prin calcul este (paragraful 4.2):

$$I_3 = -1.24, I_5 = 0.33, I_7 = 9.84, I_{15} = -2.2 \times 10^{-2},$$

$$I_9 = 6.1 \times 10^{-2}, I_{11} = -0.158, I_{13} = 6 \times 10^{-2}, I_{15} = 2.5 \times 10^{-2}$$

Având în vedere aceste rezultate, rezultă:

$$i(t) = 9.84 \sin \omega t - 1.24 \sin 3\omega t + 0.33 \sin 5\omega t +$$

$$+ 0.061 \sin 7\omega t - 0.158 \sin 9\omega t + 0.025 \sin 11\omega t +$$

$$+ 0.06 \sin 13\omega t - 0.022 \sin 15\omega t$$

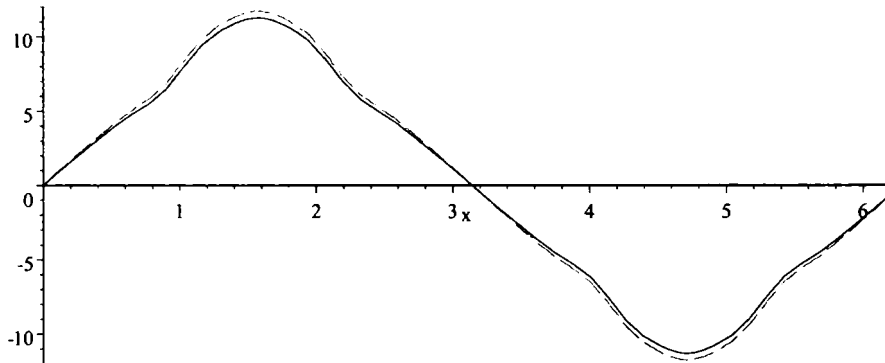


Fig 6.12. Variația în timp a curentului la **236[V]** ---experimental;—calcul

4

$$\mathbf{U = 313[V]}$$

La tensiunea de valoare $U = 313[V]$, compoziția armonică a curentului obținută prin calcul este (paragraful 4.2) :

$$I_{13} = -0.112, I_5 = -0.115, I_{11} = -6 \times 10^{-2}, I_7 = 0.37,$$

$$I_9 = 0.18, I_3 = -2.355, I_{15} = -12.5 \times 10^{-2}, I_1 = 16.234$$

Având în vedere aceste rezultate, rezultă:

$$i(t) = 16.234 \sin \omega t - 2.355 \sin 3\omega t - 0.115 \sin 5\omega t +$$

$$+ 0.37 \sin 7\omega t + 0.18 \sin 9\omega t - 0.06 \sin 11\omega t -$$

$$- 0.112 \sin 13\omega t - 0.125 \sin 15\omega t$$

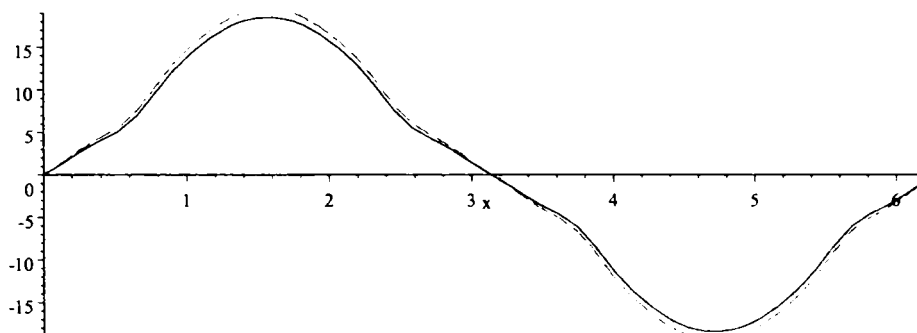


Fig 6.13. Variația în timp a curentului la $U = 313[V]$ ---experimental;---calcul

5

$$U = 386[V]$$

La tensiunea de valoare $U = 386[V]$, compoziția armonică a curentului obținută prin calcul este(paragraful4.2):

$$I_9 = 0.312, I_{11} = 0.178, I_1 = 23.08, I_7 = 0.112,$$

$$I_{13} = -8.91 \times 10^{-3}, I_{15} = -0.171, I_5 = -0.889, I_3 = -3.15$$

Având în vedere aceste rezultate, rezultă:

$$\begin{aligned} i(t) = & 23.08 \sin \omega t - 3.15 \sin 3\omega t - 0.889 \sin 5\omega t + \\ & + 0.112 \sin 7\omega t + 0.312 \sin 9\omega t + 0.178 \sin 11\omega t - \\ & - 0.0891 \sin 13\omega t - 0.171 \sin 15\omega t \end{aligned}$$

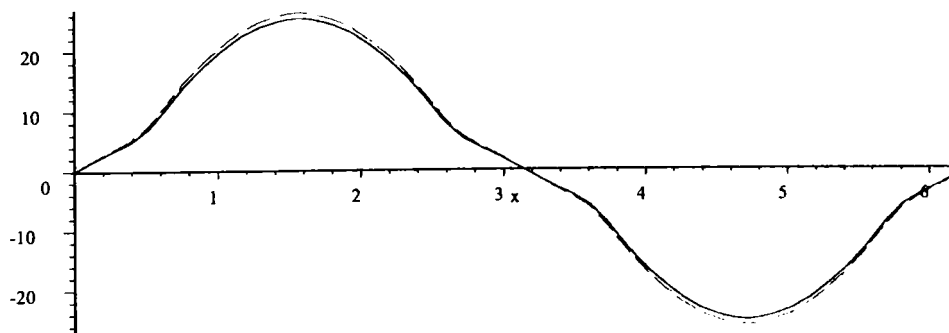


Fig 6.14. Variația în timp a curentului la $U = 386[V]$ ---experimental;---calcul

6.5 Verificări experimentale la MS la diverse valori ale curentului de excitație

Curentul de excitație I_E^* influențează semnificativ valoarea efectivă a fundamentalei, așa cum s-a arătat anterior

Se alege pentru analiza acestui caz valoarea tensiunii :

$$U = 236[V]$$

fiind aproape de cea nominală ($U_N = 230[V]$).

cazul 1

$$\text{Curent de excitație } I_E^* = 1[A]$$

La curentul de excitație $I_E^* = 1[A]$ compoziția armonică a curentului absorbit, obținută prin calcul, cu relațiile din paragraful 4.2, este:

$$I_3 = -1.2239, I_5 = 0.43033, I_1 = 5.92\sqrt{2}, I_{15} = -2.8133 \times 10^{-2}, \\ I_7 = 7.0894 \times 10^{-2}, I_9 = -0.14791, I_{13} = 6.57 \times 10^{-2}, I_{11} = 1.5069 \times 10^{-2}$$

deoarece:

$$I_{m(1)} = 6.92[A]$$

$$I_{d(1)} = I_{m(1)} - I_E^* = 6.92 - 1 = 5.92[A]$$

Curentul statoric $i(t)$ are următoarea formă:

$$i_m(t) = 5.92\sqrt{2} \sin \omega t - 1.2239 \sin 3\omega t + 0.43 \sin 5\omega t + 7.0894 \times 10^{-2} \sin 7\omega t - 0.14791 \sin 9\omega t + 1.5069 \\ - 2.81 \times 10^{-2} \sin 15\omega t$$

având o variație în timp așa ca în figura alăturată.

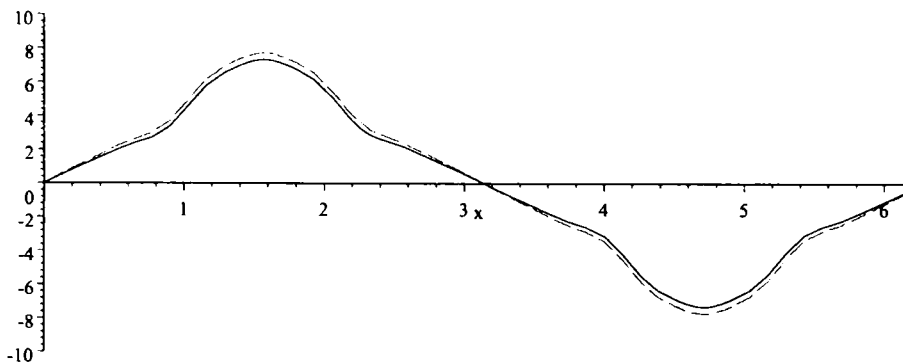


Fig 6.15. Variația în timp a curentului la $I_E^* = 1[A]$ - - - - experimental; — — — calcul

cazul 2**Curent de excitație $I_E^* = 6.92[A]$**

La curentul de excitație $I_E^* = 6.92[A]$ compoziția armonică a curentului absorbit, obținută prin calcul, cu relațiile din paragraful 4.2, este :

$$I_3 = -1.2239, I_5 = 0.43033, I_7 = 0, I_{15} = -2.8133 \times 10^{-2},$$

$$I_9 = 7.0894 \times 10^{-2}, I_{11} = -0.14791, I_{13} = 6.57 \times 10^{-2}, I_{15} = 1.5069 \times 10^{-2}$$

deoarece:

$$I_{m(1)} = 6.92[A]$$

$$I_{d(1)} = I_1 = I_{m(1)} - I_E^* = 6.92 - 6.92 = 0[A]$$

$$i(t) = -1.2239 \sin 3\omega t + 0.43033 \sin 5\omega t + \\ + 0.070894 \sin 7\omega t - 0.14791 \sin 9\omega t + 0.015069 \sin 11\omega t + \\ + 0.0657 \sin 13\omega t - 0.028133 \sin 15\omega t$$

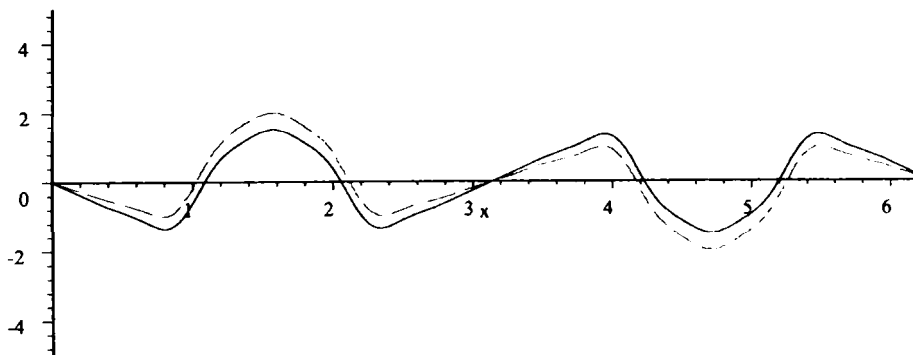


Fig 6.16. Variața în timp a curentului la $I_E^* = 6.92[A]$ ----experimental; ———

cazul 3**Curent de excitație $I_E^* = 10[A]$**

La curentul de excitație $I_E^* = 10[A]$ compoziția armonică a curentului absorbit, obținută prin calcul, cu relațiile din paragraful 4.2, este :

$$I_3 = -1.2239, I_5 = 0.43033, I_7 = -3.08\sqrt{2}, I_{15} = -2.8133 \times 10^{-2},$$

$$I_9 = 7.0894 \times 10^{-2}, I_{11} = -0.14791, I_{13} = 6.57 \times 10^{-2}, I_{15} = 1.5069 \times 10^{-2}$$

deoarece:

$$I_{m(1)} = 6.92[A]$$

$$I_{d(1)} = I_{m(1)} - I_E^* = 6.92 - 10 = -3.08[A]$$

$$i(t) = -3.08\sqrt{2} \sin \omega t - 1.2239 \sin 3\omega t + 0.43033 \sin 5\omega t + \\ + 0.070894 \sin 7\omega t - 0.14791 \sin 9\omega t + 0.015069 \sin 11\omega t + \\ + 0.0657 \sin 13\omega t - 0.028133 \sin 15\omega t$$

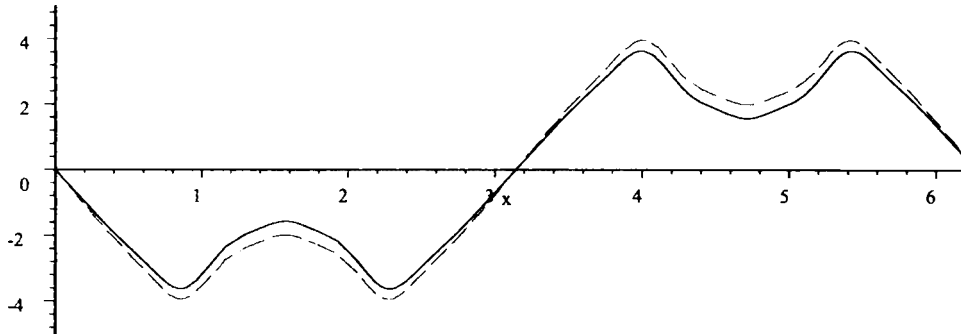


Fig 6.17. Variația în timp a curentului la $I_E^* = 10[A]$ ---experimental;---calcul

cazul 4

Curent de excitație $I_E^* = 20[A]$

La curentul de excitație $I_E^* = 20[A]$ compoziția armonică a curentului absorbit, obținută prin calcul, cu relațiile din paragraful 4.2, este :

$$I_3 = -1.2239, I_5 = 0.43033, I_1 = -13.08\sqrt{2}, I_{15} = -2.8133 \times 10^{-2}, \\ I_7 = 7.0894 \times 10^{-2}, I_9 = -0.14791, I_{13} = 6.57 \times 10^{-2}, I_{11} = 1.5069 \times 10^{-2}$$

deoarece:

$$I_{m(1)} = 6.92[A]$$

$$I_{d(1)} = I_{m(1)} - I_E^* = 6.92 - 20 = -13.08[A]$$

$$i(t) = -13.08\sqrt{2} \sin \omega t - 1.2239 \sin 3\omega t + 0.43033 \sin 5\omega t + \\ + 0.070894 \sin 7\omega t - 0.14791 \sin 9\omega t + 0.015069 \sin 11\omega t + \\ + 0.0657 \sin 13\omega t - 0.028133 \sin 15\omega t$$

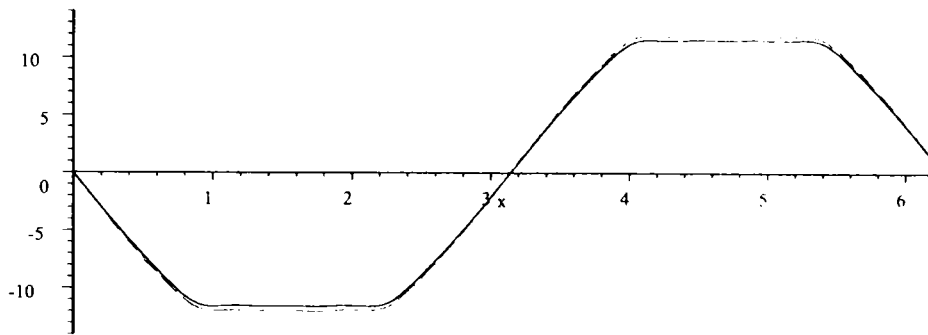


Fig 6.18. Variația în timp a curentului la $I_E^* = 20[A]$ - - - -experimental; - - - -calcul

6.6 Înregistrări experimentale ale tensiunii

Determinarea caracteristicii de magnetizare din axa longitudinală $\Psi_{md}(I_m)$ la MS, prin alimentarea înfășurării de excitație și înregistrarea tensiunilor induse din înfășurarea statorică e dată în continuare. La diverse valori ale curentului de magnetizare s-au obținut valorile corespunzătoare ale fluxului și astfel s-a putut ridica caracteristica de magnetizare din axa longitudinală $\Psi_{md}(I_m)$.

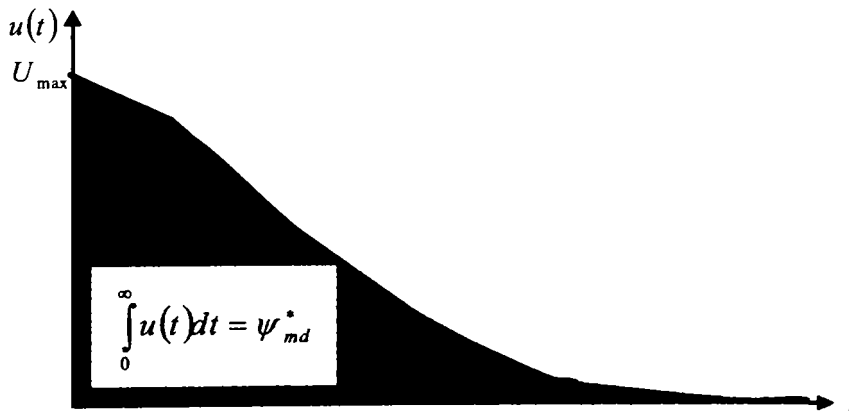
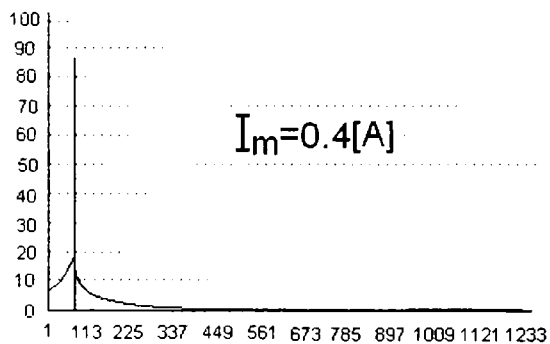
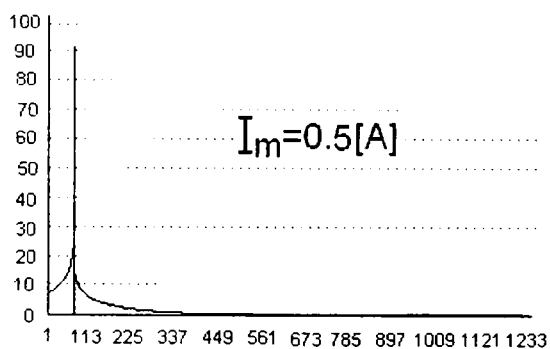


Fig.6.19. Determinarea fluxului din înregistrarea tensiunii.

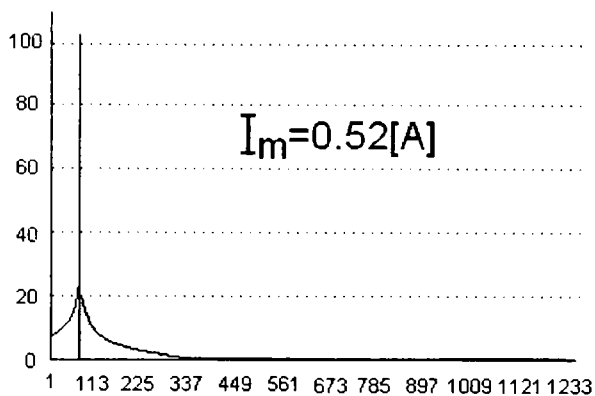
Sunt date în continuare înregistrările în timp ale tensiunii pentru 11 valori ale curentului de magnetizare. Tensiunea înregistrată a fost cea de la bornele înfășurării statorice.



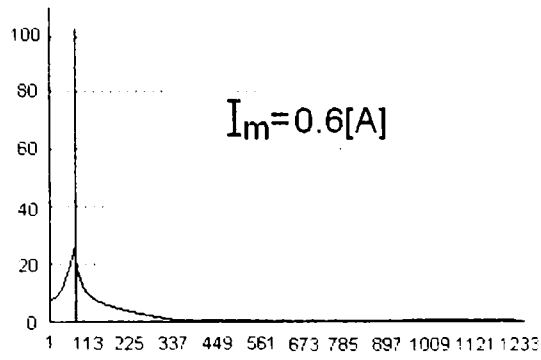
$$\Psi_{md1} = \int U dt = 0.08561 [Wb]$$



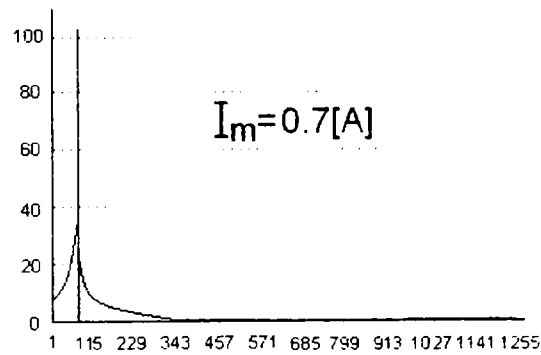
$$\Psi_{md2} = \int U dt = 0.09248 [Wb]$$



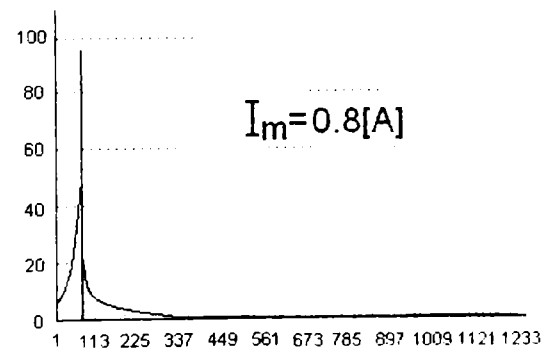
$$\Psi_{md3} = \int U dt = 0.10571 [Wb]$$



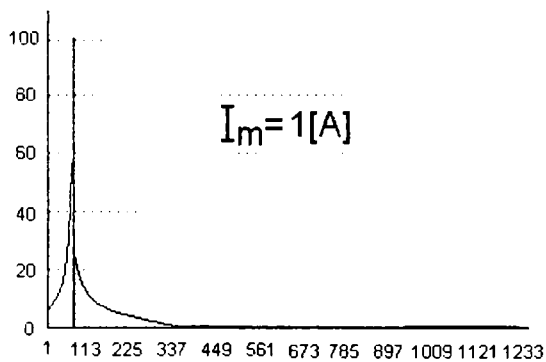
$$\Psi_{md4} = \int U dt = 0.12537 [Wb]$$



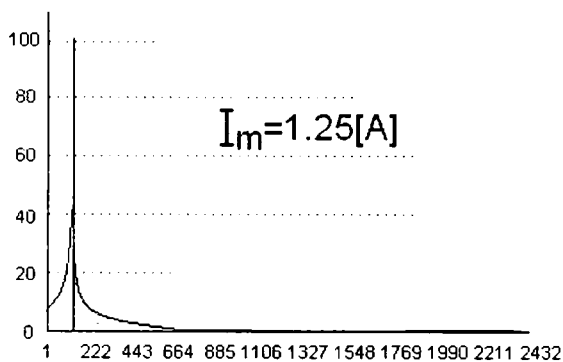
$$\Psi_{md5} = \int U dt = 0.14188 [Wb]$$



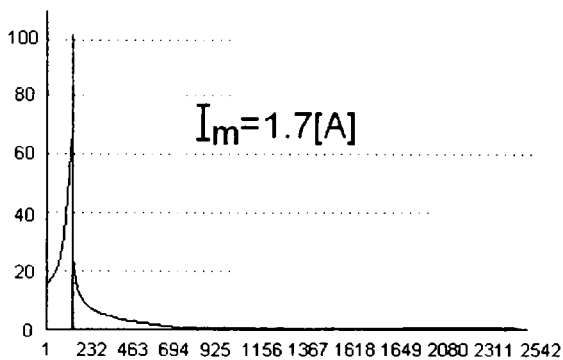
$$\Psi_{md6} = \int U dt = 0.16776 [Wb]$$



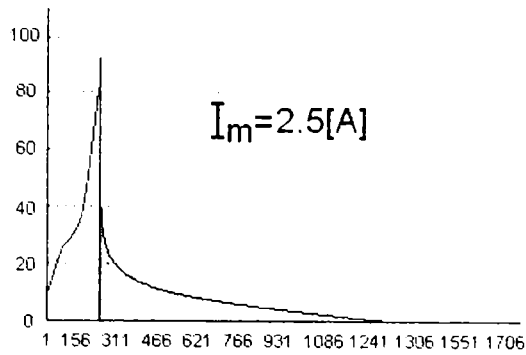
$$\Psi_{md7} = \int U dt = 0.21068 [Wb]$$



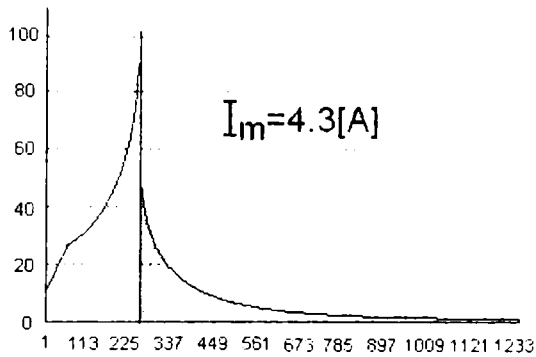
$$\Psi_{md8} = \int U dt = 0.25523 [Wb]$$



$$\Psi_{md9} = \int U dt = 0.34947 [Wb]$$



$$\Psi_{md10} = \int U dt = 0.50923 [\text{Wb}]$$



$$\Psi_{md11} = \int U dt = 0.801024 [\text{Wb}]$$

Determinarea caracteristicii de magnetizare din axa transversală $\Psi_{mq}(I_m)$ s-a făcut în mod analog prin conectarea a două faze statorice în serie și înregistrarea tensiunii din cealaltă fază, așa cum s-a arătat teoretic în capitolul al doilea.

6.7 Măsurile de filtrare pentru eliminarea armonicilor superioare.

Cunoscând armonicile superioare se pot dimensiona **filtrele** pentru eliminarea poluării sistemului electromagnetic [13].

Dacă în rețea apar componente armonice de ordinul 3 sau multiplu ale acestora, ele se însumează în conductorul neutru producând o componentă homopolară ce poate fi importantă ca valoare.

Efectele produse de componentele armonice pot fi considerate pe termen lung sau pe termen scurt. Efectul componentelor armonice pe termen lung se manifestă prin accentuarea îmbătrânirii izolației, supraîncălzirea motoarelor electrice din

cauza apariției unor momente suplimentare (pentru motoarele electrice limita maximă a distorsiunilor este 3 - 4 %), saturarea transformatoarelor, încălzirea conductorului neutru etc. În ceea ce privește efectul de scurtă durată, acesta se manifestă prin perturbarea unor mijloace de măsurare mai sensibile, comutarea unor triacuri și respectiv, a releelor statice, perturbarea telecomenzilor .

Frecvența componentelor armonice care apar în rețea nu depășește, de regulă, 2 kHz (armonica de ordinul 40).

Standardele precizează nivelul maxim (de compatibilitate) al componentelor armonice ale curentului, (CEI 1000 - 2 - 2) și respectiv contribuția maximă în conținutul total de armonice din curentul consumatorului permisă de la o singură sursă de perturbare, (CEI 555 - 2).

Reducerea nivelului componentelor armonice se face cu ajutorul filtrelor pasive sau active. Filtrele pasive sunt, de obicei, circuite LC serie conectate în paralel pe rețea. Aceste filtre au dezavantajul că sunt consumatoare de energie și introduc o componentă capacitivă la 50Hz. Filtrele active se realizează ca filtre de rejecție și se utilizează la echipamentele electronice; în prezent, asemenea filtre sunt realizate inclusiv în forma integrată.

Filtrele sunt blocuri electrice sau electronice care prelucrează în mod diferențiat armonicile superioare dintr-o gamă de frecvențe, rejctând de regulă, o parte considerată inutilă a spectrului.

Cele mai simple filtre pasive pot fi de ordinul I (filtre de tip RC), ce funcționează pe principiul disipării, sau de ordinul II (filtre de tip LC), ce funcționează pe principiul neadaptării. Prin compunerea acestora rezultă filtre de ordin superior.

În funcție de aplicație se alege tipul de filtru dorit.

Utilizarea filtrelor de rețea, adică a filtrelor prin care se face conectarea la rețeaua de alimentare a mașinilor electrice, are o importanță deosebită pentru majoritatea echipamentelor.

La proiectarea inductivităților din filtre se pornește de la valoarea efectivă maximă a curentului, și temperatura maximă la care poate ajunge bobina de șoc. Pe baza acestor considerente rezultă că valoarea maximă a curentului care încă nu produce saturarea miezului, este de circa 1,5 ori mai mare decât valoarea efectivă maximă a curentului pentru care este dimensionată bobina de șoc.

În cazul în care se dorește o filtrare mai bună, inclusiv la frecvențe ridicate, se pot conecta câte două filtre în serie ceea ce conduce și la creșterea frecvenței proprii de rezonanță.

Referitor la elementele componente ale filtrelor se poate afirma că cele mai bune condensatoare sunt cele ceramice, însă dau rezultate bune și variantele subminiatură de condensatoare cu poliester sau polistiren. Deosebit de important este ca terminalele condensatoarelor să fie cât mai scurte, ideală fiind folosirea condensatoarelor "chip" sau cu trei terminale.

În ceea ce privește bobinele, obținerea unei inductivități mari presupune un număr mare de spire care crește și capacitatea parazită a acesteia sau folosirea unor miezuri cu permeabilitate magnetică ridicată, care au și permitivitate de valoare mare și deci, conduc la același efect. Pentru reducerea capacității parazite a bobinelor se recomandă ca începutul și sfârșitul înfășurării să fie plasate pe părți opuse, bobinarea pe "galeți", iar ca tip de bobinare se folosește bobinarea "progresivă" (132547...).

Utilizarea feritelor sub formă de mărgelile sau manșoane în scopul de a concentra câmpul magnetic în jurul conductorului conduce la creșterea inductivității proprii a conductorului de câteva sute de ori și de obicei, nu implică reproiectarea circuitului. Feritele utilizate trebuie să fie absorbante la frecvențe ridicate, ceea ce face ca factorul de calitate al circuitului în care sunt plasate să fie redus și prin urmare, și efectele de rezonanță să fie minime. Ele se utilizează, de obicei, pentru reducerea efectului descărcărilor electrostatice și a impulsurilor tranzitorii rapide.

Filtrele de rețea se comercializează, ele putând fi adăugate după fabricarea produselor, existând chiar și prize filtrate .

La mașinile electrice saturate doar amplitudinile **armonicilor 3 și 5** sunt de același ordin de mărime cu valoarea amplitudinii fundamentale și din acest motiv se propun filtre de rețea pentru aceste armonici.

În acest sens se au în vedere relațiile:

$$3\omega L = \frac{1}{3\omega c} \text{ -pentru armonica 3;}$$

$$5\omega L = \frac{1}{5\omega c} \text{ -pentru armonica 5;}$$

sau:

$$9\omega^2 LC = 1 \text{ -pentru armonica 3;}$$

$$25\omega^2 LC = 1 \text{ -pentru armonica 5;}$$

La frecvența de bază $f = 50$ [Hz] ($\omega = 314$ [rad/s]) se obțin relațiile de bază pentru dimensionarea filtrelor:

$$8.8 \times 10^5 LC = 1 \text{ -pentru armonica 3;}$$

$$2.46 \times 10^6 LC = 1 \text{ -pentru armonica 5.}$$

Pentru a se realiza filtrarea armonicilor 3 și 5 se dispun 2 filtre LC.

La

$$c = 100 \text{ nf [13]}$$

rezultă:

$$L_3 = \frac{1}{8.8 \times 10^5 \times 100 \times 10^{-9}} = 11.36[H] \text{ - pentru armonica 3}$$

$$L_3 = \frac{1}{2.46 \times 10^6 \times 100 \times 10^{-9}} = 4[H] \text{ - pentru armonica 5}$$

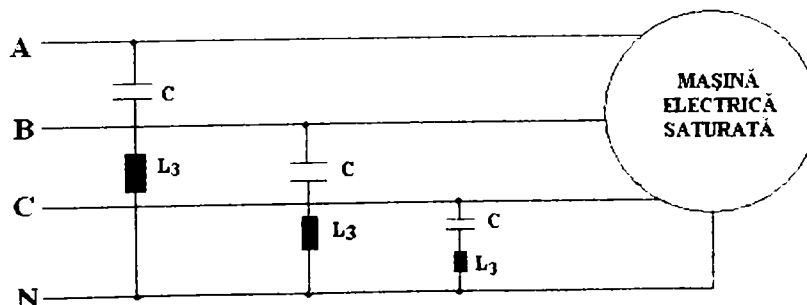


Fig.6.20. Filtru pentru armonica 3

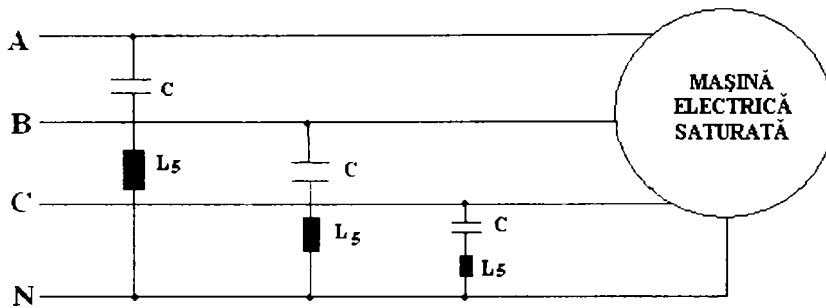


Fig.6.21. Filtru pentru armonica 5

Concluzii

a. MA

1. Prin probe de funcționare în gol se determină caracteristica de magnetizare $\Psi_m = f(I_m)$. Fluxul Ψ_m s-a determinat din fluxul total Ψ prin scăderea fluxului de dispersie (care se calculează ușor fiindcă inductanța de dispersie statorică s-a determinat experimental).
2. La diverse valori ale tensiunii de la borne s-au înregistrat, la funcționarea în gol, curenți absorbiți și s-au comparat cu valorile obținute din calcul, abaterile fiind de sub 2%.

b. MS

1. La MS s-au determinat experimental cele două inductanțe de dispersie, după cele două axe și s-au comparat cu valorile de catalog.
2. Din fluxul total Ψ_d și Ψ_q , scăzând fluxurile de dispersie, s-au obținut fluxurile utile Ψ_{md} și Ψ_{mq} . Determinările experimentale ale fluxurilor s-au făcut prin două metode propuse de autor.
3. Fluxurile s-au determinat experimental prin înregistrarea tensiunilor la bornele înfășurărilor statorice sau ale excitației.
4. Înregistrările curenților statorici, la funcționarea în gol, au fost făcute la diverse valori ale tensiunii de alimentare și pentru diferite valori ale curentului de excitație.

Valorile experimentale comparate cu cele teoretice au validat modelele matematice folosite în analiza regimului saturat la mașinile electrice. Diferențele dintre valorile teoretice și cele experimentale au fost sub 1%.

Din rezultatele obținute la calculul armonicilor se poate concluziona că doar amplitudinile **armonicilor 3 și 5** sunt de același ordin de mărime cu valoarea amplitudinii fundamentale. Din acest motiv este suficientă, la mașinile electrice saturate, plasarea numai a două filtre pentru anihilarea armonicilor 3 și 5.

7. CONCLUZII FINALE

7.1. Concluzii

Lucrarea de față analizează poluarea armonică a sistemelor electromagnetice de către mașinile electrice saturate.

În dezvoltarea acestui subiect s-a pornit de la analiza actuală a stadiului cercetărilor în domeniul saturației magnetice la mașinile electrice.

În acest sens a fost folosit modelul matematic ortogonal, dat în literatura de specialitate, model care a fost apoi prelucrat de autor și finalizat prin calculul compoziției armonice pentru diferite regimuri de funcționare ale mașinilor electrice.

Calculul compoziției armonice a curentului la mașinile asincrone și sincrone a scos în evidență următoarele aspecte :

- studiul saturației magnetice impune aprioric cunoașterea din încercări experimentale a caracteristicilor magnetice: flux - curent $\Psi_m = f(I_m)$;
- pentru determinarea fluxului util Ψ_m este necesară cunoașterea inductanțelor de dispersie, deoarece fluxul util se obține din fluxul total din care se scad fluxurile de dispersie;
- caracteristicile de magnetizare la MS $-\Psi_{md} = f(I_m)$ și $\Psi_{mq} = f(I_m)$ - se determină prin încercări ale mașinii după cele două axe ortogonale ;
- caracteristica de magnetizare rezultantă la MS $\Psi_m = f(I_m)$ - se determină pentru fiecare sarcină în parte printr-o metodă originală dată în lucrare ;
- aproximarea polinomială a caracteristicilor de magnetizare în zona saturată și în cea nesaturată introduce erori, uneori inadmisibile [capitolul 3], și prin urmare nu este recomandată a fi folosită într-o plajă largă de tensiuni la motoarele sincrone și asincrone ;
- aproximarea caracteristicilor de magnetizare prin liniarizare în zona saturată este recomandată a fi folosită [capitolul 4], deoarece rezultatele obținute sunt valide, fiind foarte apropiate de cele experimentale ;
- prin calculul armonicilor superioare ale curentului se pot calcula indicatorii regimului deformant în care funcționează mașinile electrice saturate.

Pentru diferite regimuri de funcționare s-au analizat compozițiile armonice ale curentului și s-au evidențiat mărimile ce influențează saturația magnetică a mașinilor electrice. Valoarea tensiunii de alimentare este hotărâtoare în stabilirea nivelului de saturație, la o frecvență fixă. Prin modificarea frecvenței, la tensiune fixă se modifică fluxul magnetic și deci nivelul de saturație al mașinii.

Nivelul de saturație magnetică se poate determina din caracteristicile de magnetizare și a variației în timp a curentului absorbit, la funcționarea în gol, fapt deosebit de util în verificarea tehnicilor de proiectare folosite la realizarea mașinilor respective.

Metodele experimentale de determinare a fluxurilor magnetice sunt, în general, originale și se bazează atât pe determinări în regim dinamic, cât și pe determinări

în regim staționar.

Testele efectuate pe diverse mașini și cu diferite metode au dat rezultate apropiate între ele, fapt ce evidențiază metodele propuse în lucrare.

Modelările și simulările numerice au folosit medii avansate de programare , în principal :

- Matematica IV și
- Scientific Work Place.

7.2. Contribuții originale

Se prezintă , în cele ce urmează, principalele concluzii și contribuții originale ale autorului având în vedere tema abordată : **poluarea sistemelor electroenergetice de către mașinile electrice saturate.**

Construcțiile modelelor matematice valabile în zona saturată și calculul compoziției armonice a curentului de magnetizare s-au rezolvat integral de autor prin metode originale, eficiente și verificate experimental.

Principalele contribuții originale aduse în lucrare sunt :

1. construcția modelului matematic valabil în regim saturat, la MA, având în vedere lucrările publicate în acest domeniu ;
2. determinarea mărimilor, la MA și la MS, ce determină nivelul de saturație (tensiuni, curenți cupluri);
3. determinarea experimentală a caracteristicii de magnetizare $\Psi_m(I_m)$, la MA ;
4. determinarea compoziției armonice a curentului de magnetizare, la MA, prin aproximarea polinomială a caracteristicilor de magnetizare ;
5. determinarea caracteristicii de magnetizare din axa longitudinală $\Psi_m(I_m)$ la MS, prin alimentarea înfășurării de excitație și înregistrarea tensiunii din înfășurarea statorică ;
6. determinarea caracteristicii de magnetizare din axa transversală $\Psi_m(I_m)$ prin conectarea a două faze statorice în serie și înregistrarea tensiunii din cealaltă fază ;
7. determinarea compoziției armonice a curentului de magnetizare, la MS, prin aproximarea polinomială a caracteristicii de magnetizare rezultante ;
8. determinarea , din datele de catalog, a inductanțelor de dispersie la MS ;
9. evaluarea saturației prin liniarizare în zona saturată, la MA și calculul coeficienților seriei Fourier la armonicile 1 - 15 ;
10. determinarea indicatorilor caracteristici regimului deformant , la diverse tensiuni, la MA ;
11. evaluarea saturației prin liniarizare în zona saturată , la MS și calculul coeficienților Fourier la funcționare în gol și la curent de excitație nul la MS ;
12. determinarea indicatorilor caracteristici regimului deformant, la diverse tensiuni ale MS ;
13. determinarea caracteristicii de magnetizare rezultante $\Psi_m(I_m)$, la MS, din cele două caracteristici componente, $\Psi_{ma}(I_m)$ și $\Psi_{mq}(I_m)$;
14. determinarea compoziției armonice la MS pentru diverse valori ale curentului

- de excitație și calcularea indicatorilor specifici regimului deformant, la MS;
15. estimarea variației cu tensiunea a amplitudinilor armonicilor în curent;
 16. estimarea nivelurilor armonicilor la diverse tensiuni și curenți de excitație;
 17. determinarea gradului de saturație a miezului din compoziția armonică a curentului la MA și MS ;
 18. obținerea caracteristicii de magnetizare rezultante, $\Psi_m(I_m)$, la MS, la orice sarcină (paragraful 3.2.1) ;
 19. analiza influenței valorii curentului de excitație , la funcționarea în gol, asupra formei de variație în timp a curentului statoric;
 20. probe statice la MS în axa longitudinală -axa d- și în axa transversală- axa q;

7.3. Perspective

Din analiza lucrărilor semnificative din literatura de specialitate se poate menționa faptul că saturația magnetică la mașinile electrice este în atenția specialiștilor și se caută soluții mai ales în ultima perioadă de timp când se impun praguri maxime valorilor armonicilor în curent.

Pentru realizarea filtrărilor armonicilor superioare este necesară cunoașterea compoziției armonice a curentului și obținerea unor niveluri de poluare cât mai scăzute.

Metodele de calcul și experimentele propuse pot sta la baza unor cercetări ulterioare pentru diferite aplicații unde este folosită mașina electrică saturată.

Prin folosirea tot mai largă a electronicii de putere în acționările electrice se poate limita nivelul de saturație și astfel se reduc armonicile superioare în curent.

BIBLIOGRAFIE

- A.1. Andronescu, P. - O contribuție la problema puterilor reală, reactivă, deformantă și aparentă. - Buletinul IRE, VII, 2, București, 1939.
- A.2. Arrilaga, J. - Power System Harmonics. John Wiley and Sons, Chister - New York, 1984
- A.3. Atanasiu, G. - Mașini electrice - Litografia U.T. Timișoara, 1994.
- A.4. Arie, A., Neaguș, C., Golovanov, Carmen, Golovanov, N. - Poluarea cu armonici a sistemelor electroenergetice funcționând în regim permanent simetric. - Ed. Academiei Române, București, 1994.
- A.5. Arie, A., Golovanov, N., Dumitru, C., - Propagarea armonicilor de curent produse de căile ferate electrificate în sistemul electroenergetic, Energetica, 39, nr.2, seria B, martie-aprilie 1991, pp. 77+90.
- B.1. Babescu, M. - Mașina sincronă Modelare, Identificare, Simulare - Ed. Politehnica Timișoara, 2003.
- B.2. Babescu, M. - Mașini electrice - Ed. Tehnică, București, 1996.
- B.3. Babescu, M. - Determination of the parameters of the model in use in the theory of electrical machines- Bul.șt.U.P.Timișoara, Tom 42, F2, 1997, p39-47.
- B.4. Babescu, M. - Generatoare electrice - Ed. Politehnica Timișoara 1998.,
- B.5. Babescu, M. Păunescu, D. - Mașini Electrice- Analiza matematică a regimurilor tranzitorii Ed. Politehnica, Timișoara, 2001.
- B.6. Babescu, M. - Mașina asincronă Modelare, Identificare, Simulare - Ed. Politehnica Timișoara, 2002..
- B.7. Bispo, D. Neto, L.M. Resende, J.T. Andrade, D.A. - A new strategy for induction machine modeling taking into account the magnetic saturation - IEEE Trans. on Ind. App, Vol.37, No.6, pp. 1710-1719, Nov./Dec. 2001.
- B.8. **Bobocea, M.** - Determinarea gradului de saturație la mașina asincronă din forma de variație a curentului statoric - Zilele Academice Timișene, Timișoara 2005
- B.9. **Bobocea, M.** - Determinarea gradului de saturație la mașina sincronă din forma de variație a curentului statoric - Zilele Academice Timișene, Timișoara 2007
- B.10. **Bobocea, M.** - Calculul indicatorilor regimului deformant la mașina asincronă saturată - International Conference on Electromechanical and Power System - October 4-6, 2007, Chișinău, Rep. Moldova, p146-150
- B.11. Boldea, I. Atanasiu, G. - Analiza unitară a mașinilor electrice - Ed. Academiei RSR-București, 1983.
- B.12. Boldea, I. - Parametrii mașinilor electrice - Ed. Academiei, București, 1991.
- B.13. Boldea, I. and Nasar, S.A. - Unitary treatment of core losses and saturation in the orthogonal-axis model of electric machines, - Proc. Inst. Elect. Eng., vol 134, pt.B, pp. 355 - 363, 1987.
- B.14. Boldea, I. - Transformatoare și mașini electrice - E.D.P. R.A. București, 1994.

- B.15. Boldea, I. Nasar, S.A. - A General Equivalent Circuit (GEC) of Electric Machines Including Cross coupling saturation and Frequency Effects - IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.3, No.3, pp. 689-695, september 1988.
- B.16. Boldea, I.. and Nasar, S.A. - Upon unitary tratment of magnetic saturation in orthogonal ayis models of electrical machines - Paper presented at ICEM - 1986, Munich , West germany.
- B.17. Boldea, I. Nasar, SA. - Vector Control of A.C. Drives - CRC Press Boca Raton, 1992.
- B.18. Biriescu , M. - Maşini electrice rotative - Ed. de Vest , Timișoara 1997.
- B.19. Blondel , A. - Components la theorie des alternateurs a deux reactions , RGE , 12 , 203-205 , 1922.
- B.20. Barret, Ph. Vas, P. - Regimes transitoires des machines electriques -Ed.Eyrolles , Paris , 1982.
- B.21. Brown, J.E. Kovacs, K.P., and Vas, P. - A method of including the effects of main path saturation in the generalized equations of ac machines - IEEE Trans. 1983, PAS-102, (1), pp. 96-103.
- B.22. Bălă, C - Maşini electrice - E.D.P. ,Bucureşti , 1979.
- B.23. Budeanu, - C. Confirmations expérimentales de la théorie des phénomènes déformants.- Memoriile Secţiei Ştiinţifice a Academiei Române, 1939.
- B.24. Budeanu, C. Antoniu, I S. - L'étude des phénomènes déformants dans une installation industrielle de distribution. Rap.329 - CIGRE, Paris , 1948.
- B.25. Buta, A., Milea, L., Pană, A., Impedanţa armonică a reţelelor sistemelor electroenergetice, Ed. Tehnică, Bucureşti, 2000.
- C.1. Câmpeanu, A. - Maşini electrice - Probleme fundamentale Ed. Scrisul Românesc, Craiova , 1988.
- C.2. Câmpeanu, A. Iancu ,V. Rădulescu, M. - Maşini în acţionări electrice - Editura Scrisul Românesc Craiova, 1996.
- C.3. Câmpeanu , A. - Introducere în dinamica maşinilor electrice de curent alternativ - Ed.Academiei Române Bucureşti, 1998.
- C.4. Chen GU. and Quishang GU. - A new method of predicting the performance of saturated synchronous inductor motor - IEEE Conf. Publ. 254, 1985.
- C.5. Chioncel, C. Stoian, **O. Bobocea**, M. Babescu, M. - Estimation of the harmonics of the curent by the saturate asynchronous motor, Power System Conference, Timișoara, 2007
- C.6. Capasso, A., Lamedica, R., Prudenzi, A., Tironi, E., Zaninelli, D., - Rotating load modeling for steady-state harmonic analysis, Proceedings of the 7th International Conference on harmonics and Quality of Power, Las Vegas, Nevada, 1996, pp 400+405.
- D.1. DE Mello, F.P. and Hannel, H. - Validation of synchronous machine models and derivation of model parameters from tests - IEEE Trans. 1981. PAS-100, pp.662-672.
- D.2. Dordea, T. - Maşini electrice - E.D.P., Bucureşti , 1970.
- D.3. Dordea, T. - Proiectarea și construcția maşinilor electrice- Litografia U.P. Timișoara, 1981.
- D.4. Dordea, T. - La theorie des deux axes pour les machines electriquesa enroulement repartis par zones-Rev. Roum. Sci. Techn. Electrotechn. et Energ.,

38 , Bucurest, 1993, p. 235-255.

D.5. Dordea, T. – Beitrag zur Zweiachsentheorie der elektrischen Maschinen , Archiv fur Elektrotechnik , 50 , 6 , 362 –371 (1966).

D.6. Drăgănescu, O. – Încercările mașinilor electrice rotative –Ed.Tehnică, București, 1987.

D.7. De Sabata, I.- Bazele electrotehnicii (vol 1 și 2)- Litografia IPT, Timișoara, 1980.

D.8. Deleşega, I. Andea, P. – Procese de comutație; calitatea energiei electrice – Ed. Orizonturi Universitare, Timișoara 2007

E.1. Erdogan, N. Henao, H. Grisel, R. - The Analysis of saturation effects on transient behavior of induction machine direct starting - IEEE Conference on Ind. Electronics ISIE'04, pp.975-979, May 4-7, 2004.

F.1. Ferreira de Jesus, J.M. - A model for saturation in induction machines - IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.3, No.3, pp. 682-688 September 1988.

G.1. Golovanov, C. - Aparate electrocasnice. Probleme de compatibilitate electromagnetica. Editura ICPE, București, 1997.

H.1. Harley, R.G. Limbeer, D.J.N. and Chirricozzi, E. - Comparative study of saturation in synchronous machine models - IEEE Proc. B, Electr.Power Appl., 1980, 127, (1), pp.1-7.

I.1. Iordănescu, I., - Compensarea factorului de putere și atenuarea regimului deformant, acțiuni interdependente în sistemele energetice moderne, Energetica, vol 28, 1980,nr.8, pp 327+331.

I.2. Iordănescu, I., - Fenomenul de rezonanță datorită regimului deformant și măsuri pentru evitarea sa, Conferință Națională de Energetică, București 1983, vol. 53, pp 134+140.

I.3. A. Ignea - Compatibilitate electromagnetica - Ed. de Vest, Timișoara, 2007.

J.1. Jerve, G.– Încercările mașinilor electrice rotative- Ed.Tehnică, București 1972.

K.1. Kelemen, A. Imecs, M. – Sisteme de reglare cu orientare după câmp ale mașinilor de curent alternativ –Ed.Academiei, București, 1989.

K.2. Kelemen, A. – Acționări electrice –EDP București, 1979.

K.3. Kerkmen, R.K. - Steady state and transient analysis of an induction machine with saturation of the magnetizing branch - IEEE Trans., 1985, IA-21, (1), pp.226-234.

K.4. Kei, S., T, Shenglai, I., - Comparison of standard and power supply design options for limiting harmonic distortion in power systems, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 29, No.4, iulie-august, 1993, pp. 688+696.

L.1. Leonard, W. – Control of electrical drives –Springer-Verlag, Berlin, 1985.

L.2. Lemoine, M. - Quelques aspects de la pollution des réseaux électriques par des distorsion harmoniques chez le client . R.G.E., 3, 1976.

L.3. Levi, E. and Levi, V.A. - Impact of dynamic cross-saturation on accuracy of saturated synchronous machines models - IEEE Trans. Energy Convers, vol. 15, no.2, pp. 224-230, 2000.

L.4. Levi, E. - A unified approach to main flux saturation modeling in d-q axis models of induction machines - IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.10, No.3, pp.455-461, September 1995.

L.5. Levi, E. - Impact of cross-saturation on accuracy of saturated induction

- machine models - IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.12, No3, pp.211-216, september 1997.
- L.6. Lipo, T.A. and Consoli, A. - Modeling and simulation of induction motors with saturable reactances - IEEE Trans. Ind. Appl., Vol. IA-20, no.1, pp. 180-189, Jan./Feb. 1984.
- L.7. Liénard, A. - Puissance réactive en courants nonsinusoidaux. R.G.E., X, 547, 1921.
- L.8. Lubin, T. Razik, H. and Rezzoug, A. - Magnetic saturation effects on the control of a synchronous reluctance machine - IEEE Trans. Energy Convers., vol.17, no.3, pp.356 - 362, 2002.
- M.1. Melkebeek, O.A. - Small signal dynamic modeling of saturated synchronous machines - Proc. ICEM Lansne, Switzerland, 1986, pp.442-450.
- M.2. Meynaud, P., Bergeal Y., Heikkila, H., Kendll, P., Pilegaard, M., Robert, A., Waldmann, E., - Harmoniques, paramètres caractéristiques, méthodes d'étude, estimation de valeurs existantes en réseau, ELECTRA, No 77, Juillet, pp 35 + 54.
- N.1. Nasar SA . Boldea , I. - Electric machines - dynamic and control - CRC Press , Inc. USA , 1993.
- N.2. Novac, I. - Maşini electrice - Litografia IPT , Timişoara , 1975.
- N.3. Novac, I. - Maşini şi acţionări electrice - EDP Bucureşti, 1980
- N.4. Nicolaide , A. - Maşini electrice - Ed. Scrisul Românesc Craiova , 1975.
- N.5. Neves, L., A., W., Dommel, H., W., Wilsun, Xu, - Practical distribution transformer models for harmonic studies, - IEEE Transactions on Power Delivery vol. 10, No2, 1995, pp 906 - 912.
- O.1. Ojo, J.O. Consoli, A. Lipo, T.A. - An Improved Model of Saturated Induction Machines - IEEE Trans. on Ind. App., vol. 26, No.2, pp. 212-221, March/Aprilie 1990.
- O.2. Ong, C.M . - Dynamic simulation of electric machiney Prentice Hall PTRNew Jersey 07458,1998.
- P.1. Păunescu, D. Babescu, M. - Analiza unitară a dinamicii maşinilor electrice - Editura Politehnica, Timişoara 2005.
- P.2. Park , R.H. - Two reaction theory of synchronous machines (I +II) Trans - A , IEE 48 , 716 - 727(1929) and 52 (1933).
- P.3. Pierrat, L. Dejaeger, E. and Garrido, M.S. - Models unification for the satured synchronous machines - International conference on Evolution and modern aspects of synchronous machines, (SM100), Zürich, Switzerland, pp. 44-48, Aug. 1991.
- P.4. Puşcaşu, S., Marcovici, J., Mărimi şi regimuri electrice nesinusoidale. Ed. Scrisul Românesc, Craiova, 1974.
- R.1. Retiere, N. Foggia, A. Roye, D. and Mannevy, P. - Deep-Bar Induction Motor Model for Large Transient Analysis under Saturated Condition - IEEE, pp.M.DI-3.1-M.DI-3.3, 1997.
- R.2. Richter, R. - Maşini electrice - vol I , II , III , IV Ed.Tehnică , Bucureşti , 1959.
- S.1. Seracin, E. Popovici , D. - Tehnica acţionărilor electrice - Ed.Tehnică Bucureşti,1985
- S.2. Smith, A.C. Healey, R.C. Williamson, S. - A transient induction motor model including saturation and deep bar effect - IEEE Trans. on Energy Conversion,

Vol.11, No.1, pp 8-15, March 1996.

S.3. Stepina , I. – Raunzeiger als grundlage der theorie der elektrischen maschinen – ETZ , A , Bd.88 , 1967 , H3.

S.4. Sullivan, C.R. Sanders, S.R. - Models for induction machines with magnetic saturation of the main flux path - IEEE Trans. on Ind. App. Vol.31, No.4, pp. 907-917, July/August 1995.

S.5. Sharon, D., - Reactive Power Definition and Power Factor Improvement in Non-Linear Systems. Proc. IEE, 120,6, June, 1973, p. 704-706.

Ș.1. Șora, C., Bazele Electrotehnicii, - Editura Didactică și Pedagogică, București, 1976.

T.1. Taked, Y. Adkins , B. – Determination of synchronous machine parameters allowing for unequal mutual inductances – Proc. IEE , 121 , 1974 , p1501 – 1504

T.2. Thaler, G. – Electric machines dynamics and steady state – John Wiley , New York , 1966.

T.3. Thorsen, O.V., Dalva, M. - A Contribution to the Development of Transient models for Digital Simulation of Saturated Induction Machines with Deep bar Effect - IEEE pp. 762-765, 1994.

T.4. Toulomi, O. – Synchronous machine parameter identification Multitude scale tehniue , vol 30/06/1994.

J.1. Țugulea, A., - Considerații privind efectele energetice în regimurile armonice nesimetrice ale sistemelor trifazate. Energetica, 34, 1986,p 121-129

J.2. Țugulea, A., - Considerații privind efectele energetice ale regimului deformant, Energetica, 34, 1986, p 164-167.

V.1. Viorel, I.A. Ciorba , R. – Mașini electrice în sisteme de acționare-Editura U.T.Pres 2002 , Cluj – Napoca .

V.2. Viorel, I.A., - On the parameter identification of induction motor-Electromotion 1997, Cluj-Napoca, p.138-142.

V.3. Vasiliu, Z., M., -Contribuții privind metode și sisteme de evaluare a gradului de poluare cu armonice a rețelelor electrice, - Teza de doctorat, Galați, 1996.

W.1. Williamson, J., - Effets des harmoniques du réseau sur les machines. Conférence Internationale sur les harmoniques dans les Réseaux Electriques, UMIS Manchester Angleterre, 1-2 Septembre 1998, pp 85-101.

X.1. XIA, D. Heydt, G., T., - Harmonic Power flow studies Part I – formulation and solution, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-101, june 1982, pp 1257+1270.

Normativ 1. *, -Power System Harmonics : - An Overview, IEEE Working Group on Power System Harmonics, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol PAS-102, No 8, Aug. 1983, pp 2455+2460.

Normativ 2. *, -PE 143, - Normativ privind limitarea regimului nesimetric și deformant în rețelele electrice, ICEMENERG, București, 1994.

Normativ 3. *, -Commission Eléctrotechnique Internationale (IEC), Comité d'Etudé No.77, Section 2 : Niveaux de compatibilité pour les perturbation conduités à la basse frequence, publications 1000-2-2, partie 2 : environnement section 2, 1990.

Normativ 4. *, -Commission Eléctrotechnique Internationale CEI (IEC), Comité d'Etudé No.77, - „Perturbations produites dans les réseaux d'alimentation par le apareils électrodomestiques et les équipements analogues”, CEI 555,Deuxième partie : Harmoniques, Noırme ANSI/ IEE 519/82.

Normativ 5. *, -IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems IEEE Std 519-1995.

Normativ 6. *, -Normativ privind limitarea regimului deformant și nesimetric în rețelele electrice - Compania Națională de Transport a Energiei Electrice Transelectrica.S.A. 2001

Normativ 7. *, -Guide to Harmonics with AC Drives - Technical Guide. No. 6 ABB Industry Oy, Helsinki 2000.

**Titluri recent publicate în colecția „TEZE DE DOCTORAT”
seria 6: Inginerie Electrică**

1. **Cristina Băla** – *Contribuții privind monitorizarea și diagnoza parametrilor funcționali ai transformatoarelor electrice din stațiile de transformare, prin folosirea bazelor complexe, ISBN 978-973-625-412-3, (2006);*
2. **Carmen Gabriela Stănescu** – *Contribuții privind monitorizarea calității energiei electrice la interfața între rețeaua de transport și cea de distribuție, ISBN 978-973-625-458-1, (2007);*
3. **Florentin Munteanu** – *Contribuții la implementarea protecțiilor împotriva supratensiunilor în echipamentele de telecomunicații, ISBN 978-973-625-518-2, (2007);*
4. **Nicola Valeriu Olărescu** – *Sisteme de acționări electrice performante ce utilizează mașina sincronă cu magneți permanenți în comutație statică, ISBN 978-973-625-528-1, (2007);*
5. **Marius Fătu** – *High performance control of PM synchronous generator (PMSG) for wind energy conversion, ISBN 978-973-625-607-3, (2008);*
6. **Ana Bobăianu** – *optimizarea mașinilor de inducție cu rotorul în scurtcircuit cuplate cu convertoare, ISBN 978-973-625-550-2, (2007).*