

INSTITUTUL POLITEHNIC " TRAIAN VULA " TIMISOARA .

Facultatea Electrotehnică .

Catedra " Utilizările energiei electrice
și mașini electrice " .

SOLUTII NOI IN UTILIZAREA FLUXULUI DE DISPERSIE
PENTRU OBTINEREA EFECTULUI DE REACTOR LA TRANSFORMATOARE .

Lucrare de dizertație pentru obținerea
titlului de " Doctor în științe tehnice " .

Ing. Șt. Grosu.

Conducător științific,
Prof. Dr. Ing. Toma Dordea.

BIBLIOTECA CENTRALĂ
UNIVERSITATEA "POLITEHNICA"
TIMIȘOARA

- 1 9 7 3 -

281525	
Dulap 181	lit. C

C U P R I N S
=====

Nr.		Pag.
0.	INTRODUCERE	6
1.	GENERALITATI PRIVIND FLUXUL DE DISPERSIE	9
2.	EXPUNEREA SOLUTIILOR	12
2.1.	Transformatoare cu reglaj sub sarcină	12
2.1.1.	Stadiul tehnicii	12
2.1.1.1.	Limitarea curentului între prize, prin elemente ale bobinajului transformato- rului.	13 14
2.1.2.	Scheme propuse	15
2.1.2.1.	Transformatoare de putere mică, cu bo- binajul de tensiune înaltă, în galeți.	16
2.1.2.2.	Transformatoare de putere mare.	16
2.1.2.3.	Transformatoare de putere mică, cu bo- binajul de tensiune înaltă în straturi.	16
2.2.	Transformatoarele de alimentare a cup- toarelor cu arc trifazat, pentru oțel.	17
2.2.1.	Stadiul tehnicii.	17
2.2.2.	Soluții propuse.	18
2.3.	Surse statice pentru sudarea electrică cu arc, în curent alternativ sau continuu.	19
2.3.1.	Stadiul tehnicii.	19
2.3.2.	Soluții propuse.	20
2.3.2.1.	Transformatoare monofazate pentru su- dare electrică cu arc.	20
2.3.2.2.	Transformatoare trifazate.	21

2.4.	Un principiu nou, privind reglarea curentului la transformatorul de sudare .	23
3.	ANALIZA TEORETICA	25
3.1.	Reactorul monofazat .	26
3.1.1.	Analiza inductanței.	26
3.1.2.	Mărimea inductanței.	27
3.1.3.	Schema echivalentă a reactorului monofazat.	32
3.2.	Reactorul trifazat.	33
3.2.1.	Reactorul cu miez simetric.	33
3.2.2.	Reactorul cu miez nesimetric.	35
3.2.3.	Reactorul cu miez în 5 coloane.	36
3.3.	Interacțiunea între reactor și bobinajele transformatorului.	36
3.3.1.	Bobinele reactorului și cele ale transformatorului pe coloane diferite.	37
3.3.1.1.	Bobinele reactorului pe coloanele laterale ale unui miez în manta.	40
3.3.2.	Inductanța negativă.	41
3.3.3.	Bobinele transformatorului și reactorului pe aceeași coloană magnetică.	42
3.3.4.	Transformatoare cu reactoare trifazate.	46
3.4.	Efecte secundare ale interacțiunii între bobinele reactorului, bobinajele transformatorului și piesele metalice alăturate.	47
3.4.1.	Curenți de circulație în bobinaje.	47
3.4.1.1.	Curenți de circulație în bobinajele reactorului.	47

3.4.1.2.	Curent de circulație în secundarul transformatorului	48
3.4.2.	Pierderi suplimentare.	49
3.4.2.1.	Pierderi suplimentare în bobinaje.	49
3.4.2.2.	Efectele pierderilor suplimentare.	50
3.5.	Suprapunerea fluxurilor în miezul magnetic.	51
3.5.1.	Reactorul propriu zis .	51
3.5.2.	Reactorul situat pe miezul magnetic al unui transformator.	52
3.5.2.1.	Bobinajele primar și secundar ale transformatorului sînt cilindri concentrici de înălțime egală.	52
3.5.2.1.1.	Reactorul și transformatorul alimentate separat.	52
3.5.2.1.2.	Reactorul și transformatorul alimentate din aceeași sursă.	53
3.5.2.1.3.	Reactorul în serie cu secundarul transformatorului.	55
3.5.2.1.4.	Reactorul în serie cu primarul transformatorului.	55
3.5.2.1.5.	Reactoare trifazate.	58
3.5.2.1.6.	Schema avînd pe fiecare coloană, reactorul unei faze diferite.	58
3.5.2.2.	Bobinajele primar și secundar ale transformatorului sînt în prelungire.	59
3.5.2.2.1.	Reactorul legat în serie cu bobinajul secundar.	59
3.5.2.2.2.	Reactorul legat în serie cu bobinajul primar.	61

3.6.	Variația inductanței cu frecvența.	62
4.	REZULTATE EXPERIMENTALE	64
4.1.	Inductanța reactoarelor.	64
4.1.1.	Reactorul monofazat.	64
4.1.1.1.	Încercări pe modole.	64
4.1.1.2.	Încercări pe transformatoare.	64
4.1.2.	Reactorul trifazat.	63
4.1.3.	Reactoare cu interacțiune cu bobinele transformatorului.	69
4.1.3.1.	Relații pentru măsurarea elementelor componente ale inductanței reactorului.	69
4.1.3.2.	Transformatorul monofazat cu reactor.	70
4.1.3.3.	Transformatorul trifazat cu reactor.	71
4.2.	Curentul de circulație în reactor.	72
4.3.	Pierderile suplimentare.	72
4.4.	Saturarea miezului magnetic.	75
4.4.1.	Reactorul.	75
4.4.2.	Transformatoare de sudare.	76
4.4.2.1.	Transformatoare cu reactorul conectat în secundar.	76
4.4.2.2.	Transformatoare cu reactorul conectat în primar.	77
4.4.2.3.	Curentul la mers în gol.	78
4.5.	Variația inductanței cu frecvența.	78
4.6.	Observații privind securitatea muncii la încercări.	78
5.	INDICAȚII DE PROIECTARE	80
5.1.	Mărimea inductanței .	80
5.2.	Pierderile suplimentare.	81
5.3.	Saturarea miezului magnetic.	81

5.4.	Curenții de circulație.	82
6.	REALIZARI INDUSTRIALE	83
6.1.	Transformatoare cu reglaj sub sarcină.	83
6.1.1.	Transformatorul trifazat de 400 kVA. 10/0,4 kV.	83
6.1.2.	Transformator trifazat de 3150 kVA , 35/6,3 kV.	84
6.2.	Redresorul pentru sudarea electrică cu arc în c.c. de 200 A.	86
7.	CONCLUZII	90
8.	BIBLIOGRAFIA.	91

SOLUȚII NOI ÎN UTILIZAREA FLUXULUI DE DISPERSIE PENTRU OBTINEREA EFECTULUI DE REACTOR, LA TRANSFORMATOARE

0. INTRODUCERE

În lucrare sînt analizate unele soluții propuse de autor pentru obținerea efectului de reactor, în general reglabil, la transformatoare, prin utilizarea fluxului de dispersie.

Expunerea începe cu un capitol privind aspectele generale ale acestui flux, urmează prezentarea soluțiilor cu sesizarea problemelor esențiale, extragerea și schematizarea aspectelor electrotehnice și dezvoltarea teoriei. În continuare sînt date rezultate experimentale și unele indicații de proiectare. Ca exemplificare, sînt arătate unele realizări industriale.

Se urmărește tratarea pe cît posibil unitară a domeniului nou și joncțiunea cu cel clasic spre a se putea obține rezultate care pot fi aplicate în industrie.

Introducerea unui transformator într-o schemă electrică, conduce nu numai la prezența funcției specifice de transformare a unor parametri a energiei electrice, ci și la apariția unor reactanțe în circuitele primar, secundar, deci la apariția efectului de reactor. Aceasta ca urmare a cîmpului de dispersie a celor două bobine cuplate magnetic. În multe cazuri acest efect este util. El poate fi obținut la mărimea necesară prin dimensionarea corespunzătoare a transformatorului. În anumite situații, în special cînd este necesar ca acest efect să fie reglabil, apar dificultăți importante de construcție și funcționare. Ca urmare se folosește soluția introducerii unui reactor cu construcție proprie, în serie cu primarul sau secundarul transformatorului. Este cazul clasic

al transformatorului monofazat de sudare, la care în secundar sau primar se introduce un reactor.

Există în tehnică, o tendință generală, de a concentra într-o mașină unică, mai multe funcțiuni. Aceasta pentru a se obține o micșorare a greutateii, gabariturii, pierderilor. În folul acesta există tendința de a îngloba în însăși construcția mașinii funcția reactorului necesar. Astfel, la transformatoarele de sudare, în unele construcții, se înlocuiește reactorul printr-un șunt magnetic reglabil sau se prevede reglarea distanței dintre bobinajul primar și cel secundar și deci a dispersiei între aceste bobinaje. Alteori se asociază construcția reactorului cu cea a transformatorului realizându-se un miez comun, sau un bobinaj combinat.

După cum se știe, există și alte utilizări în care apar, într-un echipament, un transformator și un reactor. Astfel, la redresorul de sudare în curent continuu, la reglajul sub sarcină al transformatoarelor, la cuptoarele electrice cu arc, pentru oțel, la redresoare.

În unele cazuri, nu se cunoaște o rezolvare avantajoasă pentru renunțarea la reactorul cu construcție proprie.

Spre exemplu sistemul cu șunt magnetic, în trifazat, pentru transformatoarele din redresoarele de sudare, sau pentru arc trifazat, devine prea complicat și are o utilizare redusă. Predomină utilizarea reactorului, care însă la puterile mici, chiar în variante cu bobinaj combinat cu cel al transformatorului, conduce la o construcție relativ complicată și grea. Trecerea la o rezolvare diferită a reglajului curentului de sudare, cu folosirea tyristoarelor, nu înlătură aceste dezavantajii.

Un progres în acest domeniu poate proveni, după cum va rezulta, din găsirea unor soluții noi, care pentru a fi aplicate, necesită o tratare teoretică și experimentală.

În stadiul actual al dezvoltării domeniului prezentat este foarte important să fie sesizate toate aspectele principale care au repercursiuni asupra funcționării, spre a evita apariția unor efecte neprevăzute, la transformatoarele construite.

Menționăm că unele aspecte analizate, specifice domeniului, pot sta la baza altor rezolvări, decât cele cuprinse în lucrare, sau trebuie să apară într-o măsură observabilă și la unele tipuri de transformatoare clasice, considerarea acestora permițând o mai bună proiectare.

Soluțiile prezentate în lucrare,^{x)} în mare măsură sînt noi. Ca o indicație în acest sens menționăm că sînt brevete în țară [9,12,19,20,22,23,31,36] și majoritatea și în străinătate [10,11,21,24,32]. Rezultă o tratare teoretică și experimentală, care pornind de la elemente cunoscute ale electrotehnicii este originală.

x) Acestea au apărut în realitate în altă succesiune în timp, și în altă înlănțuire logică, decât cele prezentate aici, din necesitatea unei expuneri sistematice.

1. GENERALITATI PRIVIND FLUXUL DE DISPERSIE

Noțiunile privind cîmpul și fluxul de dispersie sînt definite în electrotehnică. [1, 2, 3]

Vom face totuși unele precizări cu caracter general și cu caracter special privind lucrarea de față.

În mod riguros nu există cîmp și flux de dispersie în cazul unei singure spire, situată sau nu pe un miez magnetic. În mod inevitabil prezența celei de a doua spire, conduce la apariția cîmpului și a fluxului de dispersie, chiar dacă este înseriată cu prima. Aceasta pentru că, potrivit legilor fizice, două spire nu pot ocupa simultan același loc în spațiu și pentru că nu se cunoaște un mediu cu permeabilitate magnetică zero.

Existența fluxului de dispersie are ca rezultat faptul că între spirele unei mașini electrice se stabilesc relații complexe privind înlănțuirea acestora. Se obține o simplificare stabilind relații pe baza grupurilor de spire, numite "bobine".

Noțiunea de bobină în acest sens, deși des întîlnită, nu are o definiție precizată. Nu vom încerca să dăm o definiție, dar semnificația va apare de la caz la caz, în cele studiate.

Relațiile între bobinele unei mașini electrice depind printre altele de numărul lor și devin mai complexe cînd acest număr crește.

În general, la cuplarea prin cîmp magnetic a două bobine γ și λ se ține seama de cîmpul magnetic principal, acela care cauzat de curentul printr-o bobină, γ spre exemplu, înlănțește toate celelalte bobine, inclusiv λ și de cel care înlănțește pe λ nu le înlănțește pe toate celelalte bobine, cîmpul de dispersie. În legătură cu aceste cîmpuri apar fluxurile și inductanțele corespunzătoare.

Astfel în legătură cu ν și λ , răcind parte dintr-un ansamblu de mai multe bobine, distingem mărimile:

$L_{\nu\nu}$ = inductanța bobinei ν , corespunzătoare fluxului total al acesteia.

$L_{\nu\nu h}$ = inductanța bobinei ν , corespunzătoare fluxului principal.

$L_{\nu\sigma}$ = inductanța corespunzătoare fluxului de dispersie.

$L_{\nu\lambda}$ = inductanță mutuală în raport cu bobina λ corespunzătoare fluxului total (de împănțuire).

$L_{\nu\lambda h}$ = inductanța mutuală în raport cu bobina λ corespunzătoare fluxului principal.

$L_{\nu\lambda\sigma}$ = inductanța mutuală în raport cu bobina λ corespunzătoare fluxului de dispersie.

În mod analog se definesc mărimile:

$L_{\lambda\lambda}$, $L_{\lambda\lambda h}$, $L_{\lambda\sigma}$, $L_{\lambda\nu}$, $L_{\lambda\nu h}$, $L_{\lambda\nu\sigma}$.

Inductanțele rezultă dintr-o relație de tip:

$$L = \frac{\Psi}{i}$$

În studiul funcționării mașinilor electrice apare mărimea care reprezintă un flux de dispersie complex, al unei bobine, care este rezultatul trecerii curenților respectivi prin toate bobinele. Pentru o bobină λ acest flux este dat de relația:

$$\Psi_{\lambda\sigma} = \sum_{\nu=1}^m (L_{\nu h} - L_{\nu\lambda h}) i_{\nu}$$

Acestui flux nu-i corespunde o inductanță L conform

relației de mai sus, dar îi poate corespunde în cazuri particulare conform unei convenții, o inductanță "echivalentă".

La studiul fluxurilor de dispersie ale mașinilor și transformatoarelor se fac diverse simplificări. La transformatoarele clasice acestea permit importante simplificări de calcul. Astfel la un transformator trifazat, nu se iau în considerare decât bobinajele primar și secundar ale aceleiași faze. De asemenea se consideră numai anumite zone ale circuitului magnetic. [4]

În situațiile speciale ale soluțiilor prezentate în lucrare, unde amplificarea fluxului de dispersie apare ca un obiectiv și unde bobinajele diferă de cele clasice, simplificările uzuale la transformatoare nu mai pot fi utilizate. Ca urmare vom porni de la relațiile generale, cu luarea în considerare a tuturor bobinelor, efectuând ulterior simplificările posibile. De asemenea va trebui luat în considerare efectul de saturare a miezului magnetic datorat suprapunerii fluxurilor, care poate avea urmări importante.

Extinderea câmpului de dispersie în spațiul din jurul miezului magnetic conduce la apariția unor curenți în piesele metalice, inclusiv în tolele miezului, ceea ce poate avea consecințe importante nu numai sub aspectul pierderilor dar și sub acela al ecranării acestui câmp. Ca urmare vor fi analizate și posibilitățile de reducere a efectelor semnalate.

2. EXPUNEREA SOLUTIILOR

Soluțiile sînt clasificate după modul de utilizare al transformatoarelor la care se aplică. În felul acesta se pot contura nu numai problemele industriale care se rezolvă, dar și aspectele specifice legate de funcționare și construcție. Aceste aspecte sînt numai enunțate, ele indicînd direcții în care vor trebui dezvoltate, în capitolele următoare, teoria și experimentarea.

De fiecare dată se prezintă la început stadiul existent al tehnicii, spre a servi ca referință pentru soluțiile expuse.

2.1. Transformatoare cu reglaj sub sarcină.

2.1.1. Stadiul tehnicii.

La transformatoarele cu reglaj sub sarcină, la trecerea de pe o priză pe alta, există situația în general tranzitorie, în care un contact d , al comutatorului se găsește pe o priză, iar alt contact e , pe o altă priză (fig.1). În această situație curentul între prize, este limitat în general printr-o impedanță Z . După cum aceasta este o reactanță sau o rezistență, deci pornind de la un element aparent neînsemnat, s-au dezvoltat în tehnica transformatoarelor, două sisteme de reglaj sub sarcină, fiecare avînd o tehnică proprie și o dezvoltare proprie, cu importante consecințe industriale. Aceasta în primul rînd pentru că, după natura impedanței de limitare se folosește și un anumit principiu constructiv, pentru comutator. În tehnica actuală sînt folosite ambele sisteme, dar se extinde cel cu limitare prin rezistențe și comutare rapidă " Dr. Jansen".

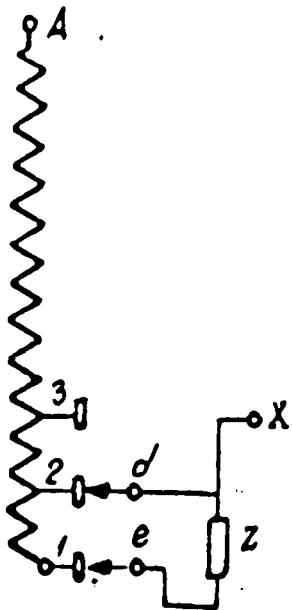


Fig. 1

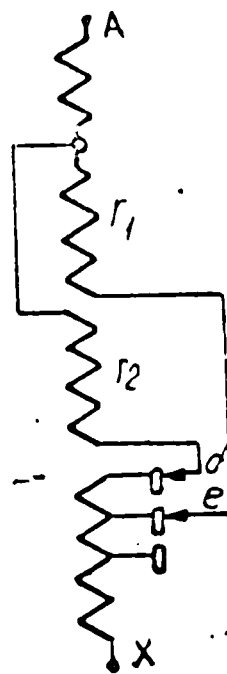


Fig. 2

2.1.1.1. Limitarea curentului între prize prin elemente ale bobinajului transformatorului.

Pentru limitarea curentului între prize, se folosesc și scheme speciale în care două porțiuni r_1 și r_2 ale unui bobinaj al transformatorului sînt conectate în paralel între ele, și în serie cu restul bobinajului (fig.2). În funcționarea între două prize, curentul este limitat prin impedanța ansamblului celor două porțiuni, care față de tensiunea dintre prize apar ca fiind conectate în opoziție. Această impedanță (între punctele d și e) este determinată în special de reactanțele de dispersie ale celor două porțiuni, una față de cealaltă. [4, 5, 6]

Avantajele acestor scheme constă în aceea că permit înlocuirea unui reactor, în mod uzual trifazat, avînd construcția proprie, prin porțiuni active ale bobinajului transformatorului. În felul acesta, la un transformator cu reglaj sub sarcină, practic nu mai apare consum sporit de toată electrotehnică și conductor (secțiunea conductorilor din cele două porțiuni se poate lua pînă la jumătate față de cea a bobinajului principal), ca în cazul folosirii reactorului cu construcție proprie. O analiză mai atentă, arată că la această soluție apar și dezavantaje. Acestea

sînt legate de faptul că cuplajul magnetic dintre cele două porțiuni de bobinaj, situate pe același miez magnetic este strîns. Ca urmare, pentru a se obține o anumită impedanță, este necesar ca o parte procentual importantă din bobinaj, să fie adusă în cele două porțiuni. Aceasta duce la o sporire a volumului ocupat de izolația conductorilor și la scumpirea manoperei. Porțiunile în paralel conduc la o repartiție în general neuniformă a amperspirelor pe înălțimea coloanei, cu consecințele cunoscute pentru eforturile axiale la scurtcircuit.

S-a căutat creșterea dispersiei între cele două porțiuni prin îndepărtarea lor. În general, aceasta conduce însă, la zone de tensiune mărită față de restul bobinajului.

Ca urmare, sistemele de reglaj de acest gen s-au utilizat în tehnică la transformatoare de puteri mici, și mai rar la puteri mai mari.

2.1.2. Scheme propuse

Acestea constituie perfecționări ale sistemului cu limitarea curentului între prize, prin porțiuni ale bobinajului transformatorului și conduc pe deoparte la obținerea unor reactanțe date, cu cel mai mic număr posibil de spire, iar pe de altă parte, încadrează astfel aceste elemente în restul bobinajului, încît să nu conducă la zone de tensiuni mărite, sau la reacții în general dezavantajoase cu restul bobinajelor. [7,8]

În principiu, se folosesc două bobine r_1 și r_2 ale bobinajului transformatorului, situate una la un capăt de coloană magnetică, iar alta la celălalt capăt, pentru fiecare fază a transformatorului (fig.3). Ca urmare se obține o importantă creștere a dispersiei între cele două bobine. [9,10]

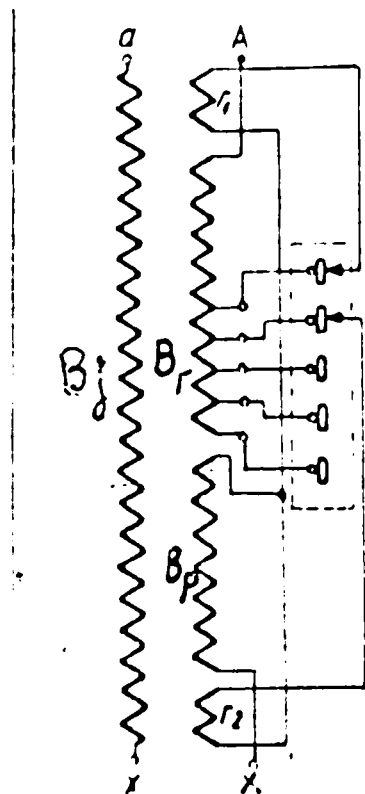


Fig. 3

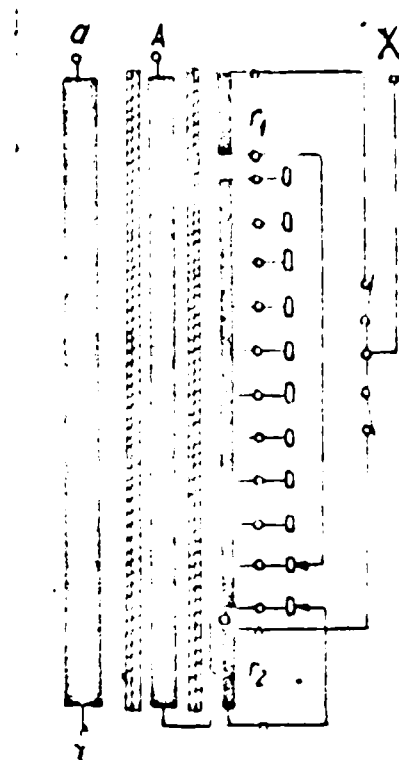


Fig. 4

In cazul transformatoarelor trifazate, se obține o creștere suplimentară a reactanțelor, ca urmare a interacțiunii între reactoarele de pe coloane diferite.

Cele două bobine r_1 și r_2 , au aproximativ potențialul bobinajului de reglaj B_p , cu care sînt în legătură. În acest fel între r_1 și r_2 și restul bobinajului principal B_p apar tensiuni mărite, care ar implica mărirea spațiului de izolație, și deci mărirea transformatorului. Acestea se evită prin următoarele scheme :

2.1.2.1. Transformatoare de putere mică, cu bobinajul de tensiune înaltă, în galeți.

In cazul transformatorului, avînd tensiunea înaltă de mărime relativ redusă (spre ex. 6 kV), cu bobinajul primar în triunghi, prin adoptarea unei scheme cu bobinajul de reglaj la mijlocul bobinajului unei faze, se poate utiliza chiar dispoziția care rezultă nemijlocit din fig. 3, deoarece între bobinele r_1 și r_2 și restul bobinajului B_p rezultă circa jumătate din tensiunea

nominală (3 kV). În acest caz distanțele de izolație suplimentare sînt practic neînsemnate. Față de bobinajul de joasă tensiune B_j situația este aceeași ca la transformatorul de construcție uzuală, fără reglaj sub sarcină.

2.1.2.2. Transformatoare de putere mare.

La transformatoarele de putere mare și tensiuni relativ înalte (35-110 kV) se poate folosi bobinajul din fig.4. La astfel de transformatoare este uzuală construcția cu bobinajul de tensiune înaltă constituit din doi cilindri concentrici, din care cel interior cuprinde partea principală, iar cel exterior bobinajul de reglaj. La un astfel de bobinaj, se restrînge înălțimea bobinajului de reglaj și la capetele acestuia se situează bobinele r_1 , r_2 . Ca urmare a acestei dispoziții, nu apar creșteri sensibile ale izolației întrucît între r_1 , r_2 și capetele bobinajului de reglaj nu apar tensiuni mai mari decît tensiunea dintre capetele bobinajului de reglaj. [11]

Astfel, la un transformator la 110 kV cu reglaj $\pm 16\%$ cu conexiune stea, această tensiune este circa 12 kV, dacă există un singur bobinaj de reglaj și devine în general și mai mică, în cazul schemelor combinate cu două bobine de reglaj.

2.1.2.3. Transformatoare de putere mică, cu bobinajul de tensiune înaltă în straturi.

În prezent sînt răspîndite la puterile pînă la 1600 kVA și 35 kV, transformatoarele cu bobinajul de înaltă tensiune în straturi. Pentru astfel de bobinaje, se poate folosi schema din fig.5. Se remarcă că cele două bobine r_1 și r_2 , sînt extinse fiecare la aproximativ jumătate din înălțimea bobinajului. Există deci o soluție intermediară impusă de o anumită construcție de bobinaj, între folosirea pentru limitarea curentului între prize a

două bobine îndepărtate la capetele coloanei magnetice și două bobine alăturate. Din urmărirea schemei de bobinaj, se vede că r_1 și r_2 se încadrează în restul bobinajului, astfel încât practic nu apar zone de tensiuni mărite și nici de izolație suplimentară.

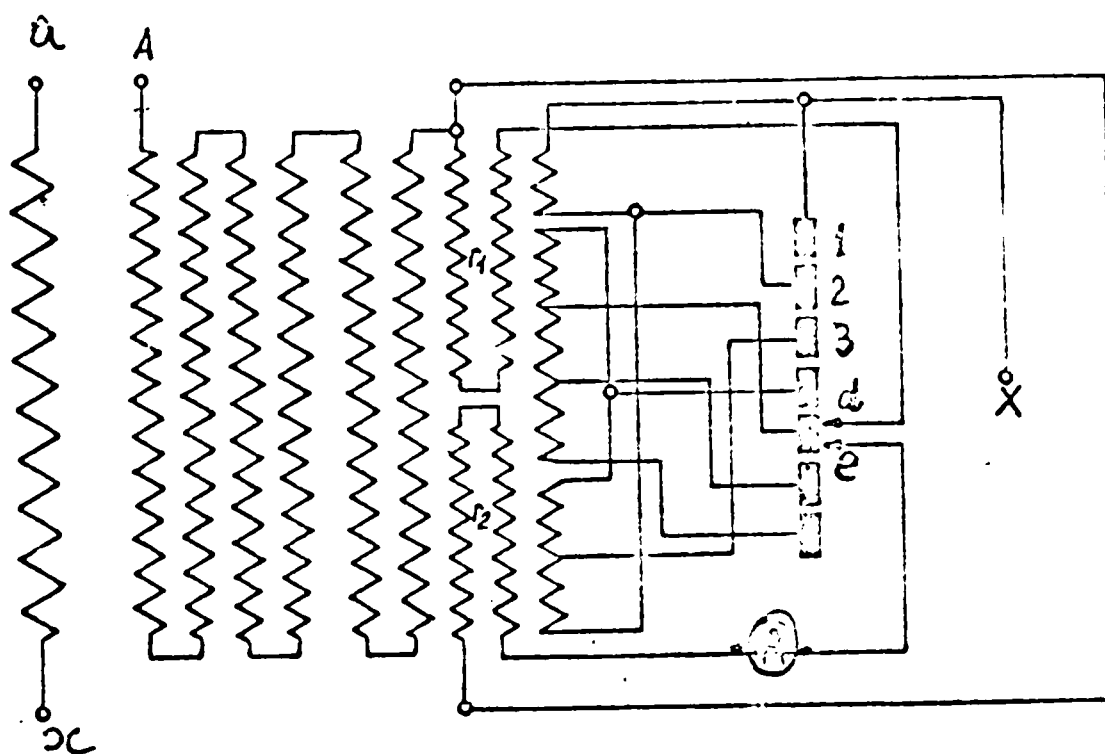


Fig. 5

La transformatoarele prezentate, mai apar problemele:

În ce mod influențează miezul magnetic, valoarea reac-tanței, care este interacțiunea reactorului cu restul bobinajelor transformatorului, sau cu piesele metalice apropiate. Aceasta va re-zulta din analiza teoretică și experimentală de la cap. 3 și 4.

2.2. Transformatoarele de alimentare a cuptoarelor cu arc trifazat, pentru oțel.

2.2.1. Stadiul tehnicii.

În echipamentul electric al cuptoarelor trifazate cu arc, pentru oțel, apare în marea majoritate a cazurilor un reac-tor trifazat. [13, 14] Este cunoscut faptul că limitarea curentului de scurtcircuit se poate face prin mărirea tensiunii de scurtcir-cuit a transformatorului deci printr-o anumită construcție a acestuia.

ia. În cazul de față, soluția are o utilizare limitată la unele transformatoare de mică putere. Aceasta în primul rând din cauză că este necesar să se obțină mai multe valori, deci un reglaj pentru tensiunea de scurtcircuit.

2.2.2. Soluții propuse.

Pentru cuptoarele electrice cu arc s-a propus soluția în care reactorul, pe fiecare fază, este realizat tot din două bobine r_1 , r_2 în opoziție, situate la capetele coloanei magnetice (fig.6).

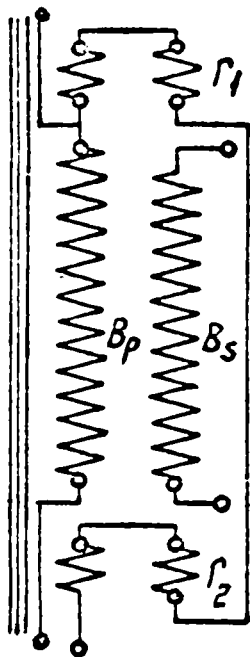


Fig.6

Problemele care apar aici sînt mai complexe, decît în cazul reglajului sub sarcină. Acest reactor are o funcționare de durată, astfel că pierderile suplimentare datorite fluxului de dispersie nu pot fi neglijate. În acest reactor, legat în serie cu bobinajul primar B_p al transformatorului apar curenți mari, în regimul de lucru ca scurtcircuitări repetate la cuptor, ceea ce poate conduce la eforturi axiale importante. Pe anumite porțiuni ale coloanelor magnetice se produce o suprapunere a fluxului de dispersie cu fluxul principal, ceea ce poate conduce la creșterea inducției și saturarea acestor porțiuni, cu consecințe negative, pentru funcționare. Între diverse secțiuni în paralel ale bobinajului secundar pot lua naștere curenți de circulație, ca urmare a t.e.m. induse prin fluxul de dispersie.

Înlăturarea dificultăților semnalate poate rezulta printr-o anumită construcție a transformatorului.

2.3. Surse statice pentru sudarea electrică cu arc în curent alternativ sau continuu

2.3.1. Stadiul tehnicii

Transformatoare monofazate pentru sudare în curent alternativ. La transformatoarele pentru sudarea electrică cu arc, fluxul de dispersie al bobinajelor primar și secundar este utilizat în mod curent pentru obținerea efectului de reactor. Acest flux este reglat, după cum s-a arătat, fie prevăzând o derivație (șunt) magnetică, cu poziție reglabilă, fie prin deplasarea unuia din bobinaje, față de celălalt. Aceste soluții, deși răspândite aduc unele complicații constructive și funcționale.

Deplasarea șuntului, poate fi înlocuită, prin promagnetizarea acestuia printr-un bobinaj, cu curent continuu reglabil. Rezultă simplificări în construcția mecanică, dar apar complicații printr-un bobinaj în plus și pierderi suplimentare [45]

La transformatoarele de puteri mai mici sînt răspîndite construcțiile cu reglajul curentului în trepte. La acestea se prevede pe un miez magnetic cu două coloane, un bobinaj primar și două bobinaje secundare, din care unul situat pe aceeași coloană cu primarul și deci cuplat magnetic relativ strîns cu acesta, iar altul pe cealaltă coloană, cuplat mai slab. Prin comutarea unor prize, circuitul de sudare poate fi alimentat de la secundarul strîns cuplat, în care caz se obține curentul maxim sau de la secundarul slab cuplat, în care caz se obține curentul minim sau, prin legarea în serie a unor porțiuni din ambele secundare, în care caz se obțin trepte intermediare. Este răspîndită și varianta analoagă, cu două bobinaje primare și unul secundar, care apare avantajoasă, prin aceea că, comutarea treptelor, se face în circuite cu curenți mai mici. Soluția aceasta, avantajoasă în general are următoarele dezavantaje :

— Faptul că se comută porțiuni din două bobinaje conduce la necesitatea de a schimba, la trecerea de la o treaptă la alta, două puncte de legătură. Aceasta complică mecanismul de comutare. Soluția este avantajoasă, cu un miez magnetic cu două coloane. Aplicarea acesteia în trifazat, unde miezurile uzuale cu trei coloane, nu au disponibile pentru fiecare fază decât o singură coloană, nu mai este rațională.

— Redresoare pentru sudarea electrică cu arc, în curent continuu. La redresoarele pentru sudarea electrică cu arc în curent continuu, schema clasică cuprinde un transformator trifazat, care alimentează printr-un reactor trifazat, reglabil, o punte redresoare. Construcțiile cu șunturi magnetice sau cu bobine deplasabile nu sînt răspîndite. Construcțiile moderne folosesc în special amplificatoare magnetice. Au apărut în ultimul timp construcții la care reglajul și redresoarele se fac cu tiristoara [8]. La toate acestea reglajul este continuu. La redresoarea de putere mică, se folosesc și construcții cu transformator monofazat, cu reglajul în trepte. La acestea este necesară filtrarea curentului, printr-un reactor.

2.3.2. Soluții propuse

2.3.2.1. Transformatoare monofazate pentru sudare electrică cu arc

La un transformator monofazat, cu miez în manta, s-a folosit un reactor pentru reglarea curentului de sudare, constituit din bobine legate în opoziție, situate la capetele unei coloane magnetice laterale (fig.7). Bobinele de pe o coloană laterală, constituie un reactor, cele de pe cealaltă coloană, un al doilea reactor, ambele putînd fi legate în serie, și în serie cu bobinajul secundar (sau primar). [19]

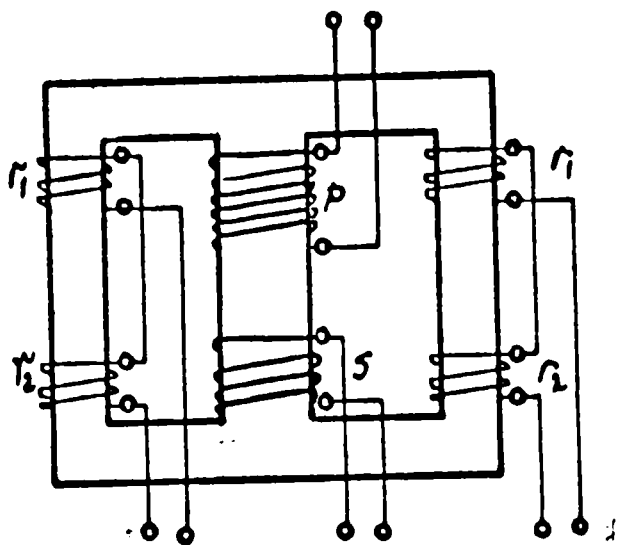


Fig.7

Reactoarele se pot diviza în grupe de câte două bobine în opoziție, grupele fiind legate în serie, iar în punctul de legătură se scot prize, astfel ca reactorul să fie introdus treptat, realizându-se un reglaj în trepte. Bobinajele transformatorului se găsesc pe coloana centrală. În comparație cu situațiile arătate anterior, la

cap. 2.1.2. și 2.2.2. apar următoarele diferențe : bobinele reactorului, se găsesc pe coloane diferite de cea pe care se găsesc bobinajele transformatorului. Bobinajul primar și secundar sînt situate cap la cap (în prelungire) deci nu sînt cilindri introduși unul într-altul, ca în cazurile precedente. Aceasta conduce la o interacțiune, între bobinele reactorului și bobinajele transformatorului, prin intermediul fluxurilor de dispersie, astfel încît apar următoarele aspecte :

Reactanța introdusă de reactor în circuitul primar sau secundar, considerînd ansamblul reactor-transformator, este sensibil mai mare decît aceea care s-ar obține, cu reactorul situat singur pe miezul magnetic. Preczăm că această reactanță corespunde unui anumit sens de legare a reactorului, cu unul din bobinajele transformatorului. Dacă se inversează sensul de legare, se obține o creștere a curentului, față de situația în care reactorul nu era introdus în circuit, deci reactorul introduce " o reactanță negativă".

2.3.2.2. Transformatoare trifazate

Principiul interacțiunii între bobinajul reactorului

și bobinajele transformatorului, este folosit în alt mod în schema din fig.8, pentru un transformator trifazat. Pe un miez magnetic cu trei coloane se situează, pe fiecare coloană, câte un bobinaj primar 3, secundar 4 și deoparte și de alta a acestora, deci la capetele coloanei, două bobine 1 și 2 legate în opoziție și în serie cu secundarul sau primarul, constituind reactorul. În funcție de sensul legării, poate să apară o reactanță pozitivă sau negativă. [20,21]

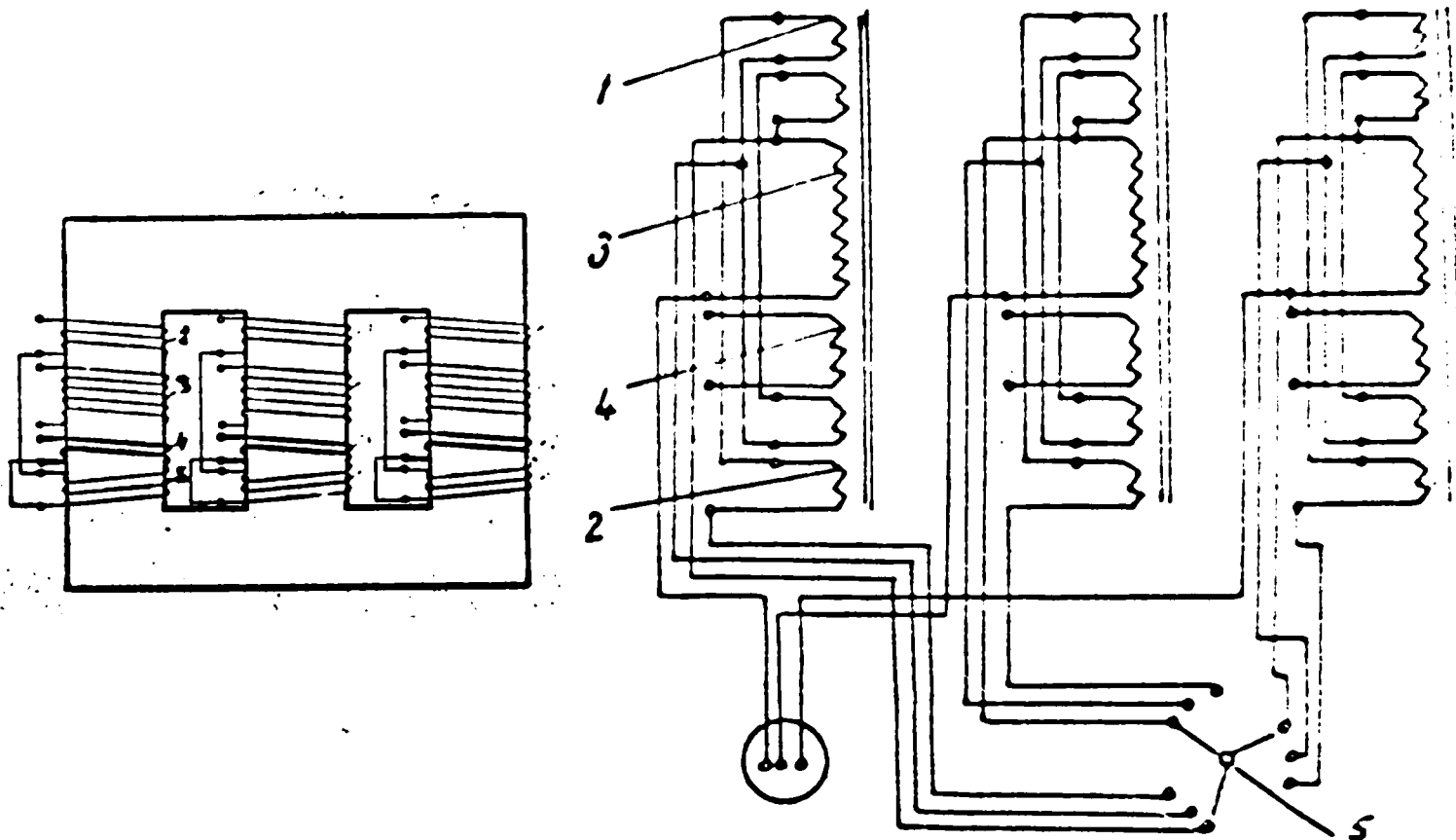


Fig.8

Fig.9

Schema poate fi folosită la transformatoarele pentru sudare cu arc trifazat, sau la redresoarele de sudare în curent continuu, alimentate de la rețeaua trifazată. Reglarea se face în trepte constituind reactorul pe fiecare fază din grupuri de bobine, legate două câte două în opoziție și scoțând prize, în punctele de legătură dintre grupuri și în punctul de legătură cu bobinajul transformatorului.

În figura 9 este dată o schemă de reglaj cu reactorul și

comutatorul 5 în primar. Bobinajele secundar se pot conecta în stea sau în triunghi.

Se obține avantajul unui echipament mai economic, întrucât se folosește un miez unic, pentru transformator și reactor.

2.4. Un principiu nou, privind reglarea curentului la transformatorul de sudare

La transformatoarele de sudare, fie că se folosește reactanța de dispersie dintre primar și secundar, reglarea curentului se face prin reglarea unei reactanțe, la care inductanța este reglabilă și pulsația (ω) constantă.

Deci

$$X = \chi \omega$$

În aparatul de sudare, conform fig.10, de la rețeaua trifazată, se alimentează un convertizor static de frecvență 1 (cu redresor și tyristoare). Ace sta alimentează transformatorul coborât de tensiune 2 care alimentează electrodul. Soluția este justificată prin aceea că de la convertizor se obține o frecvență mărită față de cea a rețelei ceea ce conduce la avantaje tehnologice, prin sudare și la transformatoare mai mici și cu randament mărit.

Prevăzînd transformatorul cu inductanță de dispersie relativ mare și practic constantă și convertizorul cu posibilitatea reglării frecvenței, reactanța de dispersie va varia în primă aproximație, proporțional

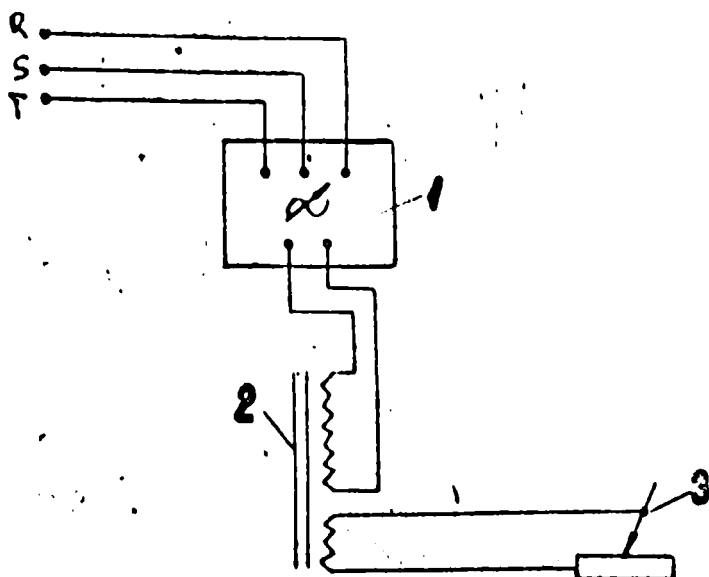


Fig. 10

cu frecvența. Deci

$$X = L \omega$$

Cu un astfel de aparat [22,23,24] se va putea suda spre exemplu la 150 Hz , la 300A și la 600 Hz la un curent de aproape 4 ori mai mic și cu orice curent între aceste limite prin variația frecvenței. Ca problemă specifică, sesizăm variația inductanței cu frecvența și modalitatea de înlăturare a acestei variații.

In prezent convertizorul static este relativ scump, soluția fiind preconizată pentru viitor.

3. ANALIZA TEORETICA

Soluțiile prezentate conțin aspecte electrotehnice într-o anumită măsură noi. Extrăgându-se esențialul, rezultă o succesiune de scheme, constituind un domeniu unitar.

Vom porni de la un bobinaj cu două bobine identice, în opoziție, situate pe o coloană magnetică, una în prelungirea celeilalte (fig.11). În toate cazurile menționate, cu o singură excepție, vom avea efectiv un astfel de bobinaj. Excepția, transformatorului funcționând la frecvență mărită și variabilă, poate fi tratată tot ca un ansamblu de două bobine în opoziție, pe un miez magnetic, deoarece în acest caz existența curentului de magnetizare, care ar constitui deosebirea față de situația reală, este neglijabilă, întrucât la frecvențe mărite, se lucrează cu inducția micșorată.

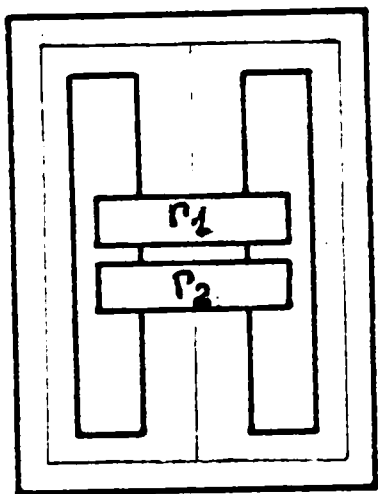


Fig.11

Fenomenul principal, acela al realizării inductanței, este însoțit de fenomene secundare, care pot condiționa utilizarea celui dintâi.

Ca urmare vom analiza :

1. Reactorul monofazat. Inductanța și variația acesteia ca urmare a îndepărtării bobinelor, iar ca un

caz special, situația în care aces-

tea sînt la capetele coloanei magnetice.

2. Reactorul trifazat.

3. Interacțiunea care apare între reactor și bobinajele transformatorului, sub aspectul modificării inductanței echivalente a reactorului.

4. Efecte secundare ale interacțiunii între bobinajele reactorului, bobinajele transformatorului și piesele metalice alăturate.

5. Suprapunerea în miezul magnetic a fluxurilor principal și de dispersie, sub aspectul saturării miezului.

6. Variația inductanței la reactorul monofazat, ca urmare a variației frecvenței .

3.1. Reactorul monofazat

3.1.1. Analiza inductanței

Reactorul monofazat, constituit din cele două bobine r_1 și r_2 situate pe un miez magnetic, conectate în opoziție, corespunde schemei din fig.11. Pentru a trata în mod unitar analiza inductanțelor, vom porni și în acest caz relativ simplu, de la relații generale, adaptate :

$$\Psi_r = \Psi_1 + \Psi_2$$

unde

$$\begin{aligned} \Psi_r &= \text{fluxul reactorului (al celor două bobine conectate)} \\ \Psi_1 &= \text{fluxul bobinei } r_1 \\ \Psi_2 &= \text{fluxul bobinei } r_2 \end{aligned}$$

$$\Psi_1 = \Psi_{1\sigma} + \Psi_{1h} \quad \Psi_2 = \Psi_{2\sigma} + \Psi_{2h}$$

unde indicele σ , indică fluxul de dispersie iar h pe cel principal.

$$\Psi_{1h} = \sum_{v=1}^m L_{v1h} \dot{i}_v$$

se obține :

$$\Psi_{1h} = L_{11h} \dot{i}_1 + L_{21h} \dot{i}_2 \quad \Psi_{2h} = L_{22h} \dot{i}_2 + L_{12h} \dot{i}_1$$

deoarece :

$$L_{11h} = -L_{21h} \quad L_{22h} = -L_{12h} \quad \dot{i}_1 = \dot{i}_2 = \dot{i}$$

rezultă :

$$\Psi_{1h} = \Psi_{2h} = 0$$

din

$$\Psi_{i\sigma} = \sum_{v=1}^m (L_{v\sigma} - L_{v\sigma h}) \dot{i}_v \quad (1)$$

rezultă : $\Psi_{1\sigma} = (L_{11} - L_{11}h) i_1 + (L_{21} - L_{21}h) i_2$

deoarece : $\Psi_{2\sigma} = (L_{22} - L_{22}h) i_2 + (L_{12} - L_{12}h) i_1$

$$L_{21} = L_{21}h \quad L_{12} = L_{12}h \quad i_1 = i_2 = i$$

rezultă : $\Psi_{1\sigma} = (L_{11} - L_{11}h) i$ $\Psi_{2\sigma} = (L_{22} - L_{22}h) i$

$$L = \frac{\Psi_{\sigma}}{i} = \frac{\Psi_{1\sigma} + \Psi_{2\sigma}}{i} = L_{11} - L_{11}h + L_{22} - L_{22}h \quad (2)$$

Deci inductanța reactorului este egală cu suma inductanțelor de dispersie a celor două bobine r_1 și r_2 , considerate una în raport cu cealaltă.

3.1.2. Mărimea inductanței

Vom analiza în continuare, posibilitățile de determinare a mărimii inductanței, a variației acesteia cu distanța dintre cele două bobine și situația limită, cu cele două bobine, fiecare la câte un capăt de coloană magnetică.

Relațiile de determinare a inductanțelor de dispersie, la transformatoarele clasice de putere [4,25] nu mai pot fi utilizate, întrucât conțin ipoteze simplificatoare, care nu mai corespund. De asemenea nu pot fi utilizate nici soluțiile cunoscute ale calculului permeanțelor în aer, pentru corpuri cu forme geometrice regulate [26,27].

O situație principial echivalentă, dar din alt domeniu, o întâlnim la transformatoarele pentru sudarea electrică cu arc, cu reglarea curentului prin îndepărtarea bobinajelor primar și secundar. Aceasta este tratată în literatură [28].

Prin adaptare pentru reactor rezultă :

În cazul unui miez ca în fig.11, chiar pentru poziția inițială, cu bobinele apropiate, relațiile care nu țin seama de forma miezului magnetic, nu mai corespund. Ca urmare, se folosește metoda cunoscută a împărțirii spirei medii a unei bobine în porțiuni situate în interiorul ferestrei și altele în exteriorul ferestrei și tratarea acestora în mod separat.

La îndepărtarea bobinelor mici aceste premize nu mai sînt corespunzătoare. Ca urmare se folosește o metodă specifică. Se consideră că de la o anumită distanță x , liniile de forță ale

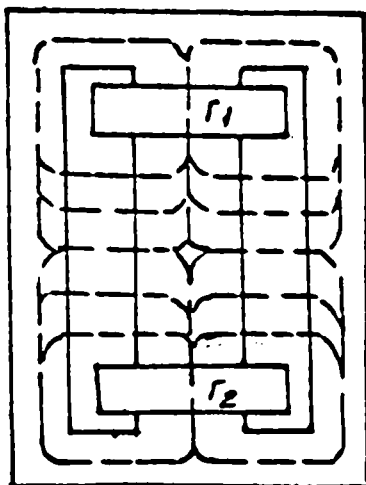


Figura 12.

Fluxului de dispersie sînt cuprinse în plane normale pe coloana centrală a miezului magnetic, se închid între această coloană și cele laterale și au o densitate constantă. Ca urmare configurația fluxului apare ca în fig. 12. Pentru o variație dx a distanței dintre bobine, pentru fluxul de dispersie al unei spire vom avea :

$$d\phi_1 = N i \Lambda \frac{dx}{2}$$

unde : N = numărul de spire al unei bobine

i = curentul

Λ = permeanța specifică (permeanța spațiului cu aer în care se închid liniile de forță, corespunzător unei distanțe egale cu unitatea). Reluctanțele porțiunilor din circuit prin miezul magnetic se neglijează. Pentru întreaga bobină rezultă :

$$d\psi_1 = N^2 i \Lambda \frac{dx}{2}$$

de unde :

$$dL_1 = N^2 \Lambda \frac{dx}{2}$$

și integrînd între limitele x și x_0 , obținem :

$$L_1 = N^2 \frac{\Lambda}{2} (x - x_0) + L_{i0}$$

iar pentru întregul reactor :

$$L = L_1 + L_2 = N^2 \Lambda (x - x_0) + L_0$$

unde L_0 este inductanța corespunzătoare distanței x_0 . Se consideră că determinarea mărimii Λ se poate obține pe cale grafică, sau prin modele - un calcul direct fiind prea complicat.

Experimental, pentru un transformator de sudare cu bobinele deplasabile se obține reprezentarea grafică $\chi = L\omega = f(x)$ din fig.13. Aceasta reprezentînd practic o dreaptă, se demonstrează că ipoteza conform căreia fluxul de dispersie, începînd de la x_0

este proporțional cu χ , este corectă. De asemenea rezultă că χ_0 este mic, corespunzând practic situației cu bobinele alăturate. Ca urmare χ_0 poate fi determinat prin relațiile pentru transformatoarele cu bobinele alăturate.

Menționăm că această dreaptă s-a obținut la un transformator, cu miezul avînd o coloană centrală și patru coloane laterale.

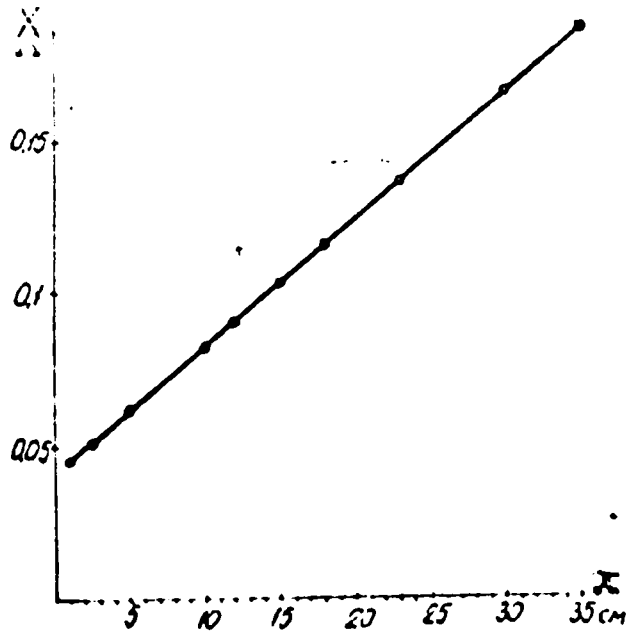


Fig. 13.

Adaptarea integrală pentru reactor a teoriei cunoscute a transformatorului de sudare, cu bobine deplasabile, nu este suficientă și menționăm următoarele:

În determinarea mărimii Λ s-au neglijat liniile de forță, care se închid numai prin coloana centrală (fig. 14).

Această simplificare poate fi justificată

în cazul tratat în literatură pe baza următoarelor considerații: miezul magnetic de tip manta, are cele două coloane laterale, relativ apropiate de coloana centrală. Tipul clasic de miez, fiind constituit din tole paralele, acestea ecranează într-o anumită măsură câmpul normal la planul

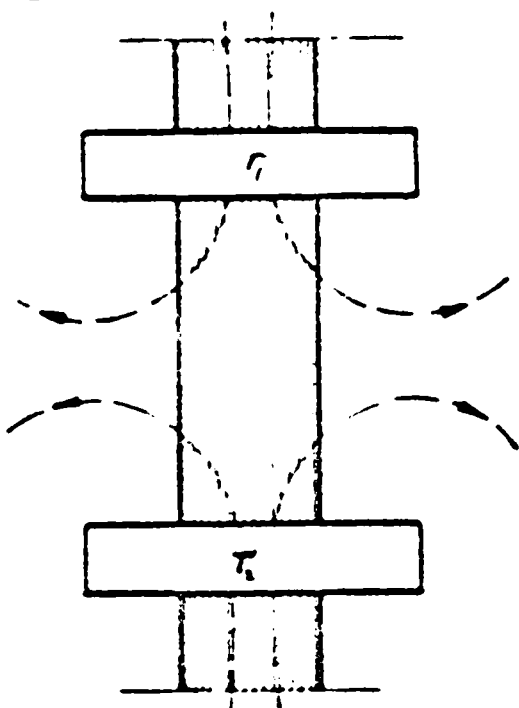


Figura 14.

tolelor. De altfel, după cum am menționat, reprezentarea grafică experimentală, corespunde unui miez monofazat cu o coloană centrală și patru laterale unde în mod evident, ipoteza admisă, este reală.

În cazul reactorului însă, situația este diferită. Modelul monofazat din fig. 12, corespunde de cele mai multe ori reactorului

de pe coloana din mijloc a unui miez trifazat de transformator cu trei coloane, unde însă distanța pînă la coloanele laterale este mai mare. Mai mult, prezintă interes reactorul din fig.15, care corespunde situației de pe o coloană laterală. Este evident că în astfel de cazuri, fluxul corespunzător liniilor de forță care se închid între coloane, este sensibil diferit de fluxul total.

Ca urmare vom reconsidera aspectele problemei tratate, după cum urmează :

Incepînd de la o distanță x_0 , variația fluxului de dispersie a unei spire, corespunzînd construcției din fig.11, sau din fig.15, pentru o variație a distanței dx , este :

$$d\Phi_1 = d\Phi_1' + d\Phi_1''$$

unde $d\Phi_1'$ reprezintă variația fluxului care corespunde liniilor de forță, care se închid între coloanele miezului magnetic și deci corespunde relației scrise anterior, iar $d\Phi_1''$ reprezintă variația fluxului care corespunde liniilor de forță care se închid prin aer la aceeași coloană pe care se găsesc și bobinele (fig.14).

O problemă principală este aceea de a cunoaște pentru acest din urmă flux, care este relația de variație în raport cu distanța dintre bobine. De data aceasta, nu mai rezultă o situație clară, ca în fig.12, care să justifice o relație simplă. Liniile de forță au acum lungimi diferite în funcție de x , care depind și de geometria miezului magnetic. Obținerea unor concluzii în această privință pe baze teoretice este dificilă. Vom încerca să le obținem pe cale experimentală. Pentru aceasta, admitem ca pe o

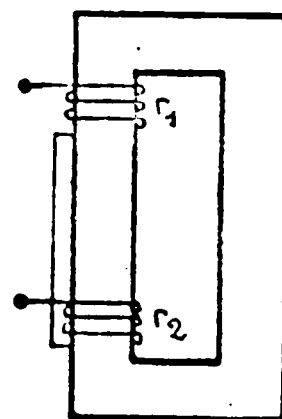


Fig.15.-

ipoteză relația :

$$d\phi_1'' = N i \Lambda'' \frac{dx}{2} \quad \Lambda'' = \text{constantă}$$

unde Λ'' este permeanța specifică, corespunzătoare spațiului prin care se închid liniile de forță la aceeași coloană. Deoarece:

rezultă:

$$d\phi_1' = N i \Lambda' \frac{dx}{2} \quad \Lambda' = \text{constantă}$$

$$d\phi_1 = N (\Lambda' + \Lambda'') \frac{dx}{2} \quad (3)$$

Reprezentarea grafică a funcției $X = L\omega = f(x)$ începînd de la x_0 , va trebui să fie o dreaptă^{x)}. Am obținut pe cale experimentală, pentru un miez ca în fig.15, deci în situația care dieră cel mai mult de cea cunoscută, dreapta din fig.16 (cap.4.1.1.1).

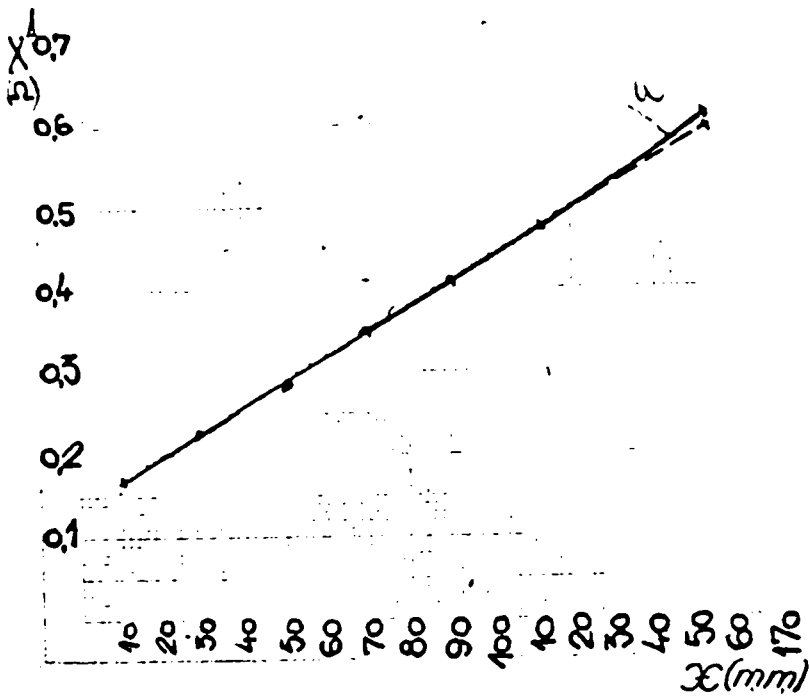


Fig.16

Aceasta este o confirmare, că cel puțin în unele cazuri, ipoteza admisă, este satisfăcătoare. Cunoașterea variației inductanței reactorului, cu distanța dintre bobine, permite simplificarea unor probleme de proiectare.

Pentru determinarea mărimii L_0 , premisele rămîn aceleași ca în cazul precedent. Pentru deter-

minarea mărimii Λ'' este necesară modelarea electrolică sau modelarea electromagnetică.

Un efect care trebuie menționat, este acela al influenței apropierii bobinelor r_1 și r_2 de juguri, în special, pentru că această situație este des întîlnită în

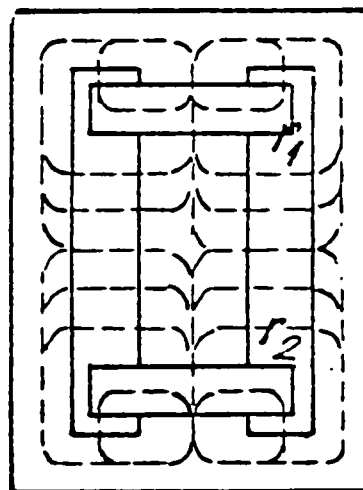


fig.17.

x) În cazul bobinelor subțiri, cum sînt cele din fig.4], cu care s-a obținut reprezentarea grafică din fig.16, x_0 este mic, practic 0.

soluțiile prezentate. În acest caz (fig.17) apar linii de forță care se închid între jug și coloana centrală (iară a mai trece prin coloanele laterale). Se produce deci o intensificare a câmpului de dispersie, deci o creștere mai accentuată a inductanței cu îndepărtarea bobinelor, în zonele apropiate de juguri. Caracteristica $L=f(x)$ urmează să se curbeze, la distanțe x , corespunzătoare acestor zone, Acest efect apare în curba ridicată experimental (fig.16).

Observație : Am menționat efectul de ecranare al tolelor miezului. Acest ^{va trebui} efect ^{sau} ^{sau cu distribuție radială a tolelor} este sensibil redus la unele construcții speciale spre ex. cea denumită "în evolventă". Rezultă că mărimea inductanței reactorului, va depinde nu numai de geometria și dimensiunile miezului, ci și de modul de construcție al acestuia.

3.1.3. Schema echivalentă a reactorului monofazat

Reactorul cu două bobine în opoziție, chiar în forma cea mai simplă, monofazat, în general nu este accesibil unei înțelegeri directe, intuitive. Pentru aceasta considerăm necesar să dăm o schemă echivalentă, chiar cu o anumită aproximație, care să definească aspectul fizic al acestui reactor.

Din analiza făcută a rezultat rolul miezului magnetic, în configurația fluxului de dispersie. Noțiunea de legare în serie sau în opoziție a două bobine este dependentă numai de fluxul principal. Considerând numai fluxurile de dispersie, sensul conectării nu mai are semnificație. Ca urmare schema echivalentă propusă este cea din fig.18, în care cele două bobine r_1 și r_2 conectate între ele

sînt situate fiecare pe cîte un miez magnetic deschis, la distanță una de alta, încît să nu existe cuplaj magnetic între ele.



Fig.18.

3.2. Reactorul trifazat

3.2.1. Reactorul cu miez simetric (fig.19).

Correspondența coloanelor A, B, C, reactoarele vor fi notate $\Gamma_A, \Gamma_B, \Gamma_C$, iar bobinole $\Gamma_{A1}, \Gamma_{A2}, \Gamma_{B1}, \Gamma_{B2}, \Gamma_{C1}, \Gamma_{C2}$

În același mod ca la 3.1.1. rezultă că fluxul principal este nul. Vom lua în considerare numai fluxurile de dispersie. Din relația 1, ținând seama și de fig.19 vom obține :

$$\begin{aligned} \Psi_{A\sigma} &= (L_{A1A1} - L_{A1A1}h + L_{A2A1} - L_{A2A1}h) i_A \\ &+ (L_{B1A1} - L_{B1A1}h + L_{B2A1} - L_{B2A1}h) i_B + (L_{C1A1} - L_{C1A1}h + L_{C2A1} - L_{C2A1}h) i_C \\ \Psi_{A2\sigma} &= (L_{A1A2} - L_{A1A2}h + L_{A2A2} - L_{A2A2}h) i_A \\ &+ (L_{B1A2} - L_{B1A2}h + L_{B2A2} - L_{B2A2}h) i_B + (L_{C1A2} - L_{C1A2}h + L_{C2A2} - L_{C2A2}h) i_C \end{aligned}$$

Analizând pozițiile bobinolelor în

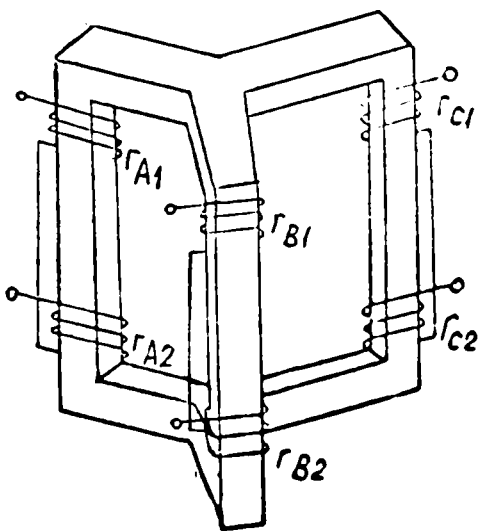


fig.19, rezultă că fluxul care în-
lănțuie bobinolele Γ_{A1} și Γ_{B2} , în-
lănțuie și bobinolele Γ_{A2} și Γ_{B1} .

Ca urmare vom putea scrie :

$$L_{B2A1} = L_{B2A1}h$$

În mod analog :

$$L_{C2A1} = L_{C2A1}h$$

$$L_{B1A2} = L_{B1A2}h \quad L_{C1A2} = L_{C1A2}h$$

Fig.19

simplificând și regrupând termenii rezultă :

$$\begin{aligned} \Psi_{A\sigma} &= \Psi_{A1\sigma} + \Psi_{A2\sigma} \\ &= (L_{A1A1} - L_{A1A1}h + L_{A2A2} - L_{A2A2}h + L_{A1A2} - L_{A1A2}h + L_{A2A1} - L_{A2A1}h) i_A \\ &+ (L_{B1A1} - L_{B1A1}h + L_{B2A2} - L_{B2A2}h) i_B + (L_{C1A1} - L_{C1A1}h + L_{C2A2} - L_{C2A2}h) i_C \end{aligned}$$

Notând :

$$L_{AA} = L_{A1A1} - L_{A1A1}h + L_{A2A2} - L_{A2A2}h + L_{A1A2} - L_{A1A2}h + L_{A2A1} - L_{A2A1}h$$

$$L_{BA} = L_{B1A1} - L_{B1A1}h + L_{B2A2} - L_{B2A2}h$$

$$L_{CA} = L_{C1A1} - L_{C1A1}h + L_{C2A2} - L_{C2A2}h$$

Rezultă :

$$\Psi_{A\sigma} = L_{AA} i_A + L_{BA} i_B + L_{CA} i_C$$

Tensiunea electromotoare, corespunzând fluxului de dispersie al reactorului fazei A va fi

$$e_A = - \frac{d\psi_{A\sigma}}{dt}$$

$$= - \left(L_{AA} \frac{di_A}{dt} + L_{BA} \frac{di_B}{dt} + L_{CA} \frac{di_C}{dt} \right)$$

$$= e_{AA} + e_{BA} + e_{CA}$$

In regim sinusoidal, vom avea

$$e_{AA} = E_{AA} \sin \omega t \quad e_{BA} = E_{BA} \sin(\omega t - 120^\circ)$$

$$e_{CA} = E_{CA} \sin(\omega t + 120^\circ)$$

Rezultă diagrama fazorială din fig.20.

In regim trifazat simetric rezultă diagrama fazorială din fig.21. Din analiza acestei diagrame obținem :

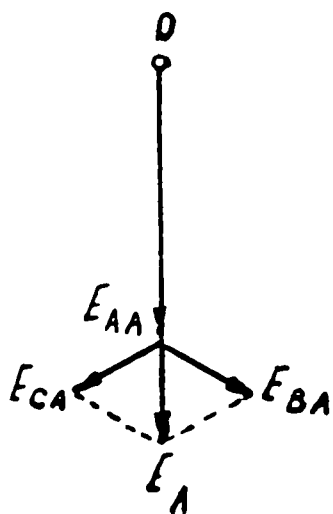


Fig.20

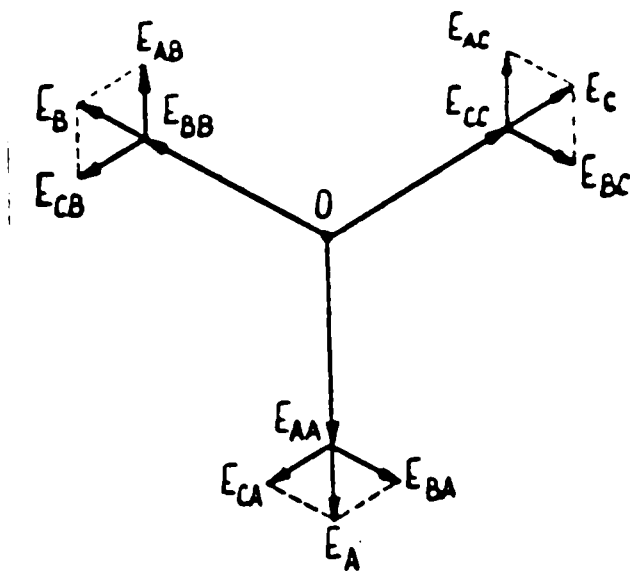


Fig.21

$$E_A = E_{AA} + \frac{E_{BA} + E_{CA}}{2}$$

$$E_B = E_{BB} + \frac{E_{AB} + E_{CB}}{2} \quad E_C = E_{CC} + \frac{E_{AC} + E_{BC}}{2}$$

Considerăm mărimea L_A , pe care o numim „inductanță echivalentă”, a reactorului P_A și care reprezintă inductanța pe care ar avea-o un alt reactor care fiind singur, deci fără reactoare pe fazele vecine, și fiind parcurs de curentul alternativ \bar{I}_A ar rezulta

o t.e.m. E_A • Vom putea scrie

$$E_A = L_A \omega I_A$$

Deoarece :

$$E_{AA} = L_{AA} \omega I_A \quad E_{BA} = L_{BA} \omega I_A \quad E_{CA} = L_{CA} \omega I_A$$

Vom avea :

$$L_A = L_{AA} + \frac{L_{BA} + L_{CA}}{2}$$

In mod analog pentru celelalte faze :

$$L_B = L_{BB} + \frac{L_{AB} + L_{CB}}{2} \quad (4)$$

$$L_C = L_{CC} + \frac{L_{AC} + L_{BC}}{2}$$

Prin urmare, inductanța echivalentă a unui reactor monofazat făcînd parte dintr-un reactor trifazat, este aceea a reactorului monofazat, considerat singur, la care se adaugă o cîtine datorată interacțiunii celorlalte faze.

3.2.2. Reactorul cu miez nesimetric

In cazul reactorului cu miez nesimetric (fig.22) pentru faza din mijloc (B) rezultă aceeași relație ca și pentru miezul simetric.

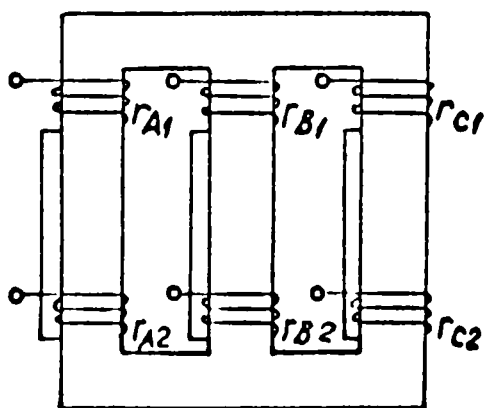


Fig.22

Pentru o fază laterală, spre ex. A, influența celeilalte faze laterale C este sensibil mai redusă decît a fazei B, ca urmare a îndepărtării. Din figura 22 rezultă :

$$L_{C/A1} = L_{C2A2} < L_{B1A1} = L_{B2A2}$$

Pe de altă parte teremenii:

$$L_{C/A1} = L_{C/A1} h \quad \text{și} \quad L_{C2A2} = L_{C2A2} h$$

sînt sensibili micșorați în raport cu cei echivalenți ai fazei B, și pentru motivul că diferența dintre fluxul total și cel principal care înlanțuie bobinele r_{A1} cu r_{C1} sau r_{A2} cu r_{C2} , este redusă,

ca urmare a creșterii traseului fluxului de dispersie care se închide prin aer - între aceste perechi de bobine. Ca urmare mărirea \overline{E}_{CA} , este sensibil redusă. Rezultă diagrama fazorială din fig.23. Pentru simplificare se poate neglija influența fazei C și unghiul care apare între \overline{E}_{AA} și \overline{E}_A . Rezultă relațiile

aproximative :

$$\begin{aligned} L_A &= L_{AA} + \frac{L_{BA}}{2} \\ L_C &= L_{CC} + \frac{L_{BC}}{2} \end{aligned} \quad (5)$$

Rezultă că în cazul

miezului considerat, inductan-

ța pe coloana centrală va fi

mărită, deoarece termenul

este mărit, față de termenii echivalenți de pe fazele laterale și în plus, termenul adițional este și el mărit.

3.2.3. Reactorul cu miez în 5 coloane

La ace sta (fig.24) expresiile inductanțelor sînt aceleași ca în cazul precedent (3.2.2.).

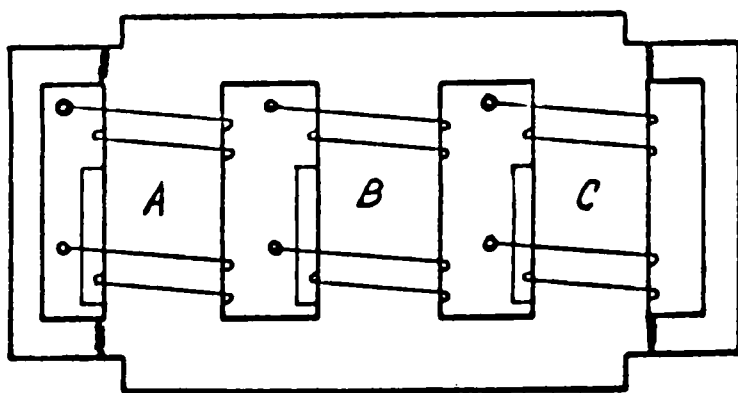


Fig.24

rare A și C, cu bobinaje, și coloanele laterale extreme

3.3. Interacțiunea între reactor și bobinajele

transformatorului

Înțelegem prin această interacțiune, înlănțuirea care dă

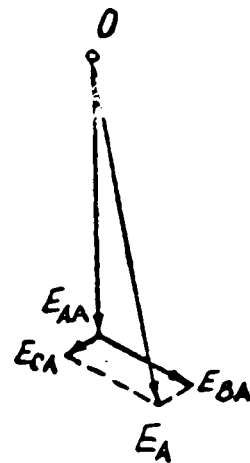


Fig.23

Se observă însă că inductanțele L_{AA} și L_{CC} , în condiții echivalente vor fi mai mari, ca la miezul nesimetric cu trei coloane și mai mari chiar decât L_{BB} . Aceasta ca urmare a micșorării distanței dintre coloanele late-

efecte sensibile între bobinele reactorului și cele ale transformatorului, prin fluxuri de dispersie. Efectul pe care-l avem în vedere este modificarea inductanței corespunzătoare reactorului. Am arătat la cap.2.3.2. cazurile în care inductanța, care apare în circuitul primar sau secundar al unui transformator, odată cu introducerea reactorului poate fi diferită de cea propriu zisă a reactorului. Apare deci o inductanță "echivalentă" a reactorului.

3.3.1. Bobinele reactorului și cele ale transformatorului pe coloane diferite.

Vom analiza în primul rând cazul din fig.25, care constituie o schemă simplificată a transformatorului de sudare din fig.7 (transformatorul cu reactorul unei singure coloane laterale). Reactorul constituit din bobinele 1 și 2 legate în opoziție este înseriat cu bobinajul secundar 4 al transformatorului. Considerând circuitul secundar - reactor în scurtcircuit, iar primarul 3 alimentat, vom putea scrie pentru fluxurile de dispersie din cele patru

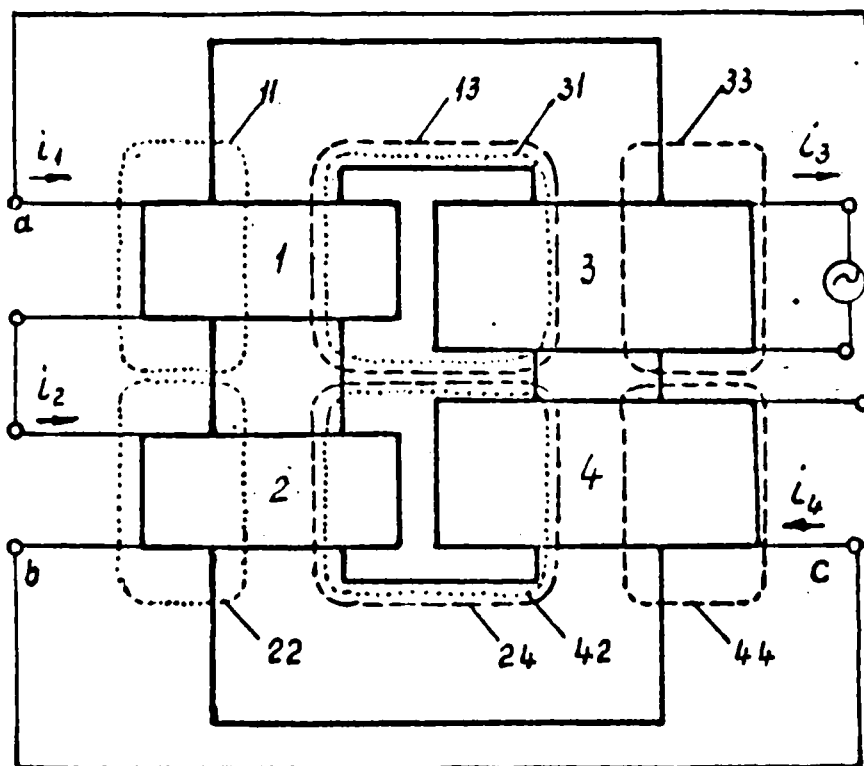


Fig.25

bobine :

$$\begin{aligned}
 \Psi_{1\sigma} &= (L_{11} - L_{11}h) i_1 + (L_{21} - L_{21}h) i_2 + (L_{31} - L_{31}h) i_3 + (L_{41} - L_{41}h) i_4 \\
 \Psi_{2\sigma} &= (L_{12} - L_{12}h) i_1 + (L_{22} - L_{22}h) i_2 + (L_{32} - L_{32}h) i_3 + (L_{42} - L_{42}h) i_4 \\
 \Psi_{3\sigma} &= (L_{13} - L_{13}h) i_1 + (L_{23} - L_{23}h) i_2 + (L_{33} - L_{33}h) i_3 + (L_{43} - L_{43}h) i_4 \\
 \Psi_{4\sigma} &= (L_{14} - L_{14}h) i_1 + (L_{24} - L_{24}h) i_2 + (L_{34} - L_{34}h) i_3 + (L_{44} - L_{44}h) i_4
 \end{aligned}$$

Tinând seama de poziția bobinelor, așa cum apare din fig.25, constatăm următoarele : Fluxul generat de bobina 4 în bobina 1, înălțuie în același timp și bobinele 2 și 3. Ca urmare :

$$L_{41} - L_{41}h = 0$$

In mod analog, vom putea scrie :

$$L_{14} - L_{14}h = 0 \quad L_{22} - L_{22}h = 0 \quad L_{23} - L_{23}h = 0$$

Tinând seama de schema de legături rezultă :

$$i_1 = i_2 = i_3 = i_4$$

Neglijând curentul de magnetizare, și pierderile, între mărimile lui i_3 , curentul din primar și i , cel din secundar, există relația :

$$i_3 = \frac{N_4}{N_3} i$$

unde N_3 și N_4 sînt respectiv numerele de spire din primarul și secundarul transformatorului.

Inductanța ($L_{13} - L_{13}h$) din bobina 3, poate fi transferată în bobina 4 (secundarul transformatorului) prin multiplicare cu coeficientul $\left(\frac{N_4}{N_3}\right)$, fără ca prin aceasta curentul de scurtcircuit al ansamblului transformator reactor să se schimbe.

Observăm că termenii :

$$(L_{33} - L_{33}h), (L_{43} - L_{43}h), (L_{44} - L_{44}h), (L_{34} - L_{34}h)$$

reprezintă inductanțele corespunzînd dispersiei între primar și secundar și deci existau și înainte de introducerea reactorului.

Ca urmare a acestor observații, fluxurile de dispersie care apar în bobinele reactorului și în bobinajele primar și secundar ale transformatorului datorită existenței reactorului vor fi :

$$\Psi_{1\sigma} = \left[(L_{11} - L_{11h}) + (L_{21} - L_{21h}) + (L_{31} - L_{31h}) \frac{N_4}{N_3} \right] i$$

$$\Psi_{2\sigma} = \left[(L_{12} - L_{12h}) + (L_{22} - L_{22h}) + (L_{42} - L_{42h}) \right] i$$

$$\Psi'_{4\sigma} = \left[(L_{24} - L_{24h}) + (L_{13} - L_{13h}) \frac{N_4}{N_3} \right] i$$

Vom considera fluxul :

$$\Psi_{\sigma} = \Psi_{1\sigma} + \Psi_{2\sigma} + \Psi_{3\sigma}$$

Se poate scrie :

$$L_p = \frac{\Psi_{\sigma}}{i} = L_{11} - L_{11h} + L_{21} - L_{21h} + (L_{31} - L_{31h}) \frac{N_4}{N_3} + L_{12} - L_{12h} + L_{22} - L_{22h} + L_{42} - L_{42h} + L_{24} - L_{24h} + (L_{13} - L_{13h}) \frac{N_4}{N_3}$$

Unde L_p este inductanța echivalentă a reactorului, deci inductanța unui reactor cu bobinaj și miez magnetic propriu, necuplat magnetic cu transformatorul și care introdus în circuitul secundar, ar conduce la același curent de scurtcircuit ca în cazul situației existente.

Termenii se pot grupa :

$$L_{11} - L_{11h} + L_{21} - L_{21h} + L_{12} - L_{12h} + L_{22} - L_{22h} = L_{da}$$

$$(L_{31} - L_{31h}) \frac{N_4}{N_3} + L_{42} - L_{42h} = L_{db}$$

$$L_{24} - L_{24h} + (L_{13} - L_{13h}) \frac{N_4}{N_3} = L_{dc}$$

și deci :

$$L_p = L_{da} + L_{db} + L_{dc} \quad (7)$$

inductanța ansamblului transformator-reactor va fi :

$$L_s = L_{ts} + L_p$$

unde L_{ts} este inductanța raportată la secundar a transformatorului propriu zis.

Inductanța reactor-transformator raportată la primar

va fi :

$$L_p = L_s \frac{N_3^2}{N_4^2}$$

Tinând seama de forma dreptunghiulară a ferestrei miezului magnetic din fig.25, cu înălțimea sensibil mai mare decât lățimea, se poate considera că fluxul generat de bobina 2, care înălțuie

bobina 1, înălțuie în cea mai mare parte și bobinele 3 și 4 și ca urmare se poate scrie :

$$L_{21} \approx L_{21} h$$

și în mod analog :

$$L_{12} = L_{12} h$$

rezultă:

$$L_{de} = L_{11} - L_{11} h + L_{22} - L_{22} h$$

Observăm că :

L_{da} = este inductanța reactorului constituit din bobinele 1 și 2, atunci când s-ar găsi singure pe miezul magnetic ;

L_{db} = reprezintă inductanța corespunzătoare reacției bobinajelor transformatorului în bobinele reactorului ;

L_{de} = reprezintă inductanța corespunzătoare reacției bobinelor reactorului în bobinele transformatorului.

3.3.1.1. Bobinele reactorului pe coloanele laterale ale unui miez în manta.

În cazul din fig.7, cu un miez magnetic tip manta, cu reactoare pe ambele coloane, există un cuplaj magnetic prin fluxurile de dispersie atât între bobinele reactoarelor și ale transformatorului, cât și între bobinele reactoarelor de pe coloane diferite. Remarcăm că acest cuplaj, atunci când reactoarele de pe cele 2 coloane sînt legate în serie, conduce la micșorarea efectului de reactor, prin apariția unor inductanțe negative. Acest cuplaj este însă relativ redus. O situație analoagă este cea de la cap. 3.2.2., dar apare diferența că aici, curenții din cele două reactoare sînt în fază. Pentru simplificare putem considera că reactoarele de pe cele două coloane funcționează independent. În acest caz vom avea :

$$L_p = L_{r1} + L_{r2}$$

unde L_p este inductanța echivalentă totală a unui reactor rezultat

din inserierea reactoarelor de pe coloanele laterale, a căror inductanță echivalentă este L_{r1} și L_{r2} .

3.3.2. Inductanța negativă

Am arătat în cap.2.3.2. că în legătura cu acest gen de reactor intervine noțiunea de "reactanță negativă" și deci de "inductanță negativă". Vom analiza în continuare sensul acestei noțiuni.

Dacă alimentăm sub tensiune constantă, în curent alternativ un reactor cu construcție proprie, uzuală, un reactor constituit din două bobine în opoziție pe un miez magnetic, sau un transformator cu două bobinaje, avînd un bobinaj în scurtcircuit, toate acestea se comportă ca un reactor cu inductanță pozitivă.

În cazul studiat există pe același miez magnetic un transformator și un reactor între bobinele cărora există un cuplaj magnetic. Fiecare din ele, transformatorul sau reactorul, luate în parte au inductanțe pozitive. În funcționare însă ca urmare a înlăturii fluxurilor de dispersie, este posibil ca fluxul de dispersie a fiecărei din ele să fie mărit sau micșorat.

Analizînd fig.25 (3.3.1-) observăm că în bobinele transformatorului în general, liniile de cîmp ale fluxului de dispersie propriu, au aceeași direcție cu cele ale fluxului de dispersie ale reactorului. Situația este aceeași și la reactor.

Astfel în bobina 3 linia 33 este paralelă cu 13, iar în bobina 4 este paralelă cu 24. În bobina 1, 11 este paralelă cu 31, iar în bobina 2, 22 este paralelă cu 42.

Liniile considerate dintr-o bobină, pot avea acelaș sens sau sens contrar. Din analiza fig.25, observăm că dacă într-o bobină liniile sînt de acelaș sens, atunci și în celelalte bobine vor avea acelaș sens. În caz contrar sînt de sensuri diferite în toate bobinele.

În cazul liniilor de acelaș sens fluxul bobinelor este mărit iar inductanțele L_{db} și L_{dc} , definite la 3.3.1, sînt pozitive. În cazul conrar devin negative. Rezultă că L_{db} și L_{dc} sînt de acelaș semn. Semnul pozitiv sau negativ depind de sensul legăturilor. Astfel în fig.25, dacă se conectează punctul c cu b rezultă un semn, iar dacă se conectează c cu a, rezultă celălalt.

Considerăm suma:

$$L'_r = L_{db} + L_{dc}$$

Este posibil ca $L'_r > L_{da}$ și rimea/aranjamentul bobinelor. Aceasta depinde de mărimea/aranjamentul bobinelor. L_{da} este prin definiție pozitiv.

În acest caz, dacă L'_r este negativ, conform relației (7) va fi negativă și inductanța echivalentă L_r , a reactorului.

Inductanța totală (definită la 3.3.1) rămasă în circuit :

$$L_s \text{ sau } L_p$$

este întotdeauna pozitivă.

Inductanța negativă nu poate fi izolată. Nu putem avea un circuit, cu două borne, avînd numai bobinaje și miezuri magnetice, la care aplicînd o tensiune de la o sursă necuplată magnetic cu circuitul, acesta să se comporte ca o capacitate.

Noțiunea de "inductanță negativă" este întîlnită și în calculul reactanțelor la transformatoarele cu trei înrășurări. [5] Nu am întîlnit un reactor, cu funcție și construcție determinată, cum este cel analizat, cu inductanță negativă.

3.3.3. Bobinele transformatorului și reactorului pe aceeași coloană magnetică

Si în acest caz (fig.26) pornind de la relația (1) se pot scrie relațiile (6) care conduc la :

$$L_p = L_{tp} + L_{da} + L_{db} + L_{dc}$$

unde L_{tp} = inductanța raportată la primar a transformatorului propriu zis,

de data aceasta mărimile fiind raportate la primarul transformatorului. Remarcăm că, dată fiind poziția bobinelor, cuplajul prin fluxurile de dispersie între bobinele reactorului și cele ale transformatorului va fi mai strâns, și ca urmare, inductanța echivalentă a reactorului va fi mărită față de cazul precedent. Am avut în vedere un anumit sens de legătură, acela care apare în figură, deoarece și în acest caz pot apare inductanțe pozitive și negative.

Vom stabili și o echivalență, cu

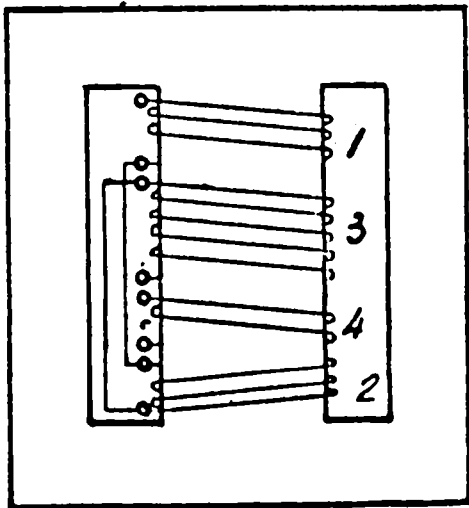


Fig.26

o situație cunoscută, care va constitui premiza unei înțelegeri intuitive a funcționării acestui reactor precum și a unui calcul mai ușor de efectuat.

Inlocuim bobina 2, printr-o bobină 2', cu aceleași dimensiuni, dar cu număr de spire :

$$N_2' = N_2 \frac{N_4}{N_3}$$

și cu secțiunea conductorului mărită în raportul $\frac{N_3}{N_4}$.

Refacem schema cu cele patru bobine, ca în fig.27, unde bobina 1 se leagă în serie cu primarul 3, iar 2' în serie cu secundarul 4 al transformatorului. A rezultat un transformator cu același raport de transformare ca cel precedent, dar cu număr mărit de spire, și fără reactor.

Inductanța de dispersie raportată la primar L'_{tp} a acestui transformator este aceeași cu inductanța echivalentă L_p a ansamblului reactor-transformator din fig.26. Într-adevăr, scriind relațiile (6), pentru fluxurile în cele patru bobine, constatăm că valorile pentru $\Psi_{1\sigma}, \Psi_{3\sigma}, \Psi_{4\sigma}$ nu s-au schimbat, față de cele obținute, pornind de la schema din fig.26, deoarece fluxurile prin aceste bobine provenite de la bobina 2', sînt aceleași ca cele provenite de la 2, întrucît :

$$N_2' i_2 = N_2 i_p$$

unde : $i_3 = i_4 = i_2' =$ curentul în secundar

$i_p = i_3 = i_4 =$ curentul în primar.

Aceasta rezultă, înlocuind pe N_2' prin $N_2 \frac{N_4}{N_3}$
și pe i_3 prin : $i_p \frac{N_4}{N_3}$

În ceea ce privește fluxul prin bobina 2', acesta devine :

$$\Psi_{2\sigma}' = (L_{12}' - L_{12}h) i_1 + (L_{22}' - L_{22}h) i_2' + (L_{32}' - L_{32}h) i_3 + (L_{42}' - L_{42}h) i_4$$

Se observă că acest flux este micșorat față de $\Psi_{2\sigma}$
în raportul :

$$\frac{\Psi_{2\sigma}'}{\Psi_{2\sigma}} = \frac{N_2'}{N_2} = \frac{N_4}{N_3}$$

Acesta este însă chiar raportul de transfer al unui flux din primar în secundar, în condiția menținerii constante a inductanței totale raportată fie la primar, fie la secundar.

Ca urmare, rezultă egalitatea :

$$L_{tp}' = L_p \quad (8)$$

Rezultă deci că același efect de reactor poate fi obținut fie cu o schemă ca în fig.26, fie cu alta ca în fig.27. S-au neglijat curenții de magnetizare . În ambele cazuri greutatea și volumul bobinajelor, deci și a miezului magnetic rămân aceleași.

În afară de cuplarea magnetică o deosebită importanță o are și modul de dispunere a bobinelor pe lungimea coloanei magnetice, cu 1 și 2 la capete, și 3 și 4 la mijloc. Se remarcă că odată cu introducerea în circuit

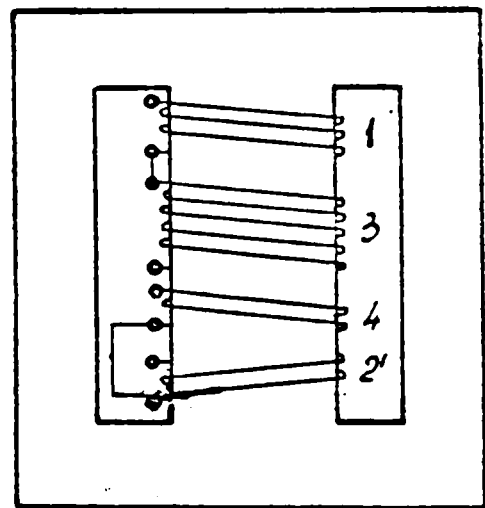


Fig.27

a reactorului (fig.26) se produce și o îndepărtare a centrelor celor două ansambluri de bobine, 1 și 3 pe deoparte și 2 și 4 pe de alta. Ca urmare efectul de reactor se produce ca la un transformator la care bobinele primare și secundare și-ar mări numărul de spire și simultan s-ar îndepărta. Rezultă o extindere

a reglajului, pentru un număr de spire dat în reactor, în comparație cu soluția în care bobinele reactorului ar fi bobinate peste cele ale transformatorului.

Soluția cu schimbarea la un transformator de sudare a inductanței, prin schimbarea numărului de spire, cu menținerea constantă a raportului de transformare este cunoscută în general.

La soluția cu reactor apar unele aspecte specifice avantajoase :

- Reglarea curentului în mai multe trepte, la un transformator, conduce la schimbarea conexiunilor atât în primar cât și în secundar, deci la două comutatoare. Cel din secundar, este mai voluminos, ca urmare a curenților mai mari din secundar. În cazul soluției cu reactor, este necesar un singur comutator, ca în fig.9.

- La redresoarele în montaj trifazat cu 3 diode și punct neutru, în bobinajul secundar apare o componentă de curent continuu, ceea ce conduce la necesitatea supradimensionării conductorilor. În cazul în care s-ar folosi soluția clasică (fig.27) cu reglarea curentului, prin introducerea de spire în primar și secundar, această supradimensionare s-ar extinde și asupra spirelor introduse în secundar. În soluția prezentată cu reactorul în circuitul primar, în spirele de reglaj, nu mai există componenta de c.c., rezultă o dimensionare mai redusă.

Ca urmare a celor stabilite în capitolul precedent, inductanța echivalentă a reactorului se poate deduce din relația :

$$L_r = L_{tA} - L_{tB}$$

unde L_{tA} și L_{tB} , reprezintă inductanțele (raportate la primar sau la secundar, după cum reactorul este conectat în circuitul primar sau secundar) a două transformatoare, constituite, cel din fig.27 din bobinele 1,2,3,4, iar cel din fig.26, din bobinele 3 și 4. Calculul inductanței reactorului se reduce deci la calculul inductanței a două transformatoare, ceea ce se poate considera că se apropie de domeniul clasic.

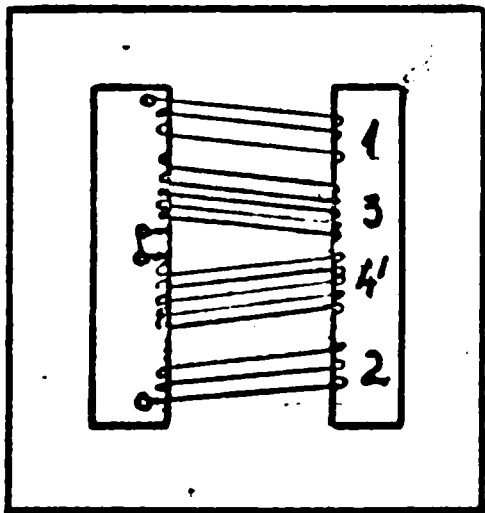


Fig.28

ansamblul reactor transformator din fig. 26, poate fi echivalent, dacă se neglijează curentul de magnetizare și ca un reactor (fig.28) cu două bobine în opoziție, în care o bobină este constituită din bobinole 1 și 3 legate în serie, iar cealaltă din bobina 2 legată în serie cu 4', care are numărul de spire :

$$N_4' = N_4 \frac{N_3}{N_4} = N_3$$

Demonstrația este analogă cu precedenta de la stabilirea echivalenței între ansamblul transformator-reactor și un transformator.

3.3.4. Transformatoarele cu reactoare, trifazate

Schema unui astfel de transformator apare în fig.8. În acest caz mai intervin și cuplajul prin fluxuri de dispersie între bobinole de pe taze și coloane magnetice diferite. Considerând echivalența din fig.28, în cazul trifazat apar trei reactoare formate din bobine în opoziție situate pe un miez magnetic trifazat. Rezultă situația care a fost analizată la cap.3.2.

Se pot scrie aceleași relații finale. Pentru miezul magnetic simetric vor avea :

$$L_{rA} = L_{rAA} + \frac{L_{rBA} + L_{rCA}}{2} \quad L_{rB} = L_{rBB} + \frac{L_{rAB} + L_{rCB}}{2} \quad L_{rC} = L_{rCC} + \frac{L_{rAC} + L_{rBC}}{2}$$

unde : L_{rA}, L_{rB}, L_{rC} sînt inductanțele echivalente ale reactorilor pe fazele A, B, C.

iar pentru cel nesimetric :

$$L_{rA} = L_{rAA} + \frac{L_{rBA}}{2} \quad L_{rB} = L_{rBB} + \frac{L_{rAB} + L_{rCB}}{2} \quad L_{rC} = L_{rCC} + \frac{L_{rBC}}{2}$$

Menționăm că la acest reactor, creșterea inductanțelor echivalente, ca urmare a interacțiunii cu celelalte faze este mai redusă, ca urmare a distanței mai mici, între bobinole care consti-

tuiesc reactorul unei faze.

3.4. Efecte secundare ale interacțiunii între bobinele reactorului, bobinajele transformatorului și piesele metalice alăturate.

3.4.1. Curenți de circulație în bobinaje

3.4.1.1. Curent de circulație în bobinajele reactorului

Vom considera cazul reactorului folosit la reglajul sub sarcină, într-o funcționare de regim. Bobinajele transformatorului sînt cilindri concentrici, de înălțime practic egală. În acest caz reacția este negliabilă. Vom analiza reacția care poate apărea din cauza nesimetriei bobinajului de reglaj.

Bobinajul de reglaj, care în general se întinde pe aproape toată înălțimea bobinajului de I.T (și J.T) este constituit din secțiuni (fig.4). Prin eliminarea din circuit, a unor secțiuni la diverse prize, apar disimetrii față de un plan median care trece pe la mijlocul înălțimii transformatorului. În acest caz se produce o circulație de curent în interiorul reactorului, chiar în cazul cînd ambele cursoare ale comutatorului se găsesc pe aceeași priză, care se suprapune peste curenții de sarcină din cele două bobine.

Vom analiza în continuare acest aspect : Cele două bobine r_1 și r_2 cu număr egal de spire, și în opoziție, au t.e.m. induse de fluxul principal, egale și de sens contrar, și deci se anulează reciproc, aceasta, oricare ar fi poziția celor două bobine.

T.e.m. induse de fluxurile de dispersie corespunzătoare bobinajelor transformatorului în fiecare din cele două bobine sînt :

$$e_{r_1} = - \frac{d\psi_{1\sigma}}{dt} = - \left[L_{p_1} - L_{p_1 h} + \frac{N_1}{N_2} (L_{s_1} - L_{s_1 h}) \right] \frac{di_p}{dt}$$
$$e_{r_2} = - \frac{d\psi_{2\sigma}}{dt} = - \left[L_{p_2} - L_{p_2 h} + \frac{N_1}{N_2} (L_{s_2} - L_{s_2 h}) \right] \frac{di_p}{dt} \quad (9)$$

indicii p și s indicând respectiv primarul și secundarul transformatorului.

În general aceste t.e.m. sînt de sens contrar. Ca să fie egale ca mărime, și deci să se anuleze, este necesar ca întregul bobinaj (inclusiv r_1 și r_2) să fie simetric față de planul median (partea inferioară fiind imaginea celei superioare). Bobinele r_1 și r_2 sînt simetrice prin plasarea lor față de acest plan. Pentru îndeplinirea condiției, este necesar, ca și bobinajele secundar și primar să fie simetrice cu acest plan. La un bobinaj de înaltă tensiune, cu bobinajul de reglaj ca în fig.4, cu excepția unei prize, condiția nu este îndeplinită. Ca urmare :

$$L_{p1} - L_{p1h} \neq L_{p2} - L_{p2h}$$

(Am considerat reglajul pe primar)

Apare o t.e.m. :

$$e = e_{r1} - e_{r2} \quad (10)$$

, care determină un curent de circulație, al cărui efect direct este o creștere a pierderilor . Acest curent apărut ca efect al unei nesimetrii a fluxului de dispersie față de planul median, va conduce la atenuarea cauzei care-l produce deci la atenuarea acestei nesimetrii. După cum se știe, în general asimetria este cauza unor eforturi axiale [29] ca urmare, curentul de circulație va atenua aceste eforturi.

Pentru înlăturarea curentului de circulație sau atenuarea lui, se folosesc bobinaje de reglaj simetrice sau speciale care introduc asimetrii mici, cum este cel din fig.5.

3.4 .1.2. Curent de circulație în secundarul transformatorului

La unele transformatoare, la care curentul secundar este mare, se folosesc multe bobine în paralel, suprapuse pe înălțime (fig.29) (1-bobinaj primar, 2-bobinaj secundar), În cazul existenței

reactorului, configurația fluxului produs de bobinele acestuia este în general, ca în fig.12. Acest flux, va induce t.e.m. care la bobinele secundare situate deoparte a planului median M, se adaugă la t.e.m. a fluxului principal, iar la bobinele situate de cealaltă parte, se scade. Pentru două bobine simetrice față de acest plan, se va putea scrie :

$$e = -2k \frac{N_s}{N_r} \frac{d\psi_{r\sigma}}{dt} \quad (11)$$

unde :

e = suma celor două t.e.m.

N_s = numărul de spire la o bobină secundară

N_r = numărul de spire la o bobină r_1 sau r_2

$\psi_{r\sigma}$ = fluxul de dispersie al unei bobine r_1 sau r_2

$k < 1$, crește cu distanța față de planul median.

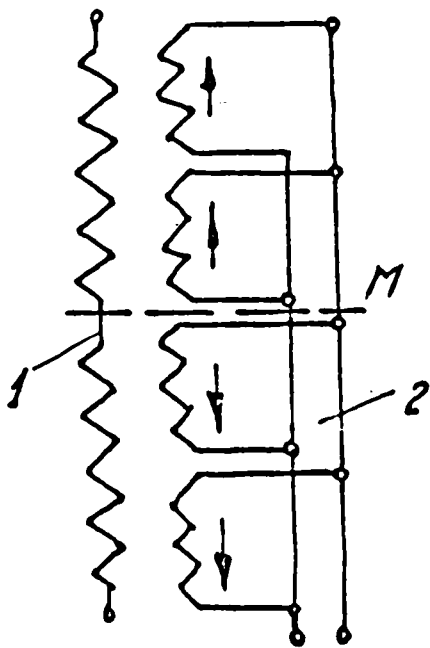


Fig. 29.

3.4.2. Pierderi suplimentare

3.4.2.1. Pierderi suplimentare în bobinaje

Existența reactorului cu două bobine situate la capetele unei coloane magnetice, conduce la un flux, cu o configurație în general ca în fig.12. Ținând seama de cele arătate la cap.3.1.2. se poate admite că

Apar deci curenți de circulație, între bobinele în paralel, care pe de o parte măresc pierderile și pe de altă parte micșorează reacțanța reactorului. Pentru înlăturarea acestor curenți se poate folosi bobinajul din fig.30, la care, fiecare bobină este constituită din două jumătăți simetrice, în raport cu planul median.

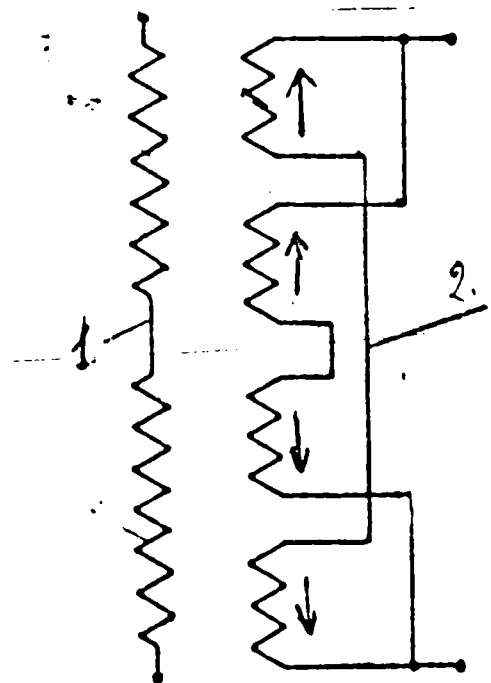


Fig.30

variația cîmpului de inducție magnetică de-a lungul unei drepte apropiate de coloană, și paralelă cu aceasta, corespunde fig.31. În intervalul dintre cele două bobine ale reactorului corespunzînd

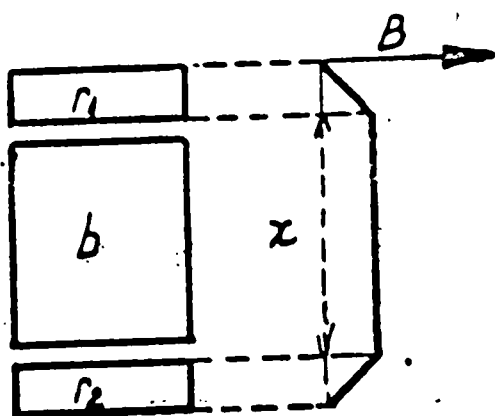


Fig.31

distanței x , deci unde B este maxim și constant, sînt situate în mod uzual, bobinele b ale transformatorului. Ca urmare vor apărea pierderi suplimentare atît în conductorii reactorului, cît și mai ales în cei ai transformatorului, precum și în piesele metalice.

Odată mărimea B stabilită, calculul pierderilor se face prin relații cunoscute în electrotehnică, în special de la calculul pierderilor la bobinajele alternate de transformatoare [4, 29, 30].

3.4.2.2. Efectele pierderilor suplimentare.

Efectele pierderilor suplimentare sînt bine cunoscute ; se micșorează randamentul iar răcirea devine mai dificilă. În cazul lucrării de față, apare însă un aspect nou.

Considerăm reactorul din fig.3 utilizat la reglajul sub sarcină al transformatoarelor. Se poate considera că pierderile suplimentare produse de fluxul de dispersie al acestui reactor, în perioada în care capetele lui se găsesc pe două prize diferite ale bobinajului de reglaj, sînt echivalente cu pierderile într-o sarcină în secundarul unui transformator, al cărui primar ar fi constituit de reactor. Ca urmare, circuitul reactorului este echivalent cu circuitul din fig.32 în care L_w este reactanța, R rezistența reactorului, iar R_s rezistența introdusă ca

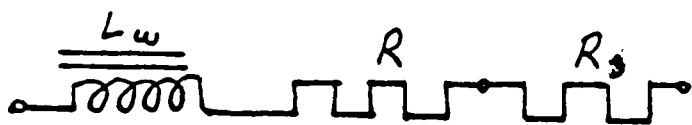


Fig.32

urmare a pierderilor suplimentare.

Introducerea acestei rezistențe îmbunătățește comutația la trecerea de pe o treaptă pe alta în conformi-

tate cu cele cunoscute cu privire la întreruperea unui circuit cu inductanță și rezistență, în curent alternativ. [26]

Pe de altă parte aceste pierderi suplimentare sînt neglijabile sub aspect energetic întrucît apar pe perioade de timp foarte scurte, în timpul trecerii de pe o treaptă de reglaj pe alta.

3.5. Suprapunerea fluxurilor în miezul magnetic.

Vom analiza cazurile caracteristice.

3.5.1. Reactorul propriu zis

După cum a reșit din analiza acestui reactor (fig.12) o bună parte a liniilor de forță, de dispersie, trec prin miezul magnetic. Crescînd tensiunea aplicată la borne, inducția în miez poate atinge valori, corespunzînd zonei de saturație. Vom considera că starea de saturație se manifestă la reactor, atunci cînd se observă o micșorare a inductanței.

Saturarea miezului magnetic la reactoare este un efect cunoscut. Avînd în vedere că în circuitul magnetic există un întrefier (care nu se saturează) apariția efectului este mai puțin netă decît la ridicarea curbei de magnetizare a tablei electrotehnice. Saturarea miezului conduce la mărirea reluctanței porțiunilor de circuit magnetic prin miez, și ca urmare și la o nouă configurație a liniilor de forță. Ca efect în ansamblu inductanța se micșorează. La limită, reactorul va fi echivalent cu cel constituit din cele două bobine, în aer (fără miez).

Efectele saturației sînt în general negative.

Reactorul din fig.12 este echivalent cu un reactor cu întrefier mare. Ca urmare, apariția efectului de saturație va fi atenuată. O imagine asupra acestui efect o putem avea din curba $U=f(I)$ reprezentată la cap. 4.4.1.

3.5.2. Reactorul situat pe miezul magnetic al unui transformator

Analiza acestui caz prezintă un interes mai mare, deoarece corespunde situației reale de utilizare a reactorului. Vom lua în considerare câteva aspecte caracteristice.

3.5.2.1. Bobinajele primar și secundar ale transformatorului sînt cilindri concentrici de înălțime egală (fig.33).

În această situație se poate neglija acțiunea fluxului de dispersie al transformatorului asupra miezului magnetic rămînînd fluxul principal al transformatorului și fluxul de dispersie al reactorului.

Aspectul general al liniilor de inducție B_h și B_r corespunzătoare fluxurilor menționate, ca și sensul acestora la

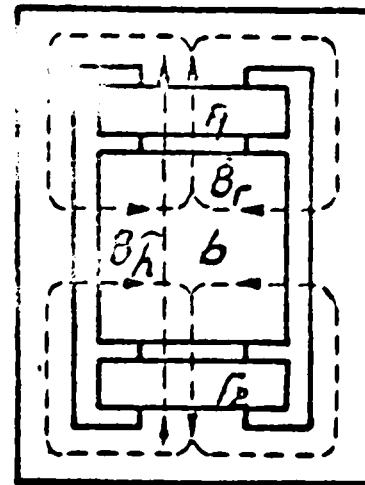


Fig.33

un moment dat, apare în figură. Se remarcă că în unele puncte va trebui să apară o inducție rezultantă mărită, iar în alta micșorată, ca urmare a faptului că liniile au acelaș sens, sau sensuri contrarii. Pentru a aprecia efectul saturației, va trebui să considerăm valorile maxime, ale inducției rezultante. Presupunem în prima aproximație, că într-un punct al miezului magnetic $B_h(\tau)$ și $B_r(\tau)$ sînt funcții sinusoidale și independente de saturarea miezului magnetic. Aceasta se justifică ținînd seama că B_h este determinat în mare măsură de tensiunea de alimentare U , a transformatorului, iar liniile de cîmp ale reactorului se închid în mare măsură prin aer. Într-un anumit punct se va putea scrie relația generală, pentru inducția rezultantă :

$$\overline{B}_e = \overline{B}_h + \overline{B}_r \quad (12)$$

Vom considera următoarele cazuri :

3.5.2.1.1. Reactorul și transformatorul alimentate separat.

Aceasta constituie cazul cel mai general. Primarul p al transformatorului și reactorul sînt alimentate respectiv la sursele S_1 și S_2 (fig.34), sincrone și defazate.

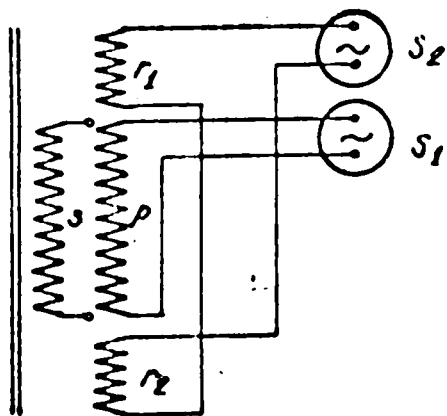
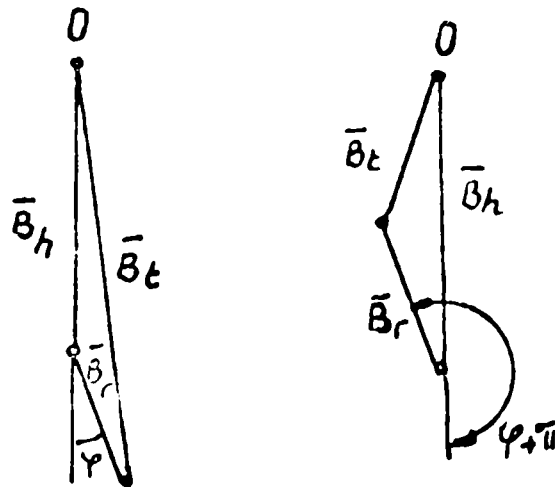


Fig.34



a

Fig.35

b

Rezultă diagramele fazorice din fig.35

Varianta a corespunde unui punct din zona în care rezultă o inducție B_t mărită, iar b, punctului simetric din zona cu inducție B_t micșorată. Unghiul φ și $\varphi + \pi$ reprezintă diferența de fază, dintre curentul de magnetizare al transformatorului și cel din reactor. În cazul în care φ este apropiat de $\frac{\pi}{2}$ poate rezulta creșterea inducției, atât în punctele din zona reactorului r_1 cât și în cele din zona reactorului r_2 .

3.5.2.1.2. Reactorul și transformatorul alimentate de la aceeași sursă (fig.36).

În acest caz unghiul de defazare φ_r între tensiunea de alimentare U_1 și curentul din reactor, va fi dat de relația :

$$\cos \varphi_r = \frac{R_t}{\sqrt{R_t^2 + L_r \omega^2}} \quad R_t = R + R_s$$

unde R_t reprezintă rezistența reactorului, incluzînd și componenta corespunzătoare pierderilor, conform celor arătate la 3.4.2. În general unghiul de defazare între tensiunea U și curentul de magnetizare al transformatorului fiind practic $\frac{\pi}{2}$ se poate scrie relația :

$$\varphi = \frac{\pi}{2} - \varphi_r$$

Un aspect particular al alimentării de la aceeași sursă

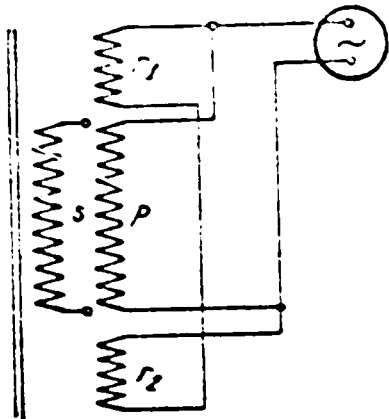


Fig.36

fi constituie transformatorul cu reglaj sub sarcină, cu limitarea curentului de circulație prin reactor, ca în fig.3. Aici porțiunea între două prize ale bobinajului de reglaj, situat în primar, alimentează reactorul în timpul schimbării unei trepte. Față de sarcina constituită de reactor, primarul transformatorului funcționează ca bobinaj de auto-

transformator. Pentru determinarea unghiului φ considerăm diagrama din fig.37. Notăm cu U_r tensiunea între două prize alăturate, în situația fără curent de circulație în reactor. Asimilăm bobinajul primar în funcționarea ca autotransformator, cu o sursă cu t.e.m. U_r și cu o impedanță Z_0 .

Unghiul de defazare între \bar{U}_r și \bar{I}_r , curentul în reactor, va fi dat de relația :

$$(13) \quad \cos \varphi_r = \frac{R_t + R_0}{\sqrt{(L_r + L_0)^2 \omega^2 + (R_t + R_0)^2}}$$

unde : R_0 și L_0 sînt respectiv rezistența și inductanța sursei.

Din diagramă rezultă unghiul φ .

În cazul în care R_0 și L_0 sînt neglijabile față de R_t și L_r iar U_1 este practic în fază cu \bar{U}_{e1} , rezultă :

$$\cos \varphi_r = \frac{R_t}{\sqrt{L_r^2 \omega^2 + R_t^2}} \quad \varphi = \frac{\pi}{2} - \varphi_r$$

Deci rezultă aceeași re-

lație ca în cazul precedent.

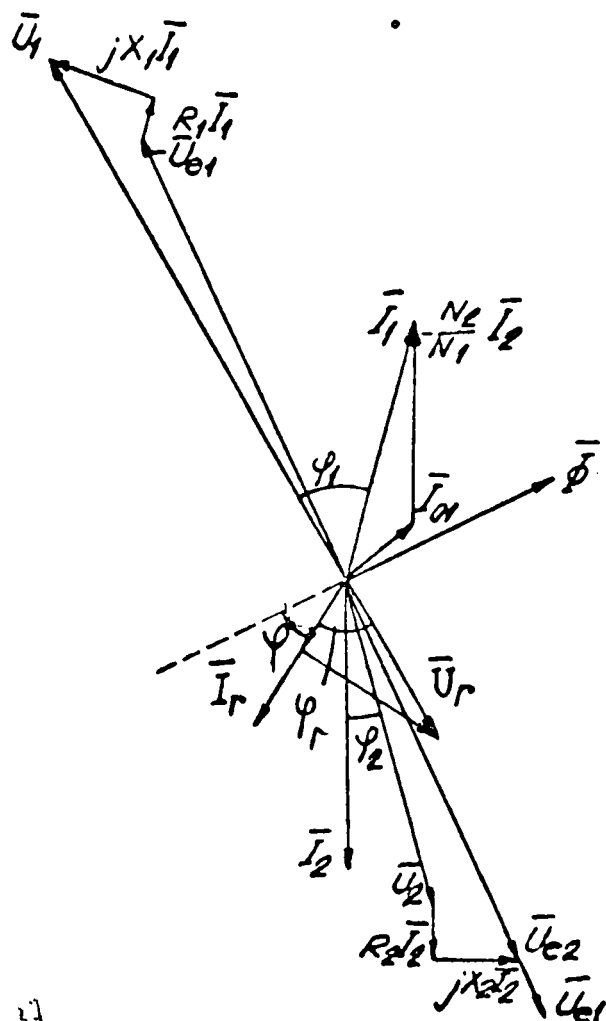


Fig.37

În toate cazurile considerate, ca urmare a suprapunerii fluxurilor în zona în care inducția rezultantă crește (fig.35 a) poate să apară sau să fie accentuată saturația miezului magnetic. Ca urmare se vor modifica B_h, B_p, B_r . Efectele saturației într-o zonă nu sînt compensate de micșorarea inducției în cealaltă (fig. 35 b). Ca urmare inductanța reactorului va scădea.

De asemenea, va crește curentul de magnetizare în bobinajul primar al transformatorului.

Rezultatele experimentale confirmă cele arătate aici și dau unele indicații cantitative.

3.5.2.1.3. Reactorul în serie cu secundarul transformatorului.

Acest caz, poate fi asimilat cu cel precedent, ținîndu-se însă seama, că curentul prin reactor depinde atît ca mărime, cît și ca diferență de fază față de tensiunea de alimentare și de caracteristicile sarcinii exterioare. Acest caz, fiind mai puțin avantajos în aplicații, decît cel care urmează, ne vom mărgini la aceste indicații.

3.5.2.1.4. Reactorul în serie cu primarul transformatorului (fig.38).

În acest caz intervin următoarele elemente specifice.

Curentul în reactor este același cu I_1 , curentul primarului, cu care este în serie. Tensiunea aplicată primarului U_1' este mai mică decît U_1 , tensiunea de alimentare, întrucît intervine căderea de tensiune U_r prin reactor. Din punct de vedere al funcționării situația este echivalentă cu a unui transformator alimentat la tensiunea U_1 la a cărui rezistență proprie R_1 , raportată la primar se adaugă rezistența R_r a reactorului, și la a cărui inductanță

de dispersie proprie raportată la primar $L_{1\sigma}$, se adaugă inductanța L_r a reactorului. Se va putea scrie pentru transformator relația :

$$\bar{U}_1 = Z_1' \bar{I}_1 - \bar{U}_{e1} \quad (14)$$

unde :

$$Z_1' = R_1 + R_c + j X_1' \quad X_1' = \omega(L_{1\sigma} + L_r) = X_1 + X_r \quad \text{Fig.38}$$

Ca urmare se obține diagrama fazorială din fig.39.

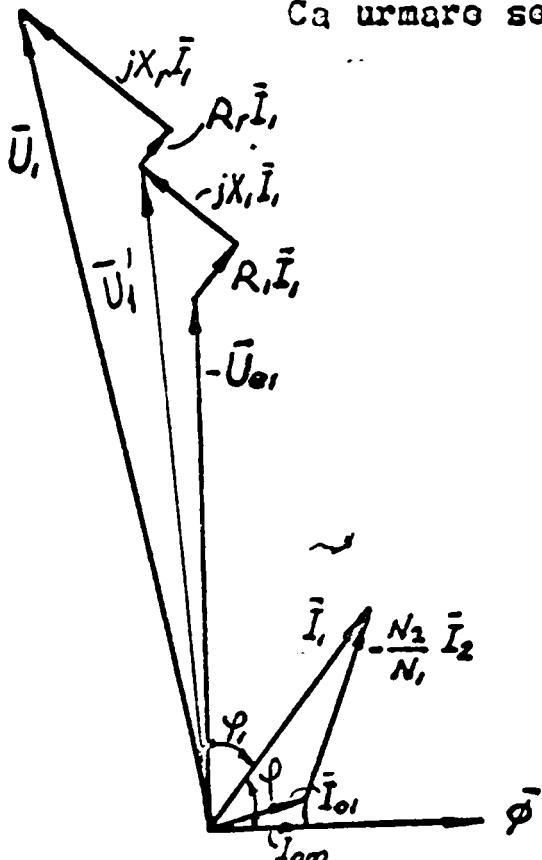


Fig.39

Se observă că va scădea U_{e1} față de alimentarea directă la tensiunea U_1 , cum era în cazul de la 3.5.2.1.3. Ca urmare va scădea și inducția B_L , corespunzătoare fluxului principal. În ceea ce privește unghiul de defazare φ , între \bar{B}_r și \bar{B}_L , același cu unghiul dintre curenții \bar{I}_1 și cel de magnetizare $\bar{I}_{\phi m}$, acesta rezultă din diagramă.

Considerând același efect de reactor se poate transfera reactorul în secundar cu o inductivitate redusă în raportul $\left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$. Acesta va ocupa același spațiu, dar va avea numărul de spire redus în raportul $\frac{N_1}{N_2}$ și va fi parcurs de un curent amplificat în același raport (curentul secundar). Ca urmare va avea același număr de amperi-spire. Rezultă aceeași valoare pentru B_r și pentru φ .

Comparând situația reactorului în primar cu aceea a reactorului echivalent în secundar, rezultă deci o valoare micșorată pentru B_L și aceeași valoare pentru B_r . Ca urmare B_L va fi micșorat. Aceasta constituie un avantaj al situării reactorului în primar.

Din cele de mai sus a reeșit că pe deoparte introduce-

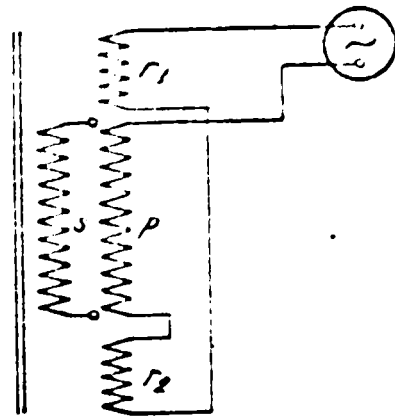


Fig.38

rea reactorului contribuie la micșorarea fluxului principal, iar pe de altă parte introduce un flux suplimentar în miezul magnetic. Aceste acțiuni contrarii, au o rezultată pe care o analizăm în continuare.

Vom urmări variația mărimii B_T când se mărește sarcina transformatorului.

Pentru aceasta vom considera cazurile limită : mersul în gol și mersul în scurt circuit.

Pentru $I_2 = 0$ (mers în gol) neglijând pe I_0

vom avea :

$$U_r' = 0 \quad U_1 = U_1' \quad B_T = B_0 \quad \varphi \approx 0$$

La scurtcircuit considerînd în primă aproximație, că toate liniile de forță ale reactorului trec prin miez și înlănțuie toate spirele reactorului (fig.35) vom putea scrie :

$$B_r = k \frac{U_r'}{N_r}$$

unde N_r = numărul de spire al reactorului

De asemenea, pentru transformator se va putea scrie, neglijînd căderea de tensiune datorită impedanței primarului :

$$B_h = k \frac{U_1'}{N_1} \quad U_1' = U_1 - U_r'$$

unde :

N_1 = numărul de spire în primarul transformatorului.

Înlocuind, obținem :

$$B_h = k \left(\frac{U_1}{N_1} - \frac{U_r'}{N_1} \right)$$

deoarece : $B_0 = k \frac{U_1}{N_r}$ și înlocuind pe U_r' , obținem

de unde : $B_h = B_0 - B_r \frac{N_r}{N_1}$

$$B_T = B_h + B_r = B_0 + B_r \left(1 - \frac{N_r}{N_1} \right) \quad (15)$$

rezultă deci că atunci când $N_1 > N_r$, în zona de concentrare a cîmpului, inducția B_T crește cu încărcarea transformatorului. Pentru $N_r > N_1$ încărcarea transformatorului, conduce la micșorarea mărimii B_T .

În realitate o parte a liniilor de forță ale reactorului nu trec prin miez, ceea ce are ca urmare o atenuare a concentrării câmpului, față de situația care rezultă din relația stabilită.

3.5.2.1.5. Reactoare trifazate

În cazul reactoarelor trifazate ca urmare a interacțiunii între reactoarele de pe faze diferite se produce o creștere a fluxului unei faze a reactorului, așa cum a rezultat la cap.3.2. iar ca urmare o creștere corespunzătoare pentru β_r .

3.5.2.1.6. Schema avînd pe fiecare coloană, reactorul unei faze diferite.

O astrel de schemă este dată în fig.40. În serie cu bobinajul primar al fiecărei faze, se conectează un reactor, situat pe altă coloană. Ansamblurile reactor-bobinaj primar monofazate, se conectează în triunghi. Pentru fiecare fază, se pot scrie aceleași relații, și se poate obține aceeași diagramă fazorială ca la cap.

3.5.2.1.4. Remarcăm însă că diagrama din fig.35 se modifică,

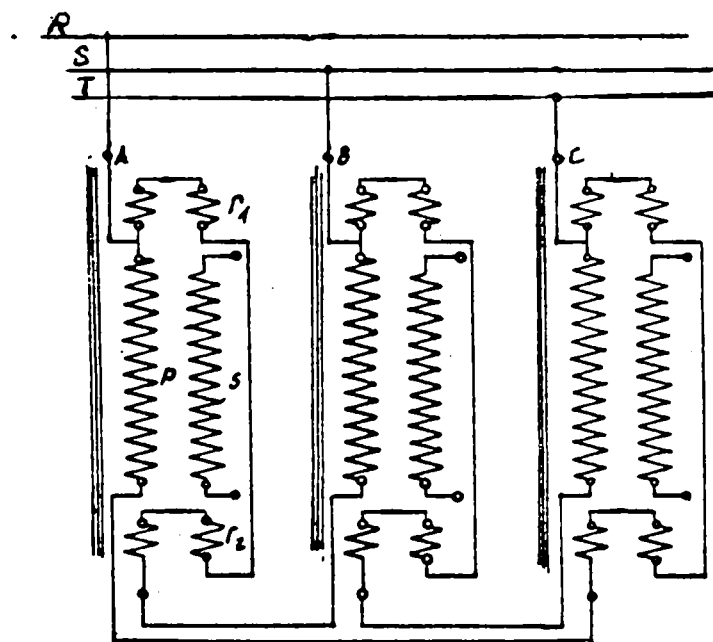


fig.40

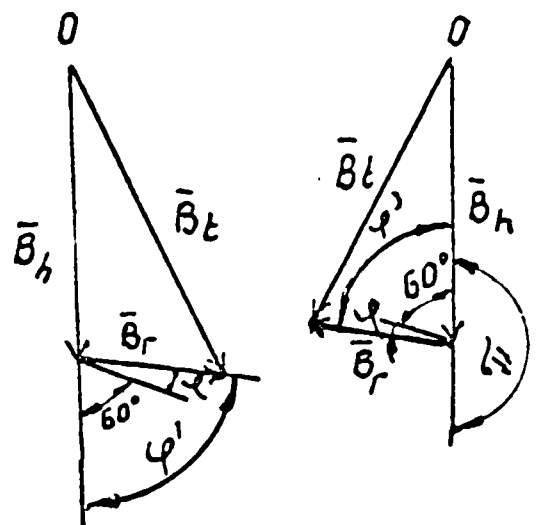


fig.41

unghiul φ , fiind înlocuit prin unghiul φ' (fig.41). Pentru regim echilibrat, vom avea :

$$\varphi' = \varphi + 60^\circ \quad (16)$$

aceasta ca urmare faptului că între curenții fazelor există un defazaj de 60° .

Ca urmare, pentru B_h și B_p date, se obține, în anumite cazuri, o micșorare a mărimei B_t a inducției rezultante și deci o atenuare a efectului de saturație.

3.5.2.2. Bobinajele primar și secundar ale transformatorului sînt în prelungire

În acest caz (fig.42) nu vom mai neglija fluxul de dispersie ψ_σ al transformatorului, care se închide prin miez, deoarece este important. Conform celor arătate

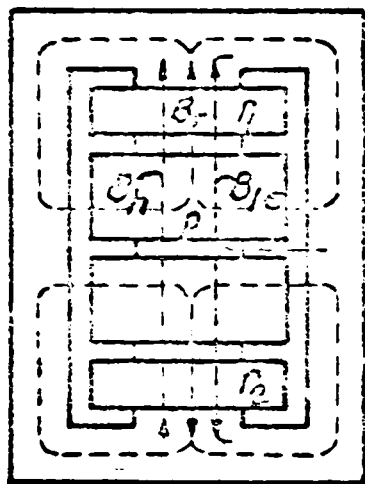


Fig.42

la 3.3.3. considerăm schema de legături, în care liniile de dispersie ale primarului și cele ale reactorului în miez, au același sens. Vom analiza două cazuri :

3.5.2.2.1. Reactorul legat în serie cu bobinajul secundar (fig.43).

Zona din miez, în care se produce concentrarea fluxului este aceea din dreptul bobinajului primar p și jumătății alăturate a reactorului. Pentru un punct al acestei zone, vom scrie :

$$\bar{B}_t = \bar{B}_h + \bar{B}_p + \bar{B}_\sigma \quad (17)$$

unde : B_σ corespunde fluxului de dispersie al bobinajului primar.

Considerăm cazul în care

nu există diferența de fază între cele trei mărimi din partea a doua a relației, deci cazul care duce la valoarea maximă pentru B_t

Pentru transformator

se poate scrie relația asemănătoare cu cea clasică :

$$u_1 = R_1 i_1 + L_1 \sigma \frac{di_1}{dt} + \frac{d\psi_{1\sigma}}{dt} \quad (18)$$

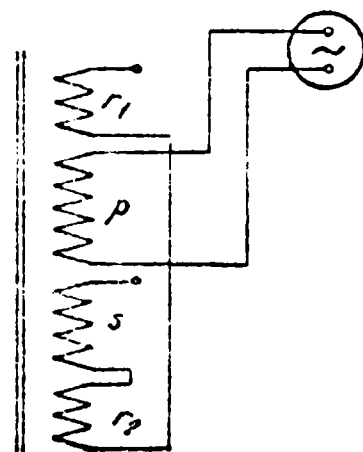


Fig. 43.-

dar în care $L'_{1\sigma}$ nu reprezintă inductanța uzuală de dispersie a primarului, ci o valoare echivalentă care ține seama și de fluxul (de dispersie) reactorului. S-a neglijat rezistența reactorului; Pentru determinarea acestei mărimi vom scrie:

$$\Psi'_{1\sigma} = (L_{11} - L_{11h}) \dot{i}_1 + (L_{r11} - L_{r11h}) \dot{i}_2$$

unde L_{r11} reprezintă inductanța corespunzătoare fluxului bobinei r_1 , care înălțăuie bobinajul primar.

Ținând seama că :

$$\dot{i}_2 = \dot{i}_1 \frac{N_1}{N_2}$$

unde N_1 și N_2 sînt numerele de spire în primar și secundar, vom avea :

$$\Psi'_{1\sigma} = \left[(L_{11} - L_{11h}) + (L_{r11} - L_{r11h}) \frac{N_1}{N_2} \right] \dot{i}_1$$

de unde inductanța echivalentă a primarului va fi :

$$(19) \quad L'_{1\sigma} = L_{11} - L_{11h} + (L_{r11} - L_{r11h}) \frac{N_1}{N_2} = L_{1\sigma} + (L_{r11} - L_{r11h}) \frac{N_1}{N_2}$$

Deci ca urmare a creșterii mărimii $L'_{1\sigma}$ față de $L_{1\sigma}$, rezultă o micșorare a fluxului principal și deci a inducției B_h .

În concluzie, la mersul în sarcină, se constată o micșorare pentru B_h și o mărire pentru B_r și $B_{1\sigma}$. Neglijînd pe R_1 și dacă luăm în considerare configurația liniilor de câmp din fig. 42 și admitem în primă aproximație că liniile de câmp de dispersie a bobinei reactorului, alăturată de primar, se închid toate prin primar, se va putea scrie :

$$u_1 = - \frac{d\Psi'_1}{dt} \quad \text{unde :}$$

$$\Psi'_1 = L'_{1\sigma} \dot{i}_1 + \Psi_{1h} = N_1 S (B_h + B_r + B_{1\sigma}) = N_1 S B_0 \quad (20)$$

unde S este secțiunea prin coloana centrală a miezului magnetic.

Urmează că la mersul în sarcină B_T este aproximativ egal cu B_0 . Considerînd și elementele neglijate, observăm că pe deoparte există unele care conduc la creșterea inducției B_T iar altele la micșorarea acesteia. Astfel o parte a liniilor de câmp de

dispersie nu înlănțuie bobinajul primar. Aceasta duce la o creștere. Pe de altă parte în sarcină în general, între inducțiile considerate în relația 17, există diferențe de fază. Aceasta duce la o micșorare. În ceea ce privește curentul de magnetizare, este cazul să se țină seama și de zona din miezul magnetic în care apare o micșorare a inducției. La transformatorul experimentat (cap.4.4.2) s-a constatat că practic curentul de magnetizare se menține același, la mers în gol și la scurtcircuit.

3.5.2.2.2. Reactorul legat în serie cu bobinajul primar (fig.44).

Acest caz se poate trata la fel cu cel precedent, cu condiția ca în relația (18), să înlocuim pe u_1 prin $u_1 - u_r'$ unde u_r' este tensiunea la bornele reactorului. Rezultă :

$$u_1 = R_1 i_1 + (L_1' + L_r) \frac{di_1}{dt} + \frac{d\psi_{1h}}{dt} \quad (21)$$

Față de cazul precedent, pentru o anumită tensiune de

alimentare U_1 , rezultă la mers în sarcină o valoare micșorată pentru inductanța rezultantă. Ca urmare, curentul de magnetizare al transformatorului, va scădea la mersul în sarcină. Menționăm că această scădere este mai accentuată decât aceea cunoscută, care ar rezulta în cazul folosirii transformatorului fără reactor.

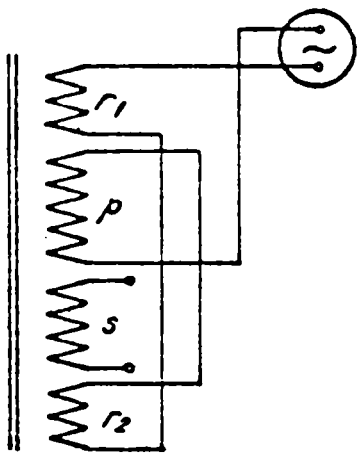


Fig. 44

Introducerea reactorului în circuit la mersul în gol.

Concluziile obținute la mersul în sarcină se pot extinde și asupra mersului în gol, înlocuind în relația (21) pe i_1 prin i_0 . Rezultă că β_h și curentul la mersul în gol se micșorează pe măsură ce se introduce reactorul. Aceasta se confirmă experimental.

Observație. În tehnica sursele de sudare, cu frecvență mărită [24,32,37] de dezvoltare, aspectele sînt principal

aceleași, dar cantitativ diferite, deoarece lucrându-se la inducții mai mici, există rezerve mai mari, până la saturarea miezului magnetic.

3.6. Variația inductanței cu frecvența

Am semnalat în capit.3.1.2. efectul de ecranare pe care-l produc tolele, în construcțiile uzuale de miezuri magnetice. Ecranarea conduce la micșorarea inductanței reactorului, ca urmare a micșorării componentei normale la tole a unei linii de forță și deci a micșorării fluxului.

Vom analiza în continuare, calitativ acest efect, indicând cantitative reșind din rezultate experimentale.

Pentru coloana centrală a reactorului din fig.12 configurația liniilor de forță normale la tole, corespunde fig.14.

În această situație o tole, spre exemplu cea marginală constituie un circuit închis cu inductanță și rezistență. Schema echivalentă a reactorului este dată în fig. 45, în care S_1 și S_2 sînt două spire, cu rezistențele R_1 și R_2 , reprezentînd tolele. Alimentăm bobinele r_1 și r_2 ale reactorului cu un curent alternativ sinusoidal de mărime constantă I , dar de frecvență variabilă.

Fluxul corespunzător curentului I care trece printr-o spirală S_1 sau S_2 va fi :

$$\phi = k I = k'$$

Forța electromotoare indusă în spirală va fi

$$E = \dot{\phi} \omega = k' \omega$$

În spirală rezultă curentul :

$$I_s = \frac{k' \omega}{\sqrt{L_s^2 \omega^2 + R^2}}$$

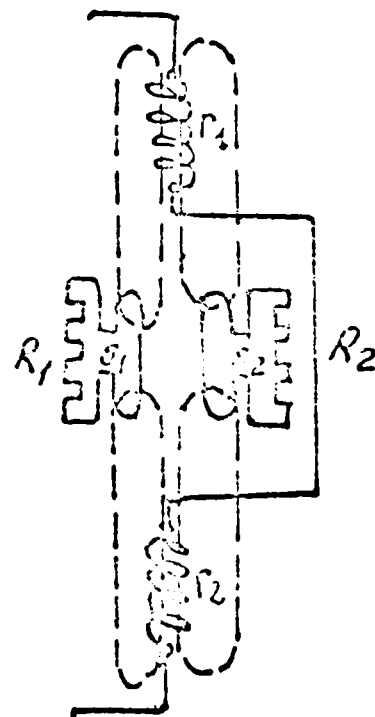


Fig.45

unde L_s = inductanța unei spire.

Rezultă că pentru R constant, la creșterea frecvenței, se produce o creștere a curentului I . Ca urmare, fluxul de reacție datorat acestui curent va crește. Aceasta are ca urmare o scădere a fluxului rezultat prin spiră și a fluxului rezultat mediu ϕ_r , a unei spire a reactorului. Neglijând rezistența reactorului, inductanța măsurată a acestuia va fi :

$$L_p = 2 \frac{N \phi_r}{I} = k \phi_r \quad (22)$$

unde N este numărul de spire al unei bobine r_1 sau r_2 .

Rezultă scăderea inductanței, cu creșterea frecvenței, ca urmare a scăderii fluxului rezultat.

4. REZULTATE EXPERIMENTALE

Pentru a verifica anumite concluzii deduse teoretic, s-au făcut experiențe pe modele sau pe transformatoare propriu zise, Rezultatele au permis să se obțină și unele indicații cantitative, care să arate importanța aspectelor analizate, sau să constituie elemente pentru proiectare.

4.1. Inductanța reactoarelor

4.1.1. Reactorul monofazat

Pentru reactorul monofazat, de la 3.1. s-au efectuat următoarele :

4.1.1.1. Incercări pe modele

Pe un miez ca în fig.46 s-au montat pe o coloană două bobine 1 și 2 de câte 47 spire și s-au legat în opoziție. Reactorul astfel obținut, a fost alimentat în c.a. 50 Hz, și la diverse distanțe x , s-au obținut datele din tabelul 1. S-a obținut curba a din fig.16.

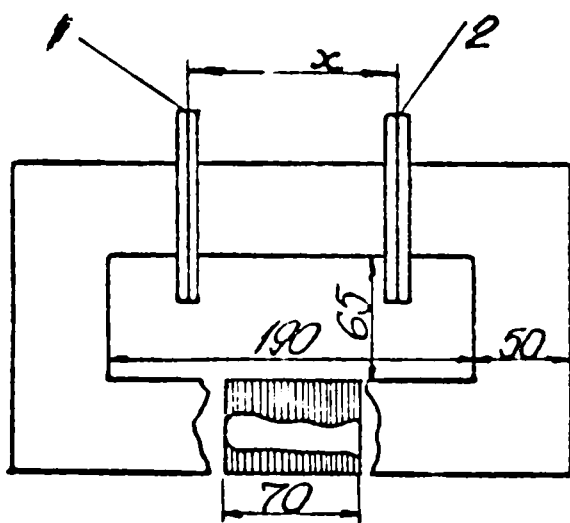


Fig. 46

Se pot trage concluziile : de la o anumită distanță, curba este practic o dreaptă. Acest aspect era verificat experimental pe miezul tip manta. La apropierea de juguri se observă o curbare corespunzând unei creșteri mai accentuate a inductanței, Se confirmă cele arătate la 3.1.2.

4.1.1.2. Incercări pe transformatoare

Primele încercări au avut ca obiectiv, să determine experimental aspectul variației inductanței unui reactor constituit din bobina în opoziție, în funcție de distanța dintre bobine. Pe un miez de transformator de 200 KVA, pe coloana centrală s-a montat bo-

bina α , cu 70 spire (fig.47). Peste aceasta și aproximativ la mijlocul înălțimii s-a montat o bobină de înălțime redusă, β , tot cu 70 spire. S-a legat această bobină în scurtcircuit, și s-a alimentat α , cu diverse tensiuni mărirându-se curentul în bobina β . S-a obținut dreapta A, $I = f(U)$ din fig.48. Raportul $U/I = Z_t$ reprezintă impedanța transformatorului cu bobinele α , β , privită fie din primar, fie din secundar, întrucît raportul de transformare este 1. Privit din punctele a, b, transformatorul este echivalent cu un generator cu t.e.m. $E = U$, și impedanță internă Z_t .

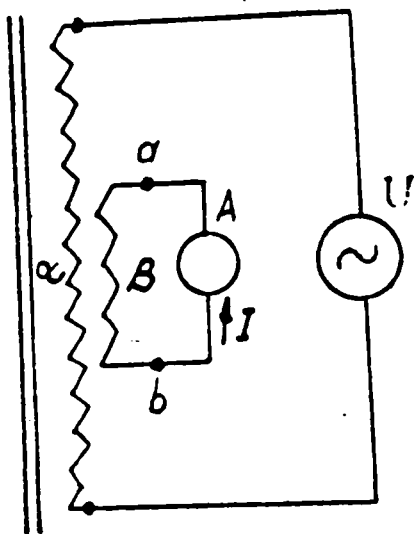


Fig.47

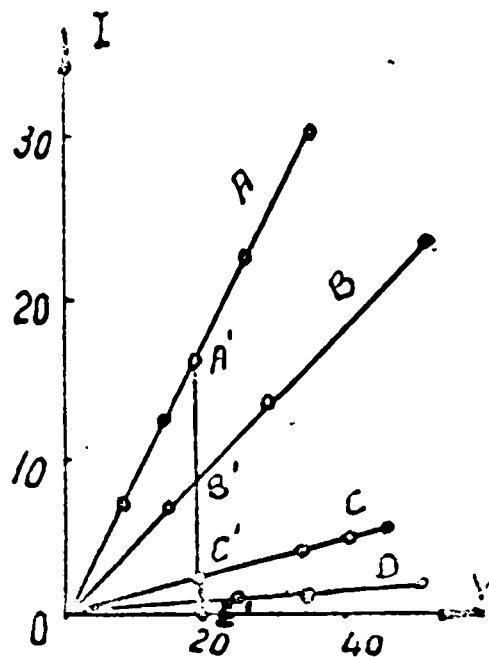


Fig.48

Mărimea acestei impedanțe o considerăm unitate de măsură. Ea este practic o reactanță. Intre bornele a și b, se leagă două bobine egale r_1 și r_2 cu câte 112 spire în opoziție, simetrice și alăturate față de bobina β . In aceste condiții fluxul care apare la trecerea unui curent în aceste bobine, induce în restul bobinelor de pe coloană t.e.m. egale și de sens contrar, astfel încît se poate considera că nu sînt influențate nici t.e.m. și nici impedanța sursei.

x (mm)	10	30	50	70	90	112	152
U (V)	1,50	1,8	2,08	2,4	2,7	3,09	3,66
I (A)	6	6	6	6	6	6	6
Z (Ω)	0,26	0,3	3,47	0,4	0,45	0,515	0,643
X (Ω)	0,17	0,225	0,28	0,35	0,41	0,475	0,614

	I			II		
	A	B	C	A	B	C
V (V)	350	350	350	350	350	350
I (A)	32	29,5	32	26,8	21,7	26,8
X (Ω)	10,9	11,8	10,9	13	16	13
L (H)	0,034	0,037	0,034	0,041	0,05	0,041

$f = 50$ Hz

Obs. Rezistența reactorului
 $R = 0,2 \Omega$

Tabel 1

Tabel 2

Pentru anumite valori ale tensiunii aplicate s-a obținut dreapta B. Ducând o linie paralelă cu axa O I, aceasta taie dreptele A și B în două puncte A' și B'. Reactanțele care limitează curenții în cele două situații sînt :

$$X_A = 1 \quad X_B = \frac{A'E'}{B'E'}$$

îndepărtînd bobinele r_1, r_2 la capetele coloanei (circa 600 mm distanță) menținîndu-le simetrice, în aceleași condiții, obținem dreapta C.

Vom avea :

$$X_C = \frac{A'E'}{C'E'}$$

Reactanța reactorului constituit din bobinele r_1, r_2 va fi :

Pentru bobinele apropiate

$$X_{rB} = \frac{A'E'}{B'E'} - 1$$

Pentru bobinele îndepărtate

$$X_{rC} = \frac{A'E'}{C'E'} - 1$$

Determinînd după grafic mărimile :

$$\frac{A'E'}{B'E'} \quad \text{și} \quad \frac{A'E'}{C'E'}$$

obținem :

$$\frac{X_{rC}}{X_{rB}} \approx 8$$

Repetînd probele cu bobinele r_1 și r_2 practic în aceeași poziție, dar cu un număr dublu de spire, obținem dreapta D și o creștere a reactanței de 4 ori față de cazul precedent.

- La un transformator de 250 kVA 10/0,4 kV, cu reglaj sub sarcină, pe o fază, reactorul este realizat din două bobine r_1, r_2 ca în fig.49. Fiecare bobină are 400 spire.

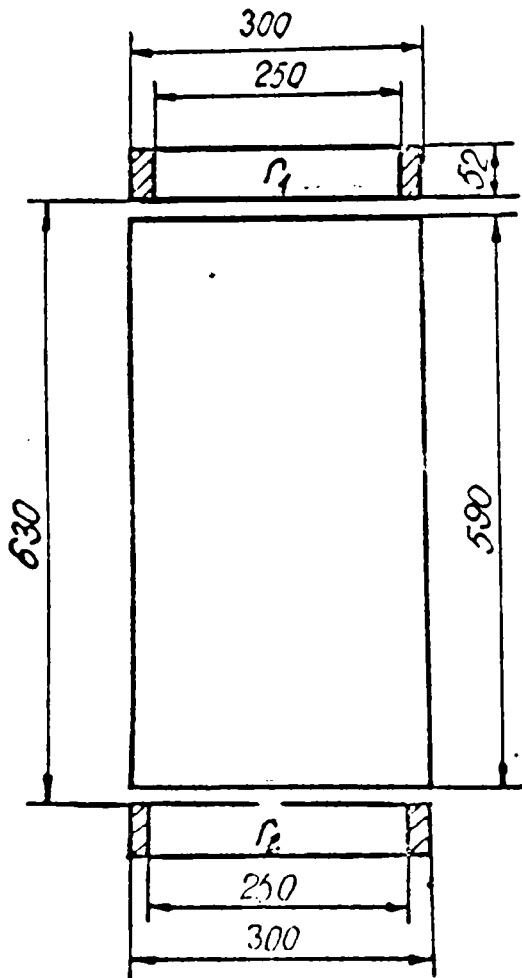


Fig.49

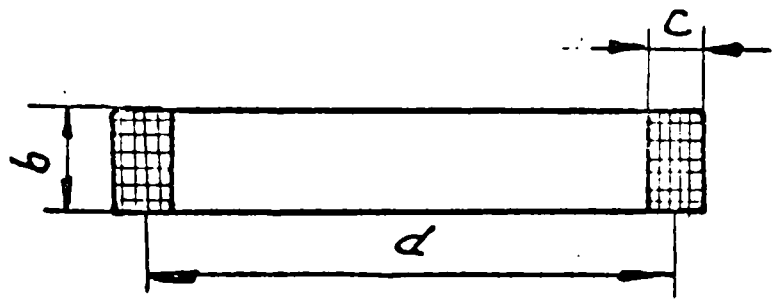


Fig.50

S-a considerat o bobină (fig.50) identică cu cea a reactorului dar situată în aer (fără miez magnetic) și i s-a calculat inductanța conform unor relații cunoscute [33]:

$$L_a = 0,2 d N^2 y \text{ (mH)}$$

d = este diametrul mediu

y depinde de d, b (înălțimea) și c (grosimea) bobinei și se dă sub formă grafică.

În cazul considerat :

$$d = 27,5 \text{ cm}, y = 0,05, N = 400 = \text{numărul de spire.}$$

A rezultat :

$$L_a = 0,043 \text{ H} \quad L_a \omega = 13,5 \Omega \quad 2 L_a \omega = 27 \Omega$$

Inductanța măsurată a reactorului propriu zis, situat pe miez este

$$X_p = 125, \Omega$$

Rezultă

$$X_r = 4,6 (2L_{\alpha} \omega)$$

Deci reactanța reactorului este de 4,6 ori mai mare decât a celor două bobine situate în aer, conectate în serie, fără cuplaj între ele.

Executînd ulterior măsurători cu o altă bobină în aer și după aceea introducîndu-se în bobină un miez de fier (din tole), deschis, s-a constatat o creștere de circa 4 ori a reactanței.

Aceste măsurători demonstrează că două bobine în opoziție pe un miez magnetic, pot constitui un reactor cu o reactanță sensibil mai mare decât aceea cu două bobine în aer și confirmă schema echivalentă de la 3.1.3.

4.1.2. Reactorul trifazat

La un transformator de 3150 KVA, 35/6,3 KV cu o conexiune stea pe partea de tensiune înaltă, cu două bobine r_1 și r_2 pe fază, conform schemei din fig.4 , și cu dimensiunile principale, date în fig. 51 avînd fiecare 90 spire, ceea ce reprezintă cca 12% din numărul de spire pentru priza nominală a bobinajului de tensiune înaltă, s-a realizat un reactor din bobinele r_1 , r_2 conform schemei din fig.52.

S-au făcut următoarele măsurători. S-a aplicat succesiv fiecărei faze, tensiunea de 350 V, ceea ce reprezintă aproximativ tensiunea dintre două prize, a bobinajului de reglaj (1,7%). S-au măsurat curenții în reactor, s-au calculat reactanțele și inductanțele. S-au obținut datele din partea I a tabelului 2. Se remarcă că pe faza din mijloc apare o reactanță, mărită cu circa 9%, față de fazele laterale.

S-au aplicat aceleași tensiuni pe fază dar pe reactorul funcționînd trifazat. S-au obținut datele din partea II a tabelului.

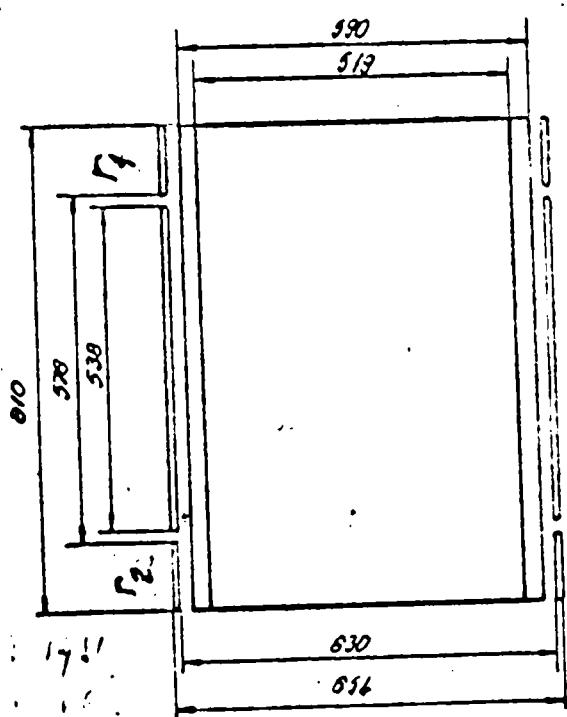


Fig. 51

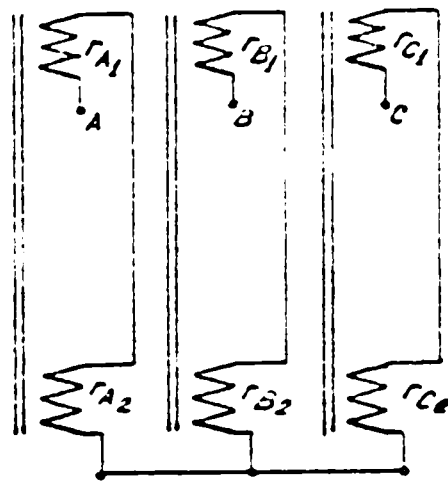


Fig. 52

Se remarcă pe de o parte o creștere a reactanțelor la toate fazele față de funcționarea monofazată, iar la faza din mijloc o creștere mai accentuată (circa 35%), ceea ce confirmă prevederile teoretice de la pct. 3.2.

4.1.3. Reactoare cu interacțiune cu bobinajele transformatorului.

4.1.3.1. Relații pentru măsurarea elementelor componente ale inductanței reactorului.

La cap. 3.3.1. am scris relația (7) :

$$L_r = L_{da} + L_{db} + L_{dc}$$

în care termenii L_{da} și L_{dc} reprezintă efectul interacțiunii.

Mărimile din relație se pot măsura separat :

- La un transformator, ca în fig. 25, se alimentează primarul și se măsoară U_s (tensiunea secundară la mers în gol). Se leagă secundarul în scurtcircuit, și la aceeași tensiune de alimentare în primar se măsoară curentul de scurtcircuit în secundar I_{sk}

Inductanța transformatorului, privită din secundar rezultă

$$L_{Ts} = \frac{U_{s0}}{\omega I_{sk}}$$

- Se repetă încercarea la scurtcircuit introducându-se

în secundar reactorul constituit din bobinele r_1 și r_2 .

Se obține :

$$L_s = \frac{U_{s0}}{\omega I'_{sk}}$$

rezultă :

$$L_r = L_j - L_{tj} = \frac{U_{j0}}{\omega} \left(\frac{1}{I'_{jk}} - \frac{1}{I_{jk}} \right)$$

- Se aplică o tensiune U , la bornele reactorului, restul circuitelor fiind deschise. Se măsoară curentul I .

Conform definiției date la 3.3.1. : $L_{da} = \frac{U}{\omega I}$

- Se leagă secundarul transformatorului în scurtcircuit. Se aplică o tensiune în primar, pînă cînd curentul secundar ia valoarea I din măsurătoarea precedentă.

Se măsoară tensiunea U_{r0} la bornele reactorului deschis. In conformitate cu analiza teoretică rezultă : $L_{db} = \frac{U_{r0}}{\omega I}$

- Se alimentează reactorul la tensiunea U .

Rezultă curentul I . Se lasă primarul și secundarul transformatorului deschise. Se măsoară separat tensiunile la bornele acestora U_p și U_s . Se calculează tensiunea transpusă în secundar, a primarului :

$$U'_p = U_p \frac{N_s}{N_p}$$

unde : N_s = număr de spire în secundar

N_p = număr de spire în primar

In conformitate cu analiza de la 3.3.1. rezultă :

$$L_{dc} = \frac{U_p \frac{N_s}{N_p} + U_s}{\omega I}$$

4.1.3.2. Transformatorul monofazat cu reactor.

Relațiile de mai sus le aplicăm la transformator, ca și în fig.25, în care 1 și 2 sînt bobinele reactorului, 3 primarul și 4 secundarul.

Din măsurători s-au obținut :

$$U_{s0} = 58 \text{ V} \quad I_{sk} = 195 \text{ A} \quad I'_{sk} = 156 \text{ A} \quad f = 50 \text{ Hz}$$

$$\text{Rezultă : } L_{ts} = 0,95 \text{ mH} \quad L_s = 1,18 \text{ mH} \quad L_r = 0,23 \text{ mH}$$

Se aplică tensiunea $U = 5 \text{ V}$, la reactor. Se obține $I = 158 \text{ A}$. Rezultă : $L_{da} = 0,1 \text{ mH}$.

Din L_r și L_{da} obținem : $L'_r = L_{db} + L_{dc} =$
 $L_r - L_{da} = 0,13 \text{ mH}$

Se repetă încercarea, dar cu reactorul legat în sens invers, spre a se obține reactanța negativă.

Din măsurători se obține :

$$U_{so} = 58 \text{ V}$$

$$I'_{sk} = 205 \text{ A}$$

de unde :

$$L_s = 0,9 \text{ mH} \quad L_r = 0,9 - 0,95 = - 0,05 \text{ mH}$$

$$L'_r = -0,05 - 0,01 = - 0,15 \text{ mH}$$

Rezultă o valoare aproximativ egală ca mărime cu cea obținută anterior.

4.1.3. 3. Transformatorul trifazat cu reactor.

Correspunde analizei teoretice de la cap.3.3.3. și 3.3.4.

Pe miezul din fig.53, s-au așezat pe cele trei coloane : bobinajul primar constituit din bobinele 1,2,3,4 legate în serie, cel secundar constituit din bobinele 5 și 6 legate în serie, bobinele 7,8,9 legate în serie constituind o bobină r_1 a reactorului și bobinele 10, 11 și 12 legate în serie constituind cealaltă bobină r_2 a reactorului, legată în opoziție cu prima. Primarul pe o fază are în total 188 spire, secundarul are 36 spire, iar reactorul 2 x 29 spire.

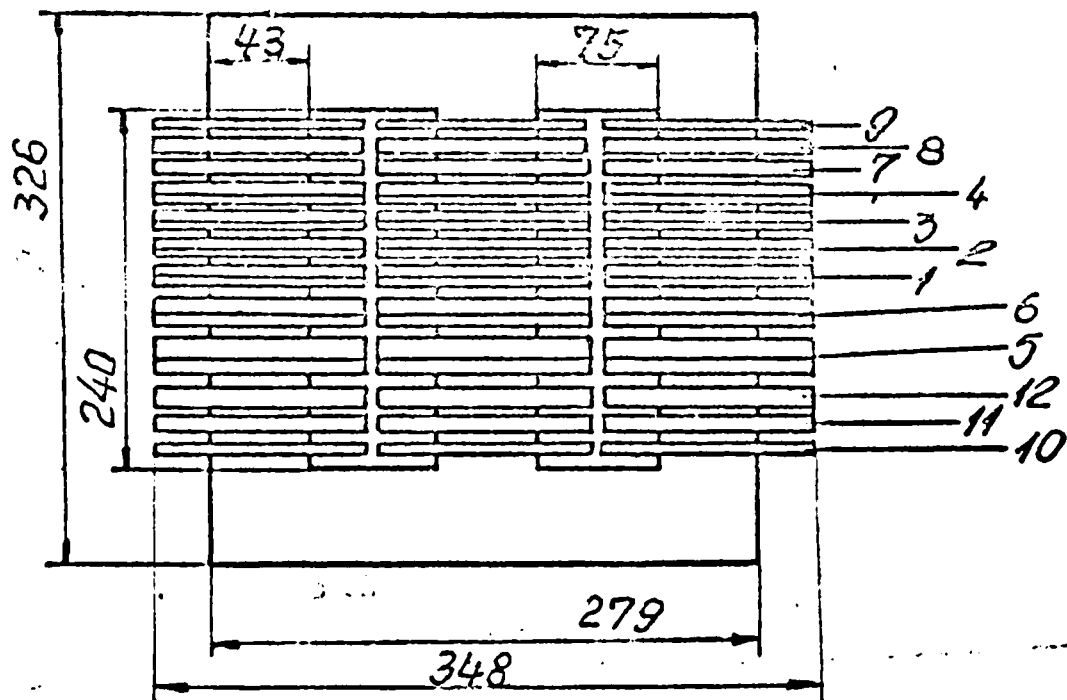


Fig.53

$U_p(V)$	$I_p(A)$	$I_s(A)$	$X(\Omega)$	Observații
21	6	31,2	3,5	col.centrală fără reactor
20	6	31,2	3,3	col.laterală fără reactor
107	6	31	17,8	col.centrală cu reactor
98	6	31	16,3	col.laterală cu reactor

Tabelul 3

Faza	$U_1(V)$	$I_r(A)$	Obs.
1	380	0	U_1 = tens primar
2	380	1,2	
3	380	0	I_r = curent reactor

Tabelul 4

Conectându-se, la faza din mijloc, secundarul în scurtcircuit, și alimentându-se primarul la tensiunea U_p , s-a obținut curentul primar I_p și curentul secundar I_s . S-a repetat încercarea, introducându-se în serie cu secundarul și reactorul și legându-se ansamblul lor în scurtcircuit. S-au repetat încercările, dar pentru coloanele laterale.

S-au obținut datele din tabelul 3. Rezultă că prin introducerea reactorului se obține o scădere a curentului primar și secundar de circa 5 ori.

4.2. Curentul de circulație în reactor

La un transformator de 400 KVA 10/0,4 KV, avînd un bobinaj ca în fig.5, s-a conectat secundarul în scurtcircuit și s-a alimentat primarul. În circuitul reactorului s-a introdus un ampermetru A. S-au obținut datele din tabelul 4.

Rezultă că pe treptele în care bobinajul de reglaj rămas în circuit, nu este simetric față de jumătatea distanței dintre bobinele reactorului apare un curent de circulație (care se închide în interiorul reactorului). Aceasta confirmă cele arătate la 3.4.1.1.

4.3. Pierderile suplimentare

La un transformator trifazat de 3 MVA 6/0,24 KV s-a prevăzut un reactor, cu bobină în opoziție la capetele coloanei, ca în fig.54. Fiecare bobină este constituită din două secțiuni, concentrice legate în serie. Pentru o fază, bobinele reactorului sînt indicate cu 1 și 2, bobinajul primar cu 3, iar bobinajul secundar cu 4. S-au făcut probe, numai cu reactorul considerat pe fiecare fază în parte, celelalte circuite fiind deschise.

Pentru orientare, menționăm că bobinele reactorului au fiecare cîte 40 spire, iar bobinajul primar, 250 spire.

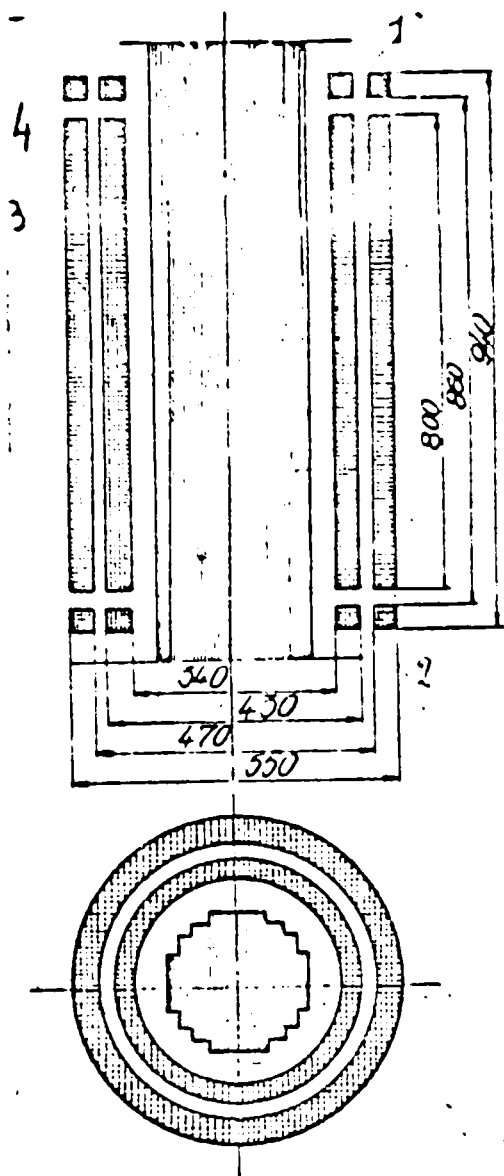


Fig. 54

Alimentându-se reactoarele succesiv, pe fiecare fază, s-au obținut datele din tabelul 5, în care :

U = tensiunea de alimentare

Z = impedanța măsurată

X = reactanța calculată din Z

W_t = puterea măsurată

I = curentul în reactor

R = rezistența calculată

S = puterea aparentă

W_r = puterea calculată = RI^2

W_s = pierderi suplimentare calculate

din W_t și W_r

R_s = rezistența corespunzând pierderilor W_s .

lor W_s .

Faza	A	B	C	A	B	C	A	B	C
$U(V)$	380	380	380	380	380	380	380	380	380
$I(A)$	151	141	151	150	141	150	157	159	157
$S(VA)$	57000	53700	57000	49400	53700	49400	59650	52820	59960
$Z(\Omega)$	2,51	2,7	2,51	2,92	2,7	2,92	2,4	2,73	2,4
$R(\Omega)$	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045	0,045
$X(\Omega)$	2,51	2,7	2,51	2,92	2,7	2,92	2,4	2,73	2,4
$W_t(W)$	3400	2640	3400	2450	2640	2450	9300	4800	9300
$W_r(W)$	1026	896	1026	760	896	760	1109	870	1109
$R_s(\Omega)$	0,105	0,09	0,105	0,1	0,086	0,1	0,33	0,2	0,33
$W_s(W)$	2374	1744	2374	1690	1744	1690	8191	3840	8191
W_s/S	0,042	0,032	0,042	0,034	0,032	0,034	0,13	0,074	0,13
Obs.	Fără cuvă			Fără cuvă			Cu cuvă		
	Fără derivatii mag.			Cu derivatii mag.			Fără derivatii mag.		

Măsurătorile s-au făcut în trei situații : cu transformatorul decuvat, cu transformatorul decuvat dar avînd două derivații magnetice la coloanele laterale ca în fig.24 și cu transformatorul incuvat, dar fără derivații.

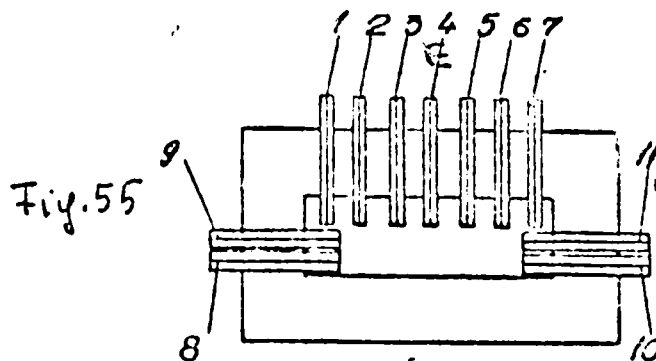
Se observă următoarele : pierderile suplimentare sînt sensibil mărite la reactoarele de pe coloanele laterale, față de coloana centrală, atunci cînd nu sînt montate derivațiile. Aceasta se explică prin faptul că la coloana centrală o parte importantă a fluxului se închide între coloane, astfel încît pe deoparte componenta normală la suprafața tolelor, a inducției, este micșorată, iar pe de altă parte extinderea la distanțe mari a fluxului este mai redusă. Dacă se trece la situația cu derivațiile magnetice montate, pierderile la coloanele laterale se reduc la aproximativ aceeași valoare ca pe coloana centrală. Prin introducerea transformatorului în cuvă, se constată o creștere a pierderilor pe toate coloanele, dar mult mai importantă la coloanele laterale. În general rezistența R_s , este sensibil mai mare decît R . S-a efectuat o încercare calitativă de localizare a acestor pierderi, observînd piesele care se încălzesc mai mult, cu ajutorul termometrelor. Aceste încercări sînt necesare deoarece uneori în afară de mărimea pierderilor care afectează randamentul sînt importante încălzirile locale întrucît în funcționare pot distruge izolația. S-a constatat că aceste pierderi se produc :

-În tolele miezului magnetic, mai accentuat în apropierea bobinelor și în tolele de la exterior.-În bobinajele transformatorului (deși acestea sînt fără curent).-În piesele metalice care strîng jugurile. Acestea sînt relativ reduse la coloana centrală. Explicația este analoagă, cu cea dată mai sus.-În tiranții laterali dintre piesele de strîngere ale jugurilor, chiar cînd aceștia sînt izolați de aceste piese, sau sînt din material nemagnetic.-În piesele de strîngere ale coloanelor, cînd aceste piese sînt metalice.

4.4. Saturarea miezului magnetic

4.4.1. Reactorul

La un reactor, ca în fig.55 cu bobinele 8,9,10,11 de câte 47 spire s-a variat tensiunea de alimentare U , obținându-se diverse valori pentru curentul I (tabelul 6.I). S-a trasat curba $U = f(I)$, a, fig.50. Rezultă micșorarea inductanței cu creșterea tensiunii.



	I						II				
U (V)	135	213	249	267	307	330	136	225	264	300	339
I (A)	42	68	80	89	109	123	44	76	96	113	136
Z (Ω)	3,22	3,14	3,11	3	2,8	2,69	3,1	2,96	2,75	2,65	2,5
I_E (A)							1,45	4,5	7,2	9,45	10,8
U (V)							220				

Tabelul 6

Pe același miez, în afară de bobinele reactorului s-a situat și bobinajul E constituit din bobinele 1-7. Acesta s-a alimentat la 220 V. S-a variat U și s-au obținut datele din tabelul 6.II S-a trasat curba b din fig.56. Se observă că alimentarea bobinajului are ca efect o saturare mai accentuată a reactorului. Se remarcă de asemenea creșterea curentului de magnetizare I_E în bobinajul E, ca urmare a creșterii tensiunii de alimentare a reactorului. Se verifică cele arătate la 3.5.2. cu privire la efectul suprapunerii fluxurilor.

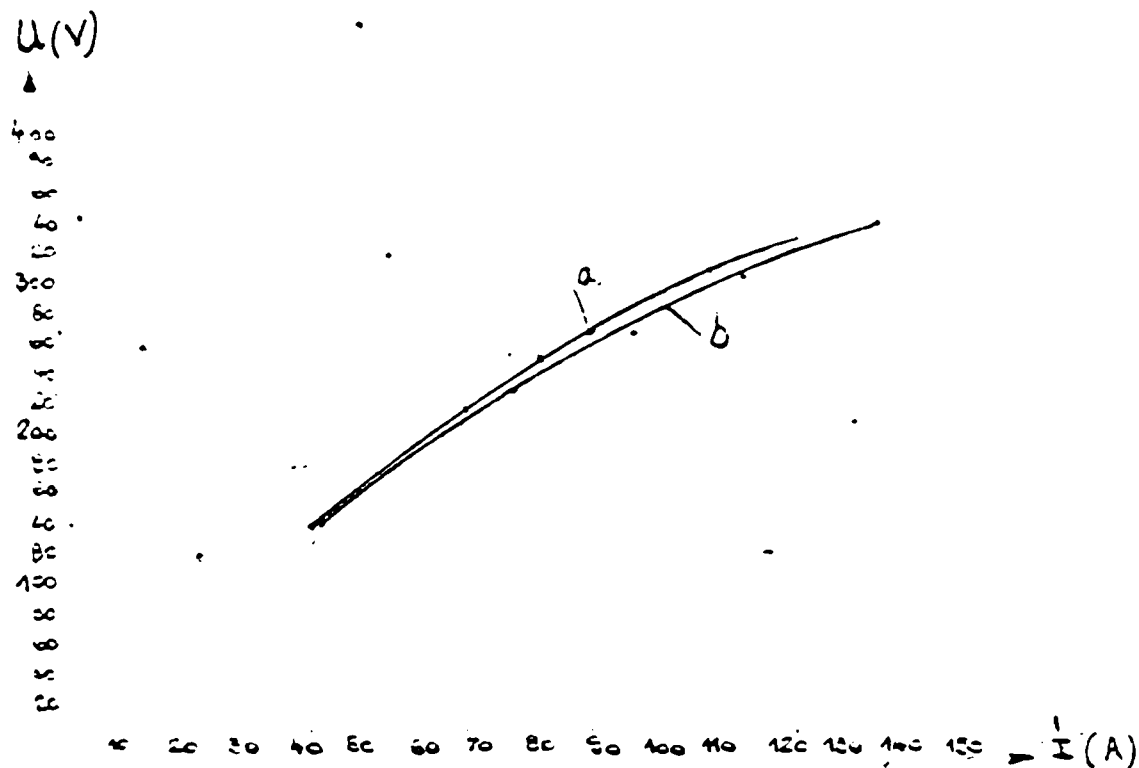


Fig.56

4.4.2. Transformatoare de sudare

4.4.2.1. Transformatoare cu reactorul conectat în secundar

Probele se fac cu un transformator cu reactorul conectat ca în fig.8. Se alimentează primarul unei faze cu tensiunea U_p , secundarul fiind deschis. Se măsoară curentul de mers în gol I_0 . Se conectează ansamblul secundar-reactor în scurtcircuit. Se alimentează din nou primarul, la aceeași tensiune. Se măsoară curenții I_p și I_s . Se obțin datele din tabelul 7.I.

Considerînd că la scurtcircuit curentul de magnetizare și curentul din primar sînt aproximativ în fază, vom putea scrie:

$$I_m = I_p - \frac{N_s}{N_p} I_s$$

Avînd primarul cu numărul de spire $N_p = 210$ și secundarul cu $N_s = 40$, și valorile măsurate :

$$I_p = 15,6 \text{ A} \quad I_s = 60,4 \text{ A}$$

rezultă :

$$I_m = 15,6 - \frac{40}{210} 60,4 = 4,1 \text{ A}$$

Considerînd că la mersul în gol curentul este aproximativ curentul de magnetizare :

$$I_{m0} = I_0 \quad I_0 \text{ măsurat} = 4 \text{ A}$$

rezultă :

$$I_m = I_{m0}$$

Deci curentul de magnetizare la scurtcircuit a rămas aproximativ egal cu curentul de magnetizare la mersul în gol. Rezultă că aceeași valoare o va avea și curentul de magnetizare la mers în sarcină. Se confirmă cele deduse la cap. 3.5.2.2.1.

I				II			
$U_p(V)$	$I_0(A)$	$I_p(A)$	$I_s(A)$	$U_p(V)$	$I_0(A)$	$I_p(A)$	$I_s(A)$
220	4	-	-	220	2,5	-	-
220	-	15,6	60,7	220	-	22	106

Tabel 7

4.4.2.2. Transformatoare cu reactorul conectat în primar

Incercările se fac cu un transformator conectat ca în fig.9.

Se alimentează o fază a circuitului primar cu rectorul scos din circuit, la tensiunea U_p cu secundarul deschis. Se măsoară I_0 . Se conectează secundarul în scurtcircuit și se alimentează la aceeași tensiune, dar cu reactorul introdus. Se măsoară I_p și I_s . Rezultă datele din tabelul 7.II. Pe baza aceluiași considerații ca mai sus rezultă aceeași relație pentru I_m curentul de magnetizare la scurtcircuit. Efectuând calculele cu $N_p = 210$ și $N_s = 40$ și cu datele din tabel, rezultă :

$$I_m = 22 - \frac{40}{210} 106 = 1,96 \text{ A} \quad I_{m0} = 2,5 \text{ A}$$

de unde :

$$I_m < I_{m0}$$

Rezultă că la scurtcircuit și la mersul în sarcină, curentul de magnetizare va fi micșorat, față de mersul în gol (cap.3.5.2.2.

4.4.2.3. Curentul la mers în gol

În cazul transformatorului cu reactorul conectat în secundar conectarea reactorului nu influențează curentul la mers în gol. În cazul reactorului conectat în primar, s-au făcut probe de alimentare în gol, la tensiune constantă U_p , conectînd succesiv bobinajul primar, și ansamblul bobinaj primar-reactor. Au rezultat datele din tabelul 8. Rezultă, conform celor arătate la 3.5.2.2.2. micșorarea curentului în gol, la introducerea reactorului.

$U_p(V)$	$I_o(A)$	Obs.
220	2,5	fără reactor
220	1,6	cu reactor

Tabelul 8

$f(Hz)$	$U(V)$	$I(A)$	$Z(\Omega)$	$R(\Omega)$	$L(H)$
50	375	2,5	150	8	0,47
310	385	0,56	687	8	0,35

Tabelul 9

4.5. Variația inductanței cu frecvența.

La un transformator trifazat de 250 kVA 10/0,4 kV, avînd primarul cu circa 1200 spire și constituit din două bobine, s-au legat pe o fază aceste bobine în opoziție obținîndu-se un reactor ca în fig.28, cu dimensiunile din fig.57. Secundarul și celelalte faze au rămas deschise. S-a alimentat reactorul la 50 Hz și 315 Hz. Au rezultat datele din tabelul 9. Rezultă o scădere a inductanței la frecvență mărită, ceea ce confirmă cele arătate la 3.6.

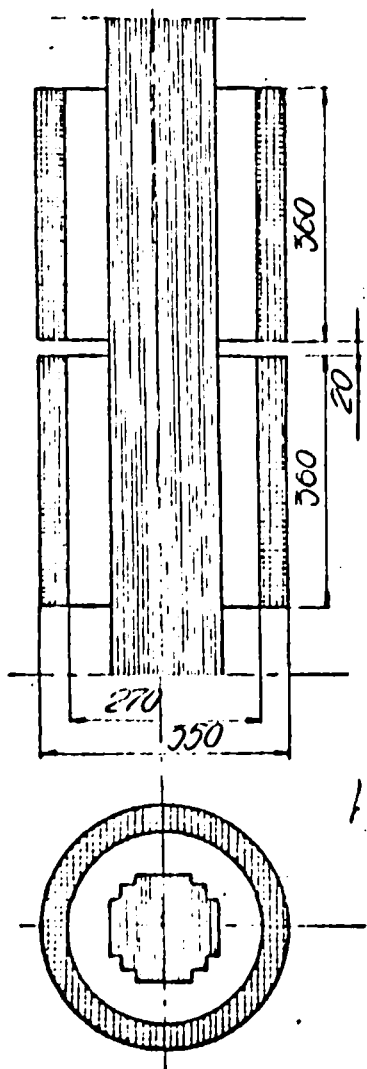


Fig.57

bobine ale reactorului pot să nu fie identice(dintr-un defect de execuție), una din ele avînd spre exemplu o spîră în plin. În acest caz

4.6. Observații privind securitatea muncii, la încercări.

La încercări pot apare anumite efecte care trebuiesc cunoscute, sub aspectul securității muncii. Astfel cele două

la alimentarea reactorului și deci la trecerea curentului prin aceasta, apare și un flux principal important, care va putea induce în alte bobinaje de pe miezul transformatorului tensiuni de care trebuie să ținem seama. Acest efect nu are practic importanță în funcționarea normală, în care uzual reactorul este legat în serie cu unul din bobinajele transformatorului.

Fluxul de dispersie, se extinde la distanțe relativ mari (de ordinul înălțimei coloanei). Dacă în apropierea reactorului încercat se găsește un bobinaj, montat sau nu pe un miez magnetic, în aceasta pot apare tensiuni a căror atingere poate fi periculoasă. Pentru evitarea acestora, bobinajele aflate în zona fluxului de dispersie, se pot lega în scurtcircuit.

5. INDICATIILE DE PROIECTARE

Soluțiile prezentate stau, sau pot sta la baza fabricației unor produse electrotehnice. Ca urmare este necesară o proiectare, iar pentru aceasta o metodică de calcul. Dezvoltarea unor astfel de metodici, ar depăși însă cadrul acestei lucrări. Ele vor face obiectul unor lucrări separate.

Este totuși foarte important să se sintetizeze semnificația unor aspecte analizate în lucrare, asupra funcționării unui produs.

Vom analiza în continuare aceste semnificații.

5.1. Mărimea inductanței

Rezultă din cele arătate că unul din obiectivele lucrării este acela de a obține reactoare, situate pe miezul magnetic al unui transformator, care pentru o inductanță dată, să aibă numărul cel mai mic de spire. S-a văzut că aceste reactoare se pot obține fără, sau cu interacțiuni cu bobinajele transformatorului. Se poate pune întrebarea, în ce împrejurări folosim un reactor sau altul? Răspunsul la această întrebare, poate reeși în general, atât din cele arătate la cap.3 și 4, cât și din prezentarea soluțiilor, legate de aplicațiile industriale, de la cap.2.

O dată precizat tipul de reactor, apare necesitatea ca pentru mărimea necesară a inductanței să se calculeze numărul de spire. La 3.1.2. rezultă bazele de calcul pentru un reactor propriu zis, iar la 3.3.3 pentru tipul cel mai important de reactor cu interacțiunea cu bobinajele transformatoarelor. Aceste calcule, deși se reduc la metode clasice, sînt dificile, și de cele mai multe ori necesită modele.

În general nu este necesar ca o anumită mărime a inductanței să fie realizată cu precizie. Reactorul pentru reglajul sub sarcină, trebuie să limiteze curentul de circulație între anumite

valori. La transformatoarele de sudare, pe deoparte, limitele de reglaj admit toleranțe, iar pe de altă parte, se fac în serie, astfel că pe baza prototipului, se pot ajusta valorile la serie. Ca urmare se pot folosi relații de calcul semi-empirice, cu precizie redusă, dar foarte simple. Prezentarea acestora nu face obiectul lucrării.

5.2. Pierderile suplimentare

A reeșit din capitolele precedente că funcționarea reactorului produce pierderi suplimentare, în anumite cazuri mari. Importanța acestora în funcționare, diferă de la caz la caz.

- La reactoarele pentru reglajul sub sarcină, unde funcționarea acestora este tranzitorie, pierderile nu numai că nu aduc practic inconveniente, dar au un rol pozitiv, ameliorând factorul de putere al circuitului care se comută.

- La transformatoarele pentru cuptoarele electrice cu arc, pierderile sînt importante și limitează aplicarea soluțiilor prezentate, la puteri relativ mici. Evitarea lor este posibilă dar dificilă. Evitarea pierderilor în tolele miezului magnetic ca urmare a componentelor normale pe tole, a cîmpului magnetic, implică schimbarea tipului de miez, cu tole paralele, într-un tip cu tolele dispuse radial^[34] sau în evolventă, folosite deocamdată numai în străinătate. Micșorarea pierderilor în celelalte elemente metalice se tratează prin soluții clasice.^[35]

- La transformatoarele de sudare, aceste pierderi pot fi obținute relativ mici și se încadrează în limitele uzuale ale transformatoarelor de sudare clasice.

5.3. Saturarea miezului magnetic

A reeșit din capitolele 3.5 și 4.4, că saturarea miezului magnetic al transformatorului, ca urmare a suprapunerii fluxurilor poate deveni importantă și conduce la efecte negative.

Saturarea poate fi în general evitată, prin adaptarea unor soluții potrivite. Uneori nu prezintă interes practic.

- La reglajul sub sarcină - Suprapunerea câmpului de dispersie a reactorului cu fluxul principal, conduce în general la o creștere neînsemnată a inducției în anumite părți ale miezului, iar efectele nu sînt importante, cu atît mai mult cu cît sînt de scurtă durată.

- La transformatoarele pentru cuptoare, este posibilă evitarea saturației dar pentru aceasta, este necesară o analiză de la caz la caz, conform celor arătate la 3.5.2.2.2.

Un aport în rezolvarea acestei probleme, o poate aduce adaptarea schemei din fig.40.

- La transformatoarele de sudare - saturarea locală care poate apare la schemele din fig.8, este neînsemnată. La folosirea schemei din fig.9, după cum s-a arătat la 3.5.2.2.2. nu numai că se evită saturarea, dar mai mult, la mersul în sarcină, se produce efectul contrar și ca urmare scăderea curentului de magnetizare.

5.4. Curenții de circulație

Astrei de curenți pot apare conform celor arătate la 3.4.1. Curenții de circulație în reactor, pot fi evitați sau micșorați prin adaptarea unor bobinaje de reglaj simetrice în raport cu mijlocul înălțimii bobinajului, care sînt uzuale, sau a unor bobinaje cu asimetrie redusă

În cazurile în care apar la transformator bobine în paralel, curenții de circulație prin acestea, pot fi evitați, conform celor arătate la cap. 3.4.1.2.

6. REALIZARI INDUSTRIALE

Vor fi descrise unele produse reprezentative sub aspectul celor arătate în lucrare. Din datele anexate rezultă unele indicații cantitative, cu privire la eficiența soluțiilor aplicate.

6.1. Transformatoare cu reglaj sub sarcină

6.1.1. Transformatorul trifazat de 400 kVA 10/0,4 kV.

La acesta, reglajul sub sarcină este situat pe partea de tensiune înaltă și are limitele $\pm 5\%$ - 10% în 7 trepte de $2,5\%$. Bobinajul de tensiune înaltă este de tip stratificat, iar schema acestuia corespunde celor arătate la cap. 2.1.2.3. și fig.5.

Bobinajele fazelor se conectează în triunghi. Se pot remarca următoarele : bobinele r_1 și r_2 , care constituiesc reactorul, au fiecare câte 113 spire, ceea ce reprezintă circa 18% din numărul total de spire al bobinajului pentru treapta nominală. Secțiunea conductorului la aceste bobine este circa jumătate, față de cea a restului bobinajului.

Bobinajul de reglaj are o schemă specială, fiind pe unele trepte simetric în raport cu mijlocul înălțimii, iar pe altele are o asimetrie de cel mult o secțiune de reglaj. În acest fel, curenții de circulație prin reactor (cap.3.4.1.1.) sînt, sau nuli, sau de mărime redusă. Consumul de conductor, materiale izo-lante și dimensiunile, rezultă practic aceleași ca ale transforma-torului uzual, cu reglaj $\pm 5\%$, fără tensiune. Ca urmare s-a utili-zat construcția (miezul magnetic, schela, cuva) transformatorului uzual.

La probe s-a constatat că reactorul limitează curentul de circulație între două prize de reglaj, la circa 10 A , ceea ce reprezintă 75% din curentul nominal ($13,3\text{ A}$).

Comutatorul de reglaj este de tipul selector sub sarcină. Are o construcție simplă. Este constituit dintr-o placă izolantă

cu câte 7 contacte fixe pentru fiecare fază, și o placă izolantă rotativă, cu câte două contacte mobile, pentru fiecare fază. Dimensiunile contactelor fixe, distanțele dintre acestea, distanța dintre contactele mobile, sînt astfel calculate încît programul de stabiliri și întreruperi de contacte arătat anterior, caracteristic trecerii sub sarcină de pe o treaptă pe alta, se obține printr-o simplă rotație a axului plăcii mobile. Dimensiunile comutatorului sînt reduse, astfel încît s-a încadrat în spațiul cuvei transformatorului uzual.

Pentru omologare, transformatorul a fost supus la diverse încercări printre care scurtcircuitul brusc și aceea a unui mare număr de schimbări de trepte, pe toată gama de reglaj și la plină sarcină.

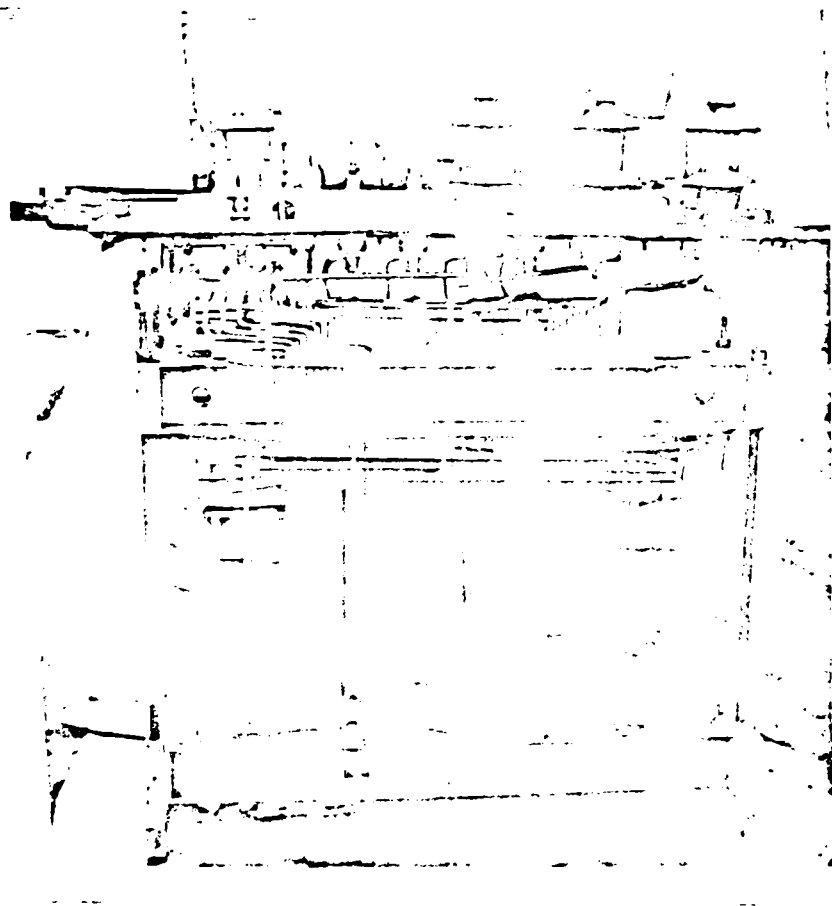


Fig.58.

In fig.58, apare un astfel de transformator, decuivat. Menționăm că, diferența de preț de cost, față de transformatorul uzual este redusă.

6.12. Transformator trifazat de 3150 KVA, 35/6,3 kV.

La acesta, reglajul sub sarcină este pe partea de tensiune înaltă și are limitele $+7 - 10\%$, în 11 trepte de $1,7\%$. Bobinajul corespunde celor arătate la cap.2.1.2.2. și fig.4 și este conectat în stea. Se pot remarca următoarele :

Bobinele r_1 și r_2 , care constituiesc reactorul au fiecare câte 90 spire, ceea ce reprezintă circa 12 % din numărul total de spire al bobinajului (considerat pentru treapta nominală). Secțiunea conductorului acestora este circa jumătate față de cea a restului bobinajului. Bobinajul de reglaj este realizat după aceeași schemă ca la 6.1.1.

La încercările făcute s-au obținut datele din tabelul 2. de la cap.4. Cum tensiunea de alimentare din tabel, este practic tensiunea dintre două prize alăturate a bobinajului de reglaj, rezultă pentru curenții de circulație între prize valorile din tabel, care sînt cuprinse între 52 % și 43%, din 51 A, curentul nominal al bobinajului de tensiune înaltă.

Efectuînd calcule pe baza datelor obținute, rezultă că s-ar fi putut obține o limitare a curentului de circulație la circa $0,7 I_n$ cu bobine ale reactorului avînd câte 75 spire, deci circa 10% din numărul total de spire al bobinajului, ceea ce ne dă o indicație sugestivă, cu privire la eficiența soluției privind realizarea reactorului.

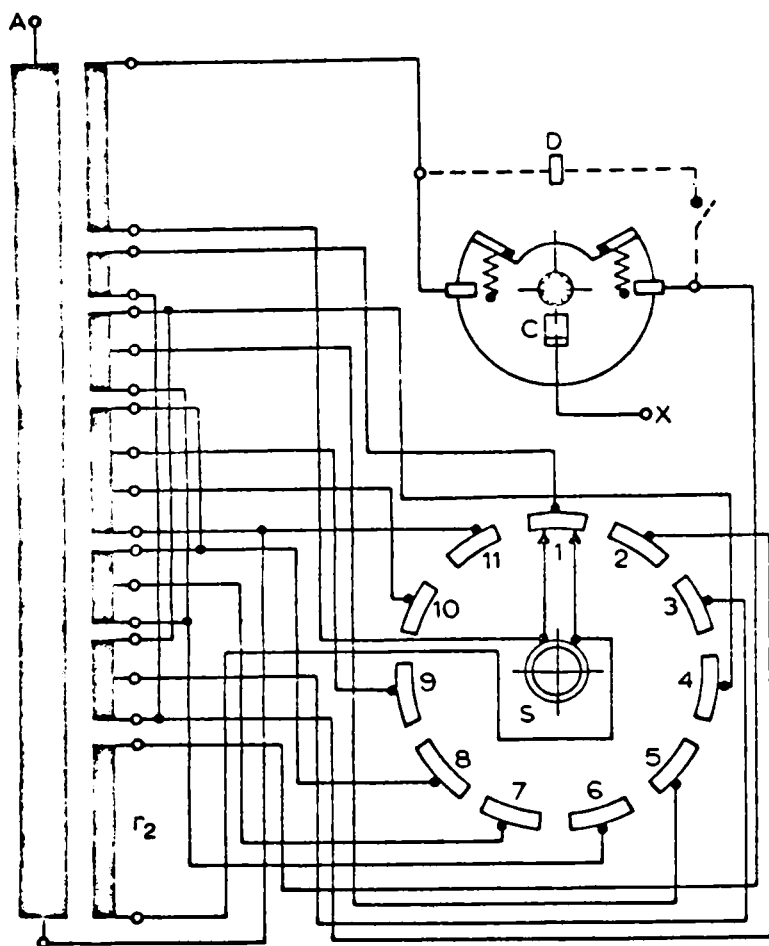


Fig.59

Schema de ansamblu a reglajului pe o fază apare și în fig.59. Din aceasta poate reieși principiul de funcționare al comutatorului. Acesta are un selector și un contactor, ceea ce este uzual. Construcția este însă originală, contactorul C, fiind de forma unui

disc tăiat, situat pe un ax cuplat prin două roți dințate cu axul selectorului S, astfel că la o rotație completă a discului, se produce succesiunea întreruperii și stabilirii de contacte, care permit selectorului să treacă de pe o treaptă pe alta, fără stabiliri și întreruperi de curent. [36]

În figura 60 este dată fotografia transformatorului, în cursul construcției.

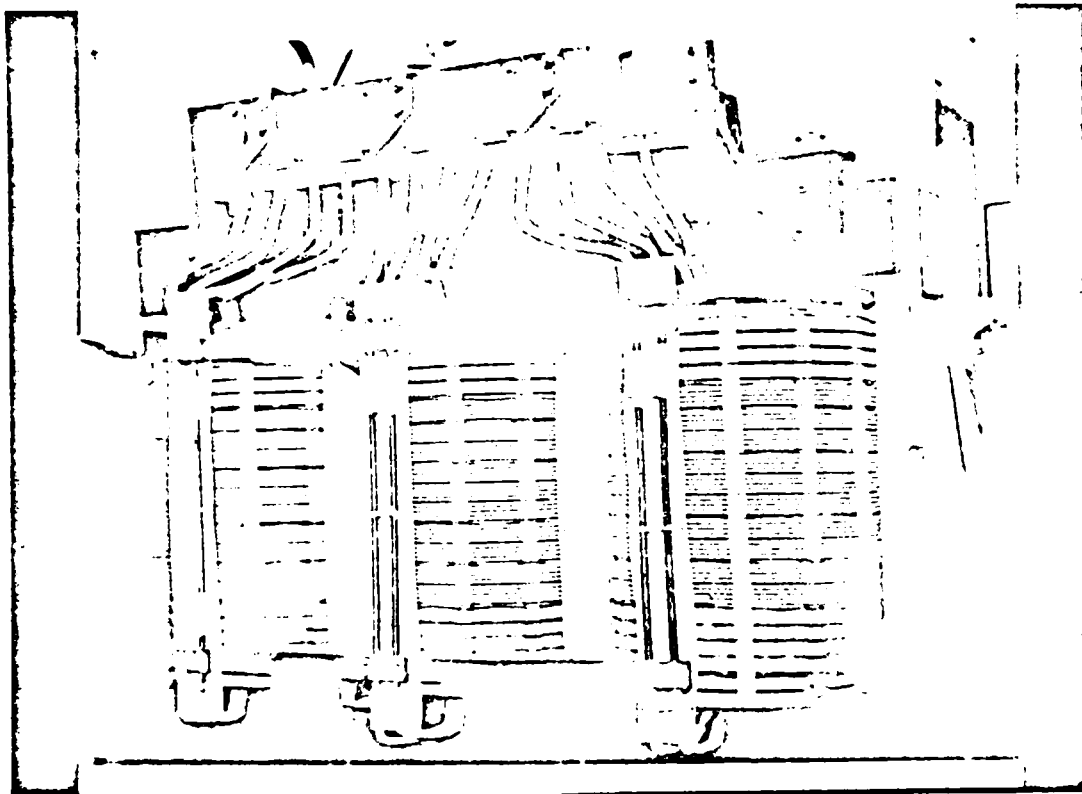


Fig.60

6.2. Redresorul pentru sudarea electrică cu arc în c.c., de 200 A.

Acest redresor conține un transformator ^{conform} celor arătate la 2.3.2.2. și conform schemei din fig.9, deci cu posibilitatea realizării unui reglaj de curent, prin reactoare montate pe coloanele miezului magnetic.

Bobinajele secundare sînt legate în triunghi și alimentează o punte trifazată cu 6 celule redresoare de siliciu. Schema de ansamblu este dată în fig.61. Reglajul tensiunii se face în 10 trepte printr-un comutator (în schemă sînt reprezentate numai 3 trepte).

Dimensiunile miezului magnetic din tola electrotehnică cu cristale orientate (M5) rezultă din fig.53. Greutatea miezului magnetic este 26 kg. Bobinajul primar al unei faze are 276 spire

iar cel secundar 58. O bobină a reactorului de pe o coloană laterală are 9 secțiuni, și în total 190 spire. Pe coloana din mijloc numărul corespunzător de spire este 170. Pe această coloană, numărul de spire este redus, pentru a compensa creșterea inductanței, conform celor arătate la 3.2.2. La bobinele reactorului de la un grup

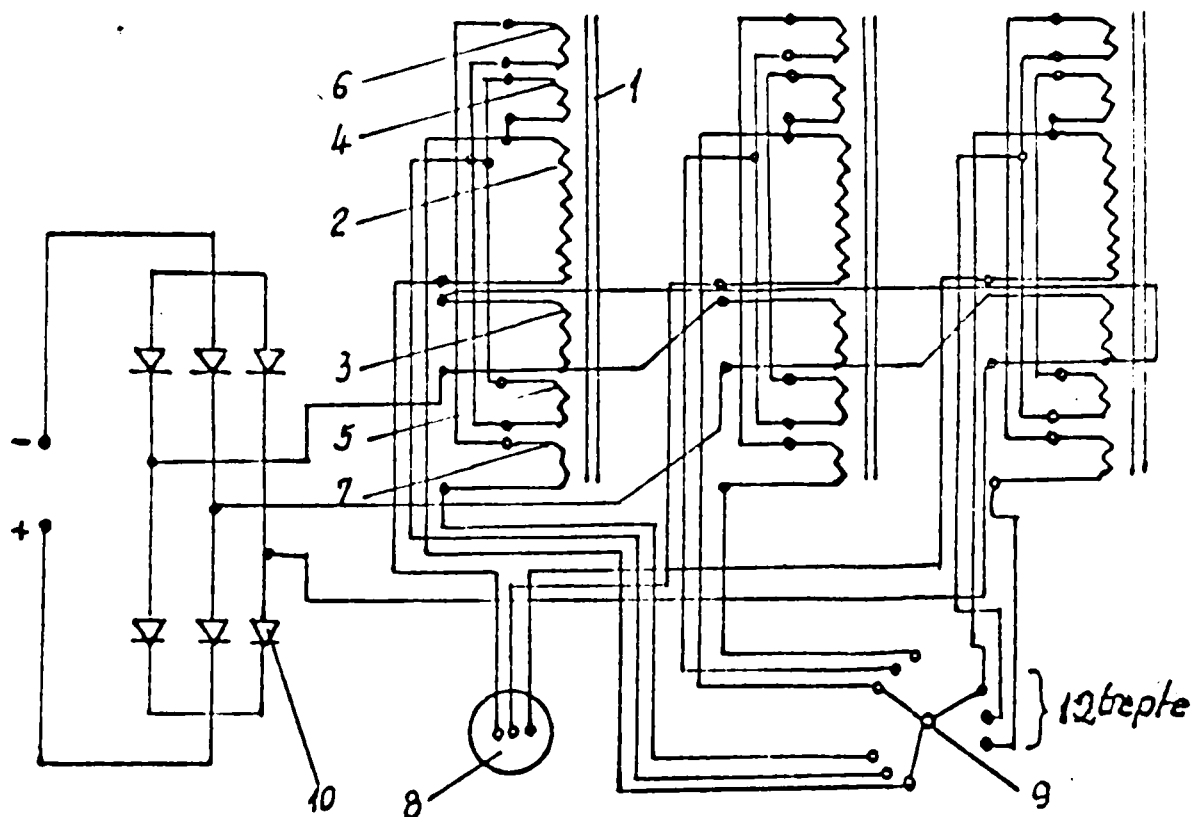


Fig.61

de secțiuni, la altul se folosesc conductori cu secțiune descrescătoare, ca urmare a micșorării curenților în aceste secțiuni. Greutatea cuprului, din bobinele transformatorului este 16 kg, iar cel din bobinele reactorului este 7,2 kg.

Dimensiunile ansamblului miez-bobine, rezultă din fig.53.

Datele tehnice generale ale redresorului sînt :

U_1 : 380 V

Nr.faze : 3

$U_{2,0}$ (c.c.): 62 V

I_2 nom. : 200 A

D.A. : 60 %

Reglaj : 50-200 A în 12 trepte

P_0 : 55 W

I_0 : ≈ 1 A

η la I_{nom} : 0,7

$\cos \varphi$ (la I_{nom}) : 0,65

Masă : 75 kg

Cote de gabarit conform figurii 62.

Răcire forțată prin ventilator.

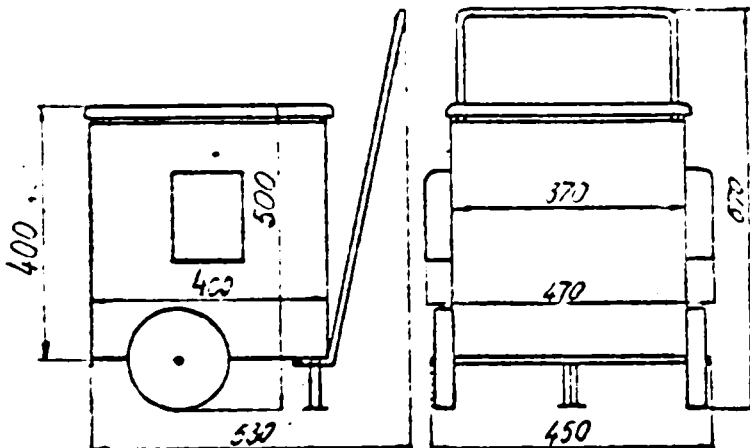
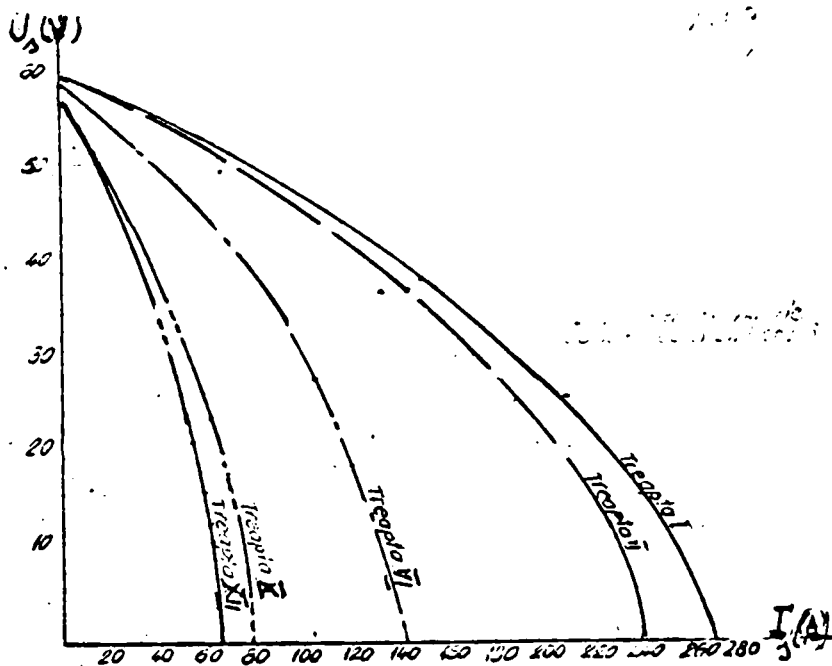


Fig.62

În fig.63 sînt arătate caracteristicile statice, $U_2 = f(I_2)$



U_2 = tensiune în secundar
 I_2 = curent în secundar

Fig.63

Redresorul se caracterizează prin greutate și dimensiuni reduse și simplitate în construcție. Menționăm că dimensiunile și greutatea acestuia sînt sensibil reduse în raport cu a unor produse similare străine, realizate pe alte principii de funcționare. Servește la sudarea cu diverse tipuri de electrozi, cu diametre de la $\varnothing = 2$ mm la $\varnothing = 4$ mm. Este destinat în special atelierului de montaj și reparații și șantierelor.

In figura 64. este dată fotografia redresorului.

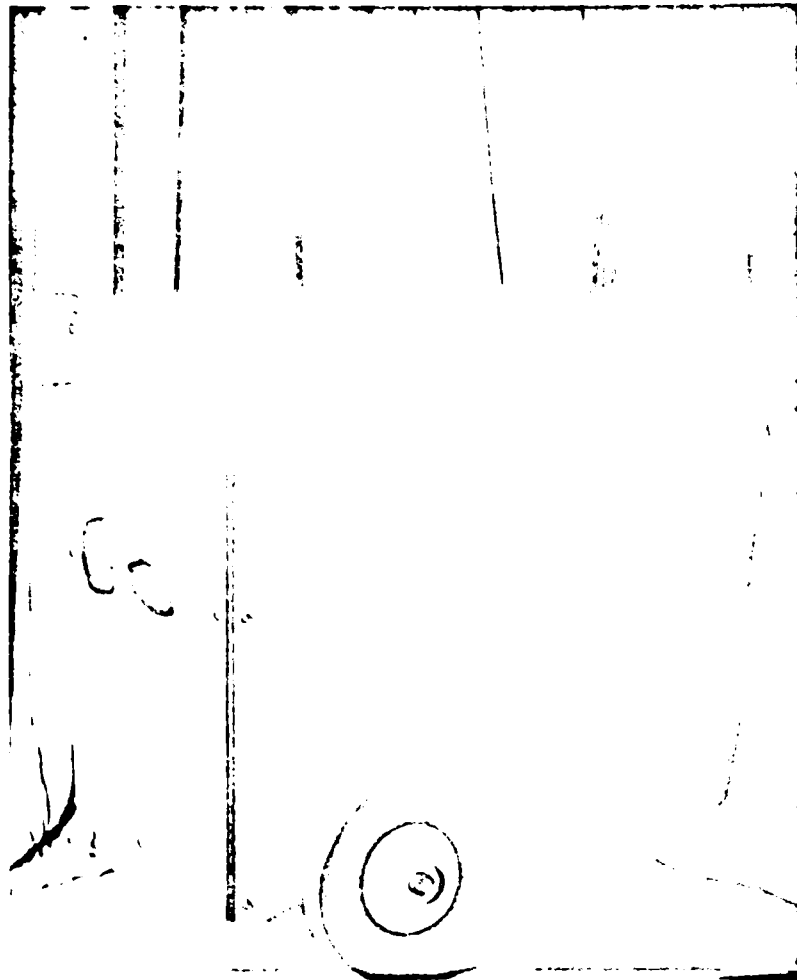


Fig.64.

Medalie de aur la "INTERNEMO" Köln 1972.

7. CONCLUZII

În diverse situații reactoarele care utilizează miezul transformatorului cu care lucrează în aceeași schemă, constituiesc o soluție avantajoasă. Funcționarea acestora este diferită și mai complexă, în raport cu reactorul cu construcție proprie și din această cauză necesită o analiză teoretică și experimentală aparte. Această analiză poate da indicații asupra locului și modului cel mai potrivit, privind aplicarea. Cap. "Indicații de proiectare" conține concluzii în această privință. Ca oricare altele, soluțiile prezentate au limite, a căror deplasare este posibilă printre altele, prin adâncirea analizei cantitative a fenomenelor și stabilirea unor metode simplificate de calcul. Principalele aspecte sînt cuprinse însă în lucrare și dau atît posibilitatea unor aplicații imediate, cît și indicații asupra direcției în care trebuie să continue cercetările.

BIBLIOGRAFIE

1. Dordea T.: Maşini electrice Institutul Politehnic Timişoara 1967.
2. Răduleţ R. : Bazele teoretice ale electrotehnicii, vol.II, III, Litogr.Invăţ.Bucureşti.
3. Sora C.: Bazele electrotehnicii, Institutul Politehnic Timişoara.
4. Richter R.: Maşini electrice vol.III, Ed.II, Editura tehnică Bucureşti 1960.
5. Blume I.F. : Transformer Engineering, Second Edition, John Wiley- New-York 1961.
6. Say M.G.: The performance and design of alternativ current machines, Pitman- London 1957.
7. Grosu St.: "On-load top changing for distribution transformers" Proceedings of the Institution of Electrical Engineer nr. 4-1972 pag.467-471.
8. Grosu St.: Neue Stellsysteme für Transformatoren unter Last. In : Probleme des Transformatoren Bau, Institut : Prüffel für elektrische Hochleistungs Technik , Simposium Berlin 1969.
9. Grosu St.: Invenţia : Reactor pentru reglajul sub sarcină la transformatoare de putere RSR nr. 43040.
10. Grosu St.: Invenţia " Choke Coil Arrangement for Regulation of the Lood of Output Transformer, "Anglia nr. 1047561.
11. Grosu St.: Invenţia : Drosselspulle zur Begrenzung der Stromstarke zwischen den Anzapfungskontakten von Stufentransformatoren (RFG, nr. 1264600).

12. Grosu St.: Invenția : Bobinaj pentru transformatoare de putere cu reglaj sub sarcină RSR nr. D.OSIM 47090.
13. Tihomirov P.N. Rascet transformatorov dlia dugovih electriceskikh pecei, Gosenergoizdat Moskva 1959 Leningrad.
14. - Standard book for Electrical Engineers Eighth Edition MC Graw New-York.
15. Centea O. Utilajele sudării electrice. Vol.I București Ed. Did.ped. 1963.
16. - Manualul Inginerului Electrician. Vol.V București, Editura Tehnică, 1957.
17. Günter H,
Herbert E. : "Fortschritte in der Entwicklung und Anwendung von Schweissgleichrichtern" ZIS- Mitteilungen Nr. 11- 1965.
18. - Catalog CKD - Praga : Fahrbares Siliziumschweissgerät.
19. Grosu St.: Invenția : Transformator monofazat pentru sudarea electrică cu arc, RSR D.OSIM 59615.
20. Grosu St.: Invenția : Transformator trifazat pentru sudarea electrică cu arc, RSR, D.OSIM 60101.
21. Grosu St.: Invenția : Transformers for electric arc welding Anglia. Nr.
22. Grosu St. Invenția "Aparat de alimentare a arcului electric la sudarea electrică RSR nr. 51803.
23. Grosu St. Invenția : Agregat pentru sudarea electrică cu arc, RSR nr. 52026.
24. Grosu St. Invenția : Schweissgerät für elektrische Lichtbogenschweissung RFG, nr. 1690614.
25. Rogowski Despre câmpul de scăpări și coeficienții de inducție mutuală de scăpări. F.Arh. 1905/28.

26. Hortopan G. Aparate electrice, Editura Didactică pedagogică București 1967.
27. Rötters A. Electromagnetic Devices Ninth Printing John Wiley London 1963.
28. Paton B.K.
Lebedev V.K. Elementi rasciotov țepej i apparatov pere-mon-toke dlja dugavoi sverski - Kiev 1953.
29. Gheorghiu I.S.
Fransua A. Tratat de mașini electrice, Ed. Academiei RSR. 1970.
30. Bălă C. Les pertes supplémentaires dans les enroulements des transformateurs. Rev. Roum. Sch. Techn.-Elektrotehn. et Energ. 12, 4, 537-547 Buc. 1967.
31. Grosu St. Invenția : Instalație pentru sudarea electrică cu arc cu mai multe posturi RSR D.OSIM 51188.
32. Grosu St. Invenția : Schaltanordnung für die Lichtbogen-schweissung RFG nr. 1690608.
33. Smirenin B.A. Manual de radiotehnică vol.I. Editura tehnică 1953.
34. Meyerhaus A. Transformatoren und Drosselspullen mit radialer Blechung, BBC Mitteilungen nr.6, 1956.
35. Tugulea, Moraru,
Bălă. Cîmpul electromagnetic și pierderile suplimentare în transformatoarele electrice cu cuva ecranată, St.cerc.energ.electr. Tom 18, nr.4, pag.819-837, Edit. Academiei RSR, 1968.
36. Grosu St. Invenția : Contactor pentru comutatoarele de reglaj sub sarcină la transformatoare, RSR nr. 50478.
37. Grosu St. "Achievements and Prospects in the Utilization of Kinetic Energy", IEEE, Transactions on Industry and General Applications Vol. IGTG-1970 p 647-652