

UNIVERSITATEA DIN CRAIOVA
FACULTATEA DE INGINERIE ELECTRICĂ

**TEZĂ DE DOCTORAT
REZUMAT**

**SISTEM STATIC MULTIFUNȚIONAL CU APLICAȚII
ÎN MENTENANȚA ECHIPAMENTELOR
HIDROELECTRICE**

DOCTORAND,
Ing. DINU ROXAN CONSTANTIN
DOBOȘERIU

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC,
Prof. dr. ing. ALEXANDRU BITOLEANU

CRAIOVA
2016

CUPRINS

INTRODUCERE

Justificarea oportunității temei

Conținutul tezei în raport cu obiectivele stabilite

I. ÎNCĂLZIREA ELECTRICĂ PRIN INDUCȚIE

I.1. ASPECTE TEORETICE ALE ÎNCĂLZIRII PRIN INDUCȚIE

I.1.1. Adâncimea de pătrundere a curenților turbionari

I.1.2. Sistemul inductor – corp încălzit

I.1.2.1. Parametrii corpului încălzit și ai inductorului

I.1.2.2. Schema electrică echivalentă a sistemului inductor - corp încălzit

I.1.3. Puterea activă indusă, randamentul electric și factorul de putere

I.1.4. Calculul simplificat al puterii transmise piesei

I.2. PARTICULARITĂȚI PRIVIND ÎNCĂLZIREA PRIN INDUCȚIE A ȚEVILOR LUNGI

I.2.1. Cerințe și elemente tehnologice

I.2.2. Algoritm pentru calculul puterilor

I.2.3. Exemplu de calcul

I.3. INFLUENȚA FRECVENȚEI DE LUCRU

I.3.1. Influența devierii de la frecvența de rezonanță

I.3.1.1. Influența devierii de la frecvența de rezonanță dacă tensiunea dată de inverter este constantă

I.3.1.2. Influența devierii de la frecvența de rezonanță dacă puterea utilă este constantă

I.4. PROCESE TEHNOLOGICE BAZATE PE ÎNCĂLZIRE, ÎN MENTENANȚA ECHIPAMENTELOR HIDROENERGETICE

I.4.1. Uscarea mașinilor electrice

I.4.2 Uscarea în curent electric continuu de la surse independente

I.4.3. Uscarea prin metoda pierderilor în fierul activ al statorului

I.4.4. Uscarea transformatoarelor

I.4.5. Demontarea îmbinărilor realizate prin presare

II. INVERTOARE CU CIRCUIT REZONANT PENTRU APLICAȚII DE ÎNCĂLZIRE PRIN INDUCȚIE

II.1. STRUCTURA SISTEMELOR DE ÎNCĂLZIRE PRIN INDUCȚIE

II.2. FRECVENȚA DE REZONANȚĂ A SARCINII ECHIVALENTE

II.3. CERINȚELE SURSEI DE ALIMENTARE CU CIRCUIT REZONANT

III. INFLUENȚA TEMPERATURII ȘI ARMONICILOR ASUPRA PARAMETRILOR ȘI PERFORMANȚELOR ENERGETICE

III.1. INFLUENȚA TEMPERATURII ASUPRA PARAMETRILOR ȘI PERFORMANȚELOR ENERGETICE

III.2. INFLUENȚA ARMONICILOR ASUPRA PARAMETRILOR ȘI PERFORMANȚELOR ENERGETICE

III.2.1. Exemplu numeric

III.3. INFLUENȚA ARMONICILOR ASUPRA FRECVENȚEI DE REZONANȚĂ

IV. DETERMINĂRI EXPERIMENTALE PENTRU CALCULUL PARAMETRILOR ECHIVALENȚI AFERENȚI APLICAȚIILOR DE ÎNCĂLZIRE DE LA CHE LOTRU

IV.1. STRUCTURA EXPERIMENTALĂ

IV.2. FORME DE UNDĂ ȘI ANALIZA ARMONICĂ

- IV.3. ANALIZA ENERGETICĂ
- IV.4. PARAMETRII SARCINII ECHIVALENTE
 - IV.4.1. Cazul bobinei cu 33 spire
 - IV.4.2. Cazul bobinei cu 38 spire
- IV.5. CONCLUZII
- V. MODELAREA SISTEMULUI STATIC MULTIFUNȚIONAL
 - V.1. MODELAREA SISTEMULUI DE ÎNCĂLZIRE PRIN INDUCȚIE CU INVERTOR DE TENSIUNE CU TRANZISTOARE BIPOLARE CU BAZA IZOLATĂ (IGBT) ȘI REZONANȚĂ PARALEL
 - V.2. MODELAREA SISTEMULUI DE ÎNCĂLZIRE PRIN INDUCȚIE CU INVERTOR DE CURENT CU TRANZISTOARE BIPOLARE CU BAZA IZOLATĂ (IGBT) ȘI REZONANȚĂ PARALEL
- VI. ESTIMAREA PERFORMANȚELOR INSTALAȚIEI ÎN CAZUL ÎNCĂLZIRII ȚEVIILOR LUNGI
 - VI.1. PERFORMANȚELE SISTEMULUI DE ÎNCĂLZIRE PRIN INDUCȚIE CU INVERTOR DE CURENT CU TRANZISTOARE BIPOLARE CU BAZA IZOLATĂ (IGBT) ȘI REZONANȚĂ PARALEL
 - VI.2. PERFORMANȚELE SISTEMULUI DE ÎNCĂLZIRE PRIN INDUCȚIE CU INVERTOR DE TENSIUNE CU TRANZISTOARE BIPOLARE CU BAZA IZOLATĂ (IGBT) ȘI REZONANȚĂ PARALEL
 - VI.3. INFLUENȚA FRECVENȚEI DE COMANDĂ A INVERTORULUI
 - VI.4. COMPARAȚIE ÎNTRE PERFORMANȚELE INVERTORULUI DE TENSIUNE ȘI INVERTORULUI DE CURENT
- VII. PROIECTAREA PĂRȚII DE FORȚĂ A SISTEMULUI STATIC MULTIFUNȚIONAL DESTINAT MENTENANȚEI ECHIPAMENTELOR HIDROELECTRICE
 - VII.1. CONFIGURAREA SISTEMULUI STATIC MULTIFUNȚIONAL
 - VII.2. DIMENSIONAREA BOBINEI DE ADAPTARE
 - VII.2.1. Analiza curenților armonici
 - VII.3. DATELE NOMINALE ȘI ALEGEREA PRINCIPALELOR ELEMENTE ALE SCHEMEI DE FORȚĂ
 - VII.3.1. Calculul mărimilor caracteristice
 - VII.3.2. Alegerea modulelor IGBT și dimensionarea radiatoarelor acestora
 - VII.3.3. Alegerea elementelor semiconductoare ale redresorului și dimensionarea radiatoarelor acestora
 - VII.3.4. Calculul și alegerea condensatorului din circuitul intermediar
 - VII.3.5. Calculul capacității condensatorului de compensare
- VIII. ESTIMAREA PERFORMANȚELOR SISTEMULUI STATIC MULTIFUNȚIONAL DESTINAT MENTENANȚEI ECHIPAMENTELOR HIDROELECTRICE
 - VIII.1. PERFORMANȚELE INSTALAȚIEI DE ÎNCĂLZIRE PRIN INDUCȚIE CU INVERTOR DE TENSIUNE CU TRANZISTOARE BIPOLARE CU BAZA IZOLATĂ ȘI REDRESOR SEMICOMANDAT
 - VIII.1.1. Performanțele instalației în cazul utilizării inductorului cu 33 spire
 - VIII.1.2. Performanțele instalației în cazul utilizării inductorului cu 38 spire
 - VIII.2. PERFORMANȚELE INSTALAȚIEI DE ÎNCĂLZIRE PRIN INDUCȚIE CU INVERTOR DE TENSIUNE CU TRANZISTOARE BIPOLARE CU BAZA

IZOLATĂ ȘI REDRESOR COMANDAT

VIII.2.1. Performanțele instalației în cazul utilizării inductorului cu 33
spire

VIII.2.2. Performanțele instalației în cazul utilizării inductorului cu 38
spire

VIII.3. COMPARAȚIE ÎNTRE PERFORMANȚELE INSTALAȚIEI CU CELE DOUĂ
TIPURI DE REDRESOARE

IX. CONCLUZII

BIBLIOGRAFIE

ANEXA 1

ANEXA 2.1

ANEXA 2.2

ANEXA 3

INTRODUCERE

Motivația mea pentru a parcurge etapa de pregătire prin doctorat a fost, în principal, dorința de perfecționare pe o direcție care să îmi fie utilă în activitatea mea de coordonare a unui colectiv ce activa în domeniul mentenanței echipamentelor din centralele hidroelectrice. Tematica tezei de doctorat a fost stabilită în vara anului 2011 când am avut o discuție dedicată cu d-nul prof. dr. ing. Alexandru Bitoleanu. Cu acest prilej am aflat că, o propunere de proiect finanțat din fonduri structurale, elaborată de domnia sa și d-na prof. dr. ing. Mihaela Popescu, tocmai fusese declarată eligibilă cu un punctaj foarte bun. În acest context, domnia sa a venit în întâmpinarea opțiunii mele și mi-a propus să identificăm o temă care să interfereze cu tematica proiectului. Am analizat procesele tehnologice care utilizează încălzirea din secția pe care o coordonam, și am ajuns la concluzia că, pentru a avea un grad ridicat de flexibilitate, este necesar un sistem static multifunțional care să poată furniza atât energie de c.c. cât și energie de c.a., și, în același timp, să permită reglarea frecvenței și a puterii furnizate. După două săptămâni, tema a fost definitivată ca **“Sistem static multifunțional cu aplicații în mentenanța echipamentelor hidroelectrice”**. Obiectivele stabilite au fost:

1. Identificarea unor structuri de sisteme statice care să utilizeze și încălzirea prin inducție și, în același timp, să permită reglarea tensiunii/frecvenței și a puterii furnizate.
2. Modelarea acestor structuri, determinarea performanțelor energetice și stabilirea structurii mai avantajoase.
3. Proiectarea structurii alese.
4. Achiziționarea unui astfel de sistem, punerea în funcțiune și efectuarea de verificări experimentale.

În consecință, după admiterea la doctorat am devenit membru în echipa de cercetare a proiectului “Sistem pentru încălzirea prin inducție cu eficiența energetică ridicată_1”, proiect POS CCE, Operațiunea 2.1.1: Proiecte de cercetare în parteneriat între universități/institute de cercetare-dezvoltare și întreprinderi, beneficiar SC INDAELTRAC SRL, Nr.258/28.12.2011.

La solicitarea beneficiarului, proiectul a fost direcționat spre conceperea, analiza, proiectarea și realizarea unui model experimental de Sistem pentru încălzirea prin inducție cu eficiență energetică ridicată destinat încălzirii finale a țevilor lungi, în procesul de laminare.

Proiectul s-a încheiat, conform prevederilor la finalul anului 2013 și au fost îndeplinite toate obiectivele stabilite.

Ca membru în echipa de cercetare am participat numai la unele etape stabilite de echipa de management a proiectului, iar elemente ale acestor etape se regăsesc în teza de doctorat.

Trebuie să subliniez, cu regret, că activitatea de realizare a tezei a fost puternic perturbată de intrarea în insolvență a S.C. Hidroelectrica SA și reorganizările ce au urmat. Au fost două consecințe directe:

1. Întreruperea stagiului de pregătire pentru doi ani;
2. Imposibilitatea achiziționării sistemului conceput, analizat și proiectat în cadrul tezei. Evident că, a 2-a consecință a condus la nerealizarea ultimului obiectiv al tezei.

În urma analizei efectuată cu coordonatorul științific la începutul anului 2016, acesta a decis înlocuirea ultimului obiectiv cu alte două:

- 4.1. Determinări experimentale pentru calculul parametrilor echivalenți aferenți aplicațiilor de încălzire de la CHE Lotru;
- 4.2. Determinarea performanțelor energetice pentru aplicații din portofoliul secției de mentenanță de la CHE Lotru.

Justificarea oportunității temei

În stabilirea temei tezei de doctorat, motivația proprie precizată anterior, a constituit punctul de pornire.

În exploatarea transformatoarelor de măsură și a mașinilor electrice care echipează stațiile de evacuare a energiei produse de centralele hidroenergetice apare necesitatea uscării acestora, fie ca urmare a umezirii izolației bobinajelor, fie după reparații, în cadrul cărora se înlocuie, total sau parțial, bobinajul sau izolația. Umezirea izolației poate fi cauzată de pierderea etanșeității între reperle componente și de pătrunderea umezelii atmosferice și este favorizată, în cazul transformatoarelor, de faptul că uleiul electroizolant este hidrosopic.

Prin Normativul de încercări și măsurători la echipamente și instalații electrice, PE116/94, se impune, spre exemplu, ca, pentru transformatoarele de curent ce lucrează la tensiuni cuprinse între 110kV- 400kV, valoarea rezistenței de izolație să fie mai mare de 5000 MΩ. În caz contrar, nu se admite punerea sub tensiune.

Uscarea bobinajelor poate fi efectuată prin diferite metode: prin încălzire exterioară, prin încălzirea cu curent de la o sursă independentă, prin încălzirea cu curent de scurtcircuit, prin ventilație, prin pierderile din fierul activ sau în corpul echipamentului. În cazurile în care, printr-o metodă oarecare nu se reușește să se obțină temperatura de uscare necesară, sau când încălzirea diferitelor piese nu este uniformă, se folosește metoda de uscare combinată, care constă în combinarea a două metode.

În prezent, la Hidroserv Râmnicu Valcea, uscarea transformatoarelor utilizate în stațiile de transformare de mare putere se face prin combinarea încălzirii prin inducție la frecvența de 50 Hz cu încălzirea prin conducție.

Este evident, iar analiza energetică ce s-a realizat demonstrează acest lucru, că soluția utilizată este depășită moral și tehnic.

*

* *

În același timp, contextul științific și metodele de investigare existente au susținut oportunitatea temei stabilite.

O modalitate modernă și eficientă de încălzire o constituie utilizarea unui câmp electromagnetic variabil în timp. În volumul piesei metalice se induc curenți turbionari, a căror distribuție depinde de geometria piesei și de proprietățile de material, dar și de frecvența câmpului electromagnetic. Cu cât frecvența este mai ridicată cu atât pierderile Joule datorate curenților turbionari se distribuie preponderent într-o zonă mai îngustă, situată în imediata vecinătate a suprafeței piesei. Principal, la încălzirea pieselor metalice contribuie și pierderile datorate ciclului de histerezis. Încălzirea prin inducție are câteva avantaje importante: poluare practic inexistentă, o bună repetabilitate, reglarea grosimii stratului încălzit, automatizare relativ ușoară etc. Aceste avantaje justifică utilizarea pe scară largă a acestui procedeu în multe unități producătoare de țevi laminate. Este interesant de observat că oțelul pierde proprietățile magnetice la încălzirea peste aproximativ 700°C. Această temperatură este cunoscută ca temperatura Curie. Acest lucru înseamnă că, peste 700°C, nu se produce o încălzire a materialului din cauza pierderilor histerezis. Orice încălzire peste această temperatură trebuie să fie asigurată numai prin curenți turbionari. Acest lucru face ca încălzirea oțelului peste 700°C să fie o provocare pentru sistemele de încălzire prin inducție.

Deși principiul încălzirii prin inducție este cunoscut de mult timp, elementele legate de cercetarea industrială, care să permită implementarea metodei cu eficiență energetică ridicată, sunt secrete de fabricație sau sunt protejate prin brevete.

Având în vedere procesele tehnologice de la Hidroserv Râmnicu Vâlcea, care utilizează încălzirea, pentru a avea un grad ridicat de flexibilitate, este necesar un sistem static multifuncțional care să poată furniza atât energie de c.c. cât și energie de c.a., și, în același timp, să permită reglarea frecvenței și a puterii furnizate. Acesta poate conține un redresor trifazat semicomandat sau comandat, în punte și un invertor monofazat de tensiune cu tranzistoare bipolare cu baza izolată (IGBT) capabil să funcționeze cu sarcină rezonantă.

Se apreciază că încălzirea prin inducție este practic obligatorie în cazul montării prin presare a unor componente mecanice și al demontării acestora.

Conținutul tezei în raport cu obiectivele stabilite

Teza elaborată este structurată pe 8 capitole de fond, o introducere și concluzii.

Capitolul I este structurat pe patru subcapitole și *este destinat fundamentării teoretice necesare realizării obiectivelor tezei.*

- I.1. Aspecte teoretice ale încălzirii prin inducție.
- I.2. Particularități privind încălzirea prin inducție a țevilor lungi.
- I.3. Influența frecvenței de lucru.
- I.4. Procese tehnologice bazate pe încălzire, în mentenanța echipamentelor hidroenergetice.

Aspectele electro-termice ale procesului de încălzire prin inducție prezentate în § I.1, I.2 și I.4 sunt preluate din literatura de specialitate (în special din [12], [69] și [18]), autorul tezei aducând câteva contribuții minore și realizând sistematizarea și algoritimizarea într-o formă aplicabilă, utilă.

Astfel, după identificarea cerințelor și elementelor tehnologice specifice s-a elaborat un algoritm pentru calculul puterilor și a mărimilor electrice caracteristice, atât pentru invertorul de tensiune, cât și pentru invertorul de curent.

În continuare, analiza influenței frecvenței de lucru, pe baza algoritmului elaborat, a relevat următoarele că creșterea frecvenței peste valoarea de rezonanță determină scăderea adâncimii de pătrundere dar are consecințe favorabile asupra performanțelor energetice.

Din relația (1.52) se constată că, la scăderea frecvenței sub valoarea de rezonanță, pentru a păstra constantă puterea utilă, curentul trebuie să crească deoarece:

1. Este invers proporțional cu $f^{1/4}$; spre exemplu, o reducere cu 20% a frecvenței determină creșterea de 1,057 ori a curentului;
2. Este invers proporțional cu coeficientul F , care poate scădea dramatic cu frecvența; spre exemplu, dacă la rezonanță $d/\delta=4$, o reducere cu 20% a frecvenței determină creșterea de 1,14 ori a curentului.

Rezultă o creștere totală a curentului de 1,205 adică cu peste 20%. Această creștere se va regăsi, în proporție și mai mare datorită necompensării componentei reactive, în curentul absorbit de la invertor și rețea.

În finalul capitolului, se prezintă procesele tehnologice bazate pe încălzire de la Hidroserv Râmnicu Vâlcea, pentru mentenanța echipamentelor hidroenergetice, respectiv: uscarea mașinilor electrice; uscarea transformatoarelor; demontarea îmbinărilor realizate prin presare.

Capitolul II este structurat pe trei subcapitole și *se încadrează în primul obiectiv al tezei.*

- II.1. Structura sistemelor de încălzire prin inducție
- II.2. Frecvența de rezonanță a sarcinii echivalente
- II.3. Cerințele sursei de alimentare cu circuit rezonant

§ II.1 este o sinteză referitoare la structura sistemelor cu invertoare de curent și tensiune, realizată de autor, pe baza literaturii de specialitate. Se desprind două concluzii:

1. Din punct de vedere istoric, performanța inverterului sursă de tensiune a fost ignorată datorită reglajului slab al puterii active transmise sarcinii, necesității utilizării de tiristoare cu timp de blocare mic și de diode de putere rapide.
2. Prin îmbunătățirea continuă a performanțelor tiristoarelor și dezvoltarea spectaculoasă a tranzistoarelor bipolare cu baza izolată (IGBT), a devenit oportună reconsiderarea performanțelor acestor invertoare [5], [20]. Este motivul pentru care, în cadrul tezei se vor avea în vedere, pentru analiză, cele două tipuri de invertoare realizate cu IGBT-uri.

§ II.2 este contribuția echipei de cercetare din care doctorandul a făcut parte. Astfel, pornind de la realitatea că bobina echivalentă a sarcinii este compusă din bobina de inducție și corpul de încălzit și, în consecință, are o rezistență ce nu poate fi neglijată, se deduce expresia frecvenței de rezonanță existentă în literatura de specialitate, dar utilizând diagramele fazoriale.

Capitolul se încheie cu sintetizarea cerințelor sursei de alimentare cu circuit rezonant. Se conchide că, sursa de alimentare trebuie să asigure:

- 1) Putere de ieșire constantă;
- 2) Tensiunea aplicată condensatorului să fie limitată;
- 3) Curentul sarcinii limitat;
- 4) Funcționare eficientă.

De asemenea, se subliniază că, în urma consultării bibliografiei reprezentative, s-a decis analiza detaliată a două variante ale sistemului de încălzire prin inducție a țevilor, cu eficiență energetică ridicată.

- 1) Sistem de încălzire prin inducție cu inverter de tensiune, cu modulație în amplitudine, cu tranzistoare bipolare cu baza izolată (IGBT) și rezonanță paralel.
- 2) Sistem de încălzire prin inducție cu inverter de curent, cu modulație în amplitudine, cu tranzistoare bipolare cu baza izolată (IGBT) și rezonanță paralel.

Capitolul III este dedicat analizei influenței temperaturii și armonicilor asupra parametrilor și performanțelor energetice și aduce elemente pentru *realizarea primului obiectiv al tezei*. Analiza s-a făcut în Excel cu un program care utilizează relațiile din Cap. I.

Astfel, prima parte intitulată “Influența temperaturii asupra parametrilor și performanțelor energetice”, se referă la încălzirea unei țevi cu diametrul exterior de 0,076m, utilizând același tip de inductor, în două situații distincte:

- la o temperatură medie peste pragul Curie: 950°C (Cazul 1);
- la o temperatură medie sub pragul Curie: 350°C (Cazul 2).

Cele mai importante constatări care rezultă din analiza valorilor numerice obținute sunt prezentate în continuare.

1. Numai câteva valori sunt mai mari, în cazul 2, respectiv:
 - adâncimea de pătrundere în conductoarele inductorului, de peste 4,5 ori; cauza o constituie scăderea frecvenței de rezonanță de aproape 20 de ori;
 - timpul necesar trecerii prin cele 5 inductoare, de peste 16 ori;
 - factorul de putere la bornele inductorului, de peste 2,7 ori.
2. Cele mai multe valori sunt mai mici sau mult mai mici. Dintre acestea:
 - frecvența de rezonanță, de aproape 20 ori; cauza principală este creșterea permeabilității magnetice relative, de 10 ori;
 - valorile raportate ale rezistenței și reactanței țevii, de peste 37 ori;
 - reactanța echivalentă, de cca. 18 ori;
 - puterea utilă a unui inductor, de peste 50 ori;
 - curentul absorbit de un inductor, de aproape 3 ori;
 - tensiunea pe inductor, de aproape 50 ori;

- puterea reactivă a inductorului, de peste 135 ori;
- puterea activă a inductorului, de aproape 50 ori;
- puterea aparentă a inductorului, de cca. 135 ori.

Rezultă că, același convertor, debitând la ieșire același curent activ de cca. 500A (curentul nominal), dacă încălzește aceeași țevă dar sub punctul Curie (Cazul 2), comparativ cu încălzirea peste punctul Curie (Cazul 1), realizează performanțe energetice mult mai slabe, respectiv:

1. creșterea temperaturii este de numai 50⁰C față de 110⁰C;
2. productivitatea este de cca. 16 ori mai mică (raportul vitezelor).

Rezultă că nu există convertor static de tensiune și frecvență care să poată fi folosit, cu aceleași performanțe energetice bune, în orice aplicație de încălzire prin inducție.

§ III.2. Influența armonicilor asupra parametrilor și performanțelor energetice are în vedere alimentarea de la un invertor monofazat pentru care se neglijează timpul mort și utilizează dezvoltarea în serie Fourier a tensiunii.

Influența este analizată pe baza unui exemplu numeric pentru care se calculează parametrii și mărimile energetice pe armonici. Se menționează că:

- s-au luat în considerare primele 6 armonici (n=1, 3, 5, 7, 9, 11);
- se neglijează circuitul de adaptare;
- inductorul este o bobină, cu $d_1=0,168$ m, $h_1=0,95$ m, $N=26$ spire;
- frecvența fundamentală este $f_r=6947$ Hz;
- corpul încălzit este o țevă Oțel Carbon 0,8% cu diametrul exterior $d_{2ext}=0,128$ m, grosimea peretelui $a=6,5$ mm, lungimea de 15 m și viteza de deplasare $v=0,5$ m/s;
- pentru calcule s-au utilizat relațiile din capitolul I și din algoritmul de calcul a puterilor (pentru puteri).

În urma analizei rezultatelor obținute se desprind următoarele concluzii:

1. Deși distorsiunea tensiunii furnizată de invertor este de cca. 50%, distorsiunea curentului prin inductor este de numai 7,9%;
2. În condiții reale, când între invertor și inductor există un circuit de adaptare, distorsiunea curentului prin inductor este mai mică;
3. 97% din puterea transmisă țevii se realizează pe fundamentala curentului.

Concluzia finală este că luarea în considerare a armonicilor fundamentale în argumentarea teoretică și deducerea unor relații de calcul este justificată și foarte aproape de realitate. Mai mult, calculul este acoperitor, deoarece există o rezervă de putere care se transferă pe armonicile superioare.

Ultimul subcapitol tratează influența armonicilor asupra frecvenței de rezonanță.

Pentru a analiza acest aspect, a fost realizat modelul sistemului invertor de tensiune-circuit de adaptare inductiv-inductor-țevă-condensator de compensare, în mediul Matlab-Simulink.

Apoi, s-a calculat valoarea efectivă a curentului debitat de invertor, pentru mai multe frecvențe de comandă situate în jurul frecvenței de rezonanță a circuitului echivalent.

Se constată că, frecvența la care are loc funcționarea la rezonanță (care minimizează valoarea efectivă a curentului dat de invertor) este mai mare decât frecvența de rezonanță a circuitului echivalent inductor-țevă în paralel cu condensatorul de compensare (7.05kHz față de 7.015kHz).

Cap. IV. Determinări experimentale pentru calculul parametrilor echivalenți aferenți aplicațiilor de încălzire de la CHE Lotru și **constituie suportul indeplinirii obiectivului 4.1.**

Conține 4 subcapitole, respectiv:

- IV.1. Structura experimentală;
- IV.2. Forme de undă și analiza armonică;

IV.3. Analiza energetică;

IV.4. Parametrii sarcinii echivalente;

IV.5. Concluzii.

Apreciind că transformatorul de curent din stația Ciunget de 110kV este sarcina tipică, sau realizat determinări experimentale aferente procesului de uscare a acestuia.

Pentru aceasta, transformatorul de curent este învelit cu o folie izolatoare de textolit, peste care se realizează o bobină constituită dintr-un număr de spire. Bobina obținută are forma de trunchi de con având diametrele bazelor de 600mm, respectiv 400mm și înălțimea de 700mm.

Conductorul utilizat este realizat din cupru flexibil, clasa 5 conform SR EN 60228, profil multifilar (diametrul sârmei de 0,51mm), cu diametrul exterior de 15,8mm. Izolația conductorului cu grosimea de 1,6mm este din cauciuc siliconic, rezistent la 180°C.

Alimentarea s-a făcut de la autotransformatorul unei surse de sudură capabile să furnizeze 1000A c.c. S-au realizat două structuri ale bobinei:

1. Bobina cu 33 spire pentru valorile efective ale curentului și tensiunii de 150A, respectiv 59V;
2. Bobina cu 38 spire pentru valorile efective ale curentului și tensiunii de 130A, respectiv 56V.

Pentru fiecare din cele două structuri, s-au înregistrat curentul și tensiunea la bornele bobinei echivalente, utilizând un osciloscop Tektronix TDS3000. Curentul a fost înregistrat printr-un shunt de 5mΩ/60mV, clasa de precizie 0,02%, frecvența de achiziție fiind 100kHz.

Forma de undă a curentului, obținută pe baza datelor achiziționate, conține armonici de înaltă frecvență. Prezența acestora se datorează atât shuntului de măsură în care se induce tensiuni datorate perturbațiilor electromagnetice existente în mediul exterior, cât și sensibilității osciloscopului. În vederea utilizării ulterioare în calculul parametrilor, forma de undă a fost filtrată cu un filtru de ordinul I având frecvența de tăiere de 10kHz, care a eliminat armonicile superioare.

Dacă se consideră forma de undă filtrată a curentului, factorul total de distorsiune armonică este 3,8%, iar factorul parțial de distorsiune armonică corespunzător primelor 31 armonici este 2,54%, puțin mai mic față de cel corespunzător unde nefiltrate. Rezultă că procesul de filtrare nu afectează armonicile joase, cu impact asupra aspectelor energetice.

Pentru analiza energetică completă, au fost calculate și puterile activă (P) și aparentă (S) și factorul de putere global (PF).

Datele numerice obținute arată că performanțele energetice sunt reduse. Astfel, factorul de putere global are valori mici, cca. 38% în cazul bobinei cu 33 spire și cca. 45% în cazul bobinei cu 38 spire.

Dacă este evident că procesul de uscare prin încălzire a transformatorului de curent este mai eficient dacă bobina acoperă mai bine înălțimea acestuia, respectiv numărul de spire al bobinei este mai mare, iată că și performanțele energetice sunt mai bune procedând în acest fel.

O mărime care susține căutarea unor noi surse și tehnologii pentru uscarea prin încălzire a transformatoarelor de curent, dar și a altor componente din centralele hidroenergetice, este puterea care poate fi compensată. Pentru cazurile analizate, puterea ce poate fi compensată, cu consecințe favorabile asupra sistemului de alimentare este de cca. (2-2,5) puterea utilă.

Sarcina echivalentă, compusă din bobina realizată și transformatorul de curent ca și corp de încălzit, este asimilată unui circuit R-L. Pentru determinarea celor doi parametri se poate proceda în două moduri.

M1. Se aproximează regimul ca fiind sinusoidal și se utilizează formulele de undă filtrate.

M2. Se aproximează regimul ca fiind sinusoidal și se utilizează relațiile deduse din puteri, în două variante: a) se utilizează formulele de undă brute; b) se utilizează formulele de undă filtrate.

Comparativ cu cazul M1, erorile din cazul M2 sunt sub 1%, iar erorile obținute în cazurile M2a) și M2b) comparativ cu cazul I sunt sub 2%, pentru rezistență și sub 0,4% pentru

inductivitate. În consecință, se poate lucra cu oricare din valorile rezistenței, respectiv inductivității.

Capitolul V este destinat modelării sistemului static multifunțional, în circuit deschis și *contribuie la realizarea celui de al 2-lea obiectiv*. Modelarea în mediul Matlab Simulink include toate elementele componente de natură electrică ale instalației și este realizat cu elemente din biblioteca SimPowerSystems. S-au obținut, astfel, modelele pentru:

1. Sistemul de încălzire prin inducție cu învertor de tensiune cu tranzistoare bipolare cu baza izolată (IGBT) și rezonanță paralel;
2. Sistemul de încălzire prin inducție cu învertor de curent cu tranzistoare bipolare cu baza izolată (IGBT) și rezonanță paralel.

Parametrii caracteristici diodelor din blocul redresor respectă valorile de catalog ale diodelor redresoare reale DD400S17K6CB2, fabricate de EUPEC, având următorii parametri principali de catalog.

Modelul părții de forță a invertoarelor a fost, de asemenea, construit ca bloc independent și conține cele patru tranzistoare IGBT împreună cu cele patru diode antiparalel. Au fost adăugate blocuri de calcul al puterilor disipate de fiecare tranzistor și de salvare a valorilor acestora în spațiul de lucru Matlab.

Blocurile tranzistoarelor, preluate din biblioteca SimPowerSystems/Power Electronics, au valorile parametrilor specifici setate conform datelor de catalog ale tranzistoarelor FD800R17KE3-B2, fabricate de Powerex.

Una dintre diferențele dintre cele două modele constă în structura redresorului trifazat în punte care, în cazul convertorului static de tensiune și frecvență cu caracter de sursă de curent, este complet comandat. Apare astfel necesitatea utilizării unui bloc de comandă pe grilă pentru tiristoarele din blocul redresorului. Pentru simplitate, în acest sens, a fost utilizat blocul de comandă pe grilă Synchronized 6-Pulse Generator, disponibil în biblioteca Simulink SymPowerSystems / Extra Library / Control Blocs. Acest bloc implementează principiul comenzii în fază pentru redresoarele trifazate în punte, cu tiristoare.

Capitolul VI este dedicat estimării performanțelor instalației în cazul încălzirii țevilor lungi, în cele două variante stabilite, *constituie îndeplinirea obiectivului 2*.

Performanțele au fost determinate prin simulare, utilizând modelele prezentate în Cap. V și considerându-se, ca și sarcină, patru tipodimensiuni de țevi, cu inductorul și condensatorul de compensare aferente. Frecvența de comandă a inverterului a fost frecvența de rezonanță a inductorului echivalent în paralel cu condensatorul de compensare. S-a urmărit, în primul rând, ca pe baza analizei performanțelor, să se stabilească soluția mai avantajoasă, pentru care să se proiecteze elementele principale.

Se menționează că, pentru a obține rezultate cu acuratețe ridicată, în condițiile utilizării de blocuri de tip comutator (diode, tranzistoare IGBT, etc.), a fost adoptat un pas variabil de simulare, prin alegerea unei metode de integrare de tipul ode15 sau ode23.

Data fiind frecvența de rezonanță a circuitului oscilant inductor – condensator de compensare, ce poate atinge valoarea de 7 kHz, a fost adoptat un pas maxim de simulare de 1 μ s, care este de cel puțin 100 de ori mai mic decât perioada corespunzătoare de oscilație.

Principalele performanțe în cazul instalației cu învertor de curent sunt:

1. Tensiunea la bornele inductorului, curentul prin acesta și curentul prin condensator sunt practic sinusoidale;
2. Puterea activă la ieșirea inverterului are valoarea minimă de 118 kW, iar valoarea maximă de 603 kW;
3. Randamentul convertorului depinde atât de valoarea curentului, cât și de frecvența de comandă și are valoarea minimă 0,692, respectiv valoarea maximă 0,929;
4. Valorile extreme ale randamentului electric sunt 0,688, respectiv 0,905;

5. Valorile extreme ale randamentului total sunt 0,544, respectiv 0,738;
6. Factorul de putere în secundarul transformatorului are valorile extreme 0,668, respectiv 0,78;
7. Tensiunea maximă ce solicită tranzistoarele este maximă la comutație, are valori importante, iar valoarea cea mai mare este de 3614 V, valoare nepermisă.

Pentru instalația cu inverter de curent, principalele performanțe sunt:

1. Tensiunea la bornele inductorului, curentul prin acesta și curentul prin condensator sunt practic sinusoidale;
2. Puterea activă la ieșirea inverterului are valoarea minimă de 96,44 kW și valoarea maximă de 936,7 kW;
3. Randamentul convertorului depinde atât de valoarea curentului, cât și de frecvența de comandă și are valorile minimă 89,77% și maximă 96,52%;
4. Valorile extreme ale randamentului electric sunt 88%, respectiv 95,5%;
5. Valorile extreme ale randamentului total sunt 61,6%, respectiv 77,2 %;
6. Factorul de putere în secundarul transformatorului are valorile extreme 0,75, respectiv 0,925;
7. Tensiunea maximă ce solicită tranzistoarele este maximă la comutație, are valori acceptabile și nu variază foarte mult de la o țevă la alta; practic nu există supratensiuni de comutație.

Din analiza comparativă a performanțelor corespunzătoare celor două tipuri de instalații, au rezultat următoarele:

1. Randamentul convertorului de tensiune este întotdeauna mai mare; diferența cea mai mare este de 25 procente, iar cea mai mică de cca. 2 procente;
2. Randamentul electric în cazul inverterului de tensiune este întotdeauna mai mare;
3. Randamentul total în cazul inverterului de tensiune este întotdeauna mai mare;
4. Solicitarea în tensiune a tranzistoarelor este mai mică în cazul inverterului de tensiune;
5. Pierderile în tranzistoare sunt mai mici în cazul inverterului de tensiune;
6. Factorul de putere total este mai mare în cazul inverterului de tensiune;
7. Factorul total de distorsiune armonică a curentului prin inverter este întotdeauna mai mic în cazul inverterului de tensiune.

În concluzie, soluția care s-a avut în vedere pentru proiectarea principalelor elemente ale părții de forță, a fost inverterul de tensiune cu rezonanță paralel.

În capitolul VII s-a realizat proiectarea părții de forță a sistemului static multifuncțional cu aplicații în mentenanța echipamentelor hidroelectrice, bazat pe inverterul de tensiune cu rezonanță paralel, dar alimentat de la un redresor trifazat, semicomandat, în punte. *Capitolul răspunde celui de al 3-lea obiectiv al tezei.*

Pornind de la procesele tehnologice care utilizează încălzirea și cerința ca sistemul să răspundă cât mai bine necesităților, s-a configurat structura acestuia, iar pe baza experienței doctorandului, s-au stabilit caracteristicile tehnice.

Având în vedere performanțele energetice determinate pe baza modelelor Simulink, sistemul static multifuncțional va fi format din:

1. Redresor trifazat semicomandat, în punte;
2. Inverter monofazat de tensiune cu tranzistoare bipolare cu baza izolată (IGBT) capabil să funcționeze cu sarcină rezonantă.

Caracterul multifuncțional al sistemului redresor-inverter va fi asigurat prin:

1. Capacitatea redresorului semicomandat de a lucra ca sursă independentă. În acest scop, între redresor și inverter se va prevedea un contactor, cu bornele de intrare (dinspre redresor) accesibile;

2. Capacitatea sistemului de a lucra ca și convertor static de tensiune și frecvență, cu frecvența variabilă într-un domeniu larg;
3. Capacitatea sistemului de a lucra ca și convertor static de tensiune și frecvență rezonant, cu sarcină rezonantă;
4. Capacitatea sistemului de a alimenta o mare diversitate de sarcini rezonante specifice proceselor prezentate în §I.4.2-I.4.5.

S-a considerat că alimentarea convertorului se face de la sursa de 3x380V, existentă la Hidroserv Lotru.

Mai întâi, s-a analizat și s-a dimensionat optimal bobina de adaptare, astfel încât să maximizeze armonica fundamentală a curentului prin inductorul echivalent, apoi s-au dimensionat și ales:

1. Modulele IGBT cu diode antiparalele;
2. Condensatorul din circuitul intermediar;
3. Tiristoarele și diodele redresorului.

Pentru modulele IGBT, tiristoarele și diodele redresorului s-au dimensionat și ales corpurile de răcire pe baza verificării la încălzire în regim staționar.

S-au calculat, de asemenea, circuitele de protecție la supratensiuni aferente modulelor IGBT și diodelor și condensatorul de compensare.

Capitolul VIII are ca obiect estimarea performanțelor sistemului static multifuncțional destinat mentenanței echipamentelor hidroelectrice, *îndeplinește obiectivul 4.2 al tezei*.

Performanțele au fost determinate prin simulare, pe baza modelelor prezentate în Cap. V, care au fost puse în acord cu structura și parametrii obținuți în cap. VII. Au fost avute în vedere două structuri ale redresorului trifazat în punte: semicomandat și complet comandat. S-au actualizat valorile tuturor parametrilor, așa cum au fost obținuți prin calculul de proiectare. Ca și sarcină s-a considerat transformatorul de curent cu inductorul și condensatorul de compensare aferent. Simularea a vizat funcționarea în circuit deschis pentru determinarea performanțelor și obținerea comutației la curent nul.

Pentru a obține rezultate cu acuratețe ridicată, cât mai apropiate de realitate, a fost adoptat un pas constant de simulare, prin alegerea unei metode de integrare de tipul ode3 Bogacki-Sampine pentru sisteme discrete.

Data fiind frecvența de rezonanță a circuitului oscilant inductor – condensator de compensare, de maxim 3 kHz, a fost adoptat un pas maxim de simulare de 1 μ s, care este de peste 300 de ori mai mic decât perioada de comandă.

A fost simulată funcționarea în cazul uscării transformatorului de curent în cele două variante ale inductorului (33 spire și 38 spire), pentru aceiași putere activă a inductorului echivalent (cca. 15 kW) cu sistem prevăzut cu redresor semicomandat și cu redresor complet comandat.

Pentru toate cele opt structuri ale sistemului, s-a analizat funcționarea pentru două valori ale frecvenței de comandă a inverterului: frecvența de rezonanță a inductorului echivalent în paralel cu condensatorul de compensare și frecvența pentru care se obține comutația la curent apropiat de zero.

În cazul sistemului cu redresor semicomandat, din analiza rezultatelor numerice și a formelor de undă, se constată următoarele:

1. Tensiunea în secundarul transformatorului este foarte puțin afectată de comutațiile redresorului, curentul este dreptunghiular ondulatoriu, iar forma sa depinde de unghiul de comandă;
2. Tensiunea din circuitul intermediar de c.c. este practic constantă iar curentul este pulsatoriu;

3. Tensiunea la ieșirea inverterului este dreptunghiulară, iar curentul este simetric și nesinusoidal;
4. Tensiunea la bornele inductorului, curentul prin acesta și curentul prin condensator sunt practic sinusoidale.

Referitor la influența frecvenței de comandă a inverterului, respectiv cea corespunzătoare rezonanței și cea care asigură comutația la curent nul, se constată următoarele:

1. Pentru obținerea aceleiași puteri active în inductorul echivalent, tensiunea continuă de la intrarea inverterului este cu cca. 200V mai mică în cazul comutației la curent nul;
2. Curentul în secundarul transformatorului este practic simetric în cazul comutației la curent nul și puternic asimetric la rezonanță;
3. La rezonanță, curentul la intrarea inverterului are și valori negative care arată că, pentru intervale scurte de timp, condensatorul de filtrare se încarcă și de la sarcină;
4. La rezonanță, comutația inverterului are loc la curent maxim;
5. În cazul comutației la curent nul, inductorul echivalent are caracter capacitiv ilustrat prin valoarea mai mare a curentului prin condensatorul de compensare;
6. Randamentele redresorului și cel al inductorului echivalent sunt practic constante la schimbarea frecvenței de comandă a inverterului și au valori ridicate;
7. Randamentul inverterului și randamentul global depind semnificativ de frecvența de comandă;
8. Randamentul total este cu cca. 4 procente mai mare în cazul comutației la curent nul;

În cazul sistemului cu redresor complet comandat, rezultatele numerice corelate cu rezultatele grafice permit evidențierea unor aspecte specifice.

1. Tensiunea în secundarul transformatorului este mai afectată de comutațiile redresorului iar curentul este dreptunghiular ondulatoriu.
2. Tensiunea din circuitul intermediar de c.c. este practic constantă iar curentul este pulsatoriu.
3. Tensiunea la ieșirea inverterului este dreptunghiulară, iar curentul este simetric și nesinusoidal.
4. Tensiunea la bornele inductorului, curentul prin acesta și curentul prin condensator sunt practic sinusoidale.

Frecvența de comandă a inverterului, respectiv cea corespunzătoare rezonanței și cea care asigură comutația la curent nul, are următoarele efecte:

1. Pentru obținerea aceleiași puteri active în inductorul echivalent, tensiunea continuă de la intrarea inverterului este cu peste 100V mai mică în cazul comutației la curent nul;
2. Curentul în secundarul transformatorului este practic simetric;
3. La rezonanță, curentul la intrarea inverterului are și valori negative care arată că, pentru intervale scurte de timp, condensatorul de filtrare se încarcă și de la sarcină;
4. La rezonanță, comutația inverterului are loc la curent maxim;
5. În cazul comutației la curent nul, inductorul echivalent are caracter capacitiv ilustrat prin valoarea mai mare a curentului prin condensatorul de compensare;
6. Randamentele redresorului și cel al inductorului echivalent sunt practic constante la schimbarea frecvenței de comandă a inverterului și au valori ridicate;
7. Randamentul inverterului și randamentul global depind semnificativ de frecvența de comandă (Tab. VIII.3, Fig. VIII.10);
8. Randamentul total este cu cca. 4 procente mai mare în cazul comutației la curent nul.

Comparând rezultatele obținute în cazul utilizării celor două tipuri de redresoare la comanda inverterului cu frecvența care asigură comutația la curent nul, pentru ambele tipuri de bobină, se constată că performanțele energetice sunt similare și nu pot constitui un criteriu de stabilire a unei variante mai bune.

Singurul criteriu este cel al prețului, iar acesta justifică soluția aleasă la proiectare, respectiv de utilizare a unui redresor semicomandat.

Având în vedere conținutul tezei, sintetizat mai sus, apreciez că obiectivele propuse au fost realizate în totalitate și la un nivel științific corespunzător.

Diseminarea rezultatelor

Rezultatele obținute în cadrul tezei au fost diseminate, până în prezent, prin trei lucrări.

1. Energetic Analysis of Drying Process of Current Transformer from 110 kV Ciungetu Power Station, autori Dinu Roxan C. Doboșeriu, Alexandru Bitoleanu și Mihaela Popescu, în curs de publicare în revista Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series, ISSN 1842-4805, nr. 40/2016, (indexare Index Copernicus) – în curs de publicare.
2. Energetic Performances of an Induction Heating System with Half-Controlled Rectifier Destined for Drying of Current Transformers from 110 kV Ciungetu Power Station, autori Dinu Roxan C. Doboșeriu, Alexandru Bitoleanu și Mihaela Popescu, Proceedings of 13th International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE), Craiova, ROMANIA, 6-8 Oct., 2016, (indexare ISI Proceedings) – în curs de publicare.
3. Modeling and Performances of an Induction Heating System with Resonant Voltage Inverter for Drying of Current Transformers from Ciungetu Power Station, autori Dinu Roxan C. Doboșeriu, Alexandru Bitoleanu și Mihaela Popescu, a 18-a Conferință Națională de Acționări Electrice CNAE 2016, 13 - 14 octombrie 2016, în curs de publicare în revista Acta Electrotehnica (CNCSIS B+).

În Anexa 3 se găsesc lucrările în extenso.

*

* *

Aduc mulțumirile mele profunde D-lui prof. dr. ing. Alexandru Bitoleanu și imi exprim întreaga grațitudine pentru experiența împărtășită. Fără competența, tactul, insistența și îndrumarea cu cel mai înalt profesionalism de care am beneficiat din partea Domniei sale, nu aș fi putut finaliza teza de doctorat.

Mulțumesc D-nei prof. dr. ing. Mihaela Popescu pentru oportunitatea și delicatetea sugestiilor pe care, în calitate de membru în Comisia de îndrumare, mi le-a făcut pe tot parcursul pregătirii și elaborării tezei, care poartă și amprenta estetică a Domniei sale.

M-am bucurat și de sprijinul D-lui șef de lucrări dr. ing. Vlad Suru ca membru în Comisia de îndrumare și pentru aceasta îi mulțumesc.

Nu în ultimul rând, mulțumesc soției și fiicei mele, pentru că m-au înțeles și pentru sprijinul moral dăruit.

CONCLUZII

Pregătirea și elaborarea tezei de doctorat a presupus parcurgerea următoarelor etape:

1. Stabilirea tematicii.
2. Întocmirea programului individual de pregătire avansată.
3. Parcurgerea etapelor prevăzute în programul individual de pregătire avansată.
4. Întocmirea programului individual de cercetare și formularea unei teme concrete.
5. Definierea obiectivelor tezei.
6. Parcurgerea etapelor prevăzute în programul de cercetare.

7. Sistematizarea materialului obținut în urma cercetării și elaborarea tezei de doctorat. Se apreciază că cercetarea efectuată a avut trei caracteristici principale:

1. A fost constatativă pentru că doctorandul s-a documentat asupra procesului de încălzire prin inducție, cu accent pe echipamentele moderne utilizate;
2. A fost extensivă pentru că s-a urmărit aplicarea acestui procedeu în domeniul mentenanței echipamentelor hidroelectrice;
3. A fost intensivă pentru că oferă explicații despre particularitățile echipamentelor necesare și performanțele lor energetice în domeniul mentenanței echipamentelor hidroelectrice.

Se apreciază că, în realizarea cercetării, doctorandul a utilizat metodele de cercetare adecvate îndeplinirii obiectivelor stabilite. Dintre acestea se menționează:

1. Observarea și măsurarea fenomenelor și înregistrarea mărimilor fizice specifice temei de cercetare;
2. Elaborarea și ordonarea materialului;
3. Identificarea structurilor posibile de echipamente și crearea de modele adecvate investigării performanțelor acestora;
4. Proiectarea unui echipament multifunțional destinat mentenanței echipamentelor hidroelectrice;
5. Testarea echipamentului pe model pe baza unor date obținute prin experimente;
6. Confirmarea performanțelor estimate;
7. Publicarea rezultatelor.

În continuare, se va detalia modul de realizarea a tezei, pe capitole, iar acolo unde este cazul, se vor evidenția rezultatele obținute prin aportul major al doctorandului.

Astfel, **Capitolul I** este destinat fundamentării teoretice necesare realizării obiectivelor tezei, iar aspectele electro-termice ale procesului de încălzire prin inducție prezentate în § I.1, I.2 și I.4 sunt preluate din literatura de specialitate (în special din [12], [69] și [18]), autorul tezei aducând câteva contribuții minore și realizând sistematizarea și algoritmizarea într-o formă aplicabilă, utilă.

Conținutul subcapitolului I.3 este contribuția substanțială a autorului prin,

I.1. Evidențierea influenței frecvenței de comandă a invertorului în raport cu frecvența de rezonanță, asupra performanțelor energetice, la încălzirea de precizie a țevilor lungi.

Capitolul II contribuie la îndeplinirea primului obiectiv al tezei.

§ II.1 este o sinteză referitoare la structura sistemelor cu invertoare de curent și tensiune, realizată de autor, pe baza literaturii de specialitate.

§ II.2 este contribuția echipei de cercetare din care doctorandul a făcut parte. Astfel, pornind de la realitatea că bobina echivalentă a sarcinii este compusă din bobina de inducție și corpul de încălzit și, în consecință, are o rezistență ce nu poate fi neglijată, se deduce expresia frecvenței de rezonanță existentă în literatura de specialitate, dar utilizând diagramele fazoriale.

Capitolul III, dedicat analizei influenței temperaturii și armonicilor asupra parametrilor și performanțelor energetice și finalizează *realizarea primului obiectiv al tezei*.

Conținutul este contribuția echipei de cercetare din care doctorandul a făcut parte, iar rezultatele activității sale sunt:

III.1. Aplicarea programului Excel și interpretarea rezultatelor privind influența temperaturii asupra parametrilor și performanțelor energetice la încălzirea unei țevi cu diametrul exterior de 0,076m, utilizând același tip de inductor, în două situații distincte, respectiv la o temperatură medie peste pragul Curie (950°C) și la o temperatură medie sub pragul Curie (350°C);

III.2. Aplicarea programului Excel și interpretarea rezultatelor privind influența armonicilor asupra parametrilor și performanțelor energetice a încălzirea unei țevi cu diametrul exterior de 0,168m;

III.3. Evidențierea influenței armonicilor asupra frecvenței de rezonanță pe modelul sistemului inverter de tensiune-circuit de adaptare inductiv-inductor-țevă-condensator de compensare, în mediul Matlab-Simulink.

Cap. IV constituie suportul îndeplinirii obiectivului 4.1., este, în totalitate, contribuția doctorandului concretizată prin:

IV.1. Efectuarea determinărilor experimentale aferente procesului de uscare a transformatorul de curent din stația Ciunget de 110kV, în tehnologia actuală, pentru două bobine (cu 33 și cu 38 spire);

IV.2. Prelucrarea formei de undă a curentului, obținută pe baza datelor achiziționate, prin filtrarea cu un filtru de ordinul I având frecvența de tăiere de 10kHz, care a eliminat armonicile superioare, în vederea utilizării ulterioare în calculul parametrilor;

IV.3. Realizarea analizei energetice completă prin calcularea puterilor activă (P), aparentă (S) și care poate fi compensată și a factorului de putere global (PF);

IV.4. Determinarea parametrilor sarcinii echivalente compusă din bobina realizată și transformatorul de curent ca și corp de încălzit (R-L), în două moduri (aproximând regimul ca fiind sinusoidal și utilizând formele de undă filtrate și aproximând regimul ca fiind sinusoidal și utilizând relațiile deduse din puteri, în două variante).

Capitolul V, este contribuția echipei de cercetare din care doctorandul a făcut parte, **contribuie la realizarea celui de al 2-lea obiectiv**, iar rezultatele activității sale se referă la,

V.1. Realizarea modelelor părții de forță, unele blocuri de calcul și conectarea acestora cu modelele părții de comandă.

Capitolul VI este dedicat estimării performanțelor instalației în cazul încălzirii țevilor lungi, în două variante, **constituie îndeplinirea obiectivului 2 și este contribuția doctorandului** concretizată prin:

VI.1. Determinarea prin simulare pe model, a performanțelor sistemului de încălzire prin inducție cu inverter de curent, a patru tipodimensiuni de țevi, cu inductorul și condensatorul de compensare aferente, la comanda inverterului cu frecvența de rezonanță a inductorului echivalent în paralel cu condensatorul de compensare;

VI.2. Determinarea prin simulare pe model, a performanțelor sistemului de încălzire prin inducție cu inverter de tensiune, a patru tipodimensiuni de țevi, cu inductorul și condensatorul de compensare aferente, la comanda inverterului cu frecvența de rezonanță a inductorului echivalent în paralel cu condensatorul de compensare;

VI.3. Analiza comparativă a performanțelor corespunzătoare celor două tipuri de instalații și identificarea variantei mai avantajoase, respectiv, inverterul de tensiune cu rezonanță paralel.

În capitolul VII s-a realizat proiectarea părții de forță a sistemului static multifuncțional cu aplicații în mentenanța echipamentelor hidroelectrice. Capitolul răspunde celui de al 3-lea obiectiv al tezei **și este contribuția doctorandului** concretizată prin:

VII.1. Configurarea structurii sistemul static multifuncțional, având în vedere procesele tehnologice de la Hidroserv Ciungetu, care utilizează încălzirea și performanțele energetice determinate pe baza modelelor Simulink;

VII.2. Dimensionarea elementelor redresorului semicomandat și ale circuitului intermediar;

VII.3. Dimensionarea elementelor inverterului de tensiune cu sarcină rezonantă paralel și a condensatorului de compensare.

Capitolul VIII are ca obiect estimarea performanțelor sistemului static multifunțional destinat mentenanței echipamentelor hidroelectrice, *îndeplinește obiectivul 4.2 al tezei și este contribuția doctorandului*. Rezultatele constau în:

VIII.1. Determinarea performanțelor energetice ale inverterului proiectat în cazul uscării transformatorului de curent, în cele două variante ale inductorului (33 spire și 38 spire), pentru aceeași putere activă a inductorului echivalent (cca. 15 kW) cu sistem prevăzut cu redresor semicomandat, pentru două valori ale frecvenței de comandă a inverterului (frecvența de rezonanță a inductorului echivalent în paralel cu condensatorul de compensare și frecvența pentru care se obține comutația la curent apropiat de zero);

VIII.2. Determinarea performanțelor energetice ale inverterului proiectat în cazul uscării transformatorului de curent, în cele două variante ale inductorului (33 spire și 38 spire), pentru aceeași putere activă a inductorului echivalent (cca. 15 kW) cu sistem prevăzut cu redresor complet comandat, pentru două valori ale frecvenței de comandă a inverterului (frecvența de rezonanță a inductorului echivalent în paralel cu condensatorul de compensare și frecvența pentru care se obține comutația la curent apropiat de zero);

VIII.3. Interpretarea rezultatelor pentru cele opt variante și sintetizarea unor concluzii utile;

VIII.4. Analiza comparativă a rezultatelor obținute în cazul utilizării celor două tipuri de redresoare, la comanda inverterului cu frecvența care asigură comutația la curent nul, pentru ambele tipuri de bobină, și validarea soluției proiectate.

BIBLIOGRAFIE

- 1 Acero J., Burdio J. M., Barragan L. A., Navarro D., Alonso R., Garcia J. R.,
Monterde F., Hernandez P., Llorente S., Garde ., **The domestic induction heating
appliance: An overview of recent research**, *Proc. Appl. Power Electron. Conf.
Expo.*, 2008, pp. 651–657.
- 2 Anghel Felicia Sprânceană., Anghel Dragoș, **Metode și procedee tehnologice. Vol.
II. Tehnologii Moderne**, Ed. Printech, BUCUREȘTI 2006.
- 3 Bitoleanu A., Ivanov S., Popescu Mihaela, **Convertoare statice**, ISBN 973-96940-2-
0, Editura Infomed, Craiova, 1997.
- 4 Bitoleanu A., Mihai D., Popescu Mihaela, Constantinescu C., **Convertoare statice și
structuri de conducere performante pentru acționări electrice**, Editura SITECH
Craiova, 2000.
- 5 Bitoleanu A., Popescu Mihaela, **Filtre active de putere**, Editura Universitaria
Craiova, ISBN: 978-606-14-0039-3, 2010.
- 6 Bitoleanu A., Popescu Mihaela, Suru V., **Experimental Evaluation of Induction
Heating Systems with Phase-Shift Voltage Resonant Inverter**, *Annals of the
University of Craiova, Electrical Engineering series, No. 38, ISSN: 1842-4805, 2014,
pp. 50-55.*
- 7 Bitoleanu A., Popescu Mihaela, Suru V., **Maximizing Power Transfer in Induction
Heating System with Voltage Source Inverter**, *The 22nd International Conference
on Nonlinear Dynamics of Electronic Systems, NDES 2014*”, Albena, Bulgaria.
- 8 Bitoleanu A., Popescu Mihaela, Suru V., **Shift Phase Power Control in Induction
Heating Systems with Voltage Resonant Inverter**, *ICATE 2014, Craiova, 978-1-
4799-4161-2/14/\$31.00 ©2014 IEEE.*
- 9 Burdio J. M., Barragan L. A., Monterde F., Navarro D., Acero ., **Asymmetrical
voltage-cancelation control for full-bridge series resonant inverters**, *IEEE Trans.
Power Electron.*, vol. 19, no. 2, pp. 461–469, Mar.2004.
- 10 Callebaut J., Laborelec, **Induction Heating**, *Power Quality & Utilisation Guide,
Section 7: Energy Efficiency*, February 2007
- 11 Chudjuarjeen S., Sangswang A., Koompai C., **An Improved LLC Resonant
Inverter for Induction-Heating Applications With Asymmetrical Control**, *IEEE
Transactions on Industrial Electronics, Volume 58, Issue 7, July, 2011, page(s) 2915
– 2925.*
- 12 Comșa D., **Instalații Electrotermice Industriale, Vol. II**, Ed. Tehnică, București,
1986
- 13 Dawson F.P., Jain P., **A Comparison of Load Commutated Inverter Systems for
Induction Heating and Melting Applications**, *IEEE Transactions on Power
Electronics, VOL. 6, NO. 3. July 1991, pp.430-441*
- 14 Dieckerhoff S., M. J. Ruan, R. W. De Doncker, **Design of an IGBT-based LCL-
resonant inverter for high-frequency induction heating**, *The 34th Industry
Applications Conference*, Vol. 3, Oct. 3-7, 1999, pp. 2039 – 2045
- 15 Esteve V, J. Pardo, J. Jordan, E. Dede, E. Sanchis-Kilders, and E. Maset, **High Power
Resonant Inverter with Simultaneous Dual-frequency Output**, *in Power
Electronics Specialists Conference, 2005, PESC '05, IEEE 36th, 2005, pp. 1278-
1281.*
- 16 FD800R17KE3_B2 IGBT power transistor datasheet, rev. 2.0, 11.03.2004.

- 17 Fujita, H., Uchida, N., Ozaki, K., **Zone controlled induction heating (ZCIH) A new concept in induction heating**, *Power Conversion Conference, Nagoya (Japan), 1498-1504 (2007)*.
- 18 Ghemke, R. G. Defectele mașinilor electrice, Editura Tehnică, București, 1960.
- 19 Haimbaugh R.E., **Practical Induction Heat Treating**, ASM International Technical Book, 2001.
- 20 Heisler P.M., **Temperature Charts for Induction and Constant Temperature Heating**, *Trans. ASME 69*, pp. 227-236
- 21 Jain P.K., Dewan, S.B., **A starting inverter for a voltage source series inverter with a transformer coupled high-Q induction heating load**, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 25. no. 4, July/Aug. 1989, pp. 627-633.
- 22 Jain P.K., Espinoza J. R., Dewan, S.B., **Self-Started Voltage-Source Series-Resonant Converter for High-Power Induction Heating and Melting Applications**, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 34. no. 3, May/June 1998, pp. 518-525.
- 23 Kazimierczuk M. K., Czarkowski D. **Resonant Power Converters**, John Wiley & Sons, 2011.
- 24 Markadeh Arab R G., E. Daryabeigi, **An Optimal Selection of Induction Heating Capacitance by Genetic Algorithm Considering Dissipation Loss Caused by ESR**, *IJE Transactions B: Applications*, Vol. 24, No. 1, February 2011, pp. 19-26
- 25 Mihail Voicu, **Teoria sistemelor**, Ed. Academiei Române, 2006.
- 26 Miyagi D., Saitou A., Takahashi N., Uchida N., **Ozaki K., Improvement of Zone Control Induction Heating Equipment for High-Speed Processing of Semiconductor Devices**, *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, no. 2, pp. 292-294, 2006.
- 27 [Nash G., Phase-Locked Loop Design Fundamentals, Freescale Semiconductor, Application Note, Document Number: AN535, Rev. 1.0, 02/200, http://www.everythingrf.com/Uploads/Content/File/Phase%20Locked%20Loop%20Design%20Fundamentals.pdf](http://www.everythingrf.com/Uploads/Content/File/Phase%20Locked%20Loop%20Design%20Fundamentals.pdf)
- 28 Năvrănescu V., Popescu M., Nicolae V., **Acționări electrice de curent continuu**, Editura ICPE, 1999
- 29 Park C. N., Lee D., Hyun D., **A power control scheme with constant switching frequency in class-D inverter for induction heating jar application**, *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 54, no. 3, pp. 1252–1260, Jun.2007.
- 30 Peram S., Ramesh V., Ranganayakulu J.S., **Full Bridge Resonant Inverter For Induction Heating Applications**, *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, ISSN 2248-9622, Vol. 3, Issue 1, January-February 2013, pp.066-073.
- 31 Popescu Mihaela, Bitoleanu A., Dobriceanu, M., **Analysis and Optimal Design of Matching Inductance for Induction Heating System with Voltage Inverter**, *The 8th International Symposium on. Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE 2013)*, 23-25 May, Bucharest, Romania, Print ISBN: 978-1-4673-5979-5 (2013).
- 32 Popescu Mihaela, Bitoleanu A., **Energetica Sistemelor de Acționare cu Motoare Asincrone și Convertoare Statice Indirecte**, ISBN 973-9357-54-7, Ed. Mediamira, Cluj-Napoca, 2005.
- 33 Popescu Mihaela, Bitoleanu A., Patrascu Alexandra, **On the Control System Synthesis and its Practical Evaluation in Induction Heating Systems with Resonant Voltage Inverter**, *International Conference on Applied and Theoretical Electricity (ICATE)* Location: Craiova, ROMANIA Date: OCT 23-25, 2014, Book Series: International Conference on Applied and Theoretical Electricity Published: 2014.

- 34 Popescu Mihaela, Bitoleanu A., **Power Control System Design in Induction Heating with resonant Voltage Inverter**, *ICATE 2014, Craiova, 978-1-4799-4161-2/14/\$31.00 ©2014 IEEE*.
- 35 Popescu Mihaela, Bitoleanu A., Subțirelu E., **Design and Performance of the Voltage Control Loop in Induction Heating Systems with L-LC resonant inverters**, *Annals of the University of Craiova, Electrical Engineering series, No. 37, ISSN: 1842-4805, 2013, pp.39-43*.
- 36 Popescu Mihaela, Bitoleanu A., Suru V., **Control of the Power in Induction Heating Systems with L-LC Resonant Voltage Source Inverters**, *4th International Symposium on Electrical and Electronics Engineering (ISEEE)* Location: Dunarea de Jos Univ Galati, Galati, ROMANIA Date: OCT 11-13, 2013, Published: 2013.
- 37 Popescu Mihaela, **Electronique de puissance: composants semi-conducteurs et convertisseurs**, Ed. Universitaria Craiova, 254 pagini, 2006
- 38 Rădac M.B., **Tehnici iterative în acordarea parametrilor reglatoarelor automate, teză de doctorat**, IPT, Editura Politehnica: Seria: 12 Nr: 1 ISSN: 2068-7990 ISBN: 978-606-554-328-7
- 39 Rhoades N., **A Fundamental Overview of Heating by Induction**, April 2006.
- 40 Rudnev V., Loveless, D., et. al., **Handbook of Induction Heating**, Marcel Dekker, NY, 2003.
- 41 Salih A., **IGBT for high performance induction heating applications**, *Proc. 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, Oct. 2012, PP:3274-3280.
- 42 Suresh A., Rama Reddy S., **Parallel Resonance Based Current Source Inverter for Induction Heating**, *European Journal of Scientific Research, Vol.58 No.2, 2011, pp.148-155*.
- 43 Suresh A., Rama Reddy S., **Series and Parallel Resonant Inverter Fed Ferromagnetic Load-A Comparative Analysis**, *International Conference on Emerging Trends in Computer and Image Processing (ICETCIP'2011) Bangkok Dec., 2011*
- 44 Suru, V., Popescu, M., Bitoleanu, A., **Energetic Performances of Induction Heating Systems with Voltage Resonant Inverter**, *Proceedings of International Symposium on Electrical and Electronics Engineering*, October 11-13, Galați, România, ISBN 978-1-4799-2441-7 (2013).
- 45 Toma Marina, **Functii de o variabila complexa. Calcul operațional si elemente de teoria stabilității**, Ed. Matrixrom, 2010.
- 46 Tomescu Anca, **Electrotehnica. Câmp electromagnetic. Circuite electrice**, Ed. Matrixrom, 2007.
- 47 Wen Li, Meiners J., **Introduction to phase-locked loop system modeling**, *Analog Applications Journal SLYT015* - May 2000.
- 48 Zinn S. and Semiatin S.L., **Coil design and fabrication: basic design and modifications**, Heat Treating 1988
- 49 *** **Highest Efficiency and Cost Effective IGBTs for Induction Heating**, Published by Infineon Technologies AG 81726 Munich, Germany.
- 50 [Application notes for IGBT and MOSFET, http://www.semikron.com/skcompub/en/section5_Application_Notes_for_IGBT_and_MOSFET_Modules.pdf.](http://www.semikron.com/skcompub/en/section5_Application_Notes_for_IGBT_and_MOSFET_MOSFET_Modules.pdf)
- 51 [Catalog online radiatoare răcire, http://www.abl-heatsinks.co.uk/index.php?page=extrudedproduct&product=201.](http://www.abl-heatsinks.co.uk/index.php?page=extrudedproduct&product=201)
- 52 [Catalog online radiatoare răcire, http://www.abl-heatsinks.co.uk/index.php?page=extrudedresults&type=1&choice=800.](http://www.abl-heatsinks.co.uk/index.php?page=extrudedresults&type=1&choice=800)
- 53 [DD 400 S 17 K6C B2 Technical Information, Eupec Corporation,](#)

- http://www.infineon.com/dgdl/dd400s17k6c_b2.pdf?folderId=db3a304412b407950112b4095b0601e3&fileId=db3a304412b407950112b42fc9574d8c
- 54 <http://www.electrotehnica.ro/files/E%20electrotehnologii.pdf>
- 55 http://www.ajaxtocco.com/applications/documentlibrary/Inductron%20II_092003.pdf
- 56 <http://www.artrom.ro/>
- 57 <http://www.celem.com/item.aspx?ItemId=8&cid=13&hmenu=31>
- 58 http://www.induction.it/OLD/melting_furnaces.htm
- 59 <http://www.inductionatmospheres.com/pdf/GH/SM-Series.pdf>
- 60 [http://www.infineon.com/cms/en/applications/industrial/induction-heating/\(Principiu+IGBT\)](http://www.infineon.com/cms/en/applications/industrial/induction-heating/(Principiu+IGBT))
- 61 <http://www.mouser.com/catalog/645/usd/533.pdf>
- 62 http://www.pillar.com/applications/documentlibrary/documentlibrary_docs/Pillar-MK-15.pdf
- 63 http://www.shiva.pub.ro/PDF/TRA/slide_curs10_TRA.pdf, Alegerea si acordarea reguletoarelor
- 64 <http://www.tme.eu/ro/Document/0fbfe30f2e8051276de40779d815ab2e/B43456A9478M-EPCOS-datasheet-516257.pdf>
- 65 http://www.unibuc.ro/prof/dinca_m/miha-p-dinc-elec-manu-stud/docs/2011/sep/19_11_18_18cap_5_v3.pdf
- 66 <http://www.vishay.com/docs/94370/94370.pdf>
- 67 IGBT Application Note, Nihon Inter Electronics Corporation, <http://www.niec.co.jp/english/products/information.html>
- 68 ITELCOND Data Book 2011, http://www.itelcond.it/Public/catalog/introduction/new/01_generalex.pdf
- 69 Încălzirea prin inducție, <http://media0.wgz.ro/files/media0:4b51f7d686d5c.pdf.upl/ET4-20Incalzirea%20prin%20inductie%20e-magn2.pdf>
- 70 Power Supply Ripple Calculations and Capacitor Size, <http://waynestegall.com/audio/ripple.htm>
- 71 Technical Application Guide, www.chtechnology.com.
- 72 www.lamina.com.pl

30.09.2016

Dobosescu Coștăntin
SM