

Teză de abilitare

Cercetări și contribuții în domeniul utilizării și producerii energiei electrice

(acționări electrice industriale cu turație variabilă, sisteme de compensare a puterii reactive, acționări electrice cu mașini axiale pentru vehicule hibride și electrice și generatoare electrice reglabile)

Domeniul: Inginerie Electrică

Conf.dr.ing. Deaconu Sorin Ioan

Universitatea Politehnica Timișoara

Cuprins

Cuprins	1
Rezumat	3
Abstract	5
I. REALIZĂRILE ȘTIINȚIFICE, PROFESIONALE ȘI ACADEMICE	7
1. Motivarea cererii de obținere a abilitării în domeniul Inginerie Electrică.....	7
2. Direcții de cercetare și competențe.....	9
2.1 Aplicații industriale ale sistemelor de acționare electrică cu turație variabilă.....	9
2.2 Aplicații industriale ale sistemelor de compensare a energiei reactive și a regimului deformant.....	10
2.3 Sisteme de acționare electrică performante cu dimensiuni și greutate reduse pentru vehicule electrice și hibride.....	10
2.4 Generatoare electrice reglabile pentru aplicații eoliene sau hidraulice.....	11
3. Realizări științifice, profesionale și academice.....	11
3.1 Aplicații industriale ale sistemelor de acționare electrică cu turație variabilă.....	11
3.1.1 Reducerea consumului de energie electrică activă prin utilizarea turației variabile.....	11
3.1.2 Pornirea controlată a sistemelor de acționare electrică.....	18
3.1.3 Producerea energiei electrice cu generatoare asincrone funcționând cu turație variabilă.....	25
3.1.4 Încercarea în sarcină artificială a mașinilor electrice rotative.....	34
3.2 Aplicații industriale ale sistemelor de compensare a energiei reactive și a regimului deformant.....	42
3.2.1 Studiul compensării energiei reactive și a armonicelor superioare în stația electrică de medie tensiune (33 KV în gol) la oțelăria electrică a Arcelor Mittal Hunedoara.....	42
3.2.2 Studiul compensării energiei reactive în stația electrică SLH de medie tensiune (6 KV) care alimentează laminorul și secția de turnare continuă a Arcelor Mittal Hunedoara.....	58
3.3 Sisteme de acționare electrică performante cu dimensiuni și greutate reduse pentru vehicule electrice și hibride.....	64
3.3.1 Introducere.....	64
3.3.2 Elemente constructive ale mașinii.....	64
3.3.3 Proiectarea analitică și optimală.....	66
3.3.4 Validarea cu element finit Quasi 3D.....	68
3.3.5 Controlul și simulările dinamice.....	69
3.3.6 Concluzii.....	73
3.4 Generatoare electrice reglabile pentru aplicații eoliene sau hidraulice.....	73
3.4.1 Generatorul sincron reactiv homopolar și homo-heteropolar cu excitație statorică.....	74
3.4.1.1 Introducere.....	74
3.4.1.2 Elemente constructive.....	74
3.4.1.3 Analiza cu elemente finite 3D.....	76
3.4.1.4 Modelul ortogonal.....	78
3.4.1.5 Controlul generatoarelor sincrone homopolare și homo-heteropolare. Simulări dinamice.....	80
3.4.1.6 Încercări experimentale.....	83
3.4.1.7 Concluzii.....	85

3.4.2 Generatorul de inducție cu două înfășurări statorice și rotorul în colivie (DSWIG).....	86
3.4.2.1 Introducere.....	86
3.4.2.2 Generatoare electrice asincrone cu două înfășurări statorice (DSWIG): topologii noi propuse.....	87
3.4.2.3 Modelul analitic al DSWIG.....	88
3.4.2.4 Optimizarea proiectării.....	89
3.4.2.5 Analiza cu elemente finite 2D FEM.....	91
3.4.2.6 Modelul controlului și simulări dinamice.....	92
3.4.2.7 Rezultate experimentale.....	97
3.4.2.8 Concluzii.....	98

II. PLANUL DE EVOLUȚIE ȘI DEZVOLTARE A CARIEREI PROFESIONALE, ȘTIINȚIFICE ȘI ACADEMICE.....	100
--	------------

III. REFERINȚE BIBLIOGRAFICE.....	102
--	------------

Rezumat

Teza de abilitare prezintă activitatea și rezultatele de cercetare obținute, după susținerea tezei de doctorat, din anul 1998 până în prezent. Titlul tezei de doctorat a fost "Generatorul electric reglabil fără perii" și a fost susținută la Universitatea Politehnica Timișoara în iunie 1998.

Teza de abilitare conține următoarele capitole: motivație, direcții de cercetare, realizări, planul de dezvoltare științifică, profesională și academică și în final capitolul de bibliografie.

Primul capitol, motivația, prezintă pe scurt activitatea didactică și de cercetare, rezultatele obținute, cooperarea cu alte universități și dorința exprimată de a continua cercetarea în domeniul ingineriei electrice la un nivel superior prin obținerea atestatului de abilitare.

În capitolul al doilea sunt prezentate principalele direcții de cercetare: aplicații industriale ale sistemelor de acționare electrică de curent alternativ cu turație variabilă, compensarea energiei reactive și a armonicelor superioare la consumatorii electrice puternic deformanți, sisteme de acționare electrică cu mașini axiale a vehiculelor electrice și hibride și conversia energiei pentru aplicații eoliene sau hidraulice reglabile. Pentru fiecare din direcțiile de cercetare enumerate sunt prezentate principalele realizări.

Capitolul realizări științifice, profesionale și academice prezintă mai detaliat activitățile desfășurate în cadrul fiecărei direcții de cercetare și principalele rezultate obținute.

Direcția de cercetare privind aplicații industriale ale sistemelor de acționare electrică de curent alternativ cu turație variabilă este divizată în patru subcapitole care prezintă preocupările legate de reducerea consumului de energie electrică activă prin utilizarea turației variabile, pornirea controlată a sistemelor de acționare electrică, producerea energiei electrice cu generatoare asincrone funcționând cu turație variabilă și încercarea în sarcină artificială a mașinilor electrice rotative. Printre marii consumatori energetici actuali regăsim sistemele de pompare și cele de ventilație. Automatizarea acestor sisteme și creșterea eficienței lor energetice poate fi făcută cu ajutorul unor automate programabile, convertizoare statice de frecvență, sisteme de comunicație și de transmitere a datelor. Aplicarea în practică a diferitelor soluții este o provocare pentru un inginer dar și pentru un cercetător din domeniul sistemelor de mașini și acționări electrice. Sunt prezentate aplicații propuse și realizate practic unele dintre ele fiind aplicate chiar după un timp mai îndelungat din cauza efortului investițional important necesar. Apariția softstarterelor a produs un salt calitativ în problema pornirii, opririi sau frânării motoarelor asincrone cu rotorul în scurtcircuit. Au fost prezentate câteva considerente teoretice și experimentale legate de optimizarea pornirii cu ajutorul softstarterelor. S-a dedus astfel că cea mai eficientă metodă de pornire este cea în care se face controlul cuplului la arbore. În acest caz, atât timpul de pornire setat este respectat cu o aproximație destul de bună cât și curentul maxim setat nu este depășit. La metoda de pornire cu rampă de tensiune și limitare de curent se ajunge la valori ale curentului mai mari decât valoarea setată. În cazul pornirii cu rampă de tensiune fără limitare de curent, valorile curentului maxim sunt mult mai mari și nu se respectă timpul de pornire setat. Ideea de la care s-a pornit în obținerea unui sistem de producere a energiei electrice cu generator asincron și convertor static de frecvență, ce funcționează cu turație variabilă, a fost găsirea unei structuri de microhidrocentrală (MHC) care să permită o funcționare eficientă și complet automatizată cu investiții recuperabile într-un interval de 5 până la 8 ani. Temperatura la sarcină maximă într-o mașină electrică rotativă reprezintă un parametru esențial. Metodele convenționale de încărcare în sarcină necesită utilizarea unei alte mașini electrice cuplată la arborele mașinii electrice de încercat. Costul echipamentului de încercare și cuplarea mecanică efectivă a celor două mașini fac ca metoda convențională să fie prohibitiv de costisitoare, în special pentru mașinile mari, pentru mașinile cu rotor vertical (imposibil de realizat), sau pentru mașinile de mare viteză. Acesta a fost motivul pentru care am abordat tema de cercetare referitoare la încărcarea în sarcină artificială a mașinilor electrice rotative.

Direcția de cercetare în domeniul aplicațiilor industriale ale sistemelor de compensare a energiei reactive și a regimului deformant pentru reducerea până la anulare a costului cu energia reactivă, cuprinde două subcapitole care tratează problematica unui consumator industrial de tip special (un combinat siderurgic având în dotare cuptoare cu arc electric de curent alternativ trifazate). În timpul funcționării, cuptorul electric cu arc (de curent continuu sau de curent alternativ

trifazat) are o variație în limite foarte largi a puterii absorbite, care determină variația puterii reactive necesare, curbele curentului și tensiunii sunt puternic distorsionate, generând apariția armonicelor superioare. Datorită inegalității reactanțelor pe cele trei faze, apare regimul nesimetric însoțit de efectul de flicker. Pentru eliminarea acestor fenomene se pot folosi compensatoare sincrone, baterii de condensatoare și bobine acordate pe anumite armonici și varianta cea mai bună dar și cea mai scumpă o reprezintă instalațiile complexe de filtre active (SVC) care sunt comandate de un sistem automat de urmărire în timp real.

O altă direcție de cercetare, detaliată în șase subcapitole, o reprezintă sistemele de acționare electrică cu mașini sincrone axiale (un stator, două rotoare cu magneți permanenți și un singur inverter pentru controlul vectorial al mișcării celor doi arbori) destinate pentru aplicații în domeniul vehiculelor electrice hibride sau pentru vehicule pur electrice. S-a prezentat topologia constructivă, modelul de circuit, proiectarea optimală, metodele de control, și analiza quasi 3D-FEM pentru validarea datelor obținute analitic cu privire la cuplul dezvoltat de mașină. Se propune o familie nouă de mașini, pentru îmbunătățirea dimensiunilor radiale și axiale, cu o densitate mare de cuplu și un randament ridicat. S-a demonstrat capabilitatea de producere a cuplului de către mașina cu înfășurări statorice fracționare concentrate și magneți permanenți montați pe suprafață.

Ultima direcție de cercetare abordată în cadrul tezei de abilitare are ca temă studiul teoretic și experimental al generatoarelor electrice reglabile pentru aplicații eoliene sau hidraulice. S-au prezentat în cincisprezece subcapitole generatorul sincron reactiv homopolar și homo-heteropolar cu excitație statorică și generatorul de inducție cu două înfășurări statorice și rotorul în colivie. Preocuparea pentru cercetarea mașinilor homopolare și homo-heteropolare cu excitație statorică este o continuare firească a temei abordate în cadrul tezei de doctorat. Creșterea în timp a puterii de calcul a calculatoarelor electronice și apariția unor programe de calcul cu elemente finite 2D și 3D, respectiv a unor programe de simulare dinamică din ce în ce mai performante, au permis abordarea la un nivel superior a analizelor efectuate. Am continuat efectuarea de încercări experimentale asupra unui model experimental de putere redusă. Sistemul de producere a energiei cu generatorul de inducție cu două înfășurări statorice propus utilizează un convertor static cu o putere aparentă mai mică decât a generatorul. Raportul obținut dintre puterea convertorului și puterea generatorului este de 50% în acest caz, similar cu cel de la sistemele de generare cu mașini asincrone dublu alimentate. Avantajul acestei mașini este dat de lipsa periiilor și posibilitatea de utilizare a lui în aplicații de producere a energiei la turație variabilă. Este posibilă extragerea unei puteri chiar și la viteze reduse a turbinei, care nu poate fi obținută când generatorul este conectat direct la rețea sau când generatorul are înfășurarea de excitație înseriată cu inverterul și înfășurarea principală înseriată cu un redresor cu diode. De asemenea varianta de sistem aleasă este avantajoasă când sarcina alimentată nu este pretențioasă și atunci nici redresorul nu mai este necesar.

Se prezintă apoi succint direcțiile de cercetare (existente sau unele noi) pe care doresc să le abordez după obținerea atestatului de abilitare, împreună cu colectivele de cercetare din care fac parte și unde voi integra și viitorii doctoranzi.

La final este lista bibliografică care conține 185 titluri de articole, cărți sau brevete de invenție dintre care la 114 sunt coautor, (la 68 prim autor).

Abstract

The habilitation thesis presents the activity and the results of the research obtained, after supporting the PhD thesis, from 1998 until now. The title of the PhD thesis was the "Study of the adjustable brushless synchronous generator" and was presented at the Politehnica University of Timișoara in June 1998.

The habilitation thesis contains the following chapters: motivation, research directions, achievements, the scientific, professional and academic development plan, and finally the bibliography chapter.

The first chapter, motivation, summarizes the didactic and research activity, the results obtained, the cooperation with other universities and the expressed desire to continue the research in the field of electrical engineering at a higher level by obtaining the certificate of habilitation.

In the second chapter the main directions of research are presented: industrial applications of AC electric drives, compensation of reactive energy and superior harmonics to strongly deforming electric consumers, axial electric drive systems for hybrid and electric vehicles, and energy conversion for adjustable wind or hydro applications. For each of the research directions listed, the main achievements are presented.

The chapter of scientific, professional and academic achievements presents the activities carried out within each research direction and the main results obtained in a more detailed fashion.

The Research Direction on Industrial Applications of Variable Speed AC Drives is divided into four subchapters which present concerns regarding the reduction of the active electric energy consumption by using the variable speed, the controlled start of the electric drive systems, the production of electric power with variable asynchronous generators and the artificial load testing of the rotating electric machines. Among the great energy consumers we find the pumping and ventilation systems. Automating these systems and increasing their energy efficiency can be done with PLCs, static frequency converters, communication and data transmission systems. Applying different solutions in practice is a challenge for an engineer but also for a researcher in the field of machine systems and electric drives. Proposed and practiced applications are presented, but some of them are applied even after a long time because of the important investment effort required. Usage of softstarters has caused a qualitative leap in the problem of starting, stopping or braking induction motors with a cage rotor. There have been some theoretical and experimental considerations related to optimization of starting with softstarters. The conclusion is that the most efficient starting method is the one that controls the torque on the shaft. In this case, both the set start time is respected with a fairly good approximation and the set maximum current is not exceeded. On the starting method with voltage ramp and current limitation, current values higher than the set value are reached. In case of starting with a voltage ramp without current limitation, the maximum current values are much higher and the set start time is not respected. The idea behind starting of a power generation system with an variable speed induction generator and a static converter was to find a micro-hydropower structure (MHC) that would allow efficient and fully automated operation with recoverable investments in a range of 5 to 8 years. The maximum load temperature in a rotating electric machine is an essential parameter. Conventional loading methods require the use of another electric machine coupled to the test machine shaft. The cost of the test equipment and the effective mechanical coupling of the two machines make the conventional method prohibitively expensive, especially for large machines, for vertical rotor (impossible to achieve), or for high speed machines. This was the reason why I approached the topic of research on the artificial loading of rotating electric machines.

The research direction in the field of industrial applications of reactive energy compensation systems and the deforming regime for reducing the cost of reactive energy to depletion comprises two subchapters dealing with the issue of a special type of industrial consumer (a steel mill equipped with furnaces three-phase alternating current arc). During operation, the arc furnace (DC or AC three-phase alternating current) has a variation within very wide limits of the absorbed power, which determines the variation in the required reactive power, the curves of the current and voltage

are strongly distorted, generating the appearance of higher harmonics. Due to the inequality of the reactants on the three phases, the unbalanced mode with the flicker effect appears. In order to eliminate these phenomena, it is possible to use synchronous compensators, capacitor batteries and coils on certain harmonics, and the best but also the most expensive variant are the complex active filter systems (SVC) which are controlled by an automatic tracking system in the real time.

Another direction of research, detailed in six subchapters, is represented by axial synchronous machines (with an stator, two permanent magnets rotors and a single inverter for vector control of the both rotors speed) intended for electric hybrids or pure electric vehicle applications. Constructive topology, circuit model, optimal design, control methods, and quasi 3D-FEM analysis were presented for validation of analytical data on machine torque developed. A new family of electric machines is proposed to improve the radial and axial dimensions, with high torque density and high efficiency. The torque capability of the machine with concentrated fractional stator windings and surface permanent magnets has been demonstrated.

The last research direction approached in the habilitation thesis has as theme the theoretical and experimental study of the adjustable electric generators for wind or hydro applications. Fifteen subchapters were presented for the homopolar and homo-heteropolar reactive synchronous generators with stator excitation and for the dual stator windings induction generator with the cage rotor. The concern for homopolar and homo-heteropolar generators with stator excitation research is a natural continuation of the theme approached in the doctoral thesis. Increasing in time of the computing power of electronic computers and the new computational programs with 2D and 3D finite elements, as well as more performant dynamic simulation programs, have enabled the analyzes to be approached at a higher level. I have continued experimenting with a low-power experimental model. The dual stator windings induction generator scheme proposed in this chapter uses an inverter with apparent power lower than the corresponding generator power. The expected ratio between the inverter power and the generator power is 50% in the case of dual stator windings induction generator. The advantage of dual stator windings induction generator is the lack of brushes. Dual stator windings induction generator can be used in variable speed applications. It is possible to extract low power even at low speeds, which cannot be obtained when the generator is directly connected to the grid, or when the generator has an inverter on the excitation winding and a diode bridge on the main winding. The dual stator windings induction generator typology is an advantageous solution when it supplies unpretentious loads. The inverter on the main winding is used to transfer the active power and also the reactive power required for generator magnetization at low speeds, when the capacitor could not provide enough reactive power. A method to determine the saturated inductance of the dual stator windings induction generator was also developed. Digital simulations and experimental results, in good correspondence, prove the validity of the theoretical considerations.

It is then briefly presented the research directions (existing or some new ones) that I want to address after obtaining the attestation certificate, together with the research teams I belong to and where I will integrate the future PhD students. The references list contains 185 papers, books or invention brevets where at 114 I am coauthor (at the 68 first author).

I. REALIZĂRILE ȘTIINȚIFICE, PROFESIONALE ȘI ACADEMICE

1. Motivarea cererii de obținere a abilitării în domeniul Inginerie Electrică

Din anul 1991 am început activitatea didactică și de cercetare ca preparator la Universitatea Politehnica Timișoara unde din anul 2000 sunt conferențiar în cadrul departamentului de Inginerie Electrică și Informatică Industrială de la Facultatea de Inginerie Hunedoara.

M-am născut în Orăștie, județul Hunedoara în anul 1965 și am urmat studiile superioare în domeniul Inginerie electrică la Facultatea de Electrotehnică, secția Electrotehnică, specializarea Mașini electrice, în cadrul Institutului Politehnic „Traian Vuia” din Timișoara între anii 1984 și 1989 absolvind cu media 9,89 ca șef de promoție și nota 10 la examenul de diplomă. Între anii 1993 și 1998, am urmat studiile doctorale la Universitatea Politehnica Timișoara și am susținut în iunie 1998, teza de doctorat cu titlul “Studiul generatorului electric reglabil fără perii”.

Din anul 1991 până în prezent am publicat 290 de lucrări științifice (4 în jurnale ISI, 37 ISI proceedings, 45 BDI, etc). Ele pot fi grupate în trei perioade distincte de evoluție a carierei de cercetător: primele 26 de lucrări au fost publicate majoritar în limba română la conferințe locale în Hunedoara, Oradea, Reșița, Sibiu și Petroșani în perioada premergătoare susținerii tezei de doctorat; următoarele 89 de lucrări, au fost publicate în perioada 1999-2007, atât în limba engleză cât și în română la conferințe locale, naționale și internaționale, atât în țară cât și în străinătate și de asemenea în jurnale naționale. Am participat la conferințele EPE la Iași începând cu anul 2002, la SIELMEN la Chișinău din 2003, la DEMI la Banja Luka în Bosnia din 2003, la ELMA la Sofia în Bulgaria în 2006, la ICEM în Creta în 2006; cu experiența acumulată, începând cu anul 2008 am abordat cu succes publicarea la cele mai prestigioase conferințe și jurnale din lume detașându-se între acestea publicațiile IEEE. La o parte din aceste lucrări, unde nu am fost prim autor am fost autor corespondent. Numărul lucrărilor publicate în această perioadă este de 175, dintre care o lucrare publicată în jurnalul IEEE Transaction on Industry Applications și numeroase lucrări publicate la conferințele IEEE: IECON (Orlando-SUA 2008, Porto-Portugalia 2009, Montreal-Canada 2012, Viena-Austria 2013), ECCE (Pittsburg-SUA 2014), IAS Annual Meeting (Houston-SUA 2009), IEVC (Greenville-SUA 2012), ICIT (Melbourne-Australia 2009, Vinna del Mar-Chile 2010, Auburn-SUA 2011), EPE ECCE Europe (Barcelona-Spania 2009, Birmingham-Anglia 2011, Lille-Franța 2013, Geneva-Elveția 2015), EPE PEMC (Poznan-Polonia 2008, Novi Sad-Serbia 2012, Antalya-Turcia 2014), ESARS (Genova-Italia 2012), OPTIM (Brașov 2010, 2012, 2014), Intermag (Dresda-Germania 2014), ICAS (Wuhan-China 2013, 2015, Banja Luka 2018). Nu am neglijat nici publicarea la conferințele naționale cum este Conferința Națională de Acționări Electrice (CNAE 2008-Timișoara, 2010-Craiova, 2012-Suceava, 2014-Reșița, 2016-Cluj și 2018-Iași) și la alte conferințe (Baia Mare, Petroșani, Sebeș). Am preferat participarea la conferințe (unde se pot face schimburi fructuoase de idei, se poate lua contact cu marile personalități în domeniu, se pot iniția colaborări între universități) în detrimentul publicării în jurnale. Astfel i-am cunoscut personal pe profesorul Bimal K. Bose, de la University of Tennessee, Knoxville, SUA, Life Fellow IEEE, pe profesorul Frede Blaabjerg de la Aalborg University Danemarca, Life Fellow IEEE (care are 14000 citări ISI și 80000 citări Google Scholar), pe profesorul Andreas Steimel de la Ruhr University Bochum Germania, pe profesorul Dusan Boroyevich de la Virginia Tech University, SUA, Life Fellow IEEE, pe profesorul Marco Liserre de la Universitatea Christian Albrechts din Kiel Germania, pe profesorul Leo Lorenz de la European Center of Power Electronics, Nuremberg Germania, pe profesorul Gianfranco Chicco de la Politecnico di Torino, Italia, Fellow IEEE, etc. Îmi propun ca în etapa următoare, după susținerea tezei de abilitare, împreună cu viitorii doctoranzi să abordez mai intens publicarea în jurnalele importante ale IEEE, pentru creșterea vizibilității rezultatelor de cercetare obținute dar nu voi neglija nici publicarea de lucrări la conferințele prestigioase. Sunt coautor la 3 brevete de invenție din care unul internațional. Am făcut parte ca membru în comisia de examen sau pentru susținerea unor referate în cadrul stagiului doctoral la conducătorii de doctorat în Inginerie Electrică de la Universitatea din Petroșani și sunt în comisia de

îndrumare a doctoranzilor doamnei profesoare Manuela Pănoiu de la Facultatea de Inginerie Hunedoara.

Încă din primii ani am căutat să am cât mai multe colaborări cu mediul industrial, atât prin contracte (10 contracte din care la 7 am fost director) cât și prin organizarea stagiului de practică al studenților și organizarea unor vizite de studiu ale studenților în cele mai reprezentative întreprinderi din țară (am organizat 30 excursii de studii de una până la șase zile, la peste 100 de întreprinderi în aproape toate județele țării). Am participat ca membru în echipă la 6 granturi de cercetare și am fost director la 2 granturi).

Nu am neglijat nici latura didactică preocupându-mă de publicarea suportului de curs, seminar și laborator. Astfel am publicat 20 de cărți și 7 suporturi de curs în format electronic cu tematică de mașini electrice, acționări electrice, tracțiune electrică și echipamente electrice. Rezultatele obținute în două direcții de cercetare importante din ultimii 8 ani (sisteme de acționare electrică performante cu dimensiuni și greutate reduse pentru vehicule electrice și hibride și generatorul electric asincron cu colivie și două înfășurări statorice DSWIG, pentru aplicații eoliene sau hidraulice) s-au materializat în 2 cărți publicate în limba engleză la Editura Politehnica Timișoara. Una dintre ele (Dual rotor single stator permanent magnet motors for hybrid electrical vehicles), a fost distinsă în anul 2016 cu premiul "Constantin Budeanu" al Academiei Române. A fost publicat de asemenea pe aceeași temă un capitol într-o carte la o editură din Anglia. În urma unei bune colaborări cu Universitatea din Cassino Italia și Universitatea Tehnică a Moldovei din Chișinău Republica Moldova, au rezultat numeroase lucrări științifice, un brevet de invenție în Italia, un grant de cercetare România-Moldova, o propunere de grant la Orizont 2020 și un capitol într-o carte la o editură din Statele Unite. Din colaborarea cu Universitatea de Aeronautică și Astronautică din Nanjing China s-a obținut un grant de cercetare comun România-China, care își propune să aprofundeze studiul DSWIG, proiectarea și realizarea unui model experimental, obținerea unui brevet de invenție și depunerea unei alte cereri de finanțare la o competiție din cadrul programului Orizont 2020 sau la o altă competiție internațională. Din anul 2000 coordonez Departamentul de Educație Permanentă al facultății și în această perioadă am înființat 13 programe de studii postuniversitare (cu peste 2500 absolvenți) și numeroase cursuri de specializare (cu peste 1000 de absolvenți) pentru diversificarea ofertei educative pentru studenți, absolvenți și populația din zonă. Suma încasată din taxele de studiu la acest departament depășește 1 milion de euro, o parte importantă fiind investită în dotări pentru facultate.

Recunoașterea internațională a activității de cercetare depusă a fost apreciată prin admiterea începând cu anul 2006 ca membru IEEE (la societățile Industry Applications, Industrial Electronics, Power Systems, Power Electronics, și Magnetics) iar din mai 2018 ca Senior Member IEEE (ca reviewer i-am avut pe profesorii Fabrizio Marignetti de la Universitatea din Cassino, Italia, pe Radu Bojoi de la Politecnico di Torino Italia și pe Christian Klumpner de la Universitatea din Nottingham Anglia). Am participat cu 3 prezentări în plenul unor conferințe internaționale, am fost membru în comitetele de program la 18 conferințe internaționale, sunt editor asociat la jurnalul JEE (Journal of Electrical Engineering), am recenzat 91 de articole la jurnale și conferințe ISI, cele mai multe pentru IEEE, și câteva sute de articole la jurnale și conferințe BDI. Lucrările științifice publicate au primit 66 de citări ISI și 129 citări Google Scholar (fără autocitări).

Deviza după care m-am ghidat: „*O cercetare trebuie să înceapă de la o idee și să fie dusă până la valorificarea industrială a rezultatelor*”, aparține academicianului Horia Hulubei. Încă din perioada stagiului doctoral am fost implicat în implementarea industrială a unor teme de cercetare în domeniul sistemelor de acționare electrică cu motoare asincrone având turație variabilă, în domeniul compensării energiei reactive și a armonicelor superioare la diverși consumatori și în domeniul metodelor de încărcare în sarcină artificială a mașinilor electrice rotative (asincrone, sincrone și de curent continuu) pe standurile de probă a fabricilor constructoare de mașini electrice sau ale secțiilor sau atelierelor de reparații electrice ale unor agenți economici. Au rezultat numeroase contracte, la care am participat ca și colaborator al firmei BeeSpeed Automatizări S.R.L. Timișoara, din care amintesc: grup de pompare cu convertor static de frecvență (CSF) și motor asincron de 400 KW pentru sistemul de termoficare al orașului Deva la termocentrala Mintia, modernizare și automatizare a sistemului de pompare a apei potabile și a apei uzate în orașul Călan, modernizare acționare ventilator cu moment de inerție mare ($J=4001 \text{ kgm}^2$) cu motor

asincron în colivie de 1600 KW și CSF de tip ACS 5000 cu puterea aparentă de 2100 KVA la Kronoshpan Sebeș, automatizare pornire motoare asincrone de 250 KW la 6 KV cu rotor bobinat pentru acționarea unor mori cu bile, prin introducerea de bobine în rotor pe durata pornirii la Macon S.A. Deva, sistem de acționare a tamburului de înrolare a hârtiei la ieșirea din mașina de fabricație la Pehart Tech Petrești, județul Alba, arbore electric cu CSF la mașini de depozitare și extracție cărbune la termocentrala Mintia, automatizare pompe răcire primară și răcire secundară la mașina de turnare continuă a oțelului la Arcelor Mittal Hunedoara și compensare a consumului de energie reactivă în stația de alimentare a pompelor, etc.

Înaintarea prezentei teze de abilitare pentru susținere în domeniul Ingineriei Electrice, este motivată de întreaga activitate de cercetare și didactică desfășurată în acest domeniu în ultimii 27 de ani. Prin acceptarea ei se creează premisele pentru transmiterea cunoștințelor actuale și a celor care se vor acumula de către mine, către tinerii cercetători doctoranzi și postdoctoranzi, continuarea activității de cercetare și didactice, creșterea impactului și vizibilității cercetării românești în domeniu bazându-mă pe experiența acumulată și pe munca pe care o vor desfășura doctoranzii în cadrul stagiului doctoral, pentru consolidarea cercetării interdisciplinare cu alte centre de cercetare din țară și străinătate, prin coordonarea în cotutelă a doctoranzilor.

2. Direcții de cercetare și competențe

2.1. Aplicații industriale ale sistemelor de acționare electrică cu turație variabilă

La începutul anilor 90 în România aproape toate acționările electrice cu turație variabilă erau realizate cu ajutorul mașinilor electrice de curent continuu și a mașinilor asincrone cu rotor bobinat și rezistențe rotorice. Excepția o reprezentau sistemele de acționare electrică cu mașini sincrone alimentate de la cicloconvertoare și câteva variante constructive, create de Electrotehnica București pe baza unor proiecte ale ICPE București, care realizau acționări electrice cu turație variabilă cu motoare asincrone. Dimensiunile de gabarit, costurile foarte mari și fiabilitatea redusă au frânat mult timp extinderea la nivel industrial a acestor aplicații. Din aceste motive regretatul academician Toma Dordea avea o mare reticență față de sistemele de acționare electrică care înglobau electronica de putere.

Preocupările personale asupra acestui subiect au început în anii de stagiatură (1989-1991) la Electrometal Timișoara, mai întâi în cadrul compartimentului investiții și apoi la compartimentul de proiectare de la fabrica de tramvaie unde aveam în probe un tramvai echipat cu chopper proiectat de ICPE București și realizat la Timișoara. Echipamentele electronice, atât cele de forță cât și cele de comandă, de fabricație românească, nu făceau față cerințelor impuse de tracțiunea electrică și din acest motiv nu s-a reușit omologarea lui.

La inițiativa academicianului Ion Boldea și a prof.dr.ing. Muntean Nicolae în anul 1994 a luat ființă BeeSpeed Automatizări SRL Timișoara care și-a propus din start să promoveze sistemele de acționare cu convertoare statice de frecvență performante în industria românească. Echipamentele utilizate au fost inițial de la firma Hitachi din Japonia iar din 1996 de la firma ABB (Suedia, Finlanda, Elveția). Încă din primul an am făcut parte din grupul de colaboratori pentru implementarea acestor soluții (la început împreună cu prof.dr.ing. Muntean Nicolae și ulterior cu dr.ing. Babău Radu), iar în cei 24 de ani de colaborare am participat la identificarea aplicațiilor, discutarea soluțiilor tehnice și punerea în funcțiune a multor proiecte de acționări electrice cu turație variabilă de la puteri mici sub 1KW până la puterea de 1600 KW (convertorul cu puterea de 2100 KVA) la tensiunea de 6KV, în foarte multe ramuri industriale (energetică, metalurgie, ciment, industria lemnului, industria hârtiei, minerit, prepararea minereurilor, alimentare cu apă, epurarea apelor uzate, etc). O parte a aplicațiilor industriale au fost din domeniul pornirii și frânării controlate a motoarelor asincrone cu ajutorul softstarterelor. Pe lângă modificarea vitezei sistemelor de acționare electrică, convertoarele statice au fost utilizate și pentru implementarea unor soluții de tensionare constantă a unui cablu electric care se rulează/derulează pe un tambur, pentru tensionarea constantă a sârmei rezultate prin laminare sau a hârtiei la ieșirea din mașina de fabricație, care se bobinează pe un tambur, pentru crearea unui arbore electric cu două convertizoare de frecvență (unul master și unul slave)

pentru deplasarea (unor macarale portal, poduri rulante, mașini de depozitare și extragere cărbune din depozit și de la estacadă) pe căi cu șine aflate la distanță mare una de alta. Prin interacțiunea cu mediul industrial au rezultat niște soluții tehnice originale la nivel național și chiar internațional, aplicate în practică, care au fost diseminate cu ocazia unor conferințe naționale și internaționale respectiv în jurnale de specialitate [Bab 04], [Dea 02b], [Dea 03b], [Dea 03c], [Dea 03d], [Dea 03e], [Dea 03f], [Dea 04a], [Dea 04b], [Dea 04c], [Dea 04d], [Dea 05a], [Dea 05e], [Dea 07a], [Dea 07b], [Dea 08d], [Dea 08e], [Dea 09a], [Dea 10a], [Dea 10b], [Dea 10g], [Dea 10h], [Dea 10i], [Dea 10j], [Dea 11b], [Dea 11c], [Dea 12], [Dea 16b], [Dea 17a], [Pan 08].

O direcție de cercetare derivată din aplicațiile cu convertoare statice de frecvență a reprezentat-o utilizarea acestora pentru încărcarea în sarcină artificială (fără mașină de încărcare cuplată la arbore) a mașinilor electrice rotative (asincrone, sincrone și de curent continuu). Am derulat un contract de cercetare pentru modernizarea standului de probe al mașinilor electrice la secția de reparații electrice a Siderurgica S.A. Hunedoara propunând soluția de încărcare în sarcină artificială [Dea 02a], [Dea 03a], [Dea 10g], [Tut 99a], [Tut 99b], [Tut 01].

2.2. Aplicații industriale ale sistemelor de compensare a energiei reactive și a regimului deformant

O altă direcție de cercetare rezultată din cerințele industriei este compensarea consumului de energie reactivă, a armonicilor superioare și a regimului deformant la consumatori de tip special (cuptoare electrice cu arc și tracțiunea electrică în curent alternativ și în curent continuu). S-au făcut numeroase investigații teoretice, simulări și măsurători experimentale pentru sistemul de alimentare cu energie electrică a Oțelăriei electrice de la Arcelor Mittal Steel Hunedoara, în substația de tracțiune electrică Deva, pe locomotive electrice în regim de tracțiune electrică pe traseu, în diverse stații electrice etc. [Bac 10], [Dea 06b], [Dea 07c], [Dea 10e], [Dea 10f], [Dea 11a], [Dea 14a], [Pop 09], [Pop 11], [Pop 12], [Tom 11]. În baza studiilor efectuate de colectivul nostru și de alte firme interesate în realizarea unui sistem de compensare la Arcelor Mittal Steel, în acest an s-a executat și pus în funcțiune un SVC cu puterea de 85 MVar având filtrare capacitiv inductivă pe armonicile 2, 3 și 4 și reactanță controlată cu tiristoare pe fundamentală. În prezent această instalație este în faza de probe tehnologice la Hunedoara, fiind cel mai modern sistem de compensare (de tip SVC) pentru o oțelărie electrică cu cuptoare trifazate cu arc electric.

2.3. Sisteme de acționare electrică performante cu dimensiuni și greutate reduse pentru vehicule electrice și hibride

La propunerea academicianului Ion Boldea, în anul 2010 am fost cooptat într-un colectiv care a primit ca temă de cercetare studiul sistemelor de acționare electrică a vehiculelor electrice hibride (HEV), prin înlocuirea celor două mașini electrice ale HEV cu o singură mașină sincronă cu întrefier axial având un stator, două rotoare independente (cu magneți permanenți pe suprafață și număr de perechi de poli diferit) care să se poată roti în ambele sensuri, cu viteze diferite și care să poată funcționa atât în regim de motor cât și de generator. Pentru controlul acestei mașini s-a propus utilizarea unui singur invertor care la ieșire să sintetizeze două frecvențe, câte una pentru fiecare rotor. Au fost studiate două topologii de bobinaj, una având o singură înfășurare de curent alternativ trifazată bobinată în inel pe miezul feromagnetic și cealaltă cu două înfășurări trifazate separate, plasate în jurul dinților miezului feromagnetic, de o parte și de alta a miezului în zona dinspre întrefier, cu posibilitatea de conectare a lor în serie sau în paralel. A fost studiată cea de-a doua topologie având în vedere că în cazul HEV raportul puterilor pentru generator-motor este 1/2 și se impune ca înfășurările să fie diferite. Prin proiectarea analitică, proiectarea optimală, validarea prin analiză cu element finit 2D și Quasi 3D, controlul în funcție de viteză și în funcție de cuplu, s-a reușit să se obțină un sistem de acționare cu gabarit redus, cu masă mică, cu performanțe energetice ridicate, controlat de către un singur invertor. S-a studiat influența înclinării laturilor exterioare ale magneților permanenți asupra cuplului de interacțiune și asupra oscilațiilor de cuplu. Pe baza experienței acumulate s-a propus o soluție originală de acționare cu acest sistem pentru vehiculele electrice (EV). Rezultatele au fost publicate la conferințe prestigioase în domeniu, a fost

obținut un brevet internațional și a fost publicată o carte care s-a bucurat de apreciere în rândul specialiștilor din domeniu. De asemenea s-a propus și câștigat un grant de colaborare bilaterală și s-a propus un grant în cadrul competiției Orizont 2020 având această temă [Amb 17], [Bol 08], [Bol 10a], [Bol 11], [Bol 12], [Bol 14], [Dea 16c], [Dea 18a], [Nuc 17], [Top 17a], [Tut 11a], [Tut 11b], [Tut 12a], [Tut 12b], [Tut 12c], [Tut 12d], [Tut 12e], [Tut 14a], [Tut 14b].

2.4. Generatoare electrice reglabile pentru aplicații eoliene sau hidraulice

După susținerea tezei de doctorat preocuparea pentru studiul generatoarelor electrice reglabile utilizate pentru centrale eoliene sau micro hidrocentrale a rămas constantă. Astfel m-am ocupat în continuare de generatoarele sincrone homopolar și homo heteropolar cu excitație statorică, studiind proiectarea optimală, analiza cu element finit (ținând cont de programele specializate 2D și 3D apărute ulterior și de puterea de calcul a noilor generații de calculatoare), modelul matematic dedus pe baza metodei circuitelor magnetice echivalente, modelul d-q, modelul realizat cu ajutorul fazorilor spațiali, controlul sistemelor de producere a energiei cu aceste tipuri de generatoare sau servomotoare și nu în ultimul rând încercarea experimentală a lor ținând cont de punerea în funcțiune a laboratorului de încercarea mașinilor electrice de la Facultatea de Inginerie Hunedoara, realizat prin autodotare. Am abordat de asemenea studiul generatoarelor electrice asincrone cu rotorul în colivie, monofazate sau trifazate, cuplate la rețea sau în regim autonom. Lucrările științifice scrise în urma acestor cercetări au fost publicate la conferințe de prestigiu sau în jurnale de specialitate [Dea 98a], [Dea 98b], [Dea 05b], [Dea 05d], [Dea 06a], [Dea 08c], [Dea 09 b], [Dea 09c], [Dea 09d], [Dea 10c], [Dea 10d], [Dea 18c], [Top 14], [Top 17b], [Tut 15b].

În perioada 2012-2016 am făcut parte din echipa grantului "Microgrid integrated small power renewable energy hybrid systems" PCCA 36/2012, PN-II-PT-PCCA-2011-3.2-1519, coordonat de Universitatea Politehnica Timișoara. În cadrul proiectului s-a cerut integrarea în același sistem a energiei produse din trei surse de energie regenerabilă: energia eoliană, energia hidraulică a apei și energia fotovoltaică. Pentru conversia energiei eoliene și a energiei hidraulice s-a impus utilizarea unor noi generatoare electrice de tip sincron și asincron. O cerință a proiectului a fost ca sistemul să poată funcționa atât conectat la rețea cât și în regim insular autonom. Colectivului nostru i-a revenit sarcina studierii, proiectării, execuției și ulterior a testării pentru două generatoare electrice: un generator de inducție cu două înfășurări statorice (DSWIG) și un generator sincron reactiv multifazat fără perii și fără înfășurare rotorică (RBLDC), cu luarea în considerare a saturației și a efectului pelicular. S-au publicat numeroase lucrări științifice și o carte pe aceste subiecte. De asemenea s-a propus și câștigat un grant de colaborare bilaterală [Dea 18b], [Tut 13a], [Tut 13b], [Tut 14c], [Tut 14d], [Tut 14e], [Tut 14f], [Tut 15a], [Tut 16a], [Tut 17].

3. Realizări științifice, profesionale și academice

3.1. Aplicații industriale ale sistemelor de acționare electrică cu turație variabilă

Printre marii consumatori energetici actuali regăsim sistemele de pompare și cele de ventilație. Automatizarea acestor sisteme și creșterea eficienței lor energetice poate fi făcută cu ajutorul unor automate programabile, convertizoare statice de frecvență, sisteme de comunicație și de transmitere a datelor. Aplicarea în practică a diferitelor soluții este o provocare pentru un inginer dar și pentru un cercetător din domeniul sistemelor de mașini și acționări electrice.

3.1.1. Reducerea consumului de energie electrică activă prin utilizarea turației variabile.

Automatizarea arderii în cazan în funcție de încărcarea generatorului sincron într-o termocentrală

Pentru o încărcare variabilă a unui generator într-o termocentrală, reglajul debitului de apă în cazan se face cu ajutorul cuplajelor hidraulice sau prin închiderea sau deschiderea unei vane, aerul necesar arderii și gazele arse își modifică debitul prin intermediul unor jaluzele iar debitul de

cărbune în mori se reglează cu alimentatoare cu bandă (ACB) antrenate cu motoare de curent continuu. În mai multe lucrări publicate la întâlnirea anuală a inginerilor energeticieni (Conferința SIG) am propus o rezolvare a reglajelor de debite utilizând mașini asincrone alimentate de la convertizoare statice de frecvență. În industrie, și în special în termocentrale, acționările cu puteri mai mari de 160 KW sunt aproape în totalitate alimentate la tensiunea de 6KV. Pe plan mondial s-au realizat acționări reglabile cu mașini asincrone la joasă tensiune (0,4 KV, 0,69 KV) până la puteri de 2,5 MW. Pentru puteri mai mari există de asemenea soluții de convertizoare de frecvență conectate direct la 6 KV. În figura 3.1.1.1 se prezintă schema bloc pentru o acționare reglabilă de putere mare la care alimentarea se poate face direct la 6 KV sau prin intermediul unui convertizor static de frecvență CSF de joasă tensiune [Dea 03b], [Dea 05a].

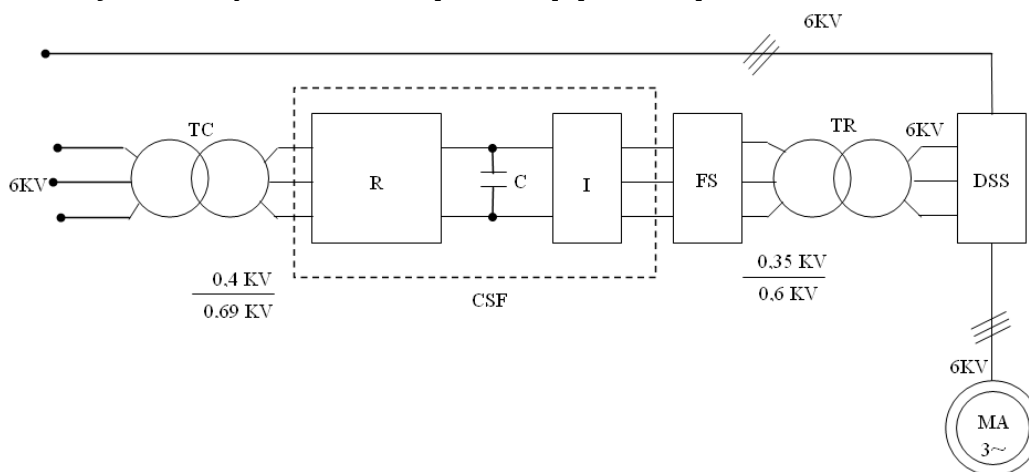


Figura 3.1.1.1 Schema de reglare a turației cu CSF de joasă tensiune

Prin intermediul transformatorului coborâtor TC tensiunea este adaptată pentru intrarea CSF. După CSF este necesar un filtru sinusoidal (FS) pentru a aduce forma de undă a tensiunii cât mai apropiată de o sinusoidă în vederea aducerii valorii ei din nou la 6 KV prin intermediul transformatorului ridicător TR. Selecția surselor (6 KV de la rețea sau 6 KV de la CSF) se face cu ajutorul dulapului de selecție a surselor (DSS). Necesitatea sursei de 6 KV de la rețea se impune în cazul unui defect la CSF. Soluția de reglare cu CSF alimentat direct la 6 KV este prezentată în figura 3.1.1.2. Această schemă este mai simplă dar costul CSF este foarte mare. Modalitatea de alegere a uneia dintre cele două soluții depinde de puterea acționărilor, de posibilitatea de amplasare a echipamentelor, de existența unei surse suficient de puternice pe joasă tensiune, etc [Dea 03b], [Dea 05a].

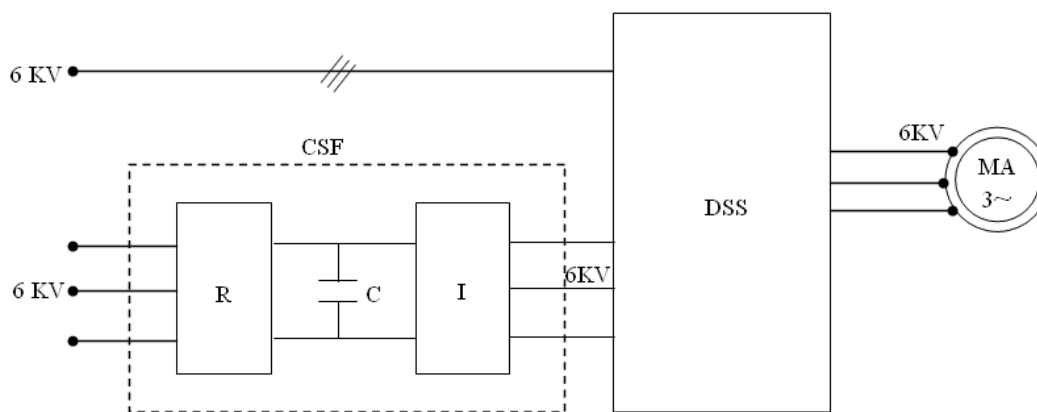


Figura 3.1.1.2 Schema de reglare a turației cu CSF alimentat direct la 6 KV.

Viteza de creștere sau de descreștere a încărcării unui grup (actualmente 3 MW/min.)

depinde de viteza de reacție a componentelor sistemului de automatizare și de inerția cazanului. Se impune deci ca elementele de reglaj (debitul de cărbune, debitul de aer cald, debitul de apă de la intrarea în cazan și debitul gazelor arse) să poată fi controlate sigur și în timp real. Soluția de reglare a turației cu convertizoare statice de frecvență pentru motoarele ventilatoarelor, a pompelor și a alimentatoarelor de cărbune cu bandă se impune ca fiind cea mai viabilă. Motoarele de antrenare ale ACB – urilor au fost înlocuite cu motoare asincrone cu rotor în scurtcircuit alimentate de la CSF. Pentru motoarele de la ventilatoarele de aer (VA), ventilatorul de gaze arse (VGA) și pentru pompa de alimentare cu apă a cazanului se alege o schemă de reglare a turației (SRT), corespunzătoare situației concrete a grupului (fie soluția din 3.1.1.1 fie soluția din 3.1.1.2). Schema de principiu a conducerii automate a cazanului în funcție de încărcarea generatorului este prezentată în figura 3.1.1.3. [Dea 03b], [Dea 05a]. Pentru funcționarea generatoarelor din termocentrale în regimuri de încărcare variabilă schema propusă conduce la creșterea siguranței în funcționare, are loc o reacție mai rapidă a sistemului și nu în ultimul rând energia electrică consumată se reduce simțitor (deci consumul specific al grupului scade). Până acum **s-a implementat** soluția de reglaj a turației cu motoare asincrone și CSF la **alimentatoarele cu bandă pentru cărbune (ACB)** ale cazanelor de la **Termocentrala Mintia** (figura 3.1.1.4).

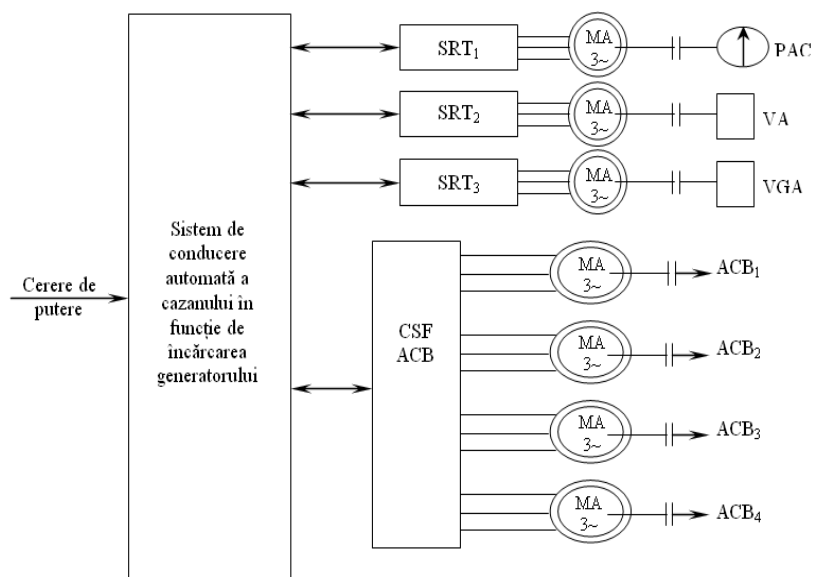


Figura 3.1.1.3 Conducerea automată a cazanului utilizând acționări cu mașini asincrone și convertizoare statice de frecvență.



Figura 3.1.1.4 Dulapul cu CSF pentru ACB-uri la Termocentrala Mintia (fotografie publicată cu acordul S.C. Complexul Energetic Hunedoara).

Creșterea eficienței sistemelor de termoficare urbană prin utilizarea turației variabile

Sistemele de termoficare centralizate au fost și vor rămâne cele mai eficiente din punct de vedere al randamentului, la producerea agentului termic pentru încălzire și a apei calde menajere. De aceea se impune pe de o parte modernizarea continuă a acestora și pe de altă parte utilizarea la maxim a facilităților oferite de noile tehnologii din domeniul pompării și al automatizării [Dea 07a], [Dea 08d], [Dea 08e].

Modificările substanțiale din ultimii ani a rețelei de distribuție a agentului termic secundar prin debransarea multor consumatori casnici și automatizarea punctelor termice au impus modernizarea sistemului de pompare al agentului primar. Pentru aceasta s-a ales soluția utilizării unei pompe cu turație variabilă, care are drept referință diferența de presiune între tur și retur, ce funcționează în paralel cu pompele existente [Dea 08e]:

$$\Delta p = P_T - P_R \quad (3.1.1.1)$$

Caracteristicile pompei au fost astfel calculate încât în perioada mai – septembrie această pompă să poată funcționa singură în rețea, iar în rest ca pompă suplimentară împreună cu o altă pompă cu turație fixă [Dea 08d]. În acest fel se poate face un reglaj fin al debitului vehiculat, păstrând constantă diferența de presiune dintre aspirație și refulare. Astfel se permite punctelor termice din oraș să lucreze complet automatizat [Dea 08d]. În figura 3.1.1.5 se prezintă schema bloc a sistemului de termoficare primar pentru un oraș cu 70 000 de locuitori. S-au făcut următoarele notații: SPATP – stație de pompare agent termic primar; SC – schimbător de căldură; $PT_1 \dots PT_n$ – puncte termice; SA – sistem automat; TPT – traductor presiune tur; TPR – traductor presiune retur; TTT – traductor temperatură tur; TTR – traductor temperatură retur. Pentru sistemul din figura 3.1.1.5 pompa cu turație variabilă are următoarele date: $Q=1000\text{m}^3/\text{h}$, $h = 120\text{m}$, $P_N = 367 \text{ kW}$.

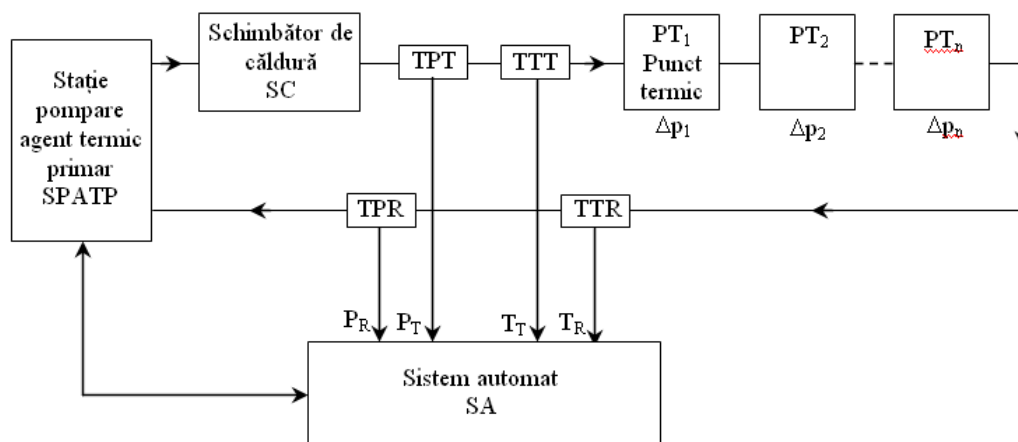


Figura 3.1.1.5 Schema bloc a circuitului de termoficare primar.

În figura 3.1.1.6 se prezintă schema de principiu a sistemului de forță și de automatizare pentru pomparea agentului primar, unde s-au făcut următoarele notații: VAMP 3100 – releu de protecție pe medie tensiune (6KV); TU – transformator electric coborât de tensiune în construcție uscată (630KVA, 6000V/400V); CSF – convertizor static de frecvență (450KVA, 400V,800A); M – motor electric (400 kW, 400V, 750A, $n_N = 1493 \text{ rot/min}$, $\cos\phi_N = 0,91$); P – pompă; CL_1, CL_2 – cutii de comandă locale; EV_1, EV_2 – electroventile ($\phi 300 \text{ mm}$); α_1, α_2 – unghiul de deschidere al electroventilelor; P_T, P_R – presiunea turului și a returului; T_T, T_R – temperatura agentului primar pe tur și pe retur; T_1, T_2, T_3 – temperaturi în înfășurarea motorului electric; T_4, T_5 - temperaturi în lagărele motorului electric; T_6 – temperatura în lagărul pompei; T_7 – temperatura înfășurărilor transformatorului; T_8 – temperatura în convertizorul de frecvență; U_1 – tensiunea de alimentare în primarul transformatorului; U_2 – tensiunea în secundarul transformatorului; I_1 – curentul absorbit de transformator; I_2 – curentul absorbit de motor; P_1 – puterea activă absorbită de transformator; Q_1 - puterea reactivă absorbită de transformator; P_2 – puterea activă absorbită de motor; n - turația motorului; CP – calculatorul de proces [Dea 08e].

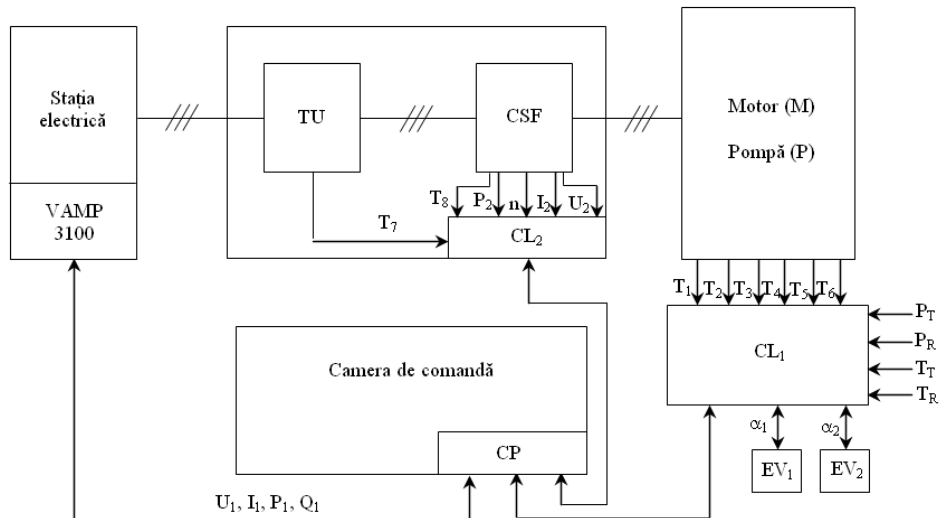


Figura 3.1.1.6 Sistemul de automatizare al pomării agentului primar.

În cutiile de comandă locale sunt automate programabile care achiziționează semnale de proces, le transmit calculatorului de proces și comandă elementele de execuție alocate. Calculatorul de proces comunică cu releul de protecție din stația electrică, cu automatele programabile din cutiile de comandă locale, afișează pe ecranul aplicației principale mărimi citite și comandă elementele de execuție când au loc procese dinamice în sistem sau când este semnalată o funcționare anormală. Comunicația este serială de tip MODBUS.

Soluția prezentată anterior a fost aplicată la una din pompele de termoficare de la **Termocentrala Mintia** (figura 3.1.1.12). La punerea în funcțiune s-au făcut diferite probe electrice, mecanice și hidraulice în gol, cu sarcină redusă și cu sarcină nominală. În figura 3.1.1.7 se prezintă tensiunea la ieșirea din CFS și curentul motorului la cuplarea pompei având o referință de viteză de 20% din cea nominală, în figura 3.1.1.8 și figura 3.1.1.9 se prezintă tensiunea și curentul la ieșirea din CFS la comanda de oprire a pompei urmată de o repornire, iar în figura 3.1.1.10 curentul la ieșirea CFS (absorbit de motor) când în circuit rămâne doar pompa cu turație variabilă (s-a comandat oprirea pompei cu turație fixă care debita în paralel în rețeaua hidraulică) [Dea 08e].

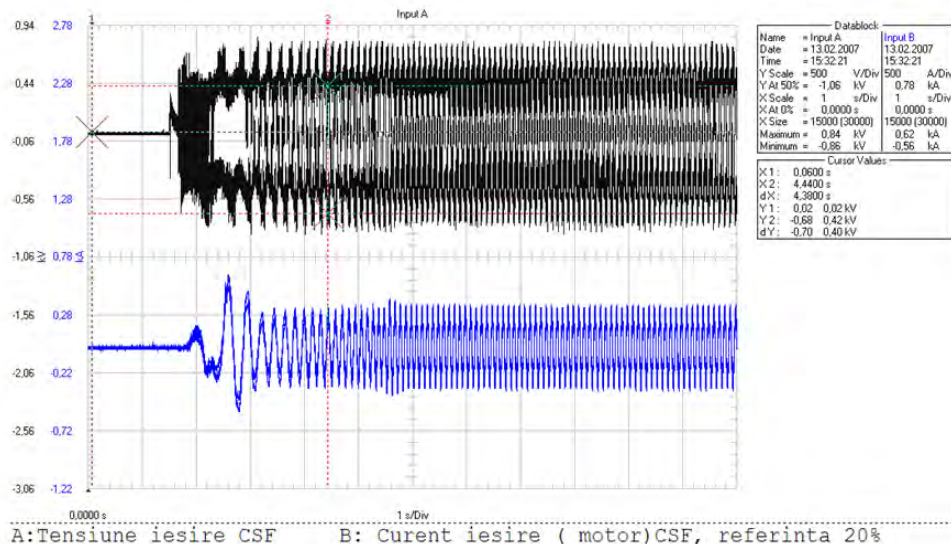


Figura 3.1.1.7 Tensiunea și curentul la ieșirea CSF la cuplarea motorului pompei, având o referință de viteză de 20% din cea nominală.

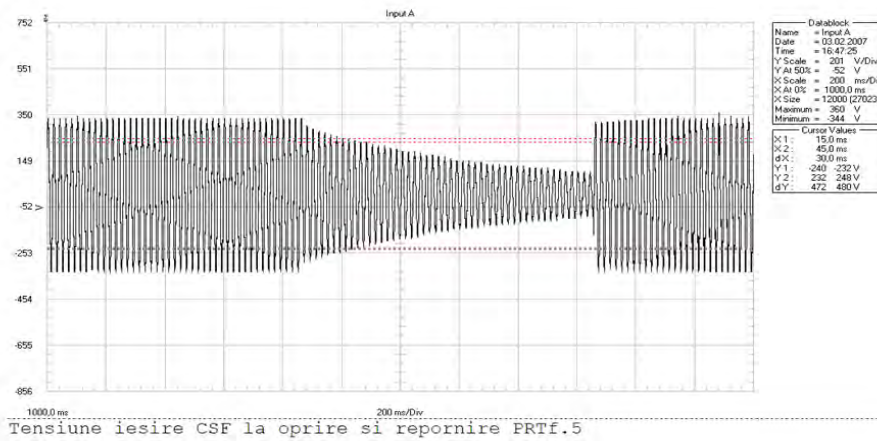


Figura 3.1.1.8 Tensiunea de ieșire a CSF după o comandă de oprire și una de repornire.

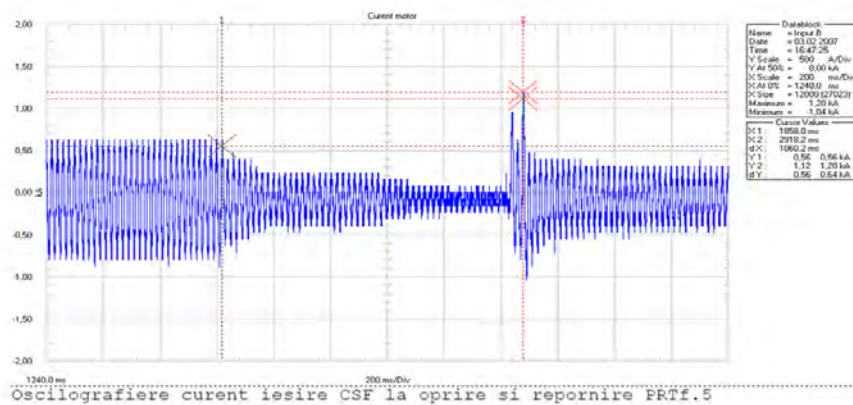


Figura 3.1.1.9 Curentul de ieșire al CSF după o comandă de oprire și una de repornire.

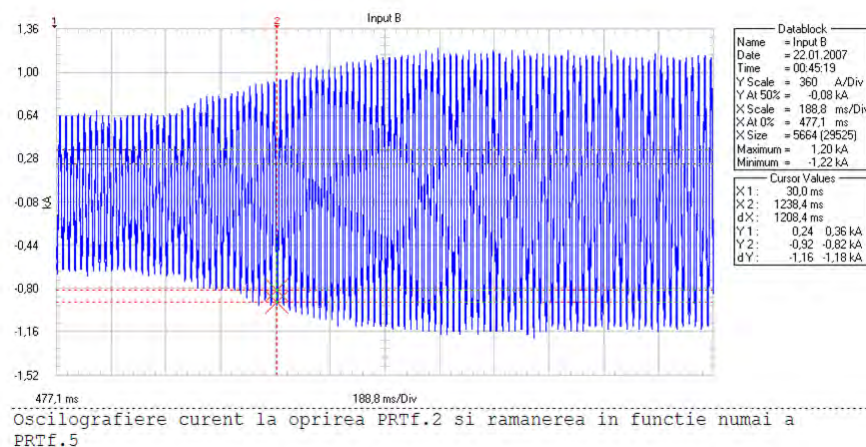


Figura 3.1.1.10 Variația curentului când pompa cu turație variabilă rămâne singură în circuitul de pompare.

După efectuarea măsurătorilor de vibrații ale motorului și ale pompei, la sarcină redusă și la sarcină nominală s-a trecut la proba de 72 de ore care încheie procedurile de punere în funcțiune. Toate problemele care au apărut în timpul probelor de punere în funcțiune au fost folosite pentru ajustări ale softului de comandă și a celui de comunicație. Prin testele efectuate la punerea în funcțiune și prin experimentări ulterioare se pot obține datele necesare pentru ca sistemul să funcționeze optim. În tabelul 3.1.1.1 se prezintă consumul de energie electrică al sistemului în anii 2006 și 2007. Pompa cu turație variabilă a fost pusă în funcțiune în luna aprilie 2007 [Dea 08e].

Tabelul 3.1.1.1

Luna \ Anul	[kWh] 2006	[kWh] 2007
IANUARIE	768 480	787 680
FEBRUARIE	645 840	636 240
MARTIE	414 600	446 640
APRILIE	302 880	460 920
MAI	142 320	385 640
IUNIE	312 480	191 560
IULIE	369 480	196 000
AUGUST	358 440	151 880
SEPTEMBRIE	458 520	134 520
OCTOMBRIE	530 280	346 560
NOIEMBRIE	759 960	649 480
DECEMBRIE	804 360	815 000
TOTAL	5 867 640	5 202 120

Rezultă că în 8 luni de funcționare s-a făcut o economie de energie electrică:

$$\Delta E = 665\,520 \text{ kWh} . \quad (3.1.1.2)$$

Reprezentarea grafică a consumurilor pe cei doi ani este dată în figura 3.1.1.11. Amortizarea completă a investiției doar prin reducerea consumului de energie electrică se poate face în 3,5 – 4 ani.

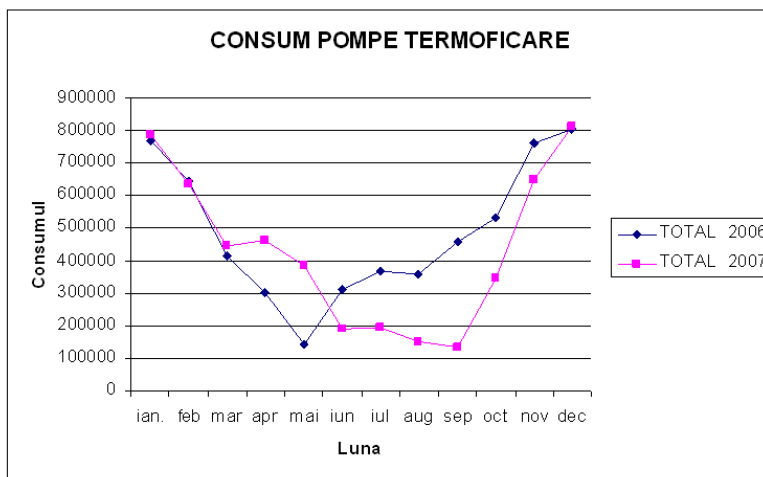


Figura 3.1.1.11 Analiza comparativă pe doi ani a consumului pompei, înainte și după modernizarea sistemului.

Pe lângă reducerea consumului de energie electrică, pomparea cu turație variabilă a agentului primar poate fi eficientizată și prin creșterea temperaturii la plecarea din centrală în așa fel încât aceiași cantitate de căldură să fie vehiculată cu ajutorul unei cantități de apă mai reduse. Căldura cedată agentului secundar are expresia:

$$\Delta Q = m \times c \times \Delta T \quad (3.1.1.3)$$

Cu cât termenul ΔT este mai mare cu atât cantitatea de apă vehiculată m va fi mai mică. Având în vedere că punctele termice sunt complet automatizate, cu cât temperatura de sosită este mai mare cu atât diafragma schimbătorului de căldură este mai închisă și în acest fel căderea de presiune pe punctul termic este mai redusă. Însumând căderile de presiune pe toate punctele termice:

$$\Delta P = \Delta p_1 + \Delta p_2 + \dots + \Delta p_n \quad (3.1.1.4)$$

rezultă o cădere de presiune totală în rețea mai mică și deci pompa va funcționa cu turație mai redusă pentru a realiza diferența impusă între tur și retur, consumul de energie electrică diminuându-se. Dacă diferența de presiune Δp se menține constantă turația pompei nu se modifică. Dacă apare o tendință de reducere a lui Δp , turația va crește până se ajunge din nou la valoarea impusă iar dacă Δp crește, turația se va reduce.

În tabelul 3.1.1.2 se prezintă măsurătorile efectuate pe parcursul a 10 zile, în fiecare zi temperatura turului a fost menținută constantă, iar valorile din tabel reprezintă media zilnică a debitelor și puterii absorbite de motor [Dea 07a].

Tabelul 3.1.1.2 Studiu asupra modului de reducere a consumului

Nr. zi	Temperatură		Δp [barr]	Q [m ³ /h]	P [kW]
	Tur [°C]	Retur [°C]			
1	80	64	7,2	720	250
2	78	63	7,2	768	272
3	76	62	7,2	822	290
4	74	60	7,2	823	291
5	72	59	7,2	886	315
6	70	57	7,2	886	315
7	68	55	7,2	886	315
8	66	54	7,2	960	340
9	64	53	7,2	1047	358
10	62	52	7,2	1152	376

La creșterea temperaturii de plecare a agentului termic primar cu 18°C, debitul vehiculat se reduce cu 36% iar puterea electrică absorbită cu 34%. Pe baza acestor date rezultă că amortizarea investiției se poate face mult mai repede (maxim 2,5 ani) [Dea 08e].



Figura 3.1.1.12 Pompa de termoficare cu turație variabilă (a) și convertizorul cu containerul pentru CSF și transformatorul uscat (b) (fotografii publicate cu acordul S.C. Complexul Energetic Hunedoara).

În prezent toate echipamentele noi înglobează sisteme de acționare electrică moderne între care se detașează acționările electrice cu turație variabilă.

3.1.2. Pornirea controlată a sistemelor de acționare electrică

Apariția softstarterelor (SST) a produs un salt calitativ în problema pornirii, opririi sau frânării motoarelor asincrone cu rotorul în scurtcircuit. Aceste echipamente nu sunt de folos la pornirea motoarelor asincrone cu rotorul bobinat. Există numeroase firme producătoare care oferă softstartere la tensiuni joase (0.4 și 0.69 KV) sau la tensiuni medii (3.3; 4.2 sau 6 KV) [Dea 10b]. Se pot porni chiar și sisteme de acționare electrică care prezintă un cuplu rezistent și un moment de inerție echivalente de valori mari [Dea 08f]. Softstarterele la care sunt controlate toate cele trei faze (majoritatea) pot utiliza pornirea sau oprirea cu controlul tensiunii, a curentului sau a cuplului [Dea

10b]. La controlul în tensiune se realizează o pornire lină, dar nu se generează nici un fel de reacție de curent sau de cuplu. Mărimile tipice pentru pornirea cu rampă de tensiune sunt tensiunea inițială U_i și durata rampei de pornire t_p . Variația în timp a curentului și tensiunii în acest caz sunt prezentate în figura 3.1.2.1 a și b. Cu I_{max} s-a notat curentul maxim obținut pe durata pornirii și cu I_R curentul de sarcină [Dea 08g].

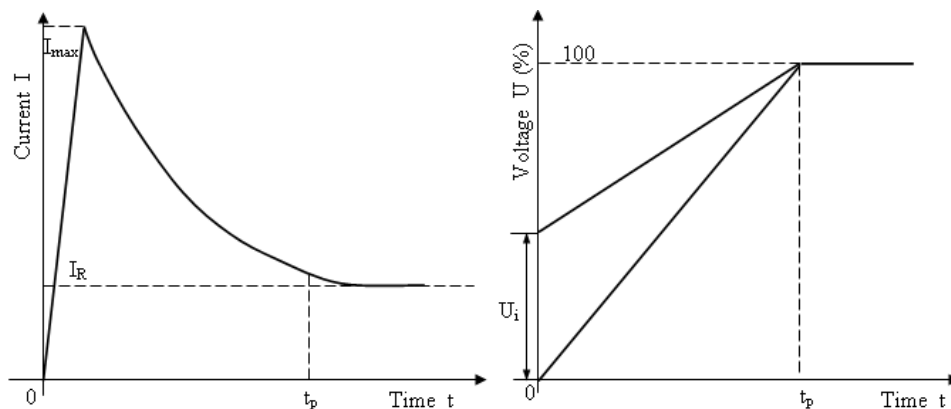


Figura 3.1.2.1 Forma de variație a curentului și tensiunii la pornirea cu rampă de tensiune.

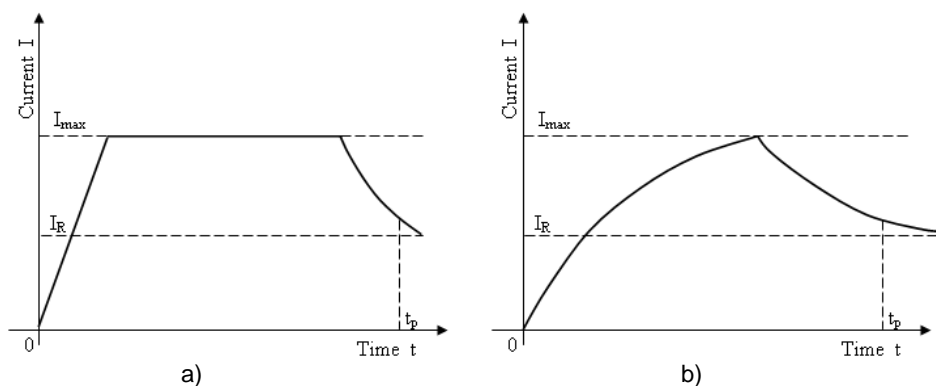


Figura 3.1.2.2 Forma de variație a curentului la pornirea cu controlul curentului (a) și la pornirea cu control de cuplu (b).

La controlul în curent, rampa de tensiune poate fi folosită dar cu urmărirea curentului, în așa fel încât la atingerea limitei I_{max} prescrise, să se limiteze creșterea tensiunii. Variația în timp a curentului este prezentată în figura 3.1.2.2 [Dea 10b]. Pornirea cu control de cuplu are eficiență maximă deoarece softstarterul monitorizează cererea de cuplu și permite pornirea cu cel mai mic curent posibil. Dacă nu se face control de cuplu, motoarele vor porni sau se vor opri mult mai repede decât este setat, mai ales la sarcini de pornire reduse. În figura 3.1.2.2b se prezintă forma de variație a curentului în acest caz [Dea 10b].

Tabelul 3.1.2.1

Mărimea	Valoarea
Curentul nominal	17 A
Tensiunea nominală	400 V
Puterea motorului recomandată	7.5 kW
Curentul maxim	150÷500% I_N
Pierderi de putere	50 W
Masa	6.7 kg
Răcire	Prin convecție
Sigurante ultrarapide Bussman	80 A

Tabelul 3.1.2.2

Mașina electrică	M ₁	M ₂
Caracteristici		
P _N [kW]	3	3.5
U _N [V]	380/220	380/220
I _N [A]	12.6/7.26	17.8/10.3
Conexiune	Δ/Y	Δ/Y
cosφ	0.77	0.75
n _N [rot/min]	945	910
U _{rotor} [V]	-	204
I _{rotor} [A]	-	12.2

Investigații experimentale

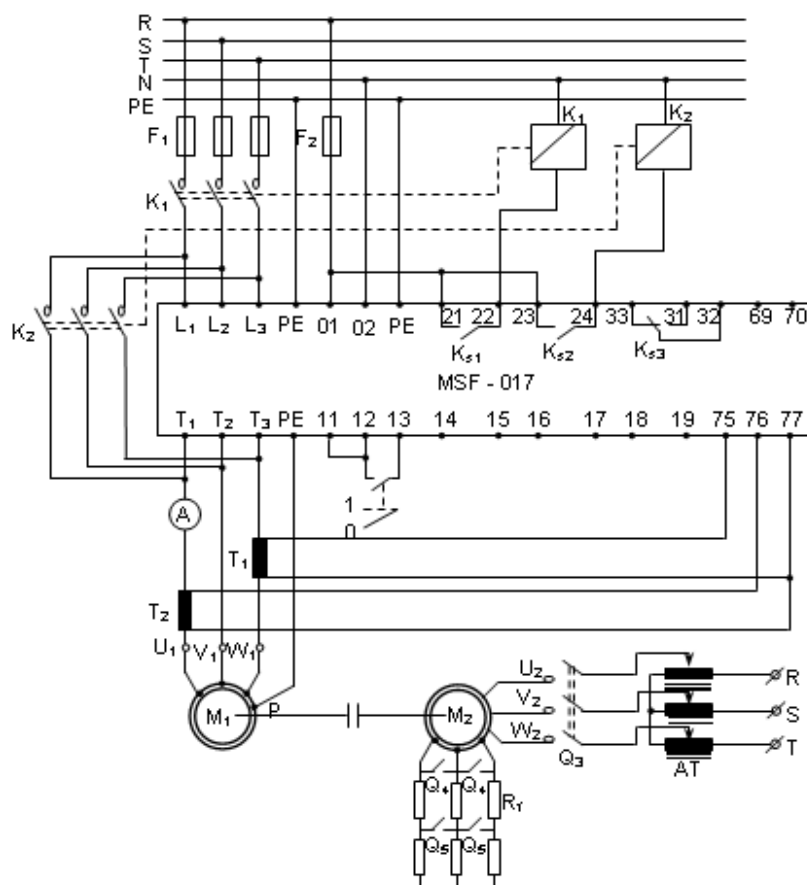


Figura 3.1.2.3 Schema experimentală.

În figura 3.1.2.3 se prezintă schema experimentală pentru măsurarea curenților, tensiunilor și timpului de pornire, unde s-au făcut următoarele notații [Dea 08f]: F₁ – siguranțe ultrarapide pentru partea de forță; F₂ – siguranță de comandă; K₁ – contactor principal; K₂ – contactor bypass; Q₃ – separator conectare M₂ la rețea; Q₄, Q₅ – separatoare scurtcircuitare trepte de rezistență; K_{s1}, K_{s2}, K_{s3} – rele softstarter; T₁, T₂ – transformatoare de curent; R_f – reostat de frânare; A – ampermetru; M₁, M₂ – motoare asincrone. În tabelul 3.1.2.1 se prezintă caracteristicile softstarterului MSF-017 de la firma Emotron din Suedia folosit la experimentări [Dea 08g] iar în tabelul 3.1.2.2 datele de catalog ale motoarelor M₁ și M₂.

Figura 3.1.2.4 prezintă softstarterul MSF-017 folosit pentru încercările experimentale. Au fost efectuate mai multe teste pe standul experimental: pornire cu rampă de tensiune fără limitare de curent, cu rampă de tensiune și limitare de curent și cu control al cuplului. S-au măsurat curenții de vârf pentru fiecare pornire iar închiderea contactorului de bypass K₂, a fost comandată de releul

softstarterului K_{S2} când tensiunea de ieșire a ajuns la valoarea nominală. Pentru a avea valori diferite ale cuplului de pornire, s-a modificat valoarea reostatului R_f aflat în circuitul rotoric al mașinii M_2 . La o valoare constantă a sarcinii s-a modificat valoarea tensiunii inițiale U_i .



Figura 3.1.2.4 Softstarterul industrial MSF-017 folosit pentru încercările experimentale.

Rezultate experimentale

În tabelul 3.1.2.3 sunt prezentate valorile curentului maxim absorbit pe durata pornirii și timpul de pornire, setate și măsurate. În figurile următoare se prezintă formele de undă ale curenților și tensiunilor achiziționate cu ajutorul standului experimental. Figura 3.1.2.5 prezintă o tensiune și un curent de fază înainte și imediat după ce softstarterul a primit comanda (START). Formele de undă ale tensiunilor pentru circa 60 ms înainte de pornirea efectivă sunt prezentate în figura 3.1.2.6, și ajută la identificarea motorului de către SST. În figura 3.1.2.7 se observă reducerea valorii curenților de fază odată cu creșterea vitezei rotorului. În figura 3.1.2.8 se prezintă curentul și tensiunea de fază în timpul regimului tranzitoriu de pornire. Figura 3.1.2.9 prezintă momentul închiderii contactorului de bypass K_2 . Se remarcă faptul că, atât curentul cât și tensiunea de fază devin perfect sinusoidale după acest moment. Figura 3.1.2.10 surprinde momentul când sistemul primește comanda (STOP), contactorul de bypass se deschide și oprirea controlată a motorului este preluată de către SST.

Tabelul 3.1.2.3

Curent sarcină [A]	Tensiune inițială la START [%]	Curent maxim absorbit [A]		
		Rampă de tensiune fără limitare de curent	Rampă de tensiune cu limitare de curent	Control de cuplu
3.4	30	15	13.4	12
	60	19.6	18.5	12.1
	90	21.3	20.5	11.1
3.9	30	20.3	19.1	15.9
	60	28.1	24.8	15.7
	90	32.9	29.1	15.3
5.2	30	23.8	21.3	20.7
	60	29.2	27	20.6
	90	35.3	32.4	20.6

Timpul de pornire măsurat [s]			Timpul de pornire setat [s]	Curentul maxim setat [A]
Rampă de tensiune fără limitare de curent	Rampă de tensiune cu limitare de curent	Control de cuplu		
6.3	7	6.2	6	30
5.8	6.8	6.1	6	30
5.2	6.5	6	6	30
6.5	6.8	6.1	6	30
6.1	6.5	6	6	30
5.4	6.3	5.9	6	30
6.6	6.9	6.1	6	30
6.3	6.6	6	6	30
5.7	6.2	6	6	30

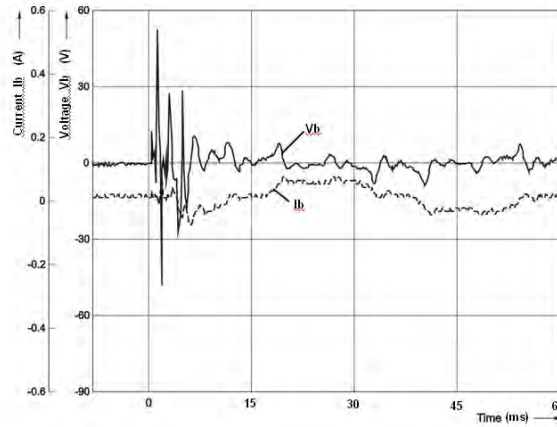


Figura 3.1.2.5 Variația curentului și tensiunii de fază înainte și după momentul când se dă comanda de START.

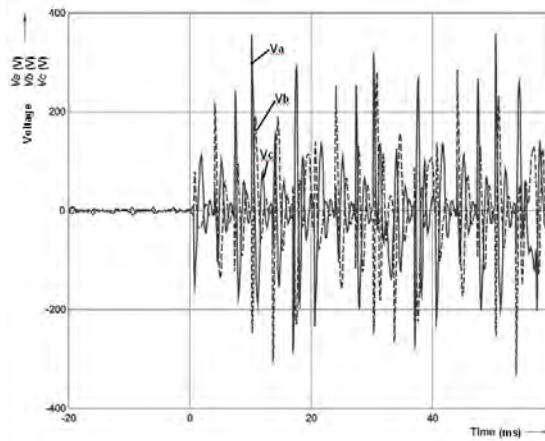


Figura 3.1.2.6 Formele de undă ale tensiunilor la pornire.

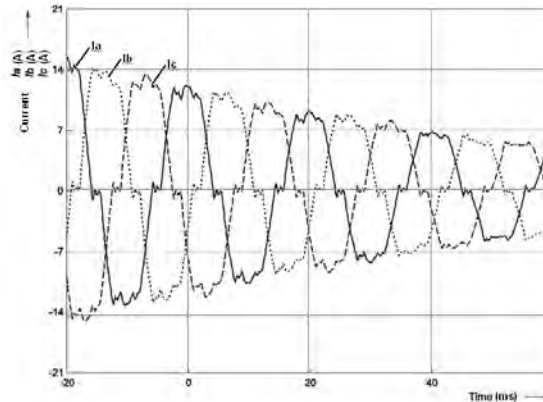


Figura 3.1.2.7 Formele de undă ale curentilor pe măsură ce viteza motorului crește.

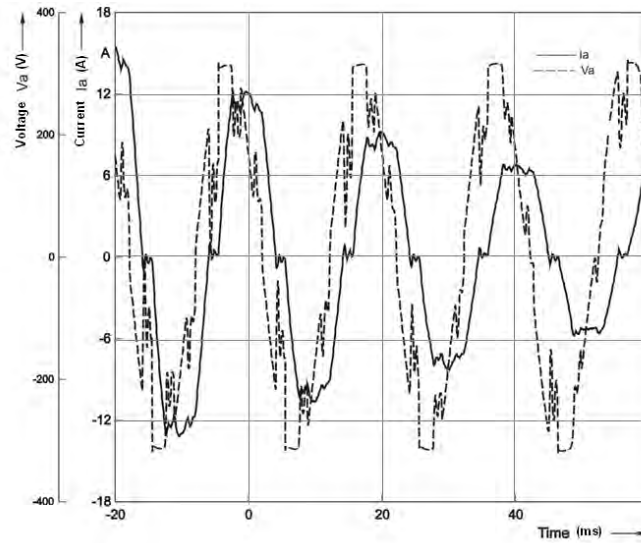


Figura 3.1.2.8 Formele de undă ale curentului și tensiunii de fază în regim tranzitoriu.

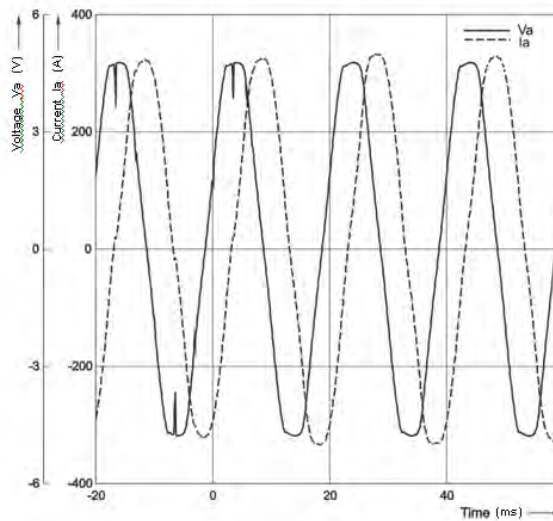


Figura 3.1.2.9 Formele de undă ale curentului și tensiunii de fază când contactorul de bypass se închide.

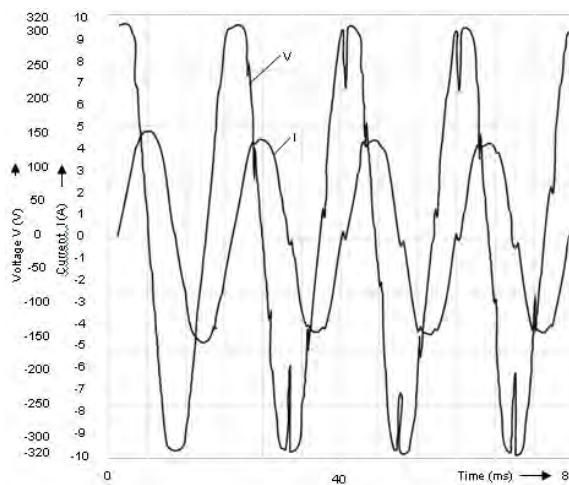


Figura 3.1.2.10 Formele de undă ale curentului și tensiunii de fază când se dă comanda STOP.

Pe baza încercărilor experimentale se pot trage următoarele concluzii asupra influenței parametrilor luați în considerare în răspunsul dinamic al pornirii mașinii de inducție cu ajutorul SST. Pe măsură ce tensiunea inițială a fost mai scăzută, și curentul de pornire a scăzut. Pe măsură ce tensiunea de pornire inițială a fost mărită, rezultatele s-au îmbunătățit. Asta înseamnă că am obținut timpi de pornire și curenți mai reduși. De exemplu o tensiune inițială de 90% este mai bună decât una de 80%. Există o relație liniară între creșterea tensiunii inițiale și scăderea timpului de pornire. Deci, putem spune că dacă scădem tensiunea inițială, vom avea: un curent de pornire mai mic și un timp de pornire mai mare. Având în vedere durata mică a procesului tranzitoriu (500 ms), acesta nu va avea un impact negativ asupra duratei de viață a motorului. Atât solicitările electrice cât și cele mecanice sunt mult mai mici la pornirea cu SST decât cele de la conectarea directă a motorului la rețea.

În urma efectuării încercărilor experimentale se deduce că cea mai eficientă metodă de pornire este cea în care se face controlul cuplului la arbore. În acest caz timpul de pornire setat este respectat cu o aproximație destul de bună iar curentul maxim setat nu este depășit. La metoda de pornire cu rampă de tensiune și limitare de curent se ajunge la valori ale curentului mai mari decât valoarea setată. În cazul pornirii cu rampă de tensiune fără limitare de curent, valorile curentului maxim sunt mult mai mari și nu se respectă timpul de pornire setat.

O soluție de pornire și reglare în limite reduse a turației a fost propusă și aplicată la o acționare de 1600kW de la S.C. Kronospan S.A. Sebeș. A fost nevoie să se folosească un CSF în loc de softstarter (SST), datorită inerției foarte mari a sistemului ($J=4001 \text{ kgm}^2$) și valorii reduse a cuplului motorului la pornirea cu SST. Cu această aplicație s-a pus în funcțiune pentru prima dată în România, un convertor static de medie tensiune cu valoarea tensiunii de ieșire de 6KV. Inițial, ventilatorul cu momentul de inerție foarte mare era antrenat de un motor asincron (cu aceeași putere) cu rotor bobinat și rezistențe de pornire. Din cauza întreținerii necorespunzătoare a rezistențelor de pornire cu lichid (nu s-a urmărit menținerea valorii concentrației sărurilor din baie), s-a defectat primul motor (care s-a rebobinat), apoi motorul de rezervă și ulterior din nou motorul principal rebobinat. Din cauza pierderilor foarte mari (300000 euro/zi) datorate opririlor repetate ale fluxului de producție (acest ventilator este vital pentru fabrica de MDF) s-a găsit, împreună cu firma BeeSpeed Timișoara, o soluție cu motor asincron cu rotorul în scurtcircuit cu puterea de 1600 kW alimentat de la un convertor static de frecvență de tip ACS 5000 de la ABB. Utilizarea CSF a permis modificarea turației motorului (într-o plajă destul de îngustă datorită specificului procesului tehnologic), dar cu beneficii importante în ceea ce privește randamentul instalației de uscare și în ceea ce privește calitatea produselor rezultate. Caracteristicile convertizorului sunt: puterea aparentă $S_N=2100\text{KVA}$, curentul nominal la ieșire $I_N=200\text{A}$, tensiunea nominală la ieșire $U_N=6000\text{V}$, domeniul de variație al tensiunii la ieșire $0\dots6000\text{V}$, domeniul de variație al frecvenței la ieșire $0\dots75\text{Hz}$, numărul de faze la ieșire $m=3$, redresorul cu 18 pulsuri, supraîncărcarea acceptată 110% un minut la fiecare 10 minute. Instalația modernizată a fost repusă în funcțiune în august 2009 și de atunci a funcționat foarte bine, fără să mai apară opriri neplanificate ale fluxului tehnologic. În figura 3.1.2.11 se prezintă dulapul convertizorului în stația electrică, în figura 3.1.2.12 este motorul de tip ABB cuplat cu ventilatorul în instalație, iar în figura 3.1.2.13 partea de comandă și automatizare a convertizorului.



Figura 3.1.2.11 Dulapul convertizorului de tip ACS 5000 – 2100KVA (fotografie publicată cu acordul S.C. Kronospan S.A. Sebeș)



Figura 3.1.2.12 Motorul ABB de 1600kW de antrenare a ventilatorului cu $J=4001 \text{ kgm}^2$ (fotografie publicată cu acordul S.C. Kronospan S.A. Sebeș).



Figura 3.1.2.13 Vedere asupra părții de comandă și automatizare la ACS 5000 (fotografie publicată cu acordul S.C. Kronospan S.A. Sebeș).

3.1.3. Producerea energiei electrice cu generatoare asincrone funcționând cu turație variabilă.

Sisteme de producere a energiei electrice cu generator asincron și convertor static de frecvență, ce funcționează cu turație variabilă

Ideea de la care s-a pornit în această direcție de cercetare, a fost găsirea unei structuri de microhidrocentrală (MHC) care să permită o funcționare eficientă cu investiții recuperabile într-un interval de 5 până la 8 ani. Aceasta deoarece s-a constatat că după nici 20 de ani, mai mult de jumătate din MHC-urile construite în anii '80 nu mai sunt în funcțiune, datorită costurilor mari de întreținere și a fiabilității scăzute a echipamentelor.

Teoretic, sursele regenerabile au un potențial care depășește cu mult consumul mondial, dar utilizarea practică a acestora creează o serie de probleme de ordin tehnic și economic. Principalele inconveniente sunt instabilitatea vitezei vântului, variațiile mari ale debitelor de apă, ciclurile zi-noapte, anotimpurile, diferențele de la an la an, posibilitățile reduse de stocare, randamentele scăzute ale panourilor fotovoltaice, problemele de protecția mediului și de dezvoltare

durabilă. De exemplu potențialul teoretic de resurse hidroenergetice este de 36000 TWh/an din care tehnic exploatabil este 14000 TWh/an. Sunt țări unde sursa hidro de mare putere (>100MW) este exploatată în proporție de 100%. Față de producția hidroelectrică mondială a anului 2000, care a fost de 2700 TWh/an, la o putere instalată de 740GW, se preconizează că în 2050 se va ajunge la 8100 TWh/an, în special prin utilizarea râurilor cu debite și căderi mai mici, cu ajutorul centralelor de mică putere (CHMP) și al microhidrocentralelor (MHC) [Dea 10h], [Dea 10i], [Dea 10j].

Utilizarea energiilor regenerabile a căpătat o importanță deosebită în ultimul deceniu. În luna martie 2007 Comisia Europeană a lansat noua politică energetică a UE pe termen mediu până în 2020 care are trei obiective importante: creșterea securității alimentării cu energie; creșterea competitivității în domeniul energiei; reducerea impactului asupra mediului. Până în anul 2020 producția de energie regenerabilă a statelor UE trebuie să depășească 20% din consumul final față de 8,5% în 2005 [Boli 04]. Principalele resurse regenerabile sunt: energia eoliană, energia hidroelectrică a căderilor de apă, energia solară, energia valurilor, energia mareelor, energia produsă din biomasă și biogaz, energia geotermală, pilele de combustie, etc [Fad 08], [Luu 08].

Țara noastră îndeplinește deja dezideratul UE de a avea peste 20% din energie din surse regenerabile datorită hidrocentralelor construite în ultimii 50 de ani. Puterea hidro totală instalată este de peste 7000 MW iar producția medie de energie anuală în ultimul deceniu este de 15000 GWh adică 22% din producția totală. Din totalul resurselor hidro disponibile se utilizează 60% restul de 40% fiind pe râuri mijlocii și mici, în zone izolate fără rețele sau cu rețele slab dezvoltate, cu variații mari ale debitelor de la un anotimp la altul, cu posibilități reduse de acumulări cu volum mare a apei, cu puteri calculate între 10-500 kW și durată mare de recuperare a investițiilor. Centralele hidroelectrice au cele mai reduse costuri de exploatare și cea mai mare durată de viață în comparație cu alte tipuri de centrale electrice. Există o experiență de peste un secol în realizarea și exploatarea centralelor hidroelectrice (CHE), ceea ce face ca ele să atingă niveluri de performanță tehnică și economică foarte ridicate. În urma inventarierii micropotențialului hidroenergetic din România, rămas de amenajat, rezultă o putere teoretică de 1900 MW din care doar 473 MW cu un potențial specific mai mare decât 150KW/km, care ar putea produce o energie de 2741 GWh/an. Zonele vizate sunt fie în amonte de amenajările existente (având căderi mari $H > 100m$ sau medii $30m \leq H < 100m$), în zonele de deal și de munte sau în aval de amenajările existente (cu căderi mici $2m \leq H < 30m$). Un potențial important îl reprezintă conductele de aducțiune cu apă potabilă sau industrială la care ruperea de presiune la intrare în stațiile de tratare se face în prezent cu ajutorul unor vane de tip fluture sau al unor cămine cu nivel liber. Costul specific de investiție pentru o MHC este între 1500-9000 Euro/KW pentru căderi între $2m \div 13,5m$ și între 1000 ÷ 3000 Euro/KW pentru căderi între $27 \div 350m$ [Dea 10i].

Există posibilitatea de convertire a unei tensiuni variabile cu frecvență variabilă într-o tensiune cu valoare efectivă constantă și frecvența rețelei prin intermediul unui sistem curent alternativ, curent continuu, curent alternativ (AC/DC/AC) prezentat în figura 3.1.3.1 [Dea 10h]. Pentru a nu injecta armonice în rețea au fost prevăzute filtre inductiv capacitive de tip EMC. Sistemul de automatizare înglobează și sistemele auxiliare (ventile, vane, servomotoare etc.).

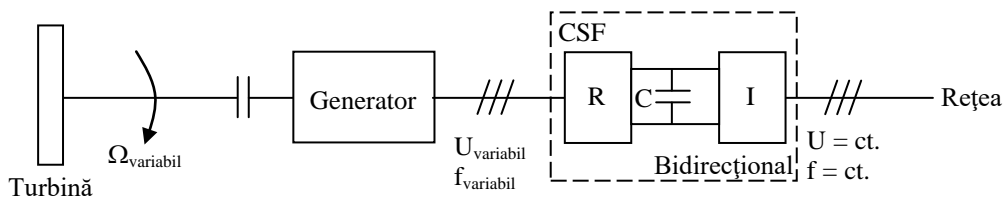


Figura 3.1.3.1 Sistem de generator electric cu turație variabilă conectat la rețea

Comanda agregatelor se face automat, de la distanță, prin interfețe de comandă digitale sau analogice în vederea conectării echipamentelor la un sistem local de comandă și control (SCADA) bazat pe un PLC, care este în permanentă legătură cu dispecerul (figura 3.1.3.2). Generatoarele sunt prevăzute cu accesorii pentru diverse monitorizări iar convertorul static de frecvență este bidirecțional. Este implementată funcția de autosincronizare cu rețeaua.

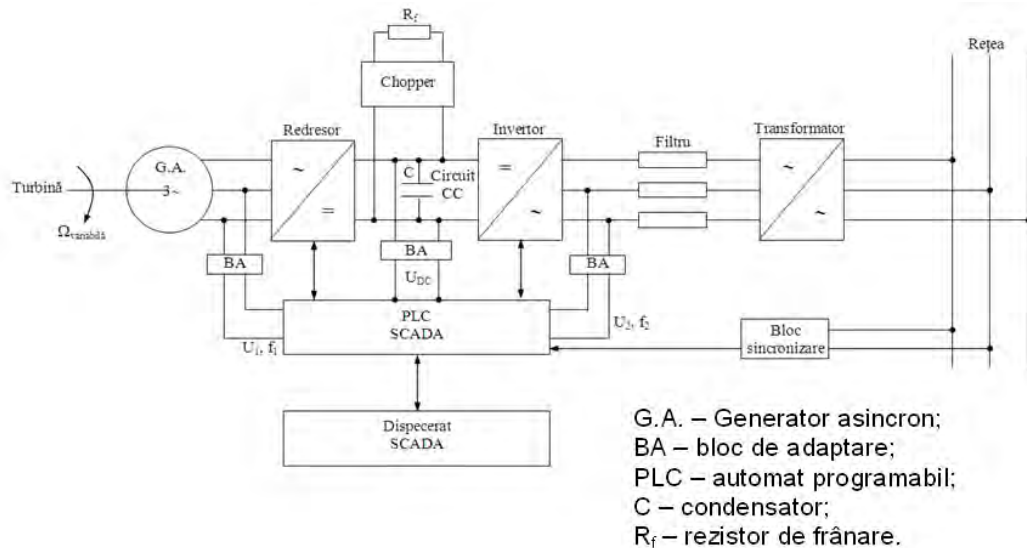


Figura 3.1.3.2 Schema bloc a microhidrocentralei cu generator asincron având turație variabilă.

Turația variabilă este necesară acolo unde are loc o variație mare de debit, o fluctuație ridicată a vitezei vântului sau parametrii variabili ai aburului provenit din arderea biomasei sau a biogazului. Prin turație variabilă se pot valorifica și perioadele extreme (viteză scăzută a vântului și debit scăzut de apă respectiv viteză mare a vântului și debit mare de apă) funcționarea centralei fiind continuă în funcție de condițiile momentane, fără a mai fi nevoie de reglaje mecanice la palele rotoarelor turbinelor sau ale aparatului director statoric a acestora. Generatorul antrenat de turbină cu viteză variabilă debitează o tensiune variabilă cu frecvență variabilă care este preluată de convertorul static de frecvență, cu circuit intermediar de tensiune continuă, acesta furnizând la ieșire tensiunea rețelei (în circuit poate fi și un transformator electric ridicător de tensiune) de valoare efectivă constantă și frecvență egală cu cea a rețelei [Dea 10h].

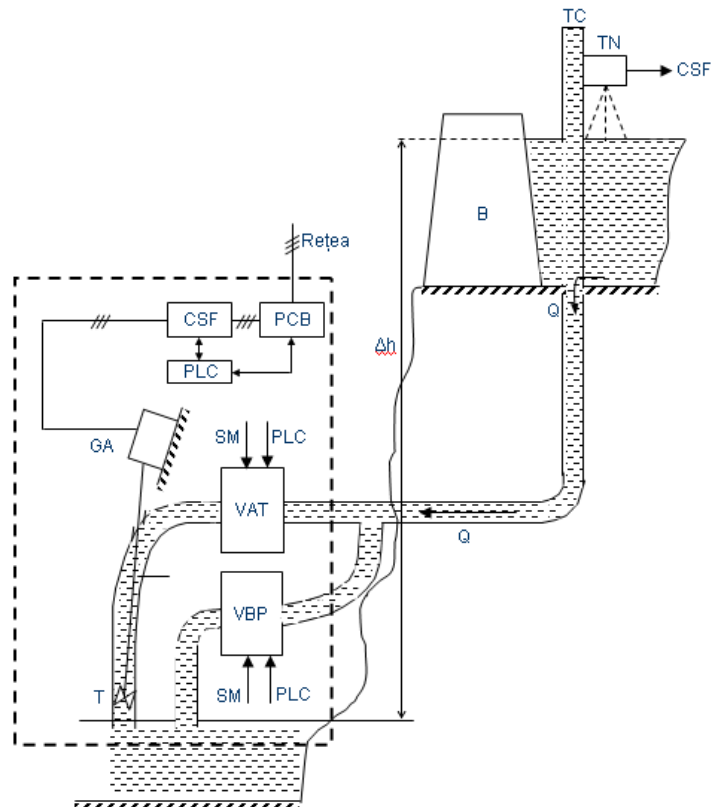


Figura 3.1.3.3 Schema hidraulică de principiu pentru funcționare cu turație variabilă cu baraj și lac de acumulare.

Această schemă crește costurile centralei datorită convertorului static de frecvență (CSF) dar apar numeroase avantaje în funcționare. În cazul microhidrocentralelor funcționarea la turație variabilă permite menținerea constantă a nivelului în lacul de acumulare la variații mari ale debitului cu efecte favorabile asupra mediului înconjurător, iar în cazul plasării lor pe conducte de aducțiune cu apă potabilă permite reglajul de debit, în funcție de consum, fără să mai fie necesară o vană de rupere a presiunii. Lacurile de acumulare și captările MHC-urilor au volume mici care nu asigură o funcționare îndelungată la debite mai mari decât cele proiectate și în acest fel, primăvara și toamna se pierd importante cantități de energie care nu pot fi produse, iar surplusul de apă se evacuează prin preaplinul barajelor. În figura 3.1.3.3 se prezintă schema hidraulică de principiu a unei MHC cu baraj și lac de acumulare. S-au făcut următoarele notații: Δh – căderea; B – baraj; TC – turn captare; Q – debit variabil de apă; VBP – vană de by-pass; VAT – vana de acces în turbină; GA – generator asincron; T – turbină; TN – traductor de nivel; CSF – convertor static de frecvență; SM – servomotor; PCB – bloc de protecție și comutație; PLC – automat programabil.

Schema poate permite funcționarea MHC atât cuplată la rețeaua națională (figura 3.1.3.4) cât și în regim insular (figura 3.1.3.5).

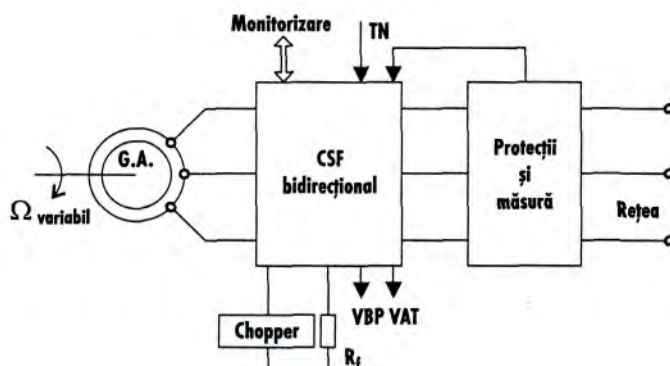


Figura 3.1.3.4 Schema de MHC cuplată la rețea.

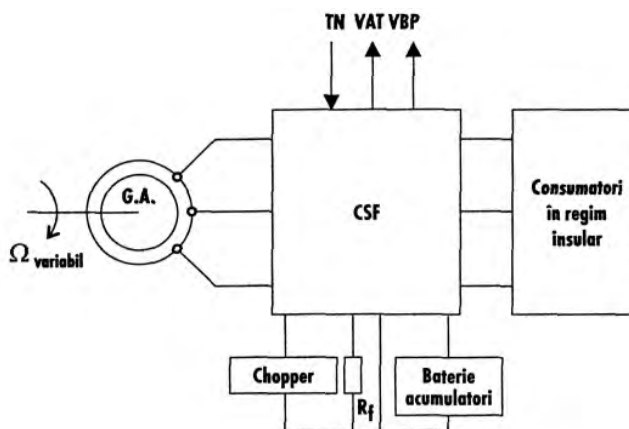


Figura 3.1.3.5 Schema de MHC în regim insular.

Traductorul de nivel TN, transmite la CSF un semnal referitor la nivelul lacului. Dacă tendința este de creștere a nivelului, CSF permite G.A. să se rotească cu o viteză mai mare, în acest fel crește debitul de apă vehiculat Q ca și cantitatea de energie electrică produsă. Dacă tendința este de scădere a nivelului, CSF obligă G.A. să reducă turația și în acest fel se procesează doar atâta apă câtă intră în lac producând energie și la debite mai mici decât cele nominale. Teoretic, debitul de intrare în MHC poate varia între (0 și 1,5) ori debitul mediu multianual. Un alt avantaj al schemei este posibilitatea de trecere a turbinei în regim de pompă în cazul unor salbe de lacuri de acumulare și pomparea apei în lacul din amonte pe perioada nopții când este surplus de energie electrică și costul acesteia este mic. În cazul pierderii rețelei, CSF comandă închiderea vanei de acces a apei în turbină VAT și deschiderea vanei de by-pass. Pentru

a evita supraturarea turbinei în această perioadă scurtă, energia produsă de generator este disipată pe un reostat de frânare R_f cu ajutorul chopper-ului de frânare aflat în circuitul intermediar de curent continuu al CSF. Convertizorul de frecvență permite legătura cu un dispecerat de unde poate fi monitorizată întreaga funcționare a MHC. Pentru consumatorii izolați ce funcționează în regim insular, se propune schema din figura 3.1.3.5 care elimină variațiile de tensiune și frecvență datorate variațiilor de consum. În plus, această schemă este prevăzută cu o baterie de acumulatori tampon cuplată în circuitul intermediar de curent continuu al convertizorului, necesară pentru pornirea MHC din regim de repaus.

Sistemul de alimentare cu apă al localităților urbane sau rurale se bazează în principal pe captări de suprafață sau subterane și aducțiuni care pot avea diverse lungimi și diferențe de nivel. Înainte de folosire, apa trebuie tratată. Deoarece filtrarea și tratarea se face în bazine deschise, presiunea la intrarea stației trebuie redusă. În multe cazuri trebuie „ruptă” o presiune de ordinul 5 la 15 barr și aceasta se face prin vane, șicane, diafragme etc pierzându-se o mare cantitate de energie. În plus, debitul de apă necesar în stația de tratare este continuu variabil deci este nevoie ca aceste vane să fie continuu comandate cu pierdere de energie suplimentară. În locul acestor metode s-a propus utilizarea unei turbine cu turație variabilă (în funcție de debitul de apă vehiculat) ce antrenează un generator asincron. Stațiile de tratare pot fi în amonte de localități sau pe înălțimile din jurul localităților. În funcție de localizare, se propun două scheme (figurile 3.1.3.6 și 3.1.3.7) prin care poate fi utilizat potențialul hidroenergetic al aducțiunilor de apă potabilă.

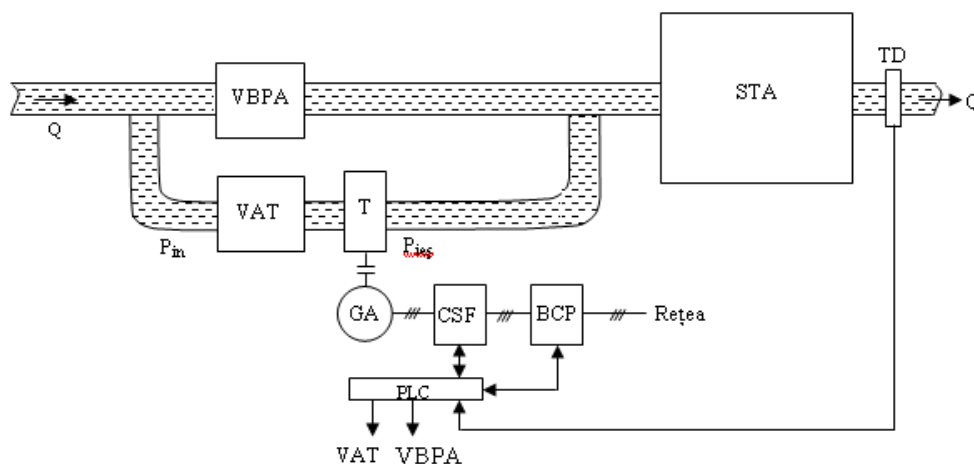


Figura 3.1.3.6 Schema hidraulică de principiu pentru funcționarea cu turație variabilă pe conducta de alimentare cu apă potabilă fără bazin tampon.

În figura 3.1.3.6 s-au făcut următoarele notații: Q – debitul de apă necesar la consumatori; TD – traductor de debit; VBPA – vană de by-pass reglabilă; VAT – vană de acces în turbină; GA – generator asincron; CSF – convertor static de frecvență; PLC – automat programabil; T – turbină; STA – stație de tratare a apei; P_{in} – presiunea la intrare; $P_{ieș}$ – presiunea la ieșire din turbină; BCP – bloc comutație și protecție. Când turbina nu funcționează (avarie, revizie), în funcție de indicațiile traductorului de debit (TD) plasat la ieșirea din stație, automatul programabil (PLC) comandă vana de by-pass reglabilă să permită trecerea aceluiași debit cu cel de la ieșire. Vana de by-pass face în același timp și ruperea de presiune. Cazul normal este acela în care apa necesară stației de tratare (STA) trece prin turbină, iar turația impusă generatorului (GA) de CSF permite trecerea debitului cerut, diferența de presiune determină în acest caz energie electrică livrată în rețea. Convertorul primește informația de turație de la TD prin intermediul PLC-ului. Presiunea de intrare P_{in} și de ieșire $P_{ieș}$ sunt monitorizate tot cu ajutorul PLC-ului, fiind menținută constantă $P_{ieș}$ pentru ca apa la ieșirea din turbină să aibă presiune suficientă pentru a ajunge în bazinul de liniștire la intrarea în STA. Partea de automatizare este similară cu cea prezentată anterior, mărimea de referință în acest caz fiind debitul necesar la consumatorii finali. Blocul de comutație și protecție (BCP) asigură legătura cu rețeaua și protejează sistemul în cazul apariției unor defecte. Dacă se pierde rețeaua BCP dă un semnal PLC-ului care comandă închiderea vanei de acces a apei în turbină (VAT) și

deschide VBPA care preia rolul de reglare a debitului. Pentru evitarea supraturării turbinei în perioada de la pierderea rețelei până la închiderea VAT, în circuitul intermediar de curent continuu al CSF este prevăzut un chopper și o rezistență de frânare care preia energia produsă și permite limitarea turației generatorului. În anul 2007, pe baza schemei din figura 3.1.3.6, **s-a proiectat** o microhidrocentrală (MHC) pe conducta de alimentare a stației de tratare a apei **Petrești județul Alba**, având două generatoare asincrone cu rotorul în colivie, cu puterile de 200 KVA respectiv 132 KVA. Datorită problemelor financiare ale companiei APA CTTA, acest proiect nu s-a aplicat încă. Un alt **proiect** a fost făcut în anul 2009 pentru Apaprod Deva, pentru conducta de alimentare cu apă a orașului Hunedoara cu două MHC-uri, una la **Hobița** de 400 KVA și una la **Teliuc** de 1MVA, și acesta fiind în așteptarea unei surse de finanțare.

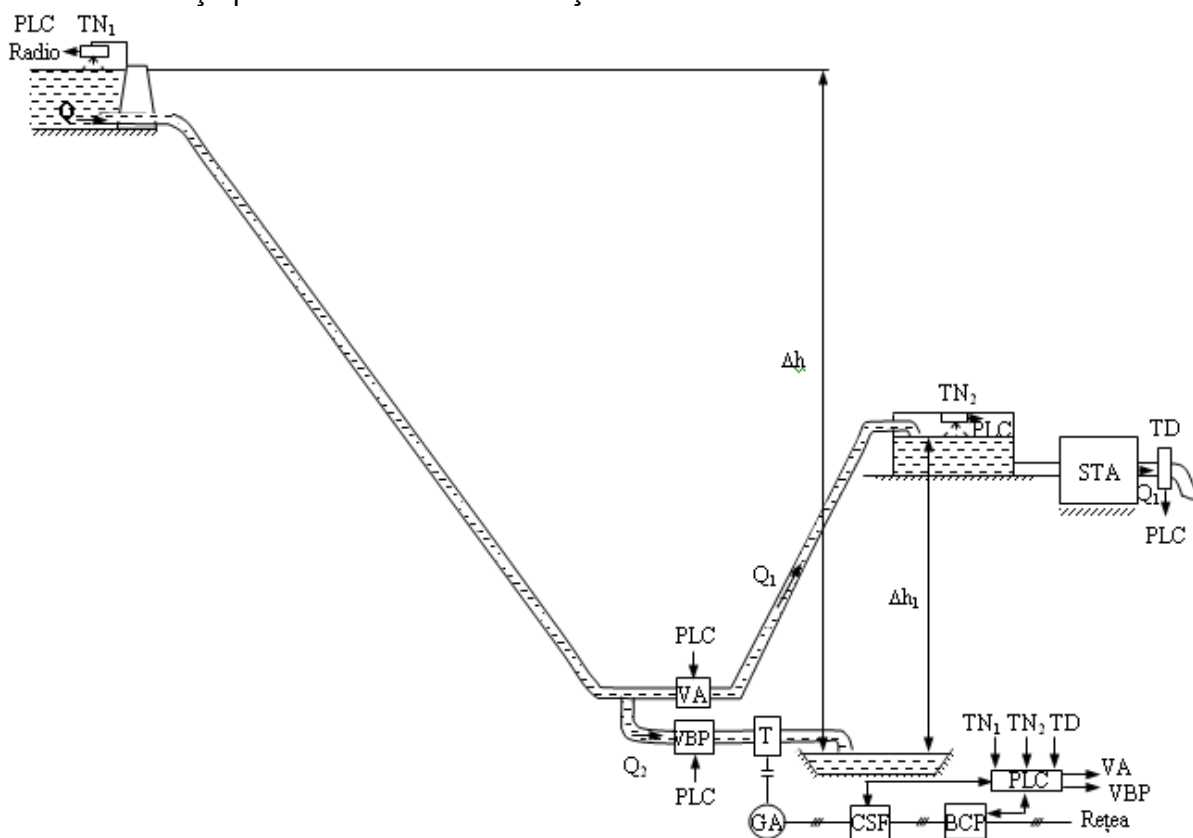


Figura 3.1.3.7 Schema hidraulică de principiu pentru funcționarea cu turație variabilă pe conducta de alimentare cu apă potabilă, cu denivelare și bazin tampon.

Captările de suprafață (CPT) preiau de obicei un debit constant, iar consumul de apă tratată este variabil. Surplusul este eliminat prin supraplinul bazinului. Această apă se pierde. Există cazuri când conducta de aducțiune ajunge la diferențe de nivel Δh mai mari decât poziția bazinului de acumulare din stația de tratare (acesta este la cota $\Delta h - \Delta h_1$). Schema din figura 3.1.3.7 propune menținerea nivelului în bazin, indiferent de consum cu ajutorul unui traductor de nivel TN și reducerea valorii presiunii apei la intrarea în bazin. Astfel, rezultă o cantitate de energie electrică, produsă la căderea Δh , care în prezent se pierde. Principiul de funcționare al MHC este descris anterior. S-au făcut notațiile: Q – debitul total; Δh – căderea totală; Δh_1 – câștigul de cădere; Q_1 – debitul util; Q_2 – surplusul de apă; TN_1 , TN_2 – traductoare de nivel; VA – vană acces debit util; VBP – vană by-pass. Pe baza schemei din figura 3.1.3.7 **s-a proiectat, construit și pus în funcțiune** în anul 2012 la **Orăștie, județul Hunedoara** o microhidrocentrală cu generator asincron cu rotorul în colivie având puterea de 132 KVA, pe conducta de alimentare cu apă a orașului (figura 3.1.3.8).



Figura 3.1.3.8 Clădirea microhidrocentralei Orăștie cu bransamentul la conducta de alimentare a stației de tratare a apei (a) și turbina Banki, generatorul asincron și panoul de comandă (b) (fotografie publicată cu acordul beneficiarului).

Cele mai uzuale generatoare utilizate în centralele ce funcționează cu turație variabilă sunt cele asincrone. La puteri de până la 1 MW se utilizează varianta cu rotorul în scurtcircuit iar peste 1 MW până la 5 MW (în prezent) sunt folosite generatoare asincrone cu rotorul bobinat (sau dublu alimentate). În figura 3.1.3.9 se prezintă schema de principiu a unei centrale cu generator asincron cu rotor bobinat și convertor static de frecvență rotoric. Fluxul de putere activă și reactivă a mașinii poate fi controlat prin intermediul convertorului rotoric prin controlul curenților rotorici. Avantajul acestei soluții constă în puterea necesară a CSF care este de 25-30% din puterea nominală a generatorului [Luu 08], [Boli 04], [Dea 10h]:

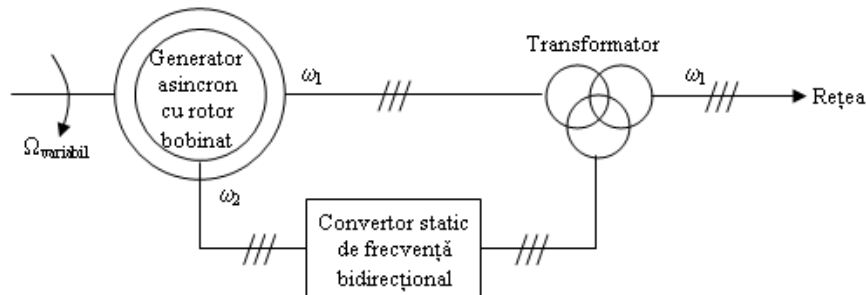


Figura 3.1.3.9 Generator asincron cu rotor bobinat funcționând la turație variabilă.

Comparativ cu turbinele cu turație fixă, cele cu turație variabilă echipate cu diverse tipuri de controlere permit generatorului să debiteze puterea maximă disponibilă la un moment dat. Pentru control este necesar să se cunoască puterea debitată în corelație cu viteza vântului (respectiv nivelul apei în lac sau presiunea aburului la intrarea în turbină). La generatoarele asincrone cu rotor în scurtcircuit variația de viteză admisă (în cazul lipsei CSF) este de 1% pentru a păstra frecvența de ieșire în limitele admise. Firma VESTAS a creat un sistem cu CSF și turație variabilă care permite variații ale vitezei de $\pm 10\%$ pentru acest tip de generatoare. Utilizând generatoare asincrone cu rotor bobinat viteza poate varia în intervalul -40% la $+30\%$ față de viteza de sincronism a generatorului, acest lucru determinând o creștere medie anuală de 5% a producției de energie electrică și alte avantaje constructive.

Problema eficienței funcționării microhidrocentralelor este rezolvată prin soluțiile propuse pentru partea hidraulică și electrică. De asemenea poate fi exploatat și potențialul hidroenergetic al aducțiunilor de apă potabilă, care nu este de neglijat.

Sisteme hibride de producere a energiei electrice cu turație variabilă pentru consumatori izolați

Cererea de energie în zone izolate (cătune, ferme, stâne, cabane, case de vacanță, etc), lipsite de rețele de distribuție, este în continuă creștere. Acest fapt implică creșterea puterii

disponibile în rețelele izolate care se bazează în principal pe generatoarele diesel. Acest sistem de producere este costisitor datorită costului combustibilului și a transportului acestuia. Pe de altă parte, în prezent, se dorește reducerea emisiilor dăunătoare mediului, iar arderea combustibililor fosili este o sursă principală de poluare [Sen 05]. O soluție de rezolvare a acestei probleme este utilizarea energiilor regenerabile disponibile local (eoliană, hidro, solară, biomasă, biogaz, valuri, etc) care practic sunt inepuizabile. Deocamdată, energia fotovoltaică are un randament scăzut și este foarte scumpă comparativ cu energia vântului sau cu energia hidrolică. Pentru biomasă, biogaz, și valuri cercetările sunt în faze incipiente nefiind încă niște tehnologii mature. Nu este de neglijat, ca sursă alternativă, utilizarea energiei înmagazinate în bateriile vehiculelor (automobile, camioane, tractoare, combine, etc) prin introducerea conceptului vehicle to grid (V2G). Rezultă ca o soluție de viitor, care să asigure puterea necesară, dar care să fie mai puțin poluantă, utilizarea sistemelor hibride [Pen 05], [Abb 08].

O variantă relativ accesibilă de sistem [Dea 09d], se bazează pe o sursă diesel și o sursă eoliană sau hidrolică. Dacă condițiile concrete permit, se pot utiliza ambele surse regenerabile (eolian și hidro) în același sistem. Generatoarele sunt asincrone cu rotorul bobinat la care statoarele sunt conectate împreună formând rețeaua de curent alternativ cu frecvență fixă și valoare efectivă a tensiunii constantă (figura 3.1.3.10), la care se conectează consumatorii. Circuitul intermediar de curent continuu este comun pentru cele trei convertoare statice (CS1, CS2, CS3), aici găsiindu-se un element de stocare al energiei ESE (bateria de acumulatori) care permite atenuarea variațiilor de consum, furnizând energie suplimentară în rețeaua consumatorilor când sursele eoliană sau hidro nu au suficientă rezervă, pentru a nu solicita sistemul diesel. Atunci când sursele regenerabile și bateria de acumulatori nu pot face față consumului intră automat în funcțiune și sursa diesel [Dea 09d], [Bol 05b]. Când sursa regenerabilă este suficient de puternică pentru alimentarea consumatorilor și eventual pentru înmagazinare de energie în ESE, sursa diesel este deconectată. Dacă sursa regenerabilă este slabă (lipsă vânt sau lipsă apă) sistemul funcționează cu sursa diesel fără înmagazinare de energie în ESE. În cele mai multe situații, sursa regenerabilă este funcțională dar nu poate acoperi întreg consumul și atunci funcționează și sursa diesel ca sursă suplimentară. Viteza de funcționare a turbinei se alege în așa fel încât puterea absorbită de la vânt sau de la apă să fie maximă (randamentul aerodinamic sau hidrodinamic să fie maxim). Dacă energia regenerabilă crește, energia sistemului diesel se reduce prin reducerea turației motorului diesel, reducându-se consumul și crescând randamentul. La reducerea energiei regenerabile, energia sistemului diesel crește prin creșterea turației motorului termic.

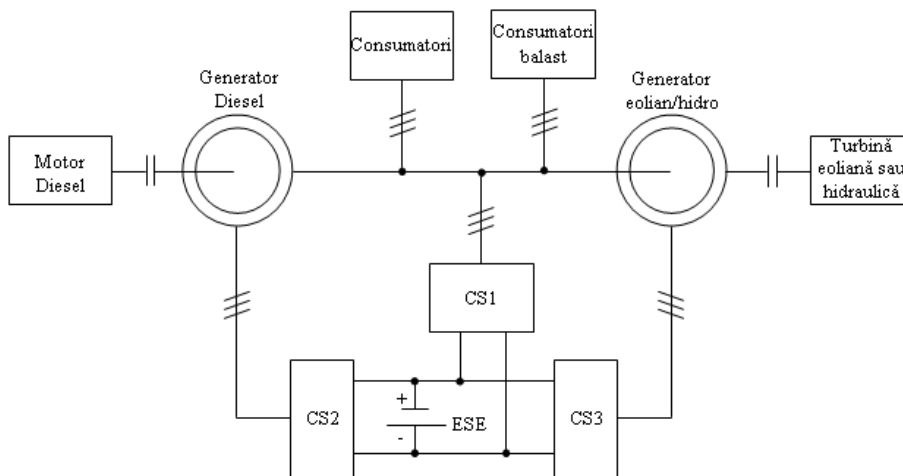


Figura 3.1.3.10 Sistemul hibrid diesel-vânt sau diesel-hidro în regim izolat.

Energia reactivă necesară în rețea poate fi furnizată de cele două generatoare sau de convertorul CS1, astfel încât să se reducă pierderile în rețea și randamentul global al sistemului să fie maxim. Prin utilizarea ESE se reduce foarte mult intervenția consumatorilor de balast și în acest fel crește cantitatea de energie utilă. Există și alte soluții de stocare a energiei prin producerea de hidrogen cu ajutorul electrolizei, care se introduce în pile de combustie generând energie electrică,

prin comprimare a aerului în rezervoare sau cu ajutorul unor roți volante cu inerție foarte mare. Dacă sistemul hibrid conține mai multe surse regenerabile, printre care și o sursă hidro, atunci, în perioadele de consum redus, surplusul de energie eoliană sau solară poate fi stocat sub formă hidraulică prin pomparea apei din lacul aval în lacul amonte. Utilizarea sistemelor hibride cu una sau mai multe surse regenerabile și o sursă diesel este o soluție practică și de perspectivă pentru rezolvarea alimentării cu energie electrică a consumatorilor izolați.

Am făcut parte dintr-o echipă de cercetare din cadrul UPT, care în perioada 2012-2016 a implementat proiectul **“Microgrid integrated small power renewable energy hybrid systems”**, **PCCA 36/2012, PN-II-PT-PCCA-2011-3.2-1519**, director de proiect fiind prof.dr.ing. Proștean Octavian, iar partener Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca. În cadrul proiectului s-a propus integrarea în același sistem a energiei produse din trei surse de energie regenerabilă: energia eoliană, energia hidraulică a apei și energia fotovoltaică. Pentru conversia energiei eoliene și a energiei hidraulice s-a propus utilizarea unor noi generatoare electrice de tip sincron și asincron. O cerință a proiectului a fost ca sistemul să poată funcționa atât conectat la rețea cât și în regim insular autonom. Colectivului nostru i-a revenit sarcina studierii, proiectării, execuției și ulterior a testării pentru două generatoare electrice: un generator de inducție cu două înfășurări statorice și rotor cu colivie (DSWIG) și un generator sincron reactiv multifazat fără perii și fără înfășurare rotorică (RBLDC). Astfel prin acest proiect, și printr-un proiect anterior de infrastructură de cercetare (ICER), s-a creat o microrețea care înglobează surse de producere a energiei eoliene și hidro prin emularea turbinelor de antrenare, sursa fotovoltaică prin panouri fotovoltaice fixe, sistemul de stocare în baterii de acumulatori și super-capacitoare, consumatori de curent continuu și de curent alternativ, care poate funcționa conectată la rețeaua națională sau în regim izolat (figura 3.1.3.11).

Împreună cu o parte din echipa acestui proiect, cu alți colegi din universitate și în colaborare cu Arctic University of Norway (Faculty of Engineering Science and Technology), Universitatea Tehnică Gh. Asachi din Iași și Universitatea Valahia din Târgoviște am depus la competiția EEA Grants România-Norvegia 2018 proiectul cu titlul **Intelligent Control Unit for Hybrid Micro-grid for Power Supply to Isolated Communities (I-COMPACT)**, care își propune să aducă în aceeași micro-rețea și să controleze, pe lângă sursele anterioare din schema prezentată în figura 3.1.3.11, și alte surse regenerabile (biomasă, biogaz și panouri fotovoltaice cu orientare după două axe), își propune să crească randamentul panourilor fotovoltaice prin răcirea acestora și prin utilizarea efectului Seebeck, și de asemenea să implementeze conceptele G2V (Grid to Vehicle) și V2G (Vehicle to Grid) pentru a avea o sursă suplimentară de stocare respectiv de alimentare a micro-rețelei (figura 3.1.3.12).

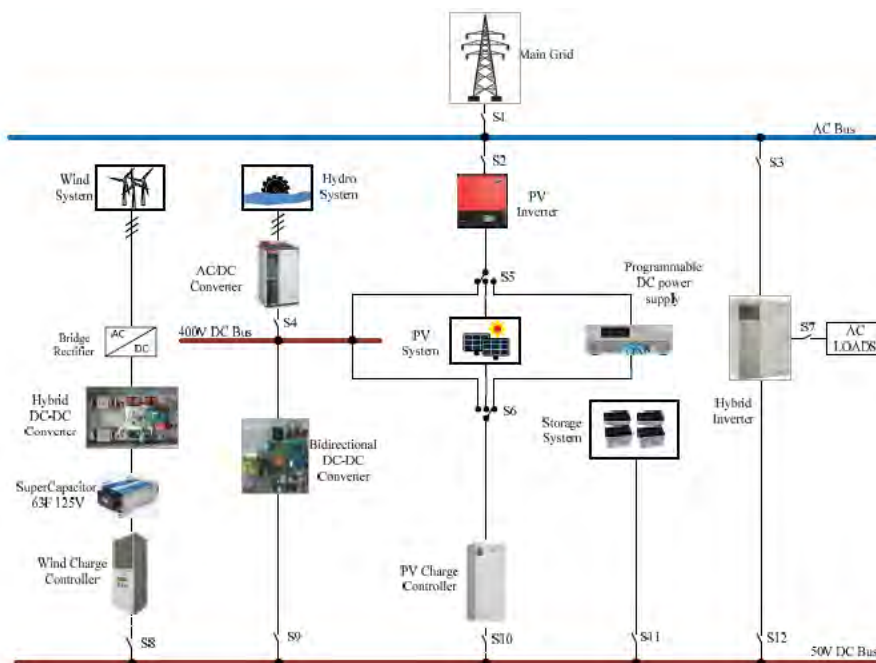


Figura 3.1.3.11 Microrețeaua creată la Facultatea de Electrotehnică și Electroenergetică din Timișoara.

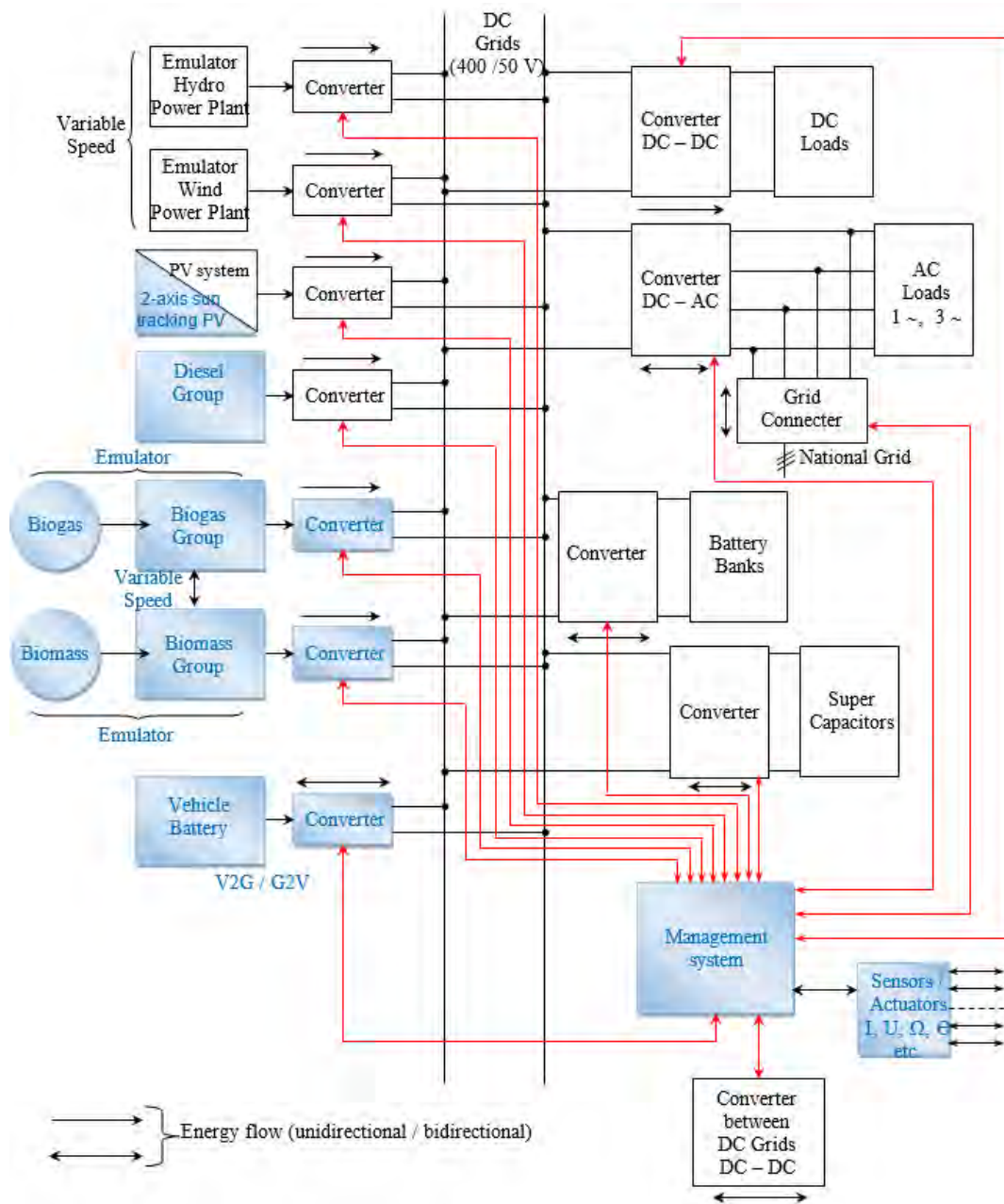


Figura 3.1.3.12 Schema concepută pentru înglobarea în micro-rețea a unor noi surse regenerabile (partea colorată în albastru).

3.1.4 Încercarea în sarcină artificială a mașinilor electrice rotative

Temperatura la sarcină maximă într-o mașină electrică rotativă reprezintă un parametru esențial. Metodele convenționale de încărcare în sarcină necesită utilizarea unei alte mașini electrice cuplată la arborele mașinii electrice de încercat. Costul echipamentului de încercare și cuplarea mecanică efectivă a celor două mașini fac ca metoda convențională să fie prohibitiv de costisitoare, în special pentru mașinile mari, pentru mașinile cu rotor vertical (imposibil de realizat), sau pentru mașinile de mare viteză [Bol 01].

Prin urmare, nu există în prezent o metodă eficientă din punctul de vedere al costurilor de evaluare a stării unei mașini la fața locului, și nici una care să ne dea informații dacă ar fi sau nu benefică din punct de vedere economic și ecologic să se înlocuiască acea mașină. În plus,

reglementările în vigoare referitoare la eficiență nu sunt retrospective și prin urmare încă mulți ani de aici înainte mașinile cu parametrii energetici scăzuți vor rămâne să funcționeze. De aceea este necesară o metodă de evaluare a randamentului mașinilor aflate în prezent în funcțiune pentru a stabili dacă trebuie înlocuite sau nu [McK 04a], [McK 03a], [McK 04b].

Acest domeniu de cercetare l-am abordat începând cu anul 1995, pentru mașinile asincrone [Dea 95a], [Dea 95d], și am continuat, în echipă cu prof.dr.ing. Tutelea Lucian și pentru celelalte mașini rotative [Tut 97], [Tut 99a], [Tut 99b], [Dea 02a], [Dea 03a], [Dea 10g]. Am avut un contract de cercetare pe această temă la care am fost director [Dea 95c].

Metode de încărcare în sarcină artificială a mașinilor de c.c.

Încărcarea în sarcină artificială se realizează prin producerea unui cuplu oscilant care are valoarea medie aproximativ egală cu zero și amplitudinea apropiată de valoarea nominală. Această condiție este îndeplinită dacă cuplul mediu dezvoltat în mașină egalează cuplul pierderilor mecanice produse când mașina funcționează la turația nominală. Încărcarea artificială a mașinii de curent continuu poate fi realizată cu ajutorul unui chopper de patru cadrane (figura 3.1.4.1) sau prin conectarea mașinii între două ramuri ale unui inverter trifazat de tensiune.

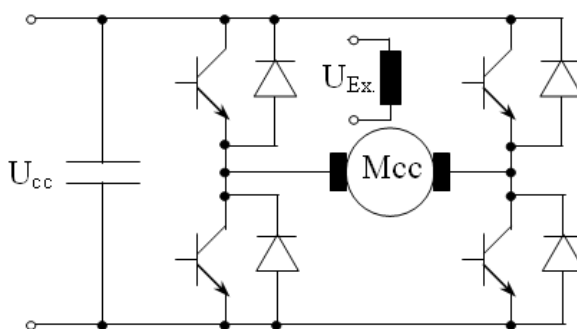


Figura 3.1.4.1 Încărcarea în sarcină artificială a mașinii de curent continuu prin utilizarea unui chopper de patru cadrane (4Q).

Apariția unor erori mici în estimarea pierderilor mecanice în funcție de turație produc abateri mari ale turației medii. Se impune utilizarea unui regulator de turație, iar pentru controlul turației se poate utiliza un traductor de turație (ca în figura 3.1.4.2) sau un estimator de turație (ca în figura 3.1.4.3).

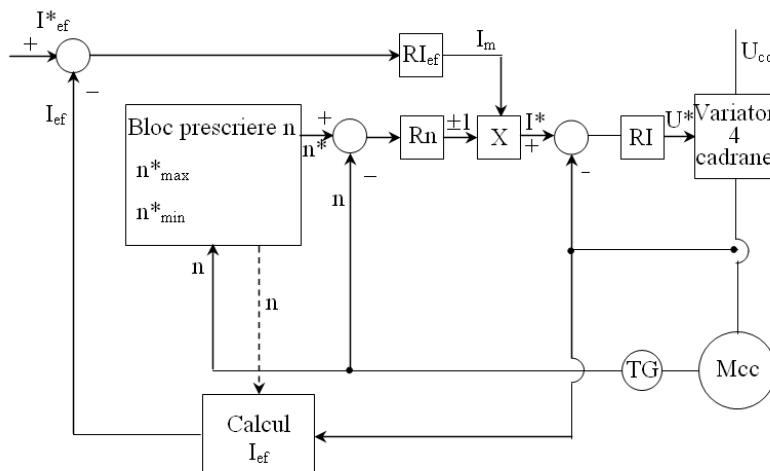


Figura 3.1.4.2 Schema cu traductor de turație pentru încărcarea în sarcină artificială a mașinii de curent continuu.

Pentru o mașină de curent continuu perfect compensată tensiunea indusă este direct proporțională cu turația. În figura 3.1.4.3, prescrierea de turație a fost înlocuită cu o prescriere de tensiune indusă. Factorul de proporționalitate între tensiune și curent este fluxul produs de excitație care poate fi citit dintr-un tabel în funcție de curentul de excitație măsurat.

Metoda prezentată se poate aplica mașinilor de curent continuu cu excitație separată sau cu magneți permanenți. Pentru a se putea aplica această metodă și la mașinile de curent continuu cu excitație serie este nevoie de o sursă de tensiune suplimentară, de valoare redusă și curenți mari care pe durata încercării să alimenteze separat excitația și să aibă posibilitatea de reglare a tensiunii. Utilizarea unui singur chopper pentru încercarea unor mașini cu tensiuni nominale mult diferite este posibilă prin adaptarea tensiunii de alimentare a variatorului la tensiunea nominală a mașinii încercate, sau numai prin reglarea tensiunii de ieșire a variatorului. Dacă utilizăm la alimentarea mașinii un invertor trifazat de tensiune, cu cea de-a treia ramură a invertorului se poate realiza sursa în comutație pentru alimentarea înfășurării de excitație serie.

Spre deosebire de metodele clasice de încercare această metodă nu necesită cuplarea mașinii de încercat cu o altă mașină și prezintă pierderi energetice mai reduse. În comparație cu metoda de încărcarea în sarcină artificială prin modificarea curentului de excitație, metoda propusă are următoarele avantaje: se poate aplica și la mașinile cu magneți permanenți; asigură pornirea mașinii; nu modifică tensiunea indusă în axa neutră.

Metode de încărcare în sarcină artificială a mașinilor asincrone

Metoda celor două frecvențe a fost propusă în 1921 de către Ytterberg [Ytt 21] pentru a produce încărcarea în sarcină artificială a mașinii asincrone. Acum, folosind convertoare electronice de putere au fost dezvoltate mai multe metode de încercare. Încărcarea termică în regim dinamic [Tem 95], [Les 97], [Klu 00], metoda vitezei constante [Gra 95], metoda de baleiere a frecvenței [McK 03b] și bineînțeles metoda celor două frecvențe [McK 03b], [Gra 93], [Gar 95], [Bol 97], [Tut 98], pot fi implementate folosind convertoare electronice de putere. Esența metodei celor două frecvențe este de a produce o tensiune de alimentare care conține două frecvențe distincte. În acest fel, se produc două câmpuri magnetice, care se rotesc la viteze diferite. Viteza arborelui nu poate fi modificată foarte rapid, astfel încât mașina va oscila între regimul de motor și cel de generator. Astfel, valoarea efectivă a curentului motorului v-a crește comparativ cu curentul de funcționare în gol [Bol 01].

În metoda lui Ytterberg, mașina de încărcare este alimentată de la două sisteme simetrice trifazate, cu frecvențe diferite. Una dintre surse are o frecvență fixă f_1 (frecvența de la rețeaua de alimentare) și se numește sursă de bază, iar cealaltă are o frecvență variabilă f_2 , uzual mai mică decât f_1 , și se numește sursă auxiliară. Tensiunile electromotoare ale celor două surse au expresiile:

$$u_1 = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin \omega_1 t, \quad (3.1.4.5)$$

$$u_2 = \sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \sin \omega_2 t. \quad (3.1.4.6)$$

În consecință, unda de tensiune rezultantă are o amplitudine modulată de o frecvență egală cu diferența dintre f_1 și f_2 . În înfășurarea rotorică, aflată în mișcare de rotație, tensiunea indusă are o frecvență egală cu diferența dintre f_1 și f_2 . Interacțiunea dintre câmpul magnetic învârtitor și curentul rotoric crează un cuplu electromagnetic care într-o semi-perioadă acționează ca un cuplu motor de accelerare, în timp ce în următoarea semi-perioadă acționează ca un cuplu generator de frânare, reducând viteza de rotație a rotorului. Cu alte cuvinte, în prima semi-perioadă, mașina absoarbe energie activă de la sursă, în timp ce în următoarea semi-perioadă cedează energie activă sursei. Tensiunea rezultantă are următoarea expresie [Bir 94], [Dea 02a]:

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot U_1 \cdot \sin \omega_1 t + \sqrt{2} \cdot U_2 \cdot \sin \omega_2 t, \quad (3.1.4.7)$$

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot (U_1 - U_2) \cdot \sin \omega_1 t + \sqrt{2} \cdot U_2 \cdot (\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t). \quad (3.1.4.8)$$

În figura 3.1.4.4 este reprezentat curentul în înfășurările mașinii

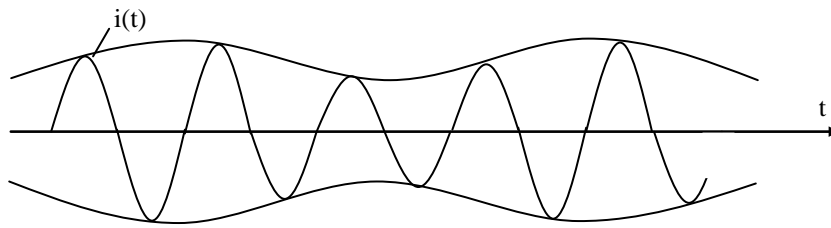


Figura 3.1.4.4 Curentul $i(t)$ la încărcarea în sarcină artificială.

În continuare, introducem următoarele notații:

$$\alpha = \omega_1 - \omega_2, \quad (3.1.4.9)$$

$$\beta = \frac{\omega_1 + \omega_2}{\omega_1 - \omega_2}, \quad (3.1.4.10)$$

$$\beta \cdot \alpha = \omega_1 + \omega_2. \quad (3.1.4.11)$$

Din ecuațiile (3.1.4.9) și (3.1.4.10) rezultă:

$$(\beta + 1) \cdot \alpha = 2\omega_1. \quad (3.1.4.12)$$

Astfel, ecuația (3.1.4.8) devine:

$$u(t) = \sqrt{2} \cdot \left[(U_1 - U_2) + U_2 \cdot \cos \frac{\alpha t}{2} \right] \cdot \sin \frac{\alpha \beta}{2} \cdot t. \quad (3.1.4.13)$$

Putem observa că această tensiune variază periodic cu pulsația ω_1 și este modulată cu frecvența $\frac{\alpha}{2}$. În încărcare termică dinamică, momentul de inerție al rotorului va produce încărcare

electromecanică în timpul ciclurilor de accelerare și de frânare. Mașina de inducție va funcționa alternativ, în regim de motor și de generator. Valoarea medie a cuplului electromagnetic este aproape de zero, dar nu este zero, pentru a compensa pierderile prin ventilație și pierderile mecanice. Pentru această metodă poate fi implementat fie controlul cuplului fie controlul vitezei.

În implementarea controlului cuplului, referința va fi un semnal dreptunghiular cu un mic offset pozitiv. Amplitudinea referinței de cuplu controlează curenții de sarcină din stator și rotor. Valoarea offsetului referinței de cuplu controlează valoarea medie a vitezei. Viteza medie de referință va fi viteza nominală pentru a menține aceleași condiții de răcire și pierderi mecanice ca la încărcarea convențională în sarcină [Bol 01]. Printr-o alegere corespunzătoare a nivelului tensiunilor și frecvențelor celor două surse de alimentare, în mașina de încercat solicitări electromagnetice apropiate de cele nominale fără cuplarea mecanică cu o altă mașină [Dea 95a].

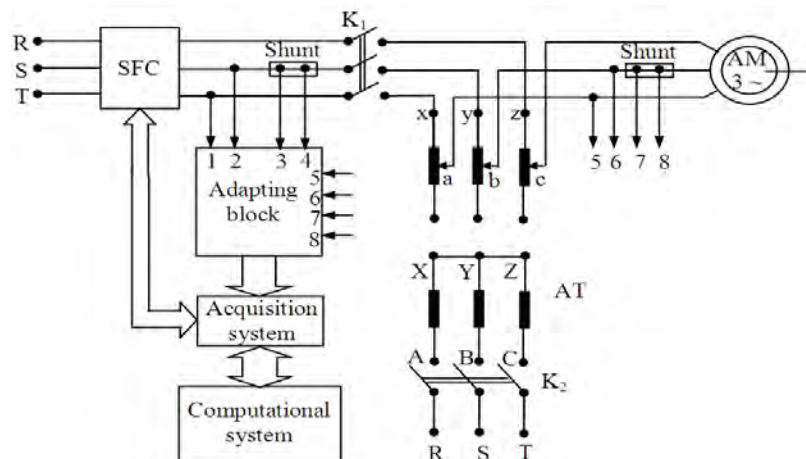


Figura 3.1.4.5 Schema bloc cu autotransformator și convertor static de frecvență pentru încărcarea în sarcină artificială a mașinii asincrone cu metoda celor două frecvențe.

O primă schemă pentru aplicarea încărcării în sarcină artificială a unui motor asincron cu metoda celor două frecvențe este dată în figura 3.1.4.5. Autotransformatorul (AT) joacă rolul sursei de bază, care furnizează tensiunea cu frecvența constantă $f_1 = 50\text{Hz}$. Convertorul static de frecvență (CSF) furnizează o tensiune cu amplitudine și frecvență variabilă f_2 , și joacă rolul sursei auxiliare care dă puterea către mașina care se va încerca pe stand. Blocul de adaptare controlează nivelul semnalelor furnizate de traductoare la intrarea sistemului de achiziție de date, care achiziționează semnale analogice și le transformă în semnale digitale. Sistemul de calcul compară datele primite de la traductoare cu setul implicit de date al mașinii de încercare și controlează modificarea parametrilor de ieșire a surselor de tensiune până când se obține valoarea nominală implicită a sarcinii artificiale. Șunturile joacă rolul de traductoare de curent.

În figura 3.1.4.6 se prezintă schema încărcării artificiale a mașinii asincrone utilizând o singură sursă de alimentare. Convertorul static de frecvență (CSF) este alimentat de la rețea, este controlat de un sistem de calcul și alimentează mașina asincronă care are arborele necuplat (liber). Înainte de a începe, în sistemul de calcul sunt introduse valorile prescrise corespunzătoare mașinii de încercat. În funcție de valoarea nominală a vitezei mașinii n_N , se aleg valorile maximă n_{\max} și minimă n_{\min} pentru viteză. Valorile tensiunii și curentului sunt controlate de calculator cu ajutorul blocului de adaptare și al traductoarelor. Puterea primită de CSF în semi-perioada când mașina funcționează în regim de generator se disipă pe reostatul de frânare plasat în circuitul intermediar de curent continuu al convertorului. Viteza poate fi ajustată până când se obține valoarea nominală.

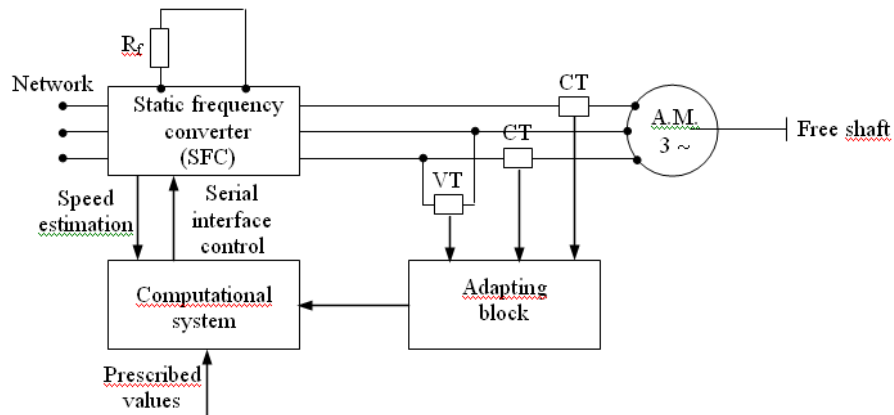


Figura 3.1.4.6 Încărcarea în sarcină artificială a mașinii asincrone utilizând o singură sursă de alimentare.

Pentru verificarea experimentală a metodei am folosit o mașină asincronă trifazată cu colivie rotorică care are următoarele date nominale: $P_N = 2,2 \text{ kW}$; $U_N = 220 \text{ V}$; $m = 3$; $\cos\varphi_N = 0,8$; curentul nominal $I_N = 4,7\text{A}$, rezistența statorică de fază $R_1 = 2,75\Omega$, rezistența rotorică de fază raportată $R_2 = 2,1 \Omega$ la 20°C respectiv $R_1 = 3,7 \Omega$, $R_2 = 2,85\Omega$ la 90°C . Temperatura înfășurării statorului a fost măsurată utilizând termocuple. În figura 3.1.4.7 se prezintă variația în timp pe durata probei de încărcare în sarcină artificială a mașinii asincrone a curentului și vitezei rotorice [Dea 02a], [Dea 03a], [Dea 10g].

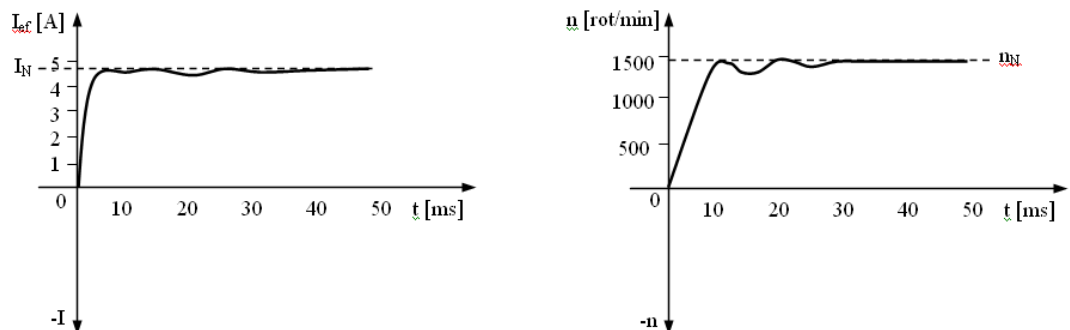


Figura 3.1.4.7 Variația curentului și a vitezei rotorice în timpul încărcării în sarcină artificială a mașinii asincrone.

În tabelul 3.1.4.1 s-a prezentat dependența de frecvență a curentului absorbit de motor în timpul încărcării în sarcină artificială [Dea 02a], [Dea 03a], [Dea 10g].

Tabelul 3.1.4.1

F [HZ]	35	36	37	37,9	39	40,1	41,2	42,2	43,1	44,3
I [A]	3,9	3,7	3,6	3,3	3,1	2,9	2,6	2,5	2,4	2,2
F [HZ]	45	46,2	47,3	48,2	49	50	51	52,1	53	54,2
I [A]	2,1	2	1,8	1,7	1,6	2,3	1,8	1,85	2,05	2,28
F [HZ]	55,7	56,5	57,9	59	60	61,6	63,1	64,1	65,4	
I [A]	2,7	2,85	3,35	4,3	4,1	4,5	4,7	4,9	5	

În tabelul 3.1.4.2 s-a prezentat variația curentului de sarcină, a vitezei medii, a tensiunii și a randamentului în funcție de frecvență [Dea 02a], [Dea 03a], [Dea 10g].

Tabelul 3.1.4.2

Frecvența [Hz]	Turația [rpm]	Tensiunea U[V]	Curentul de sarcină I[A]	Randamentul [%]
45	1445	377,6	4,75	84,9
46	1450	378,2	4,73	85,2
47	1447	378,6	4,77	85,4
48	1453	379,1	4,8	85,6
49	1441	379,5	4,66	85,9
50	1420	380	4,68	86,2
51	1418	379,9	4,72	86,15
52	1425	380,2	4,71	86,0
53	1433	380,1	4,73	85,9
54	1435	380,3	4,74	85,7
55	1438	380	4,725	85,1

Temperatura obținută la încărcarea artificială a fost mai mare decât la încărcarea clasică la arbore și la alimentarea de la o sursă sinusoidală cu aproximativ 5°C (10 %) pentru înfășurări și cu 6°C (12 %) pentru miez. Acest fenomen apare din cauza armonicilor superioare de tensiune generate la ieșirea inverterului care cresc pierderile în înfășurări și în miez. Principala problemă identificată în timpul încercărilor experimentale a fost necesitatea unui control în buclă închisă pentru a menține valorile nominale ale curentului și vitezei pentru mașina de încercat și a gestiona transferul de putere între mașină și convertor. În plus, variația randamentului cu valoarea frecvenței este mică, adică în jur de 1% (tabelul 3.1.4.2). Pierderile mecanice și cele din înfășurări vor fi cu puțin mai mari, deoarece viteza medie în timpul încărcării în sarcină artificială se apropie de viteza nominală.

Metode de încărcare în sarcină artificială a mașinilor sincrone

În principiu există două metode pentru încărcarea în sarcină artificială a mașinii sincrone: încărcarea reactivă prin subexcitare sau supraexcitare și încărcarea activă prin trecerea repetată din regimul de motor în regimul de generator.

Încărcarea reactivă prezintă avantajul că intervine numai asupra excitației, deci se vor regla puteri mici. Mașina sincronă poate fi încărcată reactiv prin subexcitare sau prin supraexcitare, corespunzător curenților de excitație I_{\min} respectiv I_{\max} . În nici unul din cele două cazuri curentul prin înfășurarea de excitație nu este cel nominal și deci condiția de a avea aceeași distribuție a pierderilor nu este respectată. Deoarece constantele termice de timp ale mașinii sincrone sunt mari se poate realiza aceeași încălzire medie și pentru înfășurarea de excitație dacă periodic se trece mașina dintr-un regim de încărcare reactivă în celălalt. Astfel pe durata t_{sub} curentul prin excitație va avea valoarea I_{\min} iar pe durata $T-t_{\text{sub}}$ va avea valoarea I_{\max} . Perioada T va fi aleasă astfel încât duratele proceselor tranzitorii să fie neglijabile în comparație cu durata procesului stabilizat dar suficient de mică în comparație cu constantele termice de timp ale mașinii. Deoarece constantele de timp termice sunt cu mai multe ordine de mărime mai mari decât cele electrice aceste condiții

pot fi îndeplinite. Notând cu k raportul între t_{sub} și perioada T se obține următoarea relație pentru curentul efectiv prin înfășurarea de excitație:

$$I_{Ex}^2 = k \cdot I_{min}^2 + (1 - k) \cdot I_{max}^2 \quad (3.1.4.14)$$

Impunând curentul efectiv, egal cu cel nominal rezultă valoarea raportului k :

$$k = \frac{I_{max}^2 - I_{ExN}^2}{I_{max}^2 - I_{min}^2} \quad (3.1.4.15)$$

Valorile lui k au sens fizic dacă sunt cuprinse în intervalul $[0,1]$. Pentru multe mașini sincrone punctul de funcționare în regim subexcitat la curent nominal și putere activă zero este situat în zona instabilă a caracteristicilor în V . La funcționarea în regim supraexcitat la curentul nominal tensiunea de alimentare a excitației poate fi de 2-3 ori mai mare decât valoarea sa nominală. Aceste dificultăți pot fi eliminate dacă se modifică și tensiunea statorică astfel: tensiunea va fi mărită pentru regimul subexcitat astfel încât punctul de funcționare la curentul nominal să fie în domeniul de stabilitate; tensiunea va fi micșorată în regim supraexcitat astfel încât să nu fie necesar un curent de excitație mai mare decât dublul curentului de excitație nominal. Dezavantajele acestei metode sunt: ea nu poate fi aplicată mașinilor sincrone cu magneți permanenți sau mașinilor sincrone reactive; nu este asigurată pornirea mașinii; pentru mașinile cu reactanțe sincrone mari încărcarea nominală nu poate fi realizată decât dacă se modifică și tensiunea statorică; la puteri mari se vehiculează puteri reactive mari, care produc modificări importante ale tensiunii în rețea. Acestea pot fi eliminate prin funcționarea în paralel cu mașina încercată a unui compensator sincron.

Încărcarea activă se realizează prin accelerarea mașinii în regim de motor și apoi frânarea în regim de generator. Pe perioada încercării turația mașinii oscilează în jurul turației nominale. Încărcarea mașinii se realizează prin controlul unghiului intern θ cu ajutorul unui invertor de tensiune și al unui sistem de control. Poziția axei d poate fi cunoscută fie utilizând un traductor de poziție fie se estimează cunoscând parametrii mașinii și dinamica variației curenților și tensiunilor. Avantajele metodei: se poate utiliza și pentru mașini cu magneți permanenți sau mașini sincrone reactive; asigură pornirea lină a mașinii sincrone încercate, fără echipamente auxiliare pentru pornire; nu produce modificări ale tensiunilor rețelei. Printre dezavantajele metodei amintim: necesitatea montării unor traductoare de poziție; estimatoarele de poziție, pot deveni instabile la schimbarea mașinilor încercate, necesitând cunoașterea parametrilor mașinii încercate, pentru reacordare; schimbul de putere activă între mașină și invertor poate să necesite mărirea capacității condensatorului din circuitul intermediar.

O altă metodă de încărcarea reactivă o reprezintă utilizarea unui convertor static de frecvență utilizat pentru modificarea tensiunii statorice. Acesta realizează și pornirea mașinii prin creșterea lentă a frecvenței. Pe durata încercării frecvența este constantă și se modifică numai tensiunea astfel încât să se obțină funcționări stabile în regim subexcitat și să nu fie necesari curenți exagerați în excitație la funcționarea în regim supraexcitat. Această metodă nu se poate aplica în cazul mașinilor cu magneți permanenți și în cazul celor reactive, dar prezența invertorului face posibilă utilizarea metodei active.

Schema din figura 3.1.4.8 permite utilizarea încărcării în sarcină artificială a mașinilor sincrone (SM) atât prin utilizarea metodei de încărcare reactivă, cât și prin metoda încărcării active. Convertorul AC/DC permite alimentarea excitației atât în regim subexcitat, cât și în regim supraexcitat, iar CSF-ul permite modificarea tensiunii și frecvenței statorice. Poziția rotorului este obținută cu ajutorul unui traductor de poziție.

Încărcarea în sarcină artificială a mașinilor electrice rotative este o soluție modernă pentru verificarea simplă, cu costuri reduse, a parametrilor și a caracteristicilor acestora. În literatura de specialitate se insistă mai mult pe testarea mașinilor asincrone, dar de mare interes devine testarea mașinilor sincrone și a mașinilor de curent continuu, inclusiv cele cu magneți permanenți. Precizia de calcul a metodelor de încărcare în sarcină artificială a mașinilor electrice a fost confirmată teoretic și experimental, folosind tehnica de calcul, capabilă să identifice pierderile totale ale mașinii testate. Calculul analitic, simulările dinamice și încercările experimentale dovedesc viabilitatea acestor metode.

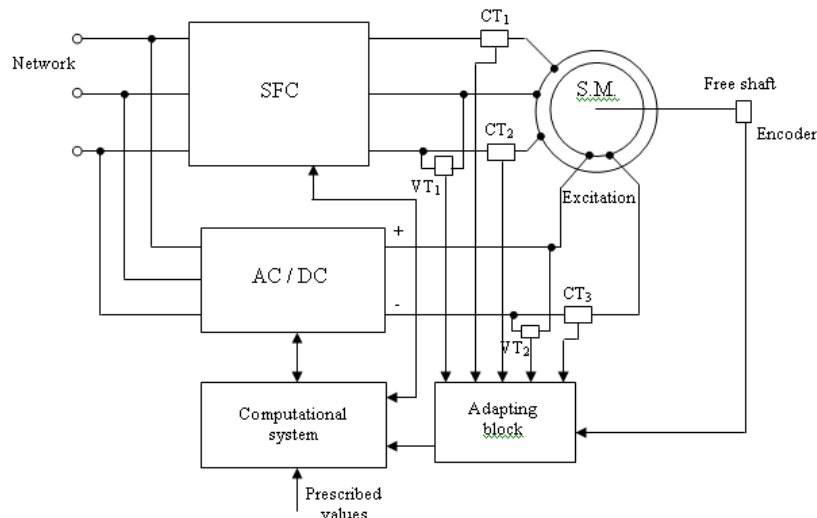


Figura 3.1.4.8 Schemă cu CSF pentru încărcarea în sarcină artificială reactivă și activă pentru mașinile sincrone.

3.2. Aplicații industriale ale sistemelor de compensare a energiei reactive și a regimului deformant

Această direcție de cercetare a apărut ca o necesitate a agenților economici din zona Hunedoara de a reduce costurile cu energia electrică. Dacă în capitolul 3.1 am abordat această temă prin prisma reducerii consumului de energie activă, aici vom prezenta preocupările de reducere, până la anulare, a costului cu energia reactivă. Pe lângă consumatorii industriali obișnuiți care au solicitat sprijin pentru acest subiect [Pop 09], [Pop 11], [Pop 12], am abordat și domenii în care abia acum se definitivează soluțiile optime chiar de către marii producători de echipamente la nivel mondial (ABB, Siemens, Nokian, etc.). Unul din domenii îl reprezintă tracțiunea electrică în curent continuu sau în curent alternativ monofazat la frecvența de 50 Hz [Bac 10]. Celălalt domeniu este cel de producere a oțelului, în cuptoare electrice cu arc (de curent continuu și de curent alternativ trifazat), și de prelucrare a lui prin deformare [Dea 06b], [Dea 07c], [Dea 10e], [Dea 10f], [Dea 11a], [Dea 14a], [Tom 11]. Voi prezenta în continuare două aplicații, una pentru stația electrică a oțelăriei electrice și cealaltă pentru stația electrică de alimentare a laminorului și a secției de turnare continuă de la Arcelor Mittal Hunedoara. Datorită costului și complexității acestor instalații ele au fost licitate și încredințate spre execuție unor firme puternice, cu experiență la astfel de lucrări.

3.2.1. Studiul compensării energiei reactive și a armonicilor superioare în stația electrică de medie tensiune (33 KV în gol) la oțelăria electrică a Arcelor Mittal Hunedoara

Industria metalurgică este cunoscută ca fiind unul din marii poluatori ai aerului, solului, apelor dar și a rețelelor electrice de alimentare. Pentru a putea funcționa în continuare, este necesar un efort investițional important pentru încadrarea în normele admise a tuturor factorilor de poluare. În timpul funcționării, cuptorul electric cu arc (de curent continuu sau de curent alternativ trifazat) are o variație în limite foarte largi a puterii absorbite, care determină variația puterii reactive necesare, curbele curentului și tensiunii sunt puternic distorsionate, generând apariția armonicilor superioare. Datorită inegalității reactanțelor pe cele trei faze, apare regimul nesimetric însoțit de efectul de flicker. Pentru eliminarea acestor fenomene se folosesc compensatoare sincrone, baterii de condensatoare și bobine acordate pe anumite armonici iar varianta cea mai bună dar și cea mai costisitoare o reprezintă instalațiile complexe de filtre active (SVC) care sunt comandate de un sistem automat de urmărire în timp real. Colaborarea pe acest subiect cu Arcelor Mittal Hunedoara a demarat în anul 2002 datorită problemei facturilor mari la energia electrică reactivă (peste 120000

de euro lunar). În primă fază s-a trecut la determinări experimentale iar apoi au fost propuse diferite soluții de rezolvare.

Investigații experimentale cu privire la regimurile de funcționare a cuptorului electric trifazat cu arc

Cuptorul electric cu arc analizat este trifazat de tip EBT (elaborare continuă) având un transformator cu datele prezentate în tabelul 3.2.1.1. Durata unei șarje este în jur de 105 de minute, obținându-se o producție medie lunară de 40000 t oțel.

Tabelul 3.2.1.1 Datele transformatoarelor de alimentare a cuptoarelor electrice

EBT Transformator cuptor		
Puterea aparentă	75	MVA
Tensiune primar	30	KV
Tensiune secundar	0.75	KV
Număr de ploturi	15	
Conexiune primar	Delta	
Conexiune secundar	Delta / Stea	
Impedanță	0.0365	p.u.
EAF LF Transformator tratare oală în vid		
Puterea aparentă	50	MVA
Tensiune primar	30	KV
Tensiune secundar	0.6907	KV
Număr de ploturi	15	
Conexiune primar	Delta / Stea	
Conexiune secundar	Delta / Delta	
Capacitate de supraîncărcare	30%	
Tensiunea de scurt circuit	6.45%	

Instalația de alimentare a fost proiectată să alimenteze trei cuptoare din care două au fost scoase din uz după 30 de ani de funcționare, construindu-se în locul unuia dintre ele un cuptor electric trifazat cu arc pentru tratare în oală, transformatorul acestuia având datele prezentate în tabelul 3.2.1.1. Partea de automatizare a topirii s-a realizat de către firma Manesmann, urmărindu-se minimizarea duratei șarjei prin maximizarea puterii active a arcului electric. Schema electrică a instalației de alimentare este prezentată în figura 3.2.1.1. Pe partea de medie tensiune (30 kV în sarcină) se găsește instalația de compensare, filtrare și echilibrare propusă.

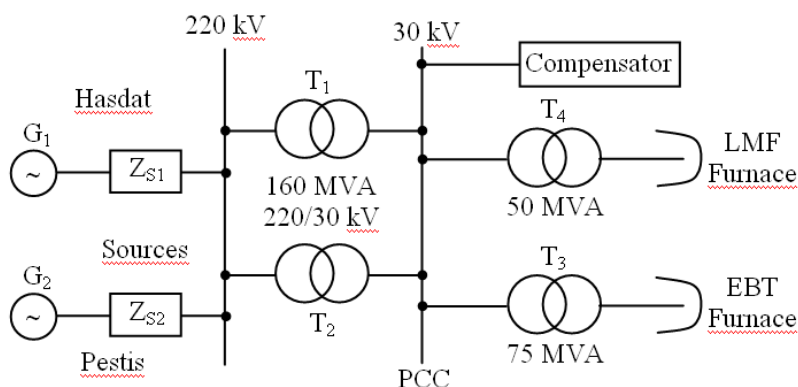


Figura 3.2.1.1 Schema electrică monofilară de alimentare a cuptoarelor.

Structura și principiul acestei instalații se determină pornind de la valorile măsurate de curent, tensiune, putere activă și reactivă pe durata șarjelor, când sunt în funcțiune ambele cuptoare. În figurile 3.2.1.2 - 3.2.1.7 se prezintă valorile medii măsurate [Dea 09a], [Dea 10a], [Tom 11].

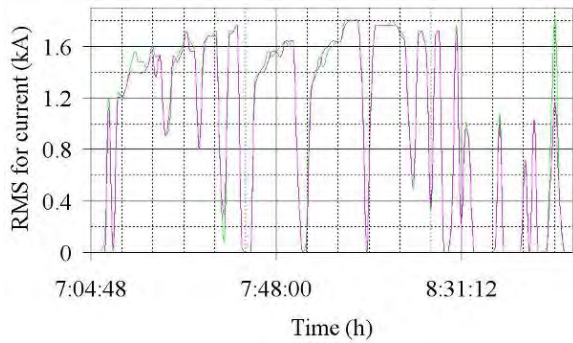


Figura 3.2.1.2 Valoarea efectivă a curentului de fază.

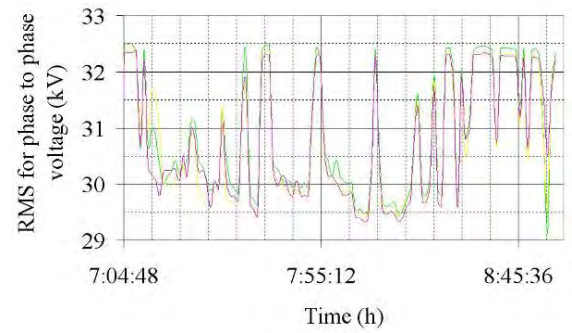


Figura 3.2.1.3 Valoarea efectivă a tensiunii de fază.

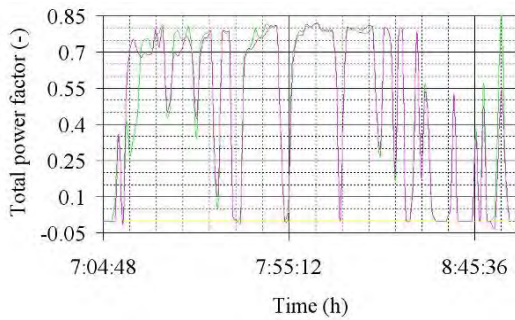


Figura 3.2.1.4 Factorul de putere total.

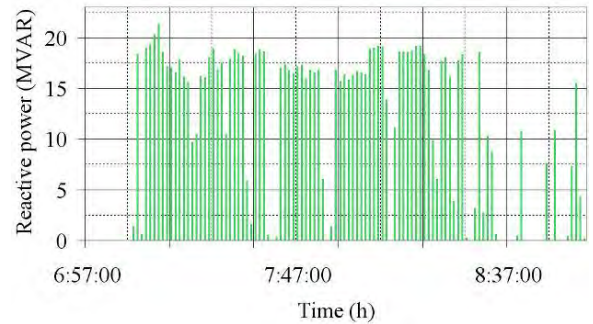


Figura 3.2.1.5 Variația puterii reactive pe o fază.

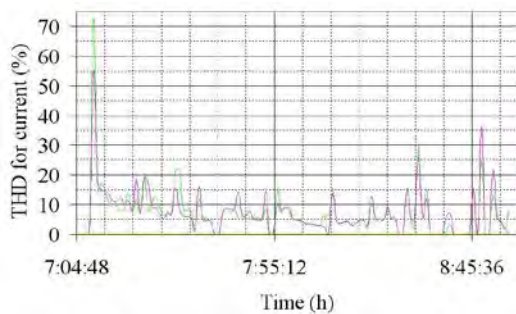


Figura 3.2.1.6 THD pentru curenți.

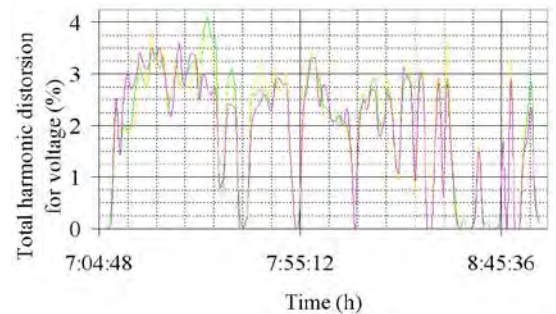


Figura 3.2.1.7 THD pentru tensiuni.

În figurile următoare se prezintă alte rezultate experimentale obținute [Dea 10e], [Dea 10f].

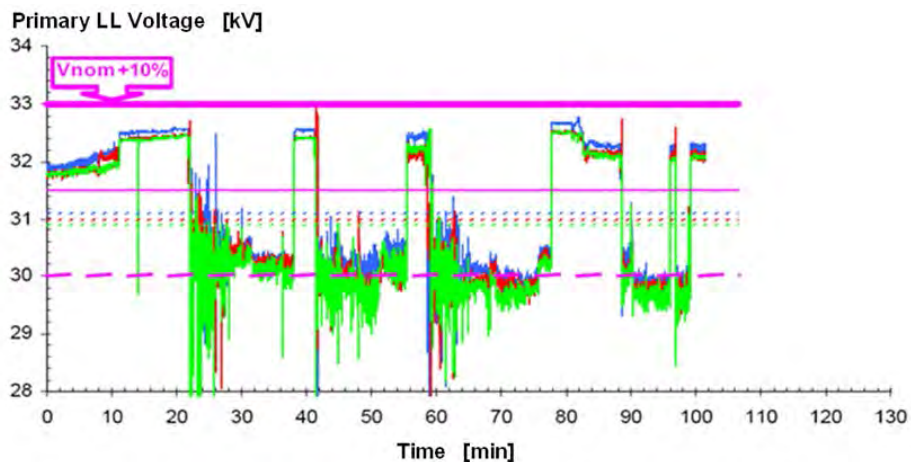


Figura 3.2.1.8 Tensiunile de linie în primarul transformatorului CEA.

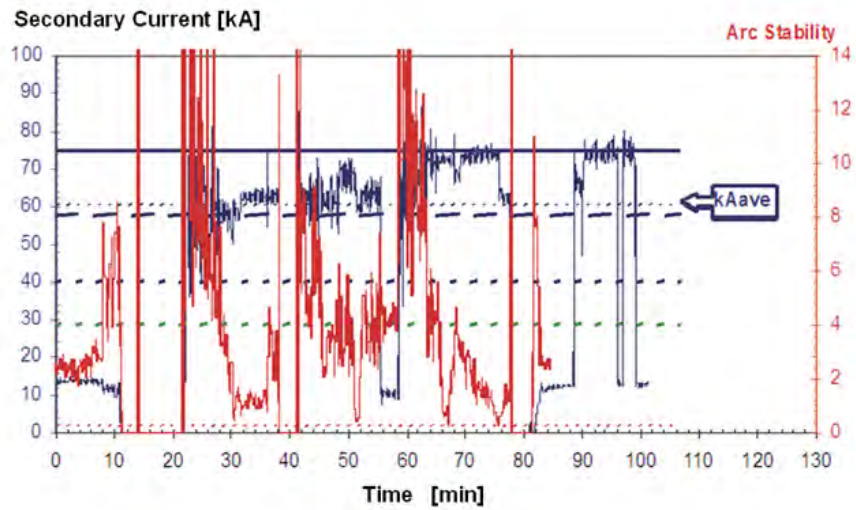


Figura 3.2.1.9 Curentul în secundar și stabilitatea arcului electric.

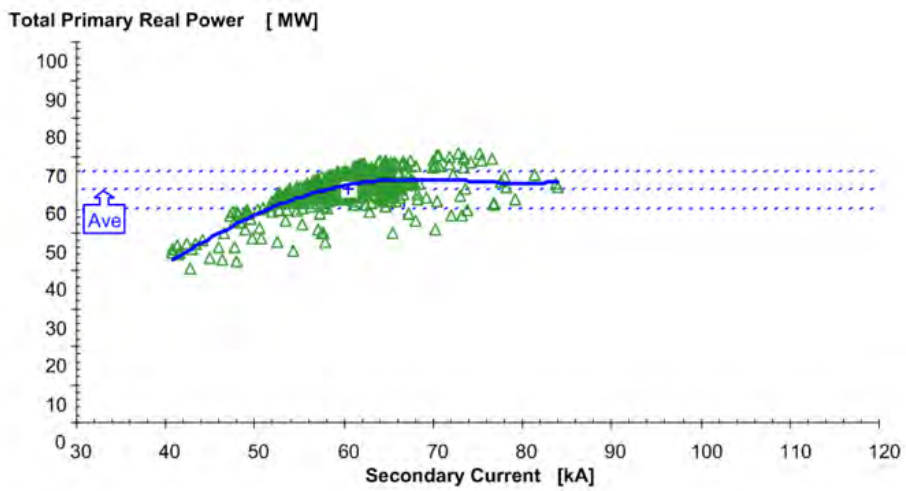


Figura 3.2.1.10 Curba de variație a puterii active în faza de topire inițială.

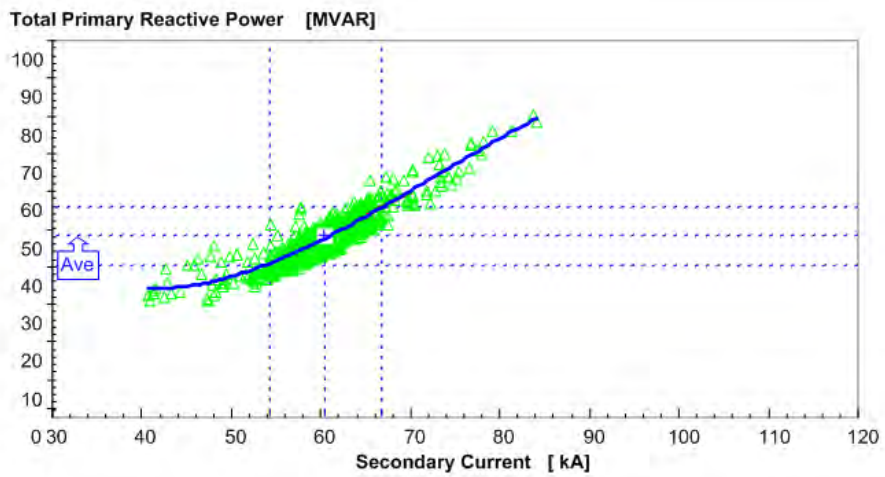


Figura 3.2.1.11 Curba de variație a puterii reactive în faza de topire inițială.

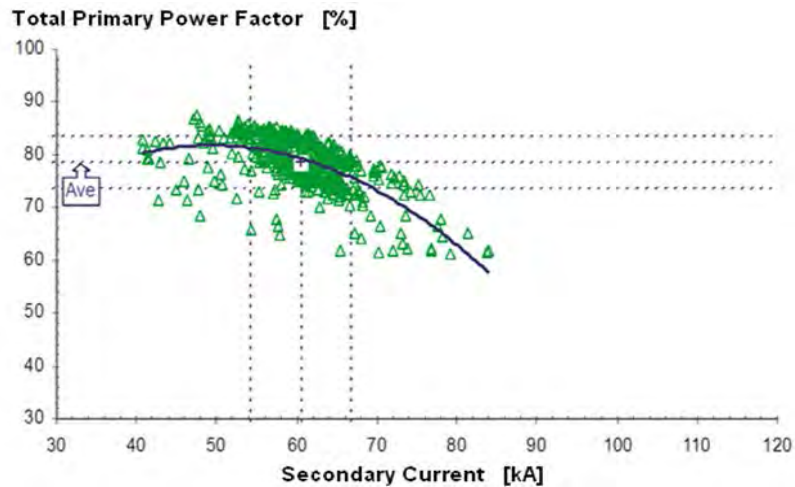


Figura 3.2.1.12 Factorul de putere în primarul CEA în faza de topire inițială.

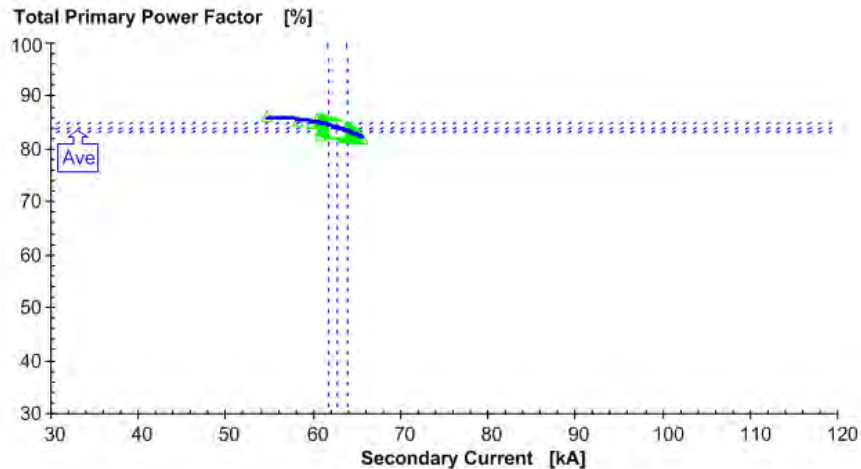


Figura 3.2.1.13 Factorul de putere în primarul CEA în faza de oxidare.

În figura 3.2.1.8 se prezintă forma de variație a tensiunilor de linie pe bara de 30 KV. Față de valoarea nominală are loc o variație cuprinsă în domeniul $\pm 10\%$. Variațiile mai accentuate se observă în faza de topire inițială. Există diferențe semnificative între tensiuni cauzate de modul de lucru al electrozilor și regimul lor de funcționare. Forma de variație a curentului în secundarul transformatorului EAF și stabilitatea arcului sunt date în figura 3.2.1.9. Se observă că variațiile mari de curent determină o instabilitate accentuată a arcului electric. Variația puterii active și a puterii reactive funcție de curentul în secundar pe parcursul topirii propriu-zise (topire inițială) se prezintă în figurile figura 3.2.1.10 și figura 3.2.1.11. Puterea activă medie este în jur de 62 MW iar puterea reactivă medie 47 MVar. Dependența factorului de putere în funcție de curentul în secundar pentru cele două faze de topire (topire inițială și oxidare) se dă în figurile figura 3.2.1.12 și figura 3.2.1.13. În primul caz (figura 3.2.1.12) rezultă o valoare medie de 78% iar în cazul al doilea de 84%. Măsurătorile s-au făcut pe durata mai multor șarje, rezultatele prezentate au fost alese dintre cele mai sugestive.

În figurile 3.2.1.10, 3.2.1.11, și 3.2.1.12 (topire inițială) domeniul de variație a curentului este larg (40÷86 kA) iar în figura 3.2.1.13 (oxidare) acest domeniu se restrânge (56÷60 kA). Datorită variațiilor mai mici de curent și a stabilității mărite în funcționare (figura 3.2.1.9), are loc o reducere a consumului de energie reactivă (de la o medie de 47 MVar la 43 MVar), o creștere a factorului de putere (cu 6% valoarea medie) și o creștere a puterii active medii (de la 62 MW la 69 MW).

Puterea consumată de cuptorul electric cu arc (CEA) poate fi privită ca o putere constantă (P_c, Q_c) plus o putere fluctuantă ($\Delta P_f, \Delta Q_f$), figura 3.2.1.14 [Dea 11a].

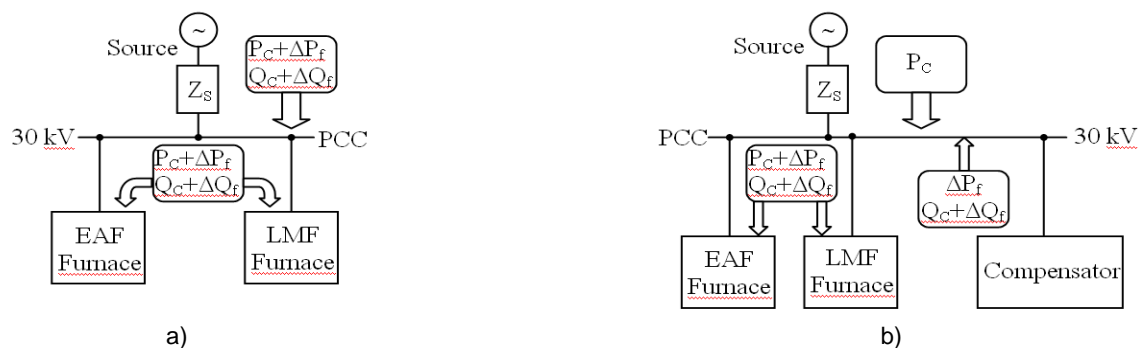


Figura 3.2.1.14 Circuitul de alimentare a cuptorului cu arc (a) fără compensare; (b) cu compensare.

Q_C afectează forma tensiunii rețelei, stabilitatea tensiunii și factorul de putere iar ΔQ_f este în principal legată de fluctuațiile amplitudinii tensiunii. O soluție pentru rezolvarea totală a problemei calității energiei determinată de CEA, este de a compensa Q_C prin intermediul sumei ΔP_f și ΔQ_f , astfel rețeaua va furniza doar puterea activă P_C la un factor de putere unitar. În practică, nu este necesară o compensare totală, o alternativă eficientă din punct de vedere al costului fiind compensarea până la factorul de putere neutral. Dacă se compensează consumul de energie reactivă, factorul de putere crește și cuptorul are disponibilă o putere mai mare pentru topire reducându-se durata medie a șarjei. În tabelul 3.2.1.2 se prezintă costurile suplimentare cu energia reactivă în anul 2008 [Dea 10a].

Tabelul 3.2.1.2

2008	Energia Activă Cumulată [MWh]	Energia Reactivă Cumulată [MVarh]	Factorul de putere PF	Energia Reactivă de compensat [MVarh]		Costul [Euro]	
				PF = 92%	PF = 94%	PF = 92%	PF = 94%
1	24949.91	22194.96	74.72	11.533.34	13139.35	76466.37	86865.71
2	47714.63	40754.13	77.51	8861.44	10296.68	58584	68072.53
3	71788.99	63712.55	72.37	12702.78	14220.59	83979.51	94013.91
4	97815.20	97613.33	73.65	12813.66	14454.52	84712.54	95560.49
5	124438.45	110151.20	76.32	11196.41	12874.91	74020.72	85117.52
6	142990.92	125643.81	76.76	7589.28	8758.95	50173.62	57906.45
7	164626.42	144399.16	75.56	9538.66	10902.71	63061.20	72079.06
8	183980.63	160763.03	76.36	8119	9339.22	53675.65	61742.66
9	204818.46	178251.05	76.60	8611	9924.89	56929.23	65614.61
10	232389.63	202178.96	75.52	12182.64	13920.91	80540.80	92032.70
11	254595.56	221729.83	75.05	10091.31	11491.32	66714.81	75970.43
12	277698.01	243625.15	74.11	11925.65	13595.24	78841.84	89879.65
Total				125198.17	142919.29	827700.29	944855.72

Având în vedere valorile totale achitate pentru energia reactivă într-un an (827700.29 Euro la un factor de putere de 92%) și faptul că operatorul de sistem intenționează să crească valoarea factorului de putere neutral la 94% (pentru care s-ar achita 944855.72 Euro) se impune adoptarea de urgență a unei soluții și implementarea ei în practică. Din analiza efectuată se disting mai multe posibilități: compensarea cu baterii de condensatoare și bobine [Dea 10e], cu compensatoare sincrone [Dea 06b] sau cu o instalație de tip SVC [Dea 10a], [Dea 09a], [Dea 07c]. Diferențele dintre aceste metode sunt mari, primele două având costuri mai mici dar eficiență redusă iar ultima este eficientă dar cu costuri mari. Se vor face analize comparative a celor trei soluții [Dea 09a], [Dea 10a].

Simulările prezentate în continuare se bazează pe modele matematice ale cuptoarelor electrice cu arc și a rețelelor de alimentare a acestora (de înaltă, medie și joasă tensiune) [Pee 04], [Dix 05], [Cor 08].

Utilizarea bateriilor de condensatoare pentru compensarea energiei reactive și filtrarea armonicelor superioare în stația electrică de medie tensiune a oțelăriei electrice

În tabelul 3.2.1.3 se prezintă rezultatele simulărilor făcute pentru compensarea energiei reactive prin introducerea de baterii de condensatoare cu puterea cuprinsă între 20 MVar și 50 MVar. Se consideră cazul compensării până la factorul de putere de 94%, ținând cont de consumurile de energie reactivă în anul 2008 [Dea 10f].

Tabelul 3.2.1.3 Rezultatele simulării la compensarea cu baterii de condensatoare

2008	Luna	Required Reactive Power [MVar]	Equivalent Capacitor [kVar]	PF = 92%							PF = 94%								
				Missing MVar Compensation (-)							Missing MVar Compensation (-)								
				Size of Capacitor Bank [kVar]							Size of Capacitor Bank [kVar]								
				20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000	Required Reactive Power [MVar]	Equivalent Capacitor [kVar]	20000	25000	30000	35000	40000	45000	50000
	1	11,566.34	34,790	-4,917	-3,255	-1,592	70	1,732	3,394	5,057	13,139.35	39,521	-6,490	-4,828	-3,166	-1,503	159	1,821	3,484
	2	8,861.45	29,616	-2,877	-1,381	115	1,611	3,107	4,603	6,099	10,296.69	34,412	-4,312	-2,816	-1,320	176	1,672	3,168	4,664
	3	12,702.78	38,208	-6,054	-4,391	-2,729	-1,067	596	2,258	3,920	14,220.59	42,774	-7,571	-5,909	-4,247	-2,584	-922	740	2,402
	4	12,813.66	39,871	-6,386	-4,779	-3,172	-1,565	42	1,648	3,255	14,454.53	44,977	-8,027	-6,420	-4,813	-3,206	-1,599	8	1,614
	5	11,196.41	33,677	-4,547	-2,885	-1,223	440	2,102	3,764	5,427	12,874.92	38,726	-6,226	-4,563	-2,901	-1,239	424	2,086	3,748
	6	7,589.29	23,615	-1,162	445	2,052	3,659	5,266	6,873	8,480	8,758.96	27,254	-2,331	-724	882	2,489	4,096	5,703	7,310
	7	9,538.67	28,691	-2,889	-1,227	435	2,097	3,760	5,422	7,084	10,902.72	32,794	-4,253	-2,591	-929	733	2,396	4,058	5,720
	8	8,119.01	24,421	-1,470	193	1,855	3,517	5,179	6,842	8,504	9,339.23	28,091	-2,690	-1,028	635	2,297	3,959	5,622	7,284
	9	8,611.14	26,794	-2,184	-577	1,030	2,637	4,244	5,851	7,458	9,924.90	30,882	-3,497	-1,890	-284	1,323	2,930	4,537	6,144
	10	12,182.64	36,644	-5,533	-3,871	-2,209	-546	1,116	2,778	4,440	13,920.91	41,872	-7,272	-5,609	-3,947	-2,285	-622	1,040	2,702
	11	10,091.32	31,400	-3,664	-2,057	-450	1,157	2,764	4,371	5,978	11,491.33	35,756	-5,064	-3,457	-1,850	-243	1,364	2,971	4,578
	12	10,297.52	31,612	-3,789	-2,162	-535	1,092	2,719	4,346	5,973	11,756.74	36,096	-5,249	-3,622	-1,994	-367	1,260	2,887	4,514

În primul caz (PF = 92%) o baterie de condensatoare având 40 MVar este suficientă pentru tot consumul de energie reactivă iar în al doilea caz (PF = 94%) valoarea este de 45 MVar (tabelul 3.2.1.3). În figurile următoare se prezintă curbele de variație a puterii active din primarul transformatorului cuptorului cu curentul din secundar pentru cazul actual (figura 3.2.1.15), pentru cazul cu baterie de condensatoare fără reactor (figura 3.2.1.16) și pentru cazul cu baterie de condensatoare și reactor cu rezistența de 1, 2, 3 Ω (figurile figura 3.2.1.17, figura 3.2.1.18, figura 3.2.1.19). Se observă că puterea activă disponibilă la un anumit curent prin arcul electric este cu atât mai mică cu cât tensiunea în secundar este mai mică și cu cât rezistența reactorului este mai mare [Dea 10f], [Dea 11a].

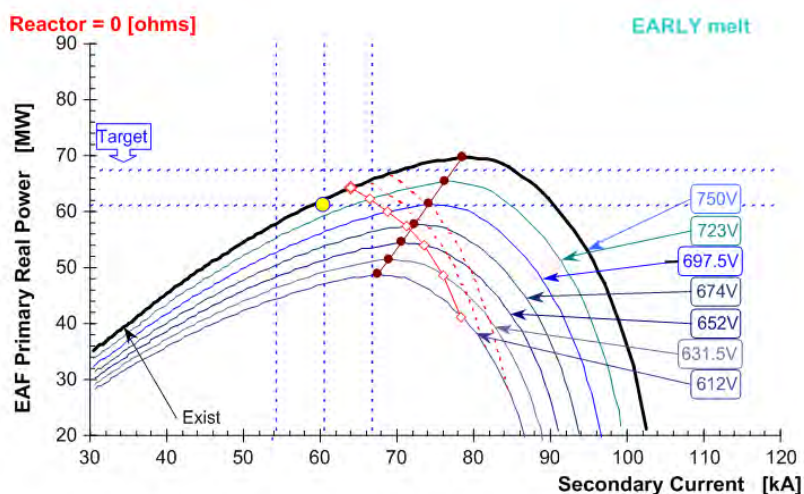


Figura 3.2.1.15 Curbele de variație a puterii active fără baterii de condensatoare și fără reactor (R = 0 Ω).

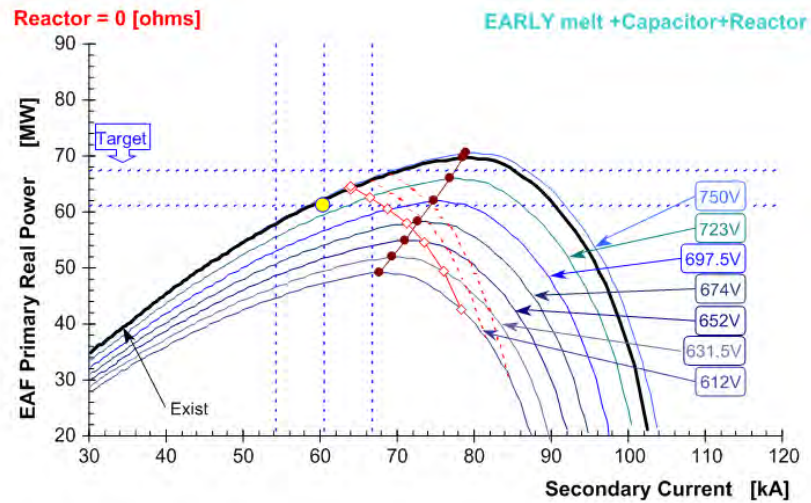


Figura 3.2.1.16 Curbele de variație a puterii active cu baterii de condensatoare și fără reactor ($R = 0 \Omega$).

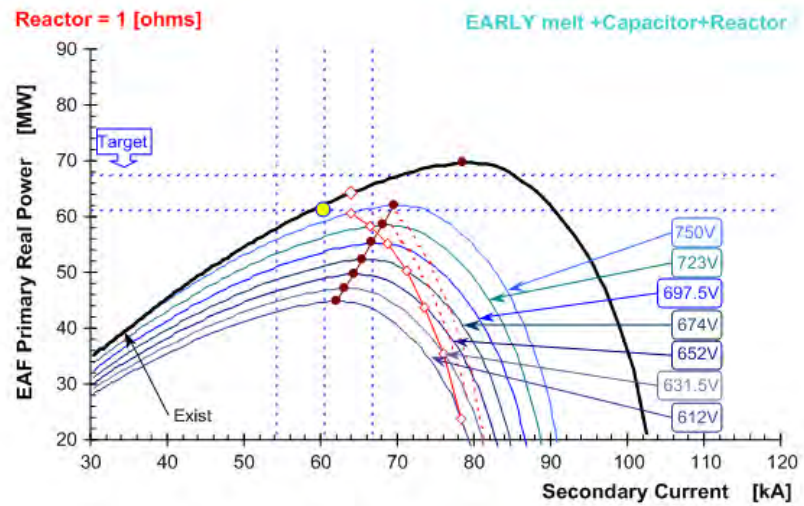


Figura 3.2.1.17 Curbele de variație a puterii active cu baterii de condensatoare și reactor ($R = 1 \Omega$).

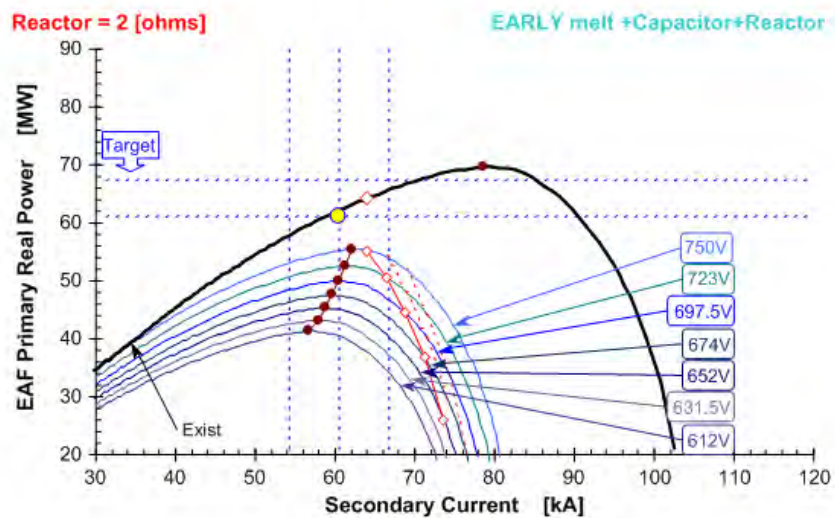


Figura 3.2.1.18 Curbele de variație a puterii active cu baterii de condensatoare și reactor ($R = 2 \Omega$).

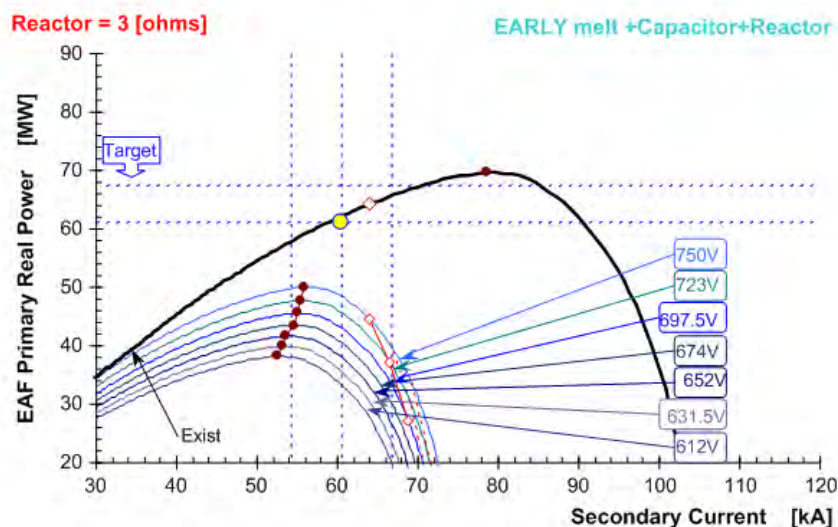


Figura 3.2.1.19 Curbele de variație a puterii active cu baterii de condensatoare și reactor ($R = 3 \Omega$).

Valoarea medie a energiei reactive necesare pentru bateria de condensatoare la 30KV pentru realiza factorul de putere de 94% este de 36,1 MVar în faza de topire inițială. Valoarea recomandată este de 45 MVar la 30 KV, oferind o compensare a factorului de putere mai mare de 94%. Se recomandă ca întreaga valoare a puterii reactive (45 MVar) să fie acordată pe frecvența armonice de ordinul 3 (sau în jurul valorii de 2,9 în funcție de condițiile de rezonanță).

Utilizarea compensatoarelor sincrone la realizarea factorului de putere neutral în stația electrică de medie tensiune a oțelăriei electrice

Cuptoarele electrice cu arc reprezintă consumatori care pe lângă consumul de energie reactivă introduc în sistem dezechilibre importante. De aceea compensarea energiei reactive și filtrarea armonicelor superioare trebuie să fie un deziderat pentru acești utilizatori. Alegerea metodei de compensare se face ținând cont de cantitatea de energie reactivă minimă ce trebuie compensată astfel încât $\cos\varphi \geq 0,92$, ponderea curenților armonici, posibilitățile tehnice, fiabilitatea echipamentului și nu în ultimul rând costul. În continuare se prezintă o soluție cu cost minim propusă pentru Oțelăria electrică a S.C. Mittal Steel S.A. Hunedoara. S-au efectuat măsurători pe baza cărora s-a realizat analiza armonică a curenților la 30 KV. Forma undei de tensiune și ponderea armonicelor în curent sunt prezentate în figura 3.2.1.20 [Dea 06b]. Coeficienții de distorsiune armonică pentru tensiune și curent au expresiile:

$$U_{THD} = \sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots} = 4,94\% < 6,5\% \quad (3.2.1.1)$$

$$I_{THD} = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + \dots} = 8,94\% < 12\% \quad (3.2.1.2)$$

care se încadrează în standardele actuale și deci nu s-ar impune utilizarea filtrelor de armonici.

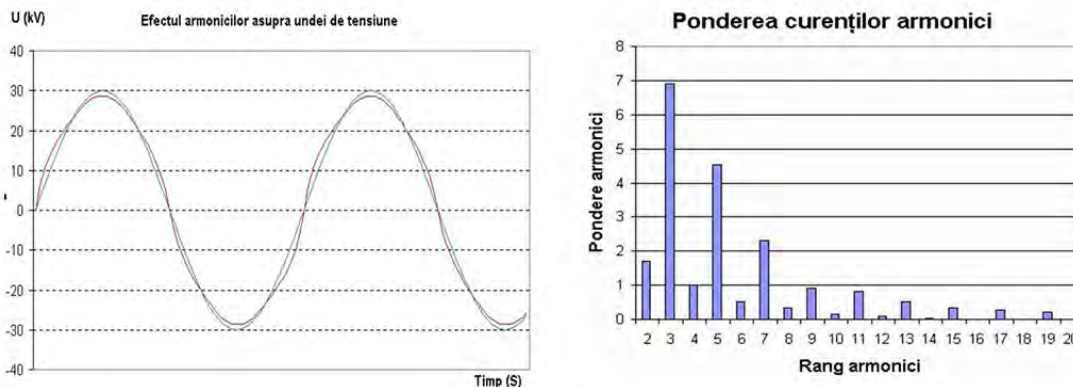


Figura 3.2.1.20 Forma de undă a tensiunii și ponderea armonicelor superioare.

Având în vedere situația actuală, se propune o schemă de compensare a energiei electrice reactive, pentru obținerea factorului de putere neutral, cu compensatoare sincrone (figura 3.2.1.21). Compensatoarele CS1 și CS2 sunt conectate la sistemul de bare de medie tensiune prin intermediul unui transformator cu puterea de 40 MVA. Puterea aparentă a compensatoarelor este de 15 MVAr la o tensiune nominală de 15,75 kV.

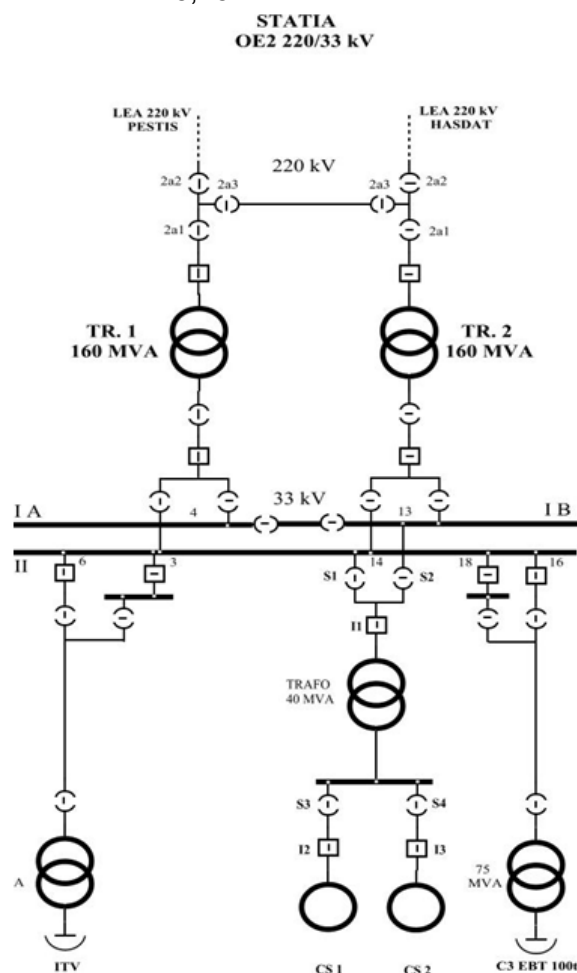


Figura 3.2.1.21 Schema monofilară a circuitului de medie tensiune, pentru utilizarea compensatoarelor sincrone

Cu ajutorul unui sistem de măsură se achiziționează curenții și tensiunile pe partea de medie tensiune. În funcție de valoarea puterii reactive, sistemul de urmărire și comandă (SUC), comandă redresoarele de alimentare a excitației compensatoarelor sincrone (REC) care modifică curenții de excitație în sensul creșterii sau descreșterii puterii reactive furnizate în rețea. Schema bloc a instalației de automatizare este prezentată în figura 3.2.1.22.

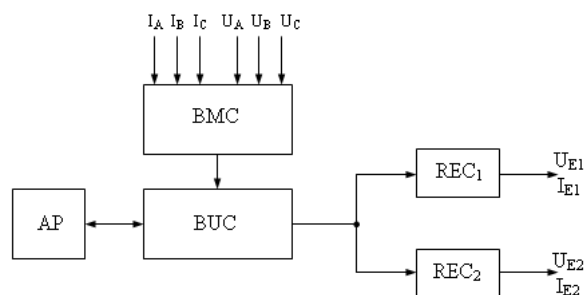


Figura 3.2.1.22 Schema bloc a instalației de automatizare.

S-au făcut următoarele notații: BMC – bloc de măsură și calcul; BUC bloc de urmărire și comandă; REC_{1,2} – redresor de alimentare a excitației; AP – automat programabil de nivel ierarhic superior.

Sistemul propus nu poate urmări în timp real variația energiei reactive din cauza inerției electromagnetice a înfășurării de excitație. Dar în medie factorul de putere poate fi menținut peste valoarea neutrală. Costul unui astfel de sistem este de cel mult 25% din costul unui sistem complet (SVC) care face compensare statică și filtrare a armonicilor, iar eficiența comparativ cu aceleași sisteme poate ajunge la 85-90% [Dea 06b].

Utilizarea sistemelor complexe, de tip SVC, pentru compensarea energiei reactive și filtrarea armonicilor superioare în stația electrică de medie tensiune a oțelăriei electrice

În prezent, variația puterii absorbite, dezechilibrul pe faze, efectul de flicker și distorsionarea formelor de undă ale tensiunilor și curenților nu este imputată consumatorului decât prin energia reactivă absorbită la un factor de putere mai mic decât cel neutral ($\cos\varphi = 0,92$). Normele moderne vor ține însă seama de toate aceste aspecte, iar costurile funcționării cu astfel de dezechilibre vor crește spectaculos. De aceea este necesară gândirea unor sisteme care să permită alinierea la noile standarde. În figura 3.2.1.23 se prezintă o propunere de sistem automat pentru compensare, filtrare și echilibrare [Dea 07c].

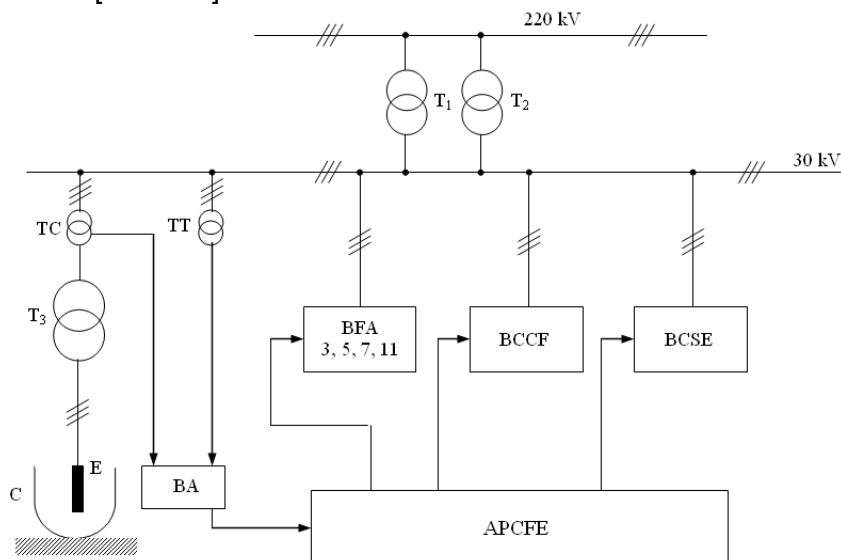


Figura 3.2.1.23 Sistem automat pentru compensare, filtrare și echilibrare.

S-au făcut următoarele notații: T₁, T₂ – transformatoare de putere (unul activ și unul de rezervă); T₃ – transformatorul cuptorului; TC – transformatoare de curent; TT – transformatoare de tensiune; C – cuptorul electric trifazat; E – electrozi; BA – bloc de adaptare; APCFE – automat programabil pentru compensare, filtrare și echilibrare; BFA – bloc filtrare armonicilor superioare; BCCF – bloc compensare energie reactivă cu reactanțe de capacitate fixă; BCSE – bloc compensare energie reactivă suplimentară și echilibrare a sarcinii. Automatul programabil primește informațiile de curent și tensiune de la transformatoarele de curent și tensiune, pentru fiecare fază, prin intermediul blocului de adaptare. Pe baza programului de conducere implementat, se comandă filtrarea armonicilor respectiv compensarea energiei reactive și echilibrarea sarcinii pe faze. Blocul de filtrare al armonicilor conține bobine și condensatoare acordate pe frecvența corespunzătoare armonicilor 3, 5, 7, 11 care în practică s-a constatat că au o pondere mai mare. Conectarea sau deconectarea lor se face prin contactoare statice comandate de automatul programabil. Blocul de compensare a energiei reactive cu reactanțe de capacitate fixă (BCCF) este conectat în circuit pe toată durata șarjei și este astfel calculat încât la valoarea medie a energiei reactive pe o șarjă să fie realizat un factor de putere neutral. Când cuptorul se află în repaus, acest bloc se deconectează. Blocul de compensare suplimentară a energiei reactive (BCSE) introduce și scoate în mod dinamic, la comanda prin contactoare statice de către automatul programabil, baterii de condensatoare pentru compensarea energiei reactive care depășește media pe o șarjă în așa fel încât factorul de

putere să nu scadă sub valoarea neutrală. Tot în cadrul acestui bloc există instalația de echilibrare a sarcinii cu bobine și condensatoare, care în timp real introduce sau scoate reactanțe din circuit astfel încât factorul de distorsiune al curenților respectiv tensiunilor să fie sub limitele admise iar valorile defazajelor între curenți și între tensiuni să corespundă unui sistem simetric. În acest bloc au loc fenomene tranzitorii importante. Instalațiile de ultimă oră folosesc convertizoare de frecvență care creează un regim capacitiv sau inductiv în funcție de cerința procesului, în locul blocului BCSE.

Ținând cont că marii producători de echipamente de compensare de tip SVC nu fac publice schemele utilizate și strategiile de control, pentru a putea aborda corect subiectul compensării armonicelor superioare este important să studiem conținutul de armonici superioare. În figurile următoare se prezintă forma de variație pe o șarjă a puterilor (aparentă, activă și reactivă) și armonicile superioare de curent și tensiune [Dea 11a].

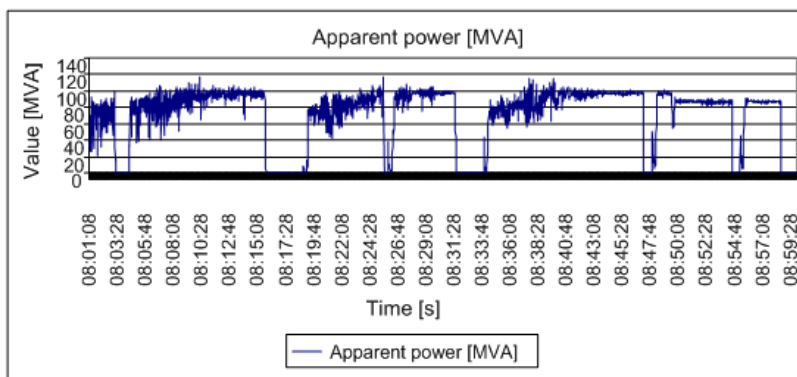


Figura 3.2.1.24 Variația puterii aparente totale pe durata unei șarje.

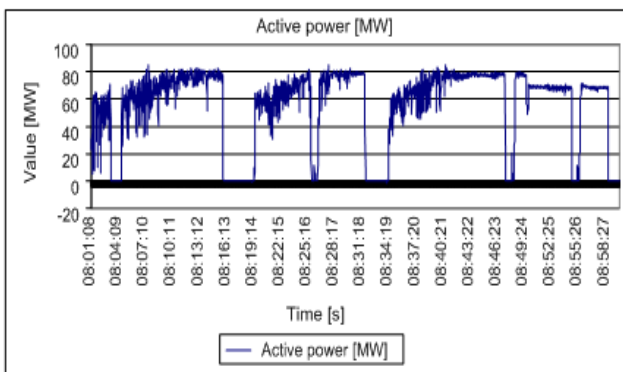


Figura 3.2.1.25 Puterea activă totală pe o șarjă.

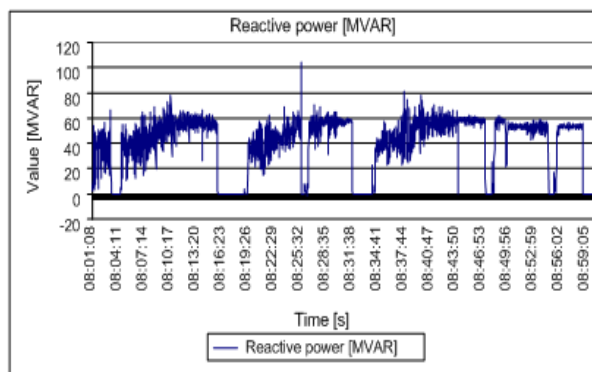


Figura 3.2.1.26 Puterea reactivă totală pe o șarjă.

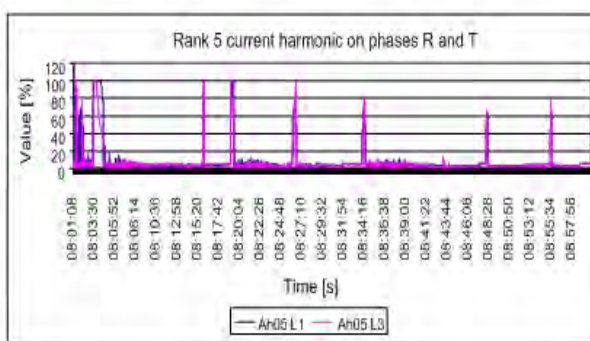
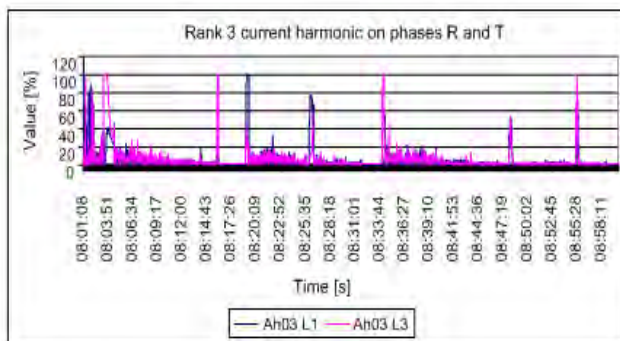


Figura 3.2.1.27 Variația ponderii armonicilor de rang 3 și 5 din curentul pe fazele R și T pe o șarjă.

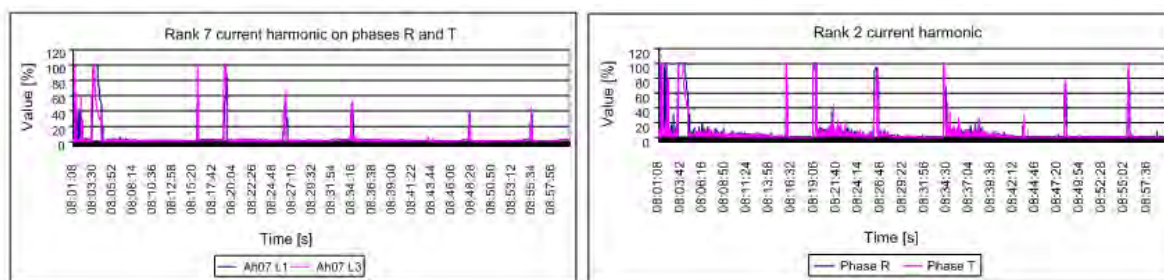


Figura 3.2.1.28 Variația ponderii armonicelor de rang 7 și 2 din curentul pe fazele R și T pe o șarjă.

Se observă salturile mari ale puterii aparente la începutul șarjei și în perioadele când se alimentează cuptorul cu fier vechi. Variațiile se reduc spre finalul șarjei când arcul funcționează stabil. Salturile armonicelor de curent de rang 3 ajung în anumite momente ale șarjei la valoarea fundamentalei. La începutul topirii sunt cele mai mari (valoarea medie fiind de 10% din fundamentală) reducându-se spre final. Armonica de curent de rang 5 atinge și ea valoarea fundamentalei, dar valoarea medie a acesteia este mai mică decât cea de rang 3 pe toată durata șarjei. Se observă valorile mari ale armonicelor pare de ordinul 2. Aceste valori se datorează faptului că transformatorul cuptorului lucrează în anumite momente la puterea aparentă nominală și miezul ajunge la saturație, introducând astfel în rețea armonici pare.

Deoarece regimul de funcționare mai dificil este topirea propriu-zisă, modelul propus pentru cuptor și toți indicatorii de referință vor fi pentru acest regim. Analiza urmărește următoarele obiective: creșterea factorului de putere la valori peste 94%, reducerea efectului de flicker, creșterea puterii active cu 10%, reducerea consumului de electrozi și creșterea stabilității arcului electric. Datele măsurate sunt sintetizate în tabelul 3.2.1.4, în paralel cu cele obținute prin modelare [Dea 09a], [Dea 10a].

Tabelul 3.2.1.4 Comparație între rezultatele din măsurători experimentale și modelare

Mărime	Unități	Măsurat	Modelare	Diferență %
Putere activă Primar	MW	61.83	62.59	1.22
Putere reactivă Primar	MVAR	48.74	49.05	0.63
Putere aparentă Primar	MVA	78.11	78.96	1.08
Curent Secundar	kA	60.65	60.65	0.00
Tensiune Primar	KV	30.42	30.36	-0.19
Factor putere Primar	%	76.23	76.33	0.13

În tabelul 3.2.1.5 sunt prezentați principalii indicatori ai procesului de topire.

Tabelul 3.2.1.5 principalii indicatori ai procesului de topire

Indicator	Unități	Valori
Impedanța Reactorului Serie	Ω	0.00
Treaptă Transformator CEA	V	750
Treaptă Transformator CEA	Position	15
Coborâre Treaptă Trafo CEA	Position	9
Curent Secundar	kA	60.6
Putere activă	MW	62.5
Putere reactivă	MVAR	49
Putere aparentă	MVA	79
Curent Primar	A	1510
Factor putere Primar	%	76.4
Factor putere Primar punct racordare	%	71.3
Compensator 94% PF, 30 KV	MVAR	26.5
Compensator 100% PF, 30 KV	MVAR	49.2
Lungime Arc	mm / kA	4.25
Tensiunea de restabilire a arcului	V	285
Conținutul de armonice în secundar	%	18.9
Influența Flicker-ului	%	2.35
Electrode Consumption	(a)	1061

În continuare sunt prezentate rezultatele simulărilor obținute la compensarea activă cu ajutorul SVC [Dea 10a]. În figurile 3.2.1.29 și 3.2.1.30 este prezentat consumul de putere reactivă atunci când ambele cuptoare funcționează, iar în circuit avem și reactanța de sarcină în serie. Figurile 3.2.1.31, 3.2.1.32 și 3.2.1.33 prezintă factorul de putere în primarul transformatorului, la punctul de conectare a barelor de medie tensiune în stația electrică, și cel instantaneu din punctul de măsură. Influența SVC este prezentată în figura 3.2.1.34, compensarea cu elemente passive și SVC în figura 3.2.1.35 și fără SVC în figura 3.2.1.36. Efectul compensării asupra flicker-ului este prezentat în figura 3.2.1.37.

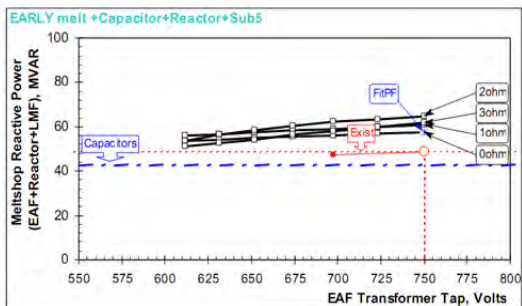


Figura 3.2.1.29 Energia reactivă cu cuptorul LF.

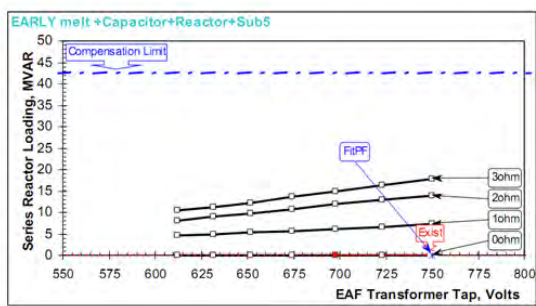


Figura 3.2.1.30 Energia reactivă cu reactor înseriat.

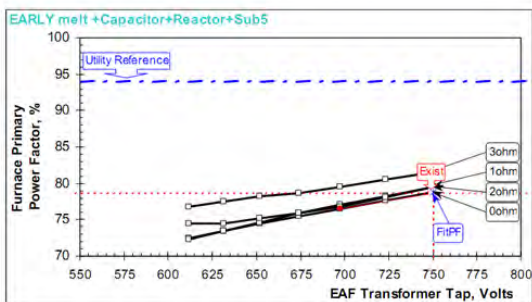


Figura 3.2.1.31 Factorul de putere în primarul trafo.

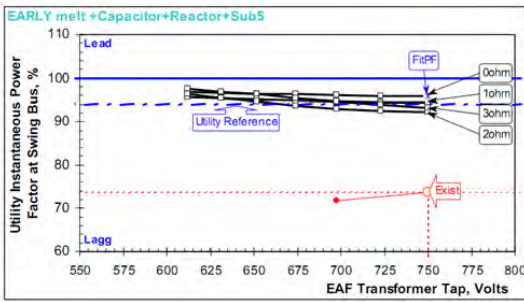


Figura 3.2.1.32 Factorul de putere la medie tensiune.

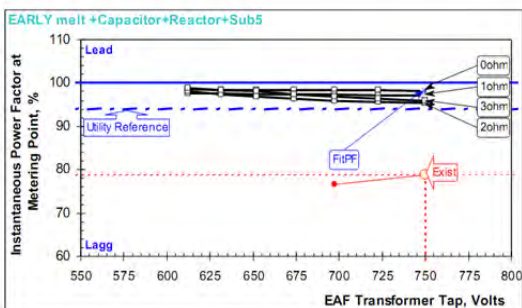


Figura 3.2.1.33 Factorul de putere instantaneu.

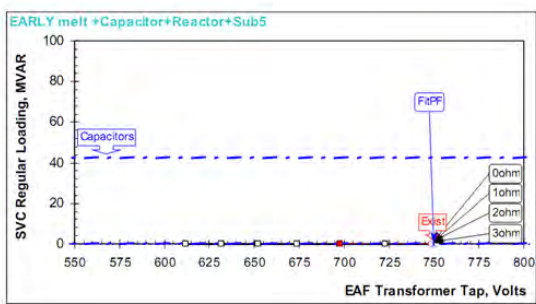


Figura 3.2.1.34 Compensare totală cu SVC.

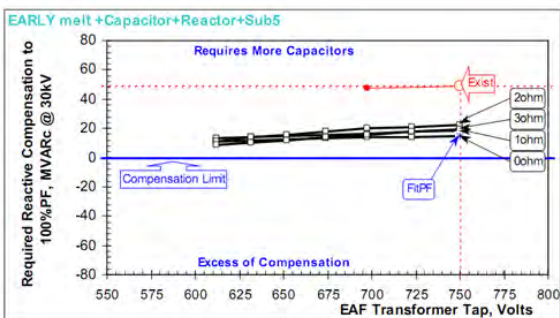


Figura 3.2.1.35 Supracompensare.

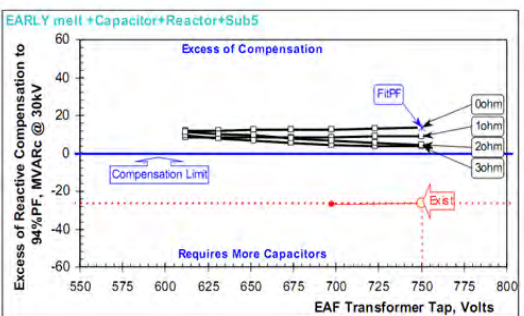


Figura 3.2.1.36 Subcompensare.

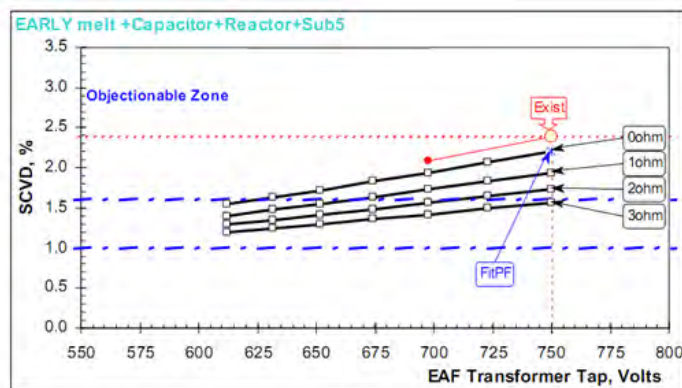


Figure 3.2.1.37 Efectul compensării asupra flicker-ului.

În tabelul 3.2.1.6 se face o analiză comparativă a efectului asupra compensării a celor trei soluții propuse [Dea 10a].

Tabelul 3.2.1.6 Analiză comparativă a celor trei soluții propuse.

Concept	Existing		Capacitance and Reactor		SVC with limited flicker		SVC with Fit Flicker	
	Min	Max	Min	Max	Min	Max	Min	Max
SVC, MVAR	-	-	-	-	65	-	95	110
Step Down Transformer, KV	238.7	238.7	247.2	-	247.2	-	247.2	247.2
EAF transformer tap	15	15	15	-	15	-	15	15
EAF transformer voltage, V	750	750	750	-	750	-	750	750
Primary current, A	1554	1554	1552	-	1552	-	1552	1552
Secondary current, kA	61.8	61.8	61.8	-	61.8	-	61.8	61.8
Real power, MW	67.9	67.9	68.3	-	70.7	-	66.4	71.2
Change of real power	-	-	0,62%	-	4.1%	-	-1.9%	5.4%
Arc length index, mm/kA	4.2	4.2	1.1%	-	4.9%	-	-1.9%	6.9%
Harmonic content	2.3	2.3	0%	-	0%	-	0%	0%
Electrode usage MW, kA	0.43	0.43	2.9%	-	20%	-	-3.8%	65%

Chiar alegând un SVC cu puterea reactivă mai mare de 65-75 MVAR acesta nu va îmbunătăți condițiile de furnizare a puterii active suplimentare pentru CEA. Dacă investiția în realizarea unui SVC se consideră necesară, pentru a avea un beneficiu maxim asupra funcționării cuptorului, se recomandă creșterea tensiunii secundare a transformatorului de alimentare a cuptorului și folosirea unei bobine (reactor) în primarul acestuia. În cazul utilizării unui SVC, este important să se utilizeze un regulator de tensiune ca o buclă externă, în plus față de bucla internă mai rapidă de control a flickerului. Aceste studii au constituit baza pentru scoaterea la licitație a sistemului de compensare a energiei reactive și a armonicelor superioare la oțelăria electrică de la Arcelor Mittal Hunedoara. Lucrarea a fost finalizată în anul 2018 și se află în prezent în funcțiune (figurile 3.2.1.38 și 3.2.1.39). Puterea reactivă totală este de 85 MVAR împărțită în trei trepte.

Cuptoarele electrice cu arc se situează printre principalele instalații de producere a oțelului. Completa automatizare a funcționării permite obținerea unei productivități și calități ridicate cu consum minim de energie. În plus, se menține în limitele impuse de standarde poluarea aerului, apei și solului printr-o monitorizare adecvată și un sistem de comandă în timp real. Utilizarea compensării energiei reactive, filtrarea armonicelor și echilibrarea în timp real a sarcinii determină creșterea factorului de putere la valori mai mari decât valoarea neutrală (0.92), reducerea poluării cu armonici a rețelei, reducerea efectului deformant asupra rețelei și a efectului de flicker. Un alt avantaj al sistemelor automate implementate este posibilitatea realizării unei conduceri optime a procesului cu obținerea puterii active maxime în arcul electric în toate fazele de topire.



Figura 3.2.1.38 SVC-ul de la Arcelor Mittal Hunedoara (sistemul de bare și bobinele comandate de tiristoare).



Figura 3.2.1.39 SVC-ul de la Arcelor Mittal Hunedoara (bateriile de condensatoare și rezistențele de descărcare). Fotografii publicate cu acordul SC Hidromatic SRL Timișoara.

3.2.2. Studiul compensării energiei reactive în stația electrică SLH de medie tensiune (6 KV) care alimentează laminorul și secția de turnare continuă a Arcelor Mittal Hunedoara

Investigațiile experimentale și soluția propusă au fost făcute împreună cu S.C. BeeSpeed Automatizări SRL Timișoara.

Investigații experimentale în stația electrică SLH de medie tensiune (6 KV)

Schema de forță monofilară a alimentării cu energie electrică a stației electrice SLH în care se dorește introducerea sistemului de compensare este prezentată în figura 3.2.2.1, iar consumul de energie reactivă și costurile aferente pentru aceasta pe durata unui an, fără sistem de compensare în tabelul 3.2.2.1 [Dea 14a].

Tabelul 3.2.2.1
Consumul de energie reactivă și costul acesteia înainte de modernizare

An/lună	Energie activă [KWh]	Energie reactivă inductivă [KVARh]	Factor de putere inductiv $\cos\phi$	Energie reactivă inductivă pentru compensare [KVARh]	Costul energiei reactive [euro]
2012/08	1.788.048	1.574.938	0,750	813.233	9.736
2012/09	2.225.684	1.906.547	0,759	958.410	11.512
2012/10	2.595.346	2.220.863	0,760	1.115.251	13.215
2012/11	3.058.872	2.508.460	0,773	1.205.386	14.367
2012/12	2.506.062	2.092.940	0,768	1.025.362	12.397
2013/01	2.973.002	2.381.127	0,781	1.114.633	14.577
2013/02	2.526.010	2.060.531	0,775	984.455	12.866
2013/03	1.786.039	1.525.789	0,760	764.940	9.967
2013/04	1.862.545	1.795.681	0,720	1.002.240	13.104
2013/05	2.520.635	2.500.846	0,710	1.427.060	18.880
2013/06	2.134.287	1.456.464	0,827	541.775	6.962
2013/07	2.067.413	2.143.809	0,694	1.263.090	16.163
2013/08	1.665.739	1.735.366	0,692	1.025.762	13.112
Total					166.858

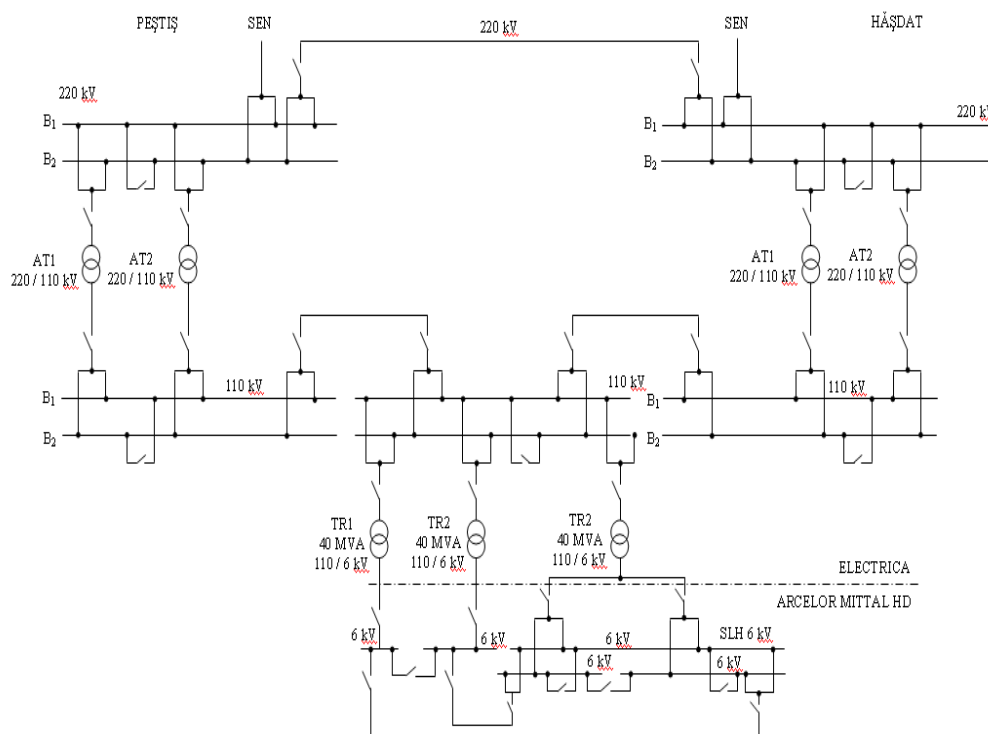


Figura 3.2.2.1 Schema monofilară de alimentare a stației electrice SLH de medie tensiune (6 KV).

Pentru determinarea soluției optime s-au făcut măsurători experimentale. Înregistrările efectuate au fost realizate cu un analizor de rețea tip Chauvin-Arnoux CA8334, după cum urmează:

A. achiziție mărimi electrice relevante (S, P, Q, U, I, cos ϕ , THD $_u$, THD $_i$, etc.) în valoare efectivă, pe durata unei săptămâni de lucru reprezentative, cu eșantionare la fiecare 2 minute; o parte a rezultatelor obținute sunt prezentate în figurile 3.2.2.2, 3.2.2.3, 3.2.2.4 și 3.2.2.5; relevante pentru chestiunea studiată sunt datele prezentate în figura 3.2.2.4 care prezintă grafic evoluția consumului de energie reactivă pe durata de timp studiată (1 săptămână); pe intervalul studiat s-au obținut următoarele mărimi orare: Q $_{med}$ = 4165 KVArh; Q $_{min}$ = 2155 KVArh; Q $_{max}$ = 6773 KVArh [Dea 14a].

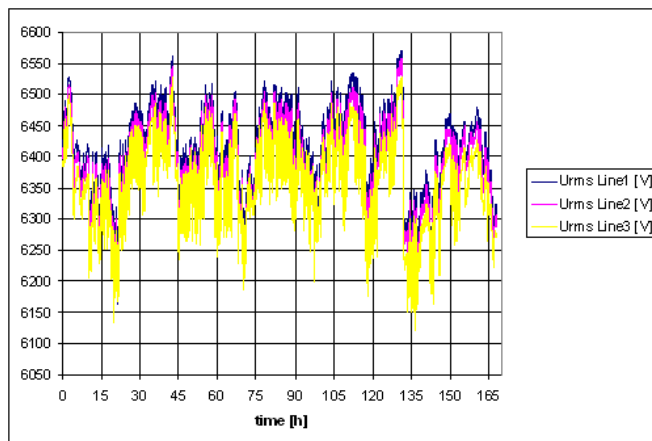


Figura 3.2.2.2 Valorile efective ale tensiunilor de linie pentru șapte zile.

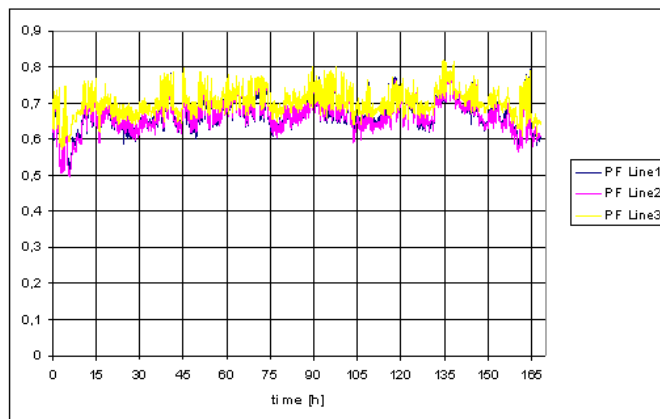


Figura 3.2.2.3 Valorile medii pe fază ale factorului de putere pentru șapte zile.

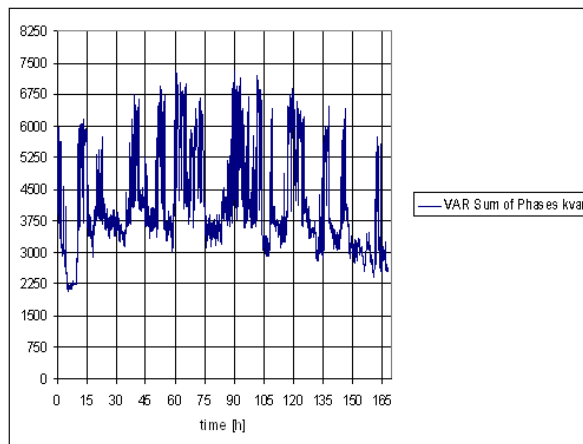


Figura 3.2.2.4 Suma energiei reactive de pe cele trei faze pentru șapte zile.

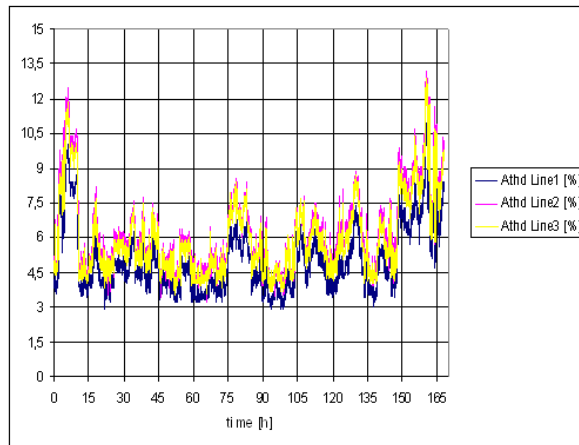


Figura 3.2.2.5 Factorul de distorsiune armonică a curentului pe fază pentru șapte zile.

Interpretarea graficului consumului de energie reactivă pe săptămâna studiată este corect d.p.d.v. statistic, cu considerarea perioadei de eșantionare (medie la 2 minute). Se observă un consum de energie reactivă compus dintr-o pătură de bază relativ stabilă (aprox. 2.75-3 MVarh), peste care se suprapune o componentă variabilă (0-3 MVarh) [Dea 14a].

B. achiziție mărimi electrice relevante (S, P, Q, U, I, cos ϕ , THD $_u$, THD $_i$, etc.) în valoare efectivă, pe durata a 20 de minute, cu eșantionare la fiecare 1 secunda; rezultatele sunt prezentate în figurile 3.2.2.6, 3.2.2.7, 3.2.2.8 și 3.2.2.9 [Dea 14a]; asupra acestor măsurători s-a efectuat o simulare a efectului introducerii unei puteri reactive capacitive locale, și s-a calculat efectul acesteia asupra factorului de putere mediu [Dea 14a]; valoarea dorită pentru puterea reactivă capacitivă se calculează.

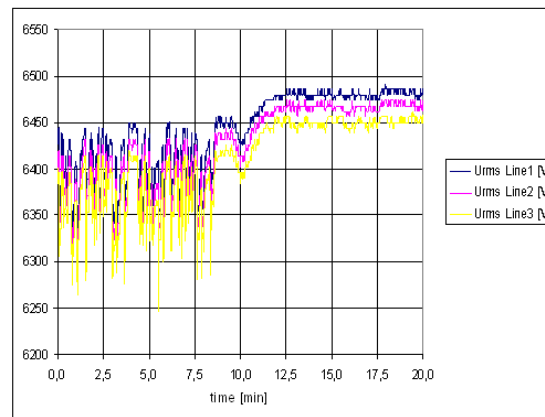


Figura 3.2.2.6 Valorile efective ale tensiunilor de linie pentru douăzeci de minute.

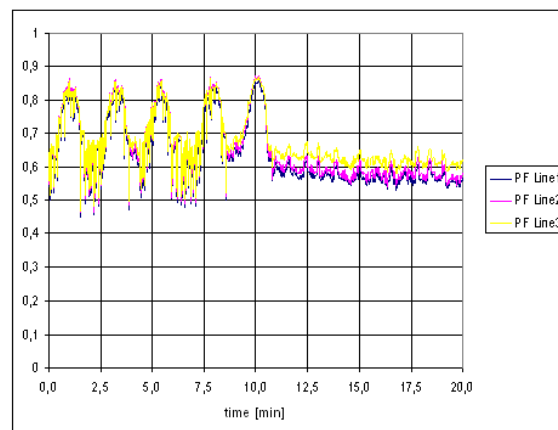


Figura 3.2.2.7 Valorile medii pe fază ale factorului de putere pentru douăzeci de minute.

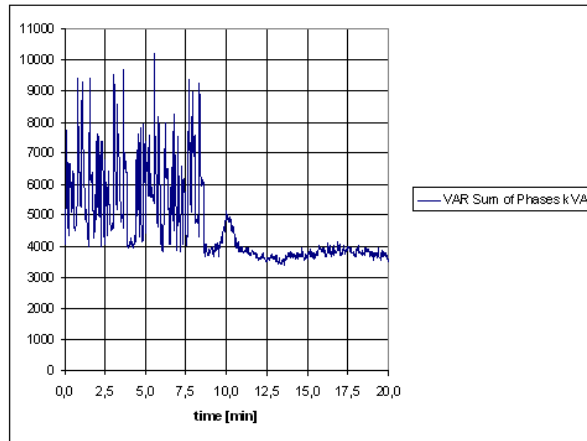


Figura 3.2.2.8 Suma energiei reactive de pe cele trei faze pentru douăzeci de minute.

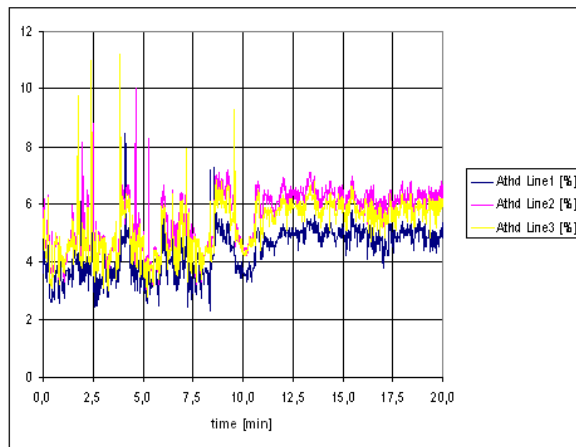


Figura 3.2.2.9 Factorul de distorsiune armonică a curentului pe fază pentru douăzeci de minute.

Proiectarea sistemului pentru controlul factorului de putere

Schema de compensare automată a consumului de energie reactivă este prezentată în figura 3.2.2.10, unde avem treptele bateriilor de condensatoare de medie tensiune (MVECB), cu rezistoarele de sarcină și bobinele de limitare a curentului, întrerupătoarele de medie tensiune (I), protecțiile fuzibile de medie tensiune (F) și controlerul factorului de putere (PFC) [Dea 14a].

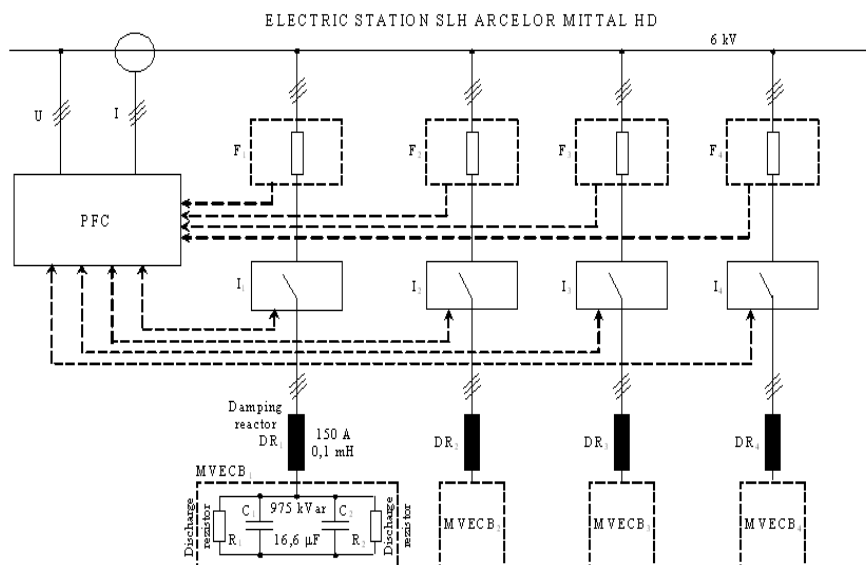


Figura 3.2.2.10 Schema de compensare automată a consumului de energie reactivă în stația electrică SLH de 6KV.

Se propune introducerea de baterii de condensatoare de medie tensiune (6 KV) pentru puterea maximă compensată de 3000 KVar, compuse din 4 trepte egale de 750 KVar (figura 3.2.2.10), luând în considerare datele măsurate disponibile [Dea 14a]. Deoarece consumul variază sezonier în funcție de regimul de lucru (există zile sau chiar săptămâni în care laminorul sau turnarea continuă nu funcționează), treptele de condensatoare trebuie să fie conectate/deconectate de un regulator de factor de putere discret, având funcții specifice în ceea ce privește automatizarea bateriilor care trebuie să compenseze factorul de putere. Acesta va lua informația referitoare la factorul de putere total în aceleași puncte de măsură (prin intermediul transformatoarelor de tensiune și curent existente) în care au fost efectuate măsurătorile anterioare, prin conectarea/deconectarea numărului necesar de trepte capacitive (750 KVar fiecare) în conformitate cu regulile (cuplarea treptei numai după descărcarea condensatorului, de exemplu la 10 minute de la ultima deconectare, decizia de conectare este o funcție a valorii factorului de putere în ultimele 5-10-15-30-60 de minute etc.). Echipamentul necesar compensării, având caracteristicile prezentate în tabelul 3.2.2.2, va fi format din: patru baterii pentru compensarea factorului de putere, 6 KV, 750 KVar, sub forma unei cutii metalice complet echipată (MVECB), care are cele două baterii capacitive (figura 3.2.2.13), cu puterea reactivă de 375 KVar, la 6 KV, cu siguranțe individuale interne (figura 3.2.2.11) pentru fiecare și cu rezistențe de sarcină în interior, de asemenea, trei bobine de limitare pentru curentul de încărcare (figura 3.2.2.12) în timpul cuplării bateriilor la rețea, trei seturi de port siguranțe la 6 KV, inclusiv micro-întrerupătoare de semnalizare; regulator de factor de putere, sub forma unei cutii metalice complet echipate (figura 3.2.2.14) care are: regulator digital de factor de putere cu parametrii de afișare setabili, seturi de elemente auxiliare (relee de multiplicare, temporizări, etc) [Dea 14a].

Tabelul 3.2.2.2 Caracteristici echipament

Caracteristici tehnice	Valoarea
Puterea nominală a bateriilor de condensatoare [KVar]	2×375
Tensiunea nominală a bateriilor de condensatoare [KV]	6
Curentul nominal al bateriilor de condensatoare [A]	2×36,1
Capacitatea nominală a condensatoarelor [μ F]	2×16,6 – -5% / +10%
Rezistența de descărcare [$k\Omega$]	3000
Timpul de descărcare până la 75 V	490 s
Pierderile medii [W/KVar]	0,15
Curentul prin siguranță [A]	125
Bobina de limitare a curentului la conectare [A]	150
Inductanța bobinei de limitare [mH]	0,1
Timpul de reconectare [s]	270



Figura 3.2.2.11 Siguranța de medie tensiune.



Figura 3.2.2.12 Bobina de limitare a curentului.

În baza recomandării producătorilor, a fost studiată posibilitatea unui fenomen de rezonanță între echipamentul energetic existent și bateriile de condensatoare propuse, dar având în vedere că factorii de distorsiune armonică a curentului/tensiunii nu depășesc în prezent 6% / 2%, și că bobinele de limitare (incluse în schema propusă) sunt considerate a avea un efect de netezire, se consideră că nu este pericol de apariție a rezonanței, nici pe fundamentală nici pe armonicile superioare.



Figura 3.2.2.13 Treaptă de compensare.



Figura 3.2.2.14 Controlerul digital al factorului de putere.

Efectul introducerii compensării asupra factorului de putere este prezentat în figura 15, unde se observă că factorul de putere mediu inductiv va crește de la valoarea 0.692 fără compensare până la 0.937. Această valoare certifică corectitudinea alegerii făcute și elimină total costul energiei reactive în această stație electrică. Costul total al echipamentului este de 125.000 de euro, inclusiv taxele, suma care este acoperită integral în 10 luni de funcționare prin anularea costurilor cu energia reactivă [Dea 14a].

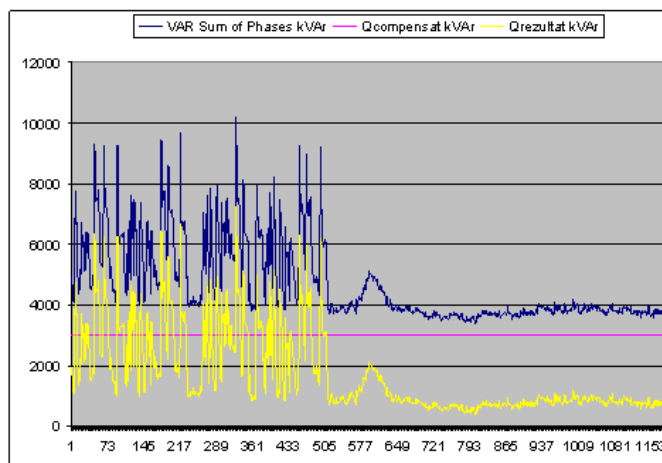


Figura 3.2.2.15 Efectul de compensare totală a energiei reactive.

Creșterea factorului de putere în rețelele electrice de distribuție industriale se face cu eforturi financiare însemnate, dar cu cât factorul de putere mediu are o valoare mai scăzută cu atât durata de recuperare a investiției este mică. Există și alte avantaje: posibilitate de conectare suplimentară de sarcină la rețea (componentele sistemului pot fi utilizate mai aproape de potențialul lor maxim), reducerea pierderilor și îmbunătățirea valorii tensiunii în sistem. Condensatoarele sunt relativ ieftine iar modalitățile de conectare multiple putând satisface orice cerință de energie

reactivă a majorității rețelelor de distribuție. Datorită simplității și utilizării lor pe scară largă, printr-un control adecvat se pot introduce și scoate trepte de capacitate din circuit pentru a urmări variațiile mai lente ale factorului de putere.

3.3. Sisteme de acționare electrică performante cu dimensiuni și greutate reduse pentru vehicule electrice și hibride

Activitatea de cercetare pe această temă s-a desfășurat începând cu anul 2010 în cadrul unui colectiv coordonat de academicianul Ion Boldea și din care au mai făcut parte prof.dr.ing. Tutelea Lucian și ș.l.dr.ing. Topor Marcel. Pe această temă am publicat 16 lucrări științifice, un brevet de invenție internațional, o carte și am câștigat un grant de colaborare România-Moldova.

3.3.1. Introducere

Poluarea datorată motoarelor cu ardere internă dar și epuizarea rezervelor de petrol au determinat intensificarea cercetărilor în domeniul vehiculelor electrice. Deoarece trecerea de la vehiculele clasice la vehiculele electrice nu se poate face brusc, datorită lipsei infrastructurii pentru reîncărcarea bateriilor de acumulatori și datorită autonomiei scăzute a acestora s-a optat pentru o soluție de tranziție: vehiculul hibrid. Acesta este dotat cu un motor termic care este utilizat în așa fel încât randamentul lui să fie maxim, acționarea roților putându-se face electric sau mixt (electric și de la motorul termic). Există numeroase variante constructive, cele mai întâlnite fiind cele serie și cele paralel.

În prezent, mașinile cu magneți permanenți cu flux axial (AFPM), care au o densitate mare de cuplu, un randament excelent și o fiabilitate bună, sunt folosite pentru diverse aplicații, cum ar fi la nave de agrement sau de tonaj redus, la vehicule hibride și electrice și la propulsia avioanelor ușoare, datorită construcției compacte și a densității ridicate de putere. Înfășurările concentrate fracționare utilizate au capetele de bobină mai scurte în comparație cu cele ale unei înfășurări distribuite în creștături ceea ce conduce la reducerea pierderilor în mașină și dimensiuni axiale reduse, dar unda solenăției conține un număr mare de armonici superioare. În literatură se prezintă numeroase soluții constructive pentru acest tip de mașină [Dor 12], [Ho 11], [Ehs 97], [Wan 11], [Li 11].

În mod normal un sistem de propulsie hibridă este compus din două mașini electrice, una cuplată cu roțile motoare care funcționează ca motor sau ca frână și una cuplată cu motorul termic care funcționează ca generator sau ca starter. Mai mult decât atât, dimensiunile lor în trenul de rulare reprezintă un dezavantaj din punctul de vedere al reducerii volumului acestuia. Astfel integrarea celor două mașini într-un singur ansamblu electromecanic care include și transmisia mecanică pentru reducerea dimensiunilor și a greutății, este o temă de cercetare abordată de mulți cercetători [Bol 10b]. O mașină cu două rotoare și stator radial având un bobinaj toroidal a fost publicată în [Yeh 12]. Motorul are două rotoare (unul interior și unul exterior) între care se găsește statorul care are un bobinaj toroidal sau axial plasat în creștăturile interioare și exterioare pe periferia statorului. Analiza cu elemente finite (FEA) este utilizată pentru verificarea proiectării preliminare, iar algoritmul Hooke Jeeves este folosit la optimizarea proiectării mașinii sincrone cu magneți permanenți (PMSM) pentru aplicații în domeniul auto [Par 05], [Wen 06], [Wan 09], [Tut 07], [Hoo 61]. Se prezintă în continuare pe scurt proiectarea preliminară cu Matlab, proiectarea optimă, rezultatele analizei cu elemente finite quasi-3D și strategia de control vectorial a mașinii sincrone cu întrefier axial, având un stator două rotoare cu magneți permanenți pe suprafață și un număr diferit de perechi de poli, destinată pentru aplicații în domeniul vehiculelor electrice hibride (HEV) sau pentru vehicule pur electrice (EV).

3.3.2. Elemente constructive ale mașinii

Într-un efort de simplificare constructivă a celor două configurații (serie și paralel) se propune o soluție în care cele două mașini electrice (generatorul și motorul) și convertoarele statice aferente se înlocuiesc cu o mașină sincronă având întrefier axial, un stator central cu creștături pe ambele părți și două înfășurări diferite alimentate de la un singur invertor PWM având două frecvențe de ieșire și două rotoare independente cu magneți permanenți cu număr de poli diferiți

$2p_1$ și $2p_2$, plasate pe cele două părți ale statorului central prevăzut cu N_{st} creștături și înfășurări plasate în jurul dinților (figura 3.3.1.), una plasată pe o parte și alta pe cealaltă parte a miezului magnetic prevăzut cu creștături; cele două înfășurări trifazate distincte pot fi conectate în paralel sau în serie.

Pentru miezul magnetic statoric se poate folosi o structură obținută prin bobinarea tolei până la diametrul dorit al mașinii urmată de realizarea creștăturilor, de o parte și de alta a rolei formate, printr-un procedeu neconvențional (de exemplu tăiere cu jet de apă sub presiune). De asemenea poate fi luată în considerare soluția cu materiale compozite ușoare unde miezul este obținut prin turnare directă cu forma și dimensiunile dorite, care are o masă redusă și poate funcționa cu pierderi mici la frecvențe înalte. Rotoarele au formă de disc având magneții permanenți montați pe suprafața acestora (figura 3.3.2). Cele două rotoare au număr diferit de perechi de poli ($p_1 = 7$, $p_2 = 5$) iar arborii de susținere a discurilor sunt independenți, astfel încât cele două mașini electrice pot funcționa în regim de motor, generator sau frână, cu viteze diferite, în același sens sau în sensuri contrare. Statorul este plasat între cele două rotoare fiind prevăzut cu câte 12 creștături de o parte și de cealaltă în care este introdusă înfășurarea concentrată fracționară având un factor de bobinaj mai mare de 0.945. Un avantaj important al utilizării mașinii sincrone cu întrefier axial având un singur stator și două rotoare cu magneți permanenți este reprezentat de lungimea redusă care permite introducerea ei în locul ambreiajului între motorul termic și transmisia mecanică. Două reprezentări 3D pentru mașină sunt date în figura 3.3.3 [Bol 10a], [Tut 11a], [Bol 11], [Tut 11b], [Tut 12c].

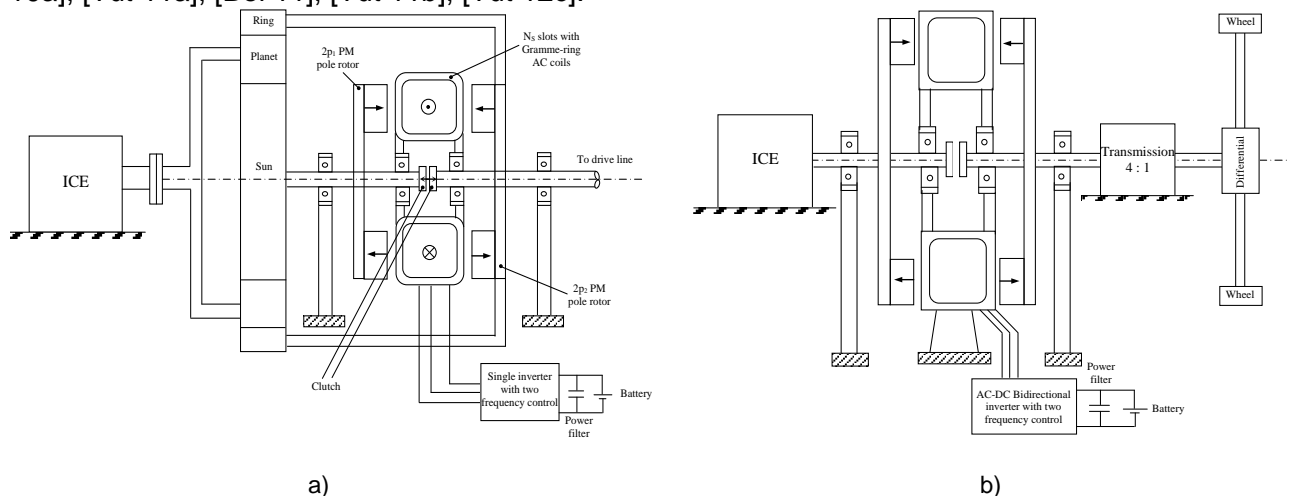


Fig. 3.3.1. Sistemul propus de mașină axială cu un stator, două rotoare și un singur invertor
a) pentru HEV de tip paralel și cutie de transmisie de tip planetar; b) pentru HEV de tip serie.

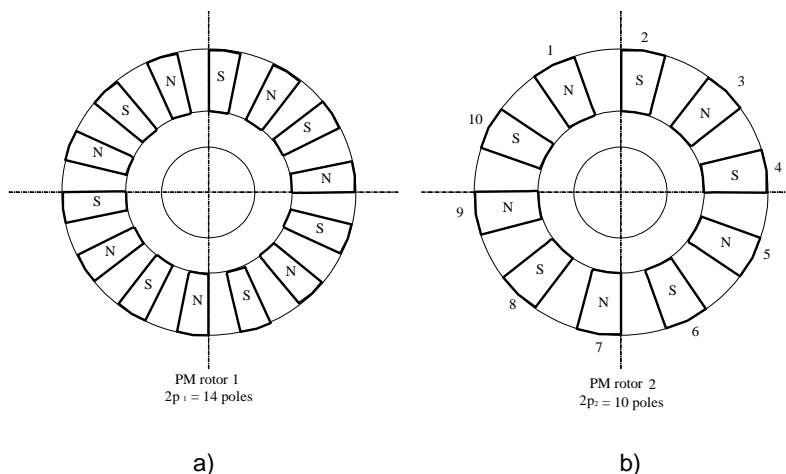
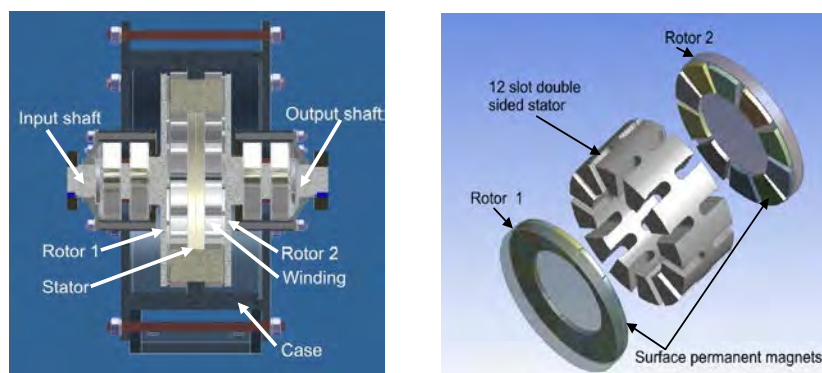


Fig. 3.3.2. Rotorul 1 cu 14 poli (a) și rotorul 2 cu 10 poli (b).



a) secțiune longitudinală b) vedere explodată
Fig. 3.3. Configurația propusă în două reprezentări 3D.

3.3.3 Proiectarea analitică și optimală

Proiectarea analitică și optimală a modelului quasi 3D al mașinii este pe larg descrisă în [Tut 07], [Hoo 61], [Bol 10a], [Tut 11a], [Bol 11], [Tut 11b], [Tut 12c], și nu va fi prezentată aici. Criteriile multi-obiectiv trebuie să fie agregate într-o singură funcție obiectiv dacă scopul proiectării este obținerea unei soluții unice. Aceasta ar putea fi o funcție de cost total care include câte o penalizare pentru fiecare constrângere nesatisfăcută. Funcția obiectiv C_t are expresia [Tut 07]:

$$C_t = C_i + C_E + C_a + C_p, \quad (3.3.1)$$

unde C_i este costul inițial, C_E este costul pierderilor în mașină, C_a un cost adițional care ține cont de gabaritul mașinii și în final C_p este costul de penalizare. Costul de penalizare în acest caz este:

$$C_p = C_{Temp} + C_{demag} + C_T + C_{In}, \quad (3.3.2)$$

unde C_{Temp} este costul suplimentar datorat supra-temperaturii obținute în mașină; C_{demag} este costul suplimentar datorat demagnetizării magneților permanenți din cauza câmpului magnetic de reacție a indusului; C_T este costul suplimentar aplicat pentru obținerea unui cuplu mai mic decât cel necesar la viteza maximă n_{max} ; C_{In} este costul suplimentar necesar din cauza supracurentului din înfășurări la viteza maximă n_{max} .

Termenul C_{Temp} este calculat considerând că a fost depășită temperatura maximă admisibilă pentru înfășurare (sau miez sau magneții permanenți), ceea ce conduce la îmbătrânirea prematură a izolației mașinii. Pentru a evita acest lucru, în cadrul algoritmului de optimizare introducem un cost de penalizare pentru supra-temperatură C_{temp} în funcția obiectiv. Costul suplimentar C_{Temp} poate varia fie liniar, fie neliniar dar monoton cu supra-temperatura. În acest caz el se calculează cu relația (3.3.3) [Tut 07]:

$$C_{Temp} = \begin{cases} k_T (T - T_{max}) C_i & \text{if } T > T_{max} \\ 0 & \text{if } T \leq T_{max} \end{cases}, \quad (3.3.3)$$

unde T este temperatura înfășurării; T_{max} este supratemperatura admisibilă în înfășurări; k_T este o constantă de proporționalitate pentru supra-temperatură.

Solenajia de reacție statorică poate demagnetiza magneții permanenți și atunci costul de penalizare datorat acestui fenomen a fost introdus pentru a menține magneții permanenți în afara zonei cu pericol de demagnetizare:

$$C_{demag_{1,2}} = \begin{cases} \left(\frac{I_{1,2} \cdot k_{sdemag}}{h_{PM_{1,2}} \cdot H_C} - 0.9 \right) \cdot h_{cdemag} \cdot C_i, & \text{if } \frac{I_{1,2} \cdot k_{sdemag}}{h_{PM_{1,2}} \cdot H_C} > 0.9, \\ 0 & \text{if } \frac{I_{1,2} \cdot k_{sdemag}}{h_{PM_{1,2}} \cdot H_C} < 0.9 \end{cases}, \quad (3.3.4)$$

unde $I_{t1,2}$ – sunt valorile de vârf ale solenației statorice de reacție la sarcina maximă pentru mașinile 1 și 2; $h_{PM1,2}$ – sunt înălțimile magneților permanenți pentru mașinile 1 și 2; H_C – este câmpul magnetic coercitiv al magneților permanenți; K_{sdemag} – este un factor de siguranță; K_{cdemag} – o constantă de proporționalitate.

Costul suplimentar aplicat pentru obținerea unui cuplu mai mic decât cel necesar la viteza maximă, C_T , este direct proporțional cu lipsa cuplului și cu costul inițial C_i (3.3.5), (3.3.6) al mașinii:

$$C_T = C_{T1} + C_{T2} \quad (3.3.5)$$

$$C_{T1,2} = \begin{cases} \frac{T_{\max req1,2} - T_{\max1,2}}{T_{\max req1,2}} \cdot C_i, & \text{if } T_{\max req1,2} > T_{\max1,2} \\ 0 & \text{if } T_{\max req1,2} \leq T_{\max1,2} \end{cases} \quad (3.3.6)$$

unde $T_{\max req1,2}$ este cuplul necesar la puterea nominală constantă și viteza maximă pentru mașinile 1, 2; $T_{\max1,2}$ este cuplul maxim obținut la viteza maximă n_{\max} .

Pentru a produce cuplul necesar, curentul ar trebui să fie mai mic decât 110% din valoarea lui nominală. Costul suplimentar aplicat datorită supracurentului (3.3.7), (3.3.8), C_{In} , a fost introdus pentru a asigura această cerință:

$$C_{In} = C_{In1} + C_{In2} \quad (3.3.7)$$

$$C_{In1,2} = \begin{cases} \frac{I_{s\max1,2}^2 - (k_i \cdot I_s)_{1,2}^2}{I_s^2} \cdot C_i, & \text{if } I_{s\max1,2} > k_i \cdot I_{s1,2} \\ 0 & \text{, if } I_{s\max1,2} \leq k_i \cdot I_{s1,2} \end{cases} \quad (3.3.8)$$

unde $I_{s\max1,2}$ este curentul statoric (valoare efectivă) la cuplul maxim necesar pentru mașinile 1 și 2; $I_{s1,2}$ este curentul nominal pentru mașinile 1 și 2; K_i este factorul de supraîncărcare al curentului la n_{\max} .

Performanțele mașinilor sunt calculate considerând circuitul magnetic nelinier datorită saturației miezului magnetic. Algoritmii au fost implementați în cod scris în MATLAB utilizând interfața grafică utilizator și fișierul de intrare și ieșire. Datele și rezultatele obținute de la proiectarea preliminară, utilizate în proiectarea optimă a mașinii sincrone axiale cu două rotoare cu magneți permanenți și un singur stator, și rezultatele proiectării optime sunt date în Tabelul 3.3.1. Câteva rezultate ale evoluției optimizării cu metoda HJ către cea mai bună soluție sunt prezentate în figurile 3.3.4, 3.3.5, și 3.3.6.

Tabelul 3.3.1. Parametrii și dimensiunile mașinilor

Parameters	Mașina M1	Mașina M2
Puterea [kW]	55	110
Viteza de bază [rot/min]	4200	2200
Viteza maximă [rot/min]	5500	12000
Tensiunea de fază, val. efectivă [V]	220	
Numărul perechilor de poli	7	5
Numărul de faze	3	
Diametrul interior [mm]	220	
Diametrul exterior [mm]	394	
Înălțimea magneților permanenți [mm]	3	6.3
Întrefierul [mm]	2	
Înălțimea totală a jugului statoric [mm]	50	
Adâncimea creștăturii [mm]	29.5	65
Lățimea creștăturii [mm]	30.2	32.7
Lungimea axială totală [mm]	188.1	
Masa totală a mașinilor [kg]	133	
Tipul magneților permanenți	Vacodym 677AP $B_r = 1.13T$, $H_C = 860 \frac{kA}{m}$ at $20^\circ C$	

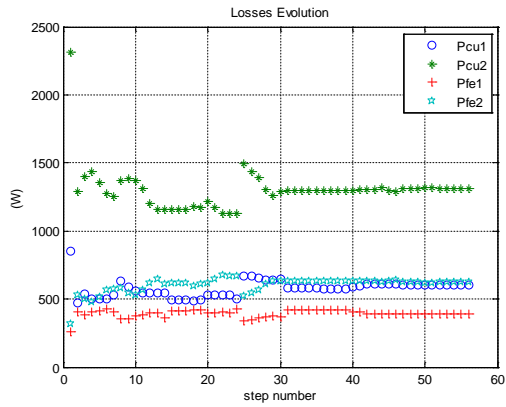


Fig. 3.3.4. Evoluția pierderilor.

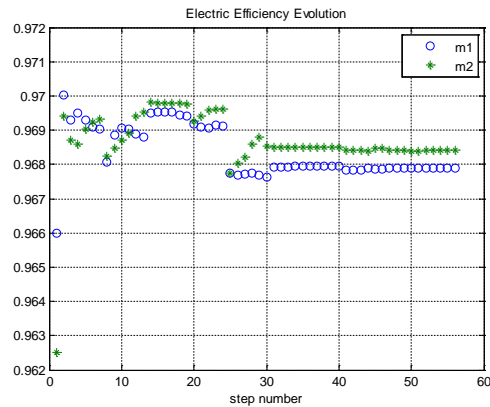


Fig. 3.3.5. Evoluția randamentului m1 – mașina1, m2 – mașina2.

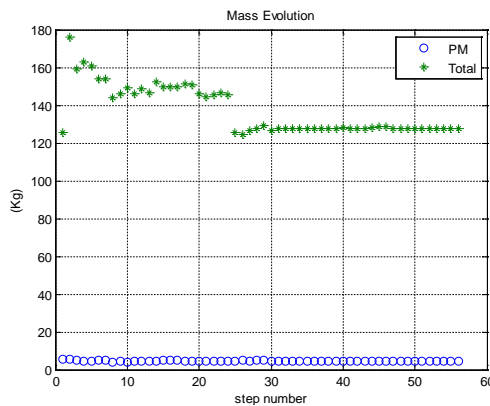


Fig. 3.3.6. Evoluția masei.

Evoluția pierderilor a fost prezentată în figura 3.3.4. Randamentul electric (presupunând neglijabile pierderile mecanice) crește de la valoarea 0.962 respectiv 0.966 la peste 0.968 (figura 3.3.5), iar evoluția masei în procesul de optimizare este prezentată în figura 3.3.6.

3.3.4. Validarea cu element finit Quasi 3D

Rezultatele obținute prin optimizare analitică în Matlab au fost comparate cu rezultatele obținute din analiza cu elemente finite quasi 3D FEM (tabelul 3.3.2). Datorită saturației ridicate în discurile rotorice (jugurile rotorice), și în colțurile dinților statorici, și a ordinului redus al modelului analitic, se poate observa o diferență notabilă, dar acceptabilă din punct de vedere al metodei FEM quasi 3D.

Fluxul de dispersie și cuplul mașinii au fost calculate cu ajutorul formulei lui Simpson, pe baza rezultatelor obținute din calculul cu elemente finite în trei plane distincte (la diametrele interior, mediu și exterior ale mașinii). Fluxul de dispersie al magneților permanenți plasați pe suprafața rotorului este practic sinusoidal (figura 3.3.7) chiar dacă înfășurarea este fracționară de tip concentrat, bobinată pe fiecare dinte. Cea mai importantă armonică superioară este cea de ordinul trei, dar ea reprezintă abia 2.21% din fundamentală pentru M1, respectiv 0.7% din fundamentală pentru M2. Controlul vectorial clasic cu inverter PWM poate fi folosit cu rezultate bune pentru a controla acest tip de mașină.

Cuplurile date de interacțiunea dintre magneții permanenți și reacția de indus statorică T1 și T2 (figura 3.3.8), au fost calculate ca diferența dintre cuplul total și cuplul de interacțiune (cogging torque) din FEM. Cuplul de interacțiune are valori acceptabile pentru sistemele de acționare electrică a vehiculelor: 1.8% pentru mașina (M1) ce funcționează ca generator și 2.9% pentru mașina (M2) ce funcționează ca motor de tracțiune. Cuplul și fluxul magneților permanenți calculate cu metoda elementelor finite FEM (tabelul 3.3.2.) sunt mai mari decât valorile calculate cu ajutorul modelului analitic pentru M1 (aproape 10% pentru cuplu) și sunt mai mici decât valorile din modelul analitic pentru M2 (aproape 8% pentru cuplu).

Tabelul 3.3.2. Comparație între valorile parametrilor (FEM și Matlab)

Parametrii	FEM quasi 3D	MATLAB optimizare
Cuplul mașinii 1 [N·m]	138.8	125
Cuplul mașinii 2 [N·m]	438.1	477.5
Inductanța mașinii 1 [mH]	0.5	0.567
Inductanța mașinii 2 [mH]	0.35	0.398
Fluxul de scăpări al PM pentru mașina 1 [mWb]	73.8	63.7
Fluxul de scăpări al PM pentru mașina 2 [mWb]	191.5	206.4

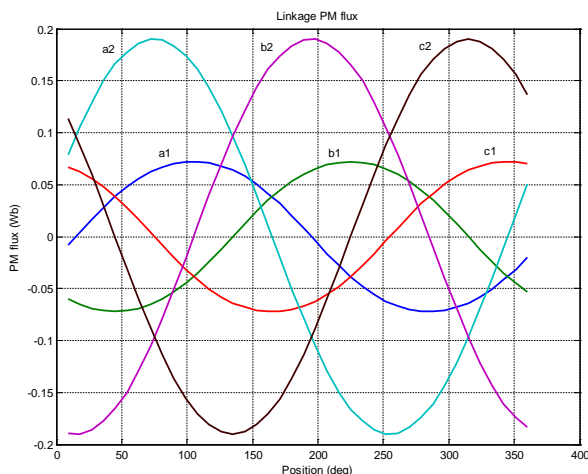


Fig. 3.3.7. Fluxul de scăpări trifazat al magneților permanenți pentru mașinile 1 și 2.

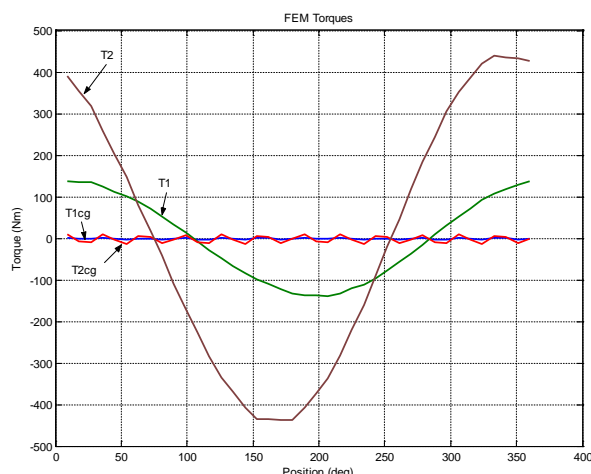


Fig. 3.3.8. Cuplurile electromagnetice (T1, T2) și cuplurile de interacțiune (cogging torques) sunt calculate cu metoda quasi 3D FEM, $I_A=100\%$ (p.u.), $I_B=I_C=-50\%$ (p.u.).

3.3.5. Controlul și simulările dinamice

Presupunem în acest caz că înfășurările statorului (dacă există cel puțin două) sunt conectate în serie și obiectivul simulării dinamice este de a evalua funcționarea în regim dinamic și staționar a algoritmului de control vectorial dual prin modularea a două tensiuni de frecvențe diferite într-o singură undă trimisă către înfășurări. Figura 3.3.9 ilustrează această strategie de control vectorial.

Controlul vectorial clasic cu două frecvențe se face după curenții de câmp și de cuplu i_{d1} , i_{d2} , i_{q1} , i_{q2} corespunzător cu sistemele ce rotesc cu pulsațiile ω_1 și ω_2 . În acest caz, înfășurările statorului sunt în serie și pentru control putem folosi tensiunea V^* . Deoarece nu există posibilitatea

de a controla cele patru componente ale curenților, componentele de cuplu i_{q1} , i_{q2} sunt controlate în buclă, iar componentele i_{d1} , i_{d2} sunt aproape zero (și sunt lăsați să varieze liber, deoarece în aceste cazuri inductanțele longitudinale și transversale sunt egale ($L_d = L_q$) iar componentele i_{d1} și i_{d2} nu au nici o contribuție la producerea cuplului). În figura 3.3.10 sunt prezentate fluxurile produse de magnetii permanenți (ψ_{PM1} și ψ_{PM2}) și tensiunile electromotoare induse (u_{e1} și u_{e2}) în sistemul de coordonate statorice (α , β). Proiecțiile acestor variabile pe cele două axe au expresiile:

$$\psi_{PM1\alpha} = -\psi_{PM1} \times \cos\theta_1, \quad \psi_{PM1\beta} = -\psi_{PM1} \times \sin\theta_1, \quad (3.3.9)$$

$$\psi_{PM2\alpha} = -\psi_{PM2} \times \cos\theta_2, \quad \psi_{PM2\beta} = -\psi_{PM2} \times \sin\theta_2, \quad (3.3.10)$$

$$E_{1\alpha} = -u_{ePM1} \times \sin\theta_1 = -\omega_1 \times \psi_{PM1} \times \sin\theta_1, \quad E_{1\beta} = u_{ePM1} \times \cos\theta_1 = \omega_1 \times \psi_{PM1} \times \cos\theta_1, \quad (3.3.11)$$

$$E_{2\alpha} = -u_{ePM2} \times \sin\theta_2 = -\omega_2 \times \psi_{PM2} \times \sin\theta_2, \quad E_{2\beta} = u_{ePM2} \times \cos\theta_2 = \omega_2 \times \psi_{PM2} \times \cos\theta_2. \quad (3.3.12)$$

Tensiunile rezultante în lungul celor două axe au expresia matricială:

$$\begin{pmatrix} u_{e\alpha} \\ u_{e\beta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\sin\theta_1 & -\sin\theta_2 \\ \cos\theta_1 & \cos\theta_2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_1 \psi_{PM1} \\ \omega_2 \psi_{PM2} \end{pmatrix}. \quad (3.3.13)$$

Cuplurile electromagnetice dezvoltate T_1 și T_2 au expresiile:

$$T_1 = \frac{3}{2} p_1 (-\psi_{PM1} \times i_{\alpha} \times \sin\theta_1 + \psi_{PM1} \times i_{\beta} \times \cos\theta_1), \quad T_2 = \frac{3}{2} p_2 (-\psi_{PM2} \times i_{\alpha} \times \sin\theta_2 + \psi_{PM2} \times i_{\beta} \times \cos\theta_2), \quad (3.3.14)$$

de unde se deduc curenții i_{α} și i_{β} :

$$\begin{pmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{pmatrix} = \frac{1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)} \begin{pmatrix} -\cos\theta_2 & \cos\theta_1 \\ -\sin\theta_2 & \sin\theta_1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \frac{T_1}{\frac{3}{2} p_1 \psi_{PM1}} \\ \frac{T_2}{\frac{3}{2} p_2 \psi_{PM2}} \end{pmatrix}. \quad (3.3.15)$$

Din ecuațiile anterioare se constată că mașina poate fi controlată de un singur inverter prin intermediul curenților i_{α}^* și i_{β}^* produși de tensiunea V^* .

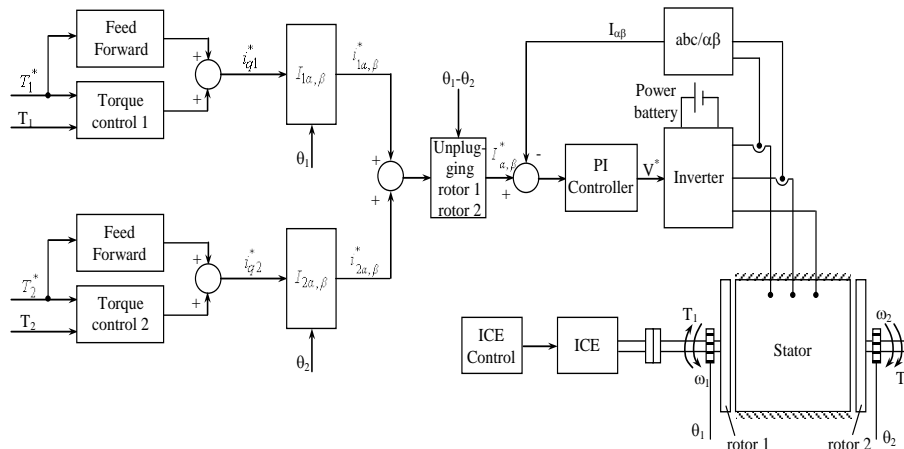


Fig. 3.3.9. Strategia de control vectorial dual propusă.

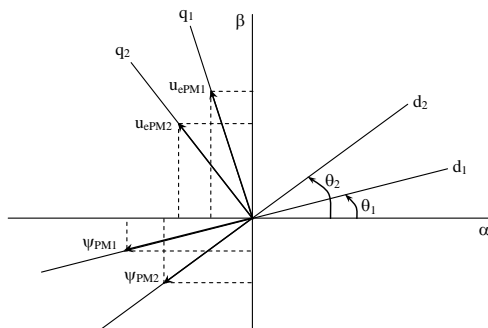


Fig. 3.3.10. Diagrama fazorială a fluxurilor și a tensiunilor electromotoare induse de magnetii permanenți.

Datorită termenului $\frac{1}{\sin(\theta_1 - \theta_2)}$ este foarte dificil să se urmărească curentul prescris care

poate varia în intervalul $(-\infty, +\infty)$. Sunt introduse limitări de curent în timp ce sinusul este monitorizat prin intermediul semnului său dat de diferența $(\theta_1 - \theta_2)$. În acest fel, soluția devine mai ușor de implementat iar împărțirea cu zero este evitată. Atunci când vitezele electrice se apropie una de cealaltă, ω_1 este egal cu ω_2 (figura 3.3.11a), sistemele de coordonate sunt rotite până la $\theta_1 - \theta_2 = 90^\circ$ (-90°) (figura 3.3.11b). În acest fel mașinile sunt decuplate și pot fi încărcate.

Cuplul de antrenare produs de motorul termic în regim staționar este egal cu cuplul electromagnetic al rotorului 1 (figura 3.3.12b). În figura 3.3.12a sunt prezentate referința de cuplu pentru rotorul 2 și cuplul realizat de acesta, observându-se că referința este urmărită cu o acuratețe destul de mare. Cele mai puternice oscilații care apar atât în cuplul rotorului 2, cât și al rotorului 1 au loc în momentul în care vitezele electrice ale celor două rotoare devin egale una cu cealaltă (figura 3.3.13). Întârzierea dintre referință și valoarea obținută se datorează unui filtru de rangul 1 cu o constantă de timp de 0.2 s. Viteza rotorului 1 atinge rapid valoarea de referință iar viteza rotorului 2 depinde de referința cuplului (figura 3.3.13).

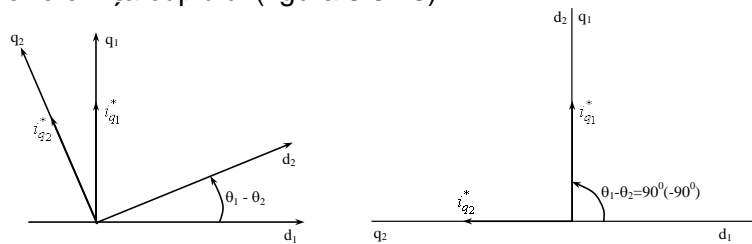


Fig. 3.3.11. a) Sistemele d_1-q_1 și d_2-q_2 ce se rotesc la $\omega_1 = \omega_2$; b) sistemele d_1-q_1 și d_2-q_2 ce se rotesc la $\omega_1 = \omega_2$ și $\theta_1 - \theta_2 = 90^\circ$ (-90°).

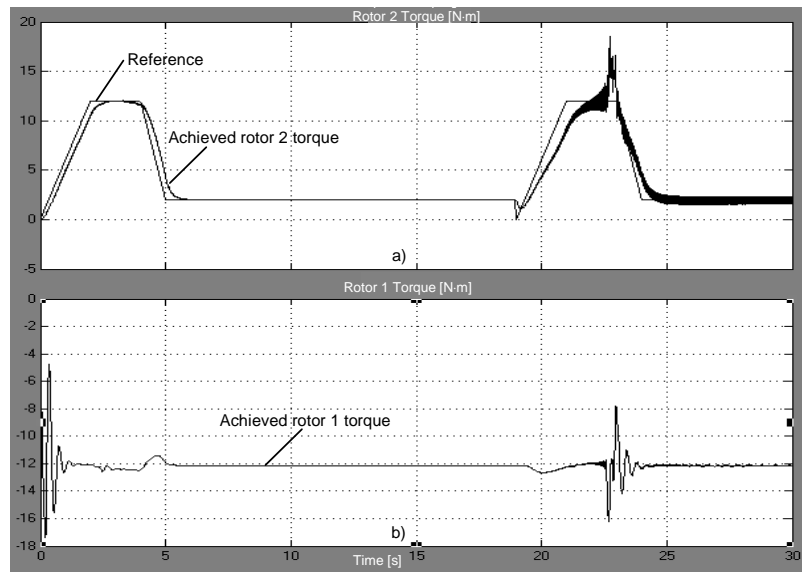


Fig. 3.3.12. a) Cuplul de referință și cel realizat pentru rotorul 2; b) cuplul realizat pentru rotorul 1.

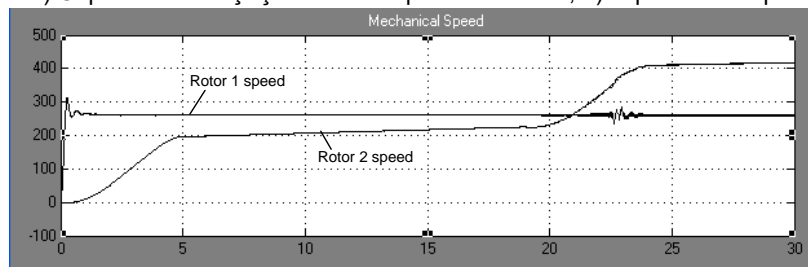


Fig. 3.3.13. Vitezele mecanice ale rotorului 1 și rotorului 2.

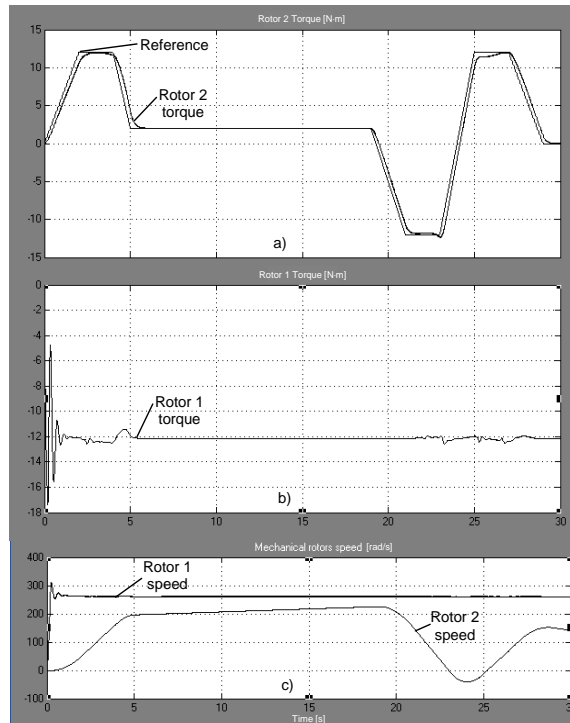


Fig. 3.3.14. a) Cuplul de referință și cel realizat pentru rotorul 2 când mașina 2 funcționează atât ca motor cât și ca generator; b) cuplul rotorului 1 în acest caz; c) vitezele celor două rotoare în acest caz.

Atunci când vitezele electrice sunt apropiate una de cealaltă, apare o oscilație, dar trecerea se face destul de ușor. În zona de egalizare a vitezelor electrice curentul prezintă o creștere. Modularea curenților de fază și tensiunilor este specifică variabilelor care conțin două frecvențe. Se observă că frecvența de pulsație a cuplului este redusă atunci când vitezele electrice sunt apropiate una de cealaltă. Figura 3.3.14a indică cuplul de referință și cuplul realizat al rotorului 2 dacă regimul de funcționare este de generator, în timp ce figura 3.3.14b,c arată cuplul rotorului 1 și cele două viteze pentru această situație.

Deși pulsațiile cuplului apar atunci când cele două rotoare traversează aceeași viteză electrică, trecerea se face cu succes (figura 3.3.13) și astfel controlul vectorial dual este considerat adecvat scopului. Ca soluție alternativă de control, care permite două înfășurări distincte ale statorului (și care duce la o reducere a pierderilor în cupru) un sistem de control al inverterului PWM cu 4 picioare este detaliat în [Tut 12a].

Pentru vehiculele pur electrice s-au identificat două soluții pentru utilizarea acestui sistem de acționare electrică (figura 3.3.14) unde: R sunt rotoarele, S este statorul, Inv. este inverterul, TM este transmisia mecanică, TD este transmisia diferențială iar RM sunt roțile motoare.

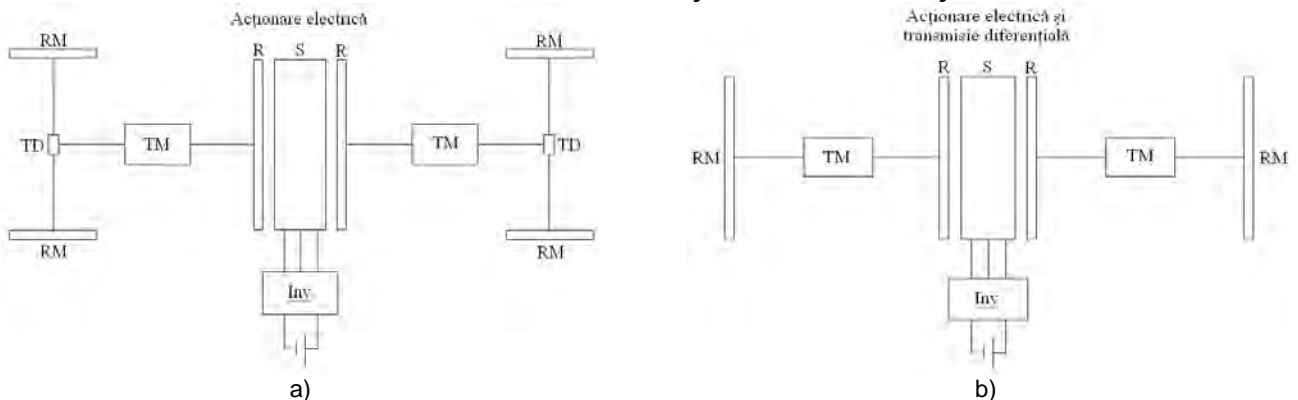


Fig. 3.3.15 Utilizarea mașinii sincrone axiale cu un stator și două rotoare ca: a) sistem de acționare electrică pentru un vehicul electric cu tracțiune integrală (pe toate patru roțile); b) sistem de acționare electrică și transmisie diferențială în același timp.

3.3.6. Concluzii

În acest paragraf s-au prezentat pe scurt principalele elemente ale cercetărilor desfășurate în vederea propunerii unui nou sistem de acționare pentru vehicule electrice hibride și pentru vehicule electrice. Acest sistem poate produce cuplu electromecanic prin două ieșiri independente, utilizând o mașină sincronă cu întrefier axial cu un singur stator și două rotoare cu magneți permanenți. S-au prezentat topologia constructivă, modelul de circuit, proiectarea optimă, metodele de control, și analiza quasi 3D-FEM pentru validarea datelor obținute analitic în ceea ce privește cuplu dezvoltat de cele două rotoare. Se propune o familie nouă de mașini, pentru îmbunătățirea dimensiunilor radiale și axiale, cu o densitate mare de cuplu și un randament ridicat. S-a demonstrat capabilitatea de producere a cuplului de către mașina cu înfășurări statorice fracționare concentrate și magneți permanenți montați pe suprafață. Astfel valoarea medie a cuplului și amplitudinea oscilațiilor acestuia, sunt direct legate de forma de variație a solenației în întrefier. Datorită configurației sale constructive speciale și a principiului de funcționare, această mașină oferă avantajele unei densități ridicate de cuplu și o bună controlabilitate [Tut 14a].

Utilizând o metodă de proiectare analitică sau o analiză cu elemente finite 2D (FEA) pentru planul corespunzător razei medii a mașinii, nu se obțin rezultate de calcul suficient de precise. Cu metoda 3D FEA, este posibil să se ia în considerare structura 3D reală a mașinii, dar durata de efectuare a calculelor este foarte ridicată, mai ales dacă obiectivul este de a realiza o proiectare preliminară a mașinii. Ideea de bază a metodei de proiectare propuse este de a împărți mai întâi mașina cu flux axial într-un număr suficient de plane de calcul independente, după care se efectuează calculele 2D necesare pentru fiecare plan, și în cele din urmă rezultatul final se obține din compunerea, cu o anumită pondere, a rezultatelor obținute pentru fiecare plan de calcul [Tut 14a].

Modelul analitic propus a fost validat cu metoda elementelor finite FEM cu o precizie de 8-10% pentru cuplu, respectiv 13% pentru inductanțe. Aceste valori sunt acceptabile, dar ele pot fi reduse prin crearea unui model analitic mai complex. Cuplul maxim calculat în funcție de viteză a arătat că ambele mașini sunt capabile să producă cuplul solicitat, pe întreg domeniul de variație al vitezei. Această cercetare arată este posibil să se proiecteze un ansamblu de două mașini (generator 55 kW/motor 110 kW) pentru un vehicul electric hibrid cu o masă de numai 133kg, un diametru exterior de 394 mm și o lungime axială de 188 mm. Atunci când vectorul variabilelor de optimizare este mare (13 în cazul nostru) algoritmul Hooke Jeeves nu poate găsi cu fermitate optimul global dar cu toate acestea soluția găsită este mai bună decât cea inițială. Valorile mari de variație ale iterației inițiale ar putea îmbunătăți șansele algoritmului HJ de a găsi soluții apropiate optimului global [Tut 14a].

A fost luată în considerare o simulare destul de extinsă pentru două cazuri (regim staționar și regim dinamic). Metoda de control vectorial dual al vitezei cu un singur inverter pentru cele două rotoare independente având un stator comun este prezentată și dovedită a fi eficientă. Următorul pas a fost de realizare a simulărilor pentru această metodă de control. Prin simulare se arată că rotoarele ajung la un moment dat în situația de egalitate a vitezelor electrice, transferul de putere între generator și motor fiind realizat direct fără inverter, iar regimul tranzitoriu datorat acestei egalități este depășit fără oscilații importante ale cuplului și vitezei. Se constată, de asemenea, că trecerea de la un regim de funcționare la altul (motor-generator și generator-motor) se face rapid și ușor [Tut 14a].

3.4. Generatoare electrice reglabile pentru aplicații eoliene sau hidraulice

Altă direcție de cercetare o reprezintă generatoarele electrice reglabile pentru centrale eoliene sau pentru microhidrocentrale. Cererea pieței pentru astfel de generatoare, la putere mică și medie este în continuă creștere. Voi face referire în continuare la două dintre ele care au avut o pondere mai importantă în preocupările științifice de după susținerea tezei de doctorat: generatorul sincron reactiv homopolar și homo-heteropolar cu excitație statorică și generatorul de inducție cu două înfășurări statorice și rotorul în colivie (DSWIG).

3.4.1 Generatorul sincron reactiv homopolar și homo-heteropolar cu excitație statorică

Preocuparea pentru cercetarea acestor mașini este o continuare firească a temei abordate în cadrul tezei de doctorat. Creșterea în timp a puterii de calcul a calculatoarelor electronice și apariția unor programe de calcul cu elemente finite 2D și 3D, respectiv a unor programe de simulare dinamică din ce în ce mai performante, au permis abordarea la un nivel superior a analizelor efectuate. Am continuat efectuarea de încercări experimentale asupra unui model experimental de putere redusă. Pentru aprofundarea analizei cu elemente finite 3D, a simulărilor dinamice și a controlului am colaborat cu ș.l.dr.ing. Topor Marcel. Am publicat după susținerea tezei de doctorat 11 lucrări științifice pe această temă.

3.4.1.1 Introducere

Unul dintre principalele dezavantaje ale mașinilor sincrone clasice îl reprezintă plasarea înfășurării de excitație în rotor determinând o greutate și o inerție mare a rotorului și care implică existența contactelor alunecătoare (inele și perii). În referința [Dea 08c] se prezintă o nouă formă de mașină heteropolară sincronă rotativă care este capabilă să asigure un randament și un factor de putere relativ ridicate. În [Dea 09b] este prezentată o mașină sincronă reactivă homo-heteropolară rotativă cu excitație statorică, care elimină dezavantajele mașinilor sincrone clasice. Constrângerile de proiectare a dispozitivelor electrotehnice necesită simulări numerice cât mai apropiate posibil de starea lor de funcționare. Este necesar de asemenea să se cupleze modele fizice ale mașinilor, în special modelele cuplate electrice, magnetice și mecanice, care permit simularea încărcării mașinilor rotative [Dea 09c]. Metoda elementelor finite (F.E.M.) permite o astfel de cuplare a modelelor pentru analiza în plan 2D. Cu toate acestea timpul de calcul este îndelungat. Utilizarea sa pentru mașini cu geometrie tipic tridimensională nu a fost realizată până acum, iar timpul de calcul se estimează a fi și mai lung [Bal 79].

Pentru obținerea celor mai bune rezultate în proiectarea mașinilor electrice speciale, ar trebui utilizate atât metodele clasice, cât și metodele numerice de calcul. Calculul ar trebui să se bazeze pe un model matematic cât mai exact posibil. Pe baza acestui model se determină prin simulare caracteristicile mașinii în regim nesaturat și saturat [Dea 09b], [He 95]. Particularitățile de proiectare ale acestor tipuri de generatoare sunt legate de caracterul axial al distribuției câmpului magnetic. Calculul câmpului în mașină poate fi realizat prin metoda elementelor finite [Sie 91], sau prin metoda tuburilor de câmp [Dea 09b], [He 95], [Rao 00], [Ich 99], [Hip 92], [Hof 00]. Luând în considerare distribuția axială a câmpului, este necesară o modelare tridimensională a acestuia. Pentru acest model tridimensional este necesar un software specializat care are nevoie de un calculator performant, iar timpul de calcul este ridicat.

3.4.1.2. Elemente constructive

Generatoarele sincrone reactive cu excitație statorică homopolar (RHBSM) și homo-heteropolar (RHHBSM) pe care le vom analiza în continuare, sunt mașini rotative. Pentru a înțelege elementele lor constructive, în figura 3.4.1.1 se prezintă câte o secțiune longitudinală. Bobina de excitație are o formă de inel și este plasată în ferestrele în formă de U respectiv de E ale pachetelor de tole (figura 3.4.1.1 a, b), și, la trecerea polilor rotorului, câmpul se închide, având prin aceasta o formă de variație dreptunghiulară. Când polii rotorici nu se află sub pachetele de tole, câmpul este practic nul.

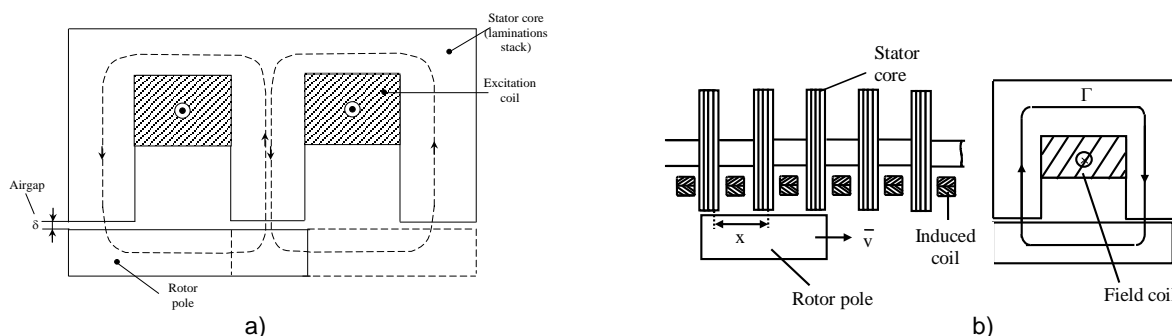


Figura 3.4.1.1. Secțiune longitudinală în circuitul magnetic al: a) mașinii sincrone homo-heteropolare; b) mașinii sincrone homopolare.

Elementele constructive ale mașinilor RHBSM și RHHBSM, sunt prezentate în figurile 3.4.1.2, 3.4.1.3 și 3.4.1.4 într-o reprezentare 3D respectiv 2D.

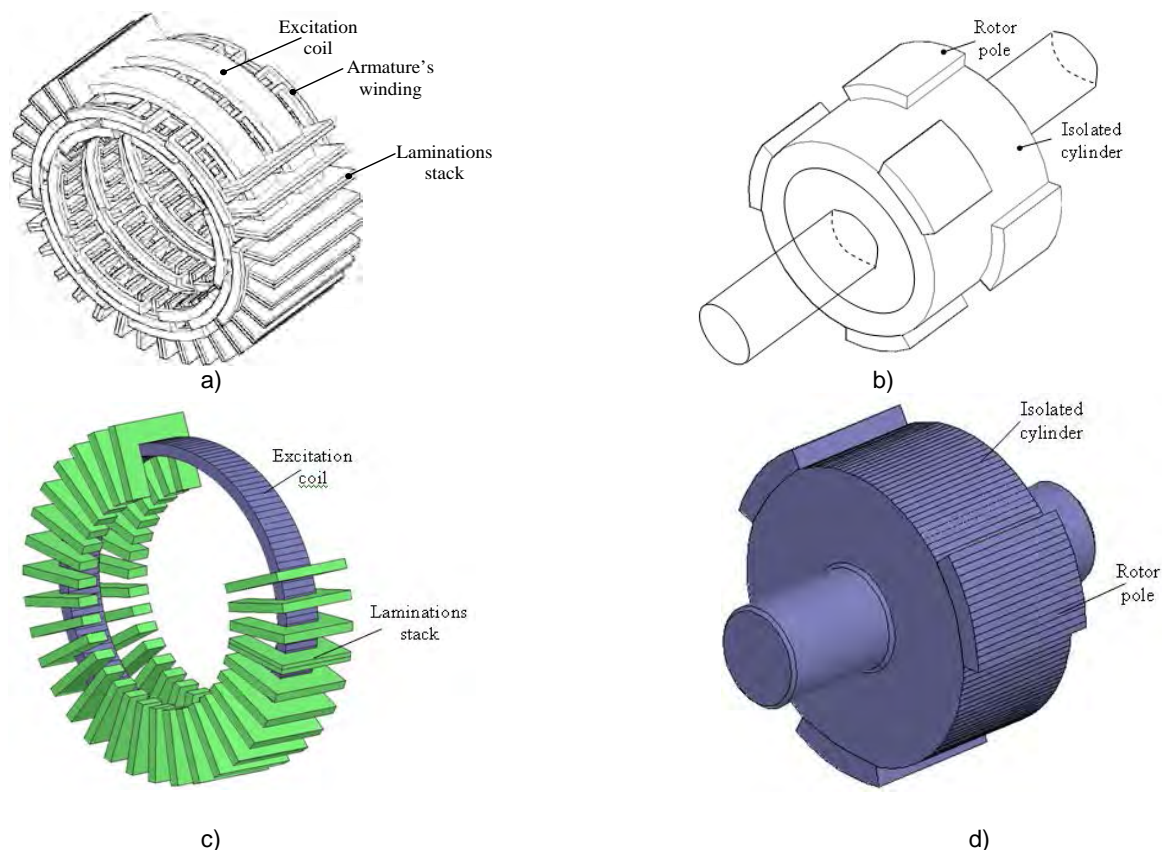


Figura 3.4.1.2. a) Reprezentarea 3D a circuitului magnetic statoric cu înfășurările de excitație și înfășurarea indusului pentru mașina RHHBSM; b) Reprezentarea 3D a rotorului mașinii RHHBSM; c) Reprezentarea 3D a circuitului magnetic statoric cu înfășurarea de excitație pentru mașina RHBSM; d) Reprezentarea 3D a rotorului mașinii RHBSM.

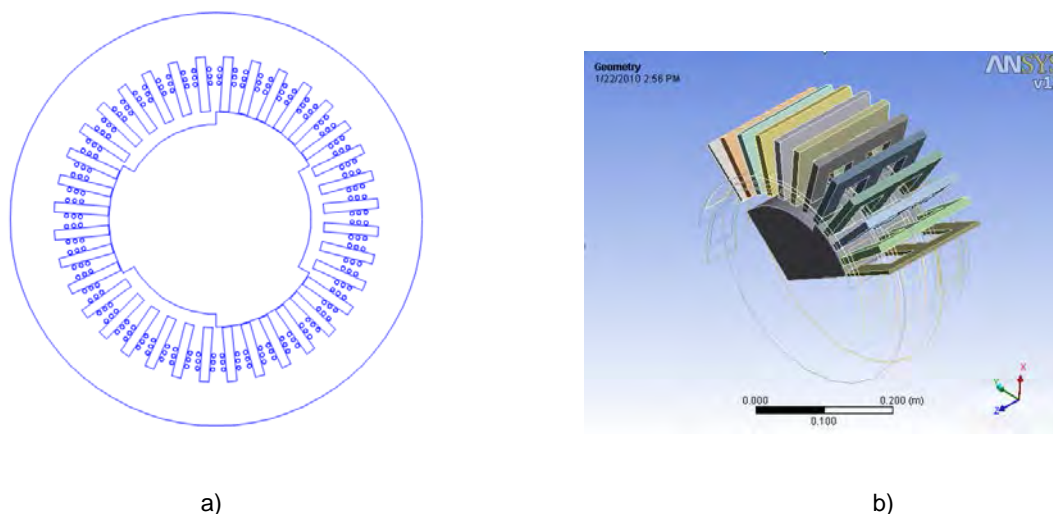


Figura 3.4.1.3. RHHBSM: a) Reprezentare 2D a circuitului magnetic statoric și rotoric, cu bobinele înfășurării indusului b) Reprezentare 3D a geometriei mașinii.

Înfășurarea trifazată de curent alternativ este plasată în creștăturile deschise, formate între pachetele de tole statorice. Pentru a proiecta structura magnetică tridimensională a RHHBSM este necesar să se identifice distribuția fluxului mașinii. Geometria RHHBSM reprezintă o provocare din

cauza diferitelor cuplaje încrucișate între rotor și stator. Distribuția fluxului produs de înfășurările de curent alternativ și de excitație este investigată separat.

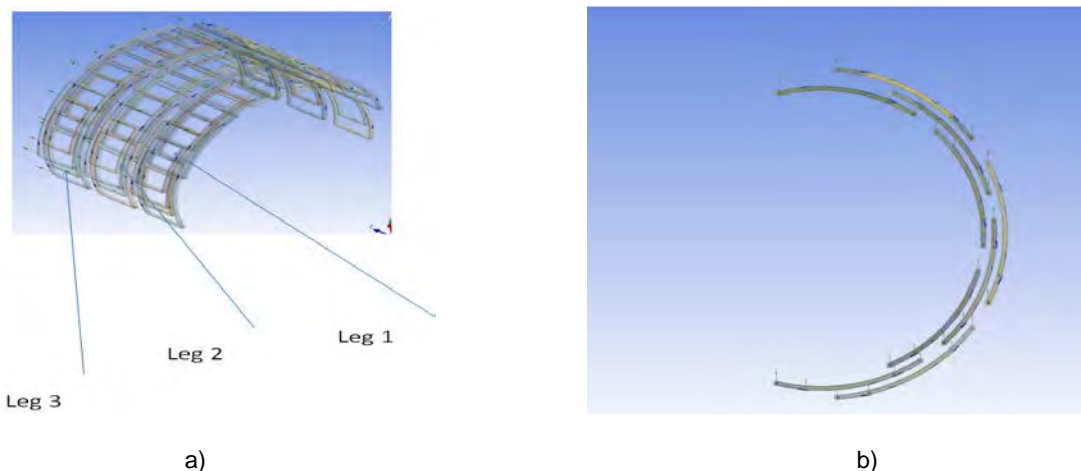


Figure 3.4.1.4. a) Reprezentarea 3D a bobinelor înfășurării statorice: a) pentru trei picioare ale pachetului de tole; b) înfășurarea pentru piciorul 1 plasată în trei straturi pentru cele trei faze.

3.4.1.3 Analiza cu elemente finite 3D

Metoda elementului finit este folosită pentru a obține parametrii cheie ai RHHBSM. Deoarece topologia este una pur tridimensională, parametrii și caracteristicile în regimuri tranzitorii nu pot fi obținute fără un efort de calcul extins pentru fluxul în mașină. Analiza cu elemente finite a mașinii a fost făcută cu ajutorul unei platforme comerciale software. Atunci când este aplicată la mașini electrice, problema descrisă este de obicei redusă pentru a acoperi un pol sau numai o pereche de poli cu ajutorul unor condiții de frontieră și simetrie, pentru a reduce timpul de calcul. Înfășurările sunt în conexiune stea iar curenții care le străbat sunt $I_A = I$, $I_B = I_C = -I/2$. Din analiza cu elemente finite 3D sau luat în considerare numai unele mărimi principale sau valori pentru verificare care nu pot fi obținute prin alte mijloace. Deoarece pentru această topologie este necesar un model de câmp 3D, și modelul magnetostatic de rezolvare a problemei de câmp trebuie să fie 3D. Pentru a simplifica soluția, am utilizat doar modelul pentru o pereche de poli (o treime de mașină) (figurile 3.4.1.5-3.4.1.9) profitând de simetria mașinii. Utilizarea instrumentului de calcul FEM 3D este consumatoare de timp, care limitează utilizarea acestuia în procesul de investigare a parametrilor.

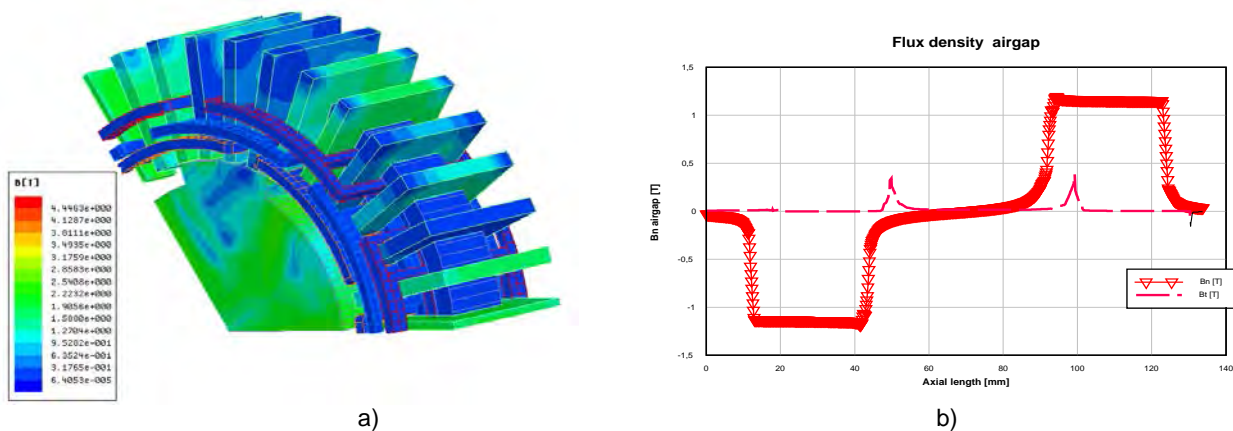
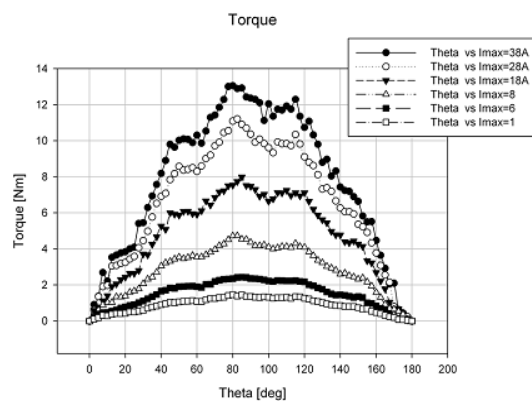
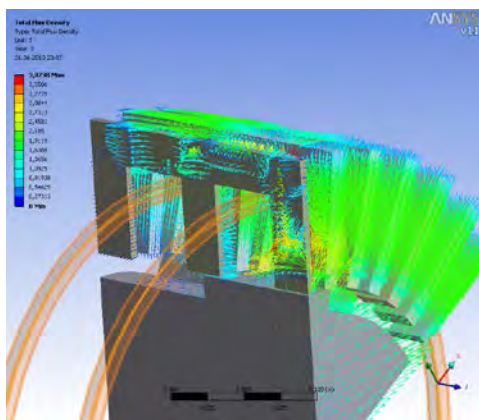


Figura 3.4.1.5 Rezultatele analizei cu elemente finite pentru mașina homopolară: a) reprezentarea 3D a câmpului magnetic; b) inducția în întrefier pentru $I_e=6A$ la funcționarea în gol.



a) b)
 Figura 3.4.1.6 Rezultatele analizei cu elemente finite pentru mașina heteropolară: a) reprezentarea 3D a inducției magnetice; b) cuplul în funcție de unghiul de rotație la diferiți curenți.

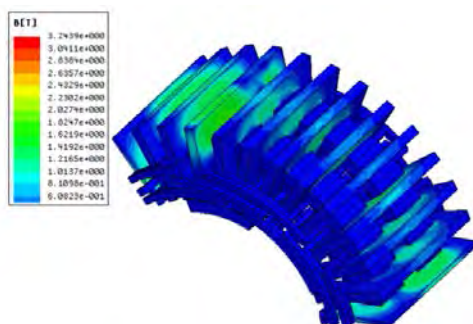


Figura 3.4.1.7 Rezultatele analizei cu elemente finite pentru mașina heteropolară: reprezentarea 3D a inducției magnetice.

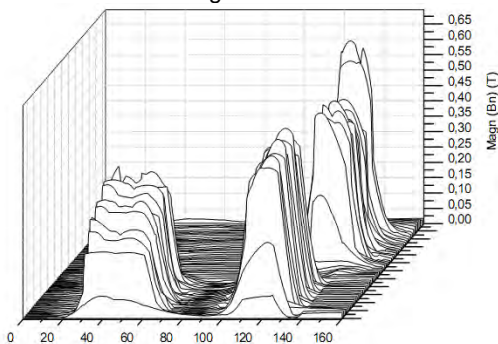


Figura 3.4.1.8 Rezultatele analizei cu elemente finite pentru mașina heteropolară: inducția magnetică în întrefier.

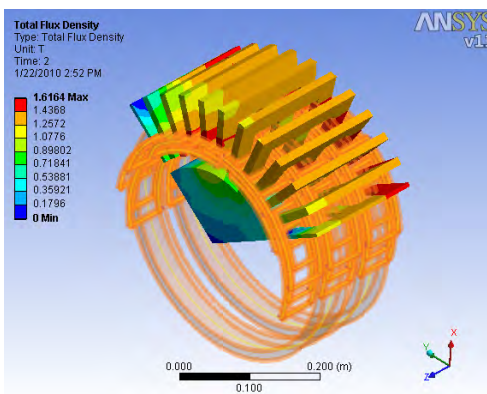


Figura 3.4.1.9 Rezultatele analizei cu elemente finite pentru mașina heteropolară: inducția magnetică totală la $I_a=I_b=I_c=0$ și $I_{exc}=I_{excN}$.

Soluțiile obținute din modelul cu elemente finite utilizând metoda 3D a durat aproximativ 6 ore pe pas. Inducția magnetică în întrefier (valoarea absolută a lui B) este prezentată în figura 3.4.1.8. Evaluarea inductivității din calculul cu elemente finite arată că mașina nu este saturată deoarece valoarea maximă a inducției în întrefier este mai mică de 1T. Cuplul static produs de curenții constanți și variația acestuia cu poziția este prezentat în figura 3.4.1.10. Se observă că valoarea cuplului maxim care poate fi obținut este egală cu 11 (Nm) pentru modelul analizat.

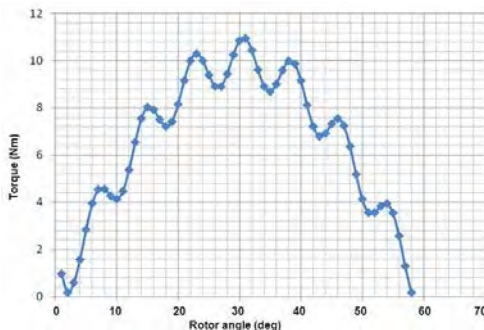


Figura 3.4.1.10 Variația cuplului static cu poziția, obținută din analiza cu elemente finite 3D FEM prin menținerea constantă a curenților.

3.4.1.4 Modelul ortogonal

Modelul ortogonal este identic pentru cele două tipuri de mașini (homopolară și homoheteropolară) cu alte valori ale inductivităților care intervin în relațiile matematice [Dea 10c]. Înfășurarea de excitație și înfășurarea indusului se găsesc în stator, iar polii rotorului sunt masivi, prevăzuți sau nu cu o colivie de amortizare. În figura 3.4.1.11 este prezentat modelul mașinii în coordonatele fazelor, iar în figura 3.4.1.12 modelul d-q obținut prin transformare [Ich 99], [Dea 09b], [Dea 10c]. Echivalența completă între mașina reală și modelul d-q presupune existența unor componente homopolare U_0 și i_0 .

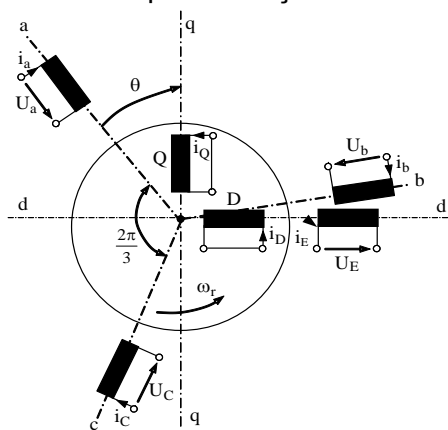


Figura 3.4.1.11 Modelul mașinii în coordonatele fazelor.

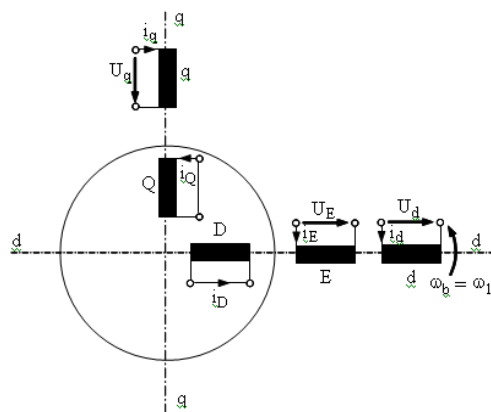


Figura 3.4.1.12 Modelul d-q al mașinii.

La conectarea la stea această componentă nu intervine. Au fost luate în considerare egalitatea puterilor momentane, a pierderilor, a cuplului și a energiei magnetice stocate. Folosind transformarea Park pentru fluxuri și curenți, se obțin expresiile fluxurilor pe axele d și q, ψ_d și ψ_q unde $L_{S\sigma}$ este inductivitatea de dispersie proprie, L_0 componenta constantă a inductanței, L_2 inductanța dependentă de poziția rotorului, M_0 inductanța constantă de cuplaj, M_E , M_D , M_Q inductanțele maxime de cuplaj între o fază a statorului, excitație și respectiv înfășurările de amortizare D and Q [Hip 92], [Hof 00], [Dea 09b], [Dea 10c]:

$$\psi_d = L_{S\sigma} \times i_d + \left(L_0 - M_0 + \frac{3}{2} L_2 \right) \times i_d + M_E \times i_E + \frac{\sqrt{3}}{2} M_D \times i_D, \quad (3.4.1.1)$$

$$\psi_q = L_{S\sigma} \times i_q + \left(L_0 - M_0 - \frac{3}{2} L_2 \right) \times i_q + \frac{\sqrt{3}}{2} M_Q \times i_Q. \quad (3.4.1.2)$$

Dacă este neglijată inductanța de dispersie de cuplaj între înfășurarea statorică și colivia D ($L_{dD\sigma} = 0$), se obțin inductanțele sincrone, longitudinală L_d și transversală L_q [Tsa 02], [Dea 09b], [Dea 10c]:

$$L_d = L_0 - M_0 - \frac{3}{2} L_2, \quad (3.4.1.3)$$

$$L_q = L_0 - M_0 + \frac{3}{2} L_2, \quad (3.4.1.4)$$

$$M_0 = -\frac{L_0}{2}. \quad (3.4.1.5)$$

Unghiul θ are expresia de mai jos, unde ω_r este viteza unghiulară a rotorului iar θ_0 valoarea inițială a acestuia:

$$\theta = \int \omega_r \times dt + \theta_0. \quad (3.4.1.6)$$

Relația obligatorie dintre curenții modelului ortogonal i_d , i_q și i_0 și curenții mașinii reale i_a , i_b și i_c este [Dea 09b], [Dea 10c]:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = [P_{abcdq0}] \times \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad (3.4.1.7)$$

unde:

$$[P_{abcdq}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\theta) & \sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}, \quad (3.4.1.8)$$

aceeași relație fiind valabilă și pentru fluxuri,

$$\begin{bmatrix} \Psi_d \\ \Psi_q \\ \Psi_0 \end{bmatrix} = [P_{abcdq0}] \times \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix}. \quad (3.4.1.9)$$

Din relațiile anterioare și luând în considerare expresia:

$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = [P_{abcdq0}]^T \times \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}, \quad (3.4.1.10)$$

se obține:

$$\psi_d = \left[L_{S\sigma} + \frac{3}{2} (L_0 + L_2) \right] \times i_d + M_E \times i_E + \frac{\sqrt{3}}{2} M_D \times i_D, \quad (3.4.1.11)$$

$$\psi_q = \left[L_{S\sigma} + \frac{3}{2} (L_0 - L_2) \right] \times i_q + \frac{\sqrt{3}}{2} M_Q \times i_Q, \quad (3.4.1.12)$$

$$\psi_0 = [L_{S\sigma} + L_0 + 2M_0] \times i_0 @ L_{S\sigma} \times i_0. \quad (3.4.1.13)$$

Considerând o singură colivie rotorică pe fiecare axă, tensiunile $U_D = U_Q = 0$ și viteza periiilor $\omega_b = \omega_r$, se obțin ecuațiile generale ale modelului ortogonal ale mașinii sincrone homo-heteropolare, unde R_S este rezistența statorică, R_E este rezistența înfășurării de excitație, R_D și R_Q rezistențele coliviei rotorului, M_e cuplul electromagnetic și p numărul perechilor de poli:

$$i_d R_s - U_d = -\frac{\partial \psi_d}{\partial t} + \omega_r \times \psi_q, \quad (3.4.1.14)$$

$$i_q R_s - U_q = -\frac{\partial \psi_q}{\partial t} + \omega_r \times \psi_d, \quad (3.4.1.15)$$

$$i_E R_E - U_E = -\frac{\partial \psi_E}{\partial t} + \omega_r \times \psi_q, \quad (3.4.1.16)$$

$$i_D R_D = -\frac{\partial \psi_D}{\partial t}, \quad (3.4.1.17)$$

$$i_Q R_Q = -\frac{\partial \psi_Q}{\partial t}, \quad (3.4.1.18)$$

$$M_e = p(\psi_d \times i_q - \psi_q \times i_d). \quad (3.4.1.19)$$

3.4.1.5 Controlul generatoarelor sincrone homopolare și homo-heteropolare. Simulări dinamice

Funcționarea mașinilor sincrone RHBSM și RHHBSM ca generator sau servomotor cu turație variabilă prezintă importanță deosebită la conceperea structurii sistemului de reglaj. Acest sistem trebuie tratat în mod unitar pe baza teoriei fazorilor spațiali. Modelul folosit ia în considerare și saturația mașinilor [Kel 89], [Dea 10c].

A. Controlul clasic

În general, pentru a compensa creșterea t.e.m. induse cu viteza și variația inductanței mașinii cu curentul, comutarea fazei este avansată cu un unghi α_a care urmărește modificarea vitezei. Formele de undă ale curentului se obțin prin intermediul controlerelor de curent. Controlul cu ajutorul unui curent dreptunghiular este preferat atunci când t.e.m. indusă de magneții permanenți este nesinusoidală (trapezoidală), $q = 1$, înfășurarea statorică este cu bobine concentrate - pentru reducerea pulsațiilor de cuplu și să profite de proximitatea unui senzor sau estimator de poziție. Controlul scalar (V / f) este legat de controlul cu un curent sinusoidal fără senzori de mișcare (sensorless) (figura 3.4.1.13) [Bol 05], [Dea 10c]:

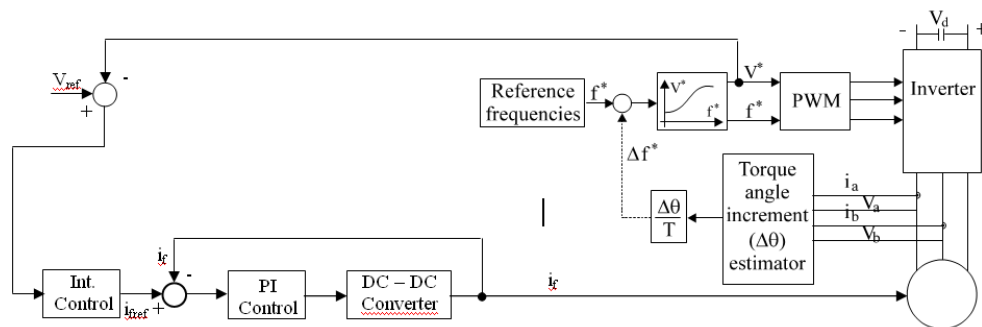


Figura 3.4.1.13 Schema de control scalar pentru RHBSM (RHHBSM) cu compensare de cuplu prin incrementarea unghiului.

Incrementul unghiului de cuplu $\Delta\theta$ este estimat iar frecvența de referință este crescută cu Δf^* , pentru compensarea variației de cuplu și pentru menținerea curenților generatorului în sincronism cu rotorul, în timpul fenomenelor tranzitorii. Este necesară o colivie rotorică de amortizare a oscilațiilor deoarece rampa de frecvență este limitată. Aplicațiile cu dinamică scăzută pot beneficia de astfel de soluții simplificate. Pentru aplicații dinamice mai rapide, se utilizează controlul vectorial (figura 3.4.1.14) [Tsa 02], [Bol 05], [Dea 10c]:

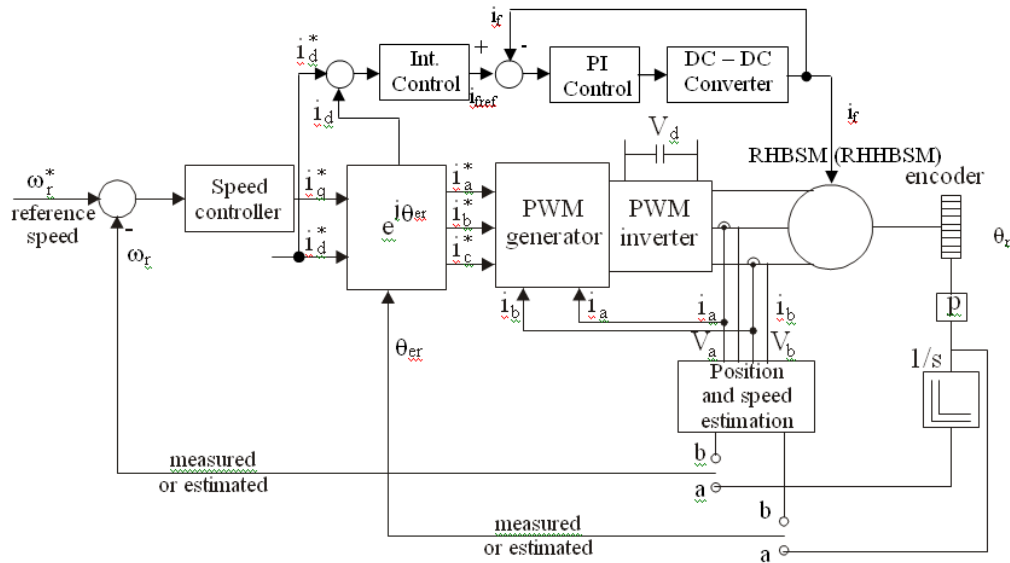


Figura 3.4.1.14 Schema de bază pentru controlul vectorial la RHBSM (RHHBSM); a - cu encoder; b – fără encoder.

B. Controlul vectorial de cuplu

Pentru a simplifica controlul generatorului, controlul direct de cuplu și flux (DTFC pentru mașini de inducție) a fost extins la RHBSM (și la RHHBSM) sub numele de control vectorial al cuplului (TVC). Controlul direct al fluxului statoric și controlul de cuplu conduce la un tabel de comutare a tensiunii (secvența vectorului de tensiune). Rotația vectorilor este astfel evitată dar sunt necesare observare de flux și cuplu. Dacă avem observer de viteză, estimarea poziției rotorului nu mai este necesară. Astfel, controlul rapid al fluxului și cuplului poate fi obținut chiar și în cazul conducerii fără senzori (figura 3.4.1.15) [Dea 10c]:

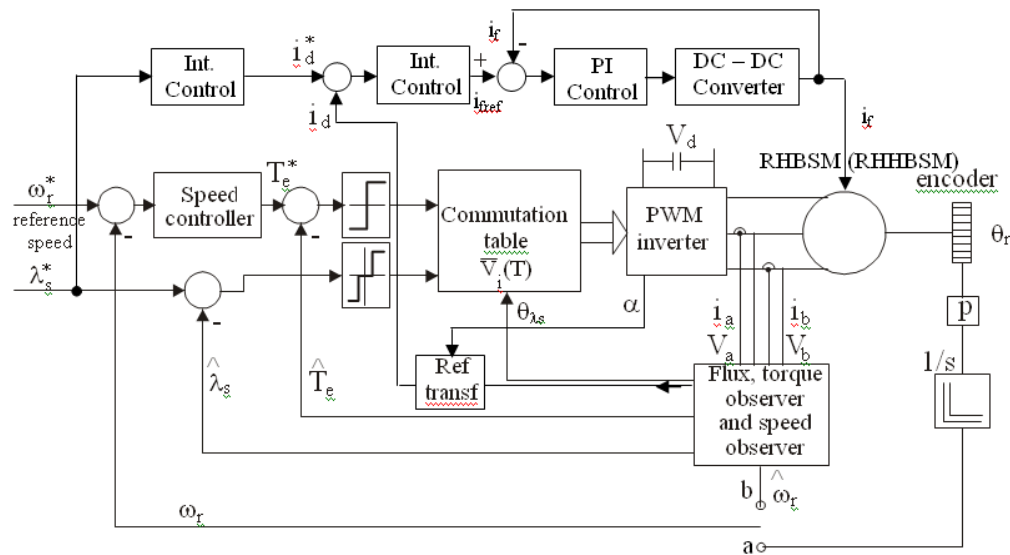


Figura 3.4.1.15 Schema pentru controlul vectorial de cuplu (TVC) la RHBSM (RHHBSM); a - cu encoder; b – fără encoder.

În figura 3.4.1.16 a fost prezentată forma de variație a solenației de reacție a indusului. În figura 3.4.1.17 se prezintă forma de variație a fluxului magnetic inductor trifazat pentru valoarea nominală a curentului de excitație. În figurile 3.4.1.18 și 3.4.1.19 a fost prezentat cuplajul magnetic al unei faze la $I_1 = 0$ respectiv la $I_1 = 5$ (A). În figura 3.4.1.20 se prezintă curba de variație a inductanței, din grafic rezultând valorile parametrilor $L_d = 26.53$ (mH) and $L_q = 16.54$ (mH), și raportul inductanțelor [Dea 06a], [Dea 08c], [Dea 09c], [Dea 18c]:

$$\left(\frac{L_d}{L_q} \right)_{\text{simulation}} = 1.6 \cdot \quad (3.4.1.20)$$

Una dintre funcțiile programului permite interpolarea curbei de magnetizare a materialului din care se face miezul feromagnetic.

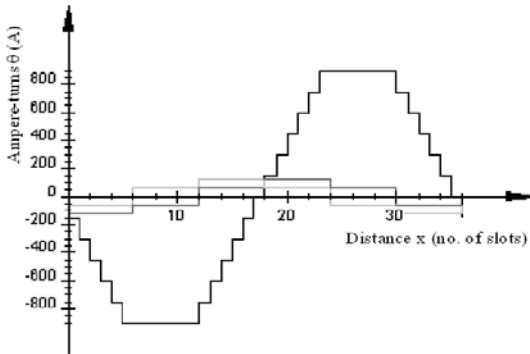


Figura 3.4.1.16 Solenația de reacție la $t = 15$ ms.

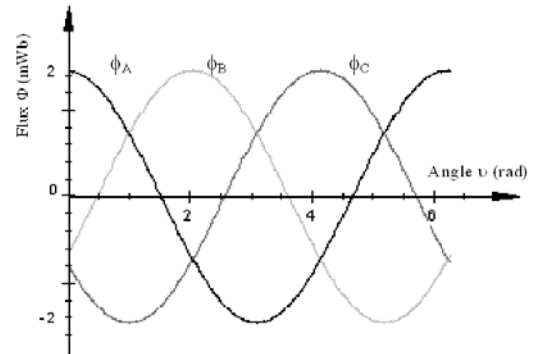


Figura 3.4.1.17 Fluxul inductor la $I_E = 5.6$ A.

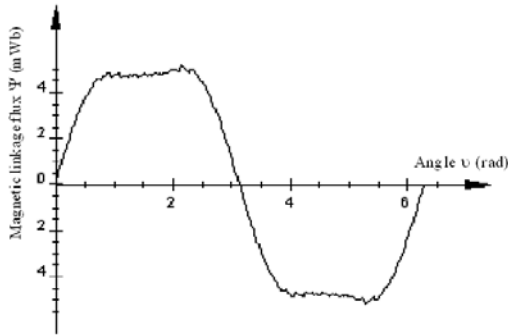


Figura 3.4.1.18 Fluxul rezultat la $I_E = 5.6$ A și $I_1 = 0$.

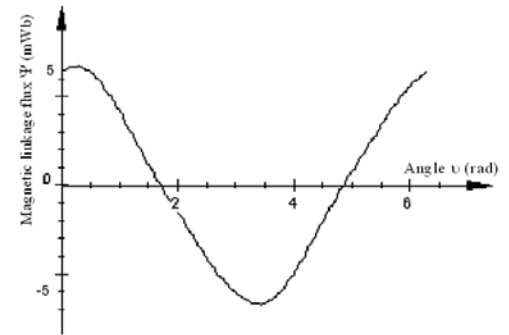


Figura 3.4.1.19 Fluxul rezultat la $I_E = 5.6$ A și $I_1 = 5$ A.

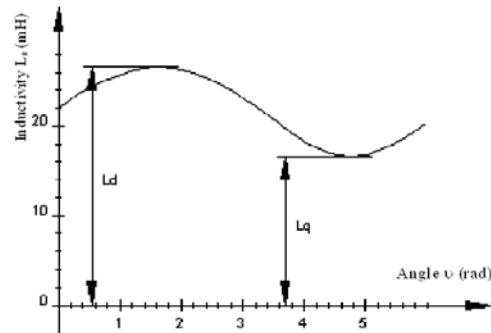


Figura 3.4.1.20 Curba de variație a inductanței.

Am analizat un scenariu simplu pentru a observa funcționarea în regim staționar a generatorului RHHBSM și răspunsul său dinamic la o cădere de tensiune rezultată dintr-o defecțiune la distanță. Căderea de tensiune se produce la $t=0.03$ s. Inițial sistemul produce o putere activă de 2 KW. Viteza turbinei corespunzătoare este egală cu viteza sincronă a generatorului. Tensiunea DC este reglată la 560 V și puterea reactivă este menținută la 0 var. La $t = 0,03$ s, tensiunea scade brusc la 0,75 din valoarea nominală, ceea ce determină o creștere a tensiunii circuitului intermediar de curent continuu și o scădere a puterii de la ieșirea generatorului. În timpul căderii de tensiune, sistemele de control încearcă să regleze tensiunea DC și puterea reactivă la valorile lor de setare (560V, 0 VAR). Sistemul își revine după eliminarea defectelor.

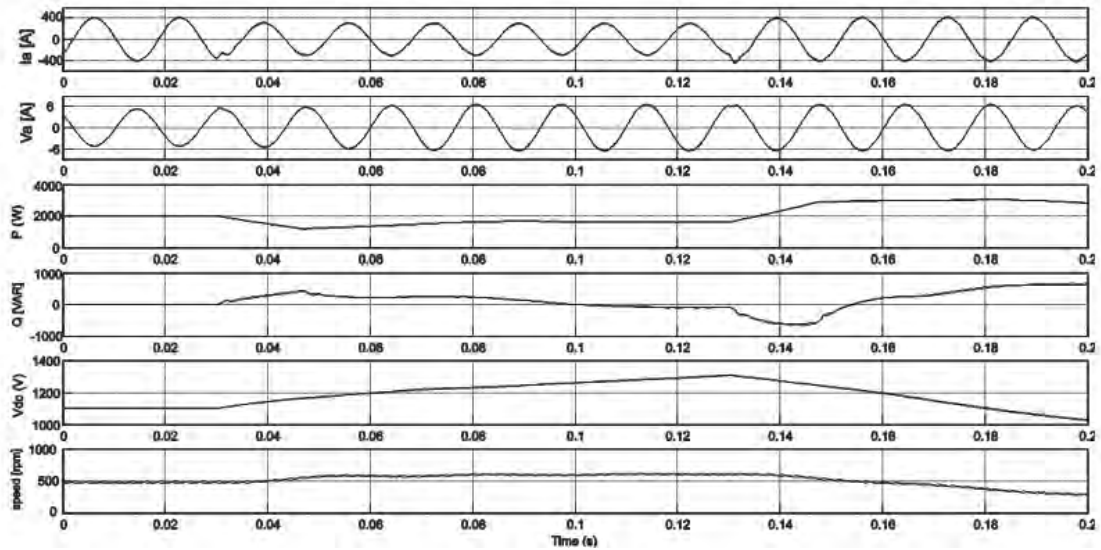


Figura 3.4.1.21 Rezultatele simulărilor pentru funcționarea RHHSM în regim de generator.

3.4.1.6 Încercări experimentale

Parametrii și dimensiunile de proiectare pentru prototipul experimental sunt date în tabelul 3.4.1 [Dea 09c].

Table 3.4.1: Parametrii și dimensiunile de proiectare pentru prototipul experimental.

Frecvența (f)	50 Hz	Diametrul exterior statoric (D_{so})	462 mm
Numărul de poli - p	6 poli	Diametrul interior statoric (D_{si})	270 mm
Întrefierul (h_{ag})	0.5 mm	Adâncimea creștăturii statorice (h_{ss})	11.5 mm
Lungimea ideală a miezului (l_i)	190 mm	Înălțimea polului rotoric (h_{rs})	31.5 mm
Numărul de creștături statorice (N_{ss})	36	Diametrul interior rotoric (D_{ri})	207 mm
Numărul de poli rotorici (p_r)	6	Tensiunea nominală a excitației (U_{DC})	250 V
Puterea aparentă nominală (P_n)	2.5 KVA	Tensiunea nominală de linie (U_n)	400 V
Numărul de bobine de excitație inelare	2	Numărul de straturi ale înfășurării indusului	3
Viteza nominală (n)	1000 rpm	Conexiunea fazelor înfășurării indusului	Y
Curentul nominal de fază (I_N)	5.5 A	Curentul nominal de excitație (I_{EN})	6 A

A fost construit un model experimental la scară redusă (figura 3.4.1.22), cu statorul (figura 3.4.1.23) și rotorul (figura 3.4.1.24) înainte de asamblare, cu ajutorul căruia s-au validat prin încercări rezultatele teoretice obținute.

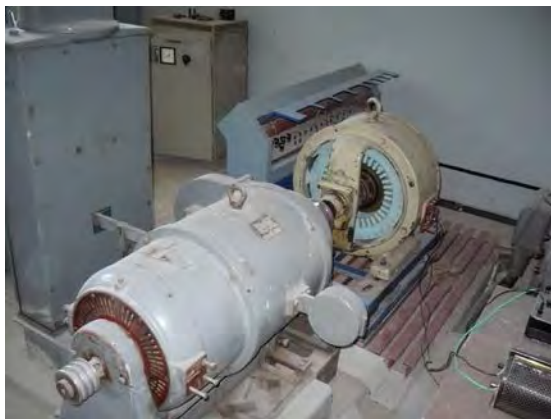


Figura 3.4.1.22 Standul de încercări experimentale.



Figura 3.4.1.23 Ansamblul stator înainte de introducerea înfășurării indusului.



Figura 3.4.1.24 Ansamblul rotor fără colivie de amortizare pentru modelul experimental.

În continuare, studiile experimentale au permis obținerea caracteristicilor în regimurile staționar și tranzitoriu ale mașinii. În figura 3.4.1.25 sunt prezentate caracteristicile de funcționare în gol obținute experimental și prin simulare cu metoda circuitelor magnetice echivalente. Comparativ cu rezultatelor obținute prin simulare, experimentul arată că influența saturației este mai puternică [Dea 09c].

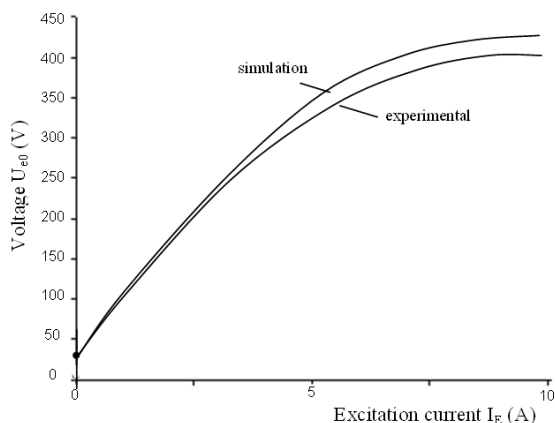


Figura 3.4.1.25 Caracteristica experimentală și simulată la funcționarea în regim de mers în gol.

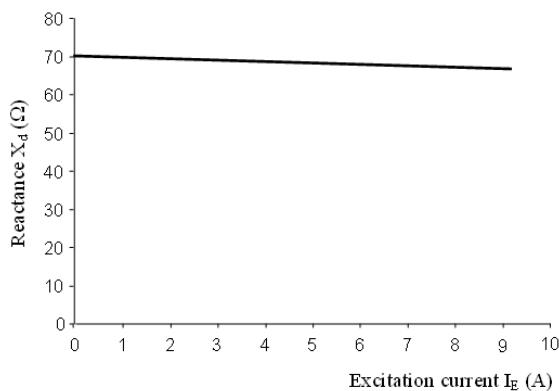


Figura 3.4.1.26 Reactanța sincronă longitudinală determinată experimental.

În figurile 3.4.1.26 și 3.4.1.27 sunt prezentate reactanțele sincrone, longitudinale și transversale. Raportul inductanțelor pentru prototip este [Dea 09c]:

$$\left(\frac{L_d}{L_q} \right)_{\text{experimental}} = 1.58 , \tag{3.4.1.21}$$

care este foarte aproape de valoarea obținută prin simulare.

Curba randamentului este prezentată în figura 3.4.1.28 iar formele de undă ale tensiunii la mers în gol și la încărcarea nominală sunt prezentate în figura 3.4.1.29 [Dea 09c].

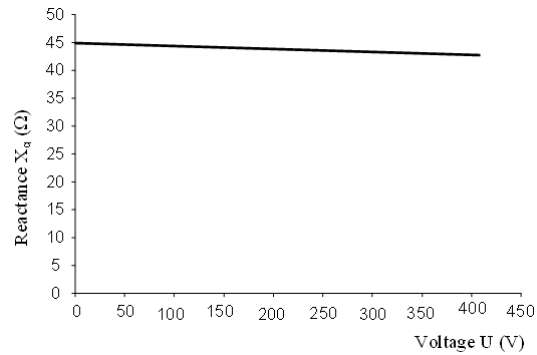


Figura 3.4.1.27 Reactanța sincronă transversală determinată experimental.

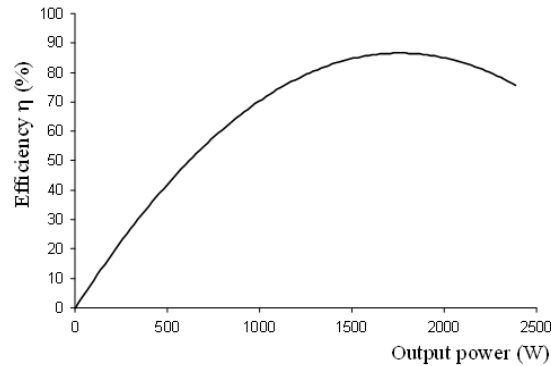


Figura 3.4.1.28 Caracteristica randamentului determinată experimental.

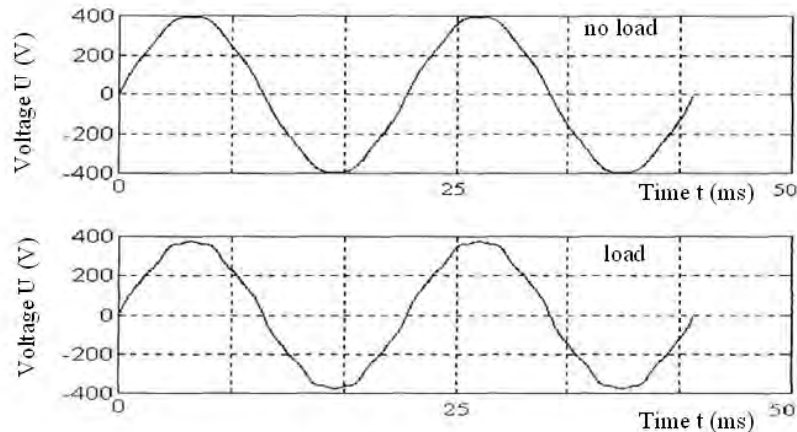


Figura 3.4.1.29 Formele de undă ale tensiunii de linie la funcționare în gol și la sarcină nominală.

3.4.1.6 Concluzii

Cercetările desfășurate au condus la obținerea unui model matematic al mașinii fără perii homo-heteropolare, prin metoda circuitelor magnetice echivalente și a modelului 3D FEM. Pe baza acestui model s-a efectuat o simulare de funcționare, fiind obținute caracteristicile solenației, fluxului inductor, fluxului rezultat și variația inductanțelor. Pe baza valorilor obținute prin simulare a fost construit un model experimental care a fost supus încercărilor, fiind prezentate rezultatele obținute, care sunt destul de apropiate de cele obținute prin simulare, validând astfel modelul matematic. Este prezentat și modelul ortogonal al mașinii, pe baza căruia s-a simulat funcționarea în regim de generator și de servomotor. Principalul avantaj al mașinilor RHBSM și RHHBSM o reprezintă capacitatea lor îmbunătățită de a funcționa la viteze variabile pentru centralele eoliene sau hidroelectrice fără contacte alunecătoare. Metoda de proiectare analitică a fost validată cu

ajutorul modelului 3D FEM. S-au prezentat caracteristicile solenației, fluxului inductor, fluxului rezultat și a cuplului.

3.4.2 Generatorul de inducție cu două înfășurări statorice și rotorul în colivie (DSWIG)

Demararea cercetărilor s-a făcut în anul 2012 în cadrul unui grant de tip PCCA unde coordonatorul a fost Universitatea Politehnica Timișoara (director prof.dr.ing. Octavian Proștean) și partener Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca. Am avut o șansă deosebită ca în cadrul acestui proiect să lucrez cu prof.dr.ing. Budișan Nicolae care de zeci de ani s-a ocupat de această mașină având o vastă experiență, cu prof.dr.ing. Muntean Nicolae și cu prof.dr.ing. Tutelea Lucian. Pe această temă am publicat 8 lucrări științifice, o carte și am câștigat un grant de colaborare România-China care este în derulare.

3.4.2.1 Introducere

În literatura de specialitate există un mare interes pentru studiul unor sisteme de producere a energiei electrice din surse regenerabile cu putere și turație redusă în regim cuplat la rețea sau în regim autonom. Utilizarea generatoarelor asincrone cu rotorul în colivie este o soluție avantajoasă datorită performanțelor dinamice bune, lipsa periilor, lipsa unei surse suplimentare de alimentare în curent continuu, costuri de întreținere reduse, etc [Wan 05], [Mun 00]. Cuplarea directă între turbină și generator reduce zgomotul, crește randamentul și densitatea de putere.

O problemă care apare este variația în limite destul de largi a vitezei turbinei dată de circulația maselor de aer și de variația sezonieră sau multianuală a debitelor de apă pe râurile mici. Utilizarea turbinelor reglabile crește mult costul sistemului. În această situație generatorul asincron clasic nu se comportă destul de bine, fiind necesar un convertor static de frecvență de putere cel puțin egală cu a generatorului, care să permită circulația bidirecțională a puterii [Mir 07], [Nai 05], [Tam 99], [Zhe 09]. Prezența acestui convertor determină variații de tensiune și injectează armonici superioare în curentul de sarcină. Tensiunea indusă este puternic dependentă de turația turbinei, valoarea capacității condensatoarelor de excitație și valoarea curentului de sarcină [Wan 05], [Sey 09].

Mașina asincronă cu două înfășurări trifazate statorice, una de excitație și alta principală pentru alimentarea sarcinii, având același număr de perechi de poli, bobinate în unul sau două straturi și rotorul cu colivie normală poate să facă față cerințelor la viteze variabile de valoare redusă și curenți de sarcină ce variază într-un domeniu larg [Mir 07]. Un avantaj esențial dat de reducerea necesarului de putere reactivă din înfășurarea principală, se poate obține prin defazarea spațială a celor două înfășurări [Tad 08], [Olo 00], [Olo 08], [Yon 09]. Cercetările cu privire la acest tip de generator au revenit în actualitate după creșterea accentuată a prețului magneților permanenți și limitarea exporturilor de către țările ce dețin rezerve mari de pământuri rare [Gop 93], [Rob 05]. În plus față de această conjunctură generatoarele sincrone cu magneți permanenți mai au și alte dezavantaje care nu sunt de neglijat: construcția complicată și tehnologia insuficient pusă la punct; pulsațiile de cuplu care pot înrăutăți condițiile de pornire mai ales în cazul turbinelor nereglabile; riscul de demagnetizare datorită temperaturilor ridicate, răcirea fiind deficitară la turații reduse; din cauza turației scăzute numărul de poli este ridicat rezultând un consum mărit de magneți permanenți; imposibilitatea reglării câmpului inductor cu variația sarcinii; cuplu de frânare de urgență în scurtcircuit de valoare redusă [Wil 97], [Bol 06], [Bud 03]. Avantajele principale ale generatorului asincron cu dublă înfășurare statorică sunt posibilitatea de control foarte bună în domeniul vitezelor mici și foarte mici și flexibilitatea caracteristicilor externe. Fluxurile produse de cele două înfășurări statorice și de curenții din barele rotorice se închid pe aceleași porțiuni ale miezului magnetic statoric și rotoric. Din această cauză fenomenele de saturație sunt mult mai complicate decât la mașina asincronă cu o singură înfășurare statorică. Complexitatea calculului impune utilizarea metodei elementului finit pentru proiectare și verificare a rezultatelor obținute prin proiectarea optimală.

Metodele standard sau avansate de control vectorial al mașinilor asincrone necesită valori precise ale parametrilor mașinii utilizate în algoritmul de control. Metodele clasice de identificare a parametrilor mașinii din încercări în sarcină necesită în general un convertor de putere, un senzor de viteză și cuplarea mecanică cu o mașină de încărcare. Pentru identificarea parametrilor, în

referința [Rai 02] se propune metoda algoritmilor genetici din încercarea tranzitorie de pornire în gol. Compararea între forma de undă a curentului de pornire și a curentului simulat și compararea vitezelor în cele două cazuri se utilizează în determinarea parametrilor. Metoda necesită achiziționarea formelor de undă în regim tranzitoriu a vitezei, curenților și tensiunilor. Totuși, metodele de identificare a parametrilor mașinilor rotative asincrone multifazate, în domeniul timp, sunt comparate în [Riv 12] cu o aproximare destul de bună. În cercetările efectuate s-a propus o metodă nouă de identificare optimală a parametrilor mașinii asincrone cu două înfășurări statorice [11] utilizând numai echipamente de măsură industriale (voltmetru, ampermetru, wattmetru) efectuând două probe standard (gol și scurtcircuit în două faze). Această metodă nu necesită cuplare mecanică cu o mașină de încărcare și nu este necesară măsurarea vitezei, încadrându-se în erorile de măsurare.

Sistemul de conversie a energiei propus permite transferul de energie activă și reactivă către rețeaua de curent continuu prin ambele înfășurări ale generatorului la o putere și un cost redus al convertoarelor. Astfel înfășurarea principală a DSWIG, plasată în 2/3 din creștăturile mașinii este conectată printr-un convertor PWM având în jur de 50% din puterea generatorului. Înfășurarea auxiliară plasată în 1/3 din creștăturile mașinii este conectată la un capacitor trifazat și prin intermediul unui redresor cu diode (având tot 50% din puterea generatorului) la rețeaua de curent continuu. La turații reduse ale turbinei, doar înfășurarea principală debitează putere fiind controlată de inverter, dar la viteze mari și înfășurarea auxiliară începe să livreze energie activă în magistrala de curent continuu. Această configurație a sistemului permite extragerea optimă a puterii (energiei) atât la viteze reduse cât și la viteze ridicate, la un cost inițial scăzut și un randament al conversiei energiei satisfăcător.

3.4.2.2 Generatoare electrice asincrone cu două înfășurări statorice (DSWIG): topologii noi propuse

În literatură [Bud 03] se prezintă numeroase scheme de conectare a excitației atât pentru generatoarele asincrone clasice cât și pentru cele cu două înfășurări statorice. Ca surse de energie reactivă se utilizează condensatoare, compensatoare sincrone sau convertoare statice (punți cu diode, redresoare sau invertoare). În scopul creșterii utilizării înfășurărilor DSWIG, se propune o schemă nouă care conține un redresor activ (inverter) și o punte necomandată cu diode, ambele dimensionate pentru jumătate din puterea nominală (figura 3.4.2.1). Cu această topologie ambele înfășurări sunt capabile să vehiculeze putere activă și putere reactivă pentru mașină. La viteză redusă doar înfășurarea principală transmite putere activă către rețeaua de curent continuu prin intermediul convertorului PWM, în timp ce la viteze ridicate se transferă o parte a puterii active către această rețea și prin intermediul înfășurării auxiliare.

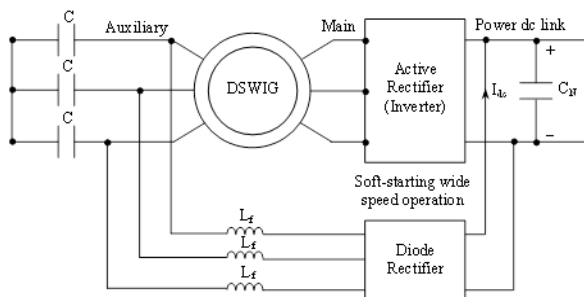


Fig. 3.4.2.1. Sistem de conversie cu turație variabilă a energiei eoliene și hidraulice propus. [Tut 14d].

Întreaga energie produsă de generatorul asincron este debitată în circuitul de curent continuu, în timp ce în figura 3.4.2.2 o parte a energiei este debitată direct din înfășurarea auxiliară unor consumatori de curent alternativ nepretențioși, și în acest caz redresorul cu diode poate fi eliminat. În aplicațiile eoliene consumatorii nepretențioși vor fi conectați numai când puterea disponibilă a sistemului este mai mare decât 50% din puterea nominală, ceea ce înseamnă că viteza turbinei trebuie să depășească 80% din viteza nominală.

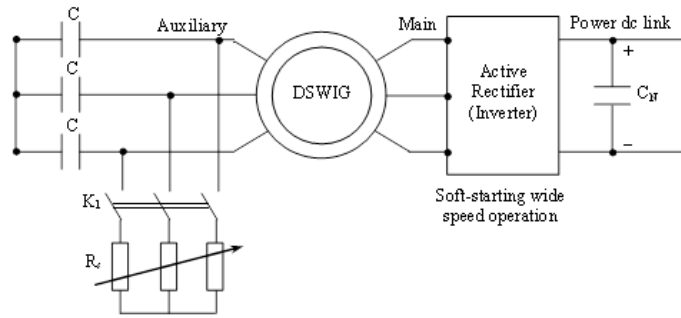


Fig. 3.4.2.2. Soluția propusă pentru consumatori de curent alternativ nepretențioși. [Tut 14d].

3.4.2.3. Modelul analitic al DSWIG

Generatorul de inducție cu două înfășurări are o greutate și un volum mai mare decât generatorul de inducție clasic în cazul general, dar în cazul turației și sarcinii variabile întâlnite la antrenarea cu turbine eoliene sau hidraulice, randamentul și costul total al mașinii și convertorului static este mai bun pentru DSWIG. Domeniul în care viteza de rotație poate să varieze depinde și de valoarea capacității bateriei de condensatoare.

În modelul dinamic al DSWA parametrii înfășurării de excitație și ai înfășurării rotorice sunt raportați la înfășurarea principală [Mul 94]. Ecuațiile tensiunilor într-un sistem de referință staționar sunt prezentate în continuare:

$$\underline{U}_m = R_m \cdot \underline{I}_m + \omega_1 \cdot \underline{\Psi}_m, \quad (3.4.2.1)$$

$$\underline{U}_e = R_e \cdot \underline{I}_e + \omega_1 \cdot \underline{\Psi}_e, \quad (3.4.2.2)$$

$$\underline{U}_r = R_r \cdot \underline{I}_r + (\omega_1 - \omega_r) \cdot \underline{\Psi}_r, \quad (3.4.2.3)$$

$$\underline{\Psi}_m = L_m \cdot \underline{I}_m + L_{me} \cdot \underline{I}_e + L_{mr} \cdot \underline{I}_r, \quad (3.4.2.4)$$

$$\underline{\Psi}_e = L_e \cdot \underline{I}_e + L_{me} \cdot \underline{I}_m + L_{mr} \cdot \underline{I}_r, \quad (3.4.2.5)$$

$$\underline{\Psi}_r = L_r \cdot \underline{I}_r + L_{mr} \cdot (\underline{I}_m + \underline{I}_e), \quad (3.4.2.6)$$

unde indicii m, e și r se referă la variabilele asociate înfășurărilor principală, de excitație și rotorică, ω_1 este pulsația în înfășurarea principală, ω_r viteza rotorică, L_{mr} și L_{me} sunt inductivitățile mutuale între înfășurarea principală și cea de excitație respectiv rotorică, iar inductivitățile celor trei înfășurări și curentul de magnetizare vor avea expresiile:

$$L_m = L_{\sigma m} + L_{me} + L_{mr}, \quad (3.4.2.7)$$

$$L_e = L_{\sigma e} + L_{me} + L_{mr}, \quad (3.4.2.8)$$

$$L_r = L_{\sigma r} + L_{mr}, \quad (3.4.2.9)$$

$$\underline{I}_0 = \underline{I}_r + \underline{I}_m + \underline{I}_e, \quad (3.4.2.10)$$

cu σ notându-se inductivitatea de dispersie. Din modelul matematic se poate deduce schema electrică echivalentă (figura 3.4.2.3).

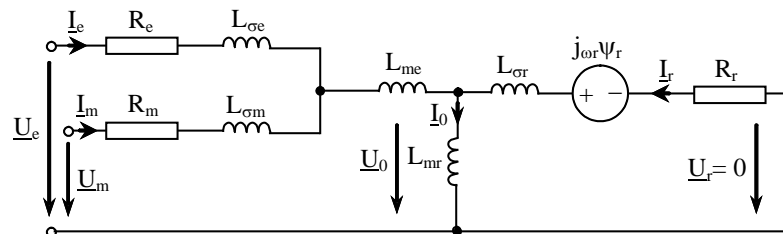


Fig. 3.4.2.3. Schema electrică echivalentă a DSWIG [Tut 13b].

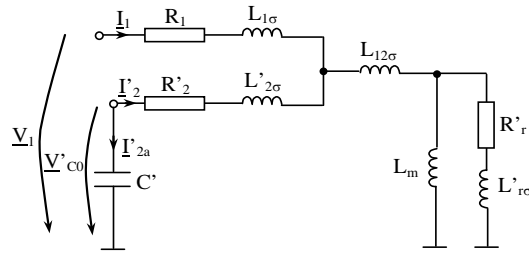


Fig. 3.4.2.4. Circuitul echivalent al schemei din figura 3.4.2.3, în gol, cu condensator în înfășurarea auxiliară [Tut 14d].

În circuitul echivalent al DSWIG prezentat în figura 3.4.2.4 se utilizează indicele '1' pentru înfășurarea principală, '2' pentru înfășurarea auxiliară și 'r' pentru înfășurarea rotorică. Înfășurarea auxiliară și cea rotorică au fost raportate la înfășurarea principală [Tut 13a], [Tut 13b], [Tut 14e].

3.4.2.4. Optimizarea proiectării

Problema generală de optimizare poate fi împărțită în trei sub-probleme cvasi-independente: alegerea funcției obiectiv, alegerea variabilelor de optimizare, a modelului mașinii și apoi rezolvarea problemei. Proiectarea optimă a generatorului DSWIG este supusă unor criterii multi-obiectiv și unor constrângeri constructive cum ar fi: reducerea costului inițial, reducerea dimensiunii și a masei generatorului, îmbunătățirea randamentului și limitarea temperaturii componentelor la un nivel acceptabil. Criteriile multi-obiectiv trebuie să fie agregate într-o singură funcție obiectiv dacă scopul proiectării este obținerea unei soluții unice. Aceasta ar putea fi o funcție de cost total care include câte o penalizare pentru fiecare constrângere nesatisfăcută. Funcția obiectiv C_t are expresia [Tut 06], [Tut 13b]:

$$C_t = C_i + C_E + C_a + C_p, \quad (3.4.2.11)$$

unde C_i este costul inițial, C_E este costul cu energia de pierderi, C_a un cost adițional care ține cont de gabaritul mașinii și în final C_p este costul de penalizare. S-au considerat 16 variabile de optimizare pentru a putea urmări mașina de la dimensiunile principale până la dimensiunile creștăturilor. S-au luat în calcul următoarele prețuri pentru materiale: cuprul 10 USD/kg, aluminiul 2.1 USD/kg și fierul 1.4 USD/kg. Durata medie de funcționare pe an s-a considerat de 3000 de ore. Probabilitatea de a ajunge la optimul global folosind algoritmul Hooke Jeeves (HJ) ar putea fi mărită prin pornirea algoritmului de mai multe ori din diferite puncte ale spațiului variabilelor de optimizare. Câteva exemple de rezultate ale optimizării HJ până la cea mai bună variantă proiectată sunt prezentate în figurile 3.4.2.5, 3.4.2.6 și 3.4.2.7. Cu ajutorul programului de optimizare s-a urmărit variația costului inițial și a costului total (pentru 10 ani de funcționare) al mașinii pentru număr de poli diferit: 8, 12, 16, 18, 20 și 24. Aceste costuri împreună cu alte caracteristici sunt prezentate în tabelul 3.4.2.1 [Tut 13b]. Analizând rezultatele obținute se constată că cea mai ieftină mașină este cea cu 20 de poli, cea care are costul total cel mai redus este cea cu 16 poli (care are și randamentul cel mai mare), cea mai ușoară este mașina cu 24 de poli, factorul de putere cel mai bun îl are mașina cu 8 poli, etc. În funcție de datele comparative prezentate pentru realizarea modelului experimental s-a ales mașina cu 8 poli.

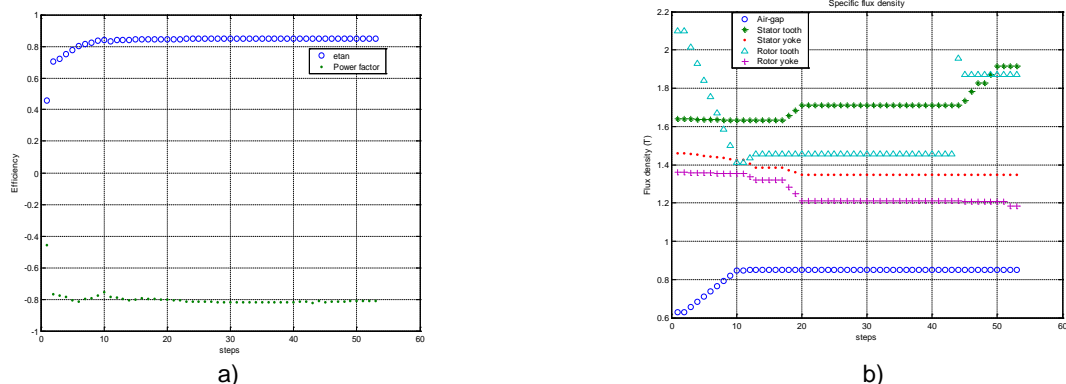
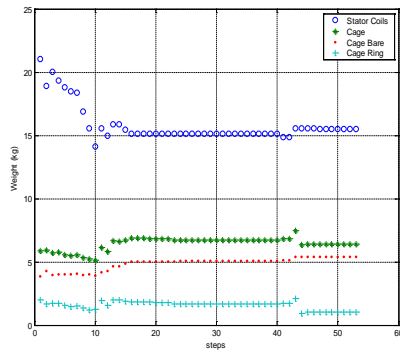
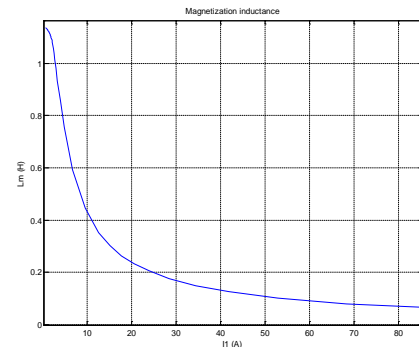


Fig. 3.4.2.5. a) Randamentul și factorul de putere; b) inducția magnetică în diferite zone ale mașinii [Tut 15a].

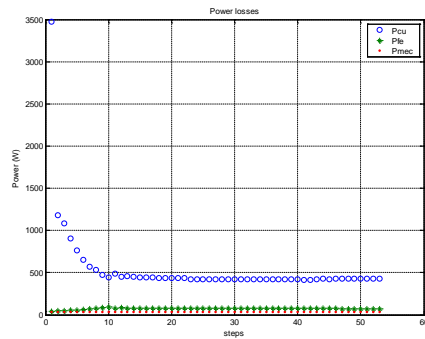


a)

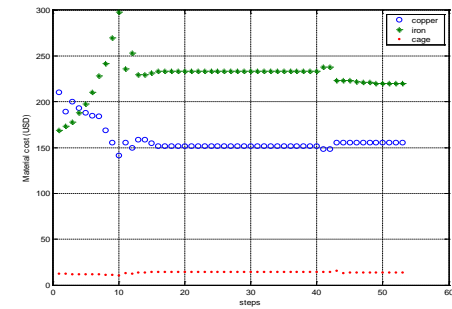


b)

Fig. 3.4.2.6. a) Masa; b) inductanța de magnetizare [Tut 15a].



a)



b)

Fig. 3.4.2.7. a) pierderile de putere; b) costul materialelor [Tut 15a].

Tabelul 3.4.2.1 Studiu comparativ al DSWIG în funcție de numărul de poli

Numărul de poli		2p	8	12	16	18	20	24
Frecvența de bază	f_n [Hz]		15	24	32.5	36.5	40.5	49
Costul de fabricație	i_cost [USD]		512.8	425.1	399.1	398.8	384.7	403.3
Funcția obiectiv (costul total)	t_cost [USD]		1478.8	1385.3	1355.8	1367.7	1399.7	1431.2
Randamentul	etan		84.83	84.9	84.95	84.79	84.18	84.01
Factorul de putere	cosphin		0.81	0.75	0.73	0.72	0.7	0.69
Masa materialelor active	M [kg]		88.8	68	58.4	55.4	51.8	48.8
Timpul de optimizare	sim_time [s]		10	23.8	12.8	8.9	6.8	10.2
Întrefierul	hag [mm]		0.35	0.35	0.35	0.35	0.35	0.35
Curentul nominal	I_{1n} [A]		5.61	6.05	6.19	6.31	6.54	6.56
Diametrul exterior statoric	D_{so} [mm]		386	409	484	519	533	594
Diametrul interior statoric	D_{si} [mm]		286.3	319.6	393.9	433.4	450.1	519.7
Lungimea pachetului de tole statoric	l_c [mm]		139.3	107.1	72.0	65.1	60.2	55.3
Inducția în întrefier	B_{agsp} [T]		0.85	0.85	0.83	0.81	0.81	0.73
Pătura de curent	elsp [kA/m]		16.22	15.31	15.94	15.0	14.45	13.07

Proiectarea optimă a scos în evidență faptul că performanțele și caracteristicile DSWIG depind de numărul perechilor de poli. Utilizarea DSWIG poate reduce puterea aparentă a inverterului (redresorului activ) cu 43% până la 28% (la 8, respectiv, 24 poli), atunci când convertorul este plasat în serie cu înfășurarea de excitație. Reducerea de putere aparentă a convertorului este mai mică atunci când numărul de poli este în creștere, deoarece inverterul trebuie să transfere o putere reactivă tot mai mare. Avantajul acestei scheme este practic eliminat în cazul în care se folosește un redresor necomandat la puterea nominală și este nevoie în plus și

de un convertor DC-DC ridicător de tensiune. Pentru cazul în care convertorul este plasat în înfășurarea principală reducerea puterii aparente a acestuia este mai mică decât în cazul precedent (19% până la 30.6%), valorile mai mari obținându-se la mașinile cu număr mai mare de poli. În acest caz nu mai este nevoie de un al doilea convertor, ci doar de o baterie de condensatoare plasată în înfășurarea de excitație. Dacă generatorul DSWIG este realizat la aceleași dimensiuni cu unul normal cu o singură înfășurare statorică, randamentul care se obține este cu 5% mai redus putând apărea probleme de răcire. Randamentul poate fi menținut doar cu prețul creșterii dimensiunilor DSWIG cu până la 10% în diametru care determină o creștere de până la 29% în ceea ce privește masa respectiv cu 35% a costului materialelor active. Din punct de vedere economic utilizarea DSWIG se justifică doar la puteri mici, costul invertorului fiind în acest caz cu peste 50% mai mare decât costul mașinii. Calculul analitic și caracteristicile obținute prin metoda de identificare optimă a parametrilor sunt prezentate în [Tut 17].

3.4.2.5. Analiza cu elemente finite 2D FEM

Determinarea performanțelor mașinii de inducție cu două înfășurări statorice cu ajutorul metodei elementelor finite ține cont de saturația miezului magnetic și de pierderile în fier. Modelul de analiză cu elemente finite oferă o acuratețe foarte bună în regim staționar, rezultatele obținute putând fi folosite la dimensionarea analitică și proiectarea optimală a mașinii. Saturația mașinii de inducție crește la frecvență scăzută (cazul cuplării directe a generatorului cu turbina), fără creșterea semnificativă a pierderilor în fier. Crestăturile DSWIG trebuie să aibă o secțiune mai mare pentru că în ele sunt laturile de bobină ale celor două înfășurări, caz întâlnit și la mașinile ieftine la care înfășurarea statorică de cupru se înlocuiește cu una de aluminiu.

S-a utilizat programul FEMM 4.2, geometria, frontierele, proprietățile de material, condițiile de simetrie, repartitia înfășurărilor, distribuția curenților în crestături fiind construită cu ajutorul unui program scris în Matlab care apelează funcțiile din programul de analiză cu elemente finite. Atunci când se aplică la mașini electrice, problema de calcul cu elemente finite se reduce de obicei la un pol sau la o pereche de poli cu ajutorul unor condiții de frontieră și simetrie, pentru a reduce timpul de calcul. Analiza s-a făcut pentru o jumătate de mașină (4 poli). În plus, de multe ori este suficientă reducerea problemei la una în plan 2D, și se poate utiliza analiza cu elemente finite (FEA). Rețeaua de discretizare are 47758 de noduri și 95129 elemente [Tut 13a]. Analiza FEM în regim staționar fără sarcină (curent zero în rotor), având curent continuu în înfășurările conectate în stea, conduce la următoarele valori ale curenților $I_{Ae} = I = -2I_{Be} = -2I_{Ce}$. Distribuția totală a inducției magnetice pentru 4 poli este prezentată în figura 3.4.2.8 pentru curentul de excitație și în figura 3.4.2.9 pentru curentul principal [Tut 13a].

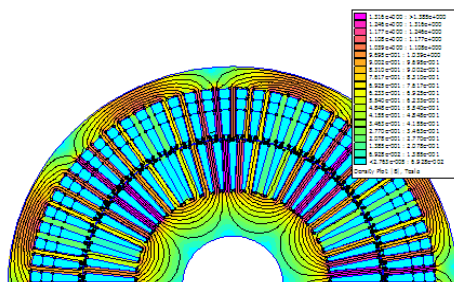


Fig. 3.4.2.8. Inducția magnetică la $I_{Ae}=4.5A$ și $I_{Am}=0$ [Tut 13a].

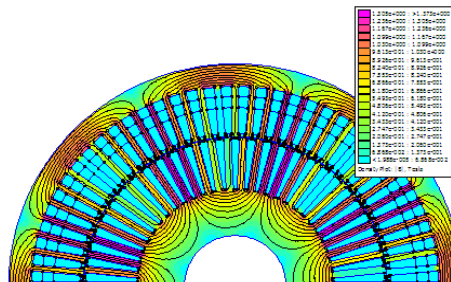


Fig. 3.4.2.9. Inducția magnetică la $I_{Am}=4.5A$ și $I_{Ae}=0$ [Tut 13a].

Figura 3.4.2.10 prezintă inducția magnetică în întrefier (produsă de curenții principal și de excitație) iar în figura 3.4.2.11 sunt reprezentate armonicile de spațiu ale acesteia. Fluxurile de dispersie (A_e produs de curentul de excitație în înfășurarea de excitație și A_m produs în înfășurarea principală) sunt reprezentate în figura 3.4.2.12. Figura 3.4.2.13 prezintă dependența inductanțelor de curent (L_{e1} inductanța de fază a înfășurării de excitație, L_{m1} inductanța de fază a înfășurării de principale, L_{ed} inductanța de excitație în axa d, L_{mq} inductanța principală în axa q, L_{em} , L_{me} inductanțele de cuplaj între înfășurarea principală și cea de excitație calculate în două moduri:

ținând cont de fluxul de dispersie produs de curentul de excitație în înfășurarea principală raportat la curentul de excitație respectiv fluxul de dispersie produs de curentul principal în înfășurarea de excitație raportat la curentul principal). Diferența dintre L_{em} și L_{me} este mai mică de 0.3% ceea ce se încadrează în eroarea admisibilă la calculul cu elemente finite [Tut 13b], [Tut 14e].

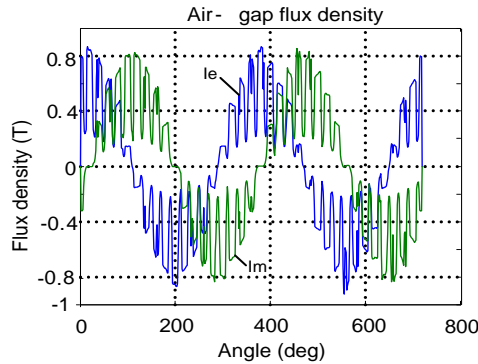


Fig. 3.4.2.10. Componenta normală a inducției magnetice în întrefier pentru DSWIG cu 8 poli [Tut 13a].

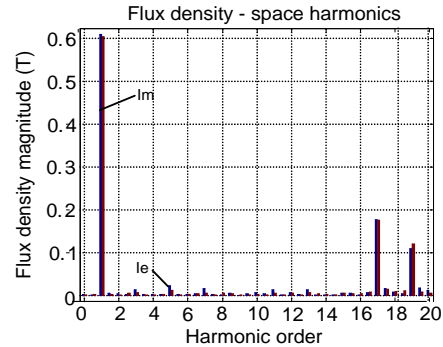


Fig. 3.4.2.11. Armonicile de spațiu ale inducției în întrefier [Tut 13a].

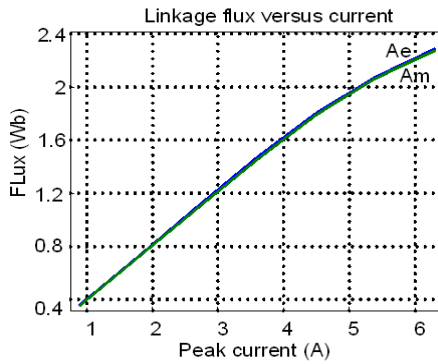


Fig. 3.4.2.12. Fluxurile de dispersie produse de curentul de excitație [Tut 13a].

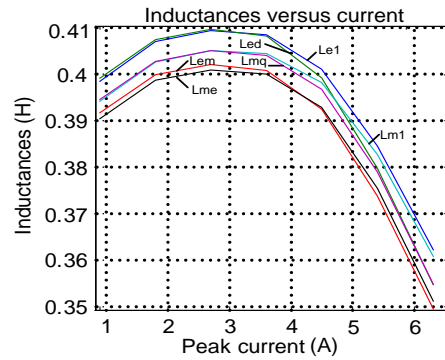


Fig. 3.4.2.13. Dependența inductanțelor în funcție de curent [Tut 13a].

3.4.2.6. Modelul controlului și simulării dinamice

O schemă preliminară de control, prezentată în figura 3.4.2.14a a fost implementată pentru verificarea regimului dinamic al topologiei propuse. Tensiunea înfășurării auxiliare devine mai mare decât tensiunea circuitului de curent continuu la o valoare mai mare de 80% din viteza nominală moment în care se începe transferul de putere activă dinspre înfășurarea auxiliară către rețeaua de curent continuu. Puterea în înfășurarea principală se menține constantă prin controlul tensiunii V_1 așa cum se observă în figura 3.4.2.14b [Tut 14d].

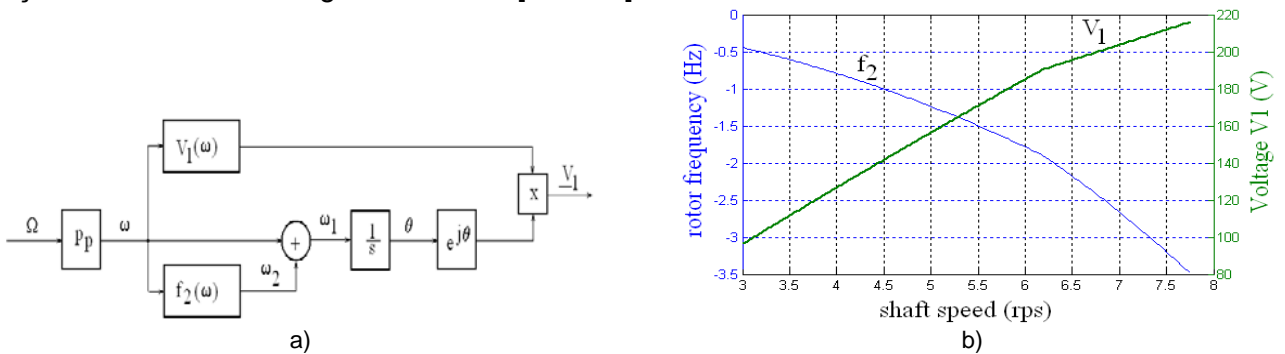


Fig. 3.4.2.14. Strategia de control: a) diagrama bloc; b) variația tensiunii V_1 și a frecvenței f_2 .

Simulările procesului dinamic au fost utilizate pentru a verifica corectitudinea strategiei de control propuse. Matricele din ecuațiile (3.4.2.12-3.4.2.14) în coordonate statorice sunt folosite pentru modelarea în regimuri tranzitorii a DSWG. Saturația inductivității principale L_m se aproximează analitic în ecuațiile (3.4.2.15-3.4.2.16) unde parametrii L_{m0} , a , b_1 , b_2 sunt dați cu ajutorul unei caracteristici, considerând valorile inductivității de magnetizare cunoscute din analiza cu elemente finite FEM [Tut 17].

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{\alpha 1} \\ \dot{I}_{\alpha 2} \\ \dot{I}_{ar} \end{pmatrix} = L^{-1} \begin{pmatrix} V_{\alpha 1} - R_1 I_{\alpha 1} \\ V_{\alpha 2} - R_2 I_{\alpha 2} \\ -R_r I'_{ar} - \omega_r \Psi'_{\beta r} \end{pmatrix} \quad (3.4.2.12)$$

$$\begin{pmatrix} \dot{I}_{\beta 1} \\ \dot{I}_{\beta 2} \\ \dot{I}_{\beta r} \end{pmatrix} = L^{-1} \begin{pmatrix} V_{\beta 1} - R_1 I_{\beta 1} \\ V_{\beta 2} - R_2 I_{\beta 2} \\ \omega_r \Psi'_{ar} - R_r I'_{\beta r} \end{pmatrix} \quad (3.4.2.13)$$

$$L = \begin{pmatrix} L_m + L_{1\sigma} + L_{12\sigma} & L_m + L_{12\sigma} & L_m \\ L_m + L_{12\sigma} & L_m + L_{12\sigma} + L_{2\sigma} & L_m \\ L_m & L_m & L_m + L_{r\sigma} \end{pmatrix} \quad (3.4.2.14)$$

$$L_m = L_{m0} \times \frac{1 + a I_0^2}{1 + b_1 I_0^2 + b_2 I_0^3} \quad (3.4.2.15)$$

$$I_0 = \sqrt{(I_{\alpha 1} + I'_{\alpha 2} + I'_{ar})^2 + (I_{\beta 1} + I'_{\beta 2} + I'_{\beta r})^2} \quad (3.4.2.16)$$

$$\begin{pmatrix} \Psi_{\alpha 1} \\ \Psi'_{\alpha 2} \\ \Psi'_{ar} \end{pmatrix} = L \times \begin{pmatrix} I_{\alpha 1} \\ I'_{\alpha 2} \\ I'_{ar} \end{pmatrix} \quad (3.4.2.17)$$

$$\begin{pmatrix} \Psi_{\beta 1} \\ \Psi'_{\beta 2} \\ \Psi'_{\beta r} \end{pmatrix} = L \times \begin{pmatrix} I_{\beta 1} \\ I'_{\beta 2} \\ I'_{\beta r} \end{pmatrix} \quad (3.4.2.18)$$

$$T_{em} = \frac{3}{2} P_1 (\Psi'_{\beta r} \times I'_{ar} - \Psi'_{ar} \times I'_{\beta r}) \quad (3.4.2.19)$$

Pe baza ecuațiilor anterioare modelul DSWG este prezentat în figura 3.4.2.15.

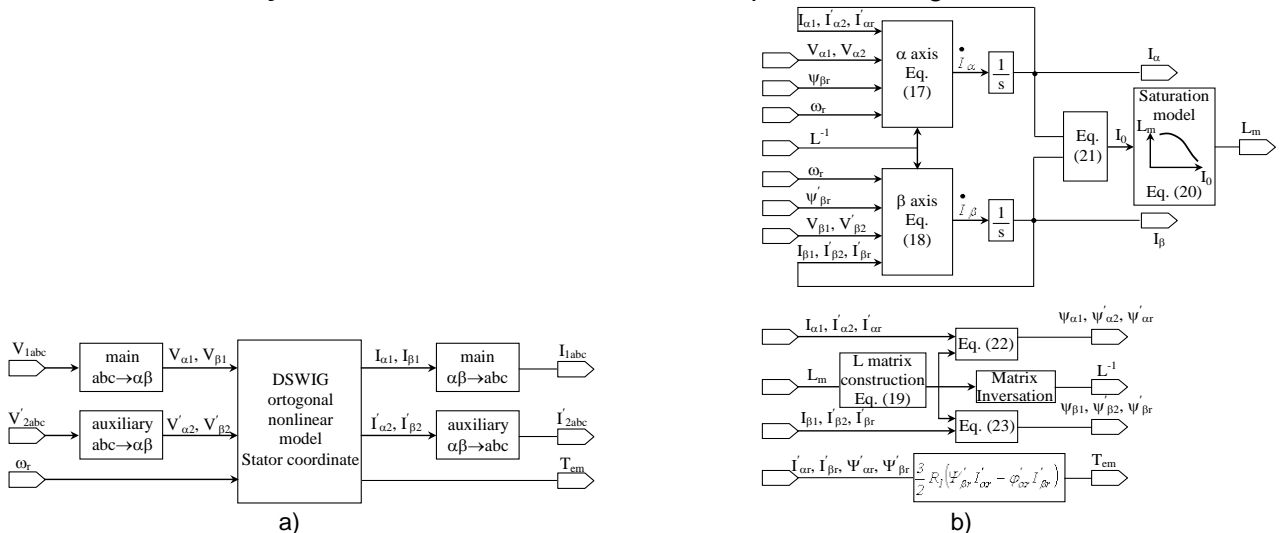


Fig. 3.4.2.15. Modelul DSWA: a) transformările ortogonale; b) modelul ortogonal nelinier.

Combinarea modelului de circuit cu modelul matematic și controlul DSWIG sunt prezentate în figura 3.4.2.16.

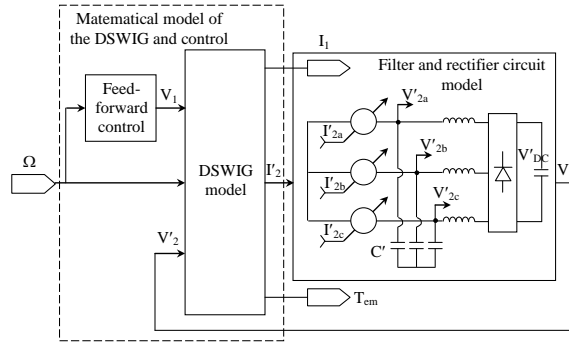


Fig. 3.4.2.16. Schema bloc a sistemului de control.

Strategia de control urmărește extragerea puterii electrice direct proporțional cu puterea a treia a vitezei arborelui generatorului. La viteză redusă doar redresorul activ este capabil să transfere putere spre rețeaua de curent continuu (figura 3.4.2.17.a). Pierderile în fier și pierderile mecanice nu sunt considerate în simulările dinamice, și în consecință randamentul, figura 3.4.2.17.b, ține cont doar de pierderile în cupru.

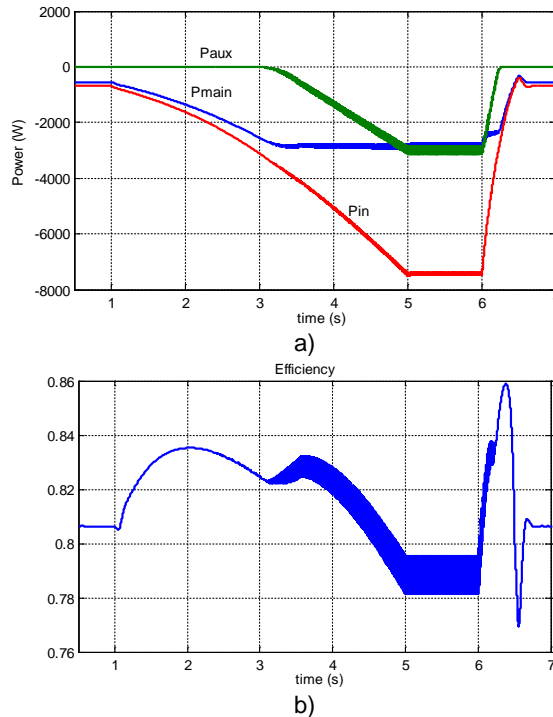


Fig. 3.4.2.17. Simularea variației puterilor (a) și a randamentului (b) [Tut 14d].

Presupunând că turbina rotește generatorul cu turație variabilă, o simulare a profilului de variație a vitezei este prezentată în figura 3.4.2.18. Pentru acest profil, în figura 3.4.2.19 se prezintă variația tensiunilor și a curenților obținuți.

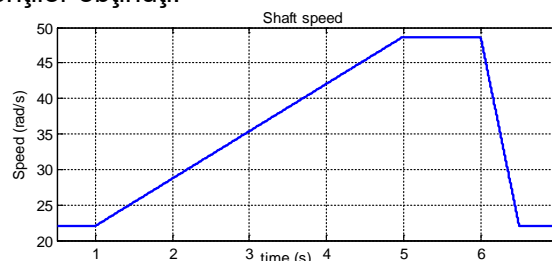


Fig. 3.4.2.18. Profilul de variație a vitezei turbinei [Tut 14d].

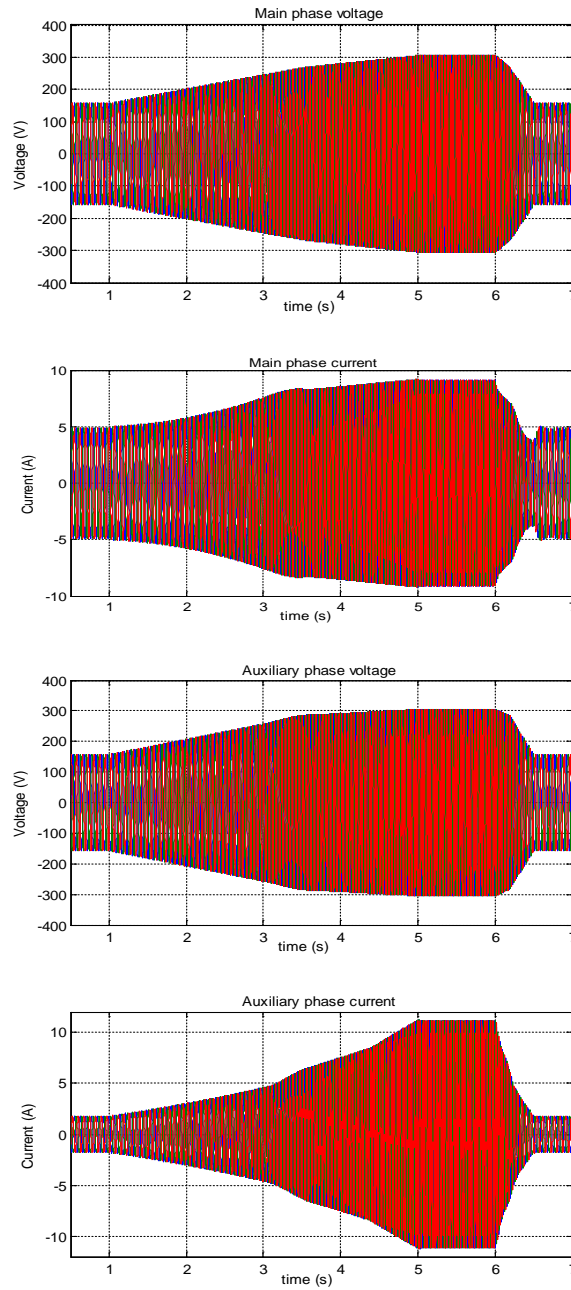


Fig. 3.4.2.19. Simularea tensiunilor și a curenților în înfășurările principală și auxiliară, la variația de viteză prezentată în figura 3.4.2.18 [Tut 14d].

În tensiunea indusă în înfășurarea principală se ia în considerare doar armonica fundamentală. Când viteza este redusă și redresorul necomandat nu este în conducție, atât curenții cât și tensiunile sunt sinusoidale. Când redresorul cu diode intră în conducție armonicile superioare apar în curentul și tensiunea din înfășurarea auxiliară, dar așa cum se observă în figura 3.4.2.20 ele apar și în curentul din înfășurarea principală pentru încărcarea nominală a înfășurării auxiliare.

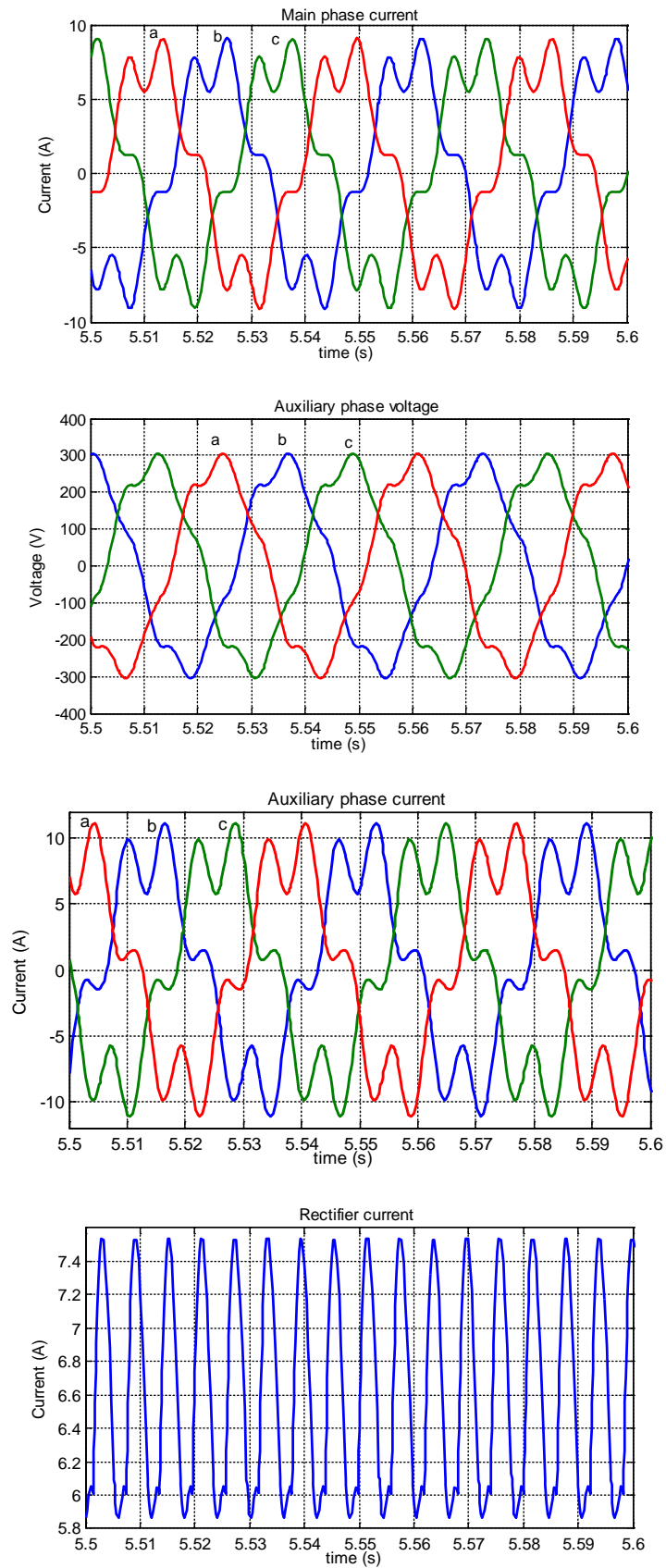


Fig. 3.4.2.20. Simularea curenților (principal, auxiliar, redresat) și forma de undă a tensiunii auxiliare (mărită) pentru puterea nominală în înfășurarea auxiliară [Tut 14d].

3.4.2.7. Rezultate experimentale

Pentru încercarea experimentală și controlul sistemului de conversie propus s-a utilizat o mașină de uz general de tip DSWIG, cu datele (6KVA, 400V/415 rpm), având două înfășurări statorice cu același număr de spire pe fază, cea principală în două straturi și cea auxiliară într-un strat. Înfășurarea principală (care ocupă 2/3 din creștături) este conectată la o rețea de curent continuu printr-un inverter cu PWM având aproximativ 50% din puterea nominală. Înfășurarea auxiliară (care ocupă 1/3 din creștături) este conectată la o baterie trifazată de condensatoare și printr-o punte redresoare necomandată cu diode (având 50% din puterea nominală) la o rețea secundară de tensiune continuă (figura 3.4.2.21). Simulările în regim staționar și dinamic arată că pentru a putea conecta redresorul necomandat la aceeași rețea de curent continuu, ar fi necesar un raport de 1.26 între numărul de spire pe fază al celor două înfășurări. Mașina DSWIG existentă s-a utilizat pentru a verifica principiul de funcționare al sistemului propus, cu înfășurarea auxiliară conectată la o rețea de curent continuu secundară, raportul între tensiunile celor două rețele fiind de 1.26. Redresorul activ și sarcina echivalentă de curent continuu, la care este conectată înfășurarea principală, s-a implementat cu ajutorul unui convertor bidirecțional industrial. Valoarea tensiunii continue în respectivul convertor este $V_{DC}=580V$.

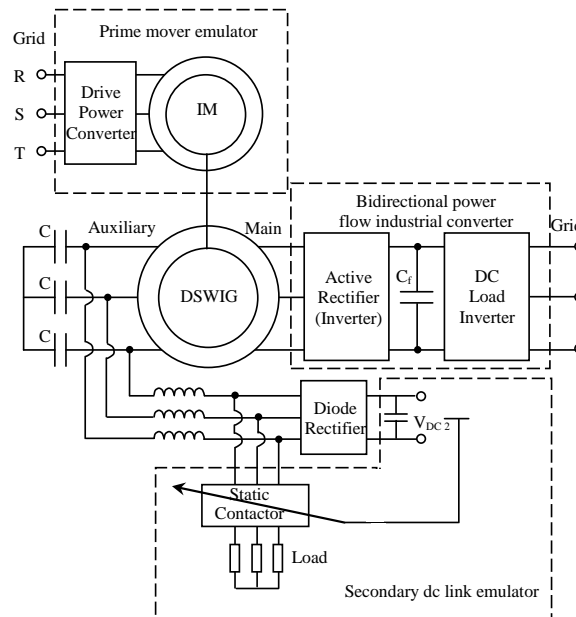


Fig. 3.4.2.21. Standul experimental folosit [Tut 14d].

Tensiunea continuă a celei de-a doua rețele, V_{DC2} , a fost aleasă de 460V considerând raportul necesar dintre tensiunile celor două rețele. Această rețea a fost creată cu ajutorul unei sarcini rezistive variabile, conectată în paralel cu puntea redresoare cu diode și controlată printr-un contactor static pentru a menține constantă tensiunea continuă a rețelei secundare (figura 3.4.2.21). Scopul încercării experimentale a fost pentru a verifica că puterea maximă disponibilă la arborele turbinei poate fi convertită, utilizând un generator de tip DSWIG, cu ajutorul schemei propuse. Armonicele de curent, introduse uzual de redresorul cu diode, nu se regăsesc utilizând această schemă, dar controlul fluxului puterilor activă și reactivă cu un singur convertor rămâne. Turbina este emulată printr-o mașină asincronă trifazată cu colivie alimentată printr-un convertor ABB ACS 800-11. Datele nominale ale prototipului sunt: puterea aparentă $S_N=6$ KVA, viteza $\Omega_N=465$ rpm, numărul perechilor de poli $p=8$, tensiunea înfășurării principale $V_N=220V$ (valoare efectivă pe fază), raportul între tensiunea înfășurării principale și a înfășurării auxiliare $k_e=24/31$. Parametrii mașinii raportați la înfășurarea principală sunt: $R_1=4.212 \Omega$; $R_2=2.49 \Omega$; $R_f=2.243 \Omega$; $X_m=1418 \Omega$; $X_{1\sigma}=0.2989 \Omega$; $X_{2\sigma}=3.9399 \Omega$; $X_{12\sigma}=7.352 \Omega$; $X_{r\sigma}=2.835 \Omega$; $L_{1\sigma}=0.9514$ mH; $L_{2\sigma}=12.5411$ mH; $L_{12\sigma}=7.4866$ mH; $L_{r\sigma}=9.0241$ mH; $L_m=0.3453$ H; $R_{fe}=1200 \Omega$. Parametrii elementelor auxiliare de circuit raportați la înfășurarea principală sunt: $C_1=133.5 \mu F$; $L_f=18$ mH; $R_f=$

0.15 Ω . În cazul pierderilor în fier s-a considerat că rezistența echivalentă a pierderilor R_{fe} este în paralel cu inductivitatea de magnetizare L_m . Pierderile mecanice la viteza nominală sunt $P_{mec}=58$ W. Funcționarea generatorului are loc pentru un domeniu larg de variație a vitezei. Secțiunile înfășurărilor mașinii existente nu sunt similare cu ale modelului propus în strategia de control și puterea disponibilă va fi doar 4kW. Rezultatele experimentale, prezentate în figura 3.4.2.22.a, arată că generatorul DSWIG, în configurația propusă, poate să dubleze puterea debitată la viteze mari, puterea în înfășurarea principală rămânând constantă, în timp ce puterea din înfășurarea auxiliară crește cu viteza. Este de remarcă faptul că prin utilizarea unui redresor activ, producerea de energie se face într-un domeniu larg de viteze. Capabilitatea generatorului de a extrage putere (la un curent nominal dat de 6.2A pentru înfășurarea principală) este mai mare decât puterea disponibilă la arborele turbinei.

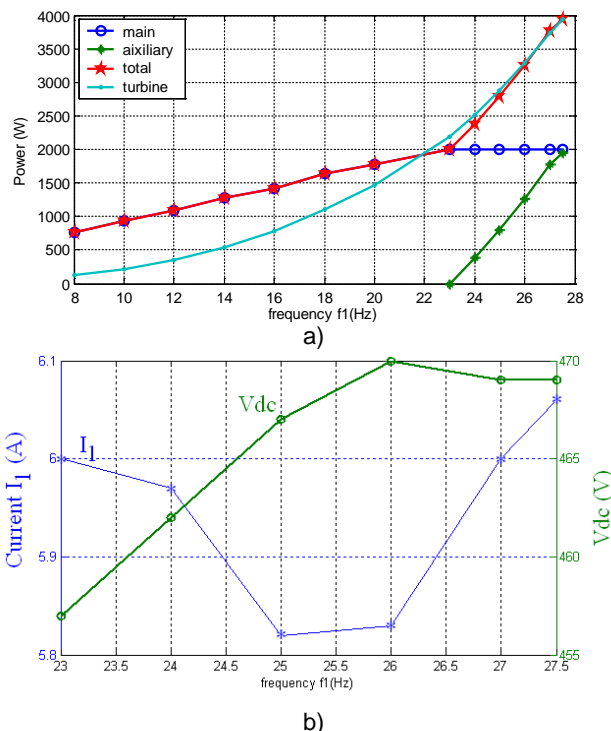


Fig. 3.4.2.22. Rezultate experimentale [Tut 14d].

Variațiile mici ale tensiunii auxiliare redresate, figura 3.4.2.22b, arată că este posibil să debiteze putere în rețeaua de curent continuu de tensiune constantă. Se observă de asemenea că în înfășurarea principală curentul rămâne constant. Mai multe rezultate experimentale au fost prezentate în [Tut 17].

3.4.2.8 Concluzii

Prin proiectarea optimă s-a putut constata puternica dependență a parametrilor și performanțelor DSWIG în funcție de numărul polilor. Ținând cont de acest fapt, generatorul cu 16 poli este considerat optim, deoarece are un randament maxim, costul materialelor active este apropiat de cel minim, iar factorul de putere (care influențează costul convertorului de putere) este acceptabil. Varianta de topologie propusă pentru generatorul DSWIG este atractivă și prin prisma valorilor parametrilor obținuți (randamentul de 84% la un cuplu de 170 Nm și o viteză de rotație de 250 rpm cu puterea de 3kW pentru un cuplu specific de 1.93 Nm/kg la mașina cu 8 poli și 3.48 Nm/kg la cea cu 24 de poli). Printr-o proiectare optimă dedicată pentru DSWIG se vor putea reduce dimensiunile de gabarit cu câteva procente, iar noile topologii de înfășurări și controlul inverterului pot aduce îmbunătățiri suplimentare ale conceptului de sistem cu DSWIG pentru centralele eoliene sau microhidrocentrale [Tut 17].

Considerarea saturației miezului magnetic este deosebit de importantă pentru sistemele cu generator asincron și baterie de condensatoare, altfel în control apare instabilitatea în funcționare.

Fenomenul de saturație, este cu atât mai important la sistemele amintite, când funcționarea are loc la turație variabilă. În această situație trebuie apelat la modelarea fenomenului printr-o aproximare analitică, ținându-se cont de inductanța de magnetizare tranzitorie și de cea în regim staționar. În aplicația noastră este nevoie de un timp de simulare mai îndelungat, fără fenomene tranzitorii rapide. S-a utilizat o versiune simplificată a modelului în coordonate statorice unde s-a luat în considerare doar inductanța de magnetizare în regim staționar. Rezultatele modelului și ale simulării sunt totuși exacte, în ciuda diferenței mari dintre inductanța de magnetizare tranzitorie și de cea în regim staționar, deoarece amplitudinea curentului de magnetizare este constantă pe fundamentala curenților și tensiunilor. Simularea dinamică demonstrează că generatorul DSWIG poate porni și funcționa cu sarcină maximă fără nici un control și de asemenea controlat de convertizor. Controlerul activ este de asemenea utilizat pentru reglarea cantității de energie activă în așa fel încât să se obțină energia maximă pentru o anumită viteză dată a vântului. Principalul avantaj al DSWIG este capacitatea sa mai bună de a funcționa la viteză variabilă redusă [Tut 17].

S-a obținut o metodă optimală de identificare a parametrilor, care poate fi aplicată atât mașinii clasice cu rotor în colivie și o singură înfășurare statorică cât și pentru DSWIG. Estimarea se realizează pe baza schemei echivalente a DSWIG și câteva încercări simple standardizate, fără să fie necesară cuplarea mașinii pentru încărcare în sarcină sau vreun senzor mecanic. Algoritmul genetic utilizat (având 100 de generații și dimensiunea fiecărei populații de 200) se bazează pe probele experimentale de funcționare în gol și în scurtcircuit, transferând de la o generație la alta cele mai bune rezultate având o rată a mutațiilor de 0.5%. Modelul utilizează parametrii constanți, așa cum sunt necesari în aplicațiile practice. Variația inductivității de dispersie cu curentul de magnetizare poate fi determinată dintr-o probă de funcționare în gol la valori ridicate ale tensiunii. În timpul identificării parametrilor, viteza mașinii este, de asemenea, o estimare în fiecare punct de încercare în gol. Dacă domeniul de variație al vitezei este redus atunci componentele pierderilor mecanice prin frecare columbiană, prin frecare vâscoasă și prin frecare cu aerul a ventilatorului, luate separat, au o precizie de calcul redusă, dar suma acestor componente este mult mai precisă [Tut 17].

Simulările digitale și rezultatele experimentale obținute demonstrează că redresorul activ cu putere redusă, capabil să acopere doar puterea activă nominală, ar putea fi utilizat pentru un interval de viteză mare atunci când puterea turbinei crește proporțional sau mai mult cu viteza. Puterea reactivă este produsă numai de bateria de condensatoare la viteza nominală, iar redresorul activ este capabil să asiste DSWIG prin furnizarea de putere reactivă la viteze mici. Configurația propusă este capabilă să funcționeze în regim autoexcitat la sarcină maximă și viteză nominală a vântului, în regim de avarie (fără electronica de putere) cu aceiași baterie de condensatoare, iar la putere redusă și o viteză redusă a vântului, funcționează cu ceva probleme de stabilitate. Creșterea cu 50% a capacității bateriei de condensatoare va îmbunătăți stabilitatea sistemului și capabilitatea de funcționare în regim autoexcitat a DSWIG la viteză mică a vântului [Tut 17].

Sistemul de producere a energiei cu DSWIG propus utilizează un convertor static cu o putere aparentă mai mică decât a generatorul. Raportul obținut dintre puterea convertorului și puterea generatorului este de 50% în acest caz, similar cu cel de la sistemele de generare cu mașini asincrone dublu alimentate de tip DFIG. Avantajul DSWIG este dat de lipsa perilor și posibilitatea de utilizare a lui în aplicații de producere a energiei la turație variabilă. Este posibilă extragerea cu ajutorul DSWIG a unei puteri chiar și la viteze reduse a turbinei, care nu poate fi obținută când generatorul este conectat direct la rețea sau când generatorul are înfășurarea de excitație înseriată cu inverterul și înfășurarea principală înseriată cu un redresor cu diode. De asemenea varianta de sistem cu DSWIG aleasă este avantajoasă când sarcina alimentată nu este pretențioasă și redresorul nu mai este necesar. Inverterul plasat în înfășurarea principală permite circulația atât a puterii active cât și a celei reactive, aceasta din urmă fiind necesară pentru magnetizarea generatorului la viteze reduse atunci când bateria de condensatoare nu poate produce suficientă putere reactivă. A fost găsită și o metodă de determinare a inductanței de magnetizare saturate a DSWIG. Considerațiile teoretice au fost validate prin simulare și verificate prin încercări experimentale. Rezultatele complete ale cercetărilor efectuate pe această temă sunt prezentate în [Tut 17].

II. PLANUL DE EVOLUȚIE ȘI DEZVOLTARE A CARIEREI PROFESIONALE, ȘTIINȚIFICE ȘI ACADEMICE

Direcțiile de dezvoltare a carierei în plan profesional, științific și academic se bazează pe experiența acumulată în cei 29 de ani de activitate din care 27,5 ani în învățământul superior. Voi încerca să schițez doar câteva direcții posibile de interes, care mă preocupă în prezent și care cred că vor avea o dezvoltare spectaculoasă în următorii 10 ani.

Nu cantitatea de energie electrică generată sau consumată este măsura dezvoltării unei societăți, ci randamentul cu care se produce și eficiența cu care este ea folosită. Domeniul **eficienței energetice** este un subiect mult discutat și reglementat la nivel mondial și național în ultima perioadă, stabilindu-se prin lege măsuri coercitive pentru cei care consumă sau produc ineficient.

Conceptele **smart city**, **Internet of Things**, **smart grids**, **smart metering** of resources, **smart home** and **active buildings**, **electromobility**, **Industry 4.0** sunt câteva exemple de direcții noi, unde este nevoie de aportul cercetării în domeniul ingineriei electrice.

Criza declanșată odată cu restricționarea de către China a exporturilor de pământuri rare, pentru producerea **magneților permanenți** de energii înalte, și creșterea exponențială a prețului acestor magneți necesită o reorientare în subiectele de cercetare care vizează servomotoarele și generatoarele ce foloseau respectivele materiale.

Preocuparea marilor companii din domeniul tehnologiilor de vârf pentru crearea de **vehicule autonome** fără conducător care se pot deplasa pe sol, în subsol, pe apă sau prin aer, este un domeniu care deschide multe perspective în ceea ce privește sistemele de tracțiune electrică. Același lucru se poate afirma despre viitoarele **trenuri de mare viteză** ce se deplasează în tuburi vidate amplasate pe sol sau în tuneluri subterane și submarine care vor crea o adevărată revoluție în domeniul transporturilor.

Astfel creșterea randamentului de producere a energiei electrice din diferite surse prin utilizarea unor generatoare ce funcționează la turație variabilă și au randamente ridicate, reducerea consumului de energie electrică activă prin utilizarea sistemelor moderne de acționare electrică (care înglobează mașini electrice performante și electronică de putere) și reducerea până la anulare a facturilor de plată a energiei reactive, proiectarea unor noi generații de motoare și generatoare electrice fără magneți permanenți de energii înalte, sisteme de tracțiune electrică pentru diverse tipuri de vehicule **sunt câteva direcții de cercetare pe care doresc să le dezvolt după obținerea abilitării** împreună cu tinerii cercetători doctoranzi sau postdoctoranzi, în cadrul unor granturi cu finanțare națională, internațională sau a unor contracte cu beneficiari din mediul economic. Sunt vizați consumatorii industriali, consumatorii rezidențiali conectați la rețea sau izolați, producătorii de energie din combustibili convenționali sau din surse regenerabile și toate tipurile de vehicule, care se deplasează pe sol, pe apă, prin aer sau în interiorul pământului. Doresc ca fiecare temă de teză de doctorat să rezolve o problemă practică, de la identificarea ei și până la punerea în funcțiune, crearea unui produs pentru piață, brevetarea pe cât posibil internațională a soluțiilor rezultate sau realizarea unui model experimental la scară redusă care să valideze soluțiile originale propuse. Doresc de asemenea ca la finalizarea studiilor de doctorat, o parte din absolvenți să acceseze fonduri publice europene sau naționale, sau să participe la competiții de finanțare privată pentru dezvoltarea de startup-uri prin care să își valorifice rezultatele obținute prin cercetare.

Câteva teme de cercetare vizate sunt enumerate în continuare:

- studiul generatoarelor electrice reglabile fără magneți permanenți de putere mică și mijlocie pentru valorificarea resurselor eoliene, hidraulice, biomasă, biogaz, valuri, geotermale, etc;
- studiul sistemelor de acționare electrică cu randament ridicat pentru consumatori industriali și rezidențiali;
- studiul sistemelor de acționare electrică cu randament ridicat pentru vehicule cu tracțiune electrică (trotinete, biciclete, scutere, automobile, camioane, tractoare, autobuze, troleibuze, tramvaie, metrou, trenuri, vapoare, avioane, etc);
- studiul sistemelor de acționare electrică cu randament ridicat pentru vehicule autonome;

- studiul compensării energiei reactive și a armonicelor superioare și de echilibrare a conectării la rețelele naționale pentru sistemele de tracțiune electrică în curent alternativ și în curent continuu;
- studiul sistemelor smart grid, micro-smart grid și hibride de producere a energiei electrice din surse regenerabile în regim conectat la rețea sau insular;
- implementarea soluțiilor de acționare electrică moderne în contextul conceptului Industry 4.0;
- implementarea soluțiilor de acționare electrică moderne în contextul conceptului Internet of Things.

Toate rezultatele semnificative obținute în activitatea de cercetare vor fi publicate în jurnalele și la conferințele din circuitul IEEE, dar și la conferințele naționale de profil.

Pentru **dezvoltarea carierei academice** doresc să public în anii următori împreună cu colegi din țară și străinătate câteva cărți, pentru specialiștii din domeniul Inginerie Electrică și pentru studenții de la diferite specializări, având o tematică referitoare la sistemele de acționare electrică, al tracțiunii electrice și al sistemelor de producere a energiei electrice. Intenționez de asemenea ca împreună cu colaboratorii mai tineri din departament să întocmim și să publicăm niște culegeri de teste pentru subiectele teoretice și aplicative de la disciplinele: Mașini electrice, Acționări electrice, Mașini și acționări electrice, Vehicule electrice și hibride, Sisteme avansate de mașini și acționări electrice. Prin depunerea unor cereri de finanțare la competiții interne și internaționale, în colaborare cu universități, centre de cercetare și entități economice puternice din domeniu intenționez să îmbunătățesc baza materială didactică și de cercetare existentă.

Pentru a veni în întâmpinarea cerințelor angajatorilor, voi încerca să propun în continuare spre acreditare noi specializări la cursurile postuniversitare, care pot rezolva mult mai ușor o cerință punctuală, decât ar face-o înființarea unei specializări de licență sau de master. Ținând cont de faptul că industria auto la nivel mondial deține o pondere de peste 20% și tracțiunea electrică are o utilizare din ce în ce mai mare, am în vedere inițierea unei specializări de master în domeniul vehiculelor propulsate electric, în limba engleză, fără frecvență, care să se adreseze inginerilor și specialiștilor din domeniul ingineriei electrice din întreaga lume. Aceste cursuri se vor ține cu ajutorul platformei de e-learning dezvoltată la nivelul universității noastre. Doresc de asemenea ca toate disciplinele la care sunt titular să fie accesibile prin intermediul acestei platforme.

Legătura cu practica a tuturor subiectelor abordate și îmbunătățirea aspectelor care vizează procesul de învățământ vor conduce nemijlocit la **creșterea prestigiului profesional**.

III. REFERINȚE BIBLIOGRAFICE

- [Abb 08] R., Pena, R., Cardenas, J., Proboste, J., Clare, G., Asher, Wind-Diesel Generating Using Doubly Fed Induction Machines, IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 23, no.1, March 2008, pp. 202-214.
- [Amb 17] T.Ambros, M.Burduniuc, **S.I.Deaconu**, N.Rujanschi, "Electromechanical converters for electric vehicles", International Conference on Applied Sciences (ICAS2017), IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 294 (2017) 012058, ISSN 1757-899X, pp. 1-9.
- [Bab 04] Babău, R., **S.I.Deaconu**, „Deaconu, S., Babău, R. The hydroelectric potenial use of the water feeding pipes”, EPE 2004, ISSN 0258 – 9109, pp. 1 ÷ 4.
- [Bac 10] I.Baciu, C.D.Cunțan, **S.I.Deaconu**, A.Iagăr, "The Study of Quality Indicators of Electrical Energy in Electrical Railway Transport", International symposium on advanced engineering & applied management, 40th Anniversary in higher education (1970-2010), 2010, ISBN 978-973-0-09340-7, pp. 239-243.
- [Bal 79] M.J. Balchim, and J.F. Eastham, "Characteristics of heteropolar linear synchronous machine with passive secondary", Electric Power Application, **vol. 2**, no. 8, pp. 213-218, December (1979).
- [Bas 05] T.B. Bashaw, and T.A. Lipo," B4 Topology Options for Operating Three Phase Induction Machines on Single Phase Grids", Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC 2005, Twentieth Annual IEEE, vol. 3, pp. 1894-1902.
- [Bir 94] M. Biriescu, "Testing elements of electric machines", Politehnica Publishing House, Timisoara, Romania, 1994 (in Romanian).
- [Bol 92] I.Boldea, N.Muntean, **S.I.Deaconu**, S.A.Nasar, Z.Fu, "Distributed anisotropy rotor synchronous (DARSYN) drives—Motor identification and performance", Proc. Int. Conf. Electrical Machines, 1992, vol.2, pp. 542-546.
- [Bol 97] I. Boldea, L. Tutelea and N. Muntean, "A new approach to inverter-fed mixed frequency testing of induction machines", Proc. Electromotion'97, Cluj-Napoca, Romania, pp. 82-87.
- [Bol 01] I. Boldea, L. Tutelea and Klumpner C., "Artificial loading of induction machines: a review", Workshop on Electrical Machine's Parameters, Technical University of Cluj-Napoca, 26th of May, 2001, pp. 9-14.
- [Bol 05a] I. Boldea and S.A. Nasar, "Electric drives", 2nd edition, CRC Press, Taylor and Francis Group, pp. 256-375, New York, (2005)
- [Bol 05b] I., Boldea, Variable Speed Generators (Electric Power Engineering Series), CRC Press, 2005, ISBN 0849357152.
- [Bol 06] Boldea Ion," Variable Speed Generators", CRC Press, Boca Raton, FL USA, 2006.
- [Bol 08] I.Boldea, **S.I.Deaconu**, ș.a., "TEHNOLOGII NOI DE ACTUATOARE ELECTRICE PENTRU AUTOMOBILE", contract CEEEX, numărul X2C33, 2008.
- [Bol 10a] I.Boldea, M.Topor, F. Marignetti, **S.I.Deaconu**, L.N.Tutelea, "A Novel, Single Stator Dual PM Rotor, Synchronous Machine: topology, circuit model, controlled dynamics simulation and 3D FEM Analysis of Torque Production", Proc. of 12th OPTIM 2010, PTS I-IV, Brasov, Romania, ISSN 1842-0133, pp. 343-351.
- [Bol 10b] I. Boldea, and S. Scridon,"Electric propulsion systems on HEVs: review and perspective," EVER 2010, Monaco, 25-28 March, pp. 1-8, 2010.
- [Bol 11] I.Boldea, L.N.Tutelea, **S.I.Deaconu**, F.Marignetti, "Dual rotor single stator brushless PMSM motor/generator system for full HEVs", Proceedings of the International Conference on ELECTRONICS, COMPUTERS and ARTIFICIAL INTELLIGENCE – ECAI-2011, Vol.4, no.1/2011, ISSN 1843–2115, pp. 95-102.
- [Bol 12] I.Boldea, L.N.Tutelea, **S.I.Deaconu**, F.Marignetti, "Dual rotor single-stator axial air gap PMSM motor/generator drive for HEVs: A review of comprehensive modeling and performance characterization", Electrical Systems for Aircraft, Railway and Ship Propulsion (ESARS), 2012, pp. 1-8.
- [Bol 14] I. Boldea, **S.I.Deaconu**, F. Marignetti, L.N.Tutelea, "Brushless electrical actuator with two independent rotors for hybrid electrical propulsion", Patent Number: IT1409332-B, 2014, Q06615.
- [Boli 04] M., Bolik Sigrid, "Modeling and Analysis of Variable Speed Wind Turbines with Induction Generator during Grid Fault", PHD Theis, Institute of Energy Technology, Aalborg University, Denmark, October, 2004, ISBN 87-89179-55-2.
- [Bro 84] H.W. Van Der Broeck, and J.D. Van Wyk," A comparative investigation of a three-phase induction machine with a component minimized voltage-fed inverter under different control options," IEEE Trans. on Industry Applications, vol. IA-20, Mar./Apr., 1984, pp. 309-320.
- [Bud 03] Budișan Nicolae, "Problems of induction generator systems", Politehnica Publishing House, Timisoara, Romania, 2003.
- [Cor 08] L. Corradini, W. Stefanutti, P. Mattaveli, "Analysis of multisampled current control for active filters," IEEE Transactions on Industry Applications, vol.44, no.6, pp.1785-1794, November/December, 2008.
- [Dea 92a] **Deaconu S.I.**, "Agregat monorotor cu excitație statorică", Tehnologii și echipamente tehnologice industriale, Hunedoara, 1992, pp. 95-100.
- [Dea 92b] **Deaconu S.I.**, "Măsurarea și prelucrarea automată a datelor pentru probele de gol și de scurtcircuit la mașina asincronă", Tehnologii și echipamente tehnologice industriale, Hunedoara, 1992, pp. 101-106.
- [Dea 94] **Deaconu S.I.**, "The reactive synchronous homopolar machine functioning in stationary regime", Buletinul Științific al Universității Tehnice din Timișoara, Tom 39(53) Mecanică Agricolă, Metalurgie, Timișoara 1994, pp. 177-182.
- [Dea 95a] **S.I.Deaconu**, „Metodă și instalație de încercare în sarcină a mașinilor electrice asincrone fără mașină auxiliară”, pag. 99, Acta universitatis Cibiniensis, vol. XX, Sibiu, România, 1995.

- [Dea 95b] **S.I.Deaconu**, „Instalație de încercare automată, în diferite regimuri de funcționare a mașinilor electrice”, Sesiunea de Comunicări Științifice a Universității “Lucian Blaga” Sibiu, 1995, p. 165-170.
- [Dea 95c] **S.I.Deaconu**, M.Pănoiu, C.V. Pănoiu, S. Anghel, „Cercetări privind noi tehnologii de verificare a caracteristicilor motoarelor la mersul în sarcină”, Contract de cercetare S.C. SIDERURGICA S.A. HUNEDOARA, 350000/39, 06.03.1995.
- [Dea 95d] **S.I.Deaconu**, “Metode moderne de încercare a mașinilor asincrone”, Sesiunea de Comunicări, Retehnologizarea proceselor și fluxurilor de producție în siderurgie, Hunedoara, 1995, vol. II, 4 pp.
- [Dea 95e] **Deaconu S.I.**, “Calculul câmpului magnetic în mașina sincronă homopolară reactivă prin metoda elementului finit”, Sesiunea aniversară de comunicări științifice, vol. VI, Hunedoara, 12-13 octombrie 1995, pp. 105-110.
- [Dea 96a] **S.I.Deaconu**, M.Pănoiu, “System of changing the position of the electrodes at the electric arc furnaces”, Automatic Control and Testing Conference, A'96-Theta 10, Cluj-Napoca, 23-24 mai 1996, pp. 111-112.
- [Dea 96b] **S.I.Deaconu**, C.Pănoiu, S.Anghel, “Control system of the air supply at the gravity-discharge furnace using static frequency converter”, Automatic Control and Testing Conference, A'96-Theta 10, Cluj-Napoca, 23-24 mai 1996, pp. 471-472.
- [Dea 98a] **Deaconu S.I.**, L.N.Tutelea, “Calculul solenației mașinii sincrone homopolare reactive cu excitație statorică prin metoda circuitelor magnetice echivalente”, Analele Universității Eftimie Murgu Reșița, anul V, nr.2, Fascicula II Inginerie, ISSN 1453-7394, pp. 276-284.
- [Dea 98b] **Deaconu S.I.**, L.N.Tutelea, “Calculul tridimensional al câmpului magnetic în mașina sincronă homopolară reactivă cu excitație statorică prin metoda elementului finit”, Analele Universității Eftimie Murgu Reșița, anul V, nr.2, Fascicula II Inginerie, ISSN 1453-7394, pp. 269-275.
- [Dea 00a] **S.I.Deaconu**, L.N.Tutelea, A.Iagăr, “Mașini Electrice. Aplicații”, Editura Destin Deva, ISBN 973-9105-34-3, 2000, 169 pp.
- [Dea 00b] **S.I.Deaconu**, “Mașini Electrice. Partea I”, Editura Destin Deva, ISBN 973-9105-38-6, 2000, 156 pp.
- [Dea 02a] **S.I.Deaconu**, Popa, G.N., Gherman, L., “Diagram for artificial charge loading of asynchronous machine and the study of the influence of the frequency change on the charge loading”, EPE 2002, Tom XLVIII, Fascicola 5c, pp. 127 ÷ 130, ISSN 0258 – 9109, Iași, 2002.
- [Dea 02b] **S.I.Deaconu**, I. Popa, Popa, G.N., Gherman, L., “Automatizarea funcționării stațiilor de pompare a apei potabile și a stațiilor de clorinare”, Revista de Automatizări și Instrumentație, nr.5-6, 2002, pp. 24-25.
- [Dea 03a] **S.I.Deaconu**, Tutelea L., Gherman L., “Artificial Loading of Induction Machine Using Single Supply Source”, 4th International Conference on Electromechanical and Power Systems, SIELMEN 2003, vol. I, 2003, Chisinau, Moldova, pp. 55-56.
- [Dea 03b] **S.I.Deaconu**, Gherman L., “Automatic Speed Control System for Electro-pumps with 6KV voltage in Power Plants”, 6th International Conference on Accomplishments of Electrical and Mechanical Industries, Proceedings, DEMI 2003, Banja Luka, Bosnia Hertegovina, 2003, pp.623-628.
- [Dea 03c] **S.I.Deaconu**, ș.a., “Răcirea controlată a hidrogenatoarelor și transformatoarelor aferente”, Conferința națională cu participare internațională „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”, Ediția a III-a, pag. 387-392, Sebeș, 2003.
- [Dea 03d] **S.I.Deaconu**, M.Negrea, “Modernizarea sistemelor de acționare electrică a malaxorului din secția BCA a S.C. Macon S.A. Deva”, Analele FIH, Tom V, Fascicola 3, 2003, ISSN 1454-6531, pp. 154-158.
- [Dea 03e] **S.I.Deaconu**, I.C.Penișoară, “Reducerea consumului energetic la instalația de desprăfuire uscată a cuptoarelor electrice cu arc”, Analele FIH, Tom V, Fascicola 3, 2003, ISSN 1454-6531, pp. 150-153.
- [Dea 03f] **S.I.Deaconu**, Gherman L., “Electrical shaft scheme with static frequency converters and cage induction machines”, ISIRR, 2003, section V, Hunedora, pp. 620-622.
- [Dea 04a] **S.I.Deaconu**, Babău, R., Gherman L., Popa I., Popa G.N., Abrudean C., “Computer simulation of the mini hydroelectric plants runs with variable speed in autonomous regime and coupled to the electric network.”, EPE 2004, ISSN 0258 – 9109, pp. 1 ÷ 4.
- [Dea 04b] **S.I.Deaconu**, Gherman L., “Optimizarea funcționării morilor de măcinat minereu”, Nordtech 2004, Scientific Bulletin, Serie C, Vol. XVIII, ISSN 1224-3264, pp. 83-84.
- [Dea 04c] **S.I.Deaconu**, Gherman L., “Utilizarea convertizoarelor de frecvență la acționarea mașinilor de extracție miniere”, Nordtech 2004, Scientific Bulletin, Serie C, Vol. XVIII, ISSN 1224-3264, pp. 79-82.
- [Dea 04d] **S.I.Deaconu**, R.Babău, “Automatizarea funcționării microhidrocentralelor”, Revista de Automatizări și Instrumentație nr. 5, 2004, pp. 15-17.
- [Dea 05a] **S.I.Deaconu**, Popa G.N., Popa I., “Creșterea siguranței în funcționare și a eficienței grupurilor energetice din termocentrale prin automatizarea arderii în cazan în funcție de încărcarea generatorului utilizând acționări cu mașini asincrone și convertizoare de frecvență”, Simpozionul Național “Siguranța în Funcționare a Sistemului Energetic”, 28-30 septembrie, 2005, Sinaia, pp. 1-4.
- [Dea 05b] **S.I.Deaconu**, Popa G.N., Popa I., Variable Speed Induction Generators Connected to the Grid or in Island Mode Operation, 11th International Conference on Electrical Machines, Drives and Power Systems, Proceedings, ELMA 2005, vol.II, Sofia, Bulgaria, 2005, pp.403-404.
- [Dea 05c] **S.I.Deaconu**, “Mașini și acționări electrice”, Editura Politehnica Timișoara, ISBN 973-625-200-0, 2005, 268 pp.
- [Dea 05d] **S.I.Deaconu**, L.N.Tutelea, G.N.Popa, I.Popa, “The influence of magnetic saturation towards the induced voltage for homopolar synchronous generator”, 5th International Conference on Electromechanical and Power Systems, October 6-8, 2005, Chișinău, Moldova, pp. 783-786.
- [Dea 05e] **S.I.Deaconu**, G.N.Popa, I.Popa, “Hydroelectric Power Plants Optimal Operation in Cascade Configuration”, 7th International Conference on Accomplishments of Electrical and Mechanical Industries, Banja Luka, DEMI 2005, pp. 489-492.

- [Dea 06a] **S.I.Deaconu**, L. Tutelea, G.N. Popa, and I. Popa, "The influence of magnetic saturation towards the induced voltage for homopolar synchronous generator", 17th International Conference on Electrical Machines, no. 486, Chania, Crete Island, Greece, September 2006.
- [Dea 06b] **S.I.Deaconu**, G.N. Popa, I. Popa, A.Toma, "Utilizarea compensatoarelor sincrone la realizarea factorului de putere neutral în cadrul unei oțelării electrice", Revista de Automatizări și Instrumentație nr. 6, 2006, pp. 12-13.
- [Dea 07a] **Deaconu S.**, Egyed F., Popa G.N., Popa I., Kaitar R., Efficiency Increasing of Urban District Heating Systems by Means of Variable Speed Drives, National Conference and Power Systems Exhibition, CNEE 2007, Sinaia, Romania, 2007, pp. 545-548.
- [Dea 07b] **S.I.Deaconu**, G.N. Popa, I. Popa, "Induction generator with rotor winding and SFC for Micro Hydroelectric Power Plants or Wind Power Station with variable speed", Analele Universității din Craiova, Seria Inginerie Electrică, anul 31, 2007, Vol. II, 6th International Conference on Electromechanical and Power Systems, October 4-6, 2007, Chișinău, Moldova, pp. 233-236.
- [Dea 07c] **S.I.Deaconu**, G.N. Popa, I. Popa, "Compensarea energiei reactive și a armonicelor superioare generate de un cuptor electric trifazat cu arc cu ajutorul sistemelor de tip SVC", A VII-a Conferință Națională Multidisciplinară cu participare Internațională "Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești", Sebeș, 2007, vol.11, pp. 209-212.
- [Dea 08a] **S.I.Deaconu**, "Elemente generale ale mașinilor electrice. Transformatorul și mașina de curent continuu", Editura Politehnica Timișoara, ISBN 978-973-625-739-1, 2008, 141 pp.
- [Dea 08b] **S.I.Deaconu**, "Mașini electrice de curent alternativ. Elemente fundamentale", Editura Politehnica Timișoara, ISBN 978-973-625-738-4, 2008, 154 pp.
- [Dea 08c] **S.I.Deaconu**, L.Tutelea, G.N.Popa, I.Popa, C.Abrudean, "Optimizing the Designing of a Reactive Homopolar Synchronous Machine with Stator Excitation", 34th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics, (IECON), 2008, ISSN 1553-572X / ISBN 978-1-4799-0224-8, pp. 1258-1265.
- [Dea 08d] **S.I.Deaconu**, Popa Gabriel Nicolae, Popa Iosif, "Optimizing the Operation of an Urban District Heating System by Means of Variable Speed Drives", 12th WSEAS International Conference on SYSTEMS, NEW ASPECTS OF SYSTEMS, PTS I AND II. Mathematics and Computers in Science and Engineering, Heraklion, GREECE, 2008, ISBN 978-960-6766-83-1, pp. 149-154.
- [Dea 08e] **S.I.Deaconu**, G.N.Popa, I.Popa, "Increasing The Energetic Efficiency In Producing Of Electric And Thermal Power In Thermal Power Plants By Using Of Variable Speed", WSEAS Transaction on SYSTEMS, 2008, Issue 9, Volume 7, Septembrie, ISSN 1109-2777, pp. 834-843.
- [Dea 08f] **S.I.Deaconu**, G.N.Popa, I.Popa, C.M.Diniș, "Studiul influenței tensiunii inițiale de pornire asupra timpului de conectare a contactorului de by-pass", Conferința Națională Dorin Pavel fondatorul hidroenergeticii românești, Sebeș, 30-31 mai 2008, vol.13, pp. 263-268.
- [Dea 08g] **S.I.Deaconu**, G.N.Popa, C.M.Diniș, I.Popa, "Comparative Study of the Methods for Starting-Up the Induction Motors by Softstarter", Proceedings of the 14th National Conference on Electrical Drives, September 25-26, Timișoara, pp. 93-96.
- [Dea 09a] **S.I.Deaconu**, Topor Marcel, Popa Gabriel Nicolae, Popa Iosif, "Comprehensive Analysis for Modernization of 100 t Electric Arc Furnace for Steel Production", 44th Annual Meeting of the IEEE-Industry-Applications-Society, 2009 IEEE INDUSTRY APPLICATIONS SOCIETY ANNUAL MEETING, IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Houston, Texas, USA, ISSN 0197-2618, ISBN 978-1-4244-3475-6, pp. 143-148.
- [Dea 09b] **S.I.Deaconu**, M.Topor, L.Tutelea, G.N.Popa, C.Abrudean, "Mathematical Model of a Reactive Homopolar Synchronous Machine with Stator Excitation", 13th European Conference on Power Electronics and Applications, 2009, ISBN 978-1-4244-4432-8, pp. 2269-2277.
- [Dea 09c] **S.I.Deaconu**, M.Topor, L.Tutelea, G.N.Popa, C.Abrudean, "Modeling and Experimental Investigations of a Reactive Homo-Heteropolar Brushless Synchronous Machine", 35th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics, (IECON), 2009, ISBN 978-1-4244-4648-3, pp. 1126-1133.
- [Dea 09d] **S.I.Deaconu**, Topor Marcel, Popa Gabriel Nicolae, Bistriean Diana, "Analysis Of Hybrid Power System Incorporating Squirrel Cage Induction Generators", Proceedings of the 13th WSEAS International Conference on SYSTEMS, WSEAS CSCC Multiconference, Rodos Island, Greece, July 22-24, Published by WSEAS Press, 2009, ISBN 978-960-474-097-0, ISSN 1790-2769, pp. 289-294.
- [Dea 10a] **S.I.Deaconu**, G.N.Popa, A.I.Toma, M.Topor, "Modeling and Experimental Analysis for Modernization of 100-t EAF", IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, vol. 46, Issue 6, ISSN 0093-9994, pp. 2259-2266.
- [Dea 10b] **S.I.Deaconu**, M.Topor, G.N.Popa, D.Bistriean, "Experimental Study And Comparative Analysis Of Transients Of Induction Motor With Soft Starter Startup", Advances in Electrical and Computer Engineering, 2010, Vol. 10, Issue 3, ISSN 1582-7445, pp. 27-33.
- [Dea 10c] **S.I.Deaconu**, L.N.Tutelea, G.N.Popa, T.Latinovici, "Mathematical models and the control of homopolar and homo-heteropolar reactive synchronous machines with stator excitation", Advances in Communications, Computers, Systems, Circuits and Devices, 2010, ISSN 1792-6637 / ISBN 978-960-474-250-9, pp. 78-83.
- [Dea 10d] **S.I.Deaconu**, M.Topor, G.N.Popa, "Study of the Induction Generators with Short-Circuited Rotor in Autonomous Regime", Buletinul Universității din Craiova, vol. 34, no. 2, 2010, ISSN 1842- 4805, pp. 111-116.
- [Dea 10e] **S.I.Deaconu**, G.N.Popa, M.Topor, T.Latinovic, "Improvement Of The EAF Energetic Parameters Using Capacitive-Inductive Filters", Last Trends on Systems, Proceedings of the 14th WSEAS International Conference on Systems, Corfu Island, Greece, 2010, ISBN 978-960-474-199-1, ISSN 1792-4235, pp. 474-479.
- [Dea 10f] **S.I.Deaconu**, G.N.Popa, T.Latinovic, "Comparative Study For EAF's Reactive Energy Compensation Methods And Power Factor Improvement", WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS, 2010, Issue 9, Volume 9, September, ISSN: 1109-2777, pp. 979-989.

- [Dea 10g] **S.I.Deaconu**, L.N. Tutelea, G.N. Popa, T. Latinović, "Artificial loading for rotating electric machines", International symposium on advanced engineering & applied management, 40th Anniversary in higher education (1970-2010), 2010, ISBN 978-973-0-09340-7, pp. 219-224.
- [Dea 10h] **S.I.Deaconu**, M.Topor, G.N.Popa, I.Popa, "Sisteme de producere a energiei electrice cu generator asincron cu rotor bobinat și convertor static de frecvență ce funcționează cu turație variabilă", Revista de Automatizări și Instrumentație nr. 3-4, 2010, pp. 16-20.
- [Dea 10i] **S.I.Deaconu**, R.Babău, M.Topor, ș.a., "Microhidrocentrală cu turație variabilă pe conducta de alimentare a unei stații de tratare a apei", A X-a Conferință Națională Multidisciplinară cu participare Internațională "Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești", Sebeș, 2010, vol.17, ISSN 2067-7138, pp. 475-482.
- [Dea 10j] **S.I.Deaconu**, M.Topor, ș.a., "Soluții de punere în valoare a potențialului microhidroenergetic", A X-a Conferință Națională Multidisciplinară cu participare Internațională "Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești", Sebeș, 2010, vol.17, ISSN 2067-7138, pp. 467-474.
- [Dea 11a] **S.I.Deaconu**, G.N.Popa, "Experimental Survey For Reducing The Flicker Effect And The Deforming Regime Produced By EAFs", Recent Researches in Circuits, Systems, Communications and Computers, Proceedings of the 2th European Conference of Systems ECS 2011, Puerto de la Cruz, Tenerife, Spain, ISBN 978-1-61804-056-5, 2011, pp. 149-154.
- [Dea 11b] **S.I.Deaconu**, G.N.Popa, I.Rodean, C.Motorga, "Utilizarea industrială a convertoarelor statice de mare putere-I", A XI-a Conferință Națională Multidisciplinară cu participare Internațională "Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești", Sebeș, 2011, vol.19, ISSN 2067-7138, pp. 377-382.
- [Dea 11c] **S.I.Deaconu**, G.N.Popa, I.Rodean, C.Motorga, "Utilizarea industrială a convertoarelor statice de mare putere-II", A XI-a Conferință Națională Multidisciplinară cu participare Internațională "Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești", Sebeș, 2011, vol.19, ISSN 2067-7138, pp. 383-388.
- [Dea 12] **S.I.Deaconu**, G.N.Popa, R.Deaconu, "Commissioning, Monitoring and Control of a Low-power Hydroelectric Power Plant", Recent Researches in Circuits and Systems, Proceedings of the 16th WSEAS International Conference on SYSTEMS, Kos Island, Greece, July 14-17, 2012, ISBN: 978-1-61804-108-1, pp. 173-178.
- [Dea 14a] **S.I.Deaconu**, G.N.Popa, R.Babău, "Study, Design and Industrial Implementation of Capacitive Power Factor Controller for Large Load Fluctuations in Steel Industry", 8th International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, IEEE, EPE, Iași, România, 2014, ISBN 978-1-4799-5849-8, pp. 962-967.
- [Dea 16a] **S.I.Deaconu**, "Mașini electrice", Editura Politehnica Timișoara, ISBN 978-606-35-0079-4, 2016, 446 pp.
- [Dea 16b] **S.I.Deaconu**, G.N.Popa, C.D.Cuntan, Experimental Investigation of a Hydroelectric Power Plant, 2016 International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, pp. 529-534.
- [Dea 16c] **S.I.Deaconu**, "Performant power train for Hybrid and Electric Vehicles with dual rotor single stator axial synchronous machine and single inverter", Grant UEFISCDI, Programul 3, Cooperare Europeană și Internațională, Subprogramul 3.1 Bilateral/multilateral, România-Moldova, 17BM/19.09.2016.
- [Dea 17a] **S.I.Deaconu**, R.Babău, G.N.Popa, P.L.Gherman, "Hydroelectric power plant with variable flow on drinking water adduction", International Conference on Applied Sciences (ICAS2017), IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 294 (2017) 012023, ISSN 1757-899X, pp. 1-9.
- [Dea 18a] **S.I.Deaconu**, V.Horga, M.Topor, F.Marignetti, L.N.Tutelea, I.Nucă, "Lightweight high efficiency power train propulsion with axial flux machines for electric or hybrid vehicles", Capitol în cartea: "New Trends in Electrical Vehicle Powertrains", IntechOpen London, ISBN, 2018, 20 pp.
- [Dea 18b] **S.I.Deaconu**, "Dual Stator Winding Induction Generator System for Wide-Variable Speed Wind Power Application", Grant UEFISCDI, Programul 3, Cooperare Europeană și Internațională, Subprogramul 3.1 Bilateral/multilateral, România-China, 8BM/02.07.2018.
- [Dea 18c] **S.I.Deaconu**, M.Topor, L.N.Tutelea, I.Nucă, M.Burduniuc, „Wind or Hydro Homo-Heteropolar Synchronous Generators: Equivalent Magnetic Circuit and FEM Analysis” MATEC Web of Conferences 210, 02008 (2018), CSCC 2018, pp. 7.
- [Dix 05] J. Dixon, L. Morán, J. Rodríguez and R. Domke, "Reactive power compensation technologies: State-of-the-art review," Proc. IEEE, vol.93, no.12, December 2005, pp.2144-2164.
- [Dor 12] D.G. Dorell, M.F. Hsieh, and A.M. Knight, "Alternative Rotor Designs for High Performance Brushless Permanent Magnet Machines for Hybrid Electric Vehicles" , IEEE Transactions on Magnetics, vol. 48, pp. 835-838, no. 2, February 2012.
- [Fad 08] R., Fadaeinedjad, M., Moallem, G., Moschopoulos, "Simulation of a Wind Turbine with Doubly Fed Induction Generator by Fast and Simulink", IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 2, June 2008, pp. 690-700.
- [Ehs 97] M. Ehsani, K. M. Rahman, and H. A. Foliyat, " Propulsion System Design of Electric and Hybrid Vehicles," IEEE Transaction on Industrial Electronics, Vol. 44, pp. 19- 27, no 1, February 1997.
- [Gar 94] S. Garvey, I. Kolak and M.T. Wright, "Aspect of mixed frequency testing for induction machines", Record of ICEM-1994, D14, Paris, France.
- [Gop 93] Gopakumar K., Ranganathan V.T., and Bhat S.R., "Split-phase induction motor operation from PWM voltage source inverter", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 29, No.5, September/October 1993, pp. 927-932.
- [Gra 93] C. Grantham, "Full load testing of three phase induction motors without the use of a dynamometer" ICEMA, 14-16 September 1993 Adelaide Australia, pp. 147-152.
- [Gra 95] C. Grantham and M. Sheng, "The synthetic loading of three-phase induction motors using microprocessor controlled power electronics", Record IEEE Catalogue No. 95TH8025/1995, pp. 471-476.
- [He 95] J. He and F. Lin, "A high frequency high power IGBT inverter drive for 45 HP/16.000 RPM brushless homopolar inductor motor", Conference Record of the IEEE IAS Annual Meeting, pp. 9-15, (1995).

- [Hip 92] M. Hippner and R. G. Harley, "High speed synchronous homopolar and permanent magnet machines comparative study", Conference Record of the IEEE IAS Annual Meeting, pp. 74-78, (1992).
- [Ho 11] S.L. Ho, S. Niu, and W.N. Fu, "Design and Analysis of a Novel Axial-Flux Electric Machine," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, pp. 4368-4371, no. 10, October 2011.
- [Hof 00] H. Hofman and S. R. Sanders, "High speed synchronous machine with minimized rotor losses", IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 36, no. 2, Mar., pp. 531-539, (2000)
- [Hoo 61] R. Hooke, and J.A. Jeeves, "Direct search solution of numerical and statistical problems," Journal of ACM, Vol. 8, No. 2, pp. 212-229, 1961.
- [Ich 99] O. Ichikawa, A. Chiba and T. Fukao, "Development of Homo-Polar Type of Bearingless Motors", Conference Record of the 1999 IEEE IAS Annual Meeting, pp. 1223-1228, (1999).
- [Kel 89] A. Kelemen, M. Imecs, "Field-Oriented Control of AC Machines" (in Romanian), Academic Publishing House, pp. 136-240, ISBN 973-27-0032-7, Bucuresti, Romania, (1989).
- [Klu 00] C. Klumpner, I. Boldea, F. Blaabjerg, "Artificial loading of the induction motors using a matrix converter", Proceedings of PEMD London 2000, pp. 40-45.
- [Les 97] P. Lesage, M. Alacula, L. Gertmar, "The dynamic thermal loading of an induction machine", Record ENE'97 vol.2 pp. 520-525.
- [Li 11] J. Li, D.W. Choi, C.H. Cho, D.H. Koo and Y.H. Cho, "Eddy-Current Calculation of Solid Components in Fractional Slot Axial Flux Permanent Synchronous Machines," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 47, pp. 4254-4257, no. 10, October 2011.
- [Luu 08] T., Luu, A., Abedini, A., Nasiri, Power Smoothing of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbines, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 23, no. 4, December 2008, pp. 2365-2370.
- [Mat 11] K. Matsuse, N. Kezuka, and K. Oka, "Characteristics of Independent Two Induction Motor Drives Fed by a Four-Leg Inverter", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 47, no. 5, September/October, 2011, pp. 2125-2134.
- [McK 03a] D. McKinnon, D. Seyoum and C. Grantham, "Novel dynamic model for a three-phase induction motor with iron loss and variable rotor parameter considerations", Journal of Electrical & Electronics Engineering, Australia, Vol. 22, No. 3, The Engineers Australia College of Electrical Engineers, 2003, pp. 219 - 225.
- [McK 03b] D.J. McKinnon and C. Grantham, "Modeling of synthetic loading for efficiency evaluation of three-phase induction motors", Proc. AUPEC 2003, Christchurch, New Zealand, 28 Sept. – 1 Oct. 2003.
- [McK 04a] D.J. McKinnon and C. Grantham, "Experimental Confirmation of On-Site Efficiency Evaluation of Three-Phase Induction Motors using Synthetic Loading Techniques", Australasian Universities Power Engineering Conference AUPEC 2004, 26-29 September 2004, Brisbane, Australia, pp. 78-83.
- [McK 04b] D.J. McKinnon, D. Seyoum and C. Grantham, "Investigation of parameter characteristics for induction machine analysis and control", Conf. Proc. Of the Second International Conference on Power Electronics, Machines and Drives, (PEMD 2004), University of Edinburgh, UK, 31 Mar. – 2 Apr. 2004, pp. 320-325.
- [Mir 07] Adam Mirecki, Xavier Roboam, and Frederic Richardeau, "Architecture complexity and energy efficiency of small wind turbines", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, No. 1, February 2007.
- [Mul 94] E. Muljadi, T.A. Lipo, "Series compensated PWM inverter with battery supply applied to an isolated induction generator," IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 30, no. 4, Jul./Aug. 1994, pp. 1073–1082.
- [Mun 00] Alfredo R. Munoz and Thomas Lipo, "Dual stator winding induction machine drive", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 5, September/October 2000, pp. 1369-1379.
- [Nai 03] Malakondaiah Naidu and James Walters, "A 4-KW 42-V Induction Machine-based automotive power generation system with a diode bridge rectifier and a PWM inverter", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 39, No. 5, September/October 2003, pp. 1287-1293.
- [Nuc 17] I.Nucă, T.Ambros, M.Burduniuc, **S.I.Deaconu**, A.Țurcanu, "Electric machines with axial magnetic flux", International Conference on Applied Sciences (ICAS2017), IOP Publishing, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 294 (2017) 012059, ISSN 1757-899X, pp. 1-9.
- [Olo 00] Olorunfemi Ojo, and Innocent Ewean Davidson, "PWM-VSI Inverter-Assisted Stand-Alone Dual Stator Winding Induction Generator", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No.6, November/December 2000, pp. 1604-1610.
- [Olo 08] Olorunfemi Ojo, and Zhiqiao Wu, "Modeling of a dual-Stator-Winding Induction Machine Including the Effect of Main Flux Linkage Magnetic Saturation", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 44, No.4, July/August 2008, pp. 1099-1107.
- [Pan 96] Pănoiu Manuela, Pănoiu Caius, **S.I.Deaconu**, "Studiu privind înlocuirea cuplajelor electromagnetice de tip Toshiba, aferente reguletoarelor de putere a CEA 100t, cu convertizoare statice de frecvență Hitachi, în circuitul de comandă alimentare a motoarelor electrice de acționare a electrozilor", Contract de cercetare S.C. SIDERURGICA S.A. HUNEDOARA, 350000/52, 20.05.1996.
- [Pan 08] Pănoiu Manuela, Pănoiu Caius, **S.I.Deaconu**, "Study about the possibility of electrodes motion control in the EAF based on adaptive impedance control", 13th International Power Electronics and Motion Control Conference, EPE-PEMC 2008, ISBN 978-1-4244-1741-4, pp. 55-60.
- [Par 05] A. Parviainen, "Design of AFPM low-speed Machines and Performance Comparison between Radial-Flux and Axial-Flux Machines," Doctoral Thesis, Lappeenranta University of Technology, Finland, April, 2005.
- [Pee 04] M. Peens, "Modelling and Control of an Electrode System for a Three-Phase Electric Arc Furnace", Master Degrees, University of Pretoria, South Africa, 151 pp.
- [Pen 05] R., Pena, R., Cardenas, J., Proboste, J., Clare, G., Asher, "Wind-Diesel Generating Using Doubly Fed Induction Machines", IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 23, no.1, March 2008, pp. 202-214.
- [Pop 06] G.N., Popa, I., Popa, **S.I.Deaconu**, „Automate programabile în aplicații”, Editura Mirton, Timișoara, 2006.

- [Pop 09] G.N.Popa, C.M.Diniş, **S.I.Deaconu**, "Îmbunătăţirea performanţelor energetice a consumatorilor electrici de la S.C. Ison Trade Construct S.R.L.", contract 93, 18.09.2009.
- [Pop 11] G.N.Popa, C.M.Diniş, **S.I.Deaconu**, A.lagăr, "An analyze on a wood processing automatic machine", WSEAS Transactions on Circuits and Systems, Volume 10 Issue 3, March, ISSN: 1109-2734, pp. 83-92.
- [Pop 12] G.N.Popa, C.M.Diniş, **S.I.Deaconu**, A.lagăr, "A Prospective on Power Quality Analyze of Three Sections Plate-Type Electrostatic Precipitator Supplies", RECENT RESEARCHES in CIRCUITS, SYSTEMS, MULTIMEDIA and AUTOMATIC CONTROL, Proceedings of the 11th WSEAS International Conference on Instrumentation, Measurement, Circuits and Systems (IMCAS '12), Rovaniemi, Finland, 2012, ISSN: 1790-5117 ISBN: 978-1-61804-085-5, pp. 49-54.
- [Rai 02] A. Raie, V. Raschtchi, "Accurate identification of parameters, in winding function model of induction motor, using genetic algorithm", SICE Proc. 2002 Aug. 5-7, Osaka, pp. 2430-2434.
- [Rao 00] G. P. Rao, J. L. Kirtby, D. C. Meeker Jr. and K. J. Donegan, "Hybrid permanent magnet/homopolar generator and motor", U. S. Patent 6097124, Aug. 1, (2000).
- [Riv 12] J. A. Riveros Yepes, A. G. Barrero, F. Doval-Gandoy, J. Bogado, B. Lopez, O. Jones, M. and E. Levi, "Parameter Identification of Multiphase Induction Machines With Distributed Windings - Part 2", Time-Domain Techniques, IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 27, N4. 4, December 2012, pp. 1067-1077.
- [Rob 05] Roberts P.C., McMahon R.A., Wang X., Tavner P.J., Maciejowski J.M., and Flack T.J., "Equivalent circuit for the brushless doubly-fed machine (BDFM) including parameter estimation", Proc. Inst. Electr. Eng.-Electr. Power Appl., vol. 152, no. 4, pp. 933-942, Jul. 2005.
- [Rus 96] N.Rusu, **S.I.Deaconu**, C.Pănoiu, D.Negruţ, L. Olah, S.Anghel, C.M. Diniş, "Studiul critic al sistemelor de automatizare existente în fluxul de fabricaţie al cimentului la S.C. Casial S.A. Deva. Soluţii de modernizare în vederea conducerii cu calculatorul a morilor de ciment", contractul 5004, 16.01.1996.
- [Sey 09] Seyed Mohammad Dehghan, Mustafa Mohamadian, and Ali Yazdian Varjani, "A New Variable-Speed Wind Energy Conversion System using Permanent-Magnet Synchronous Generator and Z-Source Inverter", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 24, No. 3, September 2009.
- [Sen 05] T., Senjyu, T., Nakaji, K., Uezato, T., Funabashi, A., "A Hybrid Power System Using Alternative Energy Facilities in Isolated Island", IEEE Transaction on Energy Conversion, vol. 20, no.2, June 2005, pp. 406-414.
- [Sie 91] M. Siegl and V. Kotrba, "Losses and cooling of a high-output power homopolar alternator", IEEE Fifth International Conference on electrical Machine and Drives (Conf. Publ. No. 341), London, U.K., 11-13 Sept., pp. 295-299, (1991).
- [Sol 02] J. Soltani, B. Szabados, and Gerry Hoolboom, "A New Synthetic Loading for Large Induction Machines With No Feedback Into the Power System" IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 17, No. 3, September, 2002, pp. 1-7.
- [Tad 08] Tadashi Fukami, Masatoshi Momiyama, Kazuo Shima, Ryoichi Hanaoka, and Shinzo Takata, "Steady-State Analysis of a Dual-Winding Reluctance Generator With a Multiple-Barrier Rotor", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 23, No. 2, June 2008, pp. 492-498.
- [Tam 99] Indraman Tamrakar, and O.P. Malik, "Power factor corection of induction motors using PWM inverter fed auxiliary stator winding", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, September 1999, pp. 426-432.
- [Tem 95] P. Templin, M. Alacula, M. Gertmar, "Dynamic Thermal Loading of an inverter fed Induction Machine", IEEE /KTH Stocckhlohm Power Tech. Conference, 1995, pp. 241-244.
- [Tir 18] M.A.Tir, F.Marignetti, **S.I.Deaconu**, "Passive magnetic bearings", Capitol în cartea: "Advances in Engineering Research", Nova Science Publ., New York, ISBN 978-53614-218-1 (e-book), 2018, 24 pp.
- [Tom 10] A.I.Toma, G.N.Popa, A.lagăr, **S.I.Deaconu**, "Experimental Analysis Of Electric Parameters Of A 100 T UHP Electric Arc Furnace", 2010 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), Vina del Mar, Chile, ISBN 978-1-4244-5695-6, 2010-03-14, pp. 919-924.
- [Top 14] M.Topor, **S.I.Deaconu**, L.N.Tutelea, "Homo-heteropolar synchronous machine for low power variable speed wind or hydro applications: Design, 3D FEM validation and control", 16th EPE'14-ECCE Europe, 2014, pp. 1-10.
- [Top 17a] M.Topor, F.Marignetti, **S.I.Deaconu**, L.N.Tutelea, "Single Stator Dual PM Rotor Synchronous Machine with two frequency single-inverter control, for the propulsion of hybrid electric vehicles", MATEC Web of Conferences 125, 02065 (2017), e-ISSN: 2261-236X, pp. 1-6.
- [Top 17b] Marcel Topor, **S.I.Deaconu**, L.N.Tutelea, I.Nucă, M.Burduniuc, "3D FEM Validation of Homo-Heteropolar Synchronous Machine for Wind or Hydro Applications", 11th International Conference on Electromechanical and Power Engineering (SIELMEN 2017), 12-13 October 2017, Chişinău, Rep. Moldova.
- [Tsa 02] P. Tsao, M. Senesky and S. Sanders, A Synchronous Homopolar Machine for High-Speed Applications, Conference Record of IEEE IAS Annual Meeting, pp. 406-416, (2002).
- [Tut 97] L.N. Tutelea, **S.I. Deaconu**, "Loading methods by artificial charge of the DC machines", Electromotion '97 Symposium, 8-9 mai 1997, Cluj-Napoca, pp. 202-207.
- [Tut 98] L. Tutelea, I. Boldea, E. Ritchie, P. Sandholdt and F. Blaabjerg, "Thermal testing for inverter-fed induction machines using mixed frequency method", Proceedings of ICEM'98 Istanbul, vol.1, pp.248-253.
- [Tut 99a] L.N. Tutelea, **S.I. Deaconu**, "Metode de încărcare în sarcină artificială a maşinilor de curent continuu", Analele Facultăţii de Inginerie Hunedoara, Tom I, Fascicola 6, 1999, ISSN 1454-6531, pp. 81-84.
- [Tut 99b] L.N. Tutelea, **S.I. Deaconu**, "Metode de încărcare în sarcină artificială a maşinilor sincrone", Analele Facultăţii de Inginerie Hunedoara, Tom I, Fascicola 6, 1999, ISSN 1454-6531, pp. 85-86.
- [Tut 01] L.N. Tutelea, **S.I. Deaconu**, "Metode de încărcare în sarcină artificială a maşinii de sincrone", Analele Facultăţii de Inginerie Hunedoara, 2001, pp. 1-8.

- [Tut 07] L. Tutelea, I. Boldea, „Optimal Design of Residential Brushless D.C. Permanent Magnet Motors with FEM Validation,” Proceedings of ACEMP, 2007, pp. 435-439.
- [Tut 11a] L.N.Tutelea, **S.I.Deaconu**, I.Boldea, F.Marignetti, G.N.Popa, “Design and Control of a Single Stator Dual PM Rotors Axial Synchronous Machine for Hybrid Electric Vehicles”, Proc. of the the 2011-14th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE 2011), ISBN 978-90-75815-15-3, pp. 1-10.
- [Tut 11b] L.N.Tutelea, **S.I.Deaconu**, I.Boldea, F.Marignetti, G.N.Popa, “Quasi-3D FEM Analysis of an Single Stator Dual PM Rotors Axial Synchronous Machine for Hybrid Vehicles”, ELECTRIMACS, Cergy-Pontoise, France, 2011, ISBN 978-2-7466-3454-1, pp. 1-7.
- [Tut 12a] L.N.Tutelea, I.Boldea, **S.I.Deaconu**, “The Single Stator Dual Rotor PMSM for HEV: Two Windings and 4 Leg Inverter Control”, 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), 2012, ISBN 978-1-4673-1972-0, DS3a.1-1- DS3a.1-6.
- [Tut 12b] L.N.Tutelea, **S.I.Deaconu**, I.Popa, G.N.Popa, “Control Methods of an Single Stator Dual Rotor PMSM”, Buletinul AGIR, vol. XVII, no. 4, 2012, ISSN 1224-7928, pp. 15-22.
- [Tut 12c] L.N.Tutelea, I.Boldea, **S.I.Deaconu**, “Optimal design of dual rotor single stator PMSM drive for automobiles”, Electric Vehicle Conference (IEVC), 2012 IEEE International, pp. 1-8.
- [Tut 12d] L.N.Tutelea, **S.I.Deaconu**, I.Boldea, “Design and FEM validation for an axial Single Stator Dual Rotor PMSM”, IECON 2012-38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society, pp. 2929- 2935.
- [Tut 12e] L.N.Tutelea, I.Boldea, **S.I.Deaconu**, G.N.Popa, “Single Stator Dual Rotor PMSM: Design and Optimization with Matlab”, International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering, EPE 2012, Iasi, Romania, ISBN: 978-1-4673-1172-4, pp. 349-354.
- [Tut 13a] L.N.Tutelea, **S.I.Deaconu**, I.Boldea, N.Budisan, “Design, Control and 2D-FEM Validation for an Double Stator Winding Induction Generator”, 39th Annual Conference of the IEEE Industrial-Electronics-Society (IECON), 2013, ISSN 1553-572X / ISBN 978-1-4799-0224-8, pp. 2732-2737.
- [Tut 13b] L.N.Tutelea, **S.I.Deaconu**, N.Budisan, I.Boldea, “Double stator winding induction generator for wind and hydro applications: 2D-FEM analysis and optimal design”, Power Electronics and Applications (EPE), 2013 15th European Conference on, pp. 1-10.
- [Tut 14a] L.N.Tutelea, **S.I.Deaconu**, “Dual rotor single stator permanent magnet motors for hybrid electrical vehicles”, Editura Politehnica Timișoara, ISBN 978-606-554-861-9, 2014, 119 pp.
- [Tut 14b] L.N.Tutelea, **S.I.Deaconu**, I.Boldea, G.N.Popa, “Dual rotor single- stator axial air gap PMSM motor/generator drive for high torque vehicles”, International Conference on Applied Sciences (ICAS2013) Book Series: IOP Conference Series-Materials Science and Engineering Vol: 57 Article No. 012009, 2014, ISSN 1757-8981, pp. 1-7.
- [Tut 14c] L.N.Tutelea, I.Boldea, **S.I.Deaconu**, “Parameter optimal identification of dual three phase stator winding induction machine”, Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM), 2014 International Conference on, pp. 231-238.
- [Tut 14d] L.N.Tutelea, I.Boldea, N.Muntean, **S.I.Deaconu**, “Modeling and performance of novel scheme dual winding cage rotor variable speed induction generator with DC link power delivery”, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE, pp. 271 – 278.
- [Tut 14e] L.N.Tutelea, **S.I.Deaconu**, G.N.Popa, “Reduced cost low speed wind or hydro energy conversion system with twin stator windings induction generator”, Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition (PEMC), 2014 16th International, pp. 317-324.
- [Tut 14f] L.N.Tutelea, **S.I.Deaconu**, G.N.Popa, “Control System for Producing Electricity with Dual Stator Winding Cage-Rotor Induction Generator”, Analele Universității „Eftimie Murgu” Reșița , Vol. XXI, nr. 2, 2014, ISSN 1453-7397, pp. 323-334.
- [Tut 15a] L.N.Tutelea, **S.I.Deaconu**, G.N.Popa, “Dual stator winding variable speed asynchronous generator: optimal design and experiments”, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 85 (2015) 012010, 2015, ISSN: 1757-899X, pp. 1-9.
- [Tut 15b] L.N.Tutelea, **S.I.Deaconu**, I.Boldea, “Classical DC Excited Synchronous Generator for High Power Direct Driven Wind Turbine: Optimal Design and FEM Validation”, EPE'15 ECCE Europe, Geneva, 8-10 septembrie, 2015, pp. 1-7.
- [Tut 16a] L.N.Tutelea, N.Muntean, **S.I.Deaconu**, C.D.Cuntan, “Dual stator winding variable speed asynchronous generator: magnetic equivalent circuit with saturation, FEM analysis and experiments”, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 106 (2016) 012036, 2016, pp. 1-10.
- [Tut 17] L.N.Tutelea, N.Muntean, **S.I.Deaconu**, “Dual Stator Winding Induction Generator for Wind or Hydro Applications”, Editura Politehnica Timișoara, ISBN 978-606-35-0111-1, 2017, 186 pp.
- [Udd 06] M. Nasir Uddin, T.S. Radwan, and M.A. Rahman, “Fuzzy-Logic-Controller-Based Cost-Effective Four Switch Three-Phase Inverter-Fed IPM Synchronous Motor Drive System”, IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 42, no. 1, January/February, 2006, pp. 21-30.
- [Vid 06] L. Vido, M. Gabsi, M. Lecrivain, Y. Amara and F. Chabot, “Homopolar and Bipolar Hybrid Excitation Synchronous Machine”, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 21, no. 3, September, pp 1212-1218, (2006).
- [Zhe 09] Zhe Chen, Josep M. Guerrero, and Frede Blaabjerg, “Review of the State of the Art of Power Electronics for Wind Turbines”, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 24, No. 8, August 2009.
- [Yeh 12] Y.H. Yeh, M.F. Hsieh, and D.G. Dorrell, “Different Arrangements for Dual-Rotor Dual-Output Radial-Flux Motors,” IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 48, pp. 612-622, no. 2, March/April 2012.

- [Yon 09] Yong Li, Yuwen Hu, Wenxin Huang, Lingshun Liu, and Yong Zhang, "The Capacity Optimization for the Static Excitation Controller of the Dual-Stator-Winding Induction Generator Operating in a Wide Speed Range", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 2, February 2009, pp. 530-541.
- [Ytt 21] A. Ytterberg, "Ny method for fullbelasstning av electrica maschiner utan drivmotor eler avlastningsmaskin", s.k. skakprov, Teknisktidskrift, 1921, S42-44.
- [Wan 05] Dong Wang, Weiming Ma, Fei Xiao, Botao Zhang, Dezhi Liu, and An Hu, "A novel stand-alone dual stator-winding induction generator with static excitation regulation", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, No. 4, December 2005, pp. 826-835.
- [Wan 11] W. Wang, K.W.E. Cheng, K. Ding, and L.C. Meng, "A Novel Approach to the Analysis of the Axial-Flux Permanent-Magnet Generator With Coreless Stator Supplying a Rectifier Load," IEEE Transactions on Magnetics , vol. 47, pp. 2391-2394, no. 10, October 2011.
- [Wan 09] S. Wang, X. Meng, N. Guo, H. Li, J. Qiu, J.G. Zhu, Y. Guo, D. Liu, Y. Wang, and W. Xu, "Multilevel Optimization for Surface Mounted PM Machine Incorporating With FEM," IEEE Trans. On Magnetics, Vol. 45, pp. 4700-4703, No. 10, October 2009.
- [Wel 01] B.A. Welchko, and T.A Lipo, "A Novel Variable-Frequency Three-Phase Induction Motor Drive System Using Only Three Controlled Switches", IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 37, no. 6, November/December, 2001, pp. 1739-1745.
- [Wen 06] O. Wen, D. Zarko, and T.A. Lipo, "Permanent Magnet Machine Design Practice and Optimization," 41st IAS Annual Meeting. Conference Record of the 2006 IEEE, vol. 4, pp. 1905-1911, October 8-12, 2006.
- [Wil 97] Williamson S., Ferreira A.C., and Wallace A.K., "Generalized theory of the brushless doubly-fed machine-Part 1: Analysis, Part 2: Model verification and performance", Proc. IEE-Elect. Power Applct., vol. 144, no. 2, pp. 111-121, pp. 123-129, Mar. 1997.