

ŞCOALA DOCTORALĂ INTERDISCIPLINARĂ

Facultatea de Design de Produs şi Mediu

Ing. Cosmin Florian CRISTEA

Cercetări teoretice şi experimentale privind comportamentul dinamic al sistemului mecanic în raport cu cel electric al maşinii sincrone în aplicaţiile eoliene

Theoretical and experimental research regarding the dynamic behavior of the mechanical system relation to electrical system of the synchronous machine in wind turbine applications

REZUMAT

Conducător ştiinţific

Prof.Univ.Dr.Ing. Ioan STROE

BRAŞOV, 2023

D-lui (D-nei)

COMPONENȚA

Comisiei de doctorat

Numită prin ordinul Rectorului Universității Transilvania din Braşov

Nr. din

PREȘEDINTE:

- Prof. univ. dr. ing. Jaliu Codruța
Decan, Facultate Design de Prods și Mediu
Universitatea Transilvania din Braşov

CONDUCĂTOR ȘTIINȚIFIC:

- Prof. univ. dr. ing. Stroe Ioan
Universitatea Transilvania din Braşov

REFERENȚI:

- Prof. univ. dr. ing. Doroftei Ioan
Universitatea Tehnică Gheorghe Asachi din Iași
- Prof. univ. dr. ing. Pâslă Doina
Universitatea Tehnică din Cluj-Napoca
- Prof. univ. dr. ing. Bidian Dan
Universitatea Transilvania din Braşov

Data, ora și locul susținerii publice a tezei de doctorat:

01.09.2023, ora 12, sala Căsuța solară, Corpul E

Eventualele aprecieri sau observații asupra conținutului lucrării vor fi transmise electronic, în

timp util, pe adresa cosmin.cristea@unitbv.ro

Totodată, vă invităm să luați parte la ședința publică de susținere a tezei de doctorat.

Vă mulțumim

CUPRINS

	pag. teză	pag. rezumat
LISTĂ DE ABREVIERI	5	-
LISTĂ DE FIGURI	6	-
LISTĂ DE TABELE	11	-
REZUMAT	14	4
ABSTRACT	14	4
INTRODUCERE	15	5
1. Stadiul actual al cercetărilor în domeniul turbinelor eoliene și a mașinii sincrone	18	8
1.1. Considerații generale privind energia eoliană	18	8
1.2. Aspecte de proiectare a turbinelor eoliene	22	10
1.2.1. Părți componente ale sistemelor eoliene	23	-
1.2.2. Tipuri de turbine eoliene	28	-
1.2.3. Standardizarea componentelor sistemelor eoliene	33	11
1.2.4. Fiabilitatea sistemelor eoliene	33	11
1.2.5. Contribuția rulmenților la fiabilitatea turbinelor eoliene	34	-
1.2.6. Cuplarea turbinelor eoliene la rețea	34	12
1.2.7. Principiul de bază al funcționării turbinelor eoliene	35	-
1.2.8. Conversia energiei eoliene - mărimi de bază	36	-
1.2.9. Tendințe de creștere a utilizării energiei eoliene în lume	38	-
1.2.10. Sisteme mecanice de reglare a turației la arborele generatorului	39	13
1.2.11. Modelarea turbinei eoliene cu generator sincron	40	14
1.3. Mașina sincronă	42	14
1.3.1. Generalități și definiții	42	14
1.3.2. Elemente constructive ale mașinii sincrone	44	-
1.3.3. Tipuri de sisteme de excitație	47	15
1.3.4. Expresia cuplului electromagnetic a mașinii sincrone	48	-
1.3.5. Bilanțul puterilor mașinii sincrone	49	-
1.3.6. Randamentul mașinii sincrone	50	-
1.3.7. Aplicații ale mașinii sincrone utilizate ca motor	50	-
1.3.8. Generatorul sincron	60	16
1.4. Concluzii și formularea obiectivelor	64	17
2. Cercetări privind mașina sincronă utilizată ca motor	67	20
2.1. Introducere	67	20
2.2. Determinări experimentale privind caracteristicile mecanice și electrice ale motorului sincron	68	21

2.3. Modelarea parametrilor pentru determinarea caracteristicilor motorului sincron	69	22
2.4. Determinarea caracteristicilor mecanice și electrice ale motorului sincron	71	23
2.4.1. Determinarea caracteristicilor mecanice și electrice ale motorului sincron pentru $I_{er}=0,5A$	71	-
2.4.2. Determinarea caracteristicilor mecanice și electrice ale motorului sincron pentru $I_{er}=1A$	76	-
2.4.3. Determinarea caracteristicilor mecanice și electrice ale motorului sincron pentru $I_{er}=1,5A$	81	-
2.4.4. Determinarea caracteristicilor mecanice și electrice ale motorului sincron pentru $I_{er}=2A$	86	-
2.4.5. Determinarea caracteristicilor mecanice și electrice ale motorului sincron pentru $I_{er}=2.5A$	91	-
2.4.6. Determinarea caracteristicilor mecanice și electrice ale motorului sincron pentru $I_{er}=3A$	96	23
2.4.7. Analiza caracteristicilor mecanice și electrice pentru valori crescătoare ale curentului de excitație	102	28
2.5. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse crescătoare ale cuplului motor	104	30
2.5.1. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse crescătoare ale cuplului motor pentru $I_{er}=0.5A$	105	-
2.5.2. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse crescătoare ale cuplului motor pentru $I_{er}=1A$	106	-
2.5.3. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse crescătoare ale cuplului motor pentru $I_{er}=1.5A$	107	-
2.5.4. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse crescătoare ale cuplului motor pentru $I_{er}=2A$	108	-
2.5.5. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse crescătoare ale cuplului motor pentru $I_{er}=2.5A$	109	-
2.5.6. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse crescătoare ale cuplului motor pentru $I_{er}=3A$	111	31
2.6. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse variabile ale cuplului motor	112	32
2.6.1. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse variabile ale cuplului motor pentru $I_{er}=0.5A$	113	-
2.6.2. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse variabile ale cuplului motor pentru $I_{er}=1A$	115	-
2.6.3. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse variabile ale cuplului motor pentru $I_{er}=1,5A$	118	-
2.6.4. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse variabile ale cuplului motor pentru $I_{er}=2A$	121	-
2.6.5. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse variabile ale cuplului motor pentru $I_{er}=2.5A$	123	-

2.6.6. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse variabile ale cuplului motor pentru $I_{er} = 3A$	126	33
2.7. Caracteristici mecanice și electrice ale motorului sincron la variații diferite de cuplu în timp	129	34
2.7.1. Caracteristica de cuplu impusă variabilă pentru $I_{er} = 3A$, în 10s	129	34
2.7.2. Caracteristica de cuplu impusă variabilă pentru $I_{er} = 3A$, în 50s	131	-
2.7.3. Caracteristica de cuplu impusă la variații bruște de cuplu pentru $I_{er} = 3A$, în 50s	134	35
2.7.4. Caracteristica de cuplu impusă la variații variabile bruște de cuplu pentru $I_{er} = 3A$, în 50s	136	-
2.8. Concluzii	140	36
3. Cercetări privind mașina sincronă utilizată ca generator	143	39
3.1. Introducere	143	39
3.2. Determinarea experimentală a caracteristicilor mecanice și electrice ale generatorului sincron	143	39
3.3. Determinarea caracteristicilor generatorului sincron	147	-
3.4. Comportarea generatorului sincron la variații impuse ale cuplului motor.	150	41
3.5. Concluzii	156	45
4. Contribuții originale privind proiectarea și dezvoltarea standului pentru punerea în sincronism a generatorului cu rețeaua electrică	158	47
4.1. Sincronizarea manuală a generatorului sincron	158	47
4.1.1. Noțiuni teoretice	158	47
4.1.2. Determinări și montaje experimentale	160	47
4.2. Comportarea generatorului sincron la variații impuse de cuplu la arborele motor	163	50
4.2.1. Echipamente utilizate	163	50
4.2.2. Determinări experimentale – Curba de variație crescătoare în trepte	163	51
4.2.3. Determinări experimentale – Curbe de variație impuse cu șocuri la arborele motor	172	52
4.3. Studiul experimental al reglajului automat tensiunii în cazul oscilațiilor turației generatorului sincron	183	54
4.3.1. Noțiuni teoretice	183	54
4.3.2. Măsurători și montaje experimentale	183	54
4.4. Concluzii	190	61
5. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE, DISEMINAREA REZULTATELOR, DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE	192	63
5.1. Concluzii finale	192	63
5.2. Contribuții originale	195	66
5.3. Diseminarea rezultatelor	196	67
5.4. Direcții viitoare de cercetare	196	67
BIBLIOGRAFIE	197	68

REZUMAT

Prezenta teză de doctorat urmărește să stabilească noi soluții pentru sincronizarea generatorului sincron cu rețeaua de alimentare trifazată, în cazul turbinelor eoliene, care în anumite situații pot fi afectate de variații crescătoare sau descrescătoare ale turației, pot fi supuse unor șocuri la arbore sau se pot accelera excesiv. Prin studierea caracteristicilor motorului sincron, s-a demonstrat importanța curentului și a tensiunii de excitație în controlul acestora. Pornind de la o abordare aprofundată a cercetării mașinii sincrone ca generator, s-au dezvoltat metode eficiente și economice de sincronizare a generatorului cu rețeaua trifazată prin variabilitatea curentului de excitație. Autorul a efectuat testări ale mașinii sincrone pe standuri dedicate, montajul, schemele și modalitățile de optimizare fiind o contribuție personală în domeniu. Acestea au permis simularea șocurilor mecanice la arborele generatorului. Finalitatea lucrării constă în configurarea și construcția unui sistem electric și mecanic care printr-o rezistență suplimentară automată introdusă în circuitul rotoric, poate fi comandat, astfel încât automatul de sincronizare utilizat să poată comanda sistemul electromecanic, păstrând valorile tensiunii în rețeaua națională, compensând șocurile mecanice de la arborele turbinei eoliene.

Theoretical and experimental research regarding the dynamic behavior of the mechanical system in relation to electrical system of the synchronous machine in wind turbine applications

ABSTRACT

This PhD thesis wants to find new ways to synchronize the synchronous generator of wind turbines with the triphasic power grid, which in some cases can be affected by increasing or decreasing speed, shocks to the shaft, or excessive acceleration. By studying the features of the synchronous motor, the importance of current and excitation voltage in its ability to be controlled has been proven. Starting from a thorough approach in researching the synchronous machine as a generator, efficient and economically viable methods of synchronizing the generator with the triphasic grid through the variability of the excitation current have been developed. The author made testing of the synchronous machine on dedicated stands, the montage, the schemes, and the optimization methods being a personal contribution to the domain. These have allowed the simulation of mechanical shocks to the generator shaft. The finality of this work consists of the configuration and construction of an electrical and mechanical system that can be controlled through an additional resistor that is automatically introduced in the rotary circuit so that the automatic synchronization system being deployed can control the electromechanical system while staying at the values of the national grid voltage by compensating for the mechanical shocks coming from the shaft of the wind turbine.

INTRODUCERE

Tendențele actuale ale dezvoltării tehnico - economice de informatizare și crearea de noi surse de energie regenerabilă, de conservare a energiei, duc la necesitatea tot mai crescută, de studiere a acestora, de găsire de noi soluții, astfel încât acestea să înlocuiască într-un timp scurt alte metode convenționale de producere de energie electrică.

Cele mai importante tehnologii din domeniul energiei din surse regenerabile responsabile pentru această creștere sunt energia eoliană și energia solară. Deși, din punctul de vedere al volumului, energia eoliană se află încă în urma energiei hidroelectrice, volumul anual de energie electrică produsă din energie eoliană a crescut cu 414 % între 2005 și 2017, ajungând în anul 2020 la 1000 GW.

Proiectarea, construcția și implementarea eolienei a evoluat în timp, căutându-se noi și noi soluții constructive, cu scopul de a deveni mai economică, producând în același timp energie cu mai multă eficiență. S-au studiat diferite topologii de proiectare, care țin de dimensiuni ale turbinelor, de dimensiunea și numărul palelor, de capacitatea de orientare pe direcția vântului, precum și aspecte ce țin de topologia/densitatea pe suprafață a acestora (tendința este de micșorare a distanței dintre ele).

Datorită vitezei vântului, care de multe ori nu este constantă în timp, apar probleme legate de variabilitate, găsindu-se soluții de proiectare la nivelul cutiei de viteze, a regulatorului de turație, dar și la nivel electric astfel încât turbina eoliană și implicit generatorul sincron al acestuia să furnizeze energie la parametri nominali rețelei trifazată de alimentare.

Astfel, în domeniul cercetării a devenit o necesitate să se găsească soluții optime atât din punct de vedere constructiv și funcțional cât și să se obțină un randament energetic constant. De aici necesitatea de a dezvolta un sistem cât mai economic de a păstra tensiunea, frecvența, succesiunea fazelor și sincronismul furnizate de generatorul sincron al turbinei eoliene astfel încât indiferent de variațiile de la arbore, să nu se producă deconectarea acestuia de la rețea.

Conținutul lucrării

Lucrarea este structurată în 5 capitole, în cadrul cărora sunt abordate probleme teoretice și experimentale legate de energia eoliană, ale mașinii sincrone precum și conceperea și modelarea acestui mecanism al sistemului mecanic - electric studiat.

Capitolul întâi, intitulat - *Stadiul actual al cercetărilor în domeniul turbinelor eoliene și a mașinii sincrone*, sintetizează aspecte teoretice privind stadiul actual al dezvoltării sistemelor eoliene, descrie turbinele eoliene și modul de conectare a acestora la rețeaua de alimentare. Tratează probleme legate de eficiență, implementare în aplicații conectate la rețea precum și cercetări actuale în domeniul atenuărilor mecanice de la arborele turbinei eoliene.

Mașina sincronă, ca parte componentă a turbinei eoliene este descrisă sub aspect teoretic privind construcția acesteia, diferențele ei în raport cu alte mașini electrice rotative, precum și rolul acesteia în industrie unde poate fi utilizată ca generator sau ca motor .

S-a plecat de la definiția mașinii sincrone, s-au făcut referiri despre rolul acesteia în aplicațiile industriale, s-a descris rolul rotorului și statorului în cadrul funcționării prezentându-se două modele de mașini sincrone, în funcție de varianta constructivă - cu miez rotoric cu poli aparenti sau cu poli înecați.

În prezent, toate turbinele eoliene de putere precum și turbinele hidroelectrice au, pentru a produce energie electrică trifazată în rețea, generatoare sincrone. Acestea au o caracteristică foarte importantă care le deosebește de alte mașini electrice: au o turație constantă, indiferent de regimul de funcționare (stabilizat) și independent de valoarea sarcinii (în limite considerate normale).

Motorul sincron cunoaște o largă aplicabilitate datorită robusteții acestuia, dezvoltă un cuplu mare la o dimensiune de gabarit acceptabilă, iar datorită întrefierului acestuia, care poate fi mărit față de alte mașini electrice, o face rezistentă în timp. În studiul motorului sincron s-au descris ecuațiile de funcționare, s-au evidențiat caracteristicile cele mai importante ale acesteia, de unde a reieșit faptul că tensiunea și curentul de excitație joacă un rol important în pornirea și reglajul acesteia. Noțiuni teoretice despre pornirea motorului sincron scot în evidență pornirea mai greoaie a acestora, probleme de exploatare care au fost rezolvate în prezent prin utilizarea invertoarelor de frecvență și a sistemelor de automatizare.

Generatorul sincron este tratat separat în lucrarea prezentată, unde s-a exemplificat rolul înfășurărilor statorice bobinate decalat, la un unghi fazorial de 120 grade, precum și rolul înfășurării de excitație, care alimentată cu un sistem de curent continuu, furnizează parametri trifazați în rețeaua de alimentare trifazată, la o frecvență nominală a rețelei. Variabilitatea generatorului sincron este strâns legată de controlul acestuia prin controlul tensiunii și curentului de excitație, fapt ce a dus la studierea acestui aspect în capitolele următoare.

Capitolul al doilea, intitulat *Cercetări privind mașina sincronă utilizată ca motor*, prezintă mai multe cercetări experimentale și studii de caz, care pun în evidență rolul și influența curentului de excitație în controlul motorului sincron.

În prima parte a acestui capitol, cu ajutorul unui stand experimental, s-au ridicat caracteristici mecanice și electrice pentru diferite valori ale curentului de excitație, la cupluri motoare diferite la arbore. În articole științifice publicate, s-a scos în evidență și necesitatea variabilității curentului de excitație în controlul motorului sincron.

Cercetările continuă cu generarea curbelor de cuplu, care scot în evidență faptul că mașina sincronă își menține turația constantă în raport cu sarcina la arbore în limite normale. S-au generat diferite caracteristici de cuplu, la diferite valori ale curentului de excitație. Studiile au scos în evidență faptul că mașina sincronă păstrează turații constante la cupluri variabile și impuse.

La final, s-au creat diferite curbe de sarcină care s-au aplicat arborelui mașinii. Acestea simulează eventualele rafale de vânt de la arborele unei turbine eoliene, măbind atât valoarea cuplului motor cât și intervalul de timp în care staționează o anomalie la palele turbinei.

În urma concluziilor determinărilor experimentale, s-a trecut la nivelul următor și anume în studii legate de cercetări asupra generatorului sincron.

Capitolul al treilea, intitulat *Cercetări privind mașina sincronă utilizată ca generator* continuă studiul anterior prin contribuții originale legate de construcția unui sistem mecanic și electric care a permis cercetarea mașinii sincrone în regim de generator.

Astfel, sunt prezentate standuri diferite, care permit ridicarea de caracteristici mecanice și electrice ale generatorului sincron. Acestea pun în evidență parametri ce trebuie modificați pentru controlul ulterior al

sistemului prezentat. Influența curentului de excitație la arborele generatorului sincron este utilizată pentru schemele de sincronizare manuală și automată care fac obiectul cercetării științifice.

În capitolul patru, intitulat *Contribuții originale privind proiectarea și dezvoltarea standului pentru punerea în sincronism a generatorului cu rețeaua electrică* am prezentat cercetări privind alegerea unei scheme corecte de sincronizare manuală și automată, astfel încât cheltuielile să fie minime, realizabile și eficiente. Montajul final prezentat în această lucrare la figura 4.17. este o contribuție originală prin care s-a studiat reglajul automat al curentului de excitație în cazul oscilațiilor turației generatorului sincron. Montajul conține un sincronizator automat care stabilizează tensiunea de ieșire a generatorului în jurul valorii de 400 V la variații ale turației până la o valoare minimă de 1367 rot/min și la o valoare maximă de 1650 rot/min, în condițiile unui turații nominale de 1500 de rot/min, acesta fiind un parametru nominal al generatorului sincron studiat. Datorită unei rezistențe suplimentare controlate automat, montate în serie cu înfășurarea rotorică de excitație, sistemul permite controlul automat al acestei rezistențe, la turații variabile sau bruște, păstrând tensiunea de ieșire a generatorului. Graficele rezultate au scos în evidență importanța curentului și implicit a rezistenței de excitație în stabilitatea sistemului eolian.

În capitolul al cincilea, se formulează concluziile finale, contribuțiile originale, diseminarea rezultatelor precum și direcțiile viitoare de cercetare.

1. Stadiul actual al cercetărilor în domeniul turbinelor eoliene și a mașinii sincrone

1.1. Considerații generale privind energia eoliană

Studii recente arată că producția de energie electrică din surse regenerabile a atins 38% din producția mondială aferentă anului 2021. Din totalul energiei electrice generate din surse regenerabile, 10% a fost produsă de sistemele eoliene și fotovoltaice. Cea mai avansată țară din Europa care a implementat sisteme de producere a energiei electrice din surse regenerabile este Danemarca, procentul atins este de 50%.

În Raportul Special nr. 08 din 2019 emis de Comisia Europeană este precizat că, pentru implementarea sistemelor de producere a energiei electrice din energie eoliană și solară sunt necesare acțiuni semnificative pentru atingerea obiectivelor asumate de UE [1].

Creșterea procentelor de energie electrică obținută din surse regenerabile are drept scop reducerea emisiilor de gaze cu efect de seră până în 2030 cu un procent de 40% iar până în 2050 cu cel puțin 80%, aceste gaze provenind în mare parte din utilizarea combustibililor convenționali pentru producerea de energie electrică și termică. Mai mult această energie este disponibilă fără costuri neimplicând și alte aspecte precum import, taxe, prețuri variabile așa cum se întâmplă în cazul combustibililor fosili.

România a elaborat un plan național integrat în domeniul energiei și schimbărilor climatice legiferat prin HOTĂRÂREA nr. 1.076 din 4 octombrie 2021 publicată în MO nr. 963 din 8 octombrie 2021 [3].

Țintele asumate ale țării noastre la nivelul anului 2030 sunt reducerea cu 43,9% a emisiilor aferente sectoarelor ETS în comparație cu nivelul înregistrat în 2005, cu 2% a emisiilor care provin din sectoarele non-ETS în comparație cu nivelul înregistrat în 2005. Alte ținte sunt legate de creșterea cu 30,7% a procentului de energie din surse regenerabile în consumul total brut și reducerea cu 40,4% a consumului final de energie față de proiecția PRIMES 2007 [4].

Industria producătoare de turbine eoliene și-a intensificat producția pe fondul creșterii cererii venite din partea producătorilor de energie electrică și nu numai. Un aspect important pentru cercetare și pentru optimizarea sistemelor îl reprezintă strategiile de comandă și control ale turbinelor de mare putere (ale centralelor eoliene) care furnizează energie direct în rețea. Scopul principal urmărit este de reducere a costurilor totale cu producerea energiei electrice. O modalitate de a obține acest lucru este dată de reducerea componentelor mecanice și reglarea pasului paletelor în scopul obținerii maximului de energie care poate fi produsă de turbină [5].

Datorită costului de producție, energia electrică produsă din surse eoliene a atins prețul cel mai mic față de celelalte surse, acesta situându-se la un moment dat la 4 eurocent/kWh. Puterea instalată în Europa la nivelul anului 2005 a fost de 50 GW reprezentând un procent de 1,3% din totalul de putere instalată pe glob). Propunerea de implementare a energiei eoliene până în 2020 era estimată că ar fi putut atinge o putere de 400 GW (8% din totalul de putere instalată pe glob) [5].

Turbinele eoliene au fost îndelung studiate pentru a funcționa optim, scopul fiind producerea de energie electrică la un preț cât mai mic. Astfel, modelarea palelor turbinei, modelarea unghiului de incidență asupra palelor, viteza vântului au fost aspecte detaliat cercetate [6].

Din studiile realizate, s-a concluzionat faptul că, o viteză nominală medie a vântului poate fi considerată la 12-15 m/s. Acest potențial eolian se regăsește și în zona Mării Negre [7]. Astfel, mașina primară, turbina trebuie să fie capabilă să furnizeze o putere electrică cât mai apropiată de puterea nominală a generatorului [5].

Dacă viteza vântului crește foarte mult, turbina eoliană, prin sistemele de protecție, se va opri pentru a nu se distruge. Turbinele eoliene care funcționează la viteze mari ale vântului sunt echipate cu sisteme de control și protecție.

Turbinele eoliene care funcționează cu viteză constantă au în structură generatoare de inducție cu rotor în colivie iar în acest caz pentru funcționarea lor nu sunt necesare strategii de control ale turbinei.

Turbinele eoliene construite pentru viteze variabile ale vântului au strategie dublă de control. Una este pentru generator, iar cea de a doua pentru rotorul turbinei, sistemul de control fiind comun.

Mașinile electrice utilizate sunt mașini sincrone cu magneți permanenți, cu înfășurare de excitație, sau mașini asincrone cu rotor bobinat. În cazul sistemelor eoliene proiectate pentru viteze variabile, sistemul electromecanic este mai complex față de cele proiectate pentru viteză constantă. Problemele date de variația vântului au determinat cercetătorii să găsească soluții la provocările apărute. Modalitățile de control ale sistemelor eoliene proiectate pentru viteze variabile ale vântului sunt pitch control, stall control și active stall control [5].

Turbinele eoliene în orice configurație ar fi (orizontale sau verticale), transformă energia dată de vânt în energie mecanică, care ulterior transmite unui generator electric este transformată în energie electrică. Energia electrică obținută este direct dependentă de energia primară furnizată de vânt, de suprafața palelor și de densitatea aerului. [8].

Problema principală de mentenanță care o ridică sistemele eoliene, în ciuda disponibilității lor, este dată de transmisia mecanică, aspect care cauzează costuri mai mari și întreruperi mai lungi. Celelalte componente se defectează mai rar și nu aduc costuri atât de ridicate din punct de vedere al întreținerii [9]. Diferența de viteză care apare între rotor și generator poate fi crescută cu ajutorul amplificatoarelor de turație. În practica de zi cu zi s-a dovedit faptul că aceste amplificatoare de turație în realitate au o durată mai mică de viață decât cea dată de fabricanți. Defecțiunile care apar sunt localizate la nivelul rulmenților roților planetare ale arborelui intermediar, la rulmenții arborelui de mare viteză, care sunt de altfel cele mai solicitate elemente aflate în mișcare. Din analiza datelor colectate de la producătorii de energie s-a ajuns la concluzia că, cele mai multe avarii nu sunt date de mecanismele care intervin în oboseala contactelor rulante (de tip latent și superficial conform ISO 15243), acestea putând fi estimate prin metode de predicție. Cele mai multe avarii apar datorită fisurilor care nu pot fi analizate în acest mod [9], [10]. De altfel, pe lângă defectele apărute la rulmenți la partea mecanică mai sunt și defecte apărute la osii, cuplaje, angrenaje, cutii de viteze, defecte la nacelă, turn, pale sau la generatorul electric [10].

Sistemele eoliene au evoluat din punct de vedere al performanțelor în timp, astfel eolienele funcționau la viteze ale vântului cuprinse între 3,8 m/s și 22 m/s cu o durată medie de funcționare de 1600 ore/an pentru ca acum să avem sisteme care funcționează 3000 de ore/an la viteze ale vântului cuprinse între 2,2 m/s și 33,3 m/s, evoluția tehnologică fiind evidentă datorită conceptului cu pas variabil.

Fiabilitatea sistemelor eoliene onshore (EMO) a crescut de-a lungul timpului, fapt care se datorează atât standardizărilor legate de funcționalitatea acestor sisteme cât și de cerințelor economice care impun acest lucru [9], [19]. Studiile arată că, de la o frecvență de defectare medie cuprinsă între 1 și 3 a unei turbine pe durata unui an de funcționare, se propunea să se ajungă la o frecvență sub 1 pe an.

Creșterea fiabilității are multe componente și anume: tehnologia de fabricație a sistemelor eoliene, tehnologia de funcționare a sistemelor eoliene, materialele din care sunt realizate, condițiile de funcționare ale sistemelor. Pentru fiabilitate se pot face predicții, acestea influențează capacitatea de producție

împreună cu condițiile de vânt disponibile. De asemenea, importante sunt și accesul logistic la instalație, locul de amplasament, costurile cu infrastructura și tipul de mentenanță [21].

Producătorii au realizat diferite tipuri de turbine EMO, însă date despre fiabilitatea lor nu erau disponibile. Pe de altă parte, fiind un sistem neliniar care nu depinde de timp, turbina eoliană are intrări variabile stocastice care au o pondere destul de mare asupra fiabilității [9].

Proiectarea sistemelor eoliene în timp a vizat mai multe aspecte atât tehnice cât și economice ca să îndeplinească condiții tehnice ridicate la prețuri acceptabile și să aibă o eficiență ridicată.

Modificările care au apărut la turbinele eoliene s-au produs la aproape toate componentele, fiind testate mai multe variante. Conceptele testate s-au referit la tipul de rotație (verticală și orizontală), poziționarea rotorului turbinei, strategii de control, alte tipuri de componente de bază precum sisteme de frânare sau tipuri de pale, tipuri de generatoare [22].

Pentru a exista o bază pentru proiectare, unele componente au fost standardizate (de exemplu turbina cu trei pale, cu ax orizontal și viteză variabilă etc.) [9].

Pe de altă parte, prin dezvoltarea continuă a sistemelor eoliene s-au realizat progrese la utilizarea acestora într-o plajă cât mai mare a vitezei vântului, dar sub aspect al fiabilității au apărut noi probleme de rezolvat.

1.2. Aspecte de proiectare a turbinelor eoliene

Turbinele eoliene sunt sisteme care au capacitatea de a transforma energia cinetică dată de vânt în energie mecanică. Aceasta este transformată prin intermediul generatorului, în energie electrică, care apoi este livrată în rețeaua de alimentare cu energie electrică după ce sunt îndeplinite condiții de sincronism și de calitate standardizate.

Generatorul electric preia la ax energia mecanică provenită de la pale pe care o transformă în energie electrică. Această energie poate fi stocată în baterii sau poate fi livrată în rețeaua publică de alimentare. De-a lungul timpului, construcția lor a vizat mai multe aspecte legate de dimensiuni, materiale, poziționare, sisteme mecanice, puteri electrice, astfel încât putem vorbi azi de turbine eoliene cuprinse într-o gamă largă de puteri electrice respectiv de la 25kW la 7MW pentru turbinele amplasate pe uscat (modelul E-126 de la Enercon) iar pentru turbinele amplasate pe mare, modelele actuale ajung la puteri electrice cuprinse între 14-15MW (ex. modelele Vestas 236 și Siemens Gamesa SG 14-222 DD) [28].

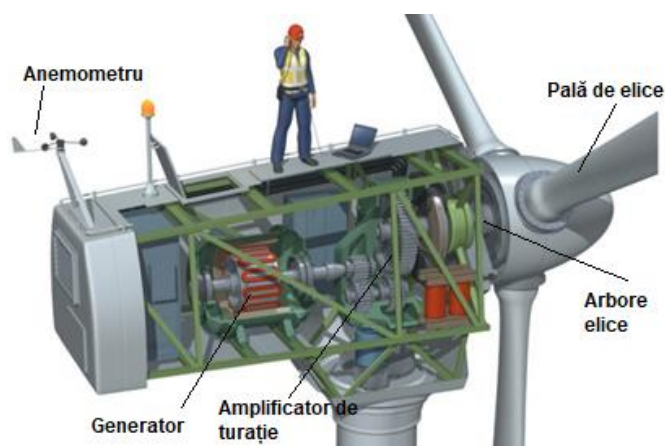


Fig.1.5. Turbina eoliană [29]

O turbină eoliană clasică simplă este alcătuită din trei părți importante: rotorul cu palele aferente (ele captează energia vântului și o transmit rotorului), amplificatorul de turație (pentru turbine mari), generatorul și frâna. La turbinele cu ax orizontal este nevoie suplimentar de un sistem de orientare în funcție de direcția vântului [8]. În Figura 1.5. sunt prezentate componentele turbinei

1.2.3. Standardizarea componentelor sistemelor eoliene

Crearea unui cadru legislativ tehnic obligatoriu, la care și-au adus contribuția și cercetătorii, a fost o provocare și o necesitate totodată. Îmbunătățirea continuă a produselor și garantarea calității produselor este o condiție a existenței pe piața producătorilor de sisteme eoliene.

Aspectele dinamice în standardizarea sistemelor eoliene cuprind: modelarea sistemelor de monitorizare și măsurare a potențialelor eoliene, modelarea palelor, modelarea turnurilor de susținere, modelarea sistemelor de transmisie a energiei, modelarea generatoarelor, susținerea introducerii de noi design-uri care să aducă randamente ridicate.

În design-ul sistemelor eoliene în ultimii ani, s-au elaborat standarde dedicate acestora. De exemplu familia de standarde IEC 61400, a fost adoptată de țara noastră sub numele SR EN IEC 61400.

De exemplu, standardul SR EN 61400 -1 din 2019 abordează "cerințele esențiale de proiectare pentru a asigura integritatea structurală a turbinelor eoliene. Scopul său, este de a oferi un nivel adecvat de protecție împotriva daunelor cauzate de toate pericolele pe durata de viață planificată. Documentul se referă la toate subsistemele turbinelor eoliene, cum ar fi: funcțiile de control și protecție, sistemele electrice interne, sistemele mecanice și structurile de sprijin. Acest document se aplică turbinelor eoliene de toate dimensiunile. Pentru turbinele eoliene mici, se poate aplica IEC 61400-2. IEC 61400-3-1 oferă cerințe suplimentare pentru instalațiile de turbine eoliene offshore". Această familie de standarde se poate armoniza cu Standardele IEC și ISO dedicate [23].

1.2.4. Fiabilitatea sistemelor eoliene

Fiabilitatea este o caracteristică care vizează două concepte și anume, unul calitativ (dacă există) și al doilea cantitativ (cât există), ambele fiind corelate în analize și cu alte aspecte care le influențează (indicatori, parametrii, condiții etc.) [41].

Aspectul calitativ al fiabilității se referă la aptitudinea unui produs (văzut ca un element, ansamblu de elemente sau sistem) de a-și îndeplini funcția pentru care a fost produs, într-o perioadă determinată de timp, având condițiile de folosire precizate.

În conceptul cantitativ al fiabilității sunt introduse elemente de performanță și este văzut ca o probabilitate de funcționare corectă într-o perioadă determinată de timp, în condiții bine precizate de producător.

În ceea ce privește studiul fiabilității turbinelor eoliene s-au făcut numeroase cercetări în diferite țări pe componentele principale ale acestora, dar și asupra tehnicilor de reglare precum și a condițiilor de mediu în care ele lucrează [19], [20]. Astfel, studiile arată preocupări legate de îmbunătățirea performanțelor însă tipurile de analize și datele obținute au fost greu de comparat. În [50] au fost analizați indicatori precum factorul de capacitate, disponibilitatea în funcție de timp, disponibilitatea tehnică, disponibilitatea energetică, timpul mediu de indisponibilitate. Colectarea unor date de la diferiți utilizatori, folosind acești indicatori, au ajutat fabricanții de turbine eoliene să îmbunătățească tehnologia de fabricare a acestora și

performanțele în funcționare. Mai mult preocupările actuale pentru îmbunătățirea fiabilității turbinelor arată că o parte din probleme au fost înlăturate și că în acest context și indicatorii de fiabilitate urmăriți sunt alții [51]. În alte studii se fac comparații ale fiabilității sistemelor onshore cu offshore asupra componentelor principale iar rezultatele arată că una din cauzele comune importante care produc alte defecte majore sunt sistemele de prindere cu șuruburi asupra cărora acționează forțe mari [50].

1.2.6. Cuplarea turbinelor eoliene la rețea

Datorită variațiilor sursei primare de energie, sistemele eoliene de producere a energiei electrice ridică probleme de calitate (armonici, scăderea frecvenței) odată cu conectarea la rețea. Din acest motiv s-au făcut studii pentru diminuarea acestor probleme. Astfel, Sava et al. [52] abordează principalele provocări legate de conectarea sistemelor de conversie a energiei eoliene (SCEE) la rețea. Centralele eoliene cu capacitate mai mare de 10MW trebuie să respecte condițiile impuse de operatorul de rețea și care sunt similare centralelor clasice. Operatorul de rețea, prin codul tehnic RED și Ordinul nr. 51/03.04.2009 ANRE pentru aprobarea normei tehnice „Condiții tehnice de racordare la rețele electrice de interes public pentru centralele electrice eoliene”, completat cu ORDINUL nr. 29 din 17 mai 2013 și Ordinul nr. 208/ din 14 decembrie 2018, pe baza căruia s-au stabilit reglementări care privesc operarea în condiții stabile de funcționare și funcționarea în condiții dinamice cauzate de perturbări ale rețelei [45], [54].

În cazul funcționării normale, durata este nelimitată fără reducerea puterii active sau reactive, limitele de frecvență sunt în intervalul 50 Hz $\pm 10\%$. Tensiunile livrate în rețea nu pot varia cu mai mult de $\pm 4\%$ față de valoarea nominală în cazul rețelelor de înaltă și medie tensiune și cu $\pm 5\%$ din valoarea nominală în cazul rețelelor de joasă tensiune. O altă condiție de racordare la rețea este dată de îndeplinirea păstrării factorului de putere la următoarele valori prin reglaje corespunzătoare și anume minim 0,95 factor de putere inductiv și minim 0,95 factor de putere capacitiv. De asemenea, valoarea tensiunii reglate trebuie să fie de minim 95% din puterea reactivă în 30s.

În cazul perturbațiilor venite din rețeaua electrică, centrala eoliană trebuie să funcționeze continuu la frecvențe variabile în plaja 47,5-52 Hz pentru a se evita probleme și mai mari precum scăderea puterii active din rețea în cazul deconectării centralei. Din acest motiv centralele eoliene au obligația de a fi prevăzute cu sisteme de control automat a puterii active care țin seama de valoarea frecvenței, mai mult vor rămâne în funcțiune atunci când apar variațiile de tensiune cât și goluri de tensiune.

Centralele eoliene se controlează și monitorizează prin sisteme SCADA. La puteri mai mari de 5MW transmiterea datelor se face continuu către operatorul de rețea. Pentru transmiterea datelor și monitorizarea parametrilor de rețea se utilizează o interfață compatibilă cu sistemul SCADA. Mărimile electrice monitorizate sunt valori minime și maxim admise ale frecvenței, tensiunii electrice, puterii active și puterii reactive. De asemenea se transmit în ce poziție se află echipamentele de comutație în punctul de delimitare, se monitorizează frecvența în funcție de putere, direcția vântului și viteza acestuia, temperatura mediului ambiant și presiunea atmosferică.

În alt studiu realizat de Nirosha în [55] sunt prezentate consecințele care apar în urma problemelor de alimentare în cazul sistemelor eoliene. Acestea sunt: valori anormale ale tensiunii, creșteri sau scăderi, goluri de tensiune, întreruperi de scurtă durată, variații ale tensiunii de lungă durată, flicker, armonici.

Având în vedere respectarea normelor tehnice de conectare, fiabilitatea sistemelor eoliene rămâne un subiect sensibil cu destul de multe probleme încă de rezolvat. Standardizarea, o proiectare bună,

mentenanța optimă, pot reduce problemele care le ridică, sub aspect tehnic și legislativ funcționarea centralelor eoliene în sistemele naționale [56].

1.2.10. Sisteme mecanice de reglare a turației la arborele generatorului

În scopul creșterii randamentului turbinelor eoliene cu viteză variabilă au fost dezvoltate, de-a lungul timpului, sisteme care au menirea să corecteze fluctuația puterii mecanice care se datorează vitezei variabile a vântului. Astfel unele sisteme includ dispozitive de electronică de putere care la rândul lor realizează redresări și conversii care duc la pierderi suplimentare și au software-ul de control scump, ceea ce duce la costuri suplimentare iar dispozitivele semiconductoare componente introduc probleme de calitate a energiei în rețea [66]. Alte soluții tehnice pentru compensarea variației de putere propun eliminarea convertizorului de putere și legarea generatorului direct la rețea [66] sau utilizarea unor trenuri de transmisie cu viteză variabilă ce includ motoare și pompe hidraulice care pot fi controlate. Pentru turbinele eoliene de mică putere ar putea fi folosite transmisii cu curele trapezoidale cu doi scripeți cu arc. Acest mecanism ajustează raportul de transmisie corespunzător cuplului aplicat pe scripetele de antrenare. Dacă arcurile sunt proiectate corespunzător între cuplu și raportul de transmisie, este obținută o relație caracteristică care asigură condițiile necesare unei bune funcționări a sistemului.

Altă soluție propusă, constă în utilizarea unei transmisii hibride care are două trepte de transmisie planetară care constă în faptul că turația angrenajului al celei de a doua trepte se controlează prin intermediul a trei mașini sincrone, pentru a permite turației rotorului să rămână variabilă iar turația generatorului sincron să rămână constantă.

Soluția propusă de Zao et al. în [66] este utilizarea unui sistem cu tren de transmisie cu viteză variabilă, care propune împărțirea puterii folosind o transmisie planetară care este controlată electric și două perechi de angrenaje de reglare. Transmisia este alcătuită din trei arbori, unul în partea de intrare care este conectat la rotorul turbinei și doi la ieșire care sunt legați de servomotor și de generator, după cum se poate observa în figura 1.14.

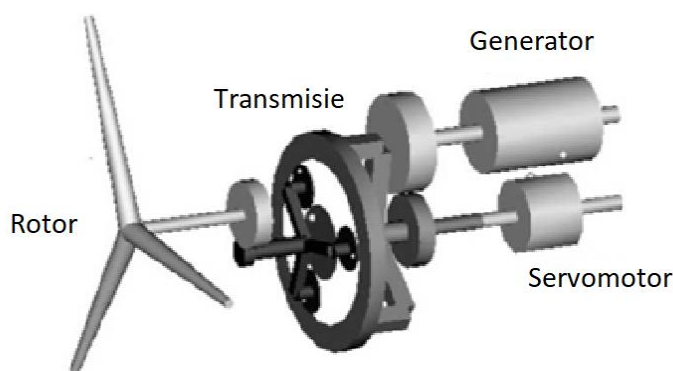


Fig.1.14. Dispozitiv de divizare a puterii mecanice[66]

Autorii analizează eficiența sistemului utilizând două configurații pentru sistemul de transmisie arătând că sistemul aduce îmbunătățiri semnificative randamentului global și că problemele legate de conectarea la rețea sunt diminuate.

În alte cercetări fundamentale [67] [68] sunt studiate amplificatoarele de turație pentru sisteme eoliene și hidroenergetice cu motoare de curent continuu și cu generator electric contrarotativ atât cu amplificatoare de turație în diferite configurații cât și fără sisteme care amplifică turația. Modelările realizate țin cont de punctul de funcționare caracterizat în regim staționar prin parametri cinematici și statici exteriori. Analiza acestor sisteme prezintă avantajul și dezavantajul fiecărei configurații. În mentenanța generală legată de costurile globale ale sistemelor eoliene amplificatorul de turație aduce costuri suplimentare deloc de neglijat. Prin urmare, găsirea unor soluții care să răspundă optim provocărilor tehnico-economice rămâne deschisă.

1.2.11. Modelarea turbinei eoliene cu generator sincron

Modelul analizat în [70] are rolul de a simula comportamentul dinamic al unei centrale eoliene de capacitate de 1,5 MW. Modelul a fost simulat în Matlab / Simulink. Părțile ce compun ansamblul turbină-generator prezentat în figura 1.15 sunt: simulatorul de vânt, turbina, generatorul sincron și un invertor de putere [70].

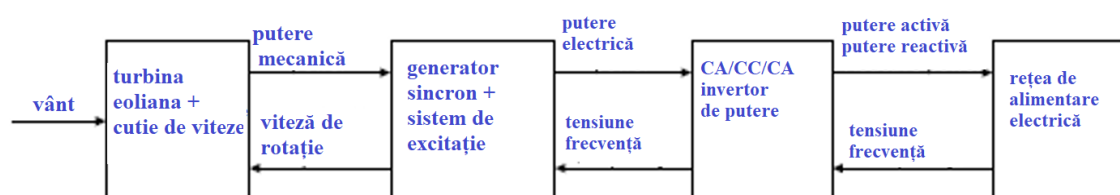


Fig.1.15.Structura generală a unui ansamblu turbină eoliană cu generator [70]

Turbina eoliană transformă energia cinetică a simulatorului fluxului de vânt în energie mecanică. Prin intermediul unei cutii de viteze arborele turbinei învârtă rotorul generatorului.

1.3. Mașina sincronă

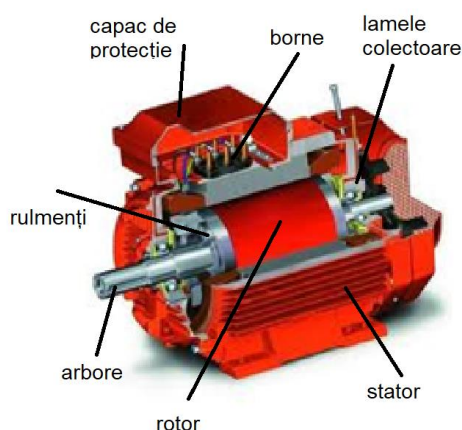


Fig.1.17.Elemente principale componente ale mașinii sincrone[71]

1.3.1. Generalități și definiții

Mașina sincronă, prin definiție este o mașină de curent alternativ. Turația ei este constantă, indiferent de regimul de funcționare (care este stabilizat) și independent de valoarea consumatorului (în limite normale).

Turația de sincronism a mașinii sincrone este legată de frecvența rețelei de curent alternativ la care este conectată mașina [73].

La mașina sincronă, viteza de rotație a rotorului este în raport constant cu frecvența rețelei electrice la care este conectată, câmpul magnetic inductor fiind produs de sistemul de perechi de poli a înfășurării de excitație care este alimentată în curent continuu [74].

Astfel se disting două regimuri de funcționare ale mașinii sincrone: regimul de motor și regimul de generator.

Regimul de bază pentru funcționarea mașinii sincrone este cel de *generator* electric, așa cum regimul de motor este regimul de bază pentru mașina asincronă. Generatorul sincron reprezintă baza economică a producerii de energie electrică în centralele electrice actuale. În funcționarea acestuia ca și generator, mașinile sincrone ating mari puteri nominale deoarece sunt cele mai mari mașini electrice rotative construite de până în prezent [77].

1.3.3. Tipuri de sisteme de excitație

- *cu mașina excitatoare*, este de fapt un generator de curent continuu. Poate fi cu excitație separată sau derivație (autoexcitație). Acesta poate fi cuplat pe același arbore al generatorului sincron (figura 1.21.a.). Metoda are avantajele ei care constau în faptul că tensiunea de excitație rezultantă constantă nu depinde de tensiunea rețelei. Probleme apar la turații mici, în cazul hidrogenatoarelor care au dimensiuni de gabarit mai mari a excitațiilor precum și la turații mari, în cazul turbogeneratoarelor unde pot apărea limitări datorită comutației (scânteieri la perii). Aceste caracteristici limitează puterea excitatoarelor de c.c. la aproximativ 500 kW;

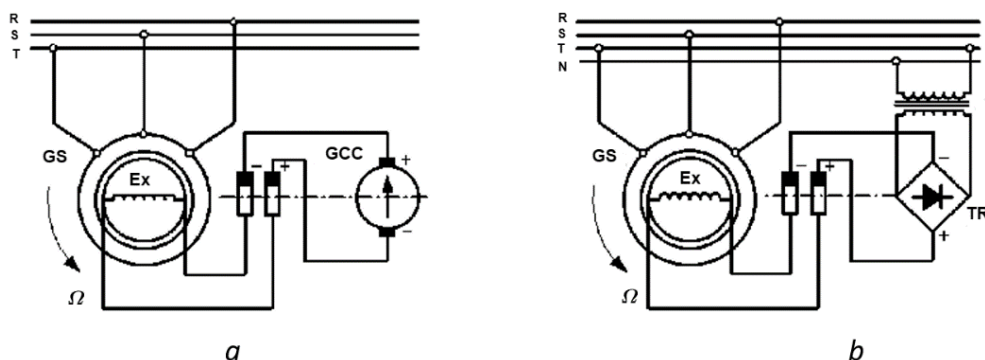


Fig.1.21. Tipuri de sisteme de excitație [77]

- *cu excitație statică* (figura 1.21.b), este în fapt o punte redresoare care redresează o fază statorică de c.a., rotorul în acest caz fiind alimentat de la redresor prin perii alunecătoare. Se elimină în acest mod dezavantajul folosirii mașinilor electrice care au inerții ale maselor în mișcare precum și uzură în timp. Sistemele de excitație statice sunt performante, simple, cu siguranță în exploatare și cu întreținere minimă.

- *cu mașini excitatoare fără perii* (figura 1.22.). În acest caz, generatorul sincron este de construcție inversată. Inductorul generatorului principal GS și indusul (rotorul) generatorului sincron de excitație GS_e sunt montate "în continuare", pe rotorul comun fiind montate pe două discuri diodele care alcătuiesc *redresorul rotitor*. Conexiunile redresorului cu bobina de excitație devin fixe, renunțându-se astfel la sistemul de perii [77].

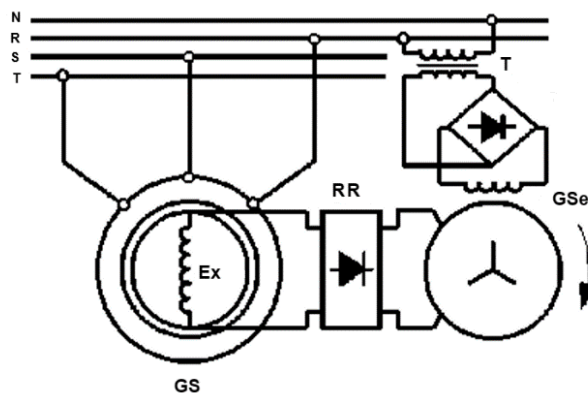


Fig.1.22. Sistem sincron cu mașină excitatoare fără perii [77]

1.3.8. Generatorul sincron

Generatorul sincron trifazat are caracteristici convenabile pentru producerea de energie electrică de curent alternativ reprezentând unica soluție general acceptată de proiectanții de centrale electrice și de sisteme electroenergetice.

Producerea energiei electrice se poate realiza prin intermediul turbogeneratoarelor, hidrogeneratoarelor respectiv turbine eoliene.

Turbogeneratoarele sunt antrenate de turbine cu abur, gaze sau motoare *Diesel* și funcționează la viteze mari, $n_0 = (1500-3000)$ rot/min. Au număr mic de poli, cei rotorici fiind poli înecați (rotorul este monobloc cilindric, prevăzut cu creștături rotorice), adică se asigură un întrefier constant, iar arborele este orizontal. *Hidrogeneratoarele* au ca mașină primară o turbină hidraulică, turația în acest caz este de ordinul sutelor de rotații pe minut, iar numărul polilor este mai mare. Au polii rotorici proeminenți, iar întrefierul nu mai este constant de-a lungul circumferinței interioare a statorului. Arborele este de obicei vertical. [77]

Turbina eoliană este o mașină care convertește energia cinetică a vântului în energie mecanică. Dacă energia mecanică este ulterior convertită în electricitate, atunci mașina se numește generator eolian, turbină eoliană sau convertor de energie a vântului [78].

Generatorul sincron de curent alternativ trifazat este o mașină electrică, care transformă energia mecanică în energie electrică de curent alternativ trifazat.

Are aceeași construcție similară ca și generatorul de curent alternativ monofazat, doar că pe stator are înfășurate trei bobine, cu parametrii similari, decalate spațial una față de alta cu 120° .

Cutia de borne a unei mașini sincrone are în general opt borne, dintre care: șase pentru înfășurările statorice și două pentru înfășurarea rotorică de excitație.

Cele trei înfășurări statorice sunt izolate atât între ele cât și față de statorul mașinii unde sunt amplasate, le numim faze și în general au capetele bobinelor notate astfel:

- capetele de început ale fazelor cu U_1, V_1, W_1 sau A, B, C;
- capetele de sfârșit ale fazelor sunt notate cu U_2, V_2, W_2 sau X, Y, Z.

Construcția unui generator sincron trifazat este reprezentată printr-o secțiune transversală a mașinii electrice, secțiune care este reprezentată ca în figura 1.35.

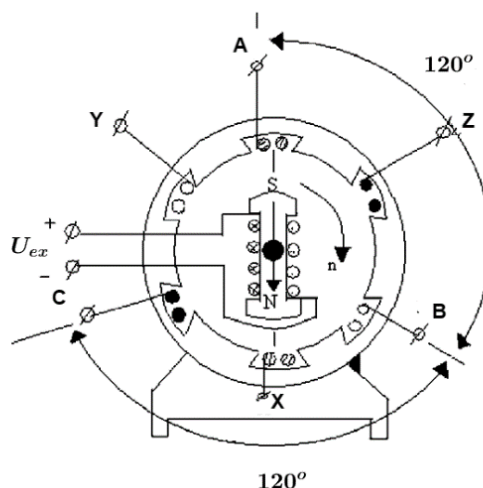


Fig.1.35. Secțiune transversală prin generatorul sincron trifazat [79]

În figura 1.35., conductoarele hașurate reprezintă faza A, cele albe reprezintă faza B, iar cele înnegrite reprezintă faza C. Bobinele înfășurărilor statorice sunt în așa fel amplasate, încât pornind de la începutul înfășurării fazei A și până la începutul înfășurării fazei B, să fie un decalaj fazorial cu un unghi de 120° , precedându-se identic între începutul înfășurării fazei B și începutul înfășurării fazei C.

Ținând cont de aceste particularități de construcție, rezultă că funcționarea generatorului sincron, comparativ cu generatorul de c.a. monofazat, diferă prin faptul că la ieșire se obțin trei tensiuni defazate între ele cu un unghiular la 120° , de curent alternativ.

1.4. Concluzii și formularea obiectivelor

Legislația actuală prevede noi reglementări privind reducerea utilizării combustibililor fosili. În acest context, Uniunea Europeană a elaborat directive legate de creșterea producției de energie electrică din surse regenerabile și a stabilit obiective precise. Fiecare țară, ținând cont de pachetele legislative europene, și-a elaborat propria strategie energetică. În contextul crizei cauzate de războiul din Ucraina, unele ținte au fost modificate mai ales datorită creșterii prețurilor atât la carburanți cât și la gaz metan și energie electrică.

Această situație cu implicare majoră economică determină guvernele să caute soluții într-un timp mult mai mic. Pe de altă parte, Raportul comisiei pune în evidență vulnerabilitățile care apar datorită legislațiilor naționale și propriilor recomandări inițiale. Raportul arată că ponderea energiile regenerabile raportat la disponibilitate poate fi mult îmbunătățită în implementare și că acest lucru s-ar putea accelera prin ajustări legislative și folosirea de fonduri publice și private. În ceea ce privește țintele României, procentul de 30% alocat creșterii producției de energie electrică din surse regenerabile este unul îndrăzneț dar nu imposibil de atins în condițiile în care profilele hidrografice și cele solare sunt fluctuante și dependente de condițiile meteo. Pe plan mondial a crescut producția de turbine eoliene de toate capacitățile și tipurile pe fondul cererii tot mai mari venite de la consumatori. În paralel cu implementarea și legarea la rețea a noilor consumatori, s-au reglementat prin standardizare și prin normative aspecte legate de calitate, fiabilitate, siguranță în funcționare, racordare la rețea, stocare de energie etc.

Preocupările cercetătorilor și producătorilor s-au concentrat în principal pe creșterea densității de energie pe suprafață. Acest lucru conduce la preocupări legate de îmbunătățirea elementelor implicate în captarea

energiei eoliene, îmbunătățirea subansamblelor implicate în transmiterea mișcării și vitezei de rotație la ax, îmbunătățirea sistemelor de control al palelor, modelarea optimizată a ansamblului turbină eoliană-generator, îmbunătățirea turnurilor de susținere, creșterea fiabilității componentelor sistemelor eoliene, modelarea sistemelor de conectare la rețeaua națională, și a sistemelor de stocare.

Toate aceste aspecte duc la noi limite, noi provocări, noi probleme de rezolvat cărora trebuie să li se facă față. Se estimează că în viitor, prin introducerea în rețea a unui număr crescut de producători de energie electrică din surse regenerabile, vor apărea probleme de calitate care trebuie atent gestionate astfel încât alimentarea în siguranță a tuturor consumatorilor să nu fie afectată.

Pentru a pune în evidență caracteristicile mașinii sincrone, s-a tratat mașina sincronă cu caracteristicile ei, detaliind motorul sincron cu caracteristicile sale și generatorul sincron la care s-au scos în evidență cele mai importante aspecte ale acestora.

În aplicațiile actuale care țin de producere de energie electrică, generatoarele sincrone se utilizează la toate sistemele eoliene precum și la toate centralele hidroelectrice.

Se pornește de la considerentul că, mașina sincronă este o mașină de curent alternativ a cărei turație este constantă, indiferent de regimul de funcționare (stabilizat) și independent de valoarea sarcinii (în limite normale). *Turația este cea de sincronism și este legată riguros de frecvența f a rețelei de curent alternativ la care este cuplată mașina* [73].

Mașina sincronă este caracterizată de faptul că viteza de rotație n a rotorului se găsește în raport constant cu frecvența rețelei la care este conectată, iar câmpul magnetic inductor este produs de un sistem de perechi de poli a căror înfășurare de excitație este alimentată în curent continuu [75]. Ea poate funcționa în regim de generator sau regim de motor.

S-au pus în evidență tipurile constructive de mașini sincrone, cu poli aparenti sau cu poli înecați, precum și diferențele dintre acestea. S-au exemplificat caracteristici ale acestora.

Particularitatea acestei mașini este legată de faptul că înfășurarea statorică are trei bobine care pot fi alimentate cu un sistem trifazat de tensiuni dacă mașina sincronă funcționează în regim de motor sau pot debita tensiuni trifazate în rețea dacă aceasta funcționează ca generator. În ambele situații, înfășurarea rotorică trebuie alimentată de la o sursă de curent continuu cu o tensiune numită tensiune de excitație. În funcție de modul de alimentare a acestei tensiuni, există variante de conectare care diferențiază montajul mașinii sincrone.

Ecuatiile de funcționare ale mașinii sincrone pun în evidență variabilitatea curentului și a tensiunii de excitație care este utilizat în pornirea, controlul și monitorizarea acestei mașini electrice.

Cel mai important aspect al motorului sincron este legat de faptul că el este utilizat în aplicații cu o largă răspândire, în general în industrie în situații în care avem nevoie de cupluri mari la turații mici. Dacă până nu demult erau probleme legate de pornirea acestora, aplicațiile recente cu invertoare de frecvență și sisteme de automatizare rezolvă aceste aspecte.

Generatorul sincron este tratat ca regim de funcționare al mașinii sincrone. Caracteristicile mecanice și electrice ale acestora pun în evidență rolul curentului de excitație în controlul acestei mașini. Modelarea generatorului sincron arată rolul înfășurării statorice cu bobinele acestora decalate fazorial la 120 grade.

În final, se pune în evidență faptul că, pentru controlul variabilității parametrilor mecanici ai mașinii sincrone, trebuie controlate și compensate caracteristicile acestora din reglajul curentului și tensiunii de excitație. De aceea s-a considerat, că pentru o cercetare în domeniul propus, este importantă studiarea acestor caracteristici atât în regim de motor cât și în regim de generator.

Din cercetările efectuate, prezentate în capitolul 1.2.10, studiul variabilității la arborele rotorului este preluat de o transmisie mecanică comandată de un servomotor. Acesta aduce sistemul mecanic la turația corespunzătoare de sincronism a generatorului. Schema bloc a acesteia este prezentată în figura 1.40.

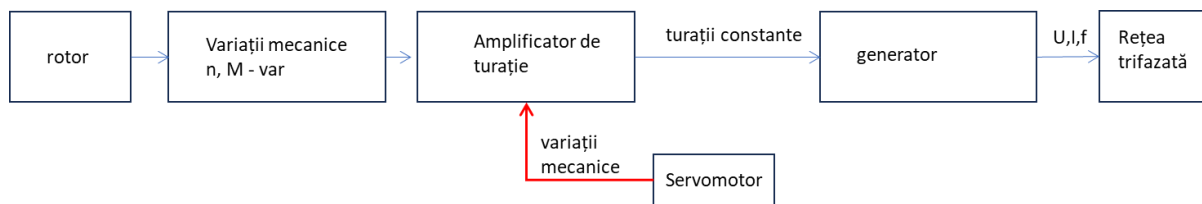


Fig.1.40. Schema bloc a sistemului mecanic utilizat pentru menținerea turației constante la generator

Cercetarea propusă, enunțată și în obiectivele tezei de doctorat, înlocuiește sistemul mecanic de control, cu un sistem de control comandat electric, prin compensarea variațiilor de la arbore cu ajutorul unei rezistențe de sarcină variabilă montată în circuitul rotoric, care permite controlul electronic al păstrării parametrilor în rețeaua trifazată, în anumite limite variabile ale turației generatorului. Astfel, schema bloc a sistemului prezentat în figura 1.40, ilustrată în figura 1.14 poate fi înlocuită cu sistemul prezentat în figura 1.41., necesitând cheltuieli mai reduse, fiabilitate mai mare și precizie ridicată.

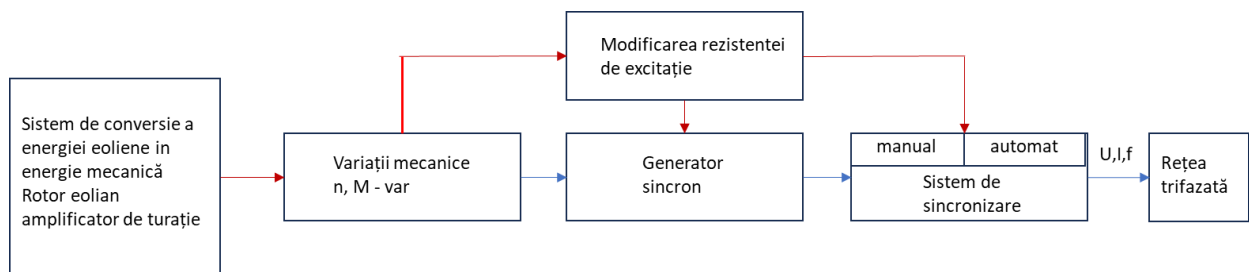


Fig.1.41. Schema bloc a sistemului propus pentru cercetare

Obiectivul tezei de doctorat

Studiul parametrilor electrici și mecanici ai generatorului sincron în scopul susținerii valorilor nominale furnizate în sistemul energetic național, în funcție de variația parametrilor mecanici ai arborelui rotorului eolian.

În urma formulării obiectivului general al tezei de doctorat s-au formulat următoarele obiectivele specifice:

- O1. Montaje și metode pentru studiul motorului sincron în scopul identificării de soluții care pot controla și stabili turația în funcție de momentul motor
- O2. Montaje și metode pentru studiul generatorului sincron în scopul identificării de soluții care pot controla și stabili parametri electrici în funcție de variațiile accidentale de la arborele turbinei eoliene
- O3. Fundamentarea procedurii de sincronizare și dezvoltarea unui stand utilizat pentru reglajul automat al tensiunii de debit de generatorul sincron în cazul variației turației rotorului eolian

2. Cercetări privind mașina sincronă utilizată ca motor

2.1. Introducere

Caracteristica de funcționare a motorului sincron este definită de egalitatea dintre câmpul magnetic învârtitor și viteza de rotație a rotorului mașinii. Viteza de rotație, în regim de funcționare staționar, depinde de frecvența tensiunii de alimentare a rețelei de curent alternativ, de numărul de poli ai câmpului magnetic învârtitor respectiv ai înfășurării de excitație.

Un element caracteristic mașinii sincrone constă în alimentarea în curent continuu a înfășurării de excitație. Datorită acestui fapt mașina sincronă poate funcționa la factor de putere unitar. [82]

Dezavantajul principal al motorului sincron constă în faptul că dezvoltă cuplu electromagnetic numai la viteza de sincronism și în plus prezintă o caracteristică mecanică rigidă până când cuplul rezistent atinge valoarea maximă a cuplului electromagnetic, moment în care motorul iese din sincronism [82].

Caracteristica mecanică este influențată de parametri electrici ai mașinii sincrone. Tensiunea și curentul de excitație ai mașinii sincrone modifică valoarea de declanșare a ieșirii din sincronism. Curentul nominal crește ușor la modificări ale cuplului rezistent până la ieșirea din sincronism. În lucrare se prezintă determinări experimentale pentru curentul de excitație nominal al motorului sincron: $n = f(M_r)$, $I = f(M_r)$, $P_2 = f(M_r)$, $\eta = f(M_r)$

Motorul sincron, datorită caracteristicii mecanice rigide, este în prezent utilizat din ce în ce mai mult în acționarea mașinilor de lucru și a sistemelor mecatronice. Motorul sincron prezintă, în comparație cu celelalte motoare electrice, următoarele avantaje: viteza de rotație nu depinde de sarcină, motorul își menține constantă viteza de rotație; factor de putere ridicat; randament mare.

Printre dezavantajele principale ale motorului sincron se pot cita: pendulările ce pot apărea la variații bruște de sarcină pe arbore, construcția mai complicată din cauza excitatoarei, preț de cost mai ridicat. În cazul acționărilor de putere redusă, schemele de pornire sunt mai complexe în cazul modificării vitezei impusă de procesul tehnologic. Motoarele sincrone sunt preferate în prezent în special pentru acționarea mașinilor de lucru care necesită puteri mari și viteză constantă de lucru.

Deoarece viteza motorului sincron nu variază cu sarcina de pe arborele său, caracteristica sa mecanică este liniară, iar panta caracteristicii definită prin derivata vitezei unghiulare în raport cu derivata momentului este nulă, figura 2.1.

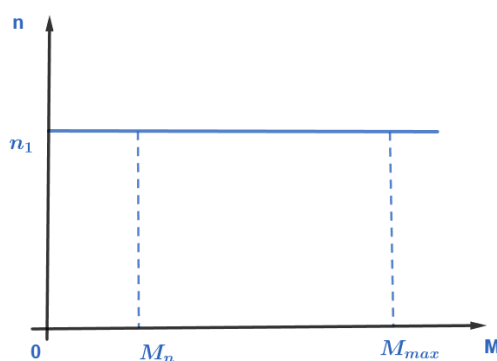


Fig.2.1. Caracteristica mecanică a mașinii sincrone [86]

Dacă se depășește o anumită valoare a cuplului de sarcină, motorul iese din sincronism și se oprește –deși teoretic valoarea cuplului poate fi oricât de mare. [86]

2.2. Determinări experimentale privind caracteristicile mecanice și electrice ale motorului sincron

Alegerea tipului și a puterii unui motor electric, utilizarea sa rațională, posibilitatea reglării vitezei etc., necesită studierea caracteristicilor mecanice și electrice ale motorului. Fiecare tip de motor posedă mai multe familii de caracteristici.

Pentru trasarea caracteristicilor mecanice și electrice ale motoarelor se utilizează standul din figura 2.3. Schema electrică de principiu este prezentată în figura 2.2. Standul are în structura sa următoarele blocuri funcționale:

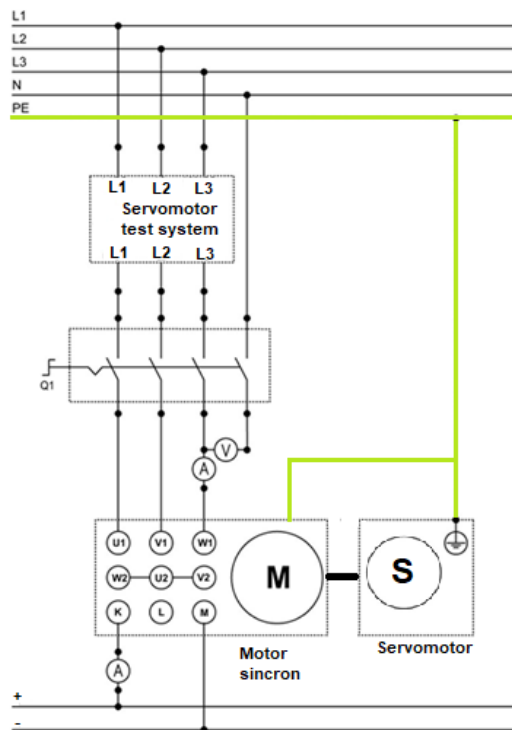


Fig.2.2. Schema electrică de principiu pentru trasarea caracteristicilor motorului sincron

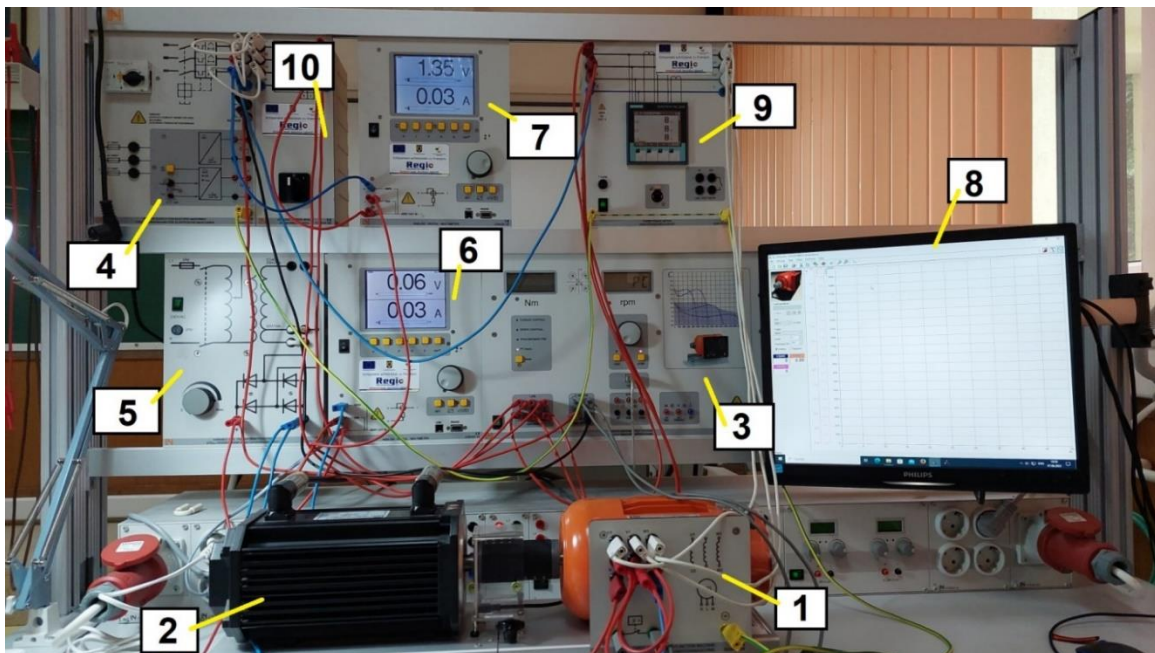


Fig.2.3. Stand pentru determinarea caracteristicilor mașinilor electrice

- 1- Mașină sincronă ;
- 2- Servomotor cu frână;
- 3- Controller servomotor;
- 4- Sursă de alimentare universală cu protecție termică pentru curent continuu și curent alternativ trifazat;
- 5- Autotransformator - pentru generarea tensiunii și curentului de excitație;
- 6- Multimetru analog/digital, voltmetru, ampermetru – pentru măsurarea curentului și tensiunii de excitație;
- 7- Multimetru analog/digital, voltmetru, ampermetru – pentru măsurarea curentului și tensiunii din înfășurarea statorică;
- 8- Software ActiveServo;
- 9- Multimetru digital pentru măsurarea parametrilor trifazați;
- 10- Întreruptor general tripolar cu 2 poziții.

Sursa de alimentare universală (4), asigură o tensiune alternativă trifazată de 400V înfășurării statorice a mașinii sincrone, conectată în conexiune stea. Multimetrul analog/digital (6), măsoară valorile în curent continuu ale curentului și tensiunii de excitație debitate variabil de către autotransformatorul (5), pe înfășurarea rotorică a mașinii sincrone (1). Controlerul (3) comunică cu servomotorul (2) prin intermediul software-ului dedicat ActiveServo (8). Mașina sincronă este cuplată la rețea prin întreruptorul general (10), după care se generează tensiune și curent de excitație pe înfășurarea rotorică. Tensiunea și curentul întregului sistem sunt monitorizate de multimetrul analog/digital (7). [80]

2.3. Modelarea parametrilor pentru determinarea caracteristicilor motorului sincron

Servomotorul utilizat la determinarea valorilor experimentale face parte dintr-un sistem complet de testare constând din: controller digital, un servomotor cu frână și un software dedicat: ActiveServo. Sistemul permite frânarea motoarelor electrice în puncte predefinite ale cuplului, afișarea valorilor nominale în diagrame de timp, precum și sincronizarea manuală și automată a generatoarelor.

Servomotorul standului permite simularea diferitelor momente rezistente pentru motorul sincron prin intermediul controllerului. Controllerul transmite mărimea de comandă motorului sincron în urma comparării mărimilor de referință cu cele transmise de senzorul de moment din cadrul transmisiei mecanice servomotor–motor sincron. Mărimile de referință sunt impuse prin programul de încercări, respectând scopul pentru care are loc determinarea diferitelor caracteristici de funcționare a motorului sincron. Servomotorul, prin intermediul mecanismului, cuplat mecanic la arbore, execută programul de încercări stabilit prin mărimile de comandă impuse.

Servomotorul prezintă din punct de vedere constructiv și funcțional următoarele caracteristici:[81]

- reglaj de viteză în limite foarte largi;
- caracteristicile mecanice generate sunt liniare;
- cuplu de pornire mare;
- capacitate de suprasarcină ridicată;
- constanta electromecanică de timp redusă;
- protecție împotriva autopornirii;
- gabarit și greutate specifică mică, etc.;
- absența autopornirii, etc.

Servomotorul cu frână este un motor asincron cu autorăcire de tip resolver. Aceasta dispune de monitorizare termică și, în legătură cu controllerul, constituie un sistem de monitorizare și de frânare, care nu necesită calibrare. Parametrii tehnici ai servomotorului sunt:

- Viteza maximă: 4000rpm;
- Cuplu maxim: 10Nm;

Monitorizarea temperaturii: senzor de temperatură continuă (KTY);

Rezoluția resolver: 65536 impulsuri/rotație.

Controllerul din cadrul sistemului de acționare și control are rolul de a genera momentele rezistente impuse caracteristicii studiate. Controllerul are următoarele caracteristici tehnice:

- Funcționare dinamică și statică în cele patru cadrane;
- 10 moduri selectabile de operare / modele de mașini;
- Sistem integrat amplificator izolat galvanic pentru măsurarea tensiunii și curentului;
- Afișează valori ale turației și cuplului;
- Monitor cu patru cadrane;
- Interfață USB;
- Monitorizarea termică a mașinii electrice;
- Testarea prezenței unui capac protector la arbore;
- Tensiunea de conectare: 320 ... 528V, 45 ... 65Hz;
- Putere maximă de ieșire: 3kVA.

Software ActiveServo este un program de monitorizare și înregistrare a caracteristicilor mașinilor electrice pentru determinarea punctelor de operare statice și dinamice. Simulează șapte sarcini diferite (volant, pompă, calandru, antrenare în ridicare, compresor, viteze de rotație, sarcină dependentă de timp configurabilă) pentru care parametrii pot fi configurați în mod individual.

2.4. Determinarea caracteristicilor mecanice și electrice ale motorului sincron

Pentru determinările experimentale, efectuate în vederea studiului caracteristicilor, s-a folosit un motor sincron cu următoarele caracteristici: $P_n=0.27\text{kW}$, $I_n=1.5\text{A}$, $f=50\text{Hz}$, $n=1500\text{rot/min}$, $U_{er}=20\text{Vcc}$; $I_{er}=4\text{A}$. Sursa de excitație a generat o tensiune în trepte de la 0-20 Vcc la valori impuse ale curentului de excitație de 0.5A, 1A, 1.5A, 2A, 2.5A, 3A. Motorul a fost frânat în 30 pași ale valorilor cuplului.

Pentru exemplificare, s-a ales reprezentarea datelor obținute în urma aplicării unui curent de excitație de $I_{er}=3\text{A}$.

2.4.6. Determinarea caracteristicilor mecanice și electrice ale motorului sincron pentru $I_{er}=3\text{A}$

În urma determinărilor realizate, pentru $I_{er}=3\text{A}$ s-au obținut caracteristicile:

$n=f(M)$, reprezentată în figura 2.39, Tabelul 2.36.

$I=f(M)$, reprezentată în figura 2.40, Tabelul 2.37.

$P_1=f(M)$, reprezentată în figura 2.41, Tabelul 2.38.

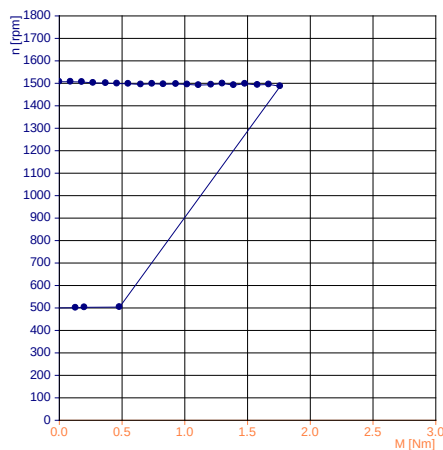
$P_2=f(M)$, reprezentată în figura 2.42, Tabelul 2.39.

$\cos \varphi =f(M)$, reprezentată în figura 2.43, Tabelul 2.40.

$\eta=f(M)$, reprezentată în figura 2.44, Tabelul 2.41.

Caracteristica $n=f(M)$ Tabelul 2.36. Rezultate obținute $n=f(M)$ pentru $I_{er}=3A$

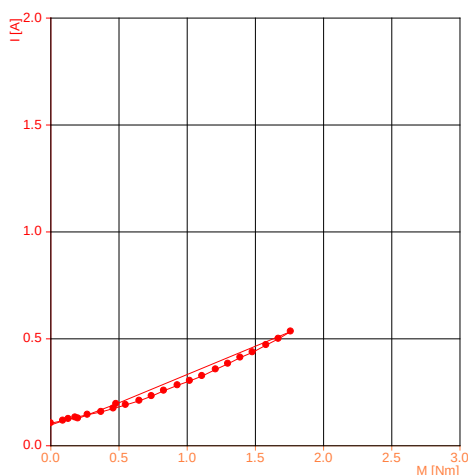
n [rpm]	1507	1507	1506	1502	1501	1499	1498	1495	1498	1496	1497	1495
M [Nm]	0	0,09	0,18	0,27	0,37	0,46	0,55	0,65	0,74	0,83	0,93	1,02
n [rpm]	1492	1494	1499	1492	1498	1493	1495	1487	504	503	501	499
M [Nm]	1,11	1,21	1,3	1,39	1,48	1,58	1,67	1,76	0,48	0,2	0,13	-0,27

Fig.2.39. Reprezentarea caracteristicii $n=f(M)$ pentru $I_{er}=3A$ [87]

Din graficul anterior se observă că turația motorului este păstrată constantă până la valoarea de 1,76 Nm după care scade și iese din sincronism la valoarea de 0,48Nm.

Caracteristica $I=f(M)$ Tabelul 2.37. Rezultate obținute $I=f(M)$ pentru $I_{er}=3A$

I [A]	0,11	0,12	0,13	0,15	0,16	0,17	0,19	0,21	0,23	0,26	0,28	0,30
M [Nm]	0	0,09	0,18	0,27	0,37	0,46	0,55	0,65	0,74	0,83	0,93	1,02
I [A]	0,33	0,36	0,38	0,41	0,44	0,47	0,50	0,53	0,20	0,13	0,13	0,04
M [Nm]	1,11	1,21	1,3	1,39	1,48	1,58	1,67	1,76	0,48	0,2	0,13	-0,27

Fig.2.40. Reprezentarea caracteristicii $I=f(M)$ pentru $I_{er}=3A$ [87]

Analiza graficului prezentat a condus la concluzia că intensitatea curentului electric din înfășurarea rotorică crește în funcție de creșterea cuplului de la valoarea de 0,11A până la valoarea de 0,53A la 1,76 Nm după care motorul iese din sincronism.

Caracteristica $P_1=f(M)$

Tabelul 2.38. Rezultate obținute $P_1=f(M)$ pentru $I_{er}=3A$

P_1 [W]	22,41	41,06	58,55	73,11	85,87	100,87	116,18	131,81	147,81	166,67	185,15	200,15
M [Nm]	0	0,09	0,18	0,27	0,37	0,46	0,55	0,65	0,74	0,83	0,93	1,02
P_1 [W]	216,06	238,45	257,26	277,13	293,81	316,70	336,14	360,56	107,40	33,43	36,17	2,23
M [Nm]	1,11	1,21	1,3	1,39	1,48	1,58	1,67	1,76	0,48	0,2	0,13	-0,27

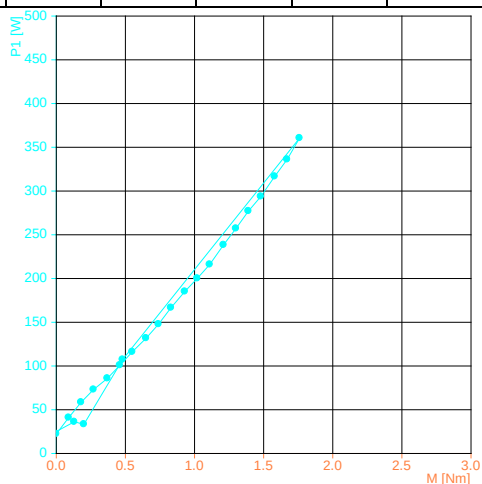


Fig.2.41. Reprezentarea caracteristicii $P_1=f(M)$ pentru $I_{er}=3A$ [87]

Din analiza rezultatelor obținute se poate formula următoarea concluzie: puterea activă crește în funcție de valorile de cuplu de la 22,41W în turație nominală până la valoarea de 360,56W după care motorul iese din sincronism.

Caracteristica $P_2=f(M)$

Tabelul 2.39. Rezultate obținute $P_2=f(M)$ pentru $I_{er}=3A$

P_2 [W]	0,00	14,20	28,39	42,47	58,16	72,21	86,28	101,76	116,08	130,03	145,79	159,69
M [Nm]	0	0,09	0,18	0,27	0,37	0,46	0,55	0,65	0,74	0,83	0,93	1,02
P_2 [W]	173,43	189,31	204,07	217,18	232,17	247,03	261,45	274,06	25,33	10,53	6,82	-14,11
M [Nm]	1,11	1,21	1,3	1,39	1,48	1,58	1,67	1,76	0,48	0,2	0,13	-0,27

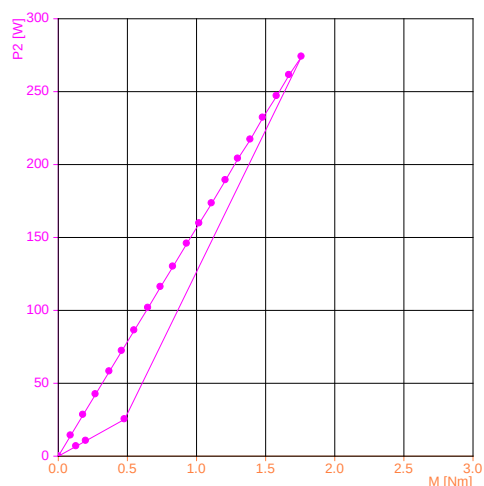


Fig.2.42. Reprezentarea caracteristicii $P_2=f(M)$ pentru $I_{cr}=3A$ [87]

Din graficul prezentat în figura 2.42. se observă că puterea mecanică la arbore crește proporțional cu creșterea cuplului motor de la valoarea 0 la valoarea de 274,06W pentru cuplul de 1,76Nm după care iese din sincronism

Caracteristica $\cos \varphi=f(M)$

Tabelul 2.40. Rezultate obținute $\cos \varphi=f(M)$ pentru $I_{cr}=3A$

$\cos \varphi$	0,30	0,50	0,63	0,72	0,77	0,83	0,87	0,90	0,91	0,93	0,94	0,95
M [Nm]	0	0,09	0,18	0,27	0,37	0,46	0,55	0,65	0,74	0,83	0,93	1,02
$\cos \varphi$	0,95	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,78	0,37	0,41	0,08
M [Nm]	1,11	1,21	1,3	1,39	1,48	1,58	1,67	1,76	0,48	0,2	0,13	-0,27

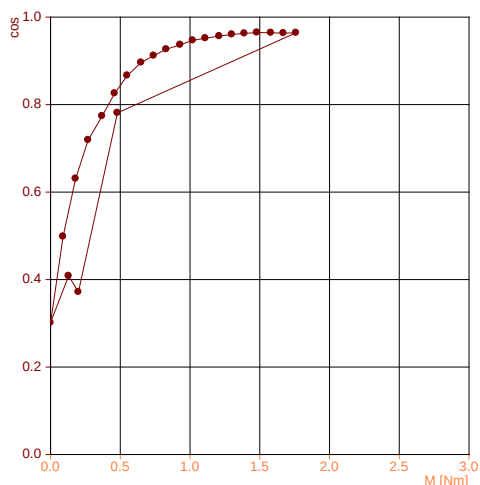


Fig.2.43. Reprezentarea caracteristicii $\cos \varphi=f(M)$ pentru $I_{cr}=3A$ [87]

Analizând figura 2.43, se observă faptul că, cosinusul unghiului de defazaj dintre tensiune și curent are o valoare crescătoare până la valoarea de 0,96 pentru un cuplu de 1,76Nm după care scade până la ieșirea din sincronism.

Caracteristica $\eta=f(M)$

Tabelul 2.41. Rezultate obținute $\eta=f(M)$ pentru $I_{cr}=3A$

η [%]	0,00	34,59	48,48	58,09	67,73	71,58	74,26	77,20	78,54	78,02	78,74	79,78
M [Nm]	0	0,09	0,18	0,27	0,37	0,46	0,55	0,65	0,74	0,83	0,93	1,02
η [%]	80,27	79,39	79,32	78,37	79,02	78,00	77,78	76,01	23,59	31,52	18,85	0,00
M [Nm]	1,11	1,21	1,3	1,39	1,48	1,58	1,67	1,76	0,48	0,2	0,13	-0,27

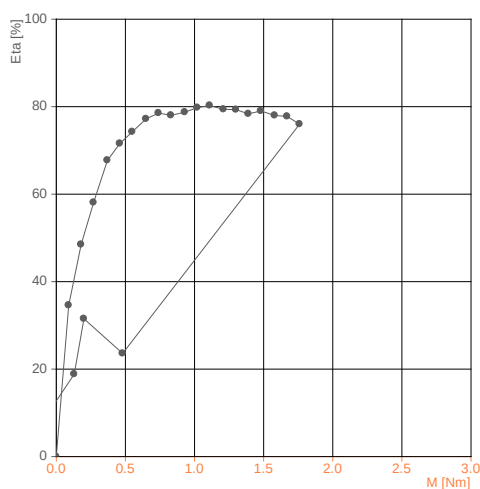


Fig.2.44. Reprezentarea caracteristicii $\eta=f(M)$ pentru $I_{cr}=3A$ [87]

În figura 2.44. se observă cum randamentul crește în primii pași de la valoarea 0 până la 79,39 % după care se păstrează relativ constant și scade datorită ieșirii din sincronism.

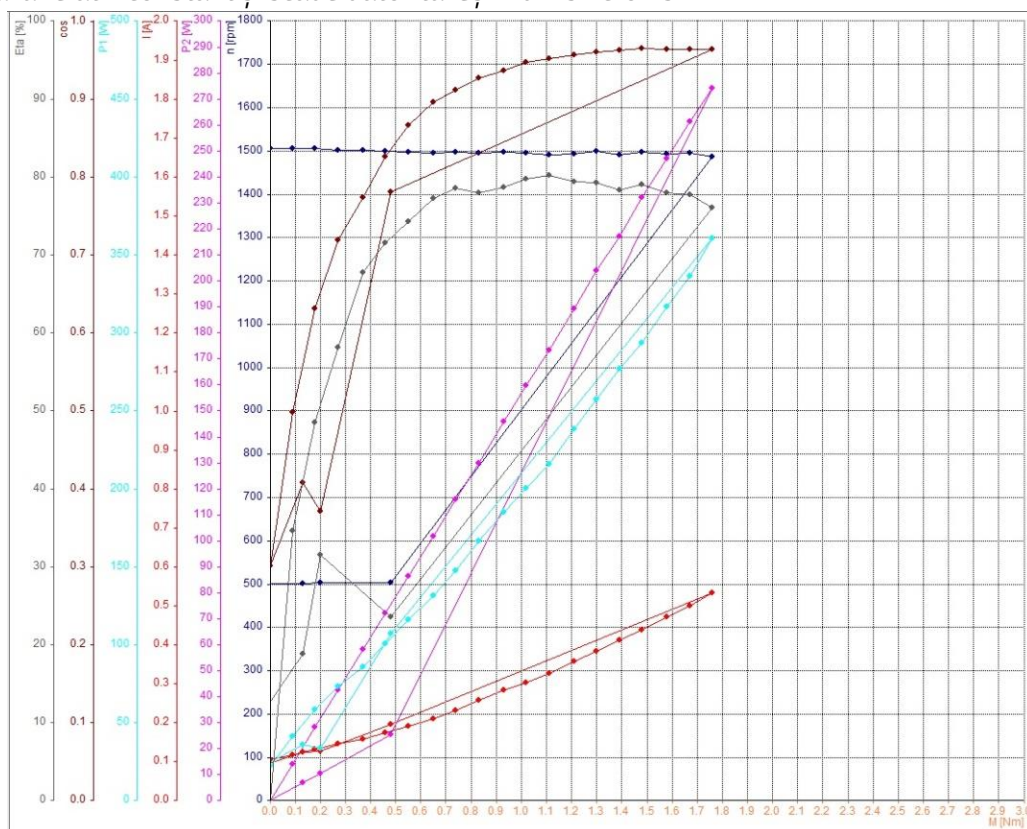


Fig.2.45. Reprezentarea caracteristicilor pentru $I_{cr}=3A$ [87]

Modificând valoarea curentului de excitație la valoarea de 3A, se observă practic că mașina sincronă își menține turația de sincronism la o încărcare succesivă a momentului, până la 1,76 Nm când se destabilizează și iese din sincronism. Acesta se destabilizează până la turația de 1487 rot/min , după care se oprește.

Valoarea curentului nominal crește în trepte, până la 1,76Nm .Se observă o scădere a valorii curentului nominal datorită creșterii valorii curentului de excitație. Puterea mecanică are o creștere liniară, direct proporțională cu creșterea cuplului, până la valoarea de 1,76Nm la ieșire din sincronism . Puterea activă în schimb crește odată cu creșterea curentului nominal până la valoarea de 360,56W după care se oprește. Față de valoarea anterioară a curentului de excitație, datorită scăderii intensității curentului, ieșirea din sincronism se face la valori mai mici ale puterii active.

Randamentul este influențat de valoarea cuplului, curba este relativ liniară, are valoarea maximă de 79,32% la un cuplu de 1,3Nm, după care scade ușor față de creșterea cuplului. Se observă practic că mașina sincronă își menține turația de sincronism la o încărcare succesivă a momentului, până la 1,76 Nm când se destabilizează și iese din sincronism. Acesta se destabilizează până la turația de 1487 rot/min , după care se oprește. Cosinusul unghiului de defazaj își menține o tentă crescătoare până la valoarea de 0,96Nm după această valoare motorul ieșind din sincronism.

2.4.7. Analiza caracteristicilor mecanice și electrice pentru valori crescătoare ale curentului de excitație

Acest subcapitol propune trasarea diagramelor caracteristicilor mecanice și electrice pentru valori crescătoare ale curentului de excitație de la 0,5 A la 3A

În urma determinărilor realizate, pentru $I_{err}=0,5A - 3A$ s-au obținut caracteristicile:

$n=f(M)$, reprezentată în figura2.46.

$I=f(M)$, reprezentată în figura2.47.

$P_1=f(M)$, reprezentată în figura2.48.

$P_2=f(M)$, reprezentată în figura2.49.

$\cos \varphi =f(M)$, reprezentată în figura2.50.

$\eta=f(M)$, reprezentată în figura2.51.

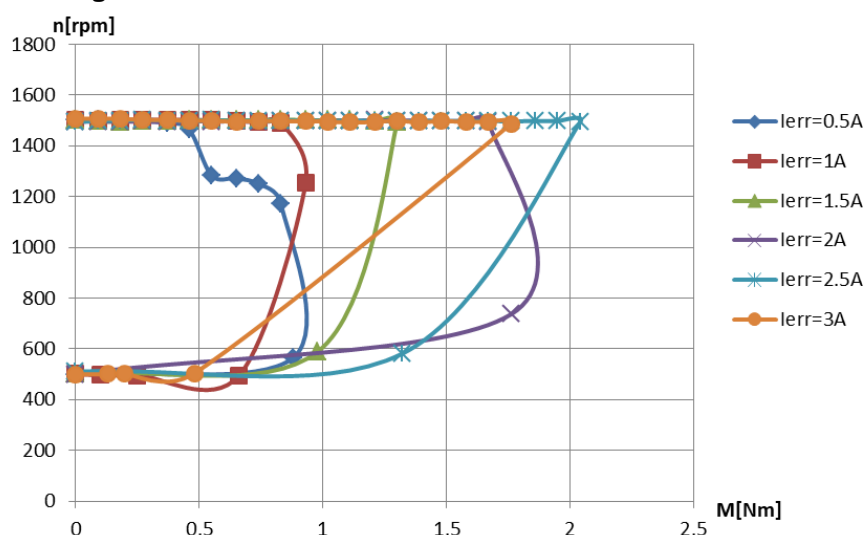


Fig.2.46. Caracteristici $n=f(M)$ pentru valori crescătoare ale curentului de excitație

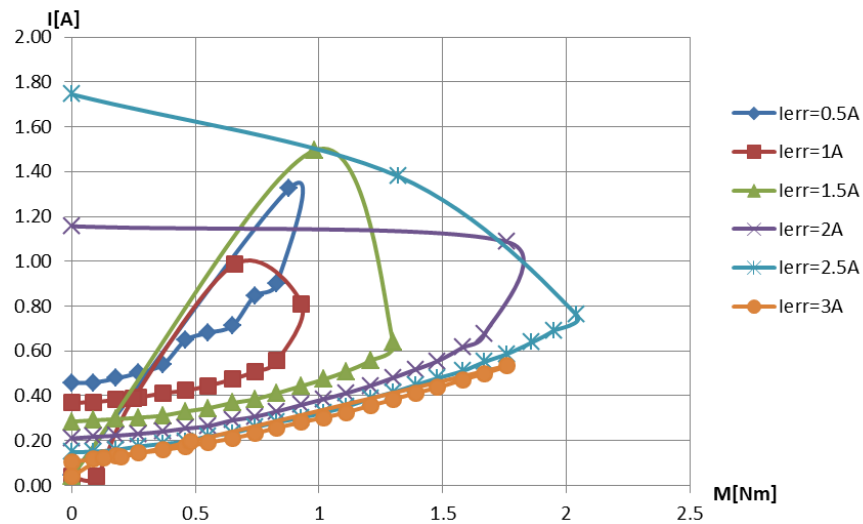


Fig.2.47. Caracteristici $I=f(M)$ pentru valori crescătoare ale curentului de excitație

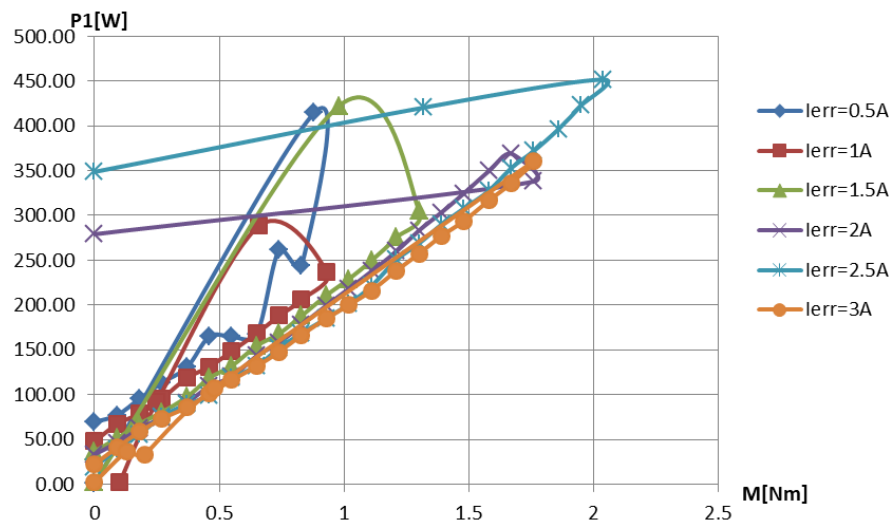


Fig.2.48. Caracteristici $P_1=f(M)$ pentru valori crescătoare ale curentului de excitație

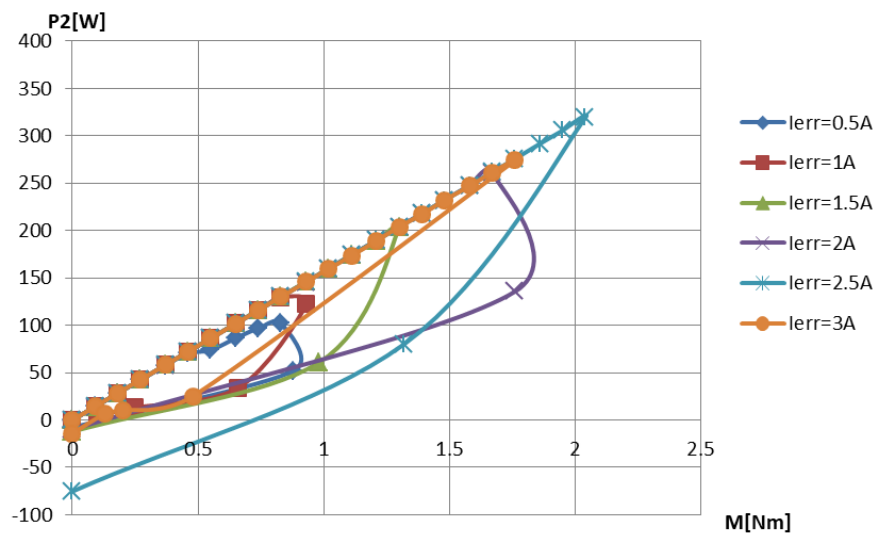


Fig.2.49. Caracteristici $P_2=f(M)$ pentru valori crescătoare ale curentului de excitație

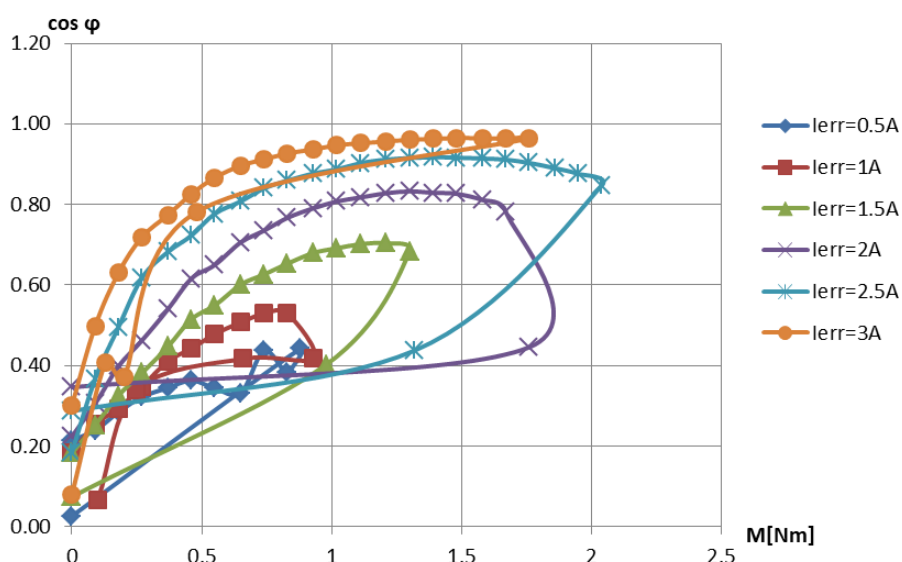


Fig.2.50. Caracteristici $\cos \varphi = f(M)$ pentru valori crescătoare ale curentului de excitație

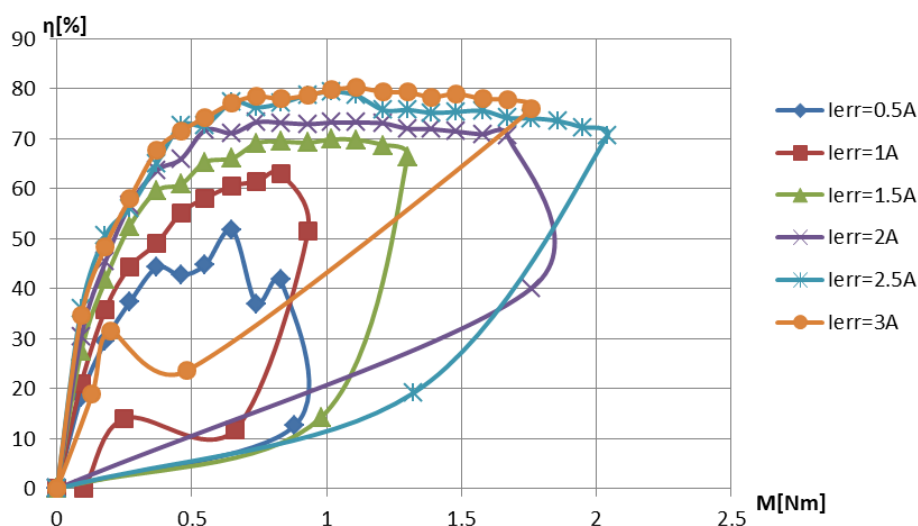


Fig.2.51. Caracteristici $\eta = f(M)$ pentru valori crescătoare ale curentului de excitație

2.5. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse crescătoare ale cuplului motor

Pentru determinările experimentale, efectuate în vederea studiului caracteristicilor, s-a folosit un motor sincron cu următoarele caracteristici: $P_n=0.27\text{kW}$, $I_n=1.5\text{A}$, $f=50\text{Hz}$, $n=1500\text{rot/min}$, $U_{er}=20\text{Vcc}$; $I_{er}=4\text{A}$. Sursa de excitație a generat o tensiune în trepte de la 0-20 Vcc la valori impuse ale curentului de excitație de 0.5A, 1A, 1.5A, 2A, 2.5A, 3A. Standul utilizat pentru determinarea caracteristicilor este prezentat în figura 2.3.

Pentru motorul sincron studiat se va urmări dependența în timp a următoarelor mărimi

- Intensitatea curentului electric din circuitul rotor, $I[\text{A}]$
- Cuplul motor $M[\text{Nm}]$
- Turația $n[\text{rpm}]$

Motorul este adus la turație de sincronism pentru 5 valori ale curentului de excitație, între 0.5 și 3A cu un pas de 0.5 A . Prin programare am impus următoarea caracteristică de cuplu:

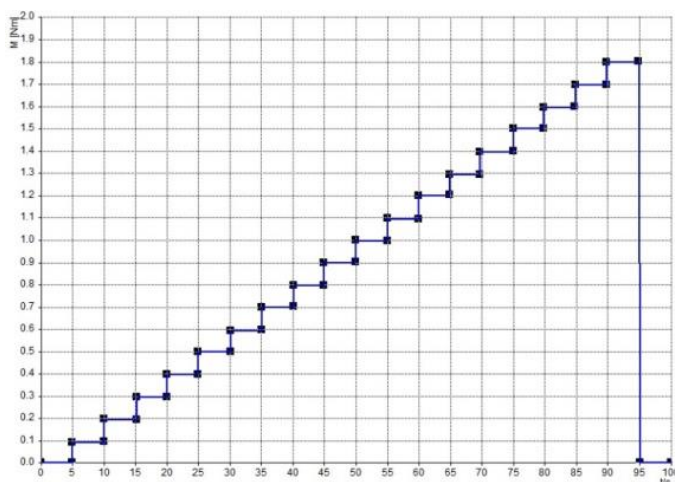


Fig.2.52. Diagrama de cuplu

Pentru 100s s-a trasat diagrama de cuplu astfel încât pentru 1 pas=0.1Nm să pornească frânarea motorului de la 5s până la 95s. La această valoare motorul va fi frânat cu 1.8 Nm.

Pentru exemplificare, s-a ales reprezentarea grafică pentru un curent de $I_{er}=3A$.

2.5.6. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse crescătoare ale cuplului motor pentru $I_{er}=3A$

Această etapă propune ridicarea caracteristicilor mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse crescătoare ale cuplului motor pentru $I_{er}=3A$. [90]

Tabelul 2.48. Rezultate obținute pentru valori impuse crescătoare ale cuplului motor la un curent de excitație de $I_{er}=3A$

t[s]	n [rpm]	M[Nm]	I [A]
0	1498	0.01	0.09
10	1491	0.19	0.11
20	1493	0.39	0.14
30	1504	0.6	0.18
40	1504	0.81	0.24
50	1502	0.89	0.26
60	1502	1.21	0.35
70	1504	1.38	0.42
80	1501	1.58	0.48
90	1497	1.81	0.54
92	1497	1,8	0,55
94	1498	1,81	0,55

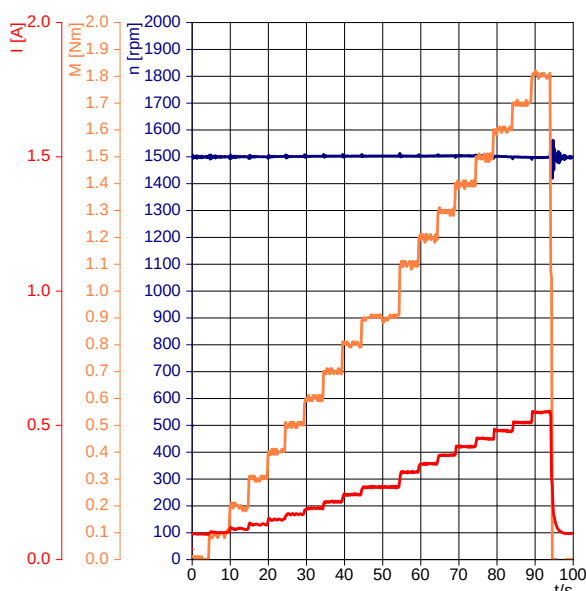


Fig.2.58. Reprezentarea caracteristicii pentru $I_{er}=3A$ [90]

Din figura anterioară rezultă că intensitatea curentului electric crește odată cu curba de cuplu impusă până la 94s. După această valoare, deoarece turația se destabilizează, valoarea curentului crește instabil până la 0.55A după care la cuplu motor de 1.81Nm iese din sincronism.

Turația se păstrează constantă până la 94s la 1.81 Nm după care se destabilizează și la valoarea de 1498 rot/min iese din sincronism și motorul se oprește.

2.6. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse variabile ale cuplului motor

Pentru motorul sincron studiat se urmărește dependența în timp a următoarelor mărimi

- Intensitatea curentului electric din circuitul rotor, $I[A]$
- Puterea mecanică la arbore $P_2[W]$
- Cuplul motor $M[Nm]$
- Turația $n[rpm]$
-

Motorul este adus la turație de sincronism pentru 5 valori ale curentului de excitație I_{er} , între 0.5 și 3A cu un pas de 0.5 A. Prin programare s-a impus o caracteristică de cuplu la care pentru 100s s-a trasat diagrama de cuplu astfel încât pentru valori variabile impuse de la 0 la valoarea maximă de sincronism, s-a redus și alternat cu șocuri mecanice până la valoarea de revenire la valorile nominale.

Pentru exemplificare, s-a ales reprezentarea diagramei la un curent de 3A.

2.6.6. Caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse variabile ale cuplului motor pentru $I_{er}=3A$

Acest subcapitol își propune analiza, trasarea și reprezentarea de caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse variabile ale cuplului motor pentru valori ale curentului de excitație de $I_{er}=3A$. [89]

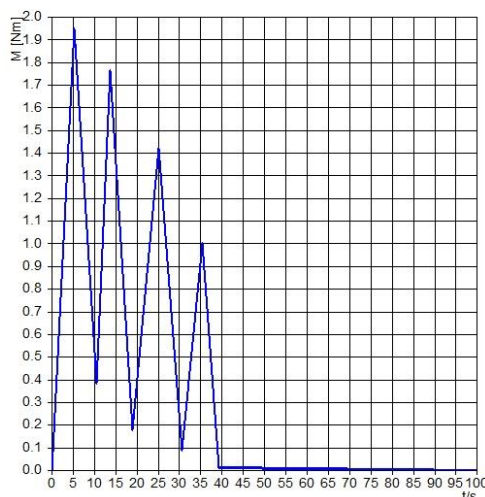


Fig.2.70. Caracteristică de cuplu impusă variabilă pentru $I_{er}=3A$ [89]

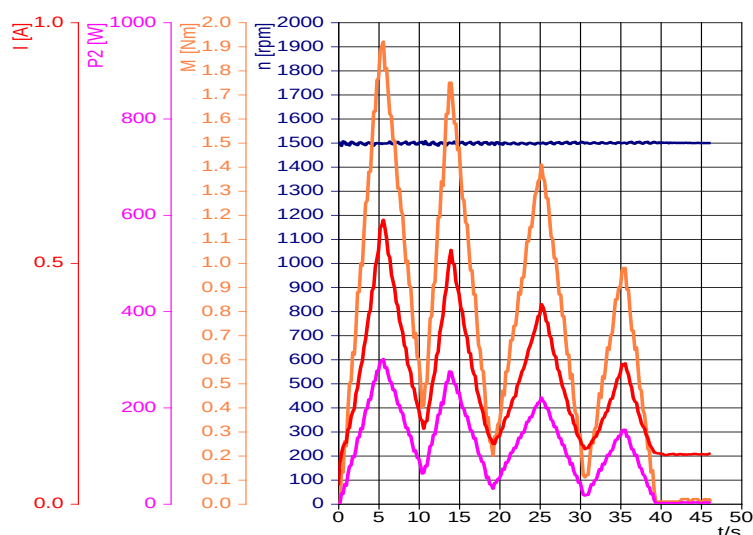


Fig.2.71. Caracteristici mecanice și electrice pentru cupluri variabile în funcție de timp, la un curent de excitație de $I_{er}=3A$ [89]

În analiza variației de cuplu (figura 2.70), s-a mărit valoarea maximă a cuplului la 1,95Nm, astfel încât să se apropie de valoarea ieșirii din sincronism, s-au mărit și celelalte variabile de cuplu, dar s-a păstrat alura studiată.

Din graficul prezentat anterior în figura 2.71, se observă că turația este păstrată constantă la variații de cuplu alternante, dacă creșterea sau scăderea cuplului se face liniar crescător în limite de 5s. De asemenea, la creșterea curentului de excitație, variațiile de turație sunt mai aplatizate. Intensitatea curentului electric din circuitul statoric păstrează curba de cuplu impusă, la fel și puterea mecanică la arborele motorului.

2.7. Caracteristici mecanice și electrice ale motorului sincron la variații diferite de cuplu în timp

Pentru reprezentarea caracteristicilor mecanice și electrice ale motorului sincron la variații diferite de cuplu în timp, s-a considerat o valoare a curentului de excitație de 3A astfel încât să se verifice comportarea motorului sincron la valori mai ridicate de ieșire din sincronism.

Impunând variații de cuplu la arborele mașinii sincrone, s-a urmărit comportarea acesteia din punct de vedere al turației, deoarece orice variație de vânt la arbore duce la variații de turație și de cuplu.

S-au trasat patru caracteristici de cuplu diferite, pentru a exemplifica aceste aspecte.

În prima parte a acestui studiu, s-a considerat că variațiile sunt de scurtă durată, și se petrec în timp de 10s, un salt de variație liniar crescătoare sau descrescătoare are loc pentru o secundă. A rezultat următoarea caracteristică de cuplu, prezentată în figura 2.72.

2.7.1. Caracteristica de cuplu impusă variabilă pentru $I_{er}=3A$, în 10s

Acest subcapitol își propune analiza, trasarea și reprezentarea de caracteristici mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse variabile ale cuplului motor în 10 secunde, pentru valori ale curentului de excitație de $I_{er}=3A$.

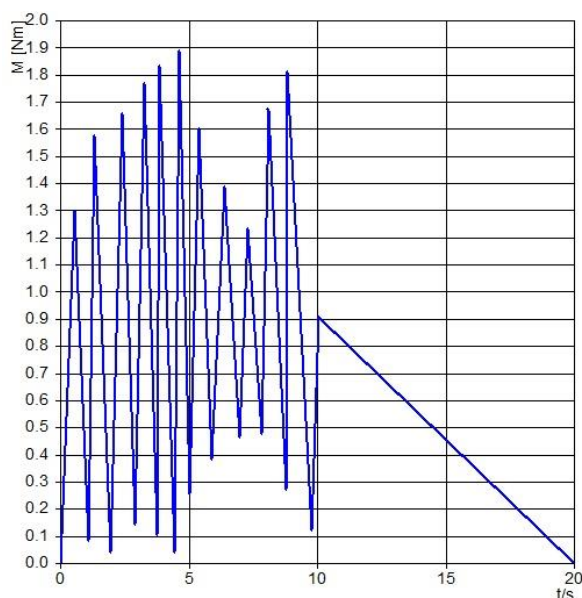


Fig.2.72. Caracteristică de cuplu impusă variabilă pentru $I_{er}=3A$, în 10s [90]

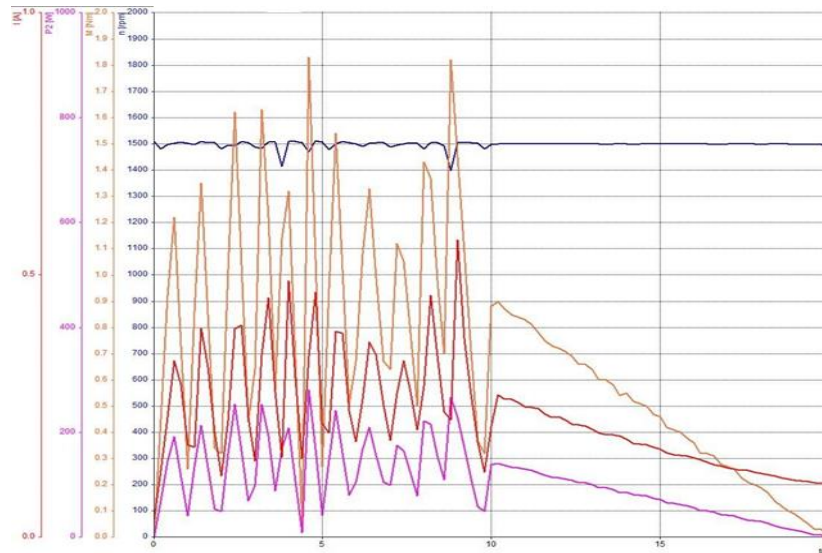


Fig.2.73. Caracteristici mecanice și electrice pentru cupluri variabile în funcție de timp, la un curent de excitație de $I_{e_r}=3A$, în 10s [90]

Din analiza graficului studiat, prezentat în figura 2.73. se observă cum turația are mici variații la cupluri variabile liniar crescătoare și descrescătoare până la valoarea de 1.63 Nm. De la această valoare motorul tinde să se desincronizeze, în special la scăderea bruscă a cuplului motor. Turația are o variabilitate și scade până la 1400 rpm. La variații care revin la cupluri mai mici, își revine la turația de sincronism, dar apoi, variabilitatea turației revine la creșterea bruscă a cuplului la 1.8 Nm.

De aceea s-a considerat oportun să se studieze comportamentul motorului sincron la aceleași variații de cuplu, dar la o desfășurare în 50 s. În varianta tezei extinse, acest aspect este prezentat în capitolul 2.7.2.

2.7.3. Caracteristica de cuplu impusă la variații bruște de cuplu pentru $I_{e_r}=3A$, în 50s

În urma graficelor studiate anterior, a apărut necesitatea studierii modului în care motorul sincron se comportă la variații bruște de cuplu, deoarece natura poate fi imprevizibilă și poate accelera sau frâna arborele motorului. S-a impus următoarea caracteristică de cuplu, care arată ca în figura 2.76.

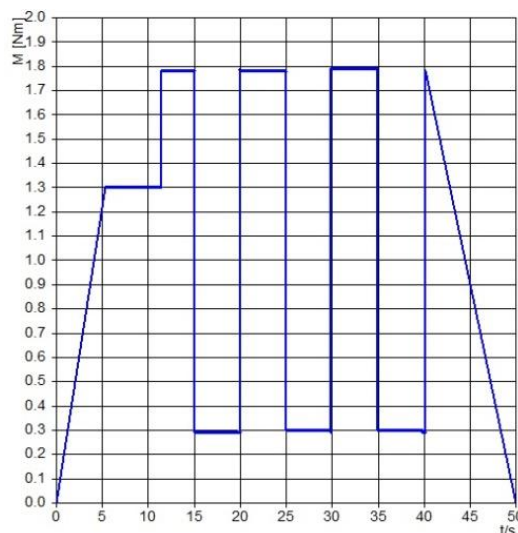


Fig.2.76. Caracteristică de cuplu impusă pentru $I_{e_r}=3A$, în 50s [90]

S-a considerat că motorul pornește și are o creștere liniară a cuplului de la 0 la 1.3Nm. Se păstrează la această valoare și după 7s, cuplul crește brusc la 1.8Nm. După 4s crește brusc la 1.8Nm și după alte 5s scade brusc la 0.3Nm. După aceasta valoare creșterea și scăderea bruscă a valorilor de cuplu se păstrează până la 40s, după care descrește liniar de la 1.8Nm la 0Nm.

S-au obținut următoarele rezultate:

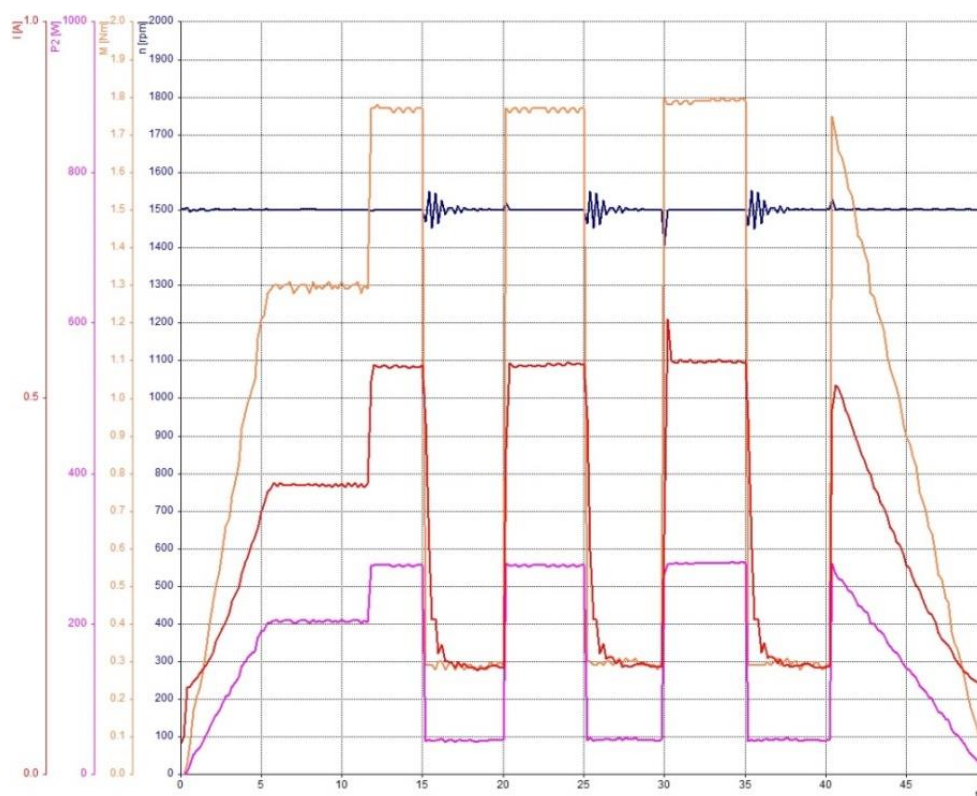


Fig.2.77. Caracteristici mecanice și electrice pentru cupluri variabile instantanee în funcție de timp, la un curent de excitație de $I_{er}=3A$, în 50s [90]

Din analiza caracteristicii prezentate în figura 2.77 se observă cum turația este păstrată constantă la valoarea de creștere până la 1.8Nm. În schimb, se observă o variabilitate a turației la scăderea bruscă a cuplului, care se repetă la fiecare scădere. Intensitatea curentului electric și puterea mecanică păstrează alura de cuplu. În concluzie, motorul se desincronizează ușor la scăderi bruște de cuplu, dar nu iese din sincronism.

2.8. Concluzii

Pentru reprezentarea caracteristicilor mecanice a parametrilor electrici și mecanici în funcție de cuplul motor s-a debitat pe înfășurarea statorică de excitație valori în trepte ale curentului de excitație între 0,5A – 3A cu un pas de 0,5A.

Din analiza caracteristicilor prezentate în acest capitol se pot formula următoarele concluzii :

- Din analiza graficelor $n=f(M)$ rezultă că mașina sincronă își păstrează turația relativ constantă de 1500rot/min în funcție de valorile crescătoare ale cuplului până la valori de ieșire din sincronism. Valoarea ieșirii din sincronism depinde direct de valoarea curentului de excitație. Cu cât aceasta este mai mare, motorul își păstrează turația constantă la valori mai mari ale cuplului. În schimb, nu trebuie

depășită valoarea maximă a curentului de excitație impusă de valorile nominale ale motorului sincron studiat.

- Din analiza graficelor $I=f(M)$ rezultă că valoarea intensității curentului electric crește în funcție de valoarea crescătoare a cuplului mecanic la arbore, dar modificând valoarea curentului de excitație în sensul creșterii acesteia, motorul absoarbe un curent mai mic de la rețea. La valori de ieșire din sincronism curentul crește brusc pentru scurt timp după care motorul se oprește.
- Din analiza graficelor $P_2=f(M)$ rezultă că puterea mecanică crește liniar în timp în funcție de creșterea cuplului motor. Modificând valoarea curentului de excitație, puterea mecanică crește la arbore până la ieșirea din sincronism. Valoarea maximă a puterii mecanice se obține la valoarea maximă a curentului de excitație.
- Din analiza graficelor $\eta=f(M)$ rezultă că randamentul are o creștere liniară până la jumătate din valoarea cuplului impus la arbore după care se stabilizează, are o mică variație până la ieșirea din sincronism. Se observă că valorile maxime ale randamentului nu se obțin la valorile maxime ale cuplului, se obțin la valori anterioare acestora. În funcție de valorile crescătoare ale curentului de excitație, crește valoarea randamentului, de la 51.68% la $I_{er}=0.5A$ la 0.96% la $I_{er}=3A$.
- Din analiza graficelor $P_1=f(M)$ rezultă că puterea activă crește liniar în funcție de valoarea cuplului în general până la valori de 350W indiferent de valoarea curentului de excitație. La valori mai mici ale curentului de excitație, aveam o mică variabilitate, la valori mai mari alura fiind aproape liniară.
- Din analiza graficelor $\cos \varphi=f(M)$ rezultă că la valori mici ale curentului de excitație, $\cos \varphi$ are valori maxime începând cu 0.43 ceea ce indică un consum ridicat de putere reactivă. La valoarea maximă de 3A $\cos \varphi$ ajunge la valoarea de 0.96 consumul de putere reactivă fiind aproape nul.

Pentru ridicarea caracteristicilor mecanice și electrice în funcție de timp pentru valori impuse crescătoare ale valorii cuplului motor s-a utilizat o diagramă de cuplu impusă în care motorul este adus la turație de sincronism pentru 5 valori ale curentului de excitație, între 0.5 și 3A cu un pas de 0.5 A, astfel încât pentru 100s s-a trasat diagrama de cuplu la 1 pas =0.1Nm să pornească frânarea motorului de la 5s până la 95s, la această valoare motorul fiind frânat cu 1.8 Nm.

Pentru motorul sincron studiat s-a urmărit dependența în timp a următoarelor mărimi

- Intensitatea curentului electric din circuitul rotor, $I[A]$
- Cuplul motor $M[Nm]$
- Turația $n[rpm]$

Analizând valoarea intensității curentului din circuitul rotor se observă că aceasta scade pentru valori crescătoare ale curentului de excitație. Dacă pentru $I_{er}=0.5A$ valoarea maximă a curentului la ieșirea din sincronism este de 0.98A, pentru valoarea de $I_{er}=3A$ motorul iese din sincronism la valoarea de 0.54A.

La fel ca în cazul analizei caracteristicilor de cuplu, din graficele anterioare se observă că, deși cuplul crește succesiv, turația motorului este păstrată constantă la valoarea de 1500rot/min până la valoarea de ieșire din sincronism. Se observă că, la $I_{er}=0.5A$ motorul iese din sincronism după 45 de secunde la 0.89 Nm în timp ce la valoarea maximă studiată de $I_{er}=3A$ motorul iese din sincronism la 95 de secunde la valoarea de 1.81 Nm. Graficele exprimă faptul că pentru un motor sincron este foarte importantă valoarea curentului de excitație pentru păstrarea turației constante în funcție de valoarea cuplului. Ieșirea din

sincronism este strâns legată de valoarea maximă a cuplului dar în același timp și de valoarea curentului de excitație.

Din analiza graficului prezentat în figura 2.61., pentru un curent de excitație de $I_{er}=0,5A$ se observă că motorul are turație constantă la valori crescătoare ale cuplului motor, dar tinde să se desincronizeze la valori mai mari ale cuplului motor, însă nu iese din sincronism. Turația revine la valori nominale la scăderi ale cuplului. Intensitatea curentului electric din circuitul statoric păstrează curba de cuplu impusă, la fel și puterea mecanică la arborele motorului. Crescând valoarea curentului de excitație cu $0.5A$, se observă că turația este păstrată constantă la variații de cuplu alternante, dacă creșterea sau scăderea cuplului se face liniar crescător în limite de 5 s. Intensitatea curentului electric din circuitul statoric păstrează curba de cuplu impusă, la fel și puterea mecanică la arborele motorului.

Pentru un curent de $I_{er}=1,5A$, s-a mărit valoarea maximă a cuplului la $1,2Nm$, astfel încât să se apropie de valoarea ieșirii din sincronism, s-au mărit și celelalte variabile de cuplu, astfel încât să se păstreze alura studiată.

Turația este păstrată constantă la variații de cuplu alternante, dacă creșterea sau scăderea cuplului se face liniar crescător în limite de 5s. Intensitatea curentului electric din circuitul statoric păstrează curba de cuplu impusă, la fel și puterea mecanică la arborele motorului.

Din analiza variației de cuplu, de la figura 2.69. , se observă mărirea valorii maxime a cuplului la $1,75Nm$, astfel încât să se apropie de valoarea ieșirii din sincronism, s-au mărit și celelalte variabile de cuplu, dar s-a păstrat alura studiată. De asemenea, la creșterea curentului de excitație, variațiile de turație sunt mai aplatisate. Intensitatea curentului electric din circuitul statoric păstrează curba de cuplu impusă, la fel și puterea mecanică la arborele motorului.

În analiza variației de cuplu, de la figura 2.71., pentru un curent de excitație de $I_{er}=3A$ s-a mărit valoarea maximă a cuplului la $1,95Nm$, astfel încât să se apropie de valoarea ieșirii din sincronism, s-au mărit și celelalte variabile de cuplu, dar s-a păstrat alura studiată. Din grafic, se observă că turația este păstrată constantă la variații de cuplu alternante, dacă creșterea sau scăderea cuplului se face liniar crescător în limite de 5 s. De asemenea, la creșterea curentului de excitație, variațiile de turație sunt mai aplatisate. Intensitatea curentului electric din circuitul statoric păstrează curba de cuplu impusă, la fel și puterea mecanică la arborele motorului.

Analizând caracteristicile prezentate în figurile 2.73. și 2.75. putem concluziona că la variații liniar crescătoare și liniar descrescătoare, motorul sincron își păstrează turația constantă în jurul valorii nominale de sincronism, dacă variațiile sunt la o perioadă de timp mai mare de 2 s. În schimb, dacă aceleași variații se produc într-un timp mai scurt, motorul are o turație alternantă, dar nu se desincronizează. În concluzie, s-a studiat modalitatea prin care generatorul sincron poate suporta aceste variații într-un timp scurt, până la valori ale cuplului de ieșire din sincronism și s-a generat caracteristica de cuplu din figura 2.74. pentru studierea acestui fenomen.

În schimb, din ultimele grafice prezentate în figurile 2.77. și 2.79. se observă că la variații bruște de cuplu, motorul se desincronizează ușor, variabilitatea de turație fiind mai consistentă la scăderi de cuplu, care se diminuează dacă valoarea cuplului asupra arborelui motorului este mai mică. Prin urmare, în studiile generatorului sincron, se vor urmări cum influențează caracteristicile nominale de sincronism la rețea aceste forțe care acționează asupra arborelui motor.

3. Cercetări privind mașina sincronă utilizate ca generator

3.1. Introducere

În centralele electrice pentru producerea curentului alternativ trifazat se folosesc în majoritatea cazurilor generatoare sincrone (GS). Generatoarele sincrone care debitează pe o rețea proprie sunt des întâlnite în instalațiile mobile sau în rețelele izolate, adesea fiind utilizate ca surse de rezervă pentru alimentarea cu energie electrică a unor obiective mai importante în caz de avarii ale sistemului energetic. GS este o mașină electrică rotativă cu înfășurarea statorică conectată la o rețea de curent alternativ, iar cea rotorică (care face parte din inductor) este alimentată în curent continuu.

În analiza comportării generatorului sincron, s-a plecat de la caracteristicile acestei mașini, scoțând în evidență particularitățile acesteia față de alte tipuri de generatoare. Caracteristici ale generatorului sincron sunt date de caracteristica de funcționare în gol, $U_{e0} = f(I_e)$, caracteristica externă, $U = f(I)$ și caracteristica de reglaj, $I_e = f(I)$. Aceste caracteristici sunt necesare pentru a scoate în evidență parametri mașinii testate și pentru a defini modul de cercetare ulterioară, astfel încât să se stabilească ce parametri trebuie influențați ca această mașină se furnizeze tensiuni și frecvențe în rețeaua trifazată la variații ale momentului motor și la variații ale turației la arbore.

3.2. Determinarea experimentală a caracteristicilor mecanice și electrice ale generatorului sincron

Standul utilizat pentru studiile de cercetare aferente ridicării caracteristicilor, sincronizării și protecției generatorului sincron este compus din:

- Sursă de alimentare de curent continuu și curent alternativ trifazat;
- Sursă de alimentare de curent alternativ trifazat;
- Sursă de alimentare reglabilă de curent continuu și curent alternativ trifazat;
- Unitate de sincronizare: 3 lămpi, comutator de sincronizare, frecvențmetre, 3 voltmetre, 1 sincronoscop digital;
- Servomotor banc de probă pentru mașini electrice de 1kW;
- Mașină sincronă trifazată 1kW;
- Rezistență reglabilă automată suplimentară de excitație;
- Multimetru analog/digital, voltmetru, cosfimetru;
- Dispozitiv de măsurare trifazat;
- Întreruptor termomagnetic;
- Sarcină rezistivă, trifazată;
- Modul de cuplare sarcină;
- Comutator de cuplare a rezistenței suplimentare de excitație;
- Releu multifuncțional, dispozitiv de control al puterii electrice, $\cos \varphi$, unitate automată de sincronizare.

Schemele electrice ale montajului experimental, utilizate pentru determinarea caracteristicilor generatorului sincron, sunt prezentate în figura 3.1.

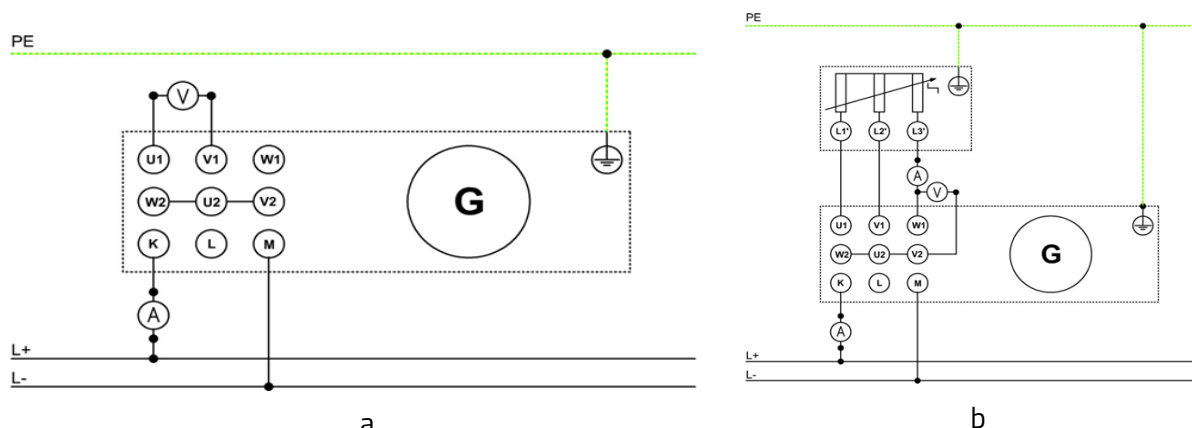


Fig.3.1. Scheme electrice utilizate pentru determinarea caracteristicilor generatorului sincron [29]

În figura 3.1.a generatorul sincron este prezentat la funcționarea în gol în timp ce în figura 3.1.b acesta este prezentat după cuplarea în sarcină la un consumator rezistiv variabil (reostat de putere).

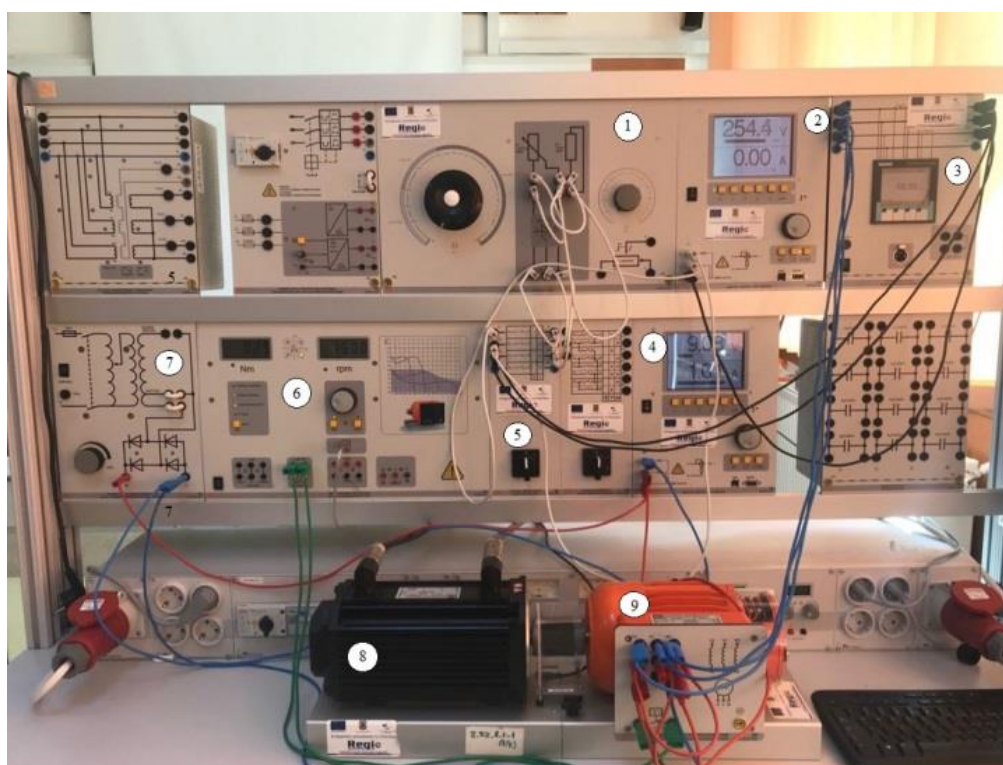


Fig.3.2. Stand pentru determinarea caracteristicilor generatorului electric

Standul are în structura sa următoarele blocuri funcționale:

- 1- Reostat de putere reglabil $2k\Omega$ - $1k\Omega$;
- 2- Multimetru analog/digital, voltmetru, ampermetru – pentru măsurarea curentului și tensiunii din înfășurarea rotorică;
- 3- Multimetru digital trifazat pentru măsurarea frecvenței și a tensiunilor trifazate alternative;
- 4- Multimetru analog/digital, voltmetru, ampermetru – pentru măsurarea curentului și tensiunii din înfășurarea de excitație;
- 5- Întrerupător general tripolar cu 2 poziții;

- 6- Controler servomotor;
- 7- Sursă de curent continuu reglabilă pentru înfășurarea de excitație;
- 8- Servomotor cu frână;
- 9- Generator sincron.

Servomotorul cu frână (8) prin intermediul controlerului servomotor (6), reglează mașina primară (care se consideră fi arborele unei centrale eoliene), la o turație de 1500 rot/min. Sursa de curent continuu de excitație (7) furnizează un curent și o tensiune reglabilă înfășurării statorice a generatorului (9). Aceste mărimi sunt măsurate cu un multimetru digital (4). Valoarea tensiunii de excitație este ridicată până când generatorul (9) furnizează în înfășurarea rotorică o tensiune de 400V curent alternativ. Parametrii tensiunii și curentului debitați de generator sunt măsuși cu un multimetru digital (2), frecvența obținută fiind măsurată cu multimetru trifazat digital (3). Pentru studierea comportării generatorului în sarcină se introduce în circuit un consumator rezistiv sub forma unui reostat reglabil liniar de $2k\Omega$ - $1k\Omega$ (1). Pentru trasarea caracteristicilor mecanice și electrice se va studia comportarea generatorului în gol (fără consumator), ulterior cuplând consumatorul pentru obținerea parametrilor nominali de debitare în rețea. Caracteristicile generatorului sincron studiat sunt reprezentate în teza extinsă.

3.4. Comportarea generatorului sincron la variații impuse ale cuplului motor.

Pentru studiul comportării generatorului sincron la diferite variații perturbatoare ale vântului și ale cuplului motor, s-a considerat montajul din figura 3.2., în care s-a considerat că pe circuitul de ieșire există mai multe încărcări rezistive pornind de la $2k\Omega$ până la $1k\Omega$. S-a considerat că turația nominală, tensiunea de ieșire și frecvența nominală trebuie păstrate constante ca fiind parametri nominali debitați în rețea. Viteza vântului, care acționează asupra palelor turbinelor eoliene duce la modificări ale cuplului motor la arborele generatorului. În consecință, la arborele motor s-a modificat cuplul motor astfel încât să se păstreze parametri nominali mai sus amintiți. S-a constatat că implicit se modifică o serie de alți parametri, respectiv curentul și tensiunea de excitație dar și curentul de ieșire debitat pe consumatori. Modificând valoarea curentului de excitație s-a adus generatorul în parametri nominali păstrând tensiunea nominală pentru diferite încărcări rezistive.

În urma efectuării determinărilor s-au obținut rezultatele prezentate în tabelele: 3.6 – 3.14 (teza extinsă)

Din analiza datelor rezultate s-au obținut următoarele caracteristici:

$I_{er}=f(M)$, pentru valori ale rezistenței de sarcină în figura 3.7.

$U_{er}=f(M)$, pentru valori ale rezistenței de sarcină în figura 3.8.

$I_e=f(M)$, pentru valori ale rezistenței de sarcină în figura 3.9.

$I_{er}=f(M)$, pentru valori ale tensiunii de ieșire în figura 3.10

$U_{er}=f(M)$, pentru valori ale tensiunii de ieșire în figura 3.11.

$I_e=f(M)$, pentru valori ale tensiunii de ieșire în figura 3.12.

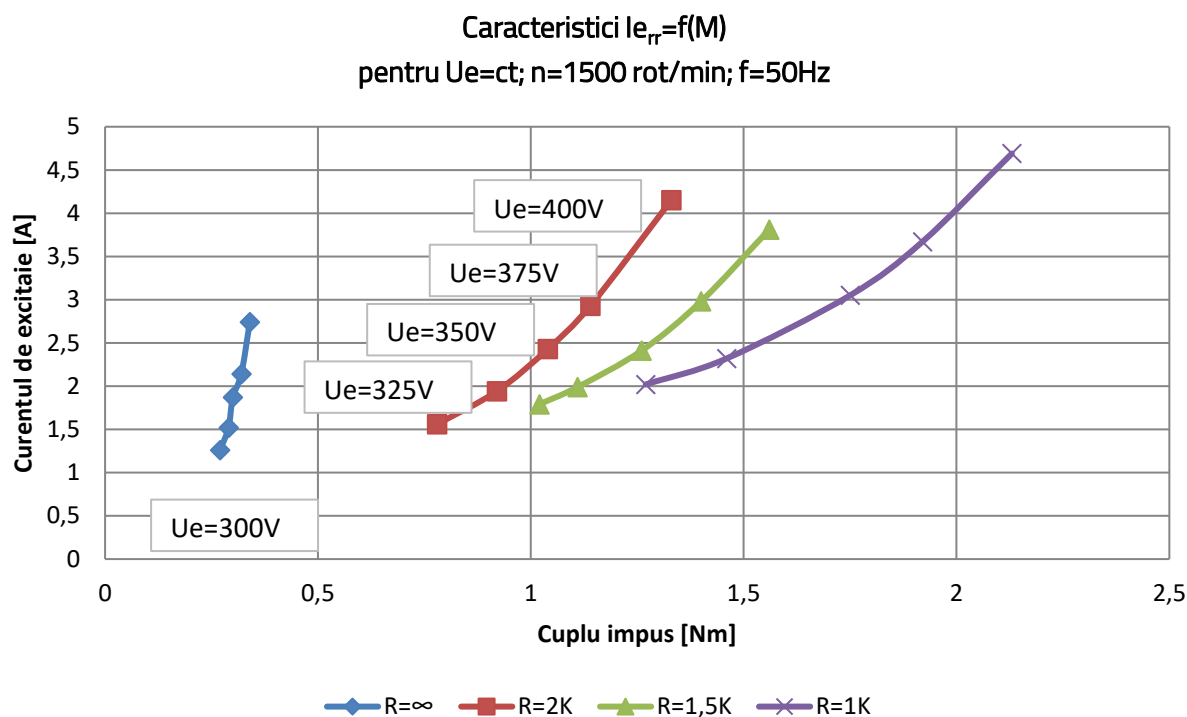


Fig.3.7. Caracteristici obținute $I_{e,r}=f(M)$ pentru $U_e=ct$; $n=1500 \text{ rot/min}$; $f=50\text{Hz}$

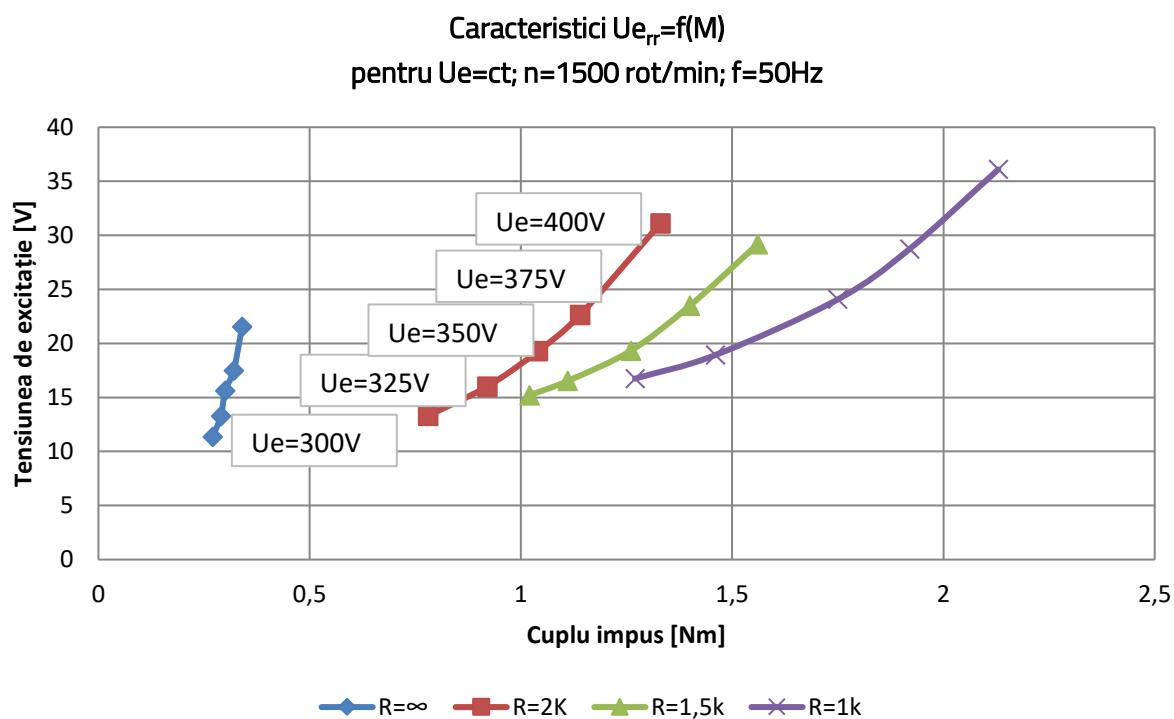


Fig.3.8. Caracteristici obținute $U_{e,r}=f(M)$ pentru $U_e=ct$; $n=1500 \text{ rot/min}$; $f=50\text{Hz}$

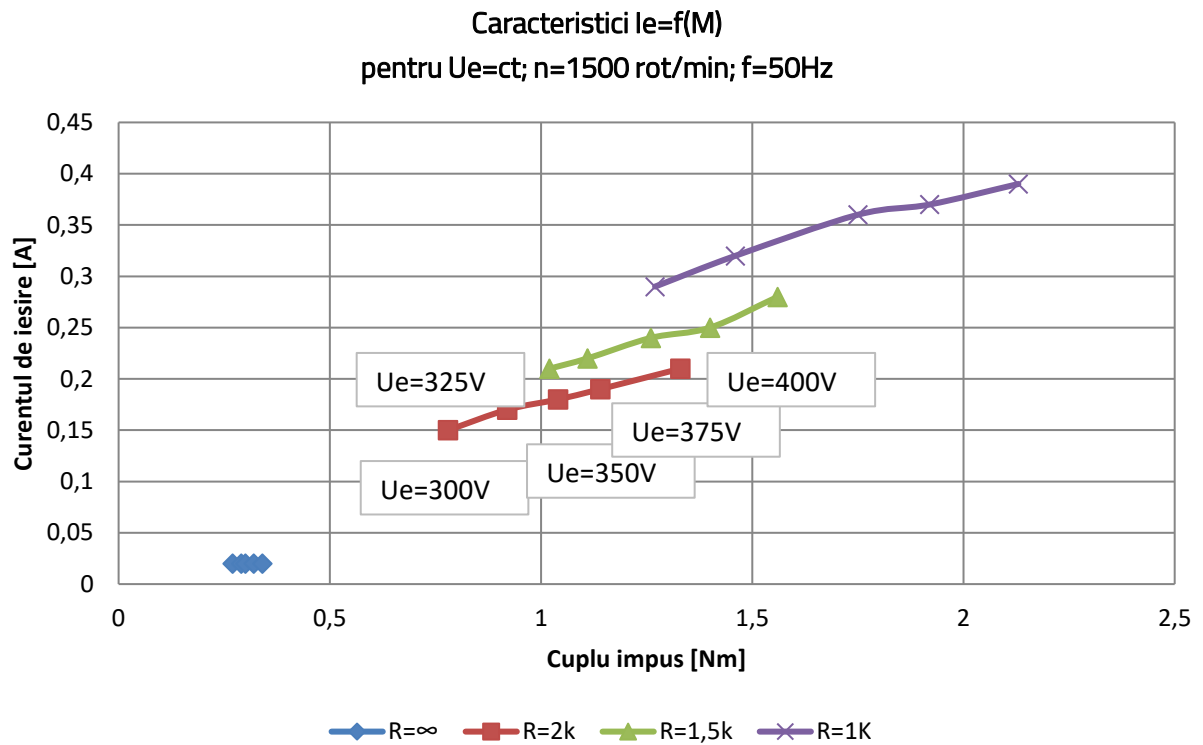


Fig.3.9. Caracteristici obținute $i_e=f(M)$ pentru $U_e=ct$; $n=1500$ rot/min; $f=50$ Hz

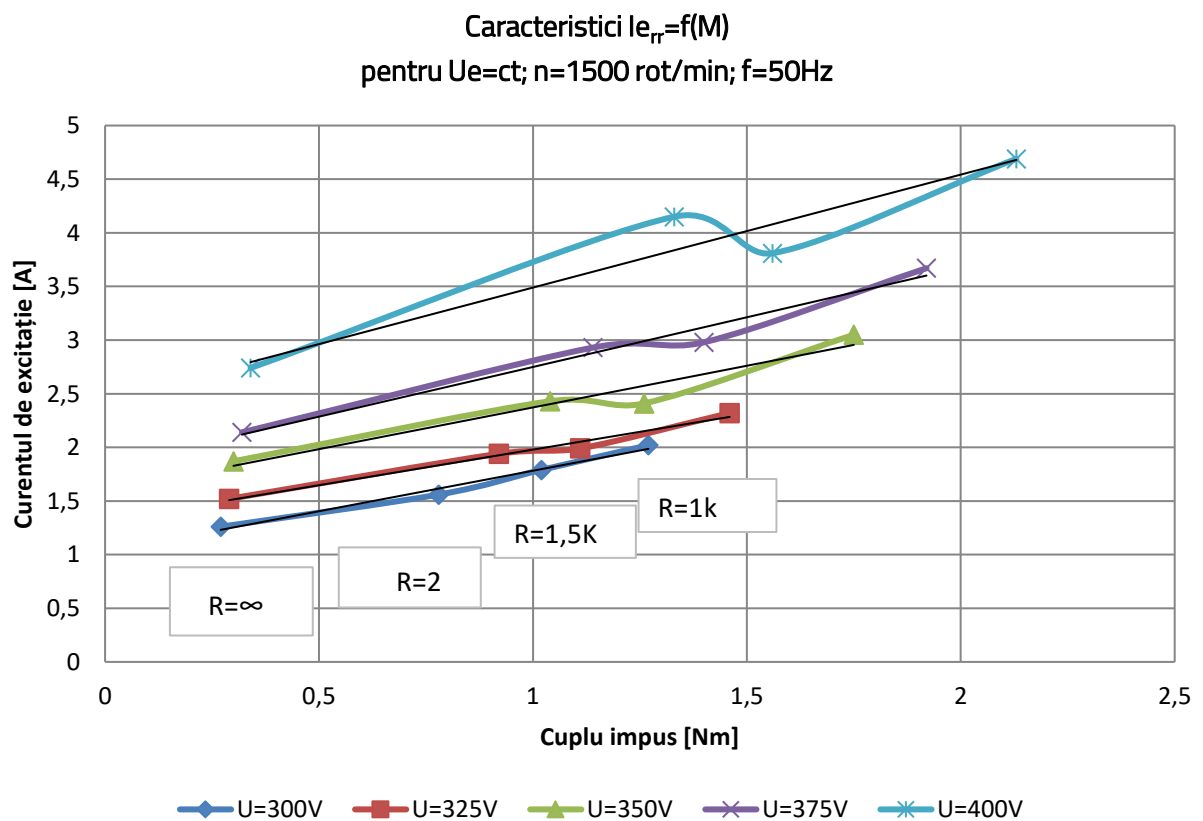


Fig.3.10. Caracteristici obținute $i_{er}=f(M)$ pentru $U_e=ct$; $n=1500$ rot/min; $f=50$ Hz

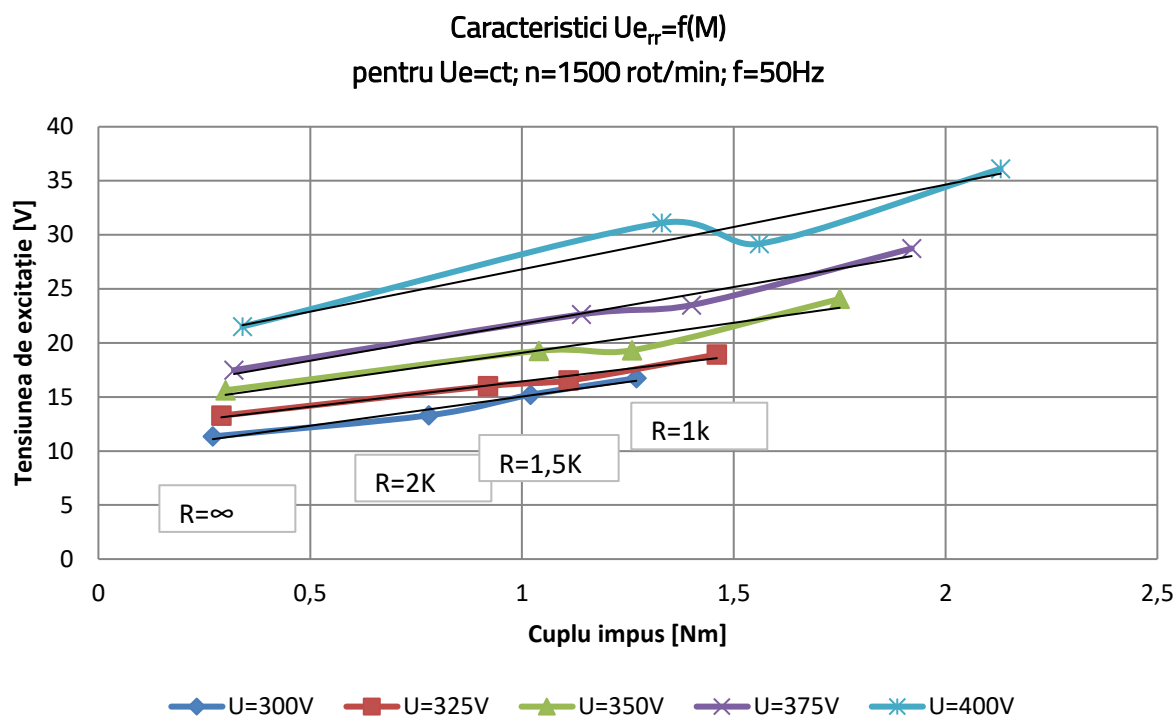


Fig.3.11. Caracteristici obținute $U_{er}=f(M)$ pentru $U_e=ct$; $n=1500 \text{ rot/min}$; $f=50\text{Hz}$

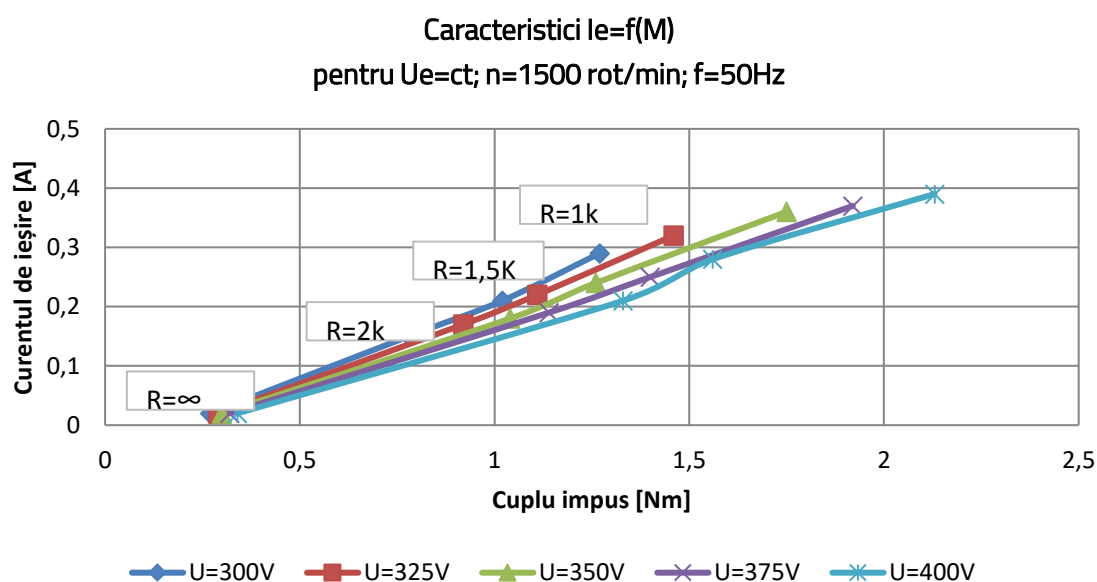


Fig.3.12. Caracteristici obținute $I_e=f(M)$ pentru $U_e=ct$; $n=1500 \text{ rot/min}$; $f=50\text{Hz}$

Analizând caracteristicile prezentate în figurile 3.7., 3.8. și 3.9. în care s-au considerat 3 încărcări ale sarcinii rezistive și o situație de funcționare în gol (fără sarcină), păstrând diferite valori ale tensiunii de ieșire în gama 300-400V, păstrând turația constantă la 1500rot/min și o frecvență de 50Hz s-au obținut 3 caracteristici: ale curentului de excitație, ale tensiunii de excitație și a curentului de ieșire în funcție de cuplul impus.

Astfel în figura 3.7. se observă că, pentru a se putea păstra tensiunea de ieșire la valoarea impusă, este necesară o modificare a curentului de excitație, în funcție de valoarea cuplului de la arbore. Dacă valoarea impusă a tensiunii crește, tendința este crescătoare și valoarea curentului de excitație crește odată cu cuplul.

În figura 3.8. se observă că tensiunea de excitație are aceeași tendință crescătoare și este asemănătoare cu caracteristica anterioară prezentată în figura 3.7.

În figura 3.9. este reprezentată valoarea curentului de ieșire în funcție de cuplul impus.

Se observă că la diferite valori crescătoare ale tensiunii de ieșire curentul de ieșire crește pentru diferite valori ale cuplului motor.

În figurile 3.10., 3.11. și 3.12. avem aceleași caracteristici considerând tensiunea de ieșire constantă pentru diferite valori ale rezistenței de sarcină.

În figura 3.10. se observă că, pentru valori constante ale tensiunii de ieșire, curba este relativ liniară cu tendința crescătoare, curentul de excitație fiind necesar a fi mărit pentru a se păstra turația constantă la diferite valori ale cuplului motor.

În figura 3.11. se observă că tensiunea de excitație are aceeași tendință crescătoare ca și curentul de excitație prezentat în figura 3.10.

În figura 3.12. păstrând tensiuni constante de ieșire se observă că odată cu creșterea forței la arbore, curentul de ieșire debitat în rețea crește odată cu creșterea încărcării rezistive.

3.5. Concluzii

În capitolul 3 s-au făcut cercetări privind mașina sincronă ca generator. S-a insistat pe caracteristicile mecanice ale cuplului astfel încât să se urmărească comportarea acestuia la condiții anormale sau accidentale. S-au identificat parametri mecanici și electrice influențați și s-au exprimat concluzii necesare în vederea trecerii la procesul de sincronizare.

În prima parte a acestui capitol, s-au realizat determinări experimentale, în vederea studiului caracteristicilor s-a considerat un generator sincron cu următoarele caracteristici: $P_n=0.27\text{kW}$, $I_n=1.5\text{A}$, $f=50\text{Hz}$, $n=1500\text{rot/min}$, $U_{er}=20\text{Vcc}$; $I_{er}=4\text{A}$. Sursa de excitație a generat o tensiune în trepte de la (0-20) Vc.c. la valori impuse ale curentului de excitație de 0.5A, 1A, 1.5A, 2A, 2.5A, 3A.

Pentru generatorul studiat, s-a trasat caracteristica de funcționare în gol $U_{e0}=f(I_{er})$. Curentul de excitație a fost modificat crescător de la 0.5A până la 3A. Valoarea tensiunii de ieșire a crescut direct proporțional cu valoarea curentului de excitație. Caracteristica este aproximativ liniară, cu observația că valoarea curentului de excitație s-a limitat la valoarea de furnizare a tensiunii nominale de linie în rețea de 400V.

Caracteristica externă $U=f(I)$ s-a obținut pentru o sarcină rezistivă reglabilă de la 2 k Ω -1k Ω , în condițiile nominale în care turația a fost păstrată la valoarea de 1500rot/min. Curentul de ieșire crește odată cu scăderea tensiunii. Rezultă că valoarea tensiunii de ieșire depinde atât de sarcina introdusă în circuit cât și de valoarea curentului de excitație.

Pentru trasarea caracteristicii de reglaj $I_e=f(I)$, la o turație constantă nominală de 1500 rot/min, s-au realizat grafice cu 2 valori constante ale tensiunii nominale furnizate în rețea în sarcină, de 400V și de 300V, pentru o sarcină variabilă de la 2k Ω -1k Ω . La o turație constantă și tensiune nominală, implicit la o

frecvență nominală de 50 Hz se obțin curbe asemănătoare care au o tendință crescătoare a curentului de ieșire în funcție de curentul de excitație până în punctul de maxim după care se stabilizează în jurul acestei valori.

Din analiza acestor caracteristici, pentru generatorul studiat, este identificată valoarea variabilă a curentului de excitație, care influențează parametri nominali ai generatorului sincron. Pe de altă parte, această variabilitate trebuie atent controlată astfel încât generatorul să furnizeze tensiuni nominale trifazate în rețea, în condițiile în care, conform normativelor în vigoare, frecvența poate varia într-o plajă de $\pm 10\%$.

Analizând caracteristicile prezentate în figurile 3.7., 3.8. și 3.9. în care s-au considerat 3 încărcări ale sarcinii rezistive și o situație de funcționare în gol (fără sarcină), păstrând diferite valori ale tensiunii de ieșire în gama 300-400V, păstrând turația constantă la 1500 rot/min și o frecvență de 50Hz sau obținut 3 caracteristici ale curentului de excitație, tensiunii de excitație și curentului de ieșire în funcție de cuplul impus. Astfel în figura 3.7. se observă că pentru a se putea păstra tensiunea de ieșire la valoare impusă este necesară o modificare a curentului de excitație, în funcție de valoarea cuplului de la arbore. Dacă valoarea impusă a tensiunii crește, tendința este crescătoare și valoarea curentului de excitație crește odată cu cuplul. În figura 3.8. se observă că tensiunea de excitație are aceeași tendință crescătoare și este asemănătoare cu caracteristica anterioară prezentată în figura 3.7. În figura 3.9. este reprezentată valoarea curentului de ieșire în funcție de cuplul impus. Se observă că, la diferite valori crescătoare ale tensiunii de ieșire, curentul de ieșire crește pentru diferite valori ale cuplului motor.

În figurile 3.10., 3.11. și 3.12. avem aceleași caracteristici considerând tensiunea de ieșire constantă pentru diferite valori ale rezistenței de sarcină. În figura 3.10. se observă că, pentru valori constante ale tensiunii de ieșire, curba este relativ liniară cu tendința crescătoare, curentul de excitație fiind necesar a fi mărit pentru a se păstra turația constantă la diferite valori ale cuplului motor. În figura 3.11. se observă că tensiunea de excitație are aceeași tendință crescătoare ca și curentul de excitație prezentat în figura 3.10. În figura 3.12. păstrând tensiuni constante de ieșire, se observă că odată cu creșterea forței la arbore curentul de ieșire debitat în rețea crește odată cu creșterea încărcării rezistive.

4. Contribuții originale privind proiectarea și dezvoltarea standului pentru punerea în sincronism a generatorului cu rețeaua electrică

4.1. Sincronizarea manuală a generatorului sincron

4.1.1. Noțiuni teoretice

Pentru a se realiza sincronizarea generatorului sincron cu rețeaua de alimentare trifazată, s-au realizat următoarele etape:

- s-a adus turbina la turația de sincronism, astfel încât aceasta să ajungă la frecvența rețelei de 50Hz ($n=1500$ rot/min)
- s-a mărit tensiunea de excitație până când tensiunea produsă de generator a devenit egală cu tensiunea rețelei
- reglând fin curentul de excitație din rezistența suplimentară de excitație, se obține sincronizarea fazorială a celor trei tensiuni trifazate produse cu cele trei tensiuni trifazate ale rețelei. Tensiunile pot fi în fază sau în opoziție de fază.

Pentru sincronizarea manuală a generatorului sincron se utilizează 3 scheme de conectare:

- circuitul dark-lamp synchronisation circuit – opoziție de fază
- circuitul bright-lamp synchronisation circuit – în fază
- circuitul three-lamp synchronisation circuit – în fază

4.1.2. Determinări și montaje experimentale

Pentru exemplificare s-a construit schema de montaj pentru sincronizarea generatorului sincron cu rețeaua trifazată „three-lamp synchronisation circuit”.

Obiective:

- conectarea generatorului sincron la turbină;
- aducerea la sincronism a turbinei;
- modificarea tensiunii de excitație până când generatorul produce o tensiune egală cu cea a rețelei;
- sincronizarea cu sincronoscopul digital, prin reglajul fin al tensiunii de excitație;
- conectarea generatorului sincron la rețea.

Echipamente utilizate:

SE2662-5Q - Mașină sincronă trifazată 1kW

C03636-6W – Servomotor banc de probă pentru mașină de 1kW

C03212-5U - Sursă de alimentare universală reglabilă pentru curent continuu și curent alternativ trifazat

C03212-6V – Unitate de sincronizare :3 lămpi, comutator de sincronizare, 2 frecvențmetre, 2 voltmetre, 1 voltmetru, 1 sincronoscop digital

C03301-5F – Rezistență reglabilă pentru reglajul tensiunii de excitație

C05127-1Z – Multimetru analog/digital, voltmetru, cosfimetru

C03212-1P – Întreruptor termomagnetic, 1.6-2.5A

C05127-1Y – Dispozitiv de măsurare trifazat

Schema electrică utilizată pentru pornirea și sincronizarea generatorului

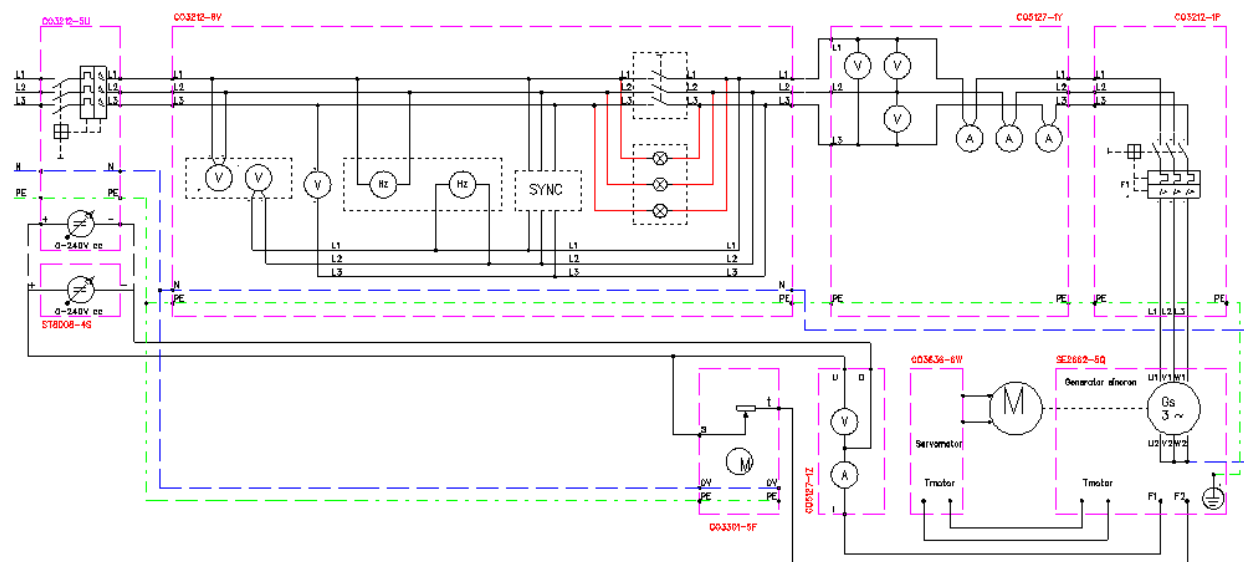


Fig.4.4. Schema electrică utilizată pentru sincronizarea manuală a generatorului sincron cu rețeaua de alimentare trifazată

Realizarea practică a schemei:

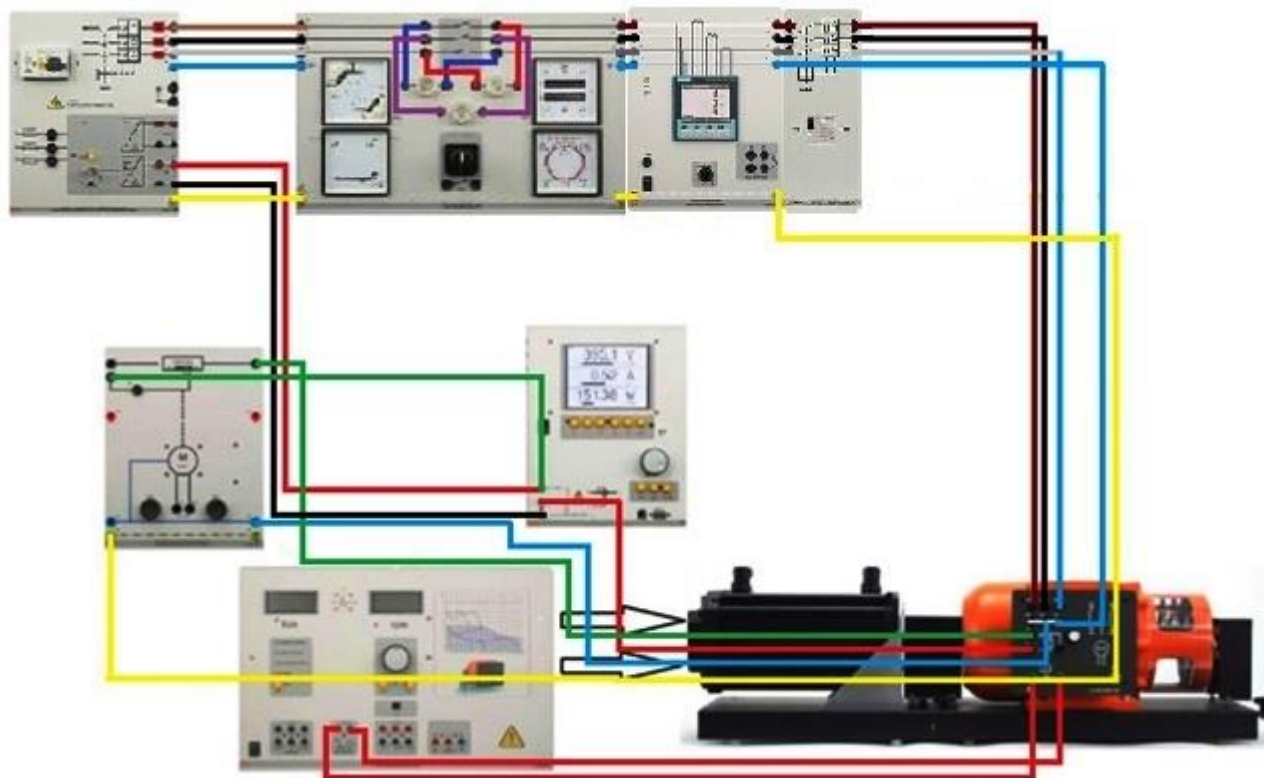


Fig.4.5. Schema de montaj pentru pornirea și sincronizarea generatorului

Pornirea și sincronizarea mașinii sincrone:

- se realizează montajul conform schemei electrice și de montaj
- se alimentează mașina primară (servomotorul)
- dacă circuitul este bine realizat, unitatea de control a servomotorului se inițializează fără a apărea cod de eroare
- se aduce mașina primară (servomotorul) la turația de sincronism, prin creșterea turației până când becurile se aprind și se sting succesiv
- se verifică turația de 1500 rot/min pe display-ul unității de control a servomotorului
- se modifică valoarea tensiunii de excitație până când generatorul produce o tensiune egală cu cea a rețelei (~400V)
- se urmărește sincronizarea cu sincronoscopul digital, prin reglajul fin al tensiunii de excitație. Acest lucru se face din butoanele modulului rezistenței de excitație. Când sincronoscopul aprinde led-ul verde, se poate cupla generatorul la rețea.
- se conectează generatorul sincron la rețea, prin cuplarea comutatorului

Oprirea mașinii sincrone:

- se deconectează generatorul sincron de la rețea, prin decuplarea comutatorului;
- se scade valoarea tensiunii de excitație până când generatorul nu mai produce tensiune;
- se întrerupe alimentarea circuitului de excitație al generatorului sincron;
- se întrerupe alimentarea mașinii primare (a servomotorului).

Manevrele care se fac la pornire depind de specificul motorului primar. Pentru oprirea mașinilor primare care antrenează generatoarele sincrone se recomandă următoarea succesiune de operații:

- se reduc încărcările activă și reactivă;
- se deconectează grupul de la bare;
- se reduce turația mașinii;
- se întrerupe alimentarea circuitului de excitație al generatorului sincron;
- se întrerupe alimentarea mașinii primare.

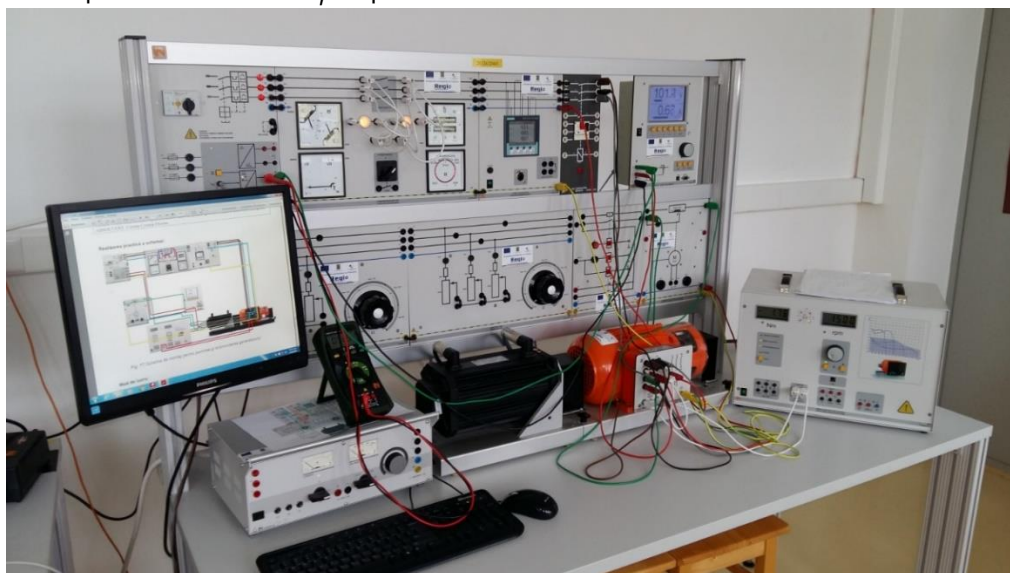


Fig.4.6. Standul experimental pentru pornirea și sincronizarea manuală a generatorului

În urma realizării montajului experimental, s-a conectat generatorul la rețeaua de alimentare trifazată respectând condițiile de sincronism.

- Tensiunile de linie debitate de către generator trebuie să fie egale cu tensiunile de linie ale rețelei trifazate. Acest lucru se poate monitoriza cu cele două voltmetre care măsoară cele două tensiuni sau cu voltmetrul montat între linia de intrare și cea de ieșire, care în momentul sincronizării trebuie să indice valoarea 0. Acest lucru se reglează din sursa de tensiune de c.c. care furnizează valoarea tensiunii și curentului de excitație
- Frecvența nominală trebuie să fie de 50 Hz. Acest lucru se reglează din turația motorului primar care trebuie să ajungă la valoarea de sincronism, de 1500 rot/min. Fazele trebuie să fie în aceeași succesiune
- Fazele trebuie să fie în sincronism. Acest lucru se urmărește cu sistemul de becuri sau cu sincronoscopul
- Cu ajutorul sincronoscopului, se observă influența tensiunii și curentului de excitație asupra condițiilor de sincronism

4.2. Comportarea generatorului sincron la variații impuse de cuplu la arborele motor

4.2.1. Echipamente utilizate

Pentru ridicarea caracteristicilor mecanice și electrice ale generatorului sincron s-au folosit următoarele echipamente:

1. Mașină sincronă trifazată 0.3 kW;
2. Mașină asincronă trifazată 0.6 kW;
3. Invertor de frecvență ELECTROZEP;
4. Servomotor cu frână;
5. Sursă de tensiune de curent continuu 0-30 V, 5A;
6. Multimetru analog/digital, voltmetru, cosfimetru, multimetru trifazat;
7. Comutator tripolar cu două poziții;
8. Dispozitiv de măsurare trifazat;
9. Reostat de sarcină;
10. Controler servomotor

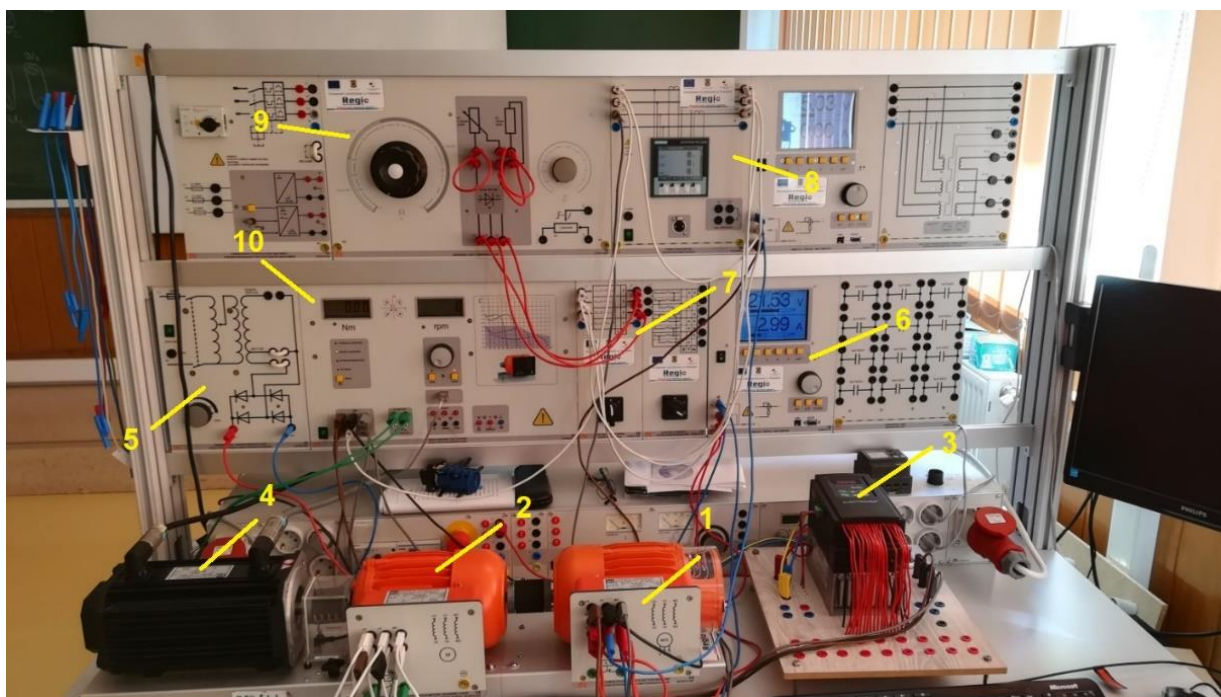


Fig.4.7. Stand pentru determinarea caracteristicilor generatorului sincron

4.2.2. Determinări experimentale – Curba de variație crescătoare în trepte

După ce s-a studiat comportarea motorului sincron la variații de cuplu, s-a montat standul din figura 4.7. pentru a se urmări comportarea mașinii sincrone în regim de generator la aceleași variații de cuplu.

Sursa de tensiune de curent continuu (5), asigură o tensiune de curent continuu înfășurării rotorice a mașinii sincrone (1), înfășurarea statorică fiind conectată în conexiune stea. Multimetru analog/digital (6) măsoară valorile în curent continuu ale curentului și tensiunii de excitație debitate variabil de către sursa de tensiune de curent continuu (5).

Motorul asincron (2), controlat de inverterul de frecvență (3), asigură turația de sincronism a generatorului sincron (1). Servomotorul cu frână (4), prin intermediul controlerului (10), generează cupluri impuse la arbore simulând variații posibile. Sistemul este cuplat la reostatul de sarcină (9), prin intermediul comutatorului tripolar cu două poziții (7). Parametri de ieșire sunt afișați cu dispozitivul de măsurare trifazat (8).

Pentru început, s-a considerat o caracteristică de cuplu care urmărește creșterea succesivă a cuplului la arbore în timp de 30s.

Până la 10s motorul are un cuplu minim, după care se mărește valoarea cuplului la 0.1 Nm, după 20s se crește la valoarea de 0.2Nm și în final revine la valoarea de început. Aceasta caracteristică de cuplu este prezentată în figura 4.8. S-a considerat că înfășurarea de excitație are o încărcare de 2.5A și 3A.

Au rezultat caracteristici mecanice și electrice prezentate în figura 4.10.

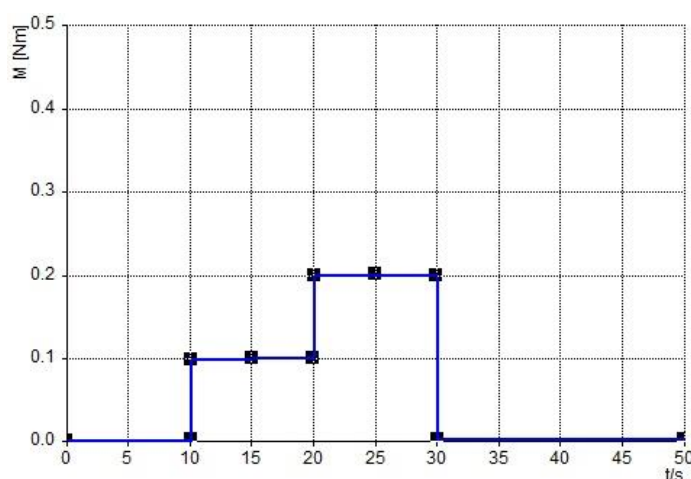


Fig.4.8. Caracteristica de cuplu impusă pentru 50s

Pe același grafic de cuplu, s-au reprezentat aceleași caracteristici pentru o valoare de $I_{er}=2.5A$ și $I_{er}=3A$ a curentului de excitație. Graficul rezultat este prezentat în figura 4.10.

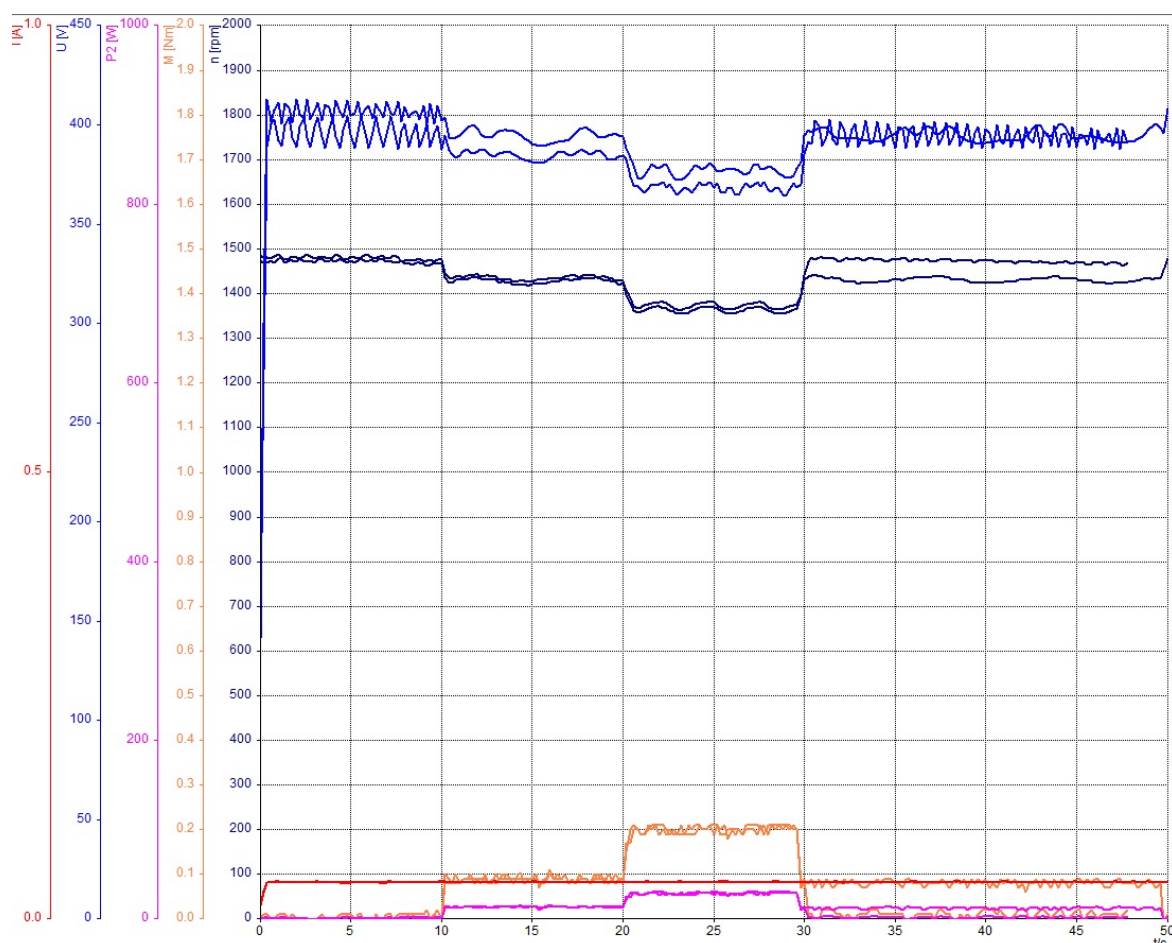


Fig.4.10. Caracteristici mecanice și electrice ale generatorului sincron pentru $I_{er}=2.5A$ și $3A$

Din analiza comparativă a acestor grafice (figura 4.10.), se observă că la variații impuse ale cuplului motor la arborele mașinii sincrone, tensiunile furnizate la borne păstrează aceeași tendință invers proporțională în raport cu momentul rezistent la arbore, dar valoarea parametrilor electrice se modifică odată cu creșterea curentului de excitație de curent continuu de pe înfășurarea rotorică. În consecință trebuie modificată valoarea curentului de excitație pentru a compensa cuplurile rezistente de la arborele mașinii sincrone.

Din aceste date, rezultă necesitatea monitorizării comportamentului generatorului sincron la variații impuse la arbore, și eventual compensarea prin variabilitatea rezistenței de excitație.

4.2.3. Determinări experimentale – Curbe de variație impuse cu șocuri la arborele motor

Pentru similitudine, s-a considerat o încărcare cu cupluri variabile care au fost aplicate în studiul motorului sincron. Astfel s-a aplicat experimentului, următoarea caracteristică de cuplu prezentată și în cercetarea mașinii sincrone utilizată ca motor, la figura 2.68.

S-a considerat că trebuie urmărite aceste încărcări pentru trei valori ale curentului excitație, de $1A$, $2,5A$ și $3A$.

Pentru exemplificare, în rezumatul tezei de doctorat a fost reprezentată caracteristica obținută pentru valoarea de $I_{er}=3A$.

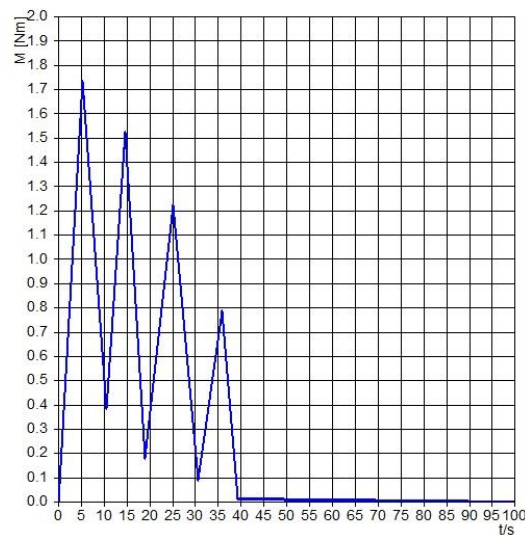


Fig.4.11. Caracteristica cuplu impusă arborelui generatorului

Pentru $I_{er}=3A$ s-au obținut următoarele rezultate și caracteristici:

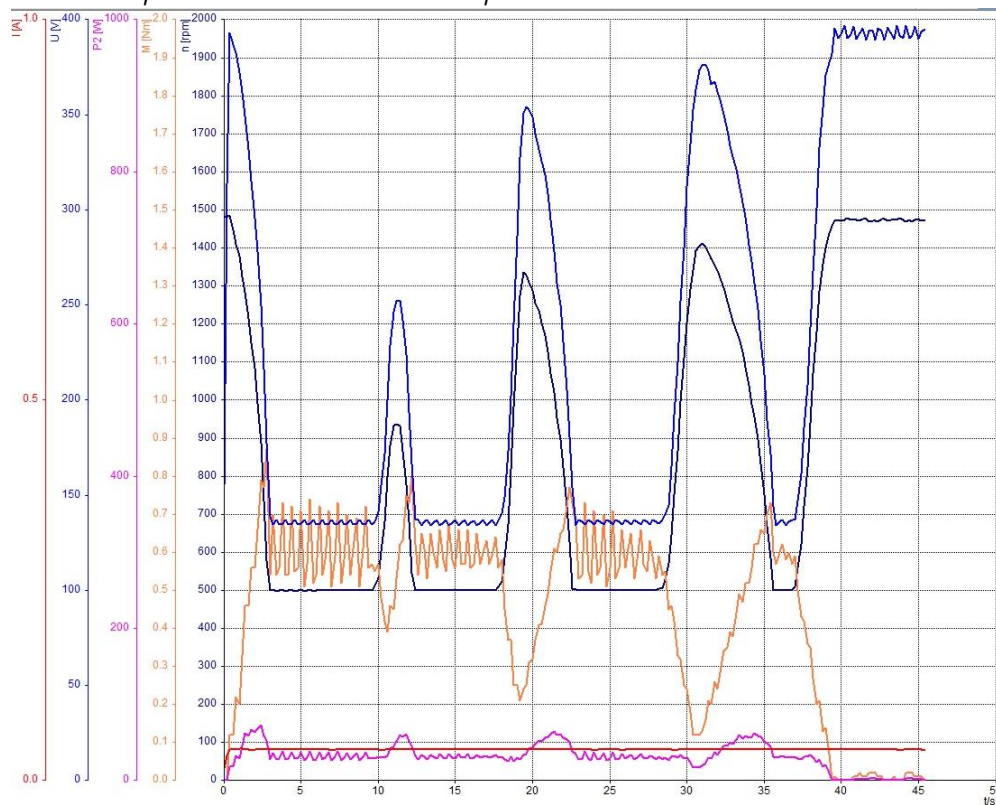


Fig.4.14. Caracteristici mecanice și electrice ale generatorului sincron pentru variație de cuplu impusă la $I_{er}=3A$

Analizând cele trei grafice comparative prezentate în figurile 4.12, 4.13. și 4.14., pentru valori diferite ale curentului de excitație, se observă că valoarea curentului de ieșire este influențată de valoarea curentului de excitație de la înfășurarea rotorică. Turația păstrează alura caracteristicii de cuplu, tensiunea nominală care tinde să destabilizeze sistemul este adusă înapoi la valoarea nominală de sincronism, lucru evidențiat și în cazul cercetărilor anterioare ale mașinii sincrone utilizate ca motor.

4.3 Studiul experimental al reglajului automat tensiunii în cazul oscilațiilor turației generatorului sincron

4.3.1. Noțiuni teoretice

În această cercetare, s-a experimentat comportamentul generatorului sincron la simularea apariției variațiilor de turație și șocuri la arborele mașinii primare. Pentru aceasta, s-a efectuat experimentul pe un stand cu echipamente de laborator, la care s-au adăugat echipamente suplimentare.

Un mecanism de protecție în timp împotriva supracurentului este adăugat pentru protecția împotriva suprasarcinii termice și o protecție diferențială pentru schema electrică. Acest mecanism măsoară curenții individuali din fiecare fază și trebuie setat la valoarea de 1.2 – 1.5 ori mai mare ca cea a curentului nominal al mașinii.

Timpul de întârziere trebuie să fie destul de lung deoarece protecția la supracurent nu trebuie să se declanșeze până ce protecția rețelei nu s-a declanșat. Timpii relativ lungi de declanșare de 2 – 10s sunt astfel configurați. De asemenea este configurat un sincronizator automat (GCP-30), utilizat pentru a readuce sistemul de tensiuni trifazate la valori nominale de sincronizare în rețea. Releul electromagnetic este utilizat pentru comanda declanșării generatorului sincron, la condiții extreme de desincronizare, când nu se mai pot asigura parametri nominali în sistem.

4.3.2. Măsurători și montaje experimentale

Obiective

- Configurarea și pornirea generatorului sincron
- Setarea parametrilor pentru releul multifuncțional (GCP-30)
- Configurarea sistemului de administrare al releului
- Configurarea monitorizării protecției în timp împotriva supracurentului
- Presetarea pragurilor de răspuns pentru protecția în timp împotriva supracurentului pentru:
 - creșterea sarcinii consumatorului
 - modificarea turației generatorului (producerea șocurilor la arbore)
 - testarea valorilor presetate

Echipamente utilizate:

CO3212-5U	Sursă de alimentare universală de curent continuu și curent alternativ trifazat;
CO3301-5P	Modul de cuplare sarcină;
CO3301-5Y	Releu multifuncțional, dispozitiv de control al puterii electrice, $\cos \varphi$, unitate automată de sincronizare;
CO5127-1Y	Dispozitiv de măsurare trifazat;
CO3212-1P	Înteruptor termomagnetic;
CO3636-6W	Servomotor – banc de probă pentru mașini electrice de 1kW;
CO3301-4F	Comutator de cuplare a rezistenței suplimentare de excitație;
CO5127-1Z	Multimetru analog/digital, voltmetru, cosfimetru;
CO3301-3F	Sarcină rezistivă trifazată;
CO3301-5F	Rezistență reglabilă automată suplimentară de excitație.

Schema electrică utilizată

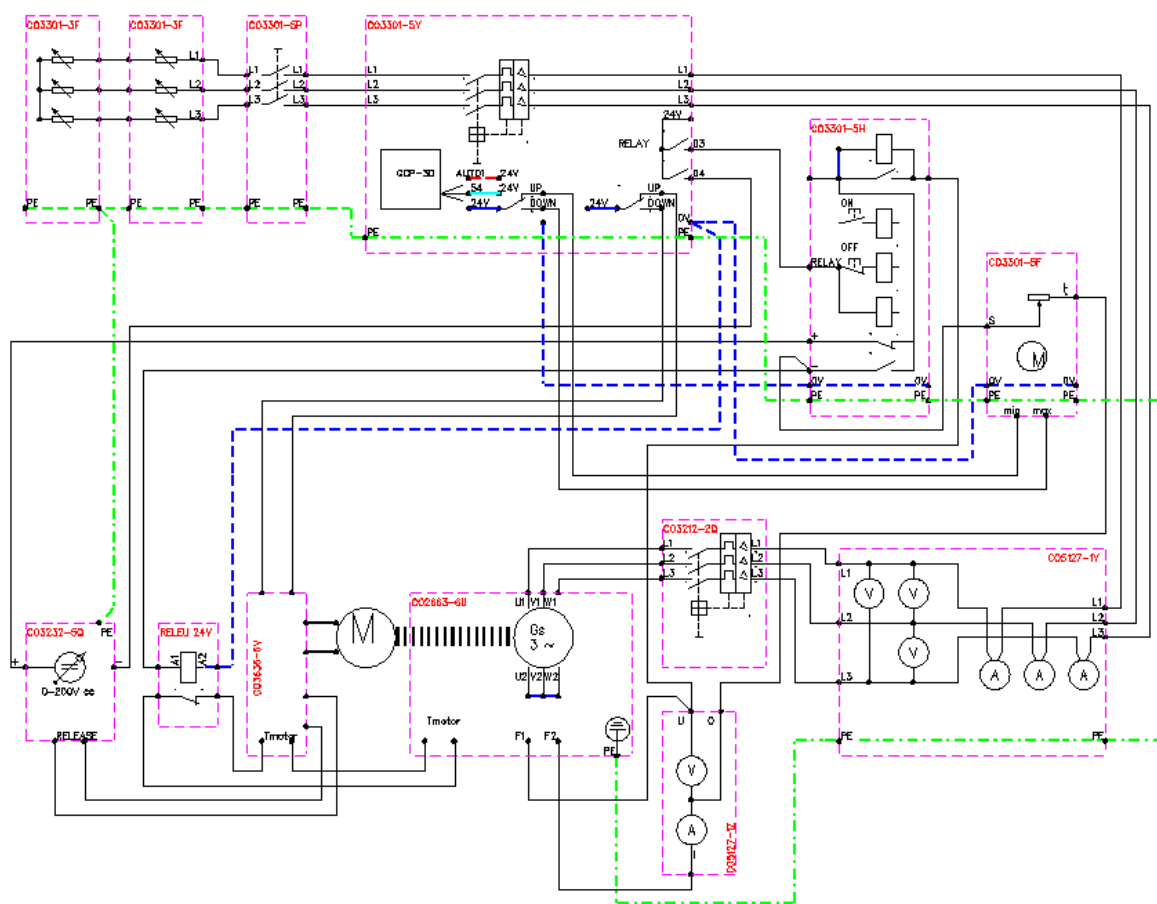


Fig.4.15. Schema electrică utilizată pentru reglajul automat al tensiunii în cazul oscilațiilor turației generatorului sincron.

Realizarea practică a schemei

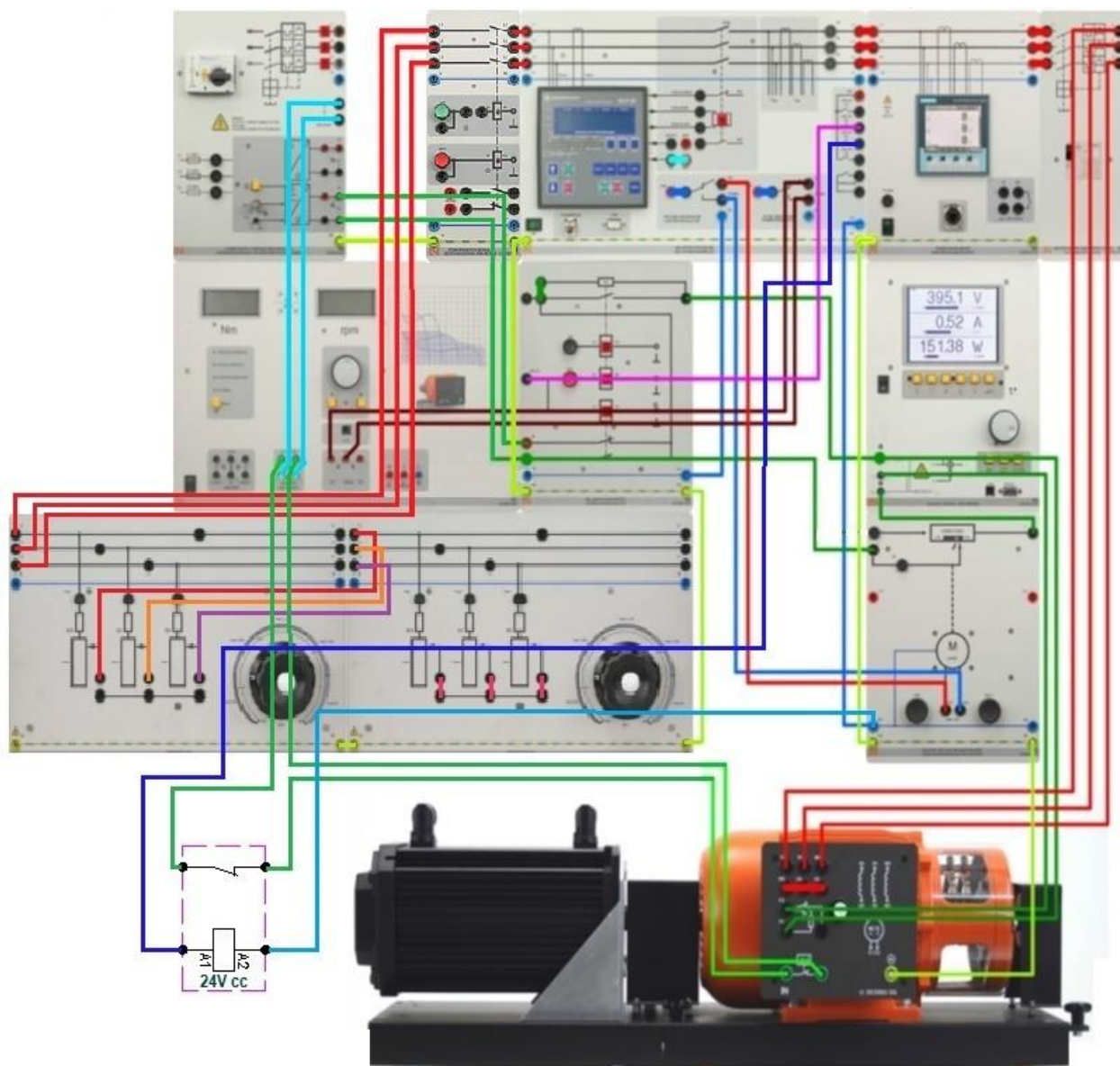


Fig.4.16. Schema electrică de principiu utilizată pentru reglajul automat al tensiunii în cazul oscilațiilor turației generatorului sincron

Se realizează următoarele setări:

- **Servomotorul:**
 - Reglarea vitezei: Viteza nominală sincronă a generatorului (mașină sincronă)
 - Direcția de rotație a generatorului sincron: pozitivă (în sens orar)
 - **Nu se conectează modul „Sync”**

Modul: „Sincronizare” setat din

- **Rezistența de excitație variabilă comandată electric:** se va seta la o valoare medie apăsând butoanele „Min” sau „Max” ale rezistenței suplimentare de excitație

- **Sursa de alimentare de curent continuu:** între 60-65V (pentru alimentarea înfășurării de excitație rotorică)
- **Rezistență de sarcină trifazată:** Se reglează rezistența la valoarea ei maximă
- **Releul multifuncțional:**
 - Activăm protecția în timp la supracurent folosind următorii parametri: (se face referire la instrucțiunile de folosire a releului GCP-30, „Protecția în timp împotriva supracurentului „).
 - Alimentare monitorizare a supracurentului: „Da”
 - Pasul 1
 - Supracurent pasul 1: 100%
 - Întârziere supracurent pasul 1: 2s
 - Pasul 2
 - Supracurent pasul 2: 300%
 - Întârziere supracurent pasul 2: 0.03s
 - Se încarcă noile valori standard în releul multifuncțional.
 - După transferul datelor, releul multifuncțional este pregătit pentru procedura „Black start”.
 - Programul LeoPC1, și interfața cu parametri, trebuie să rămână funcționale.

Se va porni montajul:

- Se setează regulatorul de tensiune de excitație la un nivel mediu folosind cele două butoane (min. și max.)
- Se pornește servomotorul și se aduce la turația de sincronism, (1500rot/min)
- Se modifică tensiunea de excitație până ajunge la valoarea de 60-65V
- Se pornește releul GCP-30. Se așteaptă până acesta se inițializează. Pe ecran apare „Gen”
- Se setează releul GCP-30 în modul automat apăsând butonul „Auto”
- Se face conexiune între 24V și AUTO1 prin introducerea cheii de scurtcircuit
- Pe ecran va apare „PREGLOW” urmat de afișarea „START”
- Se acționează butonul „ON” pe butonul de pornire al excitației (CO3301-5H). Acesta conține o rezistență suplimentară reglabilă de excitație, înseriată cu circuitul rotoric, care se comportă ca un consumator pentru circuitul de excitație
- În timpul procesului, nu se vor face modificări la setările experimentului sau ale dispozitivelor
- Imediat ce parametrii ceruți sunt îndepliniți, inclusiv unghiuri de fază identice, secvență de fază, frecvență și aceeași valoare RMS a tensiunii a fost atinsă, releul multifuncțional comută generatorul la rețea
- Se conectează consumatorul trifazat în circuit
- Se modifică turația mașinii primare, a servomotorului, până când este declanșată protecția în timp împotriva supracurentului. Se rotește încet elementul de control astfel încât regulatorul de tensiune al releului multifuncțional să poată ține pasul cu turația generatorului în creștere sau în scădere
- Se observă cum releul multifuncțional răspunde și se notează valorile de răspuns
- Pentru a termina experimentul, se va opri motorul și sursa de excitație
- După resetarea completă, montajul poate fi folosit pentru un nou experiment

- După anclanșarea alarmei releului multifuncțional și deconectarea generatorului, se va dezactiva mecanismul de declanșare al excitației prin butonul „OFF”.

S-a observat la pornire că, sarcina rezistivă CO3301-3F folosită în circuit ca și consumator trifazat are o valoare prea mică ceea ce a dus la intrarea generatorului în pendulare și creșterea bruscă a curentului generatorului. Pentru aceasta s-a mai înseriat o sarcină rezistivă pentru mărirea rezistenței și prin aceasta s-a eliminat creșterea bruscă a curentului generatorului. Sarcina rezistivă fiind reglabilă aceasta a fost fixată pe valoarea maximă a acesteia și s-a adus generatorul la turația de sincronism de 1500 rot/min, iar apoi prin reglarea tensiunii de excitație pe înfășurarea rotorică a generatorului s-a adus tensiunea generatorului la valoarea de 410V. Din acest moment s-a început reducerea rezistenței sarcinii rezistive trifazate pentru a crește curentul obținut de la generator. Rezistența automată de reglare a excitației, comandată de releul multifuncțional GCP-30 a început să aducă generatorul în echilibru pentru compensarea sarcinii și asigurarea tensiunii de ieșire a generatorului, prin mărirea tensiunii de excitație pe înfășurarea rotorică.

S-a redus turația generatorului din pas în pas, astfel încât s-a realizat compensarea păstrării condițiilor tensiunii de ieșire trifazate prin reglajul automat al rezistenței suplimentare de excitație, dat de către releul multifuncțional CGP-30. După ce s-a depășit valoarea limită setată pe releul multifuncțional GCP-30, acesta a decuplat automat generatorul de la consumator. Aceleași măsurători s-au realizat pentru o creștere a turației generatorului.

De asemenea s-a mai observat că, în momentul în care sarcina pe generator a fost mare a început scăderea tensiunii și frecvenței de sincronism.

Se observă că protecția generatorului prin releul GCP-30 decuplează la o turație de 1370 rot/min sau la o valoare a frecvenței de 45Hz, sau în creștere, la o turație de 1680 rot/min sau la o valoare a frecvenței de 55Hz.

Astfel, releul decuplează mașina primară la o valoare de $\pm 10\%$ față de valorile nominale ale curentului sau frecvenței, protejând rețeaua și generatorul.

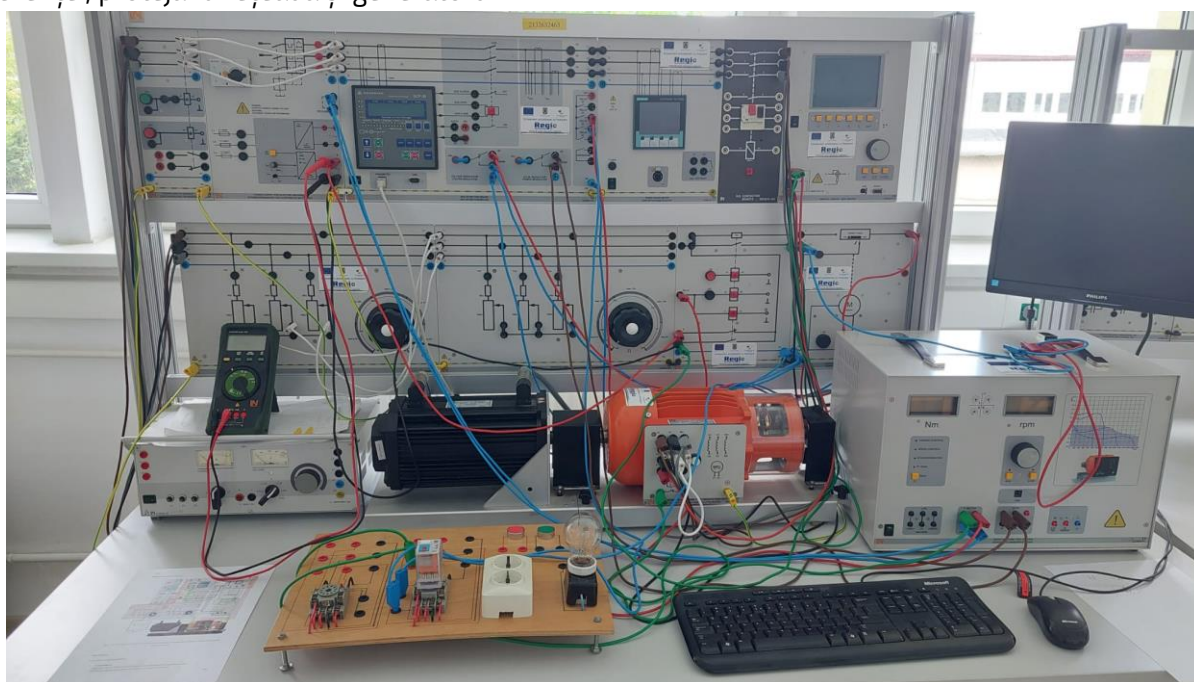


Fig.4.17. Stand pentru reglajul automat al tensiunii în cazul variațiilor turației generatorului sincron

În urma măsurărilor, s-au obținut următoarele date

Tabelul 4.6. Rezultate obținute pentru reglajul automat al tensiunii în cazul oscilațiilor turației generatorului sincron

Turație generator [rot/min]	Frecvența [Hz]	Ue [V]	Uerr [V]	I _{er} [A]	R _{total} [Ω]	R _{ex} [Ω]	R _{ex reg} [Ω]	Stare LED
1344	44.8							deconectare
1378	45.9	396	65.2	0.72	90.56	14.7	75.86	rosu 5
1400	46.65	397	65.2	0.7	93.14	17.7	75.44	rosu 4
1422	47.4	396	65.1	0.67	97.16	21.3	75.86	rosu 3
1444	48.1	398	65.1	0.66	98.64	23	75.64	rosu 2
1466	48.8	399	65.1	0.64	101.7	26.8	74.92	rosu 1
1488	49.6	399	65.2	0.62	105.2	29.9	75.26	galben
1500	50	400	65.1	0.62	105	29.9	75.1	verde
1512	50.4	403	65.1	0.61	106.7	31.7	75.02	galben
1534	51.1	404	65.1	0.6	108.5	33.3	75.2	rosu 1
1556	51.8	405	65	0.6	108.3	33	75.33	rosu 2
1578	52.6	405	65.2	0.58	112.4	37.5	74.91	rosu 3
1620	54	406	65.1	0.565	115.2	40.3	74.92	rosu 4
1642	54.7	401	65.2	0.54	120.7	45.3	75.44	rosu 5
1662	55.3							deconectare

În urma analizării rezultatelor s-au trasat următoarele caracteristici

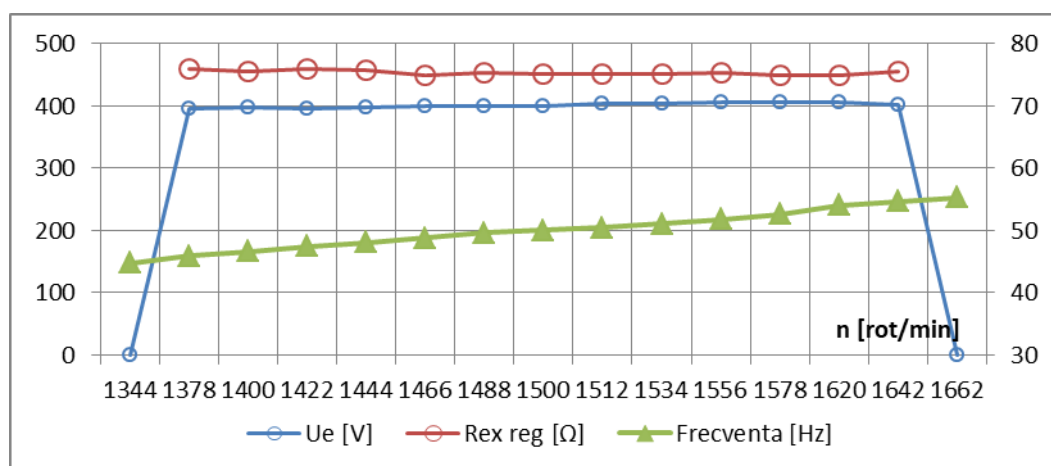


Fig.4.18. Caracteristici electrice ale generatorului sincron în funcție de turație

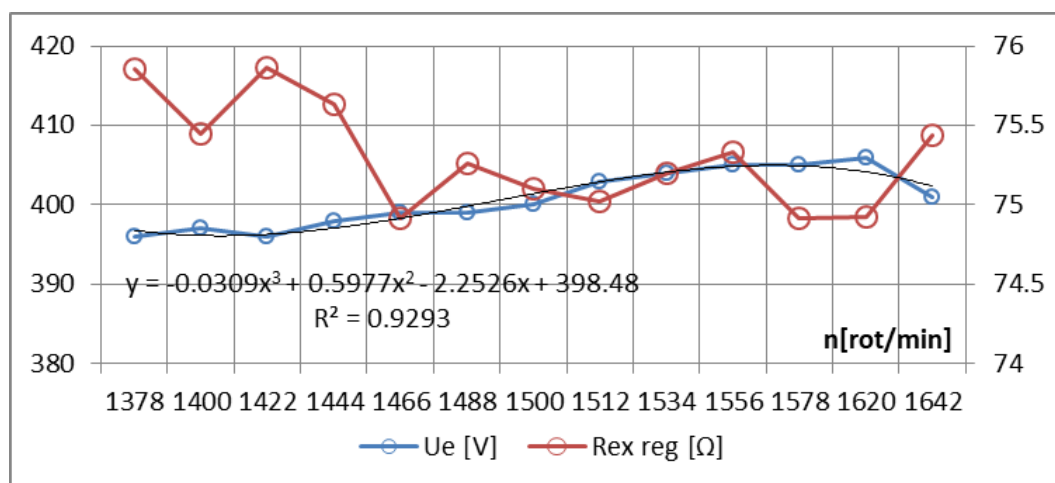


Fig.4.19. Caracteristici $U_e[V]$, $R_{ex}[\Omega] = f(n)$

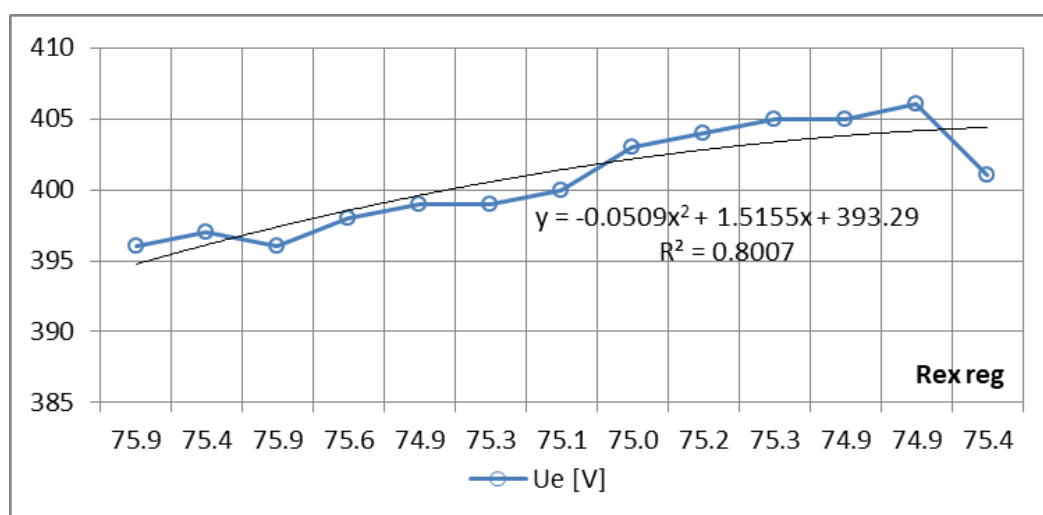


Fig.4.20. Caracteristici $U_e = f(R_{ex_{reg}})$

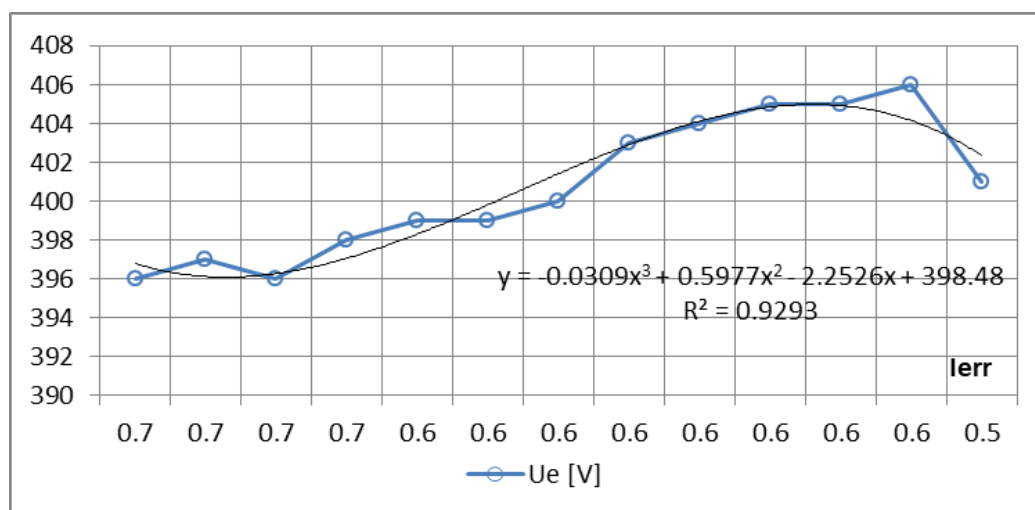


Fig.4.21. Caracteristici $U_e = f(I_{err})$

Analizând rezultatele obținute în tabelul 4.6 se poate observa cum variațiile de turație de la arborele generatorului influențează rezistența de excitație a înfășurării rotorice și implicit a curentului de excitație. Acesta este sesizat de către mecanismul de sincronizare și comandă rezistența de excitație astfel încât să se poată menține o tensiune constantă la bornele de ieșire ale generatorului în limitele frecvenței variabile de $\pm 10\%$. În figura 4.18 se poate observa cum generatorul, la variația frecvenței f , implicit variația turației, păstrează tensiuni nominale în rețeaua trifazată de alimentare, prin variabilitatea fină a rezistenței suplimentare de excitație. În figura 4.19. se observă variația rezistenței suplimentare de excitație, arătând dinamicitatea sistemului de reglare automat. În diagramele prezentate în figurile 4.20. și 4.21., s-au reprezentat caracteristici $U_e=f(R_{ex_{reg}})$, respectiv $U_e=f(I_{e_{rr}})$, care scot în evidență influența rezistenței de excitație, respectiv a curentului de excitație în reglarea sistemului automat în funcție de variațiile mecanice de la arborele generatorului.

4.4. Concluzii

Plecând de la parametri mecanici și electrici influențați s-au exprimat concluzii necesare în vederea trecerii la procesul de sincronizare. Astfel, în acest capitol s-a realizat un stand de sincronizare manuală cu rețeaua de alimentare și s-a realizat o schemă electrică care realizează o sincronizare automată cu rețeaua în condițiile unui cuplu variabil la arbore într-o anumită plajă variabilă a turației generatorului.

Pentru continuarea cercetărilor, s-a construit un montaj experimental care să realizeze sincronizarea manuală a generatorului sincron cu rețeaua trifazată de alimentare. S-a constatat că, pentru atingerea celor patru condiții de sincronizare, un rol important îl are curentul de excitație al generatorului furnizat de sursa de alimentare de curent continuu. Din cele patru condiții, care țin de tensiunile nominale debitate în rețea, frecvența nominală, sincronismul și succesiunea fazelor, frecvența nominală poate fi modificată prin valoarea curentului de excitație debitat în înfășurarea rotorică.

Din acest punct al cercetării, ajungând la aceste concluzii, s-a realizat un montaj experimental care să identifice și să monitorizeze comportarea generatorului sincron la variații impuse de cuplu la arborele motor. S-au realizat măsurători experimentale prin generarea unor cupluri ce urmăresc o curbă de variație crescătoare în trepte, pentru două valori ale curentului de excitație, de 2,5A și 3A. Analizând comparativ aceste grafice, se observă că la variații impuse ale cuplului motor la arborele mașinii sincrone, tensiunile furnizate la borne păstrează aceeași tendință invers proporțională în raport cu momentul rezistent la arbore, dar valoarea parametrilor electrici se modifică odată cu creșterea curentului de excitație de curent continuu de pe înfășurarea rotorică. În consecință s-a stabilit că trebuie modificată valoarea curentului de excitație pentru a compensa cuplurile rezistente de la arborele mașinii sincrone.

Aceste rezultate au condus la necesitatea generării unor curbe de variații bruște în timp. Scopul a fost de monitorizare a comportamentului mașinii sincrone în condiții extreme la arborele mașinii primare (a turbinei eoliene), astfel încât, la o desincronizare mai accentuată, să se identifice elementul de parametru capabil să readucă generatorul sincron la condițiile de sincronism nominale. Astfel, pentru o caracteristică de cuplu impusă la arborele mașinii, s-a destabilizat turația generatorului și s-a constatat că valoarea curentului de ieșire este cu atât mai stabilă și liniară cu cât valoarea curentului de excitație este mai apropiată de valoarea nominală a generatorului. Restul parametrilor sunt influențați în mică măsură de desincronizările de la arbore, dar datorită tensiunii și curentului din circuitul rotoric, generatorul are capacitatea de a reveni la condițiile de sincronism.

Următoarea cercetare s-a bazat pe conceperea și realizarea unui sistem care să permită furnizarea de parametri nominali în sistem în cazul modificărilor de cuplu la arborele turbinei eoliene, sau în cazul modificării turației.

La arborele unei turbine eoliene, în condițiile în care viteza vântului nu este constantă, apar cupluri variabile care tind să destabilizeze viteza de la arborele mașinii sincrone. Datorită caracteristicilor generatorului sincron turația poate fi modificată cu $\pm 10\%$ față de valoarea nominală de 1500 rot/min. Pentru diverse valori ale cuplului motor s-a intervenit în circuitul electric și s-a modificat valoarea tensiunii de curent continuu și a curentului de excitație din înfășurarea rotorică. S-a constatat că, odată cu creșterea cuplului motor trebuie crescute și aceste valori dar, astfel încât să nu se depășească valoarea nominală impusă de generatorul studiat și mai ales să nu se depășească valorile cuplului motor pentru a nu ieși din sincronism. Prin montajul conceput și studiat, sistemul poate prelua variațiile de la arborele turbinei eoliene și poate păstra în anumite limite parametri nominali în sistem.

5. CONCLUZII FINALE, CONTRIBUȚII ORIGINALE, DISEMINAREA REZULTATELOR, DIRECȚII VIITOARE DE CERCETARE

5.1. Concluzii finale

Prezenta teză de doctorat descrie activitățile desfășurate de autor pentru fundamentarea cercetării în domeniul turbinelor eoliene cu mașini sincrone împreună cu rezultatele teoretice și experimentale obținute, concluziile și direcțiile viitoare de cercetare. Totodată teza de doctorat, prezintă soluții complexe pentru sincronizarea automată a generatorului sincron cu rețeaua de alimentare trifazată, în scopul stabilirii unei metode de compensare a cuplurilor variabile la arbore prin variația curentului de excitație de pe înfășurarea rotorică a generatorului.

Capitolul 1, intitulat **Stadiul actual al cercetărilor în domeniul turbinelor eoliene și a mașinii sincrone** sintetizează aspecte legislative internaționale, europene și naționale datorită angajamentelor pe care România și le-a luat ca membru al Uniunii Europene, ca bază de plecare și fundamentare pentru necesitatea cercetării tezei având în vedere și contextul economic actual.

Astfel necesitatea îmbunătățirii continue a sistemelor eoliene este dată de mai multe aspecte și anume, de necesitatea creșterii producției de energie electrică din surse regenerabile fapt care implică analiza și elaborarea de soluții tehnice inedite, aspecte legate de disponibilitate și capacitate de conversie a energiei eoliene în energie electrică, aspecte legate de amplasament și anume unde se pot amplasa, ce arhitecturi ale sistemelor eoliene sunt necesare pentru a realiza o conversie cu randament ridicat, care este profilul sursei primare, aspecte legate de creșterea densității de energie pe suprafață, aspecte legate de legislație, aspecte legate de standardizare și aspecte legate de fiabilitate și mentenanță.

Prin urmare, în acest capitol s-au sistematizat aspecte teoretice legate de: modul de conversie al energiei eoliene în energie electrică cu analiza sursei primare și a mărimilor ce influențează randamentul conversiei primare (transformarea energiei cinetice a vântului în energie mecanică), precum și a mărimilor care influențează conversia secundară (transformarea energiei mecanice în energie electrică); clasificarea sistemelor eoliene în funcție de principiul de funcționare; de structura sistemelor eoliene din punct de vedere al părților componente ținând cont de principiul de funcționare; clasificarea turbinelor eoliene sub aspectul puterii electrice date unui consumator sau în rețea; aspecte legate de stocarea energiei electrice și avantajul conectării la rețea a sistemelor eoliene care au și sisteme de stocare; aspecte legate de existența standardelor internaționale și naționale necesare a fi respectate de fabricanți; aspecte ce țin de fiabilitatea individuală a componentelor sistemelor eoliene și fiabilitatea globală care au impact economic atât producătorul de energie cât și consumatorul în cazul în care sunt probleme în funcționare; aspecte legate de conectarea la rețea.

Analizând toate aceste aspecte s-a considerat că îmbunătățirea care s-ar putea realiza prin această cercetare, la un sistem eolian nou sau chiar la unul existent, poate fi realizată prin comanda și controlul generatoarelor sincrone.

În acest capitol s-a prezentat mașina sincronă ca parte componentă a turbinei eoliene, aspecte teoretice privind construcția acesteia, particularitățile ei în raport cu alte mașini electrice rotative, precum și rolul acesteia în aplicații ca motor sau ca generator. S-a definit mașina sincronă, s-au făcut referiri despre rolul

acesteia în aplicațiile industriale, s-a descris rolul statorului și rotorului în cadrul funcționării exemplificând două modele de mașini sincrone în funcție de varianta constructivă cu miez rotoric cu poli înecați sau cu poli aparenti.

Trebuie remarcat faptul că, în prezent, toate turbinele eoliene de putere precum și turbinele hidroelectrice au în componența lor, pentru a produce energie electrică trifazată în rețea, generatoare sincrone, care beneficiază de o caracteristică foarte importantă ceea ce o deosebește de alte mașini electrice: au o turație constantă, indiferent de regimul de funcționare (stabilizat) și independent de valoarea sarcinii (în limite considerate normale).

Mașina sincronă mai este caracterizată de faptul că viteza de rotație n a rotorului se găsește în raport constant cu frecvența rețelei la care este conectată, iar câmpul magnetic inductor este produs de un sistem de perechi de poli a căror înfășurare de excitație este alimentată în curent continuu [24]. Ea poate funcționa în regim de generator sau regim de motor.

Particularitatea acestei mașini este legată de faptul că înfășurarea statorică are trei bobine care pot fi alimentate cu un sistem trifazat de tensiuni, dacă mașina sincronă funcționează în regim de motor sau pot debita tensiuni trifazate în rețea dacă aceasta funcționează ca generator. În ambele situații, înfășurarea rotorică trebuie alimentată de la o sursă de curent continuu cu o tensiune numită tensiune de excitație. În funcție de modul de obținere a acestei tensiuni, există variante de conectare care diferențiază montajul mașinii sincrone. În capitolul 1 s-au exemplificat două moduri de alimentare a sistemului de excitație al mașinii sincrone. Pentru debitarea unui sistem trifazat de tensiuni la o frecvență nominală, este important de știut că la mașina sincronă turația este cea de sincronism și este legată riguros de frecvența rețelei de curent alternativ la care este cuplată mașina, care în Europa este de 50Hz [23].

Expresia cuplului electromagnetic al mașinii sincrone, bilanțul puterilor precum și randamentul acesteia de 98-98,5%, o face foarte importantă în aplicații industriale în special acolo unde este nevoie de cupluri mecanice mari la turații mici.

Pentru studiul mașinii sincrone, s-a tratat separat mașina sincronă, ca generator și ca motor.

Motorul sincron cunoaște o largă aplicabilitate datorită robusteții acestuia, dezvoltă un cuplu mare la o dimensiune de gabarit acceptabilă, iar datorită întrefierului acestuia, care poate fi mărit față de alte mașini electrice, o face rezistentă în timp. În studiul motorului sincron s-au descris ecuațiile de funcționare, s-au exemplificat caracteristicile cele mai importante ale acesteia, de unde a reieșit faptul că tensiunea și curentul de excitație joacă un rol important în pornirea și reglajul acesteia. Noțiuni teoretice despre pornirea motorului sincron scot în evidență pornirea mai greoaie a acestora, probleme de exploatare care au fost rezolvate în prezent prin utilizarea invertoarelor de frecvență și a sistemelor de automatizare.

Generatorul sincron este tratat separat în lucrarea prezentată, unde s-a exemplificat rolul înfășurărilor statorice bobinate decalat, la un unghi fazorial de 120 grade, precum și rolul înfășurării de excitație, care alimentată cu un sistem de curent continuu, furnizează parametri trifazați în rețeaua de alimentare trifazată, la o frecvență nominală a rețelei. Variabilitatea generatorului sincron este strâns legată de controlul acestuia prin controlul tensiunii și curentului de excitație, fapt ce a dus la studierea acestui aspect în capitolele următoare.

Capitolul 2, intitulat Cercetări privind mașina sincronă utilizată ca motor, prezintă mai multe cercetări experimentale și studii de caz care pun în evidență rolul și influența curentului de excitație în controlul motorului sincron.

În acest capitol, cu ajutorul unui stand experimental, s-au ridicat caracteristici mecanice și electrice $n=f(M)$, $I=f(M)$, $P_1=f(M)$, $P_2=f(M)$, $\cos\varphi=f(M)$, $\eta_r=f(M)$ pentru diferite valori ale curentului de excitație din treaptă în treaptă în intervalul 0.5A – 3A, la cupluri motoare diferite la arbore. Cercetările legate de acest aspect, prezentate și în articole științifice publicate, au scos în evidență rolul și necesitatea variabilității curentului de excitație în controlul motorului sincron.

Cercetările au continuat cu generarea curbelor de cuplu, astfel încât să se scoată în evidență faptul că mașina sincronă își menține turația constantă indiferent de sarcina la arbore în limite normale. Au fost generate diferite caracteristici de cuplu, la diferite valori ale curentului de excitație. Cercetările au pus în evidență faptul că mașina sincronă păstrează turații constante la cupluri variabile și impuse, astfel încât ele își continuă funcționarea și nu ajunge în starea de ieșire din sincronism. Vârfurile de sarcină pot fi diminuate și în unele cazuri anulate prin reglajul curentului de excitație din înfășurarea rotorică, deci prin influențarea câmpului magnetic inductor rotoric.

În ultima parte a capitolului 2, s-au creat diferite curbe de sarcină care s-au aplicat arborelui mașinii. S-au creat curbe de cuplu care să simuleze eventualele rafale de vânt de la arborele unei turbine eoliene, mărind atât valoarea cuplului motor cât și intervalul de timp în care staționează o anomalie la palele turbinei. O parte din curbele de sarcină s-au aplicat și în capitolul 4, în care s-a studiat mașina sincronă în regim de generator.

Caracteristicile rezultate au arătat stabilitatea în timp și la sarcini variabile ale mașinii sincrone. Motorul, chiar dacă s-a destabilizat în unele situații, a revenit la parametri nominali în cazul anulării condițiilor nedorite.

În urma concluziilor cercetărilor experimentale, s-a trecut la nivelul următor și anume în studii legate de cercetări asupra generatorului sincron.

Rezultatele cercetărilor asupra motorului sincron din prezenta teză de doctorat, diseminate prin publicarea a 4 articole în baze de date internaționale, au stat la baza viitoarelor direcții de cercetare și vor consolida colaborările deja existente.

Capitolul 3, intitulat Cercetări privind mașina sincronă utilizate ca generator continuă cercetarea anterioară prin contribuții originale legate de construcția unui ansamblu care a permis cercetarea mașinii sincrone în regim de generator. Deoarece caracteristicile generatorului sunt importante în cercetările ulterioare, s-au ridicat aceste caracteristici pentru o mașină sincronă cu următoarele date nominale. $P_n=0.27\text{kW}$, $I_n=1.5\text{A}$, $f=50\text{Hz}$, $n=1500\text{rot/min}$, $U_{er}=20\text{Vcc}$; $I_{er}=4\text{A}$. Trasarea caracteristicilor generatorului, a condus la cercetări ulterioare, prezentate în capitolul următor.

Capitolul 4 intitulat Contribuții originale privind proiectarea și dezvoltarea standului pentru punerea în sincronism a generatorului cu rețeaua electrică prezintă cercetări care duc la implementarea unui sistem de reglare automată a parametrilor de sincronizare cu rețeaua trifazată în funcție de variabilitatea turației la arborele generatorului.

Pentru a se vedea cu adevărat rolul și influența curentului de excitație, s-a construit standul de la figura 4.6. care reprezintă o contribuție originală în acest studiu. S-au asamblat anumite module care să pună în evidență procesul de sincronizare manual, păstrând cele 4 condiții de cuplare la rețeaua de energie electrică trifazată: tensiunile de linie de aceeași valoare cu a rețelei, frecvența generatorului egală cu a

rețelei, succesiunea de fază și sincronismul fazelor. Realizând oricare din schemele desenate prezentate la figurile 4.2., 4.3., 4.4. se poate sincroniza generatorul sincron cu rețeaua de alimentare trifazată. Se pune în evidență reglajul fin al tensiunii de excitație, care influențează curentul de excitație necesar reglării parametrilor de conectare.

Astfel, prin standul realizat în figura 4.7. care reprezintă o contribuție originală, s-a conectat în lanțul de angrenare, un motor asincron trifazat comandat de un invertor de frecvență. Acesta a adus turația generatorului la 1500 rot/min, ceea ce a permis ansamblului servomotorului aplicarea curbelor de sarcină variabile și impuse, care au fost studiate și în capitolul 3 dar în regim de funcționare ca motor. Aplicând caracteristici de cuplu la valori diferite ale curentului de excitație, s-a observat influența curentului de excitație de pe înfășurarea rotorică, în stabilitatea mașinii sincrone în momentul în care apare un cuplu motor variabil în trepte, impus sau brusc la arborele unei turbine eoliene.

S-au făcut cercetări privind alegerea unei scheme corecte de sincronizare automată, astfel încât cheltuielile să fie minime, realizabile și eficiente. Montajul final prezentat în această lucrare la figura 4.17. este o contribuție originală prin care s-a studiat reglajul automat al curentului de excitație în cazul oscilațiilor turației generatorului sincron. Montajul conține un sincronizator automat care stabilizează tensiunea de ieșire a generatorului în jurul valorii de 400 V la variații ale turației până la o valoare minimă de 1367 rot/min și la o valoare maximă de 1650 rot/min, în condițiile unui turații nominale de 1500 de rot/min, acesta fiind un parametru nominal al generatorului sincron. Datorită unei rezistențe suplimentare controlate automat, montate în serie cu înfășurarea rotorică de excitație, sistemul permite controlul automat al acestei rezistențe, la turații variabile sau bruște, păstrând tensiunea de ieșire a generatorului. Graficele rezultante au scos în evidență importanța curentului și implicit a rezistenței de excitație în stabilitatea sistemului eolian.

5.2. Contribuții originale

În calitate de autor al tezei de doctorat, consider ca având un caracter de noutate, rezultat al efortului creativ, următoarele:

1. Determinarea caracteristicilor mecanice și electrice ale motorului sincron prin configurarea unui sistem care a permis studierea acestora în funcție de diferite valori ale curentului de excitație.
2. Studierea parametrilor generatorului sincron la diferite scenarii de variație ale parametrilor mecanici (variații crescătoare, impuse sau bruște).
3. Construcția și configurarea unui sistem care a permis determinarea cu acuratețe a caracteristicilor generatorului sincron.
4. Elaborarea procedurii de testare care a permis sincronizarea manuală a generatorului sincron cu rețeaua de alimentare trifazată.
5. Configurarea și construcția unui sistem care a permis sincronizarea automată a generatorului cu rețeaua de alimentare trifazată prin reglajul automat al curentului de excitație în cazul variațiilor turației la arborele generatorului sincron.
6. Conceperea, proiectarea și realizarea standurilor în vederea efectuării determinărilor experimentale:
 - Stand pentru pornirea și sincronizarea manuală a generatorului;

- Stand pentru determinarea caracteristicilor generatorului sincron;
- Stand pentru reglajul automat al tensiunii în cazul variațiilor turației generatorului sincron.

5.3. Diseminarea rezultatelor

În lucrarea prezentată au fost descrise și realizate trei standuri, reprezintă contribuții originale care țin de studiul, cuplarea și sincronizarea generatorului sincron. Aceste standuri au fost realizate în laboratoarele Colegiului Tehnic Energetic Remus Răduleț Brașov.

Rezultatele cercetării au fost publicate astfel:

1. **C Cristea**, I. Stroe, Study of the mechanical and electrical characteristics of the synchronous motor with varying resistive torque, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 568 (2019) 012011, DOI10.1088/1757-899X/568/1/012035
2. **C Cristea**, I. Stroe, Modeling the mechanical and electrical characteristics of the synchronous motor for different variations of torque in time, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 568 (2019) 012011, DOI 10.1088/1757-899X/568/1/012011
3. **C Cristea**, I., Stroe, Modeling the mechanical and electrical characteristics of the synchronous motor, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 514 (2019) 514 012022, DOI 10.1088/1757-899X/514/1/012022
4. **C Cristea**, I. Stroe, The study of the synchronous motor, Bulletin of the Transilvania University of Brașov Vol. 10 (59) No. 2- 2017, Series I: Engineering Sciences, pp. 31-38, ISSN (Online): 2971-9364

5.4. Direcții viitoare de cercetare

Pornind de la studiul mașinii sincrone utilizate în aplicațiile eoliene, obiectivele cercetării de viitor ale autorului se îndreaptă spre:

- Modelarea proceselor care au loc în timpul sincronizării automate prin reglajul rezistenței suplimentare de excitație și a curentului de excitație;
- Conceperea, caracterizarea și patentarea unor scheme electrice și mecanice, împreună cu cercetători de la Departamentul de Design de Produs, Mecatronică și Mediu din Universitatea Transilvania din Brașov;
- Dezvoltarea unor metode de testare a influențelor vântului în procesul de sincronizare cu rețeaua de alimentare trifazată;
- Realizarea unui parteneriat de colaborare cu firme care montează turbine eoliene în scopul implementării soluțiilor obținute în teren;
- Realizarea de parteneriate și colaborări cu alte grupuri de cercetare în domeniul turbinelor eoliene și a generatoarelor sincrone.

BIBLIOGRAFIE

- [1] <https://www.eca.europa.eu/ro/publications?did=50079>
- [2] <https://ourworldindata.org/grapher/electricity-prod-source-stacked>
- [3] <https://legislatie.just.ro/Public/DetaliiDocumentAfis/247257>
- [4] Raport pentru Strategia Energetică a României 2019-2030, cu perspectiva anului 2050, Raport emis de KVB CONSULTING & ENGINEERING SRL pentru Ministerul Energiei, 2019, <https://energie.gov.ro/transparenta-decizionala/strategia-energetica-a-romaniei-2019-2030-cu-perspectiva-anului-2050/>
- [5] Miheţ-Popa L., "Strategii de comandă şi control ale turbinelor de vânt de mare putere", Buletinul AGIR nr. 2-3/2009, pp.54-58, ISSN 2247-3548.
- [6] Dirscherl, C., Hackl, C., Schechner, K. (2015). Modellierung und Regelung von modernen Windkraftanlagen: Eine Einführung. In: Elektrische Antriebe - Regelung von Antriebssystemen. Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, pp. 1540–1614. https://doi.org/10.1007/978-3-642-30096-7_24
- [7] <http://energielive.ro/energie-eoliana-harta-de-vant-a-romaniei-potential-de-14-000-mw/harta-vant-romania/>
- [8] Maican E., Sisteme de energii regenerabile, Ed. Printech, Bucureşti 2015, p. 136, ISBN6062303592, 9786062303594.
- [9] Băjenescu T.M., "Aspecte ale fiabilităţii eolieneleor", *EEA - Electrotehnica, Electronica, Automatica*, 62(1), pp. 65–70, ISSN:1582-5175.
- [10] Vişoreanu A.M., Vişoreanu- Răchiţeanu A., "Reliability and maintenance of wind power systems", *EMERG*, Vol. 6, Issue 3, pp. 13-23, DOI: 10.37410/EMERG.2020.3.01.
- [11] Hossain J., Introduction to wind turbine technology. In Renewable energy engineering and technology, Ed. TERI Press, 2007, pp. 503-540.
- [12] Uttamrao N. L., Uttamrao C.A., Hausaheb K. B., Shravan D. J., "Review paper on Maglev Vertical Axis Wind Turbine", *International Journal of Creative Research Thoughts (IJCRT)*, Volume 6, Issue 2 April 2018 pp. 442-446, ISSN: 2320-2882.
- [13] Vaidya H., Chandodkar P., Khobragade B., Kharat R.K., "Ower generation using Maglev windmill", *International Journal of Research in Engineering and Technology (IJCRT)*, Volume 5, Issue 6, 2018, pp. 325-330, ISSN: 2319-1163.
- [14] Pawar A., Senger P., Sharma R., Singh S., "Maglev Wind Turbine", International Conference on Intelligent Control and Computation for Smart Energy and Mechatronic Systems, JSSATE Noida India, 2020, pp. 1-8,. https://www.researchgate.net/publication/348619246_MAGLEV_Wind_Turbine
- [15] <https://www.orionairsales.co.uk/maglev-vertical-wind-turbine-400w-kit-grid-tie-12v-cxf400-3064-p.asp>
- [16] Hossain F., "Application of wind energy into the transportation sector", *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 8, 2021, pp. 1225–1237, <https://doi.org/10.1007/s40684-020-00235-1>

- [17] Aijjou A., Bahatti L. H., Raihani A., "Wind Energy for Shipboard Electric Power Needs", International Journal of Advanced Trends in Computer Science and Engineering, vol. 9, nr. 1.5, 2020, pp. 168-177, ISSN 2278-3091.
- [18] Ruschetti C., Verucchi C., Bossio G., et al., "Design of a wind turbine generator for rural applications", IET Electric Power Applications, vol. 13, issue 3, 2019, pp. 379-384, ISSN: 1751-8679.
- [19] Tavner, P. J., Xiang J., Spinato F., "Reliability Analysis for Wind Turbines", Wind Energy, nr. 10, 2007, pp. 1–18, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/we.204>
- [20] Zhu C, Yao L, Reliability Analysis of Wind Turbines. In Stability Control and Reliable Performance of Wind Turbines, Ed. Intech Croația, 2018, pp. 169-186, DOI:10.5772/intechopen.74859.
- [21] Spinato, F., Tavner Bussel G., et al., "Reliability of Wind Turbine Subassemblies", IET Renewable Power Generation, Volume 3, Issue 4, December 2009, p. 387 – 401, Online ISSN 1752-1424.
- [22] Polinder, H., van der Pijl, F.F.A., de Vilder G.-J. et al., "Comparison of Direct-Drive and Geared Generator Concepts for WTs", IEEE Trans. Energy Conversion, EC-21 3(2006), pp. 725– 733, DOI: 10.1109/TEC.2006.875476.
- [23] <https://magazin.asro.ro/ro/standard/272918>
- [24] Corentin J., Zacharopoulos A., Brandoni C. et al., "The Role of Domestic Integrated Battery Energy Storage Systems for Electricity Network Performance Enhancement" Energies 12, no. 20: 3954, 2019, p. 27. <https://doi.org/10.3390/en12203954>
- [25] "IEEE Guide for Design, Operation, and Maintenance of Battery Energy Storage Systems, both Stationary and Mobile, and Applications Integrated with Electric Power Systems," in IEEE Std 2030.2.1-2019, vol., no., pp.1-45, 13 Dec. 2019, DOI: 10.1109/IEEESTD.2019.8930450.
- [26] Tănăsescu F. T., " Sistemele de stocare a energiei, o soluție pentru optimizarea funcționării rețelelor electrice la care sunt racordate surse regenerabile intermitente", Buletinul AGIR, supliment 1, 2015, pp. 84-92, <https://www.agir.ro/buletine/2222.pdf>
- [27] Munteanu, I., Contribuții privind conducerea optimă a sistemelor de conversie a energiei eoliene; Rezumat Teză de doctorat, Universitatea "Dunărea de jos", Galați, 2006, p.60.
- [28] Vișoreanu A.M. Cercetări privind echipamentele și mașinile electrice pentru sistemele eoliene de producere a energiei, Rezumat teză doctorat, Universitatea Politehnica București, p.41. "F-CA-47033/30.10.2022".
- [29] <https://blog.romstal.ro/ce-sunt-turbinele-eoliene-si-cum-functioneaza/>
- [30] Stroie D., turbină eoliană verticală cu doi tamburi, cu ansamblu deflector și element de ghidare, cerere brevet invenție nr. a 2018 00143 din 01.03.2018
<https://osim.ro/wp-content/uploads/Brevete/a201800143.pdf>
- [31] <http://www.romania-eoliene.ro/turbine-eoliene/structura-instalatiei-eoliene.html>
- [32] Sorensen B., Breeze P., Storvick T., Yang S., et. Al., Wind Power, in Renewable Energy Focus Handbook, Academic Press, 2009, pp. 435-444, ISBN 13 9780123747051.
- [33] Curtu I., Stanciu M.D., Jeflea M., Teșulă I., " Optimizarea sistemului de ranforsare a palelor de turbine eoliene utilizând metoda elementelor finite", Buletinul AGIR, nr. 1, 2016, pp. 35-39.
- [34] Manerikar S. S., Damkale S. R., Havaladar S. N., Horizontal axis wind turbines passive flow control methods: a review, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 1136 (2021) 012022, p. 17, DOI:10.1088/1757-899X/1136/1/012022.

- [35] Wagner H. J., Mathur J., Operation and control of wind energy converters, in: Proceedings of the Introduction to Wind Energy Systems Anonymous, Springer, 2018, pp. 63–74, DOI: 10.1007/978-3-642-32976-0_6.
- [36] Apata O., Oyedokun D. T.O., An overview of control techniques for wind turbine systems, *Scientific African* 10 (2020), pp. 13., <https://doi.org/10.1016/j.sciaf.2020.e00566>
- [37] Babu B., Dvya S., "Comparative study of different types of generators used in wind turbine and reactive power compensation", *Journal of Electrical and Electronics Engineering* (IOSR-JEEE), pp. 95-99, e-ISSN: 2278-1676,p-ISSN: 2320-3331, <https://iosrjournals.org/iosr-jeee/Papers/Conf.17017/Volume-2/13.%2095-99.pdf>
- [38] Kumar R., Singh S., Yadav A., et. al., Transient Analysis of Doubly Fed Induction Generator in Grid Connected Mode, 2022 IEEE 7-th International Conference for Convergence in Technology (I2CT), Mumbai, India, 2022, pp. 1-5. DOI: 10.1109/I2CT54291.2022.9824163.
- [39] Buhagiar D., Sant T., Farrugia R.N., Farrugia D. Increasing the Value of Offshore Wind by Integrating On-Board Energy Storage, Journal of Physics: Conference Series, Volume 1222, WindEurope Conference and Exhibition 2019, pp. 10. DOI 10.1088/1742-6596/1222/1/012038.
- [40] Heredia J.F., Cuadrado M. D. , Corchero C., "On optimal participation in the electricity markets of wind power plants with battery energy storage systems," *Computers & Operations Research*, vol. 96, 2018, pp. 316-329, DOI: 10.1016/j.cor.2018.03.004.
- [41] Fotău D., Păsculescu D., Fotău I., Păsculescu V.M., Calitate și Fiabilitate, Editura Universitas, Petroșani, 2020, p. 95, ISBN: 978-973-741-620-9.
- [42] <https://www.ttonline.ro/revista/energie/turbine-eoliene-variante-constructive-si-particularitati>
- [43] Pedersen T.F., Demurtas G. and Zahle F., " Calibration of a spinner anemometer for yaw misalignment measurements", *Wind Energy*, nr. 18, 2015, pp.:1933–1952, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/we.1798>
- [44] Leithead, W. E., de la Salle, Reardon D., Role and Objectives of Control for Wind Turbines, IEE Proceedings C (Generation, Transmission and Distribution), Volume 138, Issue 2, p. 135 –148, DOI: 10.1049/ip-c.1991.0017.
- [45] Panait P.G., Panaitescu M. , Panaitescu F.V., Scupi A.A., "Considerations for Increasing the Durability of the Main Shafts Bearings of Wind Turbine", ATOM-N 2022 Proceedings SPIE vol. 12493 Advanced Topics in Optoelectronics, Microelectronics and Nanotechnologies, 2022, Constanța, 2023, pp.10. Proc. SPIE 12493, DOI: [10.1117/12.2642084](https://doi.org/10.1117/12.2642084)
- [46] Moghimi A., Aliabadi M. H., Farahani H.F., "Triple-speed coaxial magnetic gear for wind turbine applications: introduction and comprehensive analysis", *COMPEL - The international Journal for computation and mathematics in electrical and electronic engineering*, vol. 41 Issue 4, 2022, pp. 1223-1244, ISSN: 0332-1649.
- [47] Papoutsidakis M., Piromalis D., Symeonaki D.E., Chatzopoulos A., "The Use of Automation Applications for Efficient Braking of Modern Wind Turbines", *International Journal of Engineering Science Invention* (IJESI), vol. 7 Issue 10, 2018, pp. 10-20, ISSN 2319-6734.
- [48] Guo Y., Keller J.A., "Investigation of high-speed shaft bearing loads in wind turbine gearboxes through dynamometer testing", *Wind Energy* 21(11), 2017, pp. 139-150, DOI: 10.1088/1757-899X/295/1/012023.

- [49] Wasilczuk M. , Gawarkiewicz R., Bastian B., "Analysis of Failures of High Speed Shaft Bearing System in a Wind Turbine", IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 295, 2018, pp. 1-8, DOI: 10.1088/1757-899X/295/1/012023.
- [50] Pfaffel S., Faulstich S. Rohrig K., "Performance and Reliability of Wind Turbines: A Review", *Energies* nr. 10, 2017, pp. 1-27, DOI: 10.3390/en10111904.
- [51] Sheng S., O'Connor R., Chapter 14 - Reliability of wind turbines in Wind Energy Engineering (Second Edition), Academic Press, 2023, pp. 195-211, <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-99353-1.00016-5>
- [52] Sava N.G., Costinaș S., Ilias N., "Wind Power Plants, the main provider for renewable energy sources in Romania", *Journal of Economics and Technologies Knowledge*, vol. 1, nr. 2, 2015, pp. 66-71. https://www.researchgate.net/publication/273452735_Wind_Power_Plants_the_main_provider_for_renewable_energy_sources_in_Romania
- [53] COD TEHNIC din 11 decembrie 2008 al rețelelor electrice de distribuție, EMITENT AUTORITATEA NAȚIONALĂ DE REGLEMENTARE ÎN DOMENIUL ENERGIEI, Publicat în MONITORUL OFICIAL nr. 43 din 26 ianuarie 2009, <https://legislatie.just.ro/Public/DetaliiDocumentAfis/101622>
- [54] Ordin nr. 51/03.04.2009 ANRE pentru aprobarea normei tehnice „Condiții tehnice de racordare la rețele electrice de interes public pentru centralele electrice eoliene”, publicat în MO 06 din 11 mai 2009, modificat și completat. <https://legislatie.just.ro/Public/DetaliiDocument/105589>
- [55] Nirosha C., Patra P. S. K., "Power Quality Issues of Wind and Solar Energy Systems Integrated into the Grid", *Advance Science Letter* 26(5):514-523, , 2020, pp. 514-523, E-ISSN:1936-7317.
- [56] Chen B., Shi Y., Chen Y. A, Resilience Enhancement Model for Complex Distribution Network Coupling with Human Resources and Traffic Network, Hindawi Complexity, vol. 2021, p.18 <https://doi.org/10.1155/2021/2051719>
- [57] Fred W. , Producerea Distribuția și Regenerabile, Leonardo Energy 2006, https://www.sier.ro/Articolul_8_3_2.pdf
- [58] Manwell J. F., McGowan J. G., Rogers A. L., WIND ENERGY EXPLAINED Theory, Design and Application Second Edition, Ed. Wiley, 2009, p. 704, DOI:10.1002/9781119994367.
- [59] Tong W., Fundamentals of wind energy, Chapter 1 in Transactions on State of the Art in Science and Engineering, Vol 44, Ed. WIT Press, 2010, p. 46, DOI:10.2495/978-1-84564-205-1/01.
- [60] Gu Y., Kamel E., Tsitron I., Aginskiy M., "Design and performance study of a unique modular vertical axis wind turbine, *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, Vol 254, 2021, pp. 93-100, DOI: 10.2495/ESUS210091.
- [61] Maradin D. , Cerović L., Šegota A., "The efficiency of wind power companies in electricity generation", *Energy Strategy Reviews*, vol. 37, 2021, 100708, p.11. https://www.researchgate.net/publication/354254666_The_efficiency_of_wind_power_companies_in_electricity_generation
- [62] Shourangiz-Haghighi A., Diaz M., Zhang Y., et al. "Developing More Efficient Wind Turbines: A Survey of Control Challenges and Opportunities", *IEEE Industrial Electronics Magazine*, Volume: 14, Issue: 4, 2020, DOI: 10.1109/MIE.2020.2990353.

- [63] Thresher, R. W., and Dodge, D. M., "Trends În the Evolution of Wind Turbine Generation Configurations and Systems," *Wind Energy*, 1, pp. 70-85. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1824\(199804\)1:1<70::AID-WE2>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1824(199804)1:1<70::AID-WE2>3.0.CO;2-9)
- [64] Carlin, P. W., et al., "The History and State of the Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology," *Wind Energy*, 2003, 6, pp. 129 – 159, DOI: 10.1002/we.77.
- [65] Mircea Gogu, Curs- Conversia neconvențională a energiei electrice – energia eoliana https://mircea-gogu.ro/pdf/Curs%20Conversia%20neconventionala%20a%20energiei%20electrice/energia_eoliana.pdf
- [66] Zao X., Maißer P., A novel power splitting drive train for variable speed wind power generators, *Renewable Energy*, 28,2003, pp. 2001–2011
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0960148103001277>
- [67] Săulescu R., Neagoe M., Jaliu C., Amplificatoare de turație pentru sisteme eoliene și hidroenergetice, vol. 1 Modelarea răspunsului mecanic al sistemelor cu generator electric de curent continuu, Editura Universității Transilvania Brașov, 2018, p.169, ISBN 978-606-19-0973-5.
- [68] Săulescu R., Neagoe M., Jaliu C., Amplificatoare de turație pentru sisteme eoliene și hidroenergetice, vol. 2 Modelarea răspunsului mecanic al sistemelor cu generator electric contrarotativ, Editura Universității Transilvania Brașov, 2021, p.179, ISBN 978-606-19-1406-7.
- [69] Stanciu M.D., Tobașu M.G., "Proiectarea și construirea unei turbine eoliene cu ax orizontal de mici dimensiuni pe baza valorificării și reutilizării deșeurilor feroase", *Buletinul AGIR*, nr. 2, 2018, pp. 25-34. <https://www.agir.ro/buletine/2962.pdf>
- [70] Hernandez R.G., Ramirez R.G., " Modeling a Wind Turbine Synchronous Generator", *International Journal of Energy and Power (IJEP)* Volume 2 Issue 3, 2013, pp. 64-70, https://www.researchgate.net/publication/313970140_Modeling_a_Wind_Turbine_Synchronous_Generator
- [71] <http://www.electricalc.ro/blog/37-masina-asincrona>
- [72] Nedelcu V., Mașini electrice, Editura Didactică și Pedagogică, București, 1968, p. 384.
- [73] Dumitrescu I.I., Călușanu D., Heler A., et. al., Electrotehnică și mașini electrice, Editura Didactică și Pedagogică, 1983, p. 376.
- [74] Piroi I., Mașini Electrice, Editura Eftimie Murgu, 2009, p. 381, ISBN: 9789731906232.
- [75] Dordea T., Mașini electrice - Construcție, Editura ASAB, București, 2003, p. 398, ISBN 973-86010-3-7.
- [76] Cioc I., Nica C., Proiectarea mașinilor electrice, Editura Didactică și Pedagogică R.A. București 1994, p. 1098, ISBN:973-30-2937-8.
- [77] Dordea T., Mașini electrice- Teorie Editura ASAB, București, 2002, p. 634, ISBN 973-86010-0-2.
- [78] Cioc I., Bichir N., Cristea N– Mașini electrice, Îndrumar de proiectare. Vol. I, II, III. - Ed. Scrisul Românesc , Craiova, 1981.
- [79] http://euedia.tuiasi.ro/uee/uee_files/Lucrarea%2014.pdf
- [80] Mașini electrice sincrone și mașini electrice cu contacte alunecătoare, L@bsoft Multimedia Learning Environment - Version 6.05 - LUCAS NULLE GmbH 2000-2011.

- [81] Cernat M., Bidian D., Marinescu, C., Mașini și aparate electrice – Vol. II. Brașov, Editura Universității Transilvania din Brașov, 1998, p. 273, ISBN: 9739879683.
- [82] Teodoru, E.C., Gogu, M., Mașini electrice, Ed. Universității Tehnice Gh.Asachi , Iasi, 2000, p. 492, <https://www.worldcat.org/oclc/1346665815>
- [83] Ghiță, C., Mașini electrice, Ed. Matrix Rom, București, 2005, p. 313, ISBN: 9736859193.
- [84] Comănescu G., Costinaș S., Iordache M., Partea electrică a centralelor și stațiilor, Ed. Printech, București, 2001, p. 209, ISBN 9736523934.
- [85] Negrea I., Studiul adaptabilității turbinelor eoliene de mică putere la condițiile climatice din România”, Rezumat Teză de Doctorat, Universitatea Transilvania din Brașov, 2010, p. 61. <http://rs.unitbv.ro/teze/rezume/2010/rom/Negrealonela.pdf>
- [86] Apetrei C., Dogaru M., Regimuri speciale de funcționare ale mașinii sincrone, Editura Electra, București, 2002, p. 150, ISBN: 973-8067-71-5.
- [87] Cristea C. , Stroe I., The study of the synchronous motor, Bulletin of the Transilvania University of Brașov Vol. 10 (59) No. 2- 2017, Series I: Engineering Sciences, pp. 31-38, ISSN (Online): 2971-9364, https://webbut.unitbv.ro/index.php/Series_I/article/view/2811
- [88] Paraschiv I., Vencilă, I., Costin M, Mașini Electrice - lucrări practice de laborator, Galați University Press (GUP), 2020, p. 126, ISBN: 9786066961998.
- [89] Cristea C, Stroe I., Study of the mechanical and electrical characteristics of the synchronous motor with varying resistive torque, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 568 (2019) 012011, p. 1-6 DOI10.1088/1757-899X/568/1/012035 <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/568/1/012035>
- [90] Cristea C., Stroe I., Modeling the mechanical and electrical characteristics of the synchronous motor for different variations of torque in time, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 568 (2019) 012011, pp. 1-6, DOI 10.1088/1757-899X/568/1/012011. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/568/1/012011>
- [91] Cristea C., Stroe I., Modeling the mechanical and electrical characteristics of the synchronous motor, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 514 (2019) 514 012022, pp. 1-6, DOI 10.1088/1757-899X/514/1/012022. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/514/1/012022>

DECLARAȚIE DE AUTENTICITATE

Subsemnații:

Ing. Cristea Cosmin Florian
(nume și prenume doctorand)

în calitate de

student - doctorand al IOSUD:

Universitatea Transilvania din Braşov
(denumire IOSUD)

autor al tezei de doctorat cu titlul:

**CERCETĂRI TEORETICE ȘI EXPERIMENTALE PRIVIND COMPORTAMENTUL DINAMIC AL SISTEMULUI
MECANIC ÎN RAPORT CU CEL ELECTRIC AL MAȘINII SINCRONE ÎN APLICAȚIILE EOLIENE**
(titlul tezei de doctorat)

și

Prof.Univ.Dr.Ing. Stroe Ioan
(nume și prenume conducător doctorat)

în calitate de Conducător de doctorat al autorului tezei

la instituția

Universitatea Transilvania din Braşov
(denumire instituție)

declarăm pe proprie răspundere că am luat la cunoștință de prevederile art.143 alin (4) și (5)* și art. 170** din Legea educației naționale nr.1/2011, ale art. 65, alin.5 – 7***, art. 66, alin (2)**** din Hotărârea Guvernului nr.681/2011, privind aprobarea Codului Studiilor universitare de doctorat, ale art. I alin. (5) și (7) ***** din Hotărârea nr. 134 privind modificarea Codului studiilor universitare de doctorat, aprobat prin HG nr. 681/2011 și ale Anexei nr. 2 (Soluționarea sesizărilor cu privire la nerespectarea standardelor de calitate sau de etică profesională, inclusiv cu privire la existența plagiatului, în cadrul unei teze de doctorat) din Ordinul MENCS nr. 3482/2016 privind aprobarea Regulamentului de organizare și funcționare a Consiliului Național de Atestare a Titlurilor, Diplomelor și Certificatelor Universitare (CNATDCU) și ne asumăm consecințele nerespectării acestora.

Semnătură

Student doctorand



Semnătură

Conducător de doctorat



*(4) îndrumatorii lucrărilor de licenţă, de diplomă, de disertaţie, de doctorat răspund solidar cu autorii acestora de asigurarea originalităţii conţinutului acestora

(5) este interzisă comercializarea de lucrări ştiinţifice în vederea facilitării falsificării de către cumpărător a calităţii de autor al unei lucrări de licenţă, de diplomă, de disertaţie sau de doctorat.

** (1) În cazul nerespectării standardelor de calitate sau de etică profesională, se aplică prevederile Hotărârii nr. 134 privind modificarea Codului studiilor universitare de doctorat, aprobat prin HG nr. 681/2011.

(2) Reacreditarea şcolii doctorale se poate obţine după cel puţin 5 ani de la pierderea acestei calităţi, numai în urma reluării procesului de acreditare, conform art. 158.

(3) Redobândirea calităţii de conducător de doctorat se poate obţine după cel puţin 5 ani de la pierderea acestei calităţi, la propunerea IOSUD, pe baza unui raport de evaluare internă, ale cărei aprecieri sunt validate printr-o evaluare externă efectuată de CNATDCU. Rezultatele pozitive ale acestor proceduri sunt condiţii necesare pentru aprobare din partea Ministerului Educaţiei, Cercetării, Tineretului şi Sportului.

(4) Conducătorii de doctorat sunt evaluaţi o dată la 5 ani. Procedurile de evaluare sunt stabilite de Ministerul Educaţiei, Cercetării, Tineretului şi Sportului, la propunerea CNATDCU.

*** (5) teza de doctorat este o lucrare originală, fiind obligatorie menţionarea sursei pentru orice material preluat.

(6) studentul - doctorand este autorul tezei de doctorat şi îşi asumă corectitudinea datelor şi informaţiilor prezentate în teză, precum şi a opiniilor şi demonstraţiilor exprimate în teză

(7) conducătorul de doctorat răspunde împreună cu autorul tezei de respectarea standardelor de calitate sau de etică profesională, inclusiv de asigurarea originalităţii conţinutului, conform art. 170 din Legea nr. 1/2011.

**** protecţia drepturilor de proprietate intelectuală asupra tezei de doctorat se asigură în conformitate cu prevederile legii.

***** (5) (6) În cazul în care membrii CNATDCU din cadrul unei comisii de evaluare a unei teze de doctorat constată nerespectarea standardelor de etică profesională, inclusiv existenţa plagiatului, în cadrul tezei şi/sau al activităţilor care au dus la realizarea acesteia, aceştia invalidează teza de doctorat, comunică aceste constatări celorlalţi membri ai comisiei de evaluare şi sesizează Consiliul general CNATDCU pentru analiza responsabilităţii conducătorului de doctorat sau a şcolii doctorale şi pentru aplicarea prevederilor art. 69 alin. (5).

(7) (3) În termenul prevăzut la alin. (2), Consiliul general al CNATDCU solicită IOSUD punctul de vedere care trebuie formulat în termen de maximum 30 de zile de la primirea solicitării. În situaţia în care IOSUD confirmă încălcarea standardelor de calitate sau de etică profesională, va transmite CNATDCU decizia privind propunerea de retragere a titlului, semnată de rector sau, după caz, de preşedintele Academiei Române, avizată din punct de vedere juridic de universitate sau, după caz, de Academia Română.

(4) În termenul prevăzut la alin. (2), Consiliul general al CNATDCU decide dacă au fost sau nu respectate standardele de calitate sau de etică profesională, inclusiv existenţa plagiatului, iar preşedintele CNATDCU transmite autorului sesizării, autorului tezei şi IOSUD decizia Consiliului general al CNATDCU şi motivarea acesteia. Aceştia au la dispoziţie 10 zile pentru formularea unei contestaţii

privitoare la procedură, iar Consiliul general al CNATDCU are la dispoziție 10 zile pentru formularea răspunsului la contestație.

(5) În cazul în care Consiliul general al CNATDCU decide că nu au fost respectate standardele de calitate sau de etică profesională, inclusiv în ceea ce privește plagiatul, președintele CNATDCU propune Ministerului Educației Naționale și Cercetării Științifice una sau mai multe din următoarele măsuri:

- a) retragerea calității de conducător de doctorat;
- b) retragerea titlului de doctor;
- c) retragerea acreditării școlii doctorale.