

# COMPORTAREA GENERATORULUI SINCRON LA VARIAȚII IMPUSE DE CUPLU LA ARBORELE MOTOR

Dr. Ing. Cosmin CRISTEA <sup>1</sup>, Prof. Univ. Dr. Ing. Ioan STROE <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Colegiul Tehnic Energic Remus Răduleț, Brașov, România,

<sup>2</sup> Universitatea „Transilvania”, Brașov, România

**REZUMAT.** Lucrarea prezintă caracteristicile mecanice și electrice ale generatorului sincron pentru variații impuse de cuplu la arborele motor. Este prezentată configurația de testare, utilizată pentru a determina caracteristicile electrice și mecanice ale generatorului sincron. Modelarea cuplului motor permite încărcarea arborelui cu valori variabile impuse ale cuplului rezistent. Caracteristicile prezentate arată comportarea mecanică a generatorului sincron, prezentate pe baza variației cuplului rezistent timp de 40 de secunde, urmărind influența curentului de excitație aplicat înfășurării rotorului generatorului sincron.

**Cuvinte cheie:** mașina sincronă, generator, caracteristici mecanice și electrice.

**ABSTRACT.** The work presents the mechanical and electrical characteristics of the synchronous generator for torque variations imposed at the motor shaft. The test configuration, used to determine the electrical and mechanical characteristics of the synchronous generator, is shown. Motor torque modelling allows the shaft to be loaded with imposed variable resistance torque values. The presented characteristics show the mechanical behavior of the synchronous generator, presented on the basis of the variation of resistant torque for 40 seconds, following the influence of the excitation current applied to the rotor winding of the synchronous generator.

**Keywords:** synchronous machine, generator, mechanical and electrical characteristics.

## 1. INTRODUCERE

Mașina sincronă în construcție directă are câmpul magnetic inductor produs cu curent continuu. Dacă  $n_1$  este turația rotorului, atunci frecvența tensiunii induse este  $f=pn_1$ . Curenții electrici alternativi din înfășurări, în regim staționar au aceeași frecvență ca și tensiunile induse. La mașinile polifazate simetrice, curenții alternativi produc un câmp circular, care se rotește față de înfășurările respective cu turația  $n_1=f_1/p$ , numit câmpul magnetic al indusului. În mașină are loc o interacțiune continuă, utilizabilă din punct de vedere practic, atunci când cele două câmpuri magnetice se găesc în repaus relativ, situație specifică regimului staționar. La o frecvență  $f_1$  turația rotorului este egală cu turația  $n_1$  a câmpului magnetic învârtitor. Rotorul se rotește în sincronism, de unde și denumirea de mașină sincronă.

Înfășurarea prin care trece curentul continuu, înfășurarea inductoare, se numește și înfășurare de excitație, iar curentul, curent de excitație [1].

Mașinile sincrone pot funcționa în două regimuri datorită construcției: generator și motor. În regim de motor, mașina transformă puterea electrică, primită de

la o rețea de curent alternativ trifazat, în putere mecanică, necesară unei transmisii mecanice. În regim de generator, mașina transformă puterea mecanică, primită la arbore de la o mașină de antrenare sau de la o turbină, în putere electrică, care apoi este livrată într-o rețea de curent alternativ [2].

Principalul impediment întâlnit la motorul sincron este acela că el produce cuplu electromagnetic doar la viteza de sincronism, mai mult are o caracteristică mecanică rigidă până când cuplul rezistent atinge valoarea maximă a cuplului electromagnetic, moment în care motorul iese din sincronism [3].

În majoritatea cazurilor, se folosesc generatoare sincrone pentru producerea curentului alternativ trifazat. Aceste generatoare au înfășurarea statorică conectată în conexiune stea, legată la o rețea de curent alternativ trifazat, în timp ce înfășurarea rotorică este alimentată în curent continuu. Producerea energiei electrice se poate realiza prin intermediul turbogeneratoarelor, hidrogeneratoarelor respectiv a turbinelor eoliene [4].

În lucrare se prezintă determinări experimentale ale generatorului sincron:  $I$ ,  $U$ ,  $P_2$ ,  $M$ ,  $n=f(t)$ , pentru un curent de excitație de  $I_{e\pi}=2.5A$  și  $I_{e\pi}=3A$ .

## 2. GENERATORUL SINCRON

Generatorul sincron trifazat prezintă caracteristici extrem de convenabile pentru producerea energiei electrice de curent alternativ și reprezintă unica soluție general acceptată de constructorii de centrale electrice și de sisteme electroenergetice.

Are aceeași construcție ca și generatorul de curent alternativ monofazat, numai că pe stator are dispuse trei înfășurări de ieșire, cu parametrii identici, decalate spațial una față de alta cu câte  $120^\circ$ .

Ca urmare, cutia cu borne a unei astfel de mașini electrice va avea de regulă opt borne, dintre care: două pentru tensiunea de excitație și șase pentru înfășurările de ieșire.

Înfășurările statorice sunt notate cu  $U_1-U_2$ ,  $V_1-V_2$ ,  $W_1-W_2$ , în timp ce înfășurarea rotorică este notată cu  $K-M$  [5].

### 2.1. Caracteristicile mecanice și electrice ale generatorului sincron

Pentru ridicarea caracteristicilor mecanice și electrice în funcție de cupluri impuse la arborele 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 c.c. 0-30V, 5A;
  6. Multimetric analog/digital, voltmetru, cosfimetru, multimetric trifazat;
  7. Comutator tripolar cu două poziții;
  8. Dispozitiv de măsurare trifazat;
  9. Reostat de sarcină;
  10. Controler servomotor.
- Echipamente sunt configurate în Fig.1.

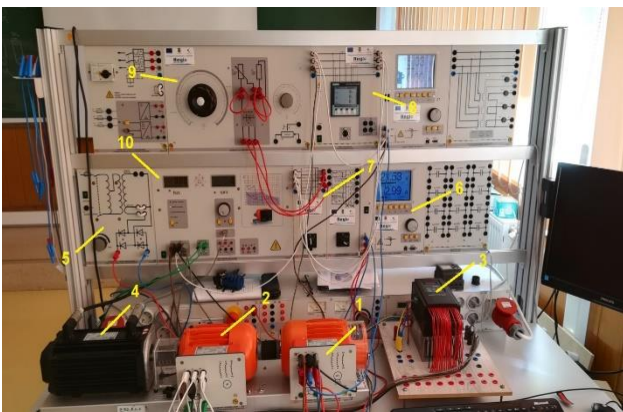


Fig. 1. Stand pentru determinarea caracteristicilor generatorului sincron.

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. Multimetricul 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 invertorul 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). Parametrii de ieșire sunt afișați cu dispozitivul de măsurare trifazat (8).

### 2.2. Modelarea momentului motor pentru determinarea caracteristicilor

*Servomotorul*, utilizat la determinarea valorilor experimentale face parte dintr-un sistem compus din: servomotor cu frână, controler digital, și software dedicat: ActiveServo. Sistemul permite controlul cuplului motoarelor electrice în puncte și grafice predefinite, afișarea valorilor nominale în diagrame de timp, precum și sincronizarea generatoarelor. Sistemul este prezentat mai detaliat în [3].

## 3. 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 Fig.1, în care s-a considerat că pe circuitul de ieșire există mai multe încărcări rezistive pornind de la  $2\text{ k}\Omega$  până la  $1\text{ k}\Omega$ . 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 parametrii 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 1 – 5.

Tabelul 1. Parametri mecanici și electrice obținuți pentru  $U_e = 300V$

$R_s$ [ $\Omega$ ]	$I_{e_{rr}}$ [A]	$U_e$ [V]	$M_n$ [Nm]
$R=inf$	1,26	300	0,27
$R=2\text{ k}\Omega$	1,56	300	0,78
$R=1,5\text{ k}\Omega$	1,79	300	1,02
$R=1\text{ k}\Omega$	2,02	300	1,27

Tabelul 2. Parametri mecanici și electrice obținuți pentru  $U_e = 325V$

$R_s$ [ $\Omega$ ]	$I_{e_{rr}}$ [A]	$U_e$ [V]	$M_n$ [Nm]
$R=inf$	1,52	325	0,29
$R=2\text{ k}\Omega$	1,94	325	0,92
$R=1,5\text{ k}\Omega$	1,99	325	1,11
$R=1\text{ k}\Omega$	2,32	325	1,46

Tabelul 3. Parametri mecanici și electrice obținuți pentru  $U_e = 350V$

$R_s$ [ $\Omega$ ]	$I_{e_{rr}}$ [A]	$U_e$ [V]	$M_n$ [Nm]
$R=inf$	1,87	350	0,3
$R=2\text{ k}\Omega$	2,43	350	1,04
$R=1,5\text{ k}\Omega$	2,41	350	1,26
$R=1\text{ k}\Omega$	3,05	350	1,75

Tabelul 4. Parametri mecanici și electrice obținuți pentru  $U_e = 375V$

$R_s$ [ $\Omega$ ]	$I_{e_{rr}}$ [A]	$U_e$ [V]	$M_n$ [Nm]
$R=inf$	2,14	375	0,32
$R=2\text{ k}\Omega$	2,93	375	1,14
$R=1,5\text{ k}\Omega$	2,98	375	1,4
$R=1\text{ k}\Omega$	3,67	375	1,92

Tabelul 5. Parametri mecanici și electrice obținuți pentru  $U_e = 400V$

$R_s$ [ $\Omega$ ]	$I_{e_{rr}}$ [A]	$U_e$ [V]	$M_n$ [Nm]
$R=inf$	2,74	400	0,34
$R=2\text{ k}\Omega$	4,15	400	1,33
$R=1,5\text{ k}\Omega$	3,81	400	1,56
$R=1\text{ k}\Omega$	4,69	400	2,13

Din analiza datelor rezultate s-au obținut următoarele caracteristici:

- $I_{e_{rr}}=f(M)$ , pentru valori ale rezistenței de sarcină în Fig.1.
- $I_{e_{rr}}=f(M)$ , pentru valori ale tensiunii de ieșire în Fig.2.

Analizând caracteristicile prezentate în Fig.2 și Fig.3 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 caracteristici ale curentului de excitație, în funcție de cuplul impus.

Astfel în Fig.2. 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.

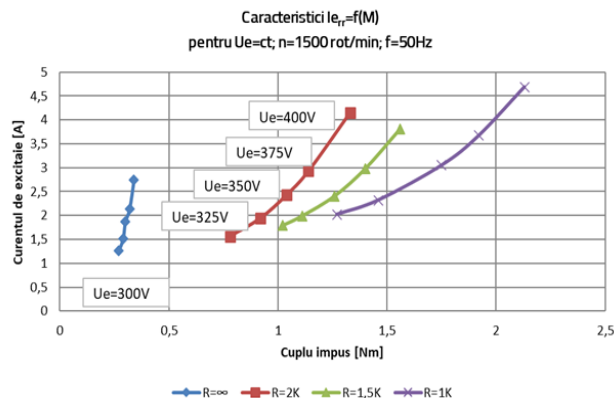


Fig. 2. Caracteristici obținute  $I_{e_{rr}}=f(M)$  pentru  $U_e=ct$ ;  $n=1500\text{ rot/min}$ ;  $f=50\text{Hz}$ .

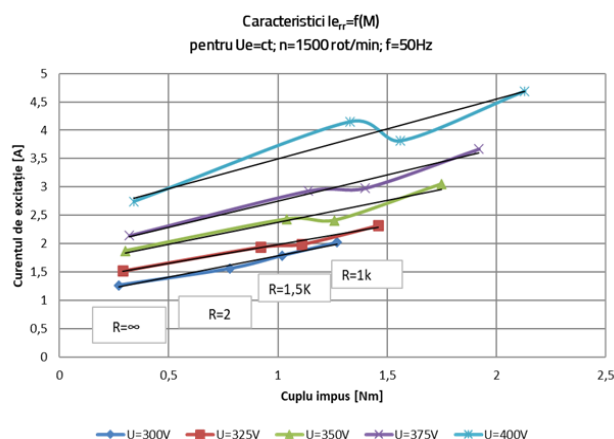


Fig. 3. Caracteristici obținute  $I_{e_{rr}}=f(M)$  pentru  $U_e=ct$ ;  $n=1500\text{ rot/min}$ ;  $f=50\text{Hz}$ .

În Fig. 3. 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.

#### 4. CARACTERISTICI MECANICE ȘI ELECTRICE LA VARIATII CRESCĂTOARE IMPUSE ALE CUPLULUI MOTOR

Pentru determinările experimentale, efectuate în vederea studiului caracteristicilor, s-a folosit un motor sincron cu următoarele caracteristici:  $P_n=0.27\text{kW}$ ,  $I_n=1.5\text{A}$ ,  $f=50\text{Hz}$ ,  $n=1500\text{rot/min}$ ,  $U_{e_{rr}}=20\text{Vcc}$ ;

## COMPORTAREA GENERATORULUI SINCRON LA VARIĂȚII IMPUSE DE CUPLU LA ARBORELE MOTOR

$I_{e_{rr}}=4A$ . Sursa de excitație a generat o tensiune de 20Vcc la un curent de excitație de 2.5A și 3A.

Studiile în domeniul mașinilor sincrone arată influența curentului de excitație asupra parametrilor de ieșire ale motorului sincron [6]. Lucrarea de față își propune să analizeze comportamentul generatorului față de variații crescătoare în trepte ale cuplului, precum și la variații cu șocuri.

Curba de cuplu aplicată generatorului sincron este prezentată în Fig.4, unde s-a considerat o caracteristică de cuplu care urmărește creșterea succesivă a cuplului la arbore în timp de 30s.

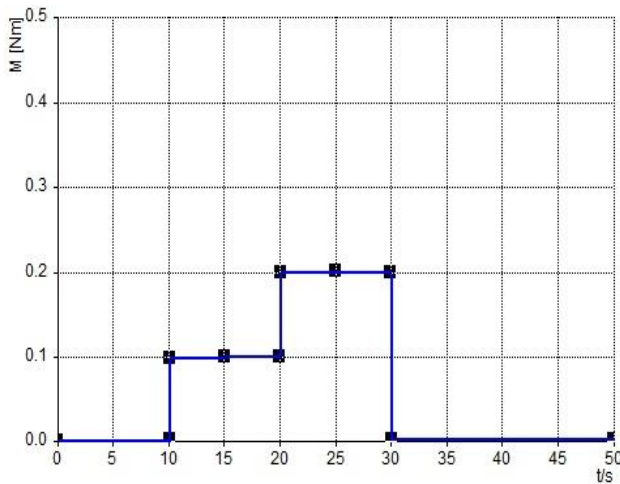


Fig. 4. Caracteristica de cuplu impusă pentru 30s.

Până la 10s motorul are un cuplu minim, după care se mărește valoarea cuplului la 0.1 Nm, după 20s se crește cuplul la valoarea de 0.2 Nm și în final revine la valoarea de început. S-a considerat că înfășurarea de excitație are o încărcare de  $I_{e_{rr}}=2.5A$ , respectiv de 3A.

În reprezentarea grafică, se observă generarea curbei de cuplu de la arborele mașinii sincrone. Puterea mecanică de la arbore  $P_2$  urmărește curba de cuplu impusă.

Turația generatorului scade până la valori de 1362rot/min, valoare suportată de sistemul de sincronizare. Tensiunea urmărește curba turației și scade până la 365.8V.

Pentru o analiză comparativă, pe același grafic de cuplu, s-au reprezentat aceleași caracteristici pentru o încărcare de  $I_{e_{rr}}=3A$  a curentului de excitație. Graficul rezultat este prezentat în Fig.6.

Din graficul prezentat în Fig.6, se observă generarea curbei de cuplu de la arborele mașinii sincrone. Puterea mecanică de la arbore  $P_2$  urmărește curba de cuplu impusă și nu diferă de valoarea curentului de excitație din înfășurarea rotorică. În schimb, se observă că turația generatorului scade mai puțin față de valoarea anterioară a curentului de excitație. Tensiunea urmărește curba turației și scade până la valori mai mari decât în reprezentarea anterioară.

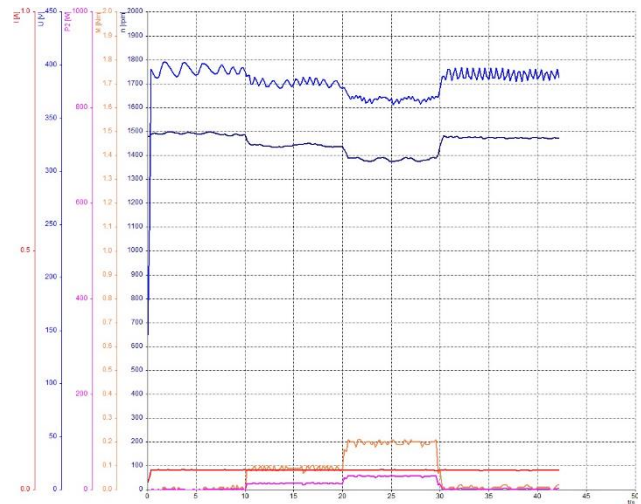


Fig.5. Caracteristici mecanice și electrice ale generatorului sincron pentru  $I_{e_{rr}}=2.5A$ .

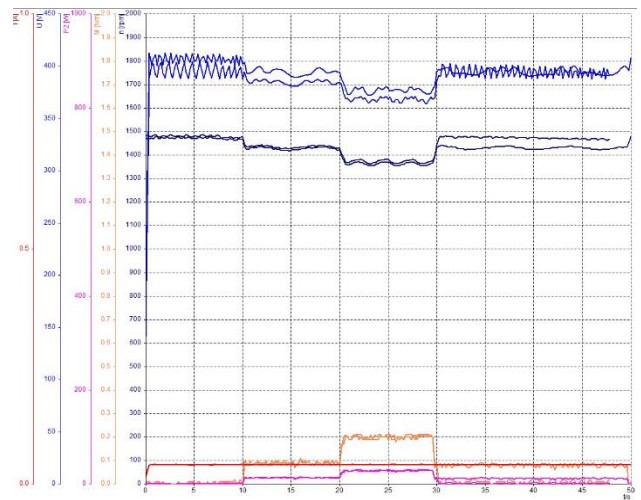


Fig.6. Caracteristici mecanice și electrice ale generatorului sincron pentru  $I_{e_{rr}}=2.5A$  și 3A.

Din analiza comparativă a acestor grafice (Fig.6), 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 va fi modificată valoarea curentului de excitație pentru a compensa cuplurile rezistente de la arborele mașinii sincrone.

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

Pentru similitudine, s-a considerat o încărcare cu cupluri variabile care au fost aplicate în studiul motorului sincron [6]. Astfel, s-a aplicat experimentului, următoarea caracteristică de cuplu prezentată în cercetarea mașinii sincrone utilizată ca motor, la Fig.7 [6].

S-au considerat două valori ale curentului excitație, de 2,5A și 3A.

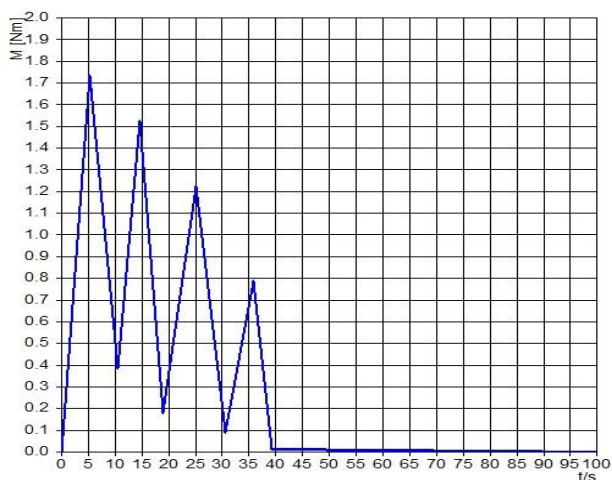


Fig.7. Caracteristica cuplu impusă arborelui generatorului

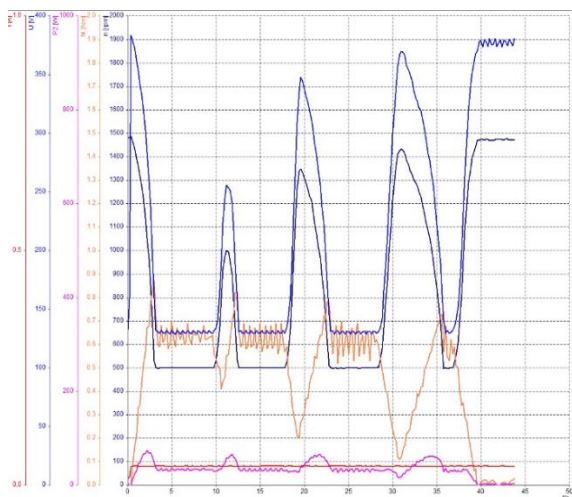


Fig.8. Caracteristici mecanice și electrice ale generatorului sincron pentru variație de cuplu impusă la  $I_{e\pi}=2,5A$

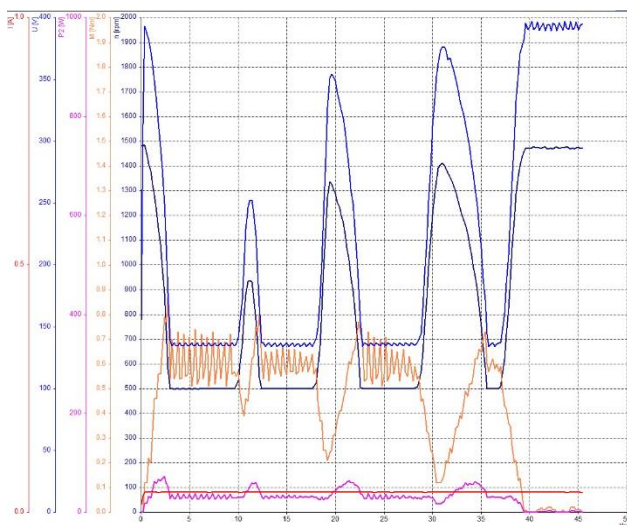


Fig.9. Caracteristici mecanice și electrice ale generatorului sincron pentru variație de cuplu impusă la  $I_{e\pi}=3A$

Aplicând caracteristica de cuplu din Fig.5 arborelui generatorului, considerând variații la arborele generatorului timp de 40s au rezultat următoarele caracteristici prezentate în Fig.6 și Fig.7 pentru două valori ale curentului de excitație, de 2.5A și 3 A.

## 5. CONCLUZII

Studiul prezintă cercetări privind mașina sincronă utilizată 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 parametrii mecanici și electrice influențați și s-au exprimat concluzii necesare în vederea trecerii la procesul de sincronizare.

Analizând caracteristica prezentată în Fig.2 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 caracteristici ale curentului de excitație, în funcție de cuplul impus.

Astfel, în Fig.2. 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 Fig.2 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.

Analizând comparativ graficele din Fig.8 și Fig.9, 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 are o variabilitate în funcție de caracteristica de cuplu. Tensiunea nominală care tinde să destabilizeze sistemul este adusă înapoi la valoarea nominală de sincronism acest lucru fiind evidențiat și în cazul cercetărilor anterioare [6] ale mașinii sincrone utilizate ca motor.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Toma, D, *Mașini electrice*, vol. 1 teorie, Editura ASAB, 2002, București, Romania.
- [2] Ghiță, C. , *Mașini electrice*, Editura Matrix Rom, 2005, București, Romania.
- [3] 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](https://webbut.unitbv.ro/index.php/Series_I/article/view/2811)
- [4] Comănescu, G, Costinaș, S, Iordache, M, *Partea electrică a centralelor și stațiilor* - Seria "Cursuri universitare 5", Universitatea Politehnică din București, Facultatea de energetică, 2005, București, România.
- [5] [http://www.euedia.tuiasi.ro/uee/uee\\_files/Lucrarea%2014.pdf](http://www.euedia.tuiasi.ro/uee/uee_files/Lucrarea%2014.pdf)
- [6] 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, DOI10.1088/1757-899X/568/1/012035, <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/568/1/012035>

---

### Despre autori

Dr. ing. **Cosmin CRISTEA**

Colegiul Tehnic Energetic Remus Răduleț, Brașov, România

Dr.ing. Cosmin CRISTEA este absolvent al Universității „Transilvania” din Brașov, Facultatea de electrotehnică – 2008, doctor inginer din anul 2023. De 25 de ani este cadru didactic la Colegiul Tehnic Energetic Remus Răduleț din Brașov. Domeniile de competență sunt: Instalații electrice, Circuite electrice, Mașini electrice, Aparate electrice, Acționări electrice și mecatronice.

Prof. univ. dr. ing. **Ioan STROE**

Universitatea „Transilvania” din Brașov, Brașov, România

Prof.univ. dr. ing. Ioan STROE este absolvent al Universității din Brașov 1979, Facultatea de Mecanică, secția Mașini și Aparate Electrice, Universitatea „Transilvania” Brașov 1990, Facultatea Tehnologia Construcțiilor de Mașini, specializare Tehnologia Construcțiilor de Mașini, doctor inginer din anul 1999, profesor la Universitatea „Transilvania” din Brașov, Facultatea Design de Produs și Mediu, conducător de doctorat în domeniul „Inginerie mecanică”, membru al Asociației Române pentru Teoria Mecanismelor și Mașinilor, membru al Asociației Române de Robotică, membru al Asociației Generale a Inginerilor din România, membru fondator al Asociației Inginerilor în domeniul Transmițiilor Mecanice. În decursul anilor a publicat numeroase lucrări științifice indexate ISI sau în baze de date internaționale, monografii și cursuri dedicate studenților, brevete de invenție. Domeniile de competență sunt: Acționarea comanda controlul sistemelor mecanice, Senzori pentru roboți industriali, Organe de mașini, Cuplaje mecanice, Tribologie, Determinarea mărimilor mecanice pe cale electrică, Încercarea și testarea produselor.