



REALIZAREA UNUI MICROMODEL PENTRU O REȚEA ELECTRICĂ DE DISTRIBUȚIE

Răzvan-Costin IUGA ¹, Ion TRIȘTIU ²

Rezumat: *Lucrarea prezintă realizarea și validarea unui micromodel la scară redusă a unei rețele electrice de distribuție, în scopul analizei regimurilor specifice de funcționare. Modelul experimental este alcătuit dintr-un generator sincron cu magneți permanenți, o stație electrică ridicătoare și respectiv coborâtore de tensiune, linii electrice aeriene și în cablu, precum și sisteme de măsurare, comandă și control. Pe baza măsurărilor experimentale au fost determinați parametrii elementelor și a fost întocmită schema echivalentă a micromodelului. Validarea micromodelului a fost realizată prin compararea rezultatelor obținute prin simulări numerice cu cele obținute prin măsurători experimentale. Rezultatele obținute confirmă capacitatea micromodelului de a simula cu acuratețe comportarea unei rețele electrice de distribuție și evidențiază potențialul utilizării conceptului de Digital Twin în modelarea sistemelor electrice de distribuție.*

Cuvinte cheie: rețea electrică de distribuție, micromodel, micronețea, Digital Twin.

1. Introducere

Rețelele electrice de distribuție reprezintă o componentă de bază a sistemelor electroenergetice, având rolul de a prelua energia electrică din rețelele electrice de transport sau direct de la sursele de generare distribuită și de a alimenta zonele de consum. În contextul tranziției energetice accelerate, caracterizată prin creșterea ponderii surselor regenerabile de energie, electrificarea transportului și digitalizarea infrastructurii energetice, rețelele electrice de distribuție se confruntă cu noi provocări tehnice și operaționale.

Necesitatea integrării eficiente a surselor de generare distribuită și a sistemelor de stocare a energiei în cadrul rețelilor de distribuție a condus la apariția conceptului de micronețea electrică. Fiind definite ca sisteme energetice locale care pot funcționa interconectat cu Sistemul Electroenergetic Național sau izolat de acesta, micronețelele oferă avantaje în ceea ce privește reziliența, eficiența energetică și calitatea energiei distribuite consumatorilor [1]. Prin capacitatea lor de a integra surse regenerabile, sisteme de stocare și sarcini controlabile, micronețelele reprezintă o platformă flexibilă pentru implementarea strategiilor avansate de management energetic [2].

Analiza și optimizarea funcționării micronețelilor impun necesitatea utilizării unor instrumente de modelare și simulare performante. În acest context, pentru modelarea și analiza funcționării în laborator a sistemelor electrice reale se pot utiliza micromodelele fizice la scară redusă [3]. Spre deosebire de simulările numerice, micromodelele oferă posibilitatea validării experimentale a modelelor matematice, a testării algoritmilor de optimizare și control, precum și a studierii diferitelor regimuri de funcționare [4].

¹ Student, anul IV, licență, Facultatea de Energetică, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București, e-mail: razvan_costin.iuga@stud.fim.upb.ro

² Prof., Facultatea de Energetică, Departamentul Sisteme Electroenergetice, Universitatea Națională de Știință și Tehnologie POLITEHNICA București, e-mail: itristiu@upb.ro

Corelarea modelului matematic, a simulărilor numerice și a platformei experimentale fizice constituie o implementare la scară redusă a conceptului de Digital Twin, concept cu aplicabilitate tot mai largă în domeniul electroenergetic [5]. Aplicat rețelelor electrice de distribuție, Digital Twin permite monitorizarea continuă a stării sistemului, identificarea regimurilor anormale de funcționare și optimizarea circulației de putere [6]. Prin complexitatea lor și prin necesitatea integrării unui număr mare de componente eterogene, microrețelele reprezintă un domeniu de aplicare deosebit de propice pentru tehnologia Digital Twin [7].

În cadrul lucrării sunt prezentate realizarea și validarea unui micromodel fizic la scară redusă a unei rețele electrice de distribuție, constituită dintr-un generator, două stații electrice de transformare, o linie electrică și consumatori. Măsurătorile experimentale realizate pe micromodel au fost validate prin rezultatele obținute prin simulări numerice și calcul analitic realizate pe baza modelului matematic al micromodelului.

2. Prezentarea rețelei electrice de distribuție

Schema de principiu a rețelei electrice de distribuție implementată în cadrul micromodelului este prezentată în figura 1. Aceasta reproduce structura unei rețele electrice trifazate de medie tensiune, alcătuită dintr-o sursă de energie electrică, o stație ridicătoare de tensiune, două variante de linii electrice (aeriane și în cablu) și o stație coborâtore de tensiune destinată alimentării utilizatorilor.

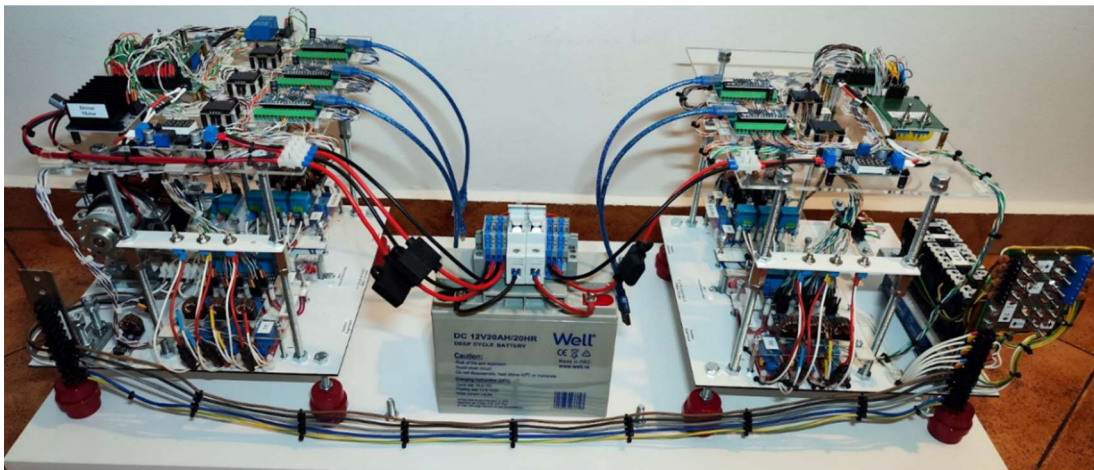
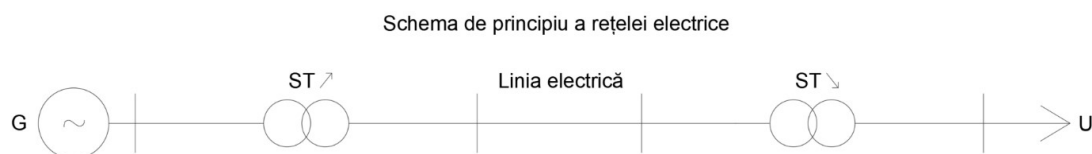


Fig. 1. Corespondența dintre elementele schemei electrice de principiu și implementarea fizică a acestora în cadrul micromodelului.

Energia electrică este produsă de un generator sincron trifazat cu magnet permanent, care furnizează la borne o tensiune de fază de aproximativ 10 V și frecvența de 50 Hz. Prin intermediul stației ridicătoare de tensiune, realizată din trei transformatoare monofazate conectate în stea, nivelul tensiunii este ridicat la aproximativ 130 V.

Legătura electrică dintre cele două stații este realizată în cadrul micromodelului prin intermediul unei linii electrice aeriene sau a unei linii electrice în cablu, selectabile prin intermediul

sistemului de comutație. Parametrii electrici ai celor două tipuri de linii au fost determinați astfel încât să reproducă, la scară, comportarea unor linii reale de distribuție, care funcționează la o tensiune nominală de 20 kV.

La capătul liniei, în stația coborâtore de tensiune, nivelul tensiunii este redus la aproximativ 7 V, valoare utilizată pentru alimentarea utilizatorului. Pentru monitorizarea regimului de funcționare, micromodelul este prevăzut cu sisteme de măsură a tensiunilor, curenților și frecvenței, precum și cu elemente de protecție, comutație și comandă specifice instalațiilor electroenergetice.

Pentru elaborarea modelului matematic al rețelei electrice, schema de principiu a fost transpusă într-o schemă electrică monofilară, prezentată în figura 2, care evidențiază toate elementele circuitului primar și conexiunile dintre acestea. Configurația constructivă a micromodelului permite integrarea ulterioară a unor celule de linie suplimentare la ieșirea din stația electrică ridicătoare, respectiv la intrarea în stația electrică coborâtore. Aceste elemente nu au fost necesare pentru obiectivele urmărite în cadrul prezentei lucrări, însă au fost prevăzute în conceptul de dezvoltare ulterioară al platformei experimentale.

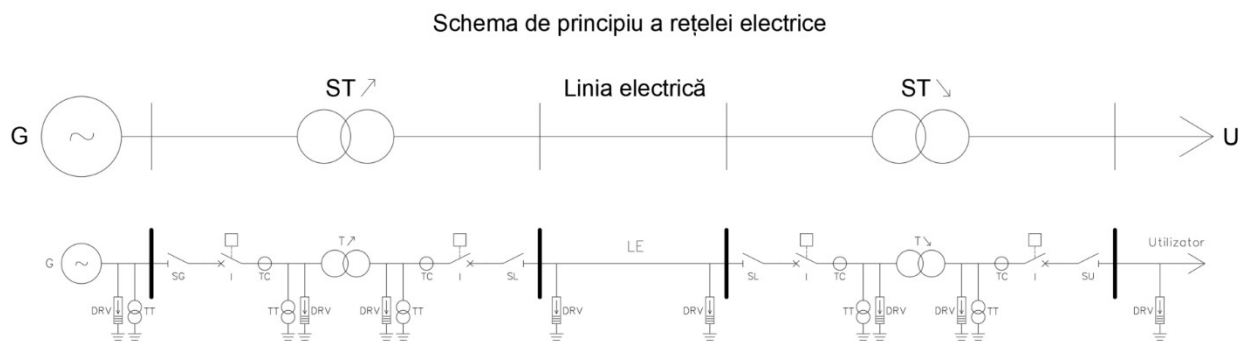


Fig. 2. Corelația dintre schema de principiu a rețelei electrice și schema electrică monofilară.

3. Realizarea practică a micromodelului

Etapile principale ale realizării generatorului sincron sunt prezentate în figura 3. Acesta a fost proiectat pentru obținerea unei tensiuni trifazate cu frecvența de 50 Hz la o viteză de rotație de 3000 rpm, rotorul fiind prevăzut cu o pereche de poli.

Axul rotorului generatorului este cuplat la arborele unui motor electric de tensiune continuă (fig. 3,a) prin piesa de cuplaj (fig. 3,b). Rotorul generatorului, având rolul de inductor, este realizat printr-un magnet permanent (fig. 3,c). Acesta are o magnetizare diametrală și are rolul de a genera câmpul magnetic necesar producerii tensiunii electromotoare în înfășurările statorice.

Elementele structurale ale generatorului au fost proiectate în mediul Blender, fiind realizate atât modelul exterior al statorului (fig. 3,d), cât și inelul de adaptare (fig. 3,f) [8]. După finalizarea modelelor tridimensionale, acestea au fost prelucrate în aplicația Creality Print pentru generarea fișierelor necesare imprimării 3D (fig. 3,e și fig. 3,g) [9].

Statorul generatorului este alcătuit din trei bobine dispuse la 120° electrice (fig. 3,h), obținându-se astfel un sistem trifazat de tensiuni. Fiecare înfășurare este realizată din conductor de cupru emailat cu diametrul de 0,3 mm și o lungime de aproximativ 160 m, corespunzătoare unui număr de 980 de spire.

Asamblarea componentelor mecanice și electrice a condus la realizarea generatorului sincron utilizat în cadrul micromodelului, prezentat în funcționare în figura 3,i.



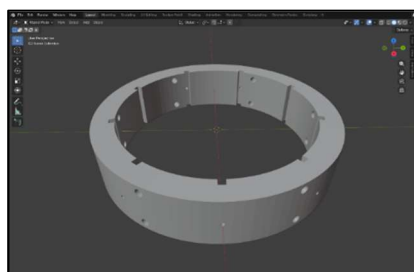
a. Motorul electric;



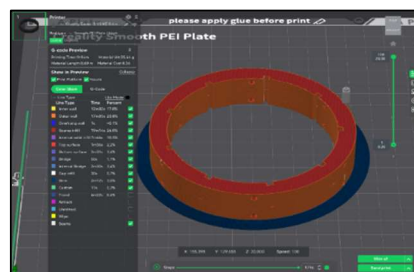
b. Piesa de cuplaj;



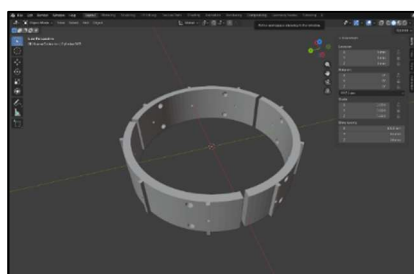
c. Magnetul permanent;



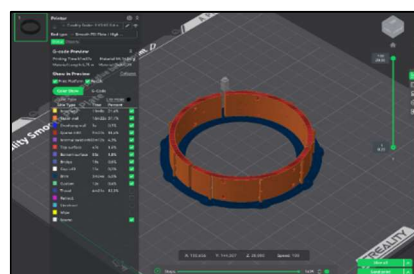
d. Exteriorul statorului modelat în Blender;



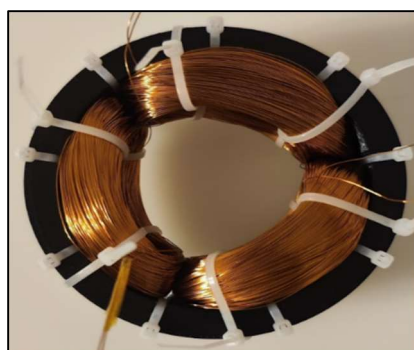
e. Exteriorul statorului în CreaLity Print;



f. Inelul de adaptare modelat în Blender;



g. Inelul de adaptare în CreaLity Print;



h. Statorul cu cele trei bobine;



i. Generatorul sincron.

Fig. 3. Etapele realizării generatorului sincron.

Stațiile electrice de transformare ridicătoare de tensiune (fig. 4) și respectiv coborâtore de tensiune (fig. 5) au fost realizate utilizând grupuri formate din câte trei transformatoare monofazate. Pentru determinarea parametrilor electrici ai transformatoarelor utilizate în cadrul micromodelului au fost efectuate încercările de regim funcționare în gol și în scurtcircuit, corespunzător rolului acestora în stația de transformare ridicătoare de tensiune, respectiv coborâtore de tensiune. Parametrii determinați au fost utilizați ulterior la dezvoltarea modelului matematic.

În fiecare dintre cele două stații electrice, pe lângă transformatoarele de putere, sunt prevăzute echipamente de măsurare, protecție și comutație. Măsurarea tensiunilor este realizată cu ajutorul traductoarelor de tensiune ZMPT101B, iar măsurarea curenților este realizată prin intermediul traductoarelor de curent ZMCT103C. Protecția la supratensiuni este asigurată prin

utilizarea unor varistoare cu oxid metalic, care îndeplinesc rolul unor descărcătoare cu rezistență variabilă. Funcția de separare este realizată prin intermediul unor comutatoare, iar funcția unui întreruptor este implementată prin asocierea unor siguranțe fuzibile cu rele. Prin intermediul acestor echipamente pot fi realizate diferite configurații de funcționare și protecție a micromodelului.

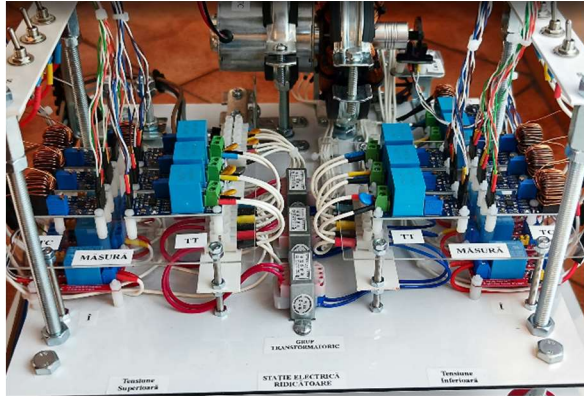


Fig. 4. Stația electrică ridicătoare de tensiune.

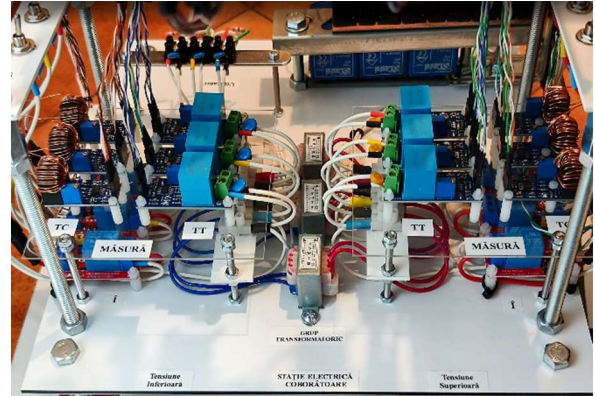


Fig. 5. Stația electrică coborătoare de tensiune.

Pentru implementarea liniei electrice în cadrul micromodelului, au fost considerate tipuri constructive existente în practică: linie electrică aeriană (LEA) realizată utilizând bobine provenite din contactoare electromagnetice și respectiv linie electrică în cablu (LEC) realizată utilizând bobine provenite din electrovalve (fig. 6). Alegerea acestor elemente a permis obținerea unor valori ale raportului dintre rezistența și reactanța longitudinală (R/X) de 1,34 pentru LEA și respectiv 3,22 pentru LEC, valori care reproduc la scară comportamentul caracteristic al liniilor electrice aeriene și al liniilor electrice în cablu din rețelele electrice de distribuție de 20 kV, echipate cu conductoare din aluminiu având secțiunea nominală de 70 mm².

Utilizatorul de energie electrică, ilustrat în figura 7, a fost realizat utilizând rezistoare care au o rezistență electrică de 390 Ω , reprezentând o sarcină rezistivă. Configurația constructivă a micromodelului permite conectarea și a altor tipuri de sarcini, atât liniare, de natură inductivă sau capacitivă, prin utilizarea bobinelor și condensatoarelor, cât și neliniare, prin intermediul unor punți redresoare.

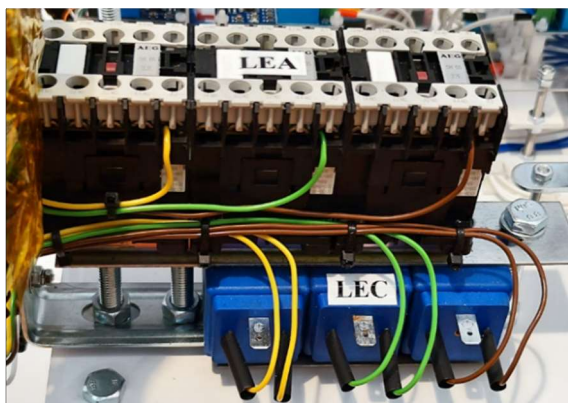


Fig. 6. Elementele care modelează liniile electrice.

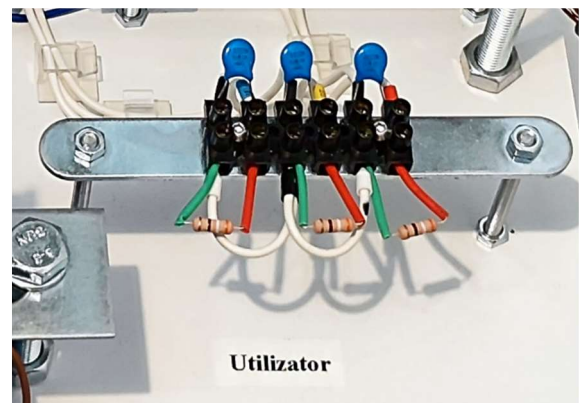


Fig. 7. Elementele care modelează utilizatorul de energie electrică.

În figura 8 este prezentată schema de comutație care permite conectarea modelului de linie aeriană, a modelului de linie electrică în cablu sau funcționarea fără linie electrică intermediară, situație în care stația ridicătoare de tensiune este conectată direct la stația coborâtore de tensiune. Prin această configurație poate fi analizată influența parametrilor longitudinali și transversali ai liniilor asupra căderilor de tensiune, a curenților și a regimului de funcționare al sistemului. Selectarea configurației de funcționare se realizează prin intermediul panoului frontal prezentat în figura 9, prevăzut cu elemente de comutație dedicate fiecărei variante de funcționare. Această soluție constructivă permite modificarea rapidă a configurației experimentale fără intervenții asupra cablajului intern al instalației, facilitând realizarea analizelor comparative între cele două tipuri de linii electrice.

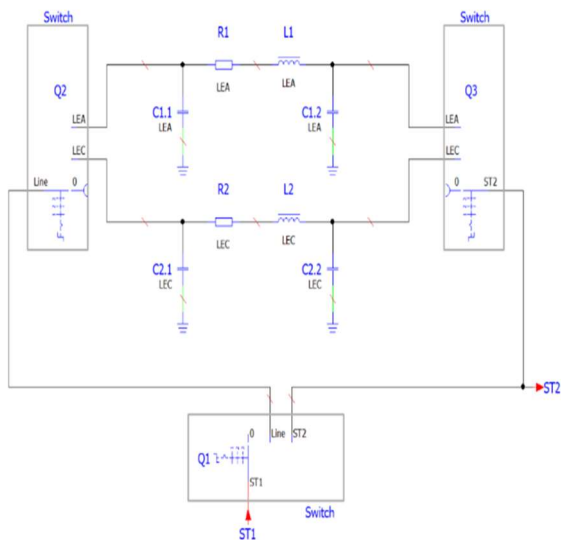


Fig. 8. Schema electrică care permite transferul energiei în stația coborâtore: direct, LEA sau LEC.

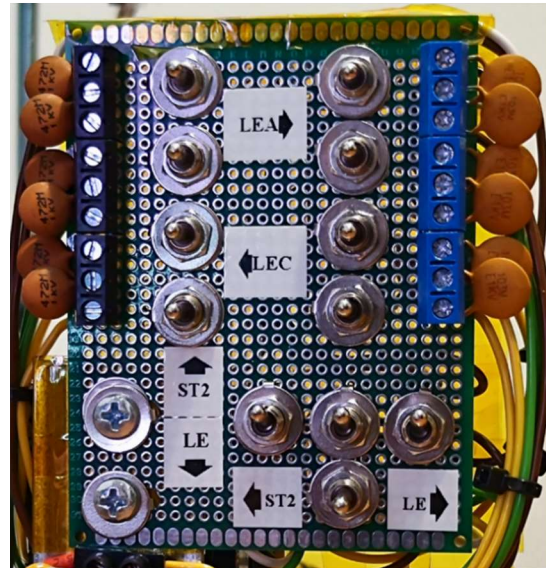


Fig. 9. Panoul de comandă pentru selectarea elementului prin care se realizează distribuția energiei electrice.

În vederea monitorizării și controlului funcționării micromodelului a fost implementat un sistem distribuit de măsurare, comandă și control bazat pe cinci microcontrolere Arduino Nano. În figura 10 este prezentată schema de automatizare pentru generatorul sincron, iar în figura 11 este prezentată schema de automatizare pentru stațiile electrice.

Controlul generatorului sincron este realizat de un microcontroler dedicat, care preia informații de la traductoarele de tensiune și de la traductorul de viteză, afișează mărimile electrice pe un display OLED și comandă sistemul de antrenare al generatorului prin intermediul unui driver motor BTS7960. Sistemul permite funcționarea atât în regim manual, prin reglarea vitezei de rotație cu ajutorul unui potențiometru, cât și în regim automat, în care frecvența sistemului este menținută în jurul valorii de 50 Hz, printr-o structură de reglare bazată pe o componentă de tip feedforward și un regulator PID pentru reglaj fin. Determinarea frecvenței este realizată prin prelucrarea semnalului de tensiune cu ajutorul unui amplificator operațional utilizat în mod de comparator.

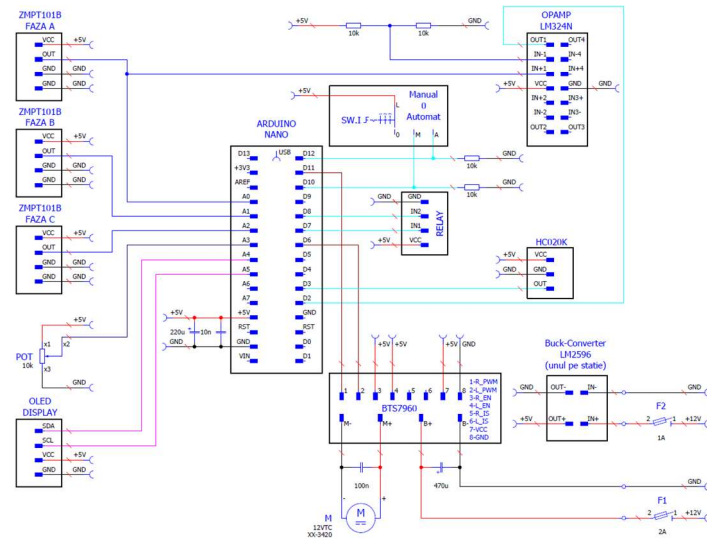


Fig. 10. Schema de automatizare pentru măsurare, comandă și control a generatorului sincron.

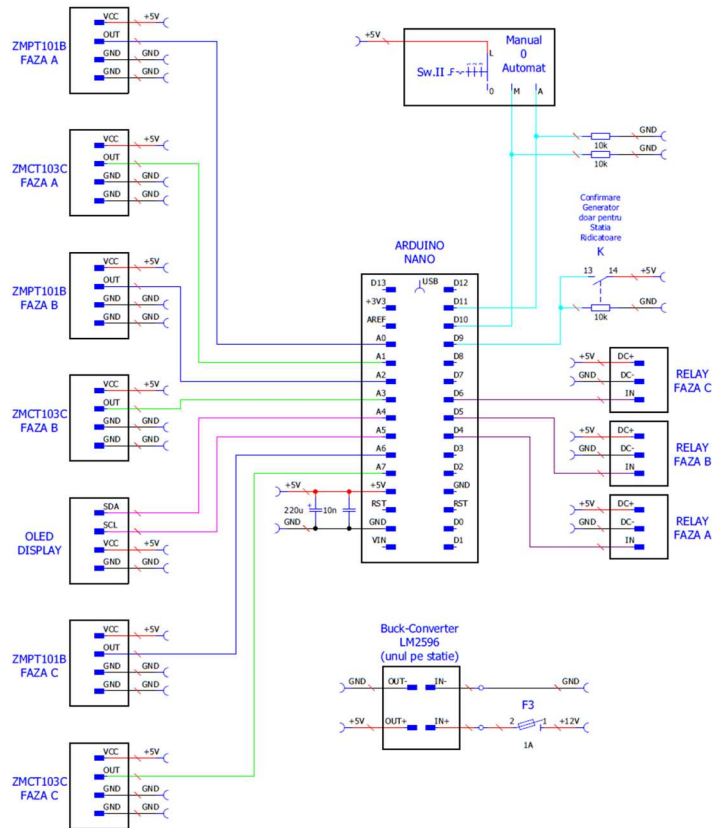


Fig. 11. Schema de automatizare pentru măsurare, comandă și control a stațiilor electrice.

Sistemul de monitorizare și protecție al micromodelului este realizat cu ajutorul a patru microcontrolere, amplasate la nivelul zonelor de tensiune inferioară și superioară ale stațiilor electrice de transformare ridicătoare și coborâtore de tensiune. Acestea efectuează achiziția mărimilor electrice de pe cele trei faze, afișarea valorilor măsurate pe display-uri OLED, implementarea funcțiilor de protecție și acționarea releelor care îndeplinesc rolul de întreruptoare.

Alimentarea sistemelor de automatizare este realizată de la o baterie cu tensiunea de 12 V, 20 Ah, prevăzută cu siguranțe fuzibile și convertoare coborâtoare de tensiune pentru circuitele electronice cu funcționare la 5 V tensiune continuă. În cadrul schemelor au fost utilizate elemente pasive suplimentare pentru filtrare și îmbunătățire a compatibilității electromagnetice a sistemului.

4. Testarea micromodelului

În prima etapă a testării micromodelului au fost verificate caracteristicile de funcționare ale generatorului sincron trifazat. În figura 12 sunt prezentate două dintre cele trei tensiuni de fază generate în înfășurările statorice. Se observă forme de undă sinusoidale cu un nivel redus al distorsiunilor, aspect favorizat de utilizarea unui magnet permanent și de absența materialelor feromagnetice în construcția generatorului.

După conectarea înfășurărilor generatorului în stea au fost monitorizate mărimile electrice de funcționare prin intermediul sistemului de măsurare, comandă și control. Rezultatele obținute sunt prezentate în figura 13. În momentul efectuării măsurării, sistemul funcționa în regim automat, iar algoritmul de reglare a intrat în etapa de reglaj fin.

Valorile afișate de sistemul de măsurare sunt în concordanță cu rezultatele obținute anterior pe osciloscop pentru înfășurările individuale ale generatorului. Diferențele observate sunt reduse și pot fi atribuite condițiilor de funcționare, procesului de măsurare și reglajului automat al vitezei. Rezultatele confirmă funcționarea corespunzătoare a generatorului sincron și a sistemului de măsurare, comandă și control asociat acestuia.

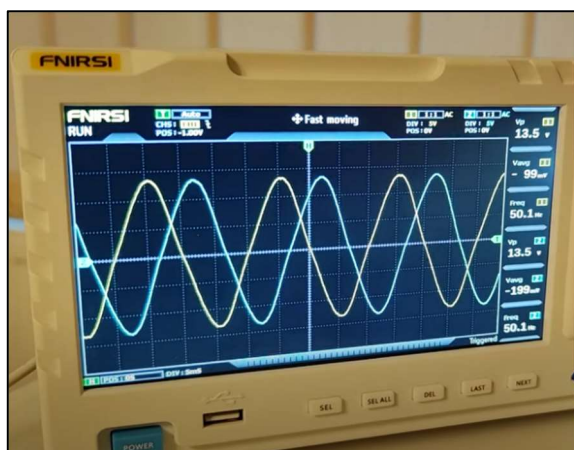


Fig. 12. Tensiunile pe două faze la bornele generatorului reprezentate pe osciloscop.

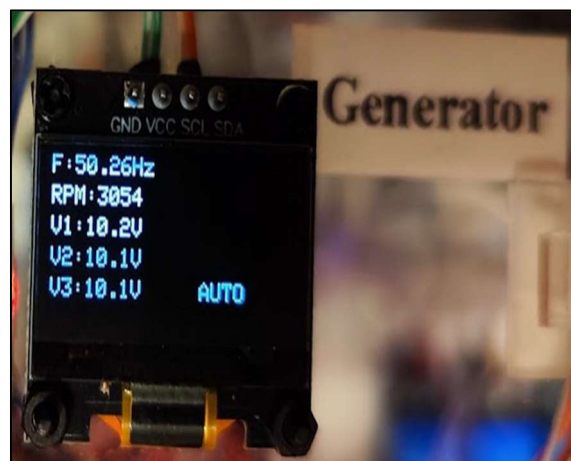
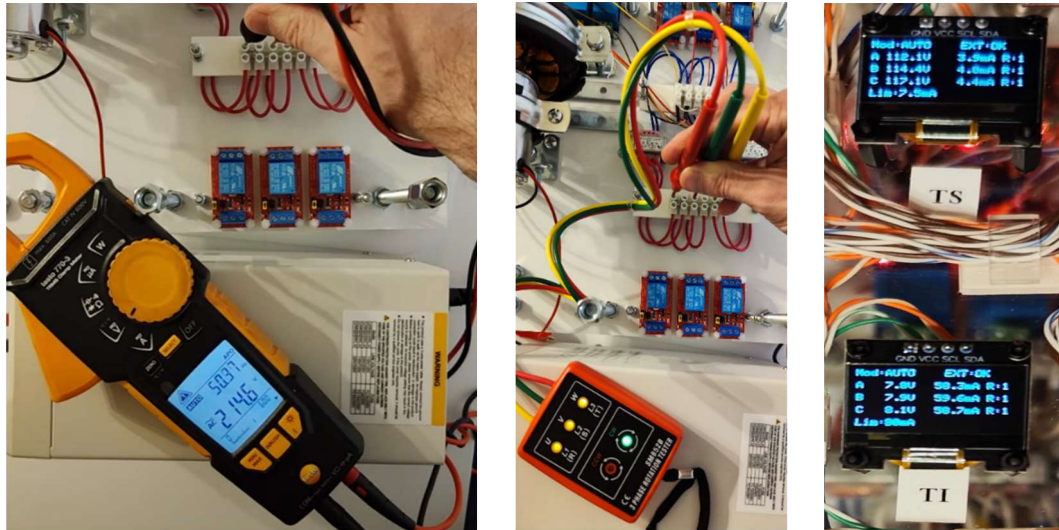


Fig. 13. Tensiunea de fază la bornele generatorului, la funcționarea în gol.

Etapa următoare a constat în verificarea funcționării generatorului sincron împreună cu transformatoarele stației electrice ridicătoare de tensiune. În figura 14,a este prezentat procesul de măsurare manuală a tensiunii de linie la ieșirea din stația ridicătoare. Între două faze a fost măsurată o tensiune de 214,6 V la o frecvență de 50,37 Hz. În vederea creșterii cuplajului magnetic dintre rotor și înfășurările statorice, a fost introdus ulterior inelul de adaptare, ceea ce a condus la creșterea tensiunii de linie la aproximativ 225 V.

În figura 14,b este prezentată verificarea succesiunii fazelor sistemului trifazat, confirmând conectarea corectă a fazelor și funcționarea corespunzătoare a generatorului împreună cu transformatoarele din stația de transformare ridicătoare de tensiune.

În figura 14,c sunt prezentate informațiile afișate de sistemele de măsură amplasate pe partea de tensiune inferioară și pe partea de tensiune superioară a stației ridicătoare. Aceste măsurări au fost realizate în etapa de testare, în diferite regimuri de încărcare, urmărindu-se verificarea funcționării sistemului de măsură, comandă și control, precum și comportarea ansamblului generator-transformatoare în prezența sarcinii electrice.



a. Tensiunea de linie

b. Succesiunea fazelor

c. OLED

Fig. 14. Măsurări electrice în stația ridicătoare de tensiune în diferite etape.

Rezultatele încercărilor efectuate au confirmat funcționarea corespunzătoare a tuturor componentelor micromodelului. Generatorul sincron, stațiile electrice, liniile electrice și sistemele de măsurare, comandă și control au funcționat conform ipotezelor inițiale, permițând utilizarea platformei experimentale pentru validarea modelului matematic și realizarea studiilor privind regimurile de funcționare ale rețelelor electrice de distribuție.

Micromodelul realizat permite efectuarea unui număr ridicat de încercări experimentale, atât în regim echilibrat, cât și în regim dezechilibrat, prin modificarea configurației rețelei și a tipului de sarcină conectată. În regim echilibrat au fost analizate configurații succesive ale sistemului, pornind de la funcționarea generatorului în gol și continuând cu conectarea stației electrice ridicătoare de tensiune, a liniei electrice, a stației electrice coborâtore de tensiune și a utilizatorului final. Pentru evidențierea influenței liniilor electrice au fost considerate variante cu linie electrică aeriană și linie electrică în cablu, fiecare analizată pentru mai multe valori ale capacității de serviciu: fără capacități conectate, cu o capacitate conectată și cu două capacități conectate.

5. Validarea modelului matematic

Validarea modelului matematic asociat micromodelului rețelei electrice de distribuție urmărește verificarea capacității acestuia de a reproduce comportarea electrică a sistemului realizat practic. În acest scop, rezultatele obținute prin calcul analitic, simulare numerică și măsurări experimentale sunt comparate pentru aceleași regimuri de funcționare. Pentru fiecare mărime analizată sunt prezentate relațiile de calcul utilizate în literatura de specialitate, urmate de aplicarea acestora asupra parametrilor micromodelului [10]:

- a) Calculul căderilor de tensiune în rețelele electrice radiale cu un singur consumator:
- Căderea de tensiune fazorială:

$$\Delta \underline{V}_{AB} = \Delta V_{AB} + j \cdot \delta V_{AB} = \frac{R \cdot P_{0B} + X \cdot Q_{0B}}{V_n} + j \frac{X \cdot P_{0B} - R \cdot Q_{0B}}{V_n} \quad (1)$$

- Căderea de tensiune algebrică:

$$DV_{AB} = \frac{R \cdot P_{0B} + X \cdot Q_{0B}}{V_n} + \frac{(X \cdot P_{0B} - R \cdot Q_{0B})^2}{2 \cdot V_n^3} \quad (2)$$

- b) Calculul pierderilor de putere în liniile electrice:
- Calculul pierderilor de putere în impedența liniei:

$$\Delta \underline{S}_Z = \Delta P_R - j \cdot \Delta Q_X = \frac{P^2 + Q^2}{V^2} \cdot R_L - j \frac{P^2 + Q^2}{V^2} \cdot X_L \quad (3)$$

- Calculul pierderilor de putere în admitanța liniei (cu mențiunea că susceptanța capacitivă B_L produce putere reactivă capacitivă):

$$\Delta \underline{S}_Y = \Delta P_G + j \cdot \Delta Q_B = V^2 \cdot \frac{G_L}{2} + j \cdot V^2 \cdot \frac{B_L}{2} \quad (4)$$

- c) Calculul pierderilor de putere într-un transformator cu două înfășurări:

$$\Delta \underline{S}_T = \Delta P_T - j \cdot \Delta Q_T = \left(\frac{P^2 + Q^2}{V^2} \cdot R_T + \Delta P_{Fe} \right) - j \left(\frac{P^2 + Q^2}{V^2} \cdot X_T + \Delta Q_\mu \right) \quad (5)$$

Analiza este realizată pe baza schemei electrice monofilare echivalente din figura 15, utilizând parametrii determinați experimental și prezentați în tabelul 1. Pentru fiecare caz studiat sunt aplicate relațiile de calcul corespunzătoare, utilizând parametrii determinați anterior, iar rezultatele obținute sunt comparate cu cele ale simulării numerice și prin măsurări experimentale.

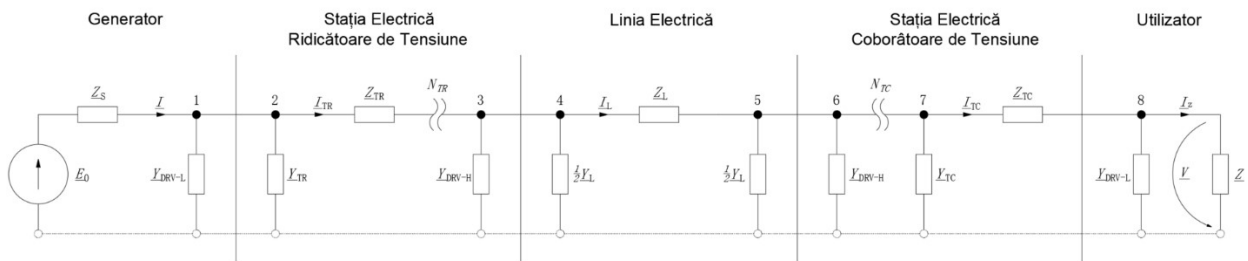


Fig. 15. Schema electrică monofilară echivalentă de calcul.

Pe baza schemei electrice monofilare echivalente și a parametrilor determinați anterior, s-a realizat calculul circulației de puteri în regim de sarcină. Pentru fiecare punct de calcul al rețelei, notat în rețea de la 1 la 8, au fost determinate valorile puterilor complexe, evidențiindu-se transferul

de putere de la sursă către utilizator și influența elementelor rețelei asupra acestuia. Rezultatele sunt sintetizate în tabelul 2.

Tabelul 1

Parametrii și mărimile electrice aferente schemei electrice monofilare echivalente de calcul	
Generator și varistoare	Utilizator
$E_0 = (10 + j \cdot 0) \text{ V}$ $Z_s = (38 + j \cdot 15,1) \Omega$ $Y_{DRV-L} = (0 + j \cdot 1,495) \mu\text{S}$ $Y_{DRV-H} = (2,7 + j \cdot 0,129) \mu\text{S}$	$V = (7 + j \cdot 0) \text{ V}$ $Z = (0,390 + j \cdot 0) \text{ k}\Omega$ $I_z = (17,95 + j \cdot 0) \text{ mA}$ $S = (125,6 + j \cdot 0) \text{ mVA}$
Stația electrică ridicătoare de tensiune	Stația electrică coborătoare de tensiune
$Z_{TR} = (8,131 + j \cdot 2,038) \text{ k}\Omega$ $Y_{TR} = (7,035 + j \cdot 14,55) \mu\text{S}$ $\Delta S_{TR} = (246,9 + j \cdot 580,2) \text{ mVA}$ $N_{TR} = 0,072$	$Z_{TC} = (5,174 + j \cdot 2,044) \text{ k}\Omega$ $Y_{TC} = (1,740 + j \cdot 8,317) \mu\text{S}$ $\Delta S_{TC} = (62,15 + j \cdot 339,9) \text{ mVA}$ $N_{TC} = 0,065$
Linia electrică aeriană	Linia electrică în cablu
$Z_L = (1,560 + j \cdot 1,165) \text{ k}\Omega$ $Y_L = (0 + j \cdot 2,953) \mu\text{S}$	$Z_L = (0,982 + j \cdot 0,304) \text{ k}\Omega$ $Y_L = (0 + j \cdot 6,283) \mu\text{S}$

Tabelul 2

Circulația de puteri prin elementele micromodelului pentru regimul de funcționare în sarcină		
Punct de calcul	Linia electrică aeriană	Linia electrică în cablu
1	$\underline{S}_1 = (630,7 - j \cdot 901,7) \text{ mVA}$	$\underline{S}_1 = (606,1 - j \cdot 832,6) \text{ mVA}$
2	$\underline{S}_2 = (630,7 - j \cdot 901,8) \text{ mVA}$	$\underline{S}_2 = (606,1 - j \cdot 832,7) \text{ mVA}$
3	$\underline{S}_3 = (298,2 - j \cdot 298,1) \text{ mVA}$	$\underline{S}_3 = (291,9 - j \cdot 233,6) \text{ mVA}$
4	$\underline{S}_4 = (252,5 - j \cdot 300,3) \text{ mVA}$	$\underline{S}_4 = (246,2 - j \cdot 235,8) \text{ mVA}$
5	$\underline{S}_5 = (238,2 - j \cdot 314,5) \text{ mVA}$	$\underline{S}_5 = (238,2 - j \cdot 286,4) \text{ mVA}$
6	$\underline{S}_6 = (238,2 - j \cdot 339,6) \text{ mVA}$	$\underline{S}_6 = (238,2 - j \cdot 339,6) \text{ mVA}$
7	$\underline{S}_7 = (192,5 - j \cdot 341,7) \text{ mVA}$	$\underline{S}_7 = (192,5 - j \cdot 341,7) \text{ mVA}$
8	$\underline{S}_8 = (125,6 + j \cdot 0,073) \text{ mVA}$	$\underline{S}_8 = (125,6 + j \cdot 0,073) \text{ mVA}$

Analiza valorilor prezentate evidențiază modul de distribuție a puterilor complexe de-a lungul rețelei, precum și diferențele dintre configurațiile de puteri pentru linia electrică aeriană și linia electrică în cablu. Valorile obținute permit evaluarea influenței parametrilor specifici fiecărui tip de linie asupra circulației de puteri și asupra transferului de energie către utilizator.

Rezultatele privind pierderile de putere, corespunzătoare regimului de funcționare în sarcină, sunt prezentate în tabelul 3 și evidențiază pierderi de putere mai ridicate în stația de transformare ridicătoare de tensiune comparativ cu stația de transformare coborătoare de tensiune. O posibilă explicație constă în faptul că transformatoarele utilizate provin din aplicații destinate funcționării în regim coborător de tensiune. În aceste condiții, utilizarea lor în regim ridicător de tensiune poate conduce la o exploatare mai puțin favorabilă din punct de vedere al pierderilor, aspect reflectat de valorile obținute în cadrul analizei.

Din analiza tabelului 3 se observă, de asemenea, faptul că pierderile de putere sunt mai ridicate în cazul configurației care utilizează linia electrică aeriană, comparativ cu linia electrică în cablu, aspect determinat de valorile diferite ale parametrilor electrice ai celor două tipuri de linii.

Pe baza relațiilor de calcul prezentate în modelul matematic, plecând de la rezultatele obținute anterior privind circulația de puteri, au fost evaluate căderile de tensiune corespunzătoare regimului de sarcină analizat. Rezultate obținute pentru cele două configurații ale rețelei sunt prezentate în tabelul 4.

Tabelul 3

Pierderile de putere prin elementele micromodelului pentru regimul de funcționare în sarcină

Linia electrică aeriană	Linia electrică în cablu
$\Delta S_{TR} = (332,5 - j \cdot 603,6) \text{ mVA}$	$\Delta S_{TR} = (314,2 - j \cdot 599,1) \text{ mVA}$
$\Delta S_{LE} = (14,37 - j \cdot 10,74) \text{ mVA}$	$\Delta S_{LE} = (8,065 - j \cdot 2,502) \text{ mVA}$
$\Delta S_{TC} = (66,98 - j \cdot 341,8) \text{ mVA}$	$\Delta S_{TC} = (66,98 - j \cdot 341,8) \text{ mVA}$

Tabelul 4

Căderile de tensiune la bornele elementelor micromodelului pentru regimul de funcționare în sarcină

Punct de calcul	Linia electrică aeriană	Linia electrică în cablu
	Raportare la tensiunea de referință: $V_{ref} = 130 \text{ V}$	
1-3	$\Delta V_{1-3} = (17,00 - j \cdot 13,97) \text{ V}$ $DV_{1-3} = 19,84 \text{ V}$ $DV_I = V_{ref} - DV_{1-3} = 110,1 \text{ V}$	$\Delta V_{1-3} = (15,60 - j \cdot 10,04) \text{ V}$ $DV_{1-3} = 18,03 \text{ V}$ $DV_I = V_{ref} - DV_{1-3} = 111,9 \text{ V}$
3-6	$\Delta V_{3-6} = (5,902 - j \cdot 1,938) \text{ V}$ $DV_{3-6} = 5,906 \text{ V}$ $DV_{II} = DV_I - DV_{3-6} = 104,2 \text{ V}$	$\Delta V_{3-6} = (2,595 - j \cdot 2,006) \text{ V}$ $DV_{3-6} = 2,599 \text{ V}$ $DV_{II} = DV_I - DV_{3-6} = 109,3 \text{ V}$
6-8	$\Delta V_{6-8} = (13,04 - j \cdot 10,57) \text{ V}$ $DV_{6-8} = 13,14 \text{ V}$ $DV_{III} = DV_{II} - DV_{6-8} = 91,1 \text{ V}$	$\Delta V_{6-8} = (13,04 - j \cdot 10,57) \text{ V}$ $DV_{6-8} = 13,14 \text{ V}$ $DV_{III} = DV_{II} - DV_{6-8} = 96,2 \text{ V}$

Analiza rezultatelor evidențiază faptul că valorile căderilor de tensiune sunt mai ridicate în cazul configurației care utilizează linia electrică aeriană, aspect aflat în concordanță cu nivelul superior al pierderilor de putere determinate anterior. Acest comportament confirmă influența parametrilor liniei asupra regimului de funcționare al rețelei și asupra tensiunii disponibile la utilizator.

În scopul validării suplimentare a modelului matematic, au fost realizate simulări numerice considerând schema electrică echivalentă a rețelei analizate. Deoarece valorile caracteristice micromodelului sunt de ordinul mVA și V, pentru asigurarea stabilității și acurateții calculului în mediul de simulare a fost aplicată o scalare. Astfel, nivelul de tensiune de 130 V a fost echivalat cu 13 kV, iar puterile la domeniul kVA, păstrându-se neschimbate rapoartele dintre parametrii și mărimile electrice ale modelului. În figurile 16 și 17 sunt prezentate rezultatele simulărilor numerice efectuate cu ajutorul programului profesional Neplan, dedicat analizei regimurilor de funcționare a rețelelor electrice [11].

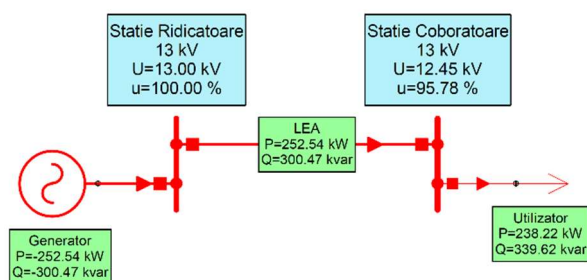


Fig. 16. Puterea tranzitată prin linia electrică aeriană și tensiunile la noduri, obținute prin simulare numerică.

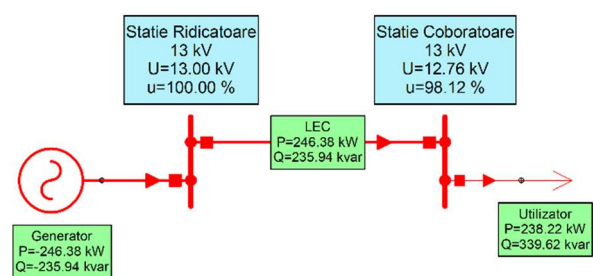


Fig. 17. Puterea tranzitată prin linia electrică în cablu și tensiunile la noduri, obținute prin simulare numerică.

Compararea rezultatelor obținute prin calculul analitic și simularea numerică evidențiază abateri reduse între cele două metode de analiză pentru calculul circulațiilor de puteri. Aceste rezultate sunt sintetizate în tabelul 5. Diferențele constatate între rezultatele analitice și cele

numerice sunt ne semnificative și pot fi atribuite erorilor de rotunjire și aproximărilor numerice specifice mediului de simulare.

Tabelul 5

Comparație privind rezultatele obținute prin calcul analitic și simulare numerică			
Linia electrică aeriană		Linia electrică în cablu	
Puterea tranzitată S_4		Puterea tranzitată S_4	
Calcul analitic [mVA]	Simulare numerică [kVA]	Calcul analitic [mVA]	Simulare numerică [kVA]
252,5 – j300,3	252,5 – j300,4	246,2 – j235,8	246,3 – j235,9

Pentru analiza influenței capacității de serviciu a liniilor electrice asupra nivelului tensiunii din rețea, au fost efectuate determinări ale căderilor de tensiune pentru diferite valori ale capacității asociate liniilor electrice. Analiza a fost realizată atât în regim de mers în gol, cât și în regim de sarcină, pentru cele două configurații ale micromodelului, respectiv linia electrică aeriană și pentru linia electrică în cablu. Rezultatele obținute sunt prezentate în tabelul 6.

Tabelul 6

Comparația privind căderile de tensiune măsurate la bornele liniei electrice (punctele 4-6) pentru regimurile de funcționare în gol și în sarcină, în funcție de capacitatea de serviciu a LEA și LEC							
Regimul de funcționare în gol				Regimul de funcționare în sarcină			
C [nF]	DV_{LEA} [V]	C [nF]	DV_{LEC} [V]	C [nF]	DV_{LEA} [V]	C [nF]	DV_{LEC} [V]
0	0,171	0	0,046	0	4,600	0	2,503
4,7	0,059	10	0,016	4,7	4,643	10	2,560
9,4	1,306	20	0,667	9,4	4,496	20	2,463

Analiza rezultatelor din tabelul 6 evidențiază o influență redusă a capacității de serviciu asupra căderilor de tensiune în regim de sarcină, valorile fiind determinate în principal de parametrii longitudinali ai liniilor electrice. În schimb, în regim de mers în gol, creșterea capacității conduce la modificări semnificative ale distribuției tensiunilor în rețea.

Pentru valorile superioare ale capacității se observă o creștere accentuată a căderilor de tensiune, fenomen asociat creșterii curenților capacitivi și apariției unei conducții reziduale prin dispozitivele de protecție de tip varistoare cu oxizi metalici instalate în nodurile rețelei.

Rezultatele evidențiază astfel influența combinată a capacităților transversale și a elementelor de protecție asupra regimului de tensiune al sistemului analizat. Astfel, micromodelul reușește să pună în evidență influența capacității liniei și a varistoarelor asupra nivelului de tensiune.

Pentru verificarea rezultatelor obținute și confirmarea modelului matematic utilizat, valorile căderilor de tensiune au fost comparate cu rezultatele furnizate de simularea numerică. Rezultatele comparative sunt prezentate în tabelul 7.

Tabelul 7

Comparație privind căderile de tensiune la bornele liniei electrice pentru regimul de funcționare în sarcină		
Metoda de determinare	LEA	LEC
Analitică	$DV_{3-6} = 5,9 \text{ V}$	$DV_{3-6} = 2,59 \text{ V}$
Simulare numerică	$DV_{4-6} = 5,5 \text{ V}$	$DV_{4-6} = 2,24 \text{ V}$

Din tabelul 7 se observă o concordanță bună între rezultatele obținute prin calcul analitic și cele furnizate de simularea numerică. Diferențele identificate sunt reduse și sunt influențate de particularitățile punctelor de evaluare utilizate în cele două metode, precum și de efectele locale

produse de dispozitivele de protecție, varistoarele cu oxizi metalici. Rezultatele confirmă capacitatea modelului matematic de a reproduce comportamentul rețelei analizate.

Pentru validarea experimentală a modelului matematic, valorile tensiunilor determinate analitic în punctele de interes ale rețelei au fost comparate cu valorile afișate de sistemul de măsură al micromodelului în stația ridicătoare (SR) și stația coborâtoare (SC) de tensiune. Rezultatele comparative sunt prezentate în tabelul 8.

Tabelul 8

Comparație privind nivelul de tensiune în punctele de interes pentru regimul de funcționare în sarcină

Metoda de determinare	Linia electrică aeriană	Linia electrică în cablu
Stația ridicătoare de tensiune		
Analitică	$V_{II} = 104,2 \text{ V}$	$V_{II} = 109,3 \text{ V}$
Experimentală	$V_{SR} = 106,4 \text{ V}$	$V_{SR} = 111,4 \text{ V}$
Stația coborâtoare de tensiune		
Analitică	$V_{II} = 91,1 \text{ V}$	$V_{II} = 96,2 \text{ V}$
Experimentală	$V_{SC} = 93,5 \text{ V}$	$V_{SC} = 98,4 \text{ V}$

Rezultatele prezentate în tabelul 8 evidențiază o bună corelație între valorile determinate analitic și cele afișate de sistemul de măsură al micromodelului. Abaterile înregistrate sunt reduse, de aproximativ 2 – 3 %, ceea ce confirmă atât validarea modelului matematic, cât și funcționarea corespunzătoare a sistemului de măsură implementat. Diferențele observate pot fi atribuite toleranțelor traductoarelor utilizate, erorilor de cuantizare asociate conversiei analog-digitale și aproximărilor numerice specifice algoritmilor de calcul. De asemenea, traductoarele de tensiune au fost calibrate pentru nivelul de tensiune de 130 V, tensiune de fază, utilizată în cadrul micromodelului, contribuind la obținerea unor rezultate experimentale apropiate de valorile estimate prin calcul analitic. Trebuie menționat și faptul că temperatura componentelor electronice influențează caracteristicile de funcționare ale sistemului de măsură, parametrii electrici ai componentelor prezentând variații odată cu modificarea temperaturii. În consecință, rezultatele experimentale pot fi influențate într-o anumită măsură de condițiile termice existente în momentul efectuării măsurărilor.

6. Concluzii

În cadrul lucrării a fost realizat un micromodel al unei rețele electrice de distribuție trifazate, conceput pentru reproducerea la scară redusă a principalelor elemente și fenomene specifice sistemelor electroenergetice. Platforma experimentală dezvoltată integrează un generator sincron cu magnet permanent, stații electrice ridicătoare și coborâtoare de tensiune, modele de linii electrice aeriene și în cablu, precum și sisteme dedicate de măsurare, comandă, control și protecție.

Parametrii electrici ai componentelor au fost determinați experimental și utilizați la dezvoltarea modelului matematic al rețelei electrice. Validarea acestuia a fost realizată prin compararea rezultatelor obținute prin calcul analitic, simulare numerică și determinări experimentale efectuate pe micromodel. Abaterile reduse dintre valorile obținute prin cele trei metode demonstrează capacitatea modelului de a reproduce cu o bună acuratețe circulația de puteri, pierderile de putere și nivelul de tensiune caracteristice sistemului analizat.

Rezultatele experimentale au evidențiat influența parametrilor longitudinali și transversali ai liniilor electrice asupra regimului de funcționare al rețelei, precum și impactul capacităților de serviciu și al dispozitivelor de protecție cu varistoare cu oxizi metalici asupra distribuției tensiunilor în diferite regimuri de exploatare. Totodată, a fost confirmată funcționarea corespunzătoare a sistemului de măsurare și a algoritmilor implementați pentru monitorizarea și controlul proceselor din cadrul micromodelului.

Prin corelarea modelului matematic, a simulărilor numerice și a platformei experimentale, soluția propusă poate fi considerată o implementare la scară redusă a conceptului de Digital Twin aplicat unei rețele electrice de distribuție. Această abordare permite analiza și validarea diferitelor regimuri de funcționare prin compararea directă dintre comportarea estimată și cea măsurată a sistemului.

Din perspectiva aplicabilității, platforma dezvoltată poate fi utilizată atât în activități didactice și de cercetare, cât și pentru validarea unor modele matematice, algoritmi de analiză și strategii de control destinate micronețelelor electrice. Flexibilitatea constructivă a micromodelului permite investigarea unui număr ridicat de configurații experimentale, în regim echilibrat sau dezechilibrat, pentru diferite tipuri de sarcini electrice.

O direcție de dezvoltare ulterioară o reprezintă integrarea unor surse de generare distribuită a energiei și implementarea unui compensator static sincron pentru stabilizarea nivelului de tensiune prin controlul puterii reactive. Aceste dezvoltări vor contribui la extinderea capabilităților de analiză, monitorizare și control ale platformei și la creșterea gradului de complexitate al Digital Twin-ului asociat rețelei electrice analizate.

BIBLIOGRAFIE

- [1] V. Dumbravă, G. C. Lăzăroiu ș.a., Photovoltaic Production Management in Stochastic Optimized Microgrids, Buletinul Științific UPB, Seria C, vol. 79, nr. 1, 2017.
- [2] L. A. Mituleț, A. Nedelcu, S. Nicolaie, R. A. Chihaia, LabVIEW Design and Simulation of a Small Scale Microgrid, Buletinul Științific UPB, vol. 78, nr. 1, 2016.
- [3] I. Triștiu, L. Toma, A. Mandiș, A. Manoloiu, A. Neagoe, D. Sidea, Transportul și distribuția energiei electrice. Îndrumar de laborator, Editura Politehnica Press, București, 2017.
- [4] A. P. S. Meliopoulos, G. J. Cokkinides, ș.a., A laboratory setup of a power system scaled model for testing and validation of EMS applications, 2009 IEEE Bucharest PowerTech, Bucharest, Romania, 2009.
- [5] M. M. Thwe, A. Ștefanov, V. S. Rajkumar, P. Palensky, Digital Twins for Power Systems: Review of Current Practices, Requirements, Enabling Technologies, Data Federation, and Challenges, IEEE Access, vol. 13, 2025.
- [6] Y. Sun, X. Zhang, H. Liu ș.a., Digital Twin for Modern Distribution Networks by Improved State Estimation with Consideration of Bad Data Identification, Electronics, MDPI, vol. 13, nr. 18, 2024.
- [7] N. Bazmohammadi ș.a., Microgrid Digital Twins: Concepts, Applications, and Future Trends, IEEE Access, vol. 10, 2022.
- [8] * * *, Manual de utilizare Blender.
- [9] * * *, Manual de utilizare Crealty Print.
- [10] I. Triștiu, Sisteme de distribuție a energiei electrice în prezența generării distribuite, Editura Politehnica Press, 2017.
- [11] * * *, Manual de utilizare Neplan.