

Energy Quality in Microgrids

Golovanov Nicolae

University Politehnica of Bucharest
Bucharest, Romania

Abstract. Measures for limiting environmental pollution by power plants using fossil fuel sources and for efficient use of local energy sources can cause significant changes in the structure of the electricity distribution networks through the development of micro-grids that can operate practically isolated or connected to the public electricity network, which ensures bilateral exchanges of energy. The microgrid requires a detailed analysis of the level of quality of electricity supplied to the microgrid. The detailed analysis of technical solutions is needed to ensure a necessary level of electric energy quality in practically isolated microgrid. Some of the specific conditions of microgrid operation are analyzed, which will ensure operation of the system at the action of disturbances.

Keywords: electric energy quality, microgrid, electromagnetic perturbations.

Calitatea energiei electrice în microrețele

Golovanov Nicolae

Universitatea Politehnică din București
București, România

Rezumat. Preocupările pentru limitarea poluării mediului de către centralele electrice utilizând surse fosile precum și pentru o utilizare eficientă a surselor locale de energie poate determina modificări importante în structura rețelelor electrice de distribuție, prin dezvoltarea unor microrețele care pot funcționa practic izolat sau conectate la rețeaua electrică de interes public cu schimburi bilaterale de energie. În special atunci când funcționează fără schimb de energie cu rețeaua publică (practic izolat) este necesară o analiză de detaliu a nivelului calității energiei electrice furnizată utilizatorilor din microrețea și a soluțiilor adoptate pentru asigurarea unui nivel de calitate care să satisfacă necesitățile utilizatorilor. În cadrul lucrării sunt analizate unele dintre condițiile specifice funcționării microrețelei, unele dintre perturbațiile care pot apărea pe durata funcționării și soluții pentru încadrarea indicatorilor de calitate a energiei electrice în limitele impuse.

Cuvinte-cheie: calitatea energiei electrice, microrețea, perturbații electromagnetice.

Качество электрической энергии в микросетях

Голованов Николае

Бухарестский политехнический университет
Бухарест, Румыния

Аннотация. Мероприятия по ограничению загрязнения окружающей среды на электростанциях с использованием ископаемых энергоресурсов и для эффективного использования местных источников энергии могут привести к значительным изменениям в структуре распределительных электрических сетей за счет развития микросетей, которые могут работать практически изолированно или которые могут быть подключены к электрической сети, допускающей двусторонние обмены электроэнергией. Режим работы без обмена электроэнергией с сетью общего пользования (островной режим) требует детального анализа уровня качества электроэнергии, поставляемой из микросети и разработки технических решений, принятых для обеспечения уровня качества, которые отвечают потребностям пользователей. В статье анализируются некоторые из конкретных условий эксплуатации микросетей, некоторые из возмущений, которые могут возникнуть в процессе эксплуатации и решений для внедрения показателей качества электроэнергии.

Ключевые слова: качество электрической энергии, микросеть, электромагнитные возмущения.

1. Introducere

Structura rețelelor electrice de distribuție poate suferi modificări importante odată cu creșterea preocupărilor privind poluarea mediului ambiant de către centralele electrice pe bază de combustibili fosili. Progresele privind realizarea soluțiilor eficiente pentru utilizarea energiei solare, a energiei maselor de aer în mișcare, a

curgerilor de apă și a altor surse regenerabile au condus la apariția conceptului de microrețea în care sunt utilizate cu prioritate sursele locale, regenerabile de energie. Conectarea la rețeaua publică de distribuție poate asigura un transfer bidirecțional al energiei în cazul unui exces de putere generată respectiv în cazul unui deficit de putere.

Odată cu dezvoltarea echipamentelor eficiente de stocare a energiei, soluțiile de tipul microgrid pot deveni o prezență obișnuită în sistemul de alimentare cu energie electrică a utilizatorilor.

O microrețea include una sau mai multe surse locale de energie precum și surse de stocare, conectate într-o rețea electrică, cu posibilitatea de a funcționa independent sau în paralel cu rețeaua electrică publică pentru alimentarea utilizatorilor.

Caracteristicile specifice ale unei microrețele impun însă analiza cu atenție, printre altele și a calității energiei electrice furnizată utilizatorilor. Funcționarea în microrețea devine eficientă și economică în cazul în care utilizatorii obțin prețuri mai reduse ale energiei electrice iar energia furnizată are o calitate cel puțin egală cu cea din rețeaua electrică de interes public. În acest sens, trebuie analizate în detaliu caracteristicile surselor de energie, ale utilizatorilor din zonă, ale structurii microrețelei, ale condițiilor tehnice și de piață la schimbul de energie cu rețeaua publică dar și ale sistemului de management din microrețea.

O atenție deosebită trebuie acordată faptului că rigiditatea nodurilor din microrețea (puterea de scurtcircuit) poate fi mai mică decât în rețeaua electrică publică iar inerția sistemului, datorită conectării surselor de energie prin convertoare de frecvență, este mică în raport cu rețeaua publică.

În prezent există soluții tehnice eficiente pentru limitarea perturbațiilor la nivelurile admise

și realizarea unui nivel de calitate dorit însă costul acestor echipament trebuie asumat de utilizatori. În multe cazuri sunt posibile însă soluții simple care necesită numai o atenție cunoaștere a caracteristicilor utilizatorilor din zonă.

2. Structura unei microrețele

Rețele electrice actuale se caracterizează prin creșterea ponderii surselor regenerabile de energie și a surselor distribuite. Sunt larg utilizate circuite electronice pentru comandă și control, astfel încât rețeaua să fie mai „inteligentă”, mai eficientă și cu siguranță mărită. Aceste surse și utilizatori sunt însă elemente de circuit cu caracteristici neliniare ce determină generarea unui nivel ridicat de armonice care conduc la distorsionarea curbelor de tensiune în nodurile rețelei.

În cazul general, o microrețea poate include ca surse: instalații eoliene, panouri fotoelectrice, surse hidro, instalații cu biomasă, celule cu combustibil, eventual un generator de intervenție antrenat de motor Diesel, sisteme de stocare a energiei și legătura cu rețeaua electrică de interes public (fig.1) precum și utilizatori simpli sau „prosumer” utilizând în mare măsură energia din surse proprii (în general surse fotoelectrice) dar și furnizând în rețea puterea generată în exces.

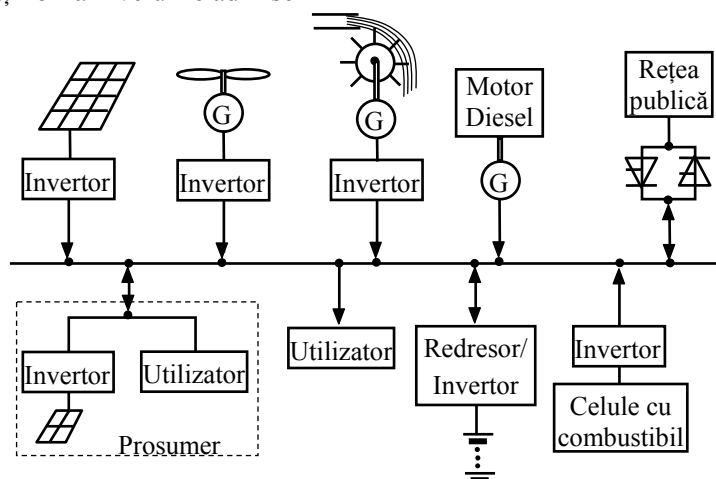


Fig. 1 – Surse și utilizatori într-o microrețea.

Cele mai multe surse sunt conectate în microrețea prin intermediul unor convertoare electronice.

Dimensionarea schemei dar și sistemul de management trebuie să ia în considerație impredictibilitatea unora dintre sursele de energie (eolian, solar și hidro) dar și condițiile de

calitatea diferite necesare unora dintre utilizatorii din schemă. În acest sens, utilizatorii din rețea pot fi împărțiți în 3 categorii:

– utilizatori critici (care necesită o calitate superioară a serviciului de alimentare – nu admit întreruperi în alimentare);

- utilizatori preferențiali (care necesită o calitate bună a serviciului de alimentare – admit scurte întreruperi în alimentare);
- utilizatori standard (care admit întreruperi în alimentare conform condițiilor din sistemul energetic public).

Sistemul de management urmărește graficul de sarcină al utilizatorilor, graficul de producție al surselor și nivelul energiei stocate asigurând alimentarea tuturor utilizatorilor, cu prioritate din surse proprii. În funcție de analiza economică, în caz de deficit de putere, sistemul de management poate decide preluarea de energie din rețeaua electrică publică sau deconectarea utilizatorilor standard (fig. 2) pentru limitarea deficitului de

putere. Sistemul de management urmărește limitarea întreruperilor la utilizatori, reducerea daunelor datorate întreruperilor, o analiză atentă a costurilor și asigurarea calității serviciului de alimentare a utilizatorilor.

Utilizatorii critici sunt conectați prin intermediul unui sistem UPQC (*Unified Power Quality Controller*) care asigură o sursă neîntreruptibilă pentru acești utilizatori precum și o calitate ridicată a tensiunii la borne (lipsa distorsiunilor, nesimetriei, fluctuațiilor de tensiune și a golurilor de tensiune).

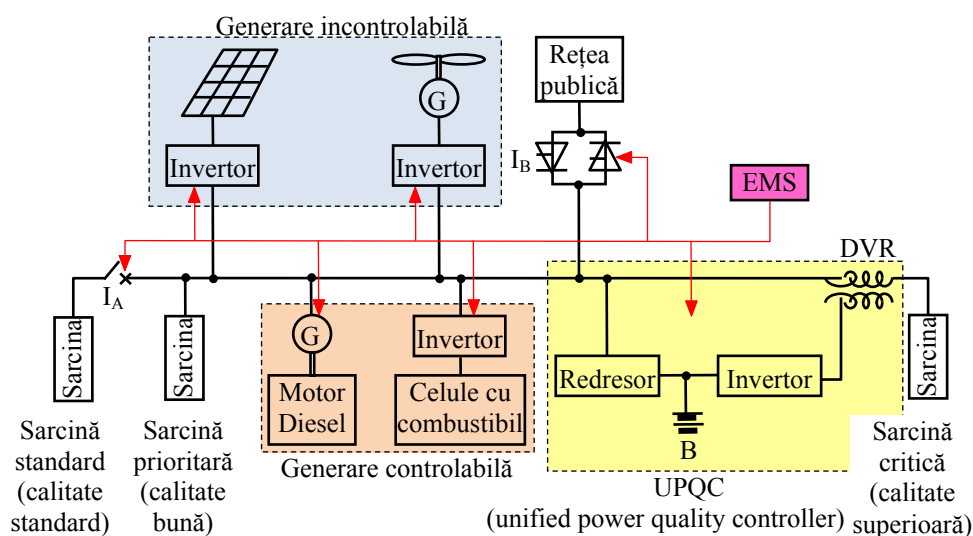


Fig. 2 – Microrețea cu controlul calității energiei electrice furnizate.

3. Perturbații electromagnetice în microrețele

În mod obișnuit în cadrul unei microrețele sunt conectați utilizatori de putere relativ redusă alimentați la joasă tensiune, mulți dintre aceștia în montaj monofazat. De asemenea, cele mai multe dintre receptoarele acestora prezintă caracteristici nelinare determinate de prezența convertoarelor în circuitul de intrare. În acest sens, analiza calității energiei electrice în microrețele trebuie să ia în considerație limitarea nesimetriei și a distorsiunii curbilor de tensiune și de curent electric. Problema apare în special în intervalele de timp în care microrețeaua funcționează izolat față de rețeaua publică.

Limitarea nesimetriei poate fi obținută prin conectarea corespunzătoare a utilizatorilor pe fazele circuitului trifazat. Având în vedere,

variabilitatea puterilor absorbite de receptoarele conectate monofazat, soluția de conectare se decide în urma cunoașterii variației statistice a graficului de sarcină și a limitelor admise pentru factorul de nesimetrie negativă pentru tensiune și a nivelului curentului electric prin conductorul neutru. O atenție deosebită trebuie acordată sistemului de iluminat stradal care poate induce importante nesimetrii dacă nu sunt adoptate măsuri pentru limitarea încărcării inegale a celor trei faze.

În cazurile practice o conectare adecvată a receptoarelor monofazate în sistemul trifazat asigură limitarea factorului de nesimetrie negativă la valorile admise sub 2%, astfel că în cele mai multe cazuri curentul electric în conductorul neutru este determinat de circulația armonicele de rang multiplu de trei.

Funcționarea izolată a microrețelei determină ca puterea de scurtcircuit în nodurile rețelei să fie

redușă, mai ales în cazurile practice în care principalele surse locale de alimentare cu energie electrică (solar, eolian, sisteme de stocare) sunt conectate la rețeaua electrică prin intermediul convertoarelor de frecvență care au un aport practic nul la curentul electric de scurtcircuit.

3.1. Perturbații armonice

Echipamentele electrocasnice având în circuitul de intrare convertoare electronice, conectate în rețeaua electrică sunt importante surse de armonice într-un spectru larg de frecvențe. Ca exemplu, în figura 3 este indicat spectrul armonic al curentului electric absorbit de un aspirator cu reglare a puterii absorbite.

Desigur că, în prezent prin utilizarea de filtre pasive sau filtre active este posibilă limitarea nivelului distorsiunilor. O soluție cu costuri reduse constă în conectarea surselor de perturbații astfel încât acestea să fie grupate asigurând compensarea armonicelor cu unghiuri de defazare diferite. Astfel, dacă se consideră armonicile de rang h de curent electric de la două receptoare neliniare, valoarea însumată este

$$i = i_a + i_b = a_a \cdot \sin(h\omega t + \varphi_a) + a_b \cdot \sin(h\omega t + \varphi_b) = a \cdot \sin(h\omega t + \xi) \quad (1)$$

în care

$$a = \sqrt{a_a^2 + a_b^2 + 2 \cdot a_a \cdot a_b \cdot \cos(\varphi_a - \varphi_b)}; \quad (2)$$

$$\tan \xi = \frac{a_a \cdot \sin \varphi_a + a_b \cdot \sin \varphi_b}{a_a \cdot \cos \varphi_a + a_b \cdot \cos \varphi_b}$$

Prima dintre relațiile (2) pune în evidență că, cu excepția cazului în care $\varphi_a = \varphi_b$, amplitudinea a a curbei însumate este mai mică decât suma $a_a + a_b$ (fig.4).

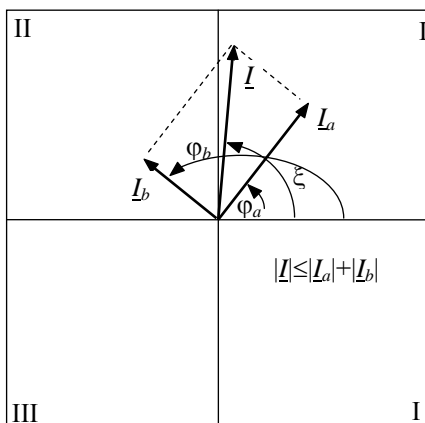


Fig. 4 – Adunarea armonicelor cu argumente diferite.

Pentru a pune în evidență efectele diferitelor măsuri pentru limitarea distorsiunilor armonice s-a considerat schema simplificată din figura 5, în care rețeaua electrică publică alimentează o micrețea ce cuprinde utilizatori cu caracteristică liniară și receptoare cu caracteristică neliniară (motoare asincrone alimentate prin intermediul convertoarelor de frecvență). Cel de al doilea motor este alimentat prin intermediul unui convertor cu 12 pulsuri iar primul motor este conectat în prima etapă prin intermediul unui convertor cu 6 pulsuri iar în etapa următoare prin intermediul unui convertor cu 12 pulsuri. Alimentarea convertoarelor se face prin cabluri conectate la bara de 400 V.

Analiza efectuată utilizând programul de calcul ETAP 11 a pus în evidență rezultatele indicate în figura 6.

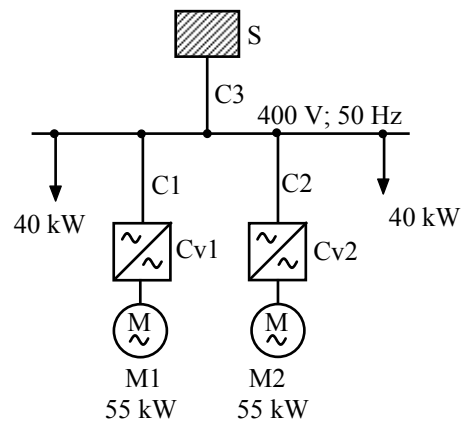


Fig. 5 – Schema simplificată studiată.

Analiza datelor din figura 6, a) arată faptul că o conectare a două surse armonice cu caracteristici unghiulare diferite conduce la reducerea nivelului armonic. Astfel se observă faptul că pe cablul 2 la care este conectată sursa cu 12 pulsuri, armonicile determinate de sursa conectată prin intermediul cablului 1 sunt mai reduse decât cele determinate numai de sursa cu 12 pulsuri (pentru armonica de rang 11 o reducere de la 8,7% la 7,8% iar pentru armonica de rang 13 o reducere de la 7,4% la 6,3%) – figura 6, b).

Soluția privind utilizarea convertoarelor cu mai multe pulsuri asigură, de asemenea, reducerea nivelului distorsiunii armonice de curent electric. Faptul că apar armonice h de rang superior, cu amplitudine redusă asigură limitarea distorsiunii armonice a curbelor de curent electric

$$h = m \cdot p \pm 1 \quad (3)$$

în care $m = 1, 2, 3 \dots$ iar p – numărul de pulsuri al convertorului.

Datele din figura 6, b) arată faptul că utilizarea pentru alimentarea motoarelor a două convertoare cu 12 pulsuri permite reducerea importantă a nivelului de distorsiune (pe cablului 1 nivelul de distorsiune scade de la 26,51% la

13,46% , pe cablul 2 are loc o creștere a nivelului de distorsiune datorită lipsei efectului de limitare determinat de convertorul cu 6 pulsuri, iar pe cablul de alimentare are loc o reducere de la 6,42% la 6,13% a factorului de distorsiune de curent electric).

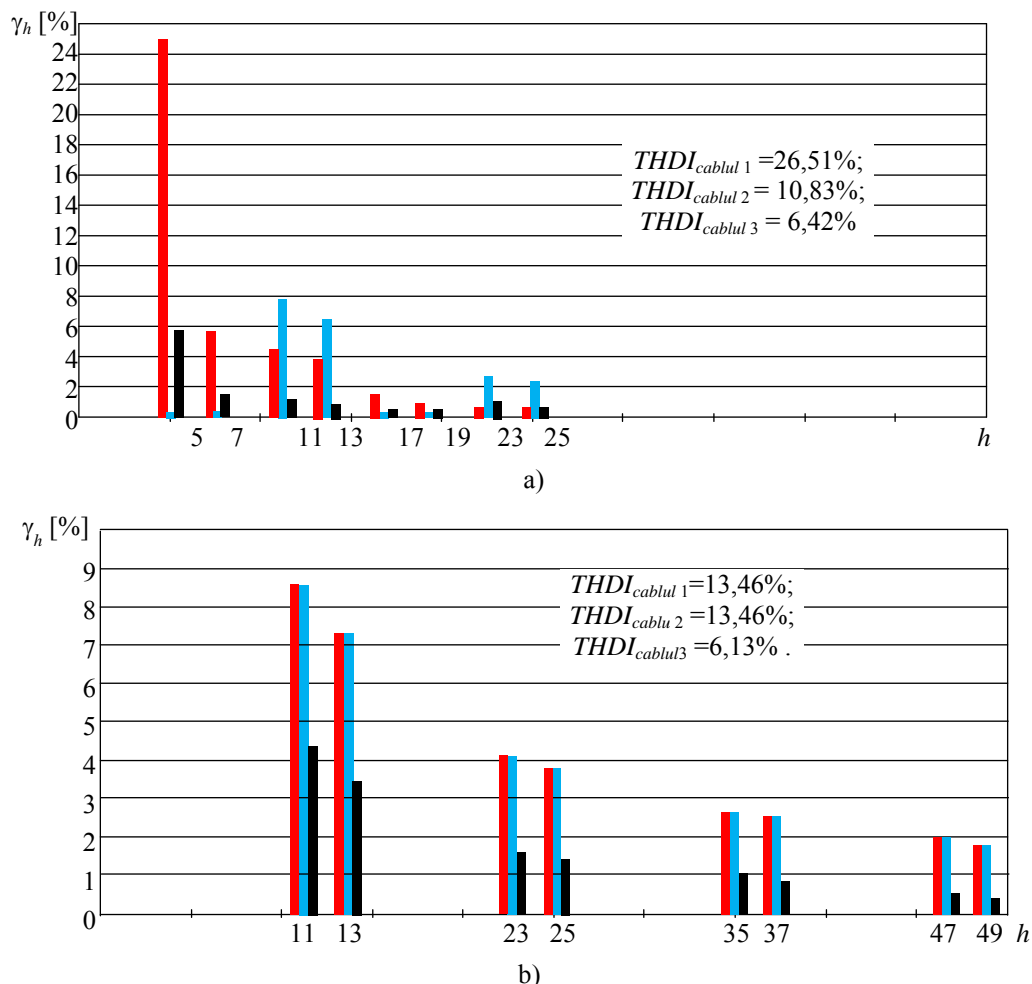


Fig.6 – Spectrul de armonice al curentului electric în circuitele din schemă:
a) motoare alimentate cu convertoare cu 6 și 12 pulsuri; b) motoare alimentate cu convertoare cu 12 pulsuri.

Analiza efectuată pune în evidență faptul că o conectare adecvată a surselor cu caracteristică neliniară în rețeaua electrică a unui microgrid poate oferi soluții eficiente pentru limitarea nivelului distorsiunilor armonice în rețea, cu limitarea pierderilor de energie activă și asigurarea calității necesare a energiei electrice la bornele utilizatorilor.

3.2. Variația nivelului de tensiune în microrețea

Transformarea microrețelei în rețea activă prin conectarea de surse în interiorul acesteia și

alegerea rațională a nodurilor în care sunt conectate aceste surse permite îmbunătățirea substanțială a nivelului tensiunilor în rețea [1].

Ca exemplu, în figura 7 este indicată schema unei microrețele în care pot fi conectate diferite surse: fotoelectrice, eoliene, sisteme de stocare. Analiza efectuată se referă numai al cazul cel mai întâlnit al utilizării de surse fotoelectrice, dar poate fi extinsă și la celelalte tipuri de surse. A fost luată în considerație o schemă urbană reală, alimentată dintr-un post de transformare 20/0,4 kV, 640 kVA caracterizat la bara de 20 kV de o putere trifazată de scurtcircuit de 200 MVA. La bara de 0,4 kV a postului de transformare poate fi

conectat un sistem de stocare a energiei electrice (nu a fost activat în cadrul studiului).

În micronețeaua analizată sunt conectați utilizatori cu o putere de 280 MVA și sunt conectate două surse fotoelectrice, fiecare având o putere disponibilă de 48 kW.

În figura 7 este indicată circulația puterilor în rețeaua analizată în lipsa surselor de energie din schemă și poate fi pusă în evidență variația nivelului de tensiune în diferitele noduri ale schemei (tabelul 1).

În perioada în care sursele fotoelectrice sunt active (fig.8) tensiunile în nodurile micronețelei se modifică asigurând un nivel superior al calității energiei electrice la bornele utilizatorilor. Se observă faptul că sursa PVA1 are o pondere redusă în îmbunătățirea nivelurilor de tensiune

fiind conectată în apropierea sursei de alimentare din rețeaua electrică publică. Sursa PVA2, amplasată la un utilizator aflat la sfârșitul rețelei are o pondere importantă în îmbunătățirea nivelului tensiunilor din rețea (tabelul 1).

Analiza datelor din figurile 7 și 8 pune în evidență faptul că o alegere adecvată a locului de conectare a surselor fotoelectrice permite îmbunătățirea importantă a calității energiei electrice la bornele utilizatorilor pe durata în care aceste surse sunt active [2]. Desigur că în intervalele de timp în care aceste surse nu sunt active, pot să apară abateri mari ale nivelului de tensiune care trebuie avute în vedere la dimensionarea micronețelei și a sistemului ei de management.

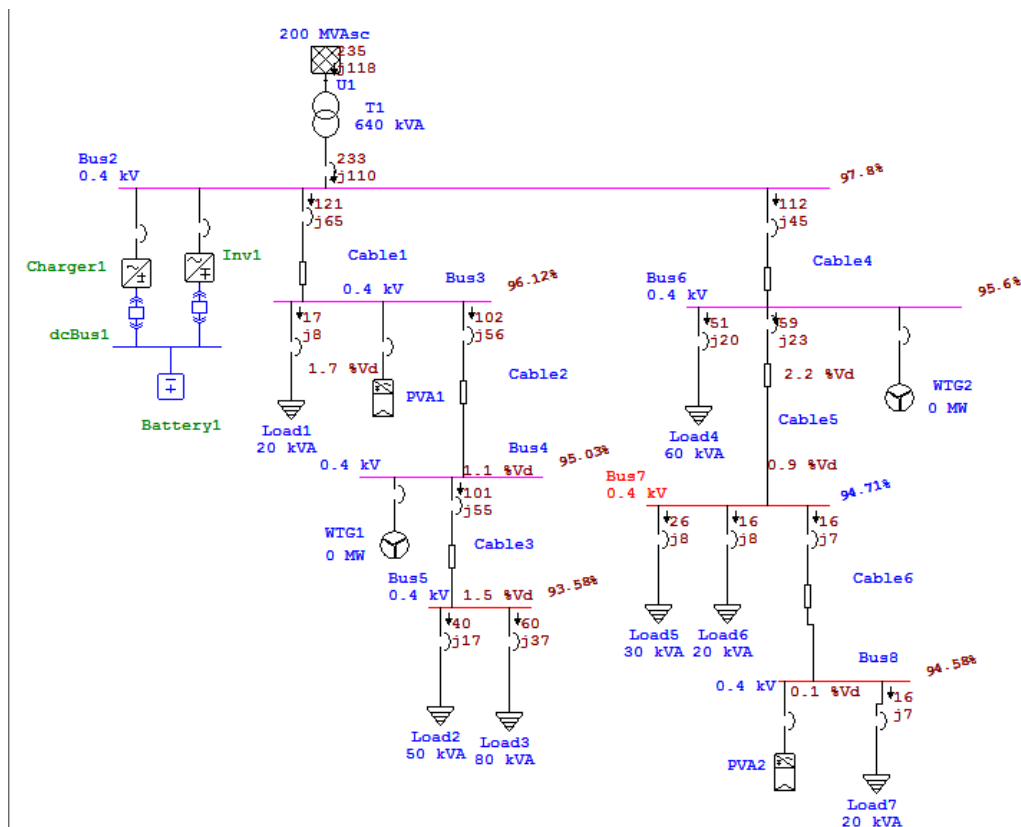


Fig. 7 – Schema electrică a micronețelei studiate cu alimentare din rețeaua electrică publică.

Tabelul 1 – Tensiuni în nodurile schemei

Nodul	Tensiunea în noduri [%]		Diferențe [%]
	în lipsa surselor interne	în prezența surselor interne	
1	100	100	0
2	97,8	98,6	0,8
3	96,12	97,41	1,29
4	95,03	96,31	1,28
5	93,58	94,84	1,26

6	95,6	98,52	2,92
7	94,71	98,4	3,69
8	94,5	98,53	4,03

3.3. Supratensiuni la funcționarea micronețelelor

Prezența surselor regenerabile de energie cu producție necontrolabilă poate conduce la supratensiuni datorate succesiunii stărilor de activare și inactivare a sursei [3]. Ca exemplu, în

figura 9 este prezentat cazul unei linii de joasă tensiune la care este conectată o sursă cu variații mari ale producției generate.

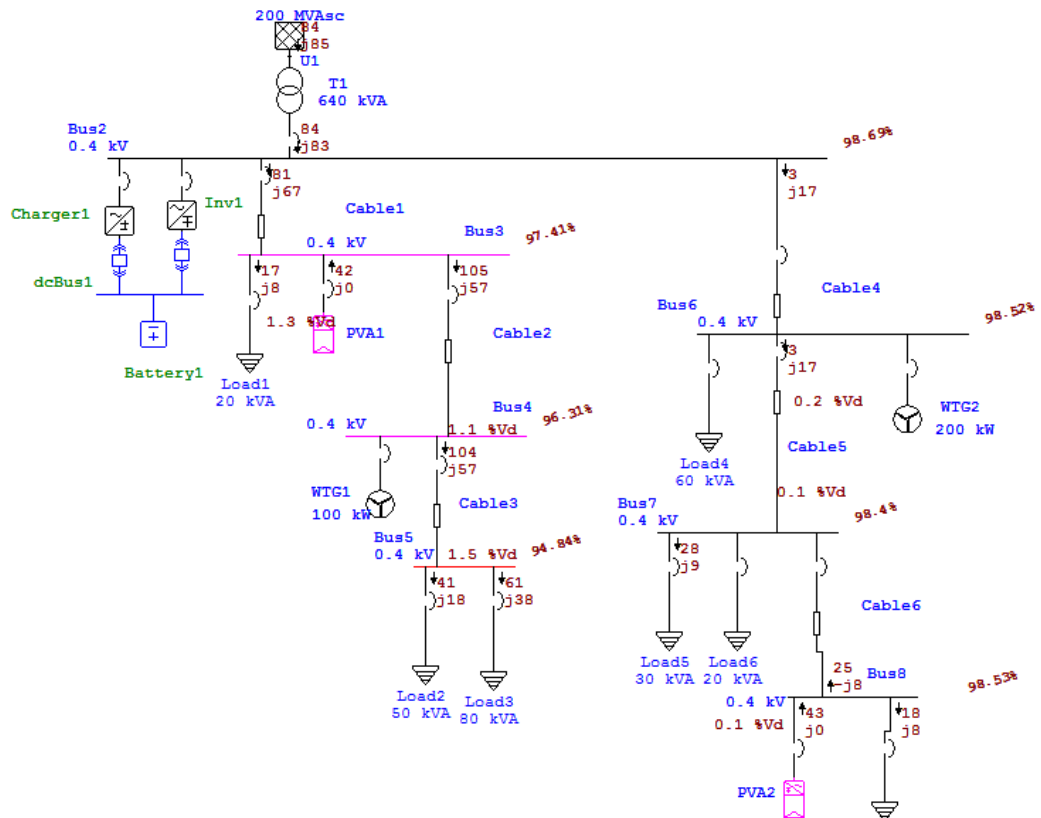


Fig. 8 – Schema electrică a microrețelei studiate cu alimentare hibridă din rețeaua electrică publică și din surse fotoelectrice.

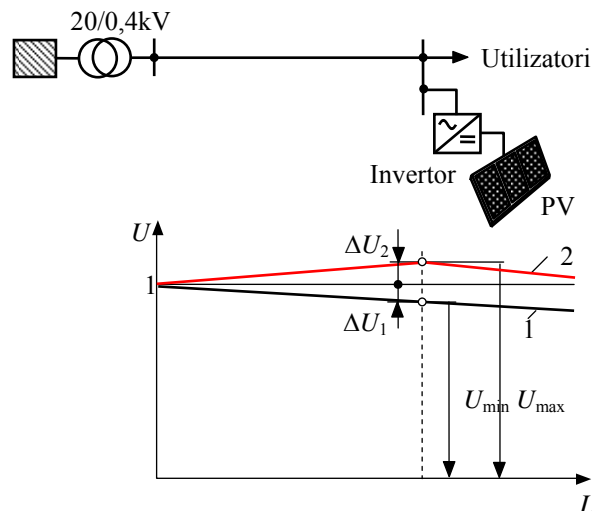


Fig. 9 – Supratensiuni temporare la conectarea surselor regenerabile de energie pe o linie de JT radială:
1 – sursă regenerabilă inactivă, sarcină maximă pe linie;
2 – sursă regenerabilă în funcțiune, sarcină redusă la utilizatori.

Variația de tensiune ΔU care poate apărea la bornele utilizatorilor la bara la care este conectată sursa PV poate fi determinată din relația

$$\Delta U = U_{\max} - U_{\min} = \Delta U_1 - \Delta U_2 \quad (4)$$

în care

$$\begin{aligned}\Delta U_1 &= \frac{S_1 \cdot \cos(\psi - \varphi_1)}{S_{sc}} \cdot U ; \\ \Delta U_2 &= \frac{(S_2 - S_{PV}) \cdot \cos(\psi - \varphi_2)}{S_{sc}} \cdot U .\end{aligned}\quad (5)$$

În relațiile (5) au fost utilizate notațiile:

S_1 este puterea absorbită de utilizatorii cu factorul de putere $\cos\varphi_1$, conectați la bara analizată (valori corespunzătoare maximului graficului de sarcină – de obicei vârful de seară);

S_{sc} – puterea de scurtcircuit la barele de joasă tensiune ale postului de transformare;

ψ – unghiul rețelei ($\tan\psi = X_0/R_0$ unde X_0 și R_0 sunt reactanța specifică și respectiv rezistența specifică a liniei de 0,4 kV);

U – tensiunea de referință la barele de 0,4 kV ale postului de transformare (considerată practic constantă pe durata unei zile);

S_2 – puterea absorbită de utilizatorii cu factorul de putere $\cos\varphi_2$, conectați la bara analizată (valori corespunzătoare unei sarcini reduse – de obicei ora prânzului într-o zi de sârbătoare);

S_{PV} – puterea generată de sursa PV (de obicei la ora de prânz, cu producție maximă).

Supratensiunea care rezultă ar putea determina deteriorarea echipamentelor utilizatorilor. Sistemul de management al microrețelei trebuie să monitorizeze nivelul tensiunilor din nodurile în care sunt conectate surse regenerabile de energie și să adopte măsuri adecvate pentru încadrarea acestora în limitele acceptate.

4. Concluzii

Preocupările privind reducerea poluării mediului ambiant și utilizarea surselor locale de energie determină modificarea structurii rețelelor electrice de distribuție prin apariția de microrețele, conectate la rețeaua electrică publică dar și cu posibilitatea de a funcționa izolat.

Despre autor.



Golovanov Nicolae, profesor dr.ing., la catedra Sisteme Electroenergetice, facultatea Energetică, Universitatea Politehnică din București, specialist în domeniul utilizării eficiente a energiei electrice și în domeniul calității energiei electrice. A condus un mare număr de doctoranzi, din țară și din străinătate (Elveția, Grecia). Are peste 100 lucrări științifice publicate în reviste de specialitate din țară și străinătate, fiind o prezență activă la cele mai importante manifestări științifice internaționale din domeniu. 13 dintre lucrările realizate sunt citate ICI iar 4 sunt citate INSPEC.

Atât pe durata funcționării conectat la rețeaua electrică publică precum și la funcționarea izolată pot apărea aspecte specifice care să determine abateri de la valorile normate ale calității energiei electrice. În prezent există soluții tehnice eficiente pentru limitarea tuturor tipurilor de perturbații electromagnetice, unele fiind posibil de a fi limitate prin soluții inteligente de conectare în circuit dar altele necesitând echipamente specializate. Desigur că dezvoltarea sistemelor de stocare eficientă a energiei electrice va asigura condiții favorabile pentru asigurarea calității energiei electrice, dezvoltarea microrețelor și a „prosumerilor”.

Dezvoltarea microrețelelor și acceptarea acestora de către utilizatori va impune realizarea unui preț al energiei electrice cel mult egal cu prețul energiei electrice în rețeaua electrică publică și un nivel al calității energiei electrice care să corespundă cel puțin calității energiei electrice din rețeaua publică.

Un rol deosebit de important pentru asigurarea condițiilor de funcționare eficientă a microrețelei îl are sistemul de management care asigură gestionarea surselor de energie astfel încât să se ofere utilizatorilor energie de calitate la un preț cât mai redus.

REFERENCES

- [1] Berger A., Henning M., Körner Ch., *Voltage control in smart distribution grid – overview and practical experience of available solution*, CIRED Stockholm 2013, rap. 0188.
- [2] Fazeli A., Sumner M., Johnson C.M., Christopher E. *Investigating the impact of varying the number of distributed energy resources on controlling the power flow within a microgrid*, PESGM 2015, Denver, rap.001586.
- [3] Golovanov N., Albert H., Gheorge S., Mogoreanu N., Lazaroiu G.C, *Surse regenerabile de energie în sistemul electroenergetic*, Editura AGIR, București, 2005.