

## POLUAREA ARMONICĂ A REȚELEI DE DISTRIBUȚIE A ENERGIEI ELECTRICE

Cosmin N. POPESCU  
Constantin RĂDOI  
Traian MANEA

Facultatea de Electronică și Telecomunicații București  
Email: cnpo@elia.pub.ro, cradoi@elia.pub.ro, tman@alpha.imag.pub.ro.

**Rezumat:** Lucrarea prezintă principalele avantaje, din care reiese necesitatea corecției factorului de putere. Se încearcă o caracterizare a transferului de putere într-o rețea formată din generator și consumator. Astfel, se definește factorul de putere și puterile utilizate în descrierea transferului de energie: puterea activă, reactivă și deformantă. Cu ajutorul unui exemplu preluat dintr-o simulare Pspice, se pot remarca cu ușurință dezavantajele apărute o dată cu prezența componentelor reactive și deformante ale curentului absorbit din rețeaua de distribuție de un consumator poluant: tensiuni și curenți mai mari în rețea, calitate redusă a formei de undă a energiei electrice furnizate consumatorilor, pierderi crescute în rețeaua de distribuție, transfer bidirecțional de putere în rețea. În continuare, se realizează o clasificare a metodelor utilizate în combaterea efectelor negative prezentate anterior: o primă categorie, o constituie cele pasive (atunci când se utilizează numai elemente pasive) sau active (când, cu ajutorul convertoarelor electronice de putere, se încearcă reconstruirea formei de undă a curentului absorbit din rețea); o altă categorie este reprezentată de cele aplicate individual (cazul unui redresor sau a unui interfeț cu transfer bidirecțional) sau pentru un grup de consumatori (cazul unui filtru activ de putere). Lucrarea este presărată cu observații, iar, în final, sunt introduse câteva concluzii.

**Cuvinte cheie:** (corecția) factorului de putere; putere activă, reactivă și deformantă; simulare PSpice; filtre de putere.

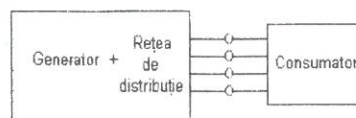
### 1. Transferul de putere

Pentru un circuit generator-consumator, factorul de putere se calculează în raport cu bornele de alimentare cu energie (figura 1), cu relația

$$FP = \frac{P_{activa}^{def}}{P_{aparenta}}, \quad (1)$$

unde  $P_{activa}$  reprezintă puterea activă, iar  $P_{aparenta}$  - puterea aparentă, consumată de către sarcină.

În cazul ideal, avem  $FP=1$ .



Borne de alimentare

Figura 1. Sistem de transfer energetic

Pentru două borne de conexiune se scrie

$$P_{activa} = \frac{1}{T} \int_T u(t)i(t)dt, \quad (2)$$

$$P_{aparenta} = U_{ef} I_{ef}, \quad (3)$$

unde  $u(t)$  este valoarea instantanee a tensiunii la borne,  $i(t)$  curentului prin borne, iar  $U_{ef}$  și  $I_{ef}$  sunt valorile lor efective, calculate cu relația următoare, scrisă pentru tensiune:

$$U_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_T u^2(t) dt} \quad (4)$$

$T$  reprezintă perioada tensiunii și a curentului.

Un caz frecvent analizat este cel al tensiunii de alimentare sinusoidale,

$$u(t) = \sqrt{2}U_B \sin \omega t, \quad (5)$$

aplicată la bornele unei sarcini neliniare. Curentul prin circuit, poluat cu armonici, are o expresie de forma:

$$i(t) = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t - \theta_n) = \underbrace{\sqrt{2}I_1 \cos \theta_1 \sin \omega t}_{\text{Componenta-activă}} + \underbrace{\sqrt{2}I_1 \sin \theta_1 \cos \omega t}_{\text{Componenta-reactivă}} + \underbrace{\sum_{n=2}^{\infty} \sqrt{2}I_n \sin(n\omega t - \theta_n)}_{\text{Componenta-deformantă}} \quad (6)$$

Valoarea efectivă a tensiunii de alimentare este

$$U_{ef} = U_B, \quad (7)$$

iar a curentului:

$$I_{ef} = \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (8)$$

În situația aceasta, puterea aparentă se poate scrie sub următoarea formă

$$P_{aparenta}^2 = P_{activa}^2 + P_{reactiva}^2 + P_{deformanta}^2, \quad (9)$$

unde

$$P_{activa} = U_B I_1 \cos \theta_1 \quad (10)$$

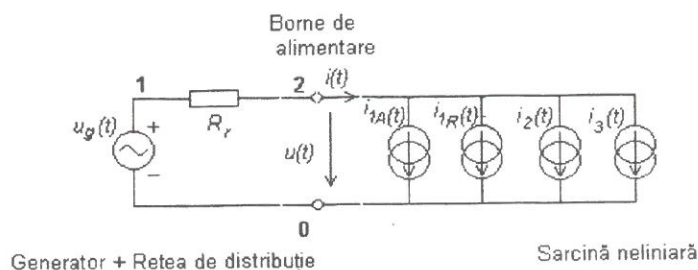
corespunde definiției de mai sus, iar

$$P_{reactiva} = U_B I_1 \sin \theta_1, \quad (11)$$

$$P_{deformantă} = U_B \sqrt{I_0^2 + \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} \quad (12)$$

Aceste mărimi pot fi privite și ca produsul dintre valoarea efectivă a tensiunii și cea efectivă a componentei corespunzătoare a curentului.

Pentru a înțelege mai bine situația prezentată și necesitatea corecției factorului de putere se poate urmări exemplul din figura 2.



**Figura 2. Sistem de transfer al energiei electrice**

Generatorul de energie și rețeaua de distribuție sunt reprezentate împreună, prin sursa de tensiune  $u_g(t)$  și rezistorul  $R_r$ . Sursele de curent formează sarcina neliniară.

S-a analizat schema printr-o simulare pe calculator cu pachetul de programe PSpice, în următoarele condiții:

$$u_g(t) = 310 \sin(2\pi 50t);$$

$$R_r = 3;$$

$$i_{1A} = 20 \sin(2\pi 50t);$$

$$i_{1R} = 20 \sin(2\pi 50t + \pi/2) \text{ (componenta reactivă a curentului);}$$

$$i_2 = 20 \sin(2\pi 100t + \pi/4) \text{ (o componentă deformantă a curentului);}$$

$$i_{1R} = 20 \sin(2\pi 150t + 3\pi/2) \text{ (altă componentă deformantă a curentului).}$$

Prima observație se poate face, urmărind figura 3, în care s-au expus curenții din circuit. Remarcăm forma deformată a curentului absorbit de sarcină și dimensiunile mărite ale acesteia, în comparație cu componenta activă. Întregul sistem lucrează cu tensiuni și curenți mai mari decât necesarul, prin urmare, se cer măsuri sporite de siguranță, fapt regăsit și în dimensiunile mărite ale componentelor fizice.

Figura 4 scoate în evidență forma de undă deformată a tensiunii la bornele sarcinii. Aceasta se aplică prin rețeaua de distribuție la bornele altor consumatori, deci, calitatea energiei furnizate scade.

Mai constatăm că puterea disipată în rezistența de pierderi  $R_r$  a sistemului este mărită. Față de cazul unei sarcini rezistive, când  $i(t) = i_{1A}(t)$ , se pierde suplimentar în sistem puterea:

$$P_{pierderi} = R_r (i_{1R}^2 + i_2^2 + i_3^2). \quad (13)$$

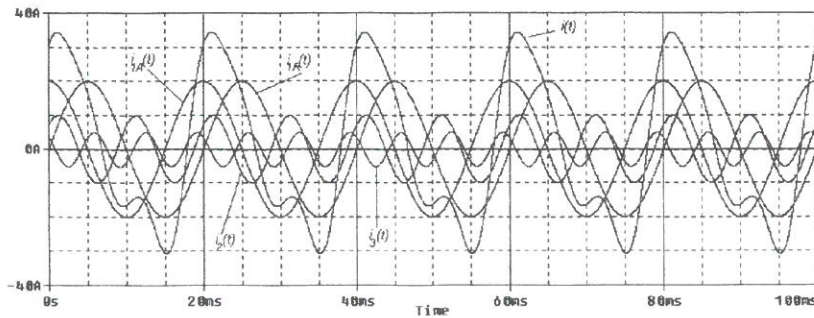


Figura 3. Forme de undă explicative pentru curenți

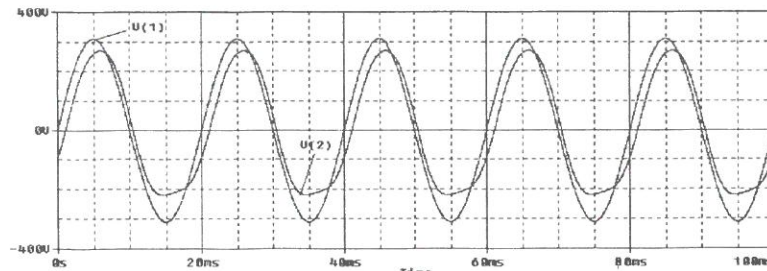


Figura 4. Forma de undă deformată a tensiunii la bornele sarcinii neliniare

În figura 5, se poate compara puterea aparentă instantanee ( $u_g(t) * i(t)$ ) și puterea activă instantanee ( $u_g(t) * i_{1A}(t)$ ) furnizate de către generatorul ideal ( $u_g(t)$ ). Constatăm că puterea activă se transferă numai într-un singur sens, de la generator la sarcină, pe când cea aparentă se transferă în ambele sensuri. Valorile lor medii sunt egale. Putem să afirmăm că, de-a lungul unei perioade, generatorul ideal ( $u_g(t)$ ) cedează suplimentar sarcinii putere reactivă și deformantă, pe care apoi o recuperează. Acest fapt se dorește a fi evitat pentru generatoare, ca și creșterea artificială a valorii maxime pentru puterea instantanee, transferată în circuit.

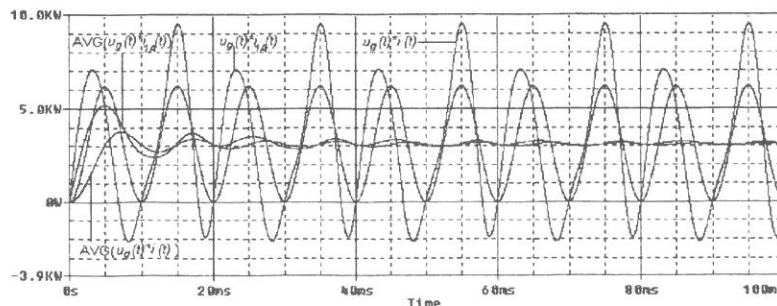


Figura 5. Transferul de putere

Pentru a combate efectele negative prezentate anterior, preocupările specialiștilor se împart în două direcții:

- consumatorii de energie electrică, deci, sarcinile rețelei de alimentare, se proiectează astfel încât să se comporte similar unui rezistor, deci, cu absorbție redusă de armonici;
- se construiesc circuite speciale ce se plasează la diferite borne ale sistemului de distribuție, pentru a atenua armonicile produse de către consumatori. Astfel, comportarea întregului sistem din punct de vedere al generatorului se apropie de aceea a unui rezistor. Circuitele acestea pot fi filtre active sau pasive.

## 2. Echipamente cu absorbție redusă de armonici

Așa cum am mai spus, constructorii de aparate electrice sunt preocupați să realizeze echipamente ce lucrează cu factor de putere cât mai apropiat de unitate. Demersurile ce se fac în acest sens vin să satisfacă limitările impuse prin standardele internaționale și preîntâmpină eforturile întreprinse prin mijloacele suplimentare de corecție a factorului de putere.

Se vor prezenta, în continuare, câteva idei ce stau la baza proiectării redresoarelor cu performanțe deosebite. Redresorul clasic este convertorul cel mai răspândit, fiind o sursă importantă de perturbații. Totodată, creșterea performanțelor acestuia reprezintă un subiect de actualitate, aflat în prim-planul mai multor cercetători.

Schema de principiu a unui redresor cu factor de putere îmbunătățit se află desenată în figura 6.

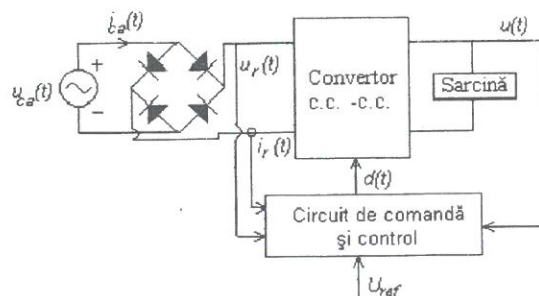


Figura 6. Redresor cu factor de putere îmbunătățit

Se distinge în componență o punte redresoare, un convertor c.c.-c.c. în comutație și un circuit de comandă și control. Un convertor c.c.-c.c. ridicător de tensiune (în speță Boost) este cea mai simplă soluție pentru atingerea obiectivelor propuse.

Circuitul de comandă și control furnizează impulsuri de comandă pentru comutatoarele convertorului în conformitate cu o strategie de comandă prin care se aproximează forma de undă dorită a curentului absorbit, prin segmente de dreaptă ca în figura 7, determinată pe baza tensiunii de la ieșire ( $u(t)$ ), valorii de referință pentru aceasta ( $U_{ref}$ ), tensiunea de intrare redresată ( $u_r(t)$ ).

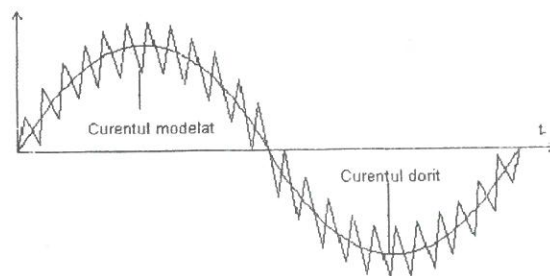


Figura 7. Curentul de intrare al redresorului din figura 7

Frecvența de comutație a comutatoarelor este mult mare față de aceea a rețelei electrice. În consecință, se poate aproxima că, aproape instantaneu, întreaga putere preluată din rețea este transferată sarcinii.

Cu o funcționare asemănătoare este interfața cu transfer bidirecțional de energie, prezentată în figura 8. Circuitul de comandă și control stabilește funcționare de redresor, atunci când sarcina, o mașină de curent continuu, absoarbe energie, sau de inverter pe parcursul frânării regenerative, când sarcina devine un generator de energie. Forma de undă a curentului absorbit sau injectat în rețea este similară celei din figura 7.

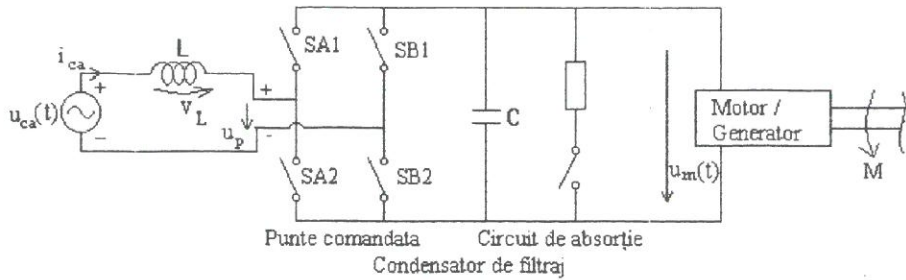


Figura 8. Interfață pentru transferul bidirecțional de energie

### 3. Filtre de putere

#### 3.1. Filtre pasive de putere

Tradițional, eliminarea armonicilor se realizează prin intermediul filtrelor pasive. Proiectarea și randamentul acestora sunt dependente de rețeaua de distribuție și consumator.

Cel mai întâlnit circuit pasiv corector îl formează un inductor montat în serie cu rețeaua de alimentare, ca în figura 9. Prin mărirea unghiului de conducție al curentului este redus conținutul de armonici al acestuia. Este o soluție simplă și ieftină, însă uneori nu este satisfăcătoare, conducând la creșterea dimensiunilor redresorului.

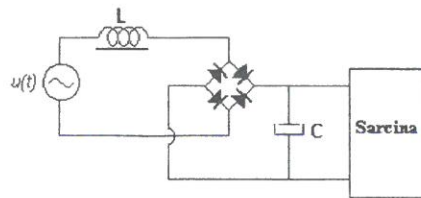


Figura 9. Inductor în serie rețeaua de alimentare

În figura 10, este reprezentat un filtru construit cu bancuri de circuite rezonante serie ( $Z_1, Z_2, Z_3$ ), acordate pe frecvențele armonicilor produse de sarcină, modelată prin generatorul de curent  $i_s(t)$ .

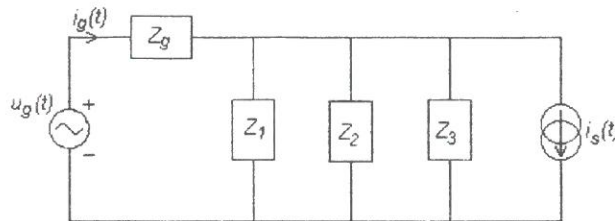


Figura 10. Filtru cu bancuri de circuite rezonante

Impedanța generatorului de energie ( $u_g(t)$ ) și aceea a rețelei electrice sunt cuprinse în  $Z_g$ . Curenții armonici tind să se închidă prin impedanțele șunt ( $Z_1, Z_2, Z_3$ ), întrucât acestea au valori reduse la frecvențele armonicilor.

Funcția de transfer a sistemului este:

$$H(s) = \frac{i_g(s)}{i_s(s)} = \frac{Z_g \parallel Z_1 \parallel Z_2 \parallel Z_3}{Z_g} \quad (14)$$

### 3.2. Filtre active de putere

Filtrele active de putere sunt convertoare cu funcționare în comutație, atașate unui singur consumator, unui grup de consumatori sau rețelei de distribuție a energiei electrice, cu scopul de a crește factorul de putere. Absorb o cantitate redusă de putere activă pentru a compensa pierderile datorate dispozitivelor electronice.

După felul cum sunt conectate în circuit, în raport cu sarcina poluantă, avem filtre active serie sau filtre active paralele. Primul tip este deja utilizat în țările mai avansate, al doilea este încă în faza de dezvoltare de laborator. Prin combinații între filtrele active și pasive se nasc filtrele hibride.

În figura 11, avem reprezentată schema de principiu a unui filtru activ de putere paralel, monofazat, construit pe baza unui inverter alimentat în tensiune. Circuitul de comandă și control primește informații despre  $i_S(t)$ ,  $i_g(t)$ ,  $u_C(t)$  și acționează asupra comutatoarelor SA1, SA2, SB1 și SB2.

Pentru a-i înțelege mai bine funcționarea, se poate urmări un caz particular în figura 12. Curentului absorbit de sarcină ( $i_S(t)$ ) i-se determină componenta activă ( $i_{S1}(t)$ ), apoi curentul ce ar trebui să fie absorbit de filtrul activ de putere ( $i_F^*(t)$ ). Prin acționarea comutatoarelor se aproximează prin segmente de dreaptă curentul dorit ( $i_F(t)$ ) cu componenta reală ( $i_F(t)$ ).

În cazul rețelei de distribuție trifazate, pentru un consumator nesimetric, filtrul activ de putere poate echilibra consumul de putere activă între cele trei faze.

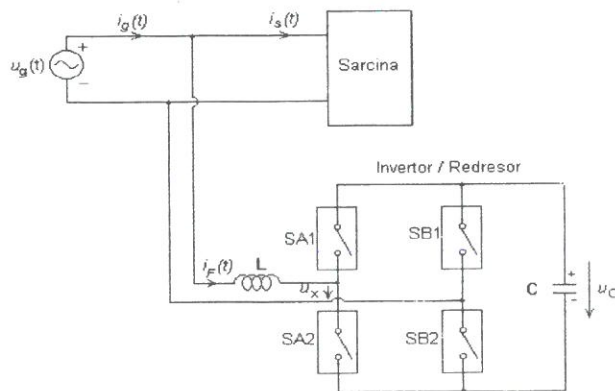


Fig.ura10. Filtru activ de putere plasat în paralel cu sarcina

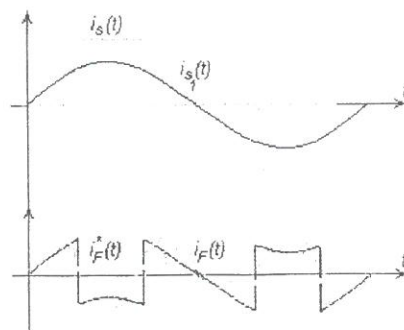


Figura 11. Forme de undă explicative pentru schema din figura 10

Filtrul activ de putere serie se conectează în serie cu rețeaua de distribuție, de obicei printr-un transformator. Se comportă ca o sursă de tensiune, astfel ca tensiunea furnizată consumatorilor să aibă o formă cât mai apropiată de o sinusoidă.

### Concluzii

Lucrarea pornește de la prezentarea unor mărimi ce caracterizează transferul de putere: factorul de putere, puterea activă, reactivă și deformantă. Pe marginea unei simulări PSpice realizate pentru un caz particular, se comentează avantajele corecției factorului de putere.

Sunt analizate cele două căi principale de îmbunătățire a factorului de putere. Pentru o mai bună înțelegere s-au introdus câteva exemple semnificative.

Lucrarea face o introducere într-un subiect mai larg, aflat în actualitatea cercetărilor din domeniile transferului de energie electrică, electronicii de putere, sistemelor de comandă și control. S-a urmărit numai cazul restrâns în care distribuția energiei electrice se realizează printr-o rețea monofazată. Discuția poate continua și spre problemele specifice variantei trifazice.

În situația unei surse de alimentare cu curent continuu, definiția factorului de putere rămâne valabilă. De asemenea, sunt căutate metode de îmbunătățire a acestuia.

## Bibliografie

1. **AKAKI, H.:** New tends in Active Filters for Power Conditioning. În: IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 32, No. 6.
2. **MOHAN, N., M.T. UNDERLAND, P.W. ROBBINS:** Power Electronics. / Converters, Applications and Design, John Willey & Sons, 1989.
3. **RASTOGI, M., R. NAIK, N. MOHAN:** A Comparative Evaluation of harmonic Reduction Techniques in Three-Phase Utility Interface of Power Electronics Loads. În: IEEE Transactoins on Industry Applications, Vol. 30, No. 5.
4. **POPESCU, C.N., C. RĂDOI, A. FLORESCU:** Îmbunătățirea factorului de putere pentru redresoare, Revista Electronică, Electrotehnică, Automatică (în curs de apariție).