

Curs 6

Armonici în rețelele electrice

1. Definiții

Armonică (de tensiune/de curent) = tensiune/curent sinusoidal cu frecvența egală cu un multiplu întreg al frecvenței fundamentale a tensiunii de alimentare.

Într-un sistem de 50Hz pot să apară armonici de ordinul(rangul) 2 (100 Hz), 3 (150 Hz), 4 (200 Hz), etc. În mod normal, într-un sistem trifazat apar doar armonici de rang impar (3, 5, 7, 9). Apariția unor armonici de rang par duce cu gândul la existența unor convertoare cu deficiențe conectate în sistem.

Regimurile nesinusoidale sau deformante de funcționare ale SEE reprezintă acele regimuri pentru care curbele de tensiune și curent sunt periodice, dar cel puțin una dintre ele nu variază în timp după o lege de tip sinusoidal.

Deformarea unei curbei depinde de următorii factori:

- *natura armonicilor*, făcându-se referire la gradul de paritate sau imparitate al acestora. În funcție de ordinul (rangul) lor, armonicile se mai pot împărți în *armonici superioare* (rangul este un număr întreg) și *subarmonici* (rangul lor este un număr subunitar).
- *amplitudinea armonicilor* (se definește ca amplitudinea oricărei sinusoid). Se exprimă fie în procente din fundamentală, fie în unități absolute sau relative.
- *valoarea defazajelor dintre armonici diferite* (poziția relativă a armonicilor).

Exemple de curbe oscilografiate:

Fig.1

- sinusoidă turtită
- ecuație matematică $y = \sin(x) + 0.25 \sin(3x)$
 \Leftarrow sinusoidă de 50 Hz (frecvența fundamentală) + sinusoidă cu frecvența triplă față de fundamentală (150 Hz) - armonica de rang 3 - și amplitudinea $\frac{1}{4}$ (0.25 x) față de a fundamentalei

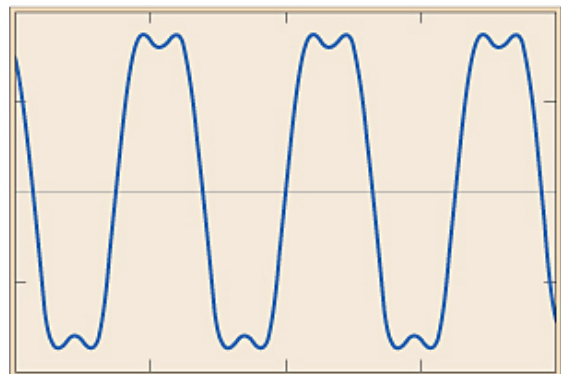


Fig. 2

- sinusoidă ascuțită
- ecuație matematică $y = \sin(x) - 0.25 \sin(3x)$
- curbă cu aceeași compoziție de armonici ca și în cazul precedent, cu excepția faptului că armonica de rang 3 este în opoziție de fază cu fundamentală (sign -) \Rightarrow diferență semnificativă între profilurile celor două curbe

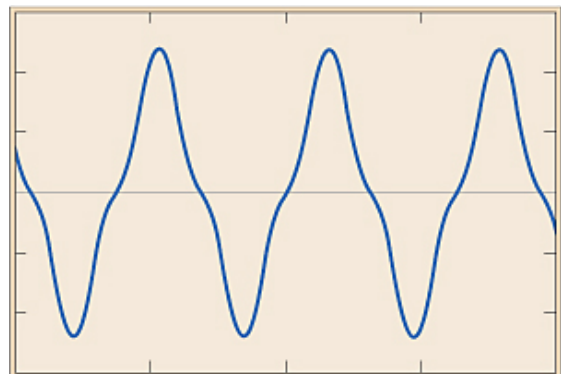


Fig. 3

- curba conține și alte câteva armonici în plus față de cea de rang 3, unele în fază, altele defazate față de fundamentală
- pe măsură ce spectrul de armonici devine mai bogat, curba mărimii de stare are un profil mai complex, fiind mult mai deviată de la profilul unei sinusoide
- un spectru armonic bogat poate „acoperi” complet sinusoida fundamentală, nemaisemănând nici pe departe cu o sinusoidă.

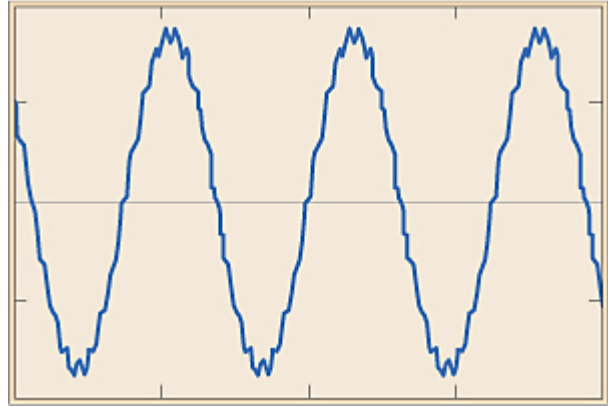
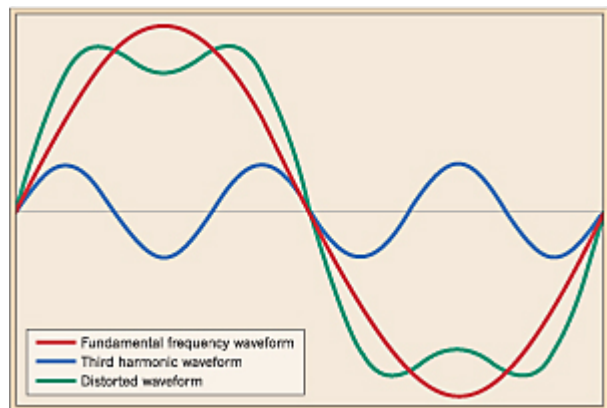


Fig. 4

Analiza armonicilor. Când sunt cunoscute amplitudinile și rangul armonicilor, este simplu de reconstituit curba de origine distorsionată (deformată) - prin însumarea punct cu punct a armonicilor componente. EX. curba din Fig. 1 este sintetizată în Fig. 4 (curba verde) prin însumarea amplitudinilor celor două componente armonice - fundamentala (curba roșie) și armonica de rang 3 (curba albastră).



Pe de altă parte, descompunerea curbei deformate în componente armonice este mult mai dificil de realizat. Acest proces necesită **analiza Fourier**, care implică un mare volum de calcul. Actualmente, acest lucru este facilitat de echipamentele electronice care pot realiza o analiză corectă în timp real. Analizoarele trifazate sunt capabile să înregistreze digital o curbă trifazată și să exercite funcții de analiză, inclusiv analiza Fourier, în scopul determinării conținutului de armonici. Provocarea legată de a aceste echipamente se referă la funcțiile de detectare și diagnoză a problemelor legate de armonici în majoritatea sistemelor electroenergetice.

Când se vorbește despre armonici în instalațiile electrice ne referim în principal la curenți, deoarece armonicile rezultă datorită curenților și cea mai mare parte a efectelor nocive este datorată acestor curenți. Este foarte important însă ca să fie măsurate atât valorile tensiunilor armonice, cât și ale curenților și ca valorile determinate să fie specificate explicit ca valori ale tensiunii și curentului.

Curenții armonici sunt prezenți în sistemul electric de alimentare de mai mulți ani. Inițial, ei erau determinați de redresoarele cu mercur utilizate pentru a asigura conversia tensiunii alternative în tensiune continuă pentru calea ferată și pentru acționări de tensiune continuă cu viteză variabilă din industrie. În ultimul timp clasa de tipuri și numărul de unități de echipament care produce armonici a crescut foarte mult și va continua să crească, astfel că proiectanții și birourile de studii trebuie acum să ia în considerație foarte atent armonicile și efectele datorate lor.

2. Cum sunt generate armonicile

Într-un sistem energetic ideal – perfect curat – formele curbelor de tensiune și de curent electric sunt perfect sinusoidale. În practică **curenții** nesinusoidali apar dacă sarcina este neliniară în raport cu tensiunea aplicată.

În cazul unui circuit simplu având numai sarcini liniare rezistive, inductive sau capacitive, curentul care circulă este proporțional cu tensiunea aplicată (la o anumită frecvență) astfel că, dacă tensiunea aplicată este sinusoidală va circula un curent sinusoidal – Fig. 5. - caracteristica de sarcină a unei sarcini liniare. Dacă în circuit există un element reactiv se va produce un defazaj între curba de tensiune și cea de curent; factorul de putere este redus, dar circuitul poate fi încă liniar.

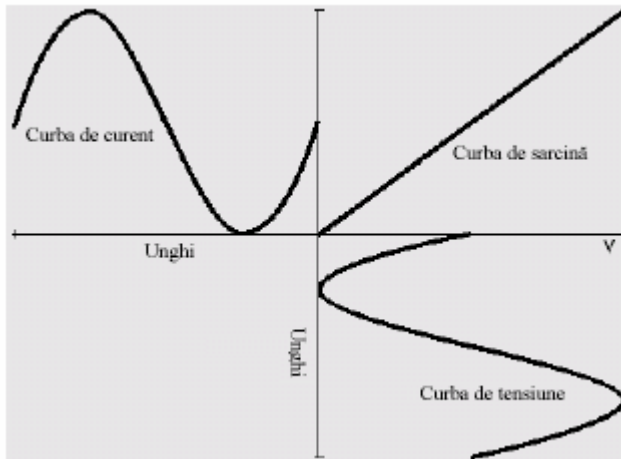


Fig.5 – Forma curbei de curent într-o sarcină liniară

În fig.6 se prezintă situația în care sarcina este constituită dintr-un redresor și un condensator, ca la intrarea unei surse în comutație (SMPS) tipice. În acest caz curentul circulă numai când tensiunea de alimentare va depăși tensiunea de la bornele condensatorului, de exemplu în apropierea punctului de maxim al curbei de tensiune, ceea ce se observă pe caracteristica de sarcină.

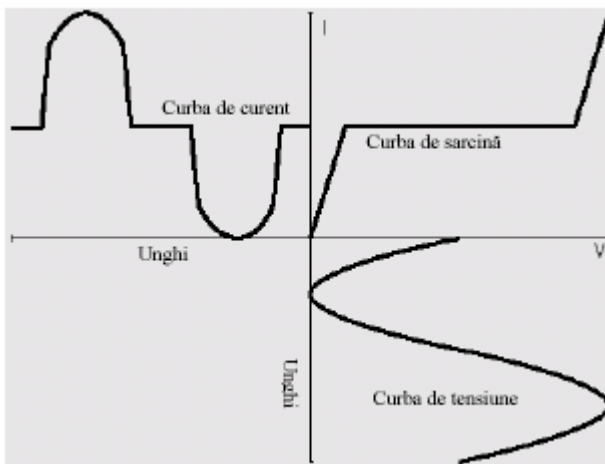


Fig.6 – Forma curbei de curent într-o sarcină neliniară

În practică, caracteristica de sarcină (precum și forma curbei de curent) vor fi mult mai complexe decât cele prezentate; pot fi asimetrice și histeretice, punctele de inflexiune și pantele se vor modifica odată cu încărcarea.

Pentru curbe simetrice – semiperioadele pozitivă și negativă având aceeași mărime și aceeași formă – armonicile de rang par sunt nule.

Armonicile de rang par sunt acum relativ rare, ele apăreau în mod obișnuit când se utilizau vechile redresoare.

În Fig. 7 este prezentat circuitul echivalent al unei sarcini neliniare. Ea poate fi modelată ca o sarcină liniară în paralel cu un număr de surse de curent, câte o sursă pentru fiecare curent armonic de o anumită frecvență.

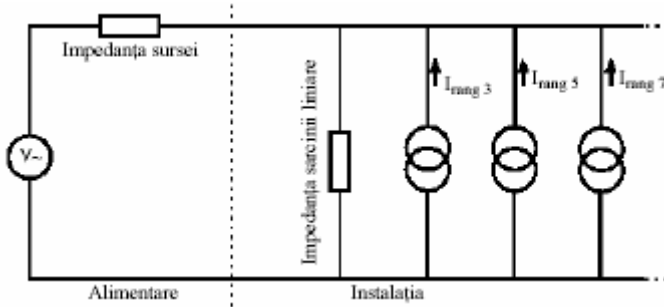


Fig.7 – Circuitul echivalent al unei sarcini neliniare

Curenții armonici generați de sarcină – sau mai exact conversia de către sarcină din curentul fundamental a curenților armonici - vor circula în circuit prin impedanța sursei și toate celelalte ramuri în paralel. În consecință vor apărea tensiuni armonice pe impedanța sursei de alimentare și acestea vor fi prezente peste tot în instalație.

Sursele de armonici sunt uneori reprezentate ca generatoare de tensiune. Dacă acest lucru ar fi adevărat, impedanța sursei nu ar avea nici o influență asupra amplitudinii tensiunii armonice a sursei. În realitate amplitudinea acestei tensiuni este proporțională – până la o anumită limită – cu impedanța sursei, ceea ce indică faptul că sursa de armonici se comportă mai curând ca o sursă de curent.

Impedanțele interne ale surselor sunt foarte reduse, astfel că distorsiunea armonică a tensiunii rezultată din curentul armonic este foarte mică și adesea mult sub fondul rezidual (*background*). Aceasta poate însă conduce la erori, deoarece dă impresia că nu ar fi probleme de armonici când de fapt există curenți armonici importanți. Este un caz similar cu acela în care se încearcă măsurarea curentului la pământ cu ajutorul unui voltmetru. De câte ori se bănuiește prezența armonicilor sau când se încearcă verificarea absenței acestora, trebuie măsurat curentul.

3. Surse de armonici

Acestea sunt :

- sursele de tensiune sau de curent* care alimentează sisteme ce conțin elemente liniare; într-un sistem electroenergetic aceste surse sunt generatoarele sincrone, pentru care chiar la mersul în gol tensiunile la borne nu sunt sinusoidale, precum și redresoarele de orice tip;
- elemente neliniare sau deformante*, reprezentate de bobine și transformatoare cu miez saturat, condensatoare neliniare, dispozitive redresoare, dispozitive semiconductoare comandate și necomandate;
- acțiunea simultană a elementelor de tipul celor a), b).

În accepțiunea Prof. Budeanu, elementele deformante se clasifică în două categorii:

- elemente deformante de categoria I* (elementele neliniare de mai sus);
- elemente deformante de categoria a II-a* (reprezentate în cadrul circuitelor de curenți tari cu frecvențe industriale, de bobine și condensatoare).

Tipuri de echipamente care generează armonici

Curenții armonici sunt generați de sarcini neliniare. Acestea includ:

Sarcini monofazate, de exemplu:

- surse de putere în comutație (*Switched mode power supplies* - SMPS);
- balasturi electronice pentru lămpile fluorescente;
- unități mici de alimentare neîntreruptibilă (*Uninterruptible power supplies* - UPS).

Sarcini trifazate, de exemplu:

- acționări cu viteză variabilă;
- unități mari UPS.

Surse de armonici în SEE

- instalații electrice și electronice industriale, cu caracter neliniar: mutatoare, instalații de electroliză, cuptoare cu arc;
- generatoare și elemente de rețea care prin construcția lor determină la ieșire mărimi cu formă nesinusoidală (mașini sincrone, transformatoare de putere);
- elemente de rețea în regimuri perturbate (mașini electrice și transformatoare supraîncărcate, linii electrice supratensionate prin efect Corona);
- aparate electrice și electronice pentru utilizări casnice și birotică;
- aparate de înaltă tensiune și ultrafrecvență (ex. cuptoare cu microunde).

3.1. Sarcini monofazate

Sursă de putere în comutație (SMPS)

Majoritatea echipamentelor electronice moderne utilizează surse în comutație (SMPS).

Acestea diferă de sursele mai vechi în care tradiționalul transformator coborâtor și redresorul sunt înlocuite cu o redresare directă comandată a alimentării pentru a încărca o baterie de condensatoare, din care curentul continuu pentru sarcină se obține, printr-o metodă adecvată, la bornele de ieșire, la tensiunea și valoarea cerută a curentului.

Avantajul – pentru producătorul de echipamente – este că dimensiunile, costul și greutatea sunt semnificativ reduse și unitatea energetică poate fi realizată practic pentru orice factor de formă cerut. Dezavantajul – în plus față de celelalte tipuri – este că în loc de curent continuu, sursa, absoarbe din rețeaua de alimentare un curent sub formă de pulsuri de curent care conțin o mare cantitate de armonici de rang 3 și mai mari și componente de înaltă frecvență armonică (fig. 8). Se prevede un filtru la intrare pentru a conduce la pământ componentele de înaltă frecvență din curentul de fază și din conductorul neutru, însă acesta nu are efect asupra curenților armonici care se propagă înapoi spre alimentare.

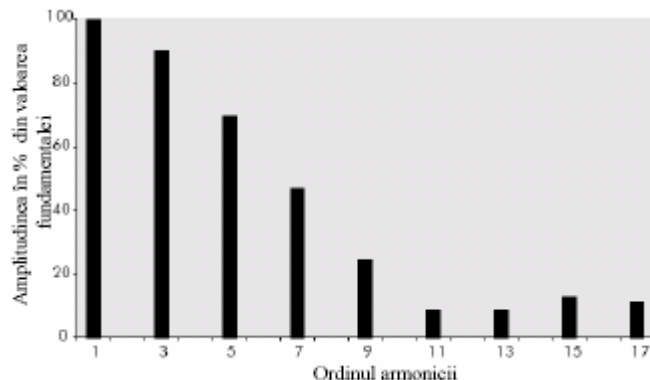


Fig.8. Spectrul armonic tipic al unui PC

Unitățile UPS monofazate au caracteristici foarte asemănătoare cu echipamentele SMPS. Pentru unitățile de mare putere a apărut în ultimul timp tendința realizării echipamentelor cu corecție de factor de putere (*Power factor corrector* - PFC). Acestea au rolul de a face ca sarcina de alimentată să apară ca o sarcină rezistivă, astfel încât curentul absorbit să apară sinusoidal și în fază cu tensiunea aplicată. S-a reușit ca curentul absorbit să aibă o formă triunghiulară de frecvență ridicată care este apoi mediată cu ajutorul filtrului de intrare la o formă sinusoidală. Nivelul complex al echipamentului nu este încă aplicabil la unitățile cu preț redus care constituie majoritatea sarcinilor din instalațiile comerciale și industriale.

Balasturi electronice pentru lămpi fluorescente

Balasturile electronice pentru lămpi fluorescente au devenit populare în ultimii ani datorită necesității creșterii eficienței. În general ele sunt doar cu puțin mai eficiente decât cele mai bune balasturi magnetice și în fapt, câștigul cel mai mare rezultă la nivelul lămpii fluorescente care este mai eficientă când este alimentată la frecvență ridicată decât la nivelul balastului electronic însuși. Avantajul lor principal este că nivelul de iluminare poate fi menținut pe o durată de viață mai mare prin controlul curenților din lampă, conducând însă la o micșorare a randamentului global. Inconvenientul principal este că generează armonici în rețeaua de alimentare.

Lămpile fluorescente compacte sunt destinate să înlocuiască lămpile cu incandescență cu filament din wolfram. Un balast miniaturizat este plasat în soclul lămpii și controlează tubul fluorescent cu diametrul de 8 mm. Lămpile fluorescente cu o putere de 11 W sunt destinate să înlocuiască lămpile cu incandescență de 60 W și au o durată de viață de 8000 ore.

Spectrul curenților armonici generați de aceste lămpi este prezentat în Fig.9. Aceste lămpi sunt utilizate din ce în ce mai mult înlocuind lămpile cu incandescență în sectorul casnic și în special în hoteluri în care frecvent apar probleme serioase datorate armonicilor.

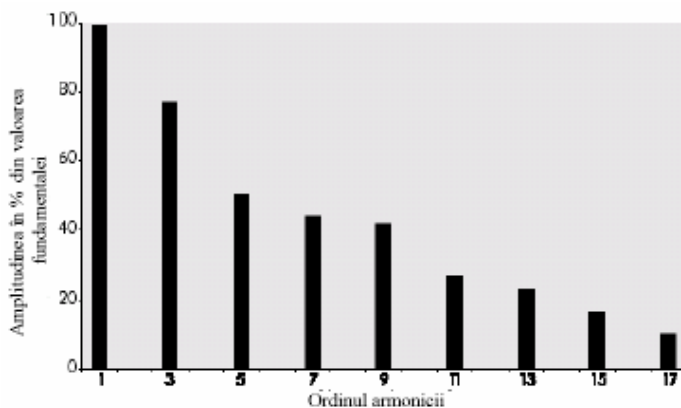
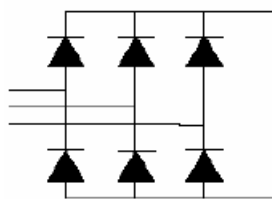


Fig. 9 - Spectrul armonic al unei lămpi fluorescente compacte tipice

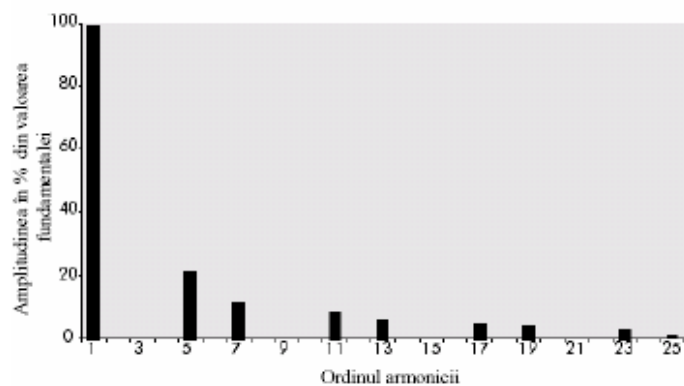
3.2. Sarcini trifazate

Variatoarele de viteză, unitățile UPS și convertoare de tensiune continuă sunt de regulă alimentate printr-o punte trifazată (fig. 10), denumită și punte cu 6 pulsuri (6 pulsuri pe perioadă, unul pe jumătate de perioadă și fază) în curentul continuu de ieșire.

O punte cu 6 pulsuri generează armonici de rang $6 \cdot n \pm 1$. În teorie, amplitudinea fiecărei armonici este invers proporțională cu rangul armonicii. Ex. 20 %, armonica rang 5 și 9 %, armonica rang 11 etc.



a.



b.

Fig.10. – Punte trifazată sau punte 6 pulsuri: a. schemă echivalentă ; b. spectru de armonici

Amplitudinea armonicilor este semnificativ redusă dacă se utilizează o punte cu 12 pulsuri (două punți de 6 pulsuri, alimentate de la înfășurările secundare conectate în stea și în triunghi ale unui transformator, fig. 11, determinând defazaje de 30° între tensiunile aplicate).

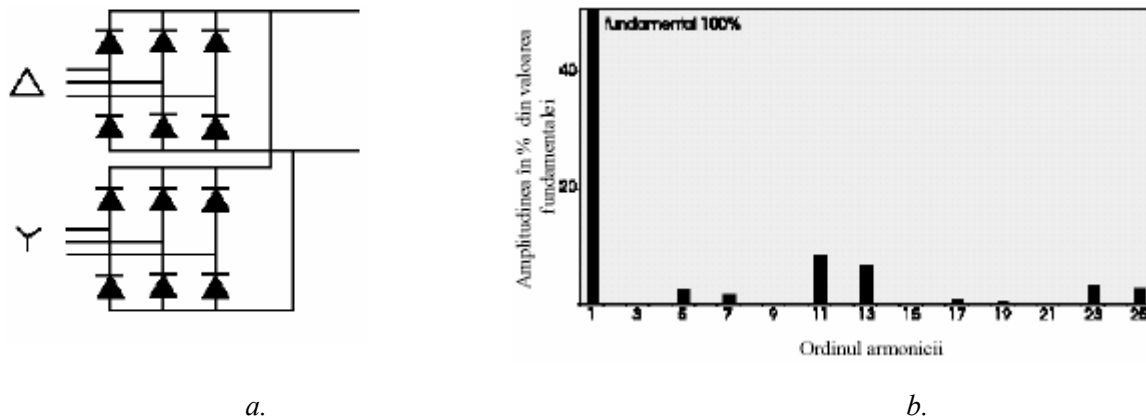


Fig. 11 – Punte trifazată dublă sau punte 12 –pulsuri: a- schema; b. – spectrul de armonici

Armonicile de rang $6 \cdot n$ sunt teoretic suprimate, dar în practică reducerea depinde de ajustarea convertorului și factorul tipic de reducere este între 20 și 50. Armonicile de rang $12 \cdot n$ rămân neschimbate. În acest caz curentul armonic total se reduce și totodată armonicile care rămân sunt de frecvență superioară și fac mai ușoară proiectarea unui filtru.

Adeesea producătorii de echipamente își iau unele măsuri de reducere a amplitudinii curenților armonici ca de exemplu prin adăugarea unui filtru sau bobine în serie.

O creștere în continuare a numărului de pulsuri la 24, obținută prin folosirea în paralel a două unități de 12 pulsuri cu o defazare de 15 grade, reduce curentul armonic total până la 4,5 % (din curentul de alimentare). Instalația ultra-sofisticată crește costul, astfel că acest tip de echipament va fi utilizat numai când este absolut necesar pentru a se încadra în limitele impuse de furnizor.

4. Probleme determinate de armonici

Curenții armonici determină probleme atât la nivelul distribuției, cât și la nivelul instalațiilor. Efectele și soluțiile sunt foarte diverse și vor fi tratate separat.

Probleme la nivelul instalațiilor

Există mai multe probleme generale determinate de armonici:

Probleme determinate de curenții armonici:

- supraîncărcarea conductorului de nul de lucru;
- supraîncălzirea transformatoarelor;
- acționarea intempestivă a întreruptoarelor;
- suprasolicitarea condensatoarelor pentru corecția factorului de putere;
- efect pelicular în conductoare.

Probleme determinate de tensiunile armonice:

- perturbații la trecerea prin zero a curbelor.

4.1. Creșterea pierderilor de putere activă

Prezența armonicilor de curent și de tensiune implică apariția unor efecte termice majorate, determinate de apariția pierderilor suplimentare de putere activă:

- pierderi în materialul conductor P_{Cu} ;
- pierderi în materialele magnetice P_{Fe} ;
- pierderi în dielectric P_d .

Circulația unor curenți nesinusoidali în elementele rețelei determină *pierderi suplimentare în materialul conductor* prin efect Joule-Lenz datorită:

- creșterii valorii efective față de regimul pur sinusoidal;
- creșterii rezistenței electrice a conductoarelor, având în vedere dependența de frecvență a acesteia (efectul pelicular și de proximitate).

În ipoteza neglijării componentei continue, aceste pierderi pot fi calculate cu relația :

$$P_{Cu} = \frac{3}{2} \sum_{k=1}^{\infty} R_k I_{\max,k}^2 \quad (1)$$

$I_{\max,k}$ – amplitudinea armonicii de rang k ;

R_k – rezistența electrică a elementului, calculată pentru frecvența armonicii de rang k .

Dacă se neglijează variația cu frecvența a rezistenței electrice (se consideră că $R_k=R_1$), relația (2) poate fi pusă sub forma :

$$P_{Cu} = \frac{3}{2} R \sum_{k=1}^{\infty} I_{\max,k}^2 = \frac{3}{2} R I_{\max,k}^2 (1 + \delta_I^2) \quad (2)$$

unde δ_I – factorul de distorsiune al curbei curentului electric.

Relația anterioară pune în evidență faptul că pierderile active în elementele conductoare pot crește mult în cazul funcționării sistemului în regim periodic nesinusoidal, comparativ cu cel sinusoidal.

Pierderile suplimentare în materialele magnetice apar datorită:

- fenomenului de histerezis ;
- existenței curenților turbionari.

Pentru echipamentele monofazate cu caracteristici magnetice liniare (lucrând pe porțiunea liniară a caracteristicii de magnetizare), prin însumarea pierderilor pe fiecare armonică se poate scrie :

$$P_{Fe} = c_1 \sum_{k=1}^{\infty} \frac{U_{\max,k}^p}{k^{p-1}} + c_2 \sum_{k=1}^{\infty} U_{\max,k}^2 \quad (3)$$

unde : $c_1 = a_H c^p f_1$; $c_2 = a_T c^2 f_1$

$U_{\max,k}$ – amplitudinea armonicii de rang k de tensiune ;

a_H, a_T – constante care depind de natura materialului ;

p – constanta lui Steinmetz (exponent a cărui valoare 1,5...2,5 depinde de natura materialului) ;

Pentru echipamentele trifazate, pierderile determinate cu relația anterioară se vor multiplica cu 3.

În cazul echipamentelor care prezintă fenomene de histerezis și/sau lucrează pe porțiunea neliniară a caracteristicii de magnetizare, adunarea puterilor pe fiecare armonică este aproximativă, dar acceptabilă pentru situațiile din SEE.

Pierderile în materialele dielectrice sunt localizate în SEE în principal în :

- dielectricul condensatoarelor ;
- izolația liniilor electrice.

Pierderile sunt determinate de componenta activă a curentului electric prin izolație și de conductivitatea materialului dielectric. Valoarea componente active a curentului este influențată de temperatura și umiditatea mediului înconjurător. Mărimea definitorie pentru pierderile active în dielectric este tangenta unghiului de pierderi, care pentru armonica de rang k are valoarea:

$$\tan \delta_k = \frac{Q_k}{P_k} \quad (4)$$

în care P_k – pierderile de putere activă corespunzătoare armonicii de rang k ;

Q_k – puterea reactivă corespunzătoare aceleiași armonici.

■ *Condensatorul electric* – considerat ca element liniar, plasat într-o rețea afectată de regim periodic nesinusoidal, este caracterizat de pierderi dielectrice pe fază date de :

$$P_{dC} = \pi C f \sum_{k=1}^{\infty} k U_{\max,k}^2 \tan \delta_k \quad (5)$$

unde C este capacitatea condensatorului.

■ *Liniile electrice* – pierderile dielectrice pot fi calculate (temperatură și umiditate normale) :

$$P_{dLE} = 3\pi f L \sum_{k=1}^{\infty} k C_k U_{\max,k}^2 \tan \delta_k \quad (6)$$

cu C_k – capacitatea lineică pe fază corespunzătoare armonicii de rang k (pozitivă, negativă sau zero, conform $k = 3m \pm 1$ sau $k = 3m$);

L – lungimea liniei.

Pentru a se limita suprasolicitarile datorate pierderilor suplimentare în regim periodic nesinusoidal, normativele în vigoare impun dimensionarea condensatoarelor pentru următoarele încărcări de durată:

i) *în curent*

$I_{\max} = 1,3 I_N$ - corespunzând unui factor de distorsiune de curent $\delta_I = 83\%$;

ii) *în tensiune*

$U_{\max} = 1,1 U_N$ - ceea ce permite condensatoarelor să suporte supratensiunile la borne determinate de regimul deformant.

iii) *putere reactivă*

$Q_{\max} = U_{\max} I_{\max} = 1,43 Q_N$

Puterea reactivă maximă furnizată de baterie corespunde încărcărilor suplimentare admise pentru tensiune și curent.

4.2. Supratensiuni în nodurile rețelei sau la bornele echipamentelor

i) *Rezonanța pe armonici de tensiune*

Dacă într-o rețea electrică apare o latură formată din elemente R , L , C , constante în timp și invariabile cu temperatura și frecvența, iar potențialul față de pământ al nodului de conectare al sarcinii N , este nesinusoidal:

$$u_N = \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} U_k \sin(k\omega_1 t + \alpha_k) \quad (7)$$

Curentul electric de armonică de rang k ce parcurge această latură poate fi determinat cu relația:

$$\underline{I}_k = \frac{U_k}{\underline{Z}_k} = \frac{U_k e^{j\alpha_k}}{R + j \left(k\omega_1 L - \frac{1}{k\omega_1 C} \right)} \quad (8)$$

Dacă în latura analizată, pentru armonică de rang k , elementele reactive satisfac relația:

$$k_r \omega_1 L = \frac{1}{k_r \omega_1 C} \quad (9)$$

atunci intensitatea \underline{I}_{kr} a curentului armonic de rang k , rezultă:

$$\underline{I}_{kr} = \frac{U_{kr}}{R} e^{j\alpha_{kr}} \quad (10)$$

Din relația (10) se observă că armonica de curent de rang k este în fază cu tensiunea armonică de același rang și are o valoare mare, fiind limitată numai de rezistența electrică a circuitului.

În același timp, la bornele elementelor reactive de pe aceeași latură vor apărea supratensiuni de valori mari:

$$\underline{U}_{Lkr} = -\underline{U}_{Ckr} = \frac{k_r \omega_1 L}{R} U_{kr} e^{j(\alpha_{kr} + \pi/2)} \quad (11)$$

Factorul de supratensiune la bornele bobinei sau condensatorului este egal cu $k_r \omega_1 L/R$ și crește cu scăderea rezistenței R .

ii) *Creșterea potențialului punctului neutru pentru conexiuni în stea ale transformatoarelor sau ale altor receptoare*

Un receptor echilibrat sau un transformator coborât, trifazat, conectat într-o rețea electrică trifazată, echilibrată, cu tensiuni sinusoidale, la frecvență fundamentală, are potențialul punctului neutru egal cu zero în raport cu pământul, dacă prezintă o conexiune stea. Dacă rețeaua electrică este afectată de un regim periodic nesinusoidal, la bornele echipamentului se aplică tensiunile armonice:

$$\begin{aligned} u_A &= \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} U_k (\sin k\omega_1 t + \alpha_k) \\ u_B &= \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} U_k (\sin k\omega_1 t + \alpha_k - 2\pi/3) \\ u_C &= \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} U_k (\sin k\omega_1 t + \alpha_k + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (12)$$

Pentru armonicile de rang $k = 3m$ ($m = 1, 2, 3..$), în punctul neutru apare un potențial față de pământ a cărui valoare depinde de raportul dintre impedanțele armonice ale laturii conexiunii în stea (fazei active) și circuitul de nul.

Potențialul față de pământ al punctului neutru are valoarea:

$$\underline{U}_{3m}^0 = \underline{U}_{3m}^a \frac{1}{1 + \frac{Z_{3m}^a}{3Z_{3m}^0}} \quad (13)$$

unde: Z_{3m}^a – impedanța armonică a fazei active;

Z_{3m}^0 – impedanța armonică a circuitului de nul.

Pentru armonicile de rang $k=3m\pm 1$, potențialul față de pământ al punctului neutru rămâne nul.

4.3. Supracurenți în rețelele electrice trifazate

i) *Rezonanța de curent în circuitele consumatorilor de energie electrică*

Pe barele de alimentare ale unui consumator industrial (fig.12) pot fi racordate:

- receptoare nesinusoidale (surse de curenți armonici);
- receptoare sinusoidale;

- baterii de condensatoare pentru compensarea puterii reactive.

Utilizarea bateriilor de condensatoare în instalațiile de joasă tensiune ale consumatorilor industriali poate determina apariția de fenomene de rezonanță paralel între bateria de condensatoare (C) și impedanța sistemului văzută din punctul de racordare (L_s).

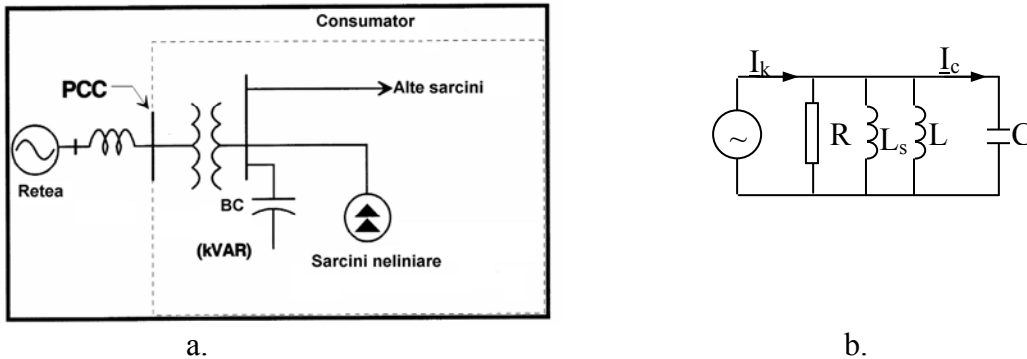


Fig. 12. Schema echivalentă pentru studiul circuitelor rezonante în regim deformant

Pentru un anumit regim de lucru, permanent și simetric, în planul armonicii de rang k , schema electrică echivalentă este reprezentată în fig.12.b., în care R este rezistența electrică echivalentă, care corespunde puterii active absorbită de consumator, $\omega_1 L$ – reactanța inductivă care corespunde puterii reactive, pe frecvența fundamentală, absorbită de consumator, $\omega_1 L_s$ – reactanța inductivă a sistemului de alimentare și care corespunde curentului de s.c. al sistemului pe barele de alimentare ale consumatorului; $1/\omega_1 C$ – reactanța capacitivă a bateriei de condensatoare, pe frecvența fundamentală, care corespunde instalației de compensare a puterii reactive.

Curentul electric armonic I_{ck} care parcurge circuitul bateriei de condensatoare, în funcție de curentul I_k determinat de sursele de curenți armonici conectate la barele consumatorului, rezultă pe baza schemei echivalente din fig.12.b:

$$I_{ck} = I_k \frac{1}{\frac{k^2 \omega_1^2 C \lambda - 1}{k^2 \omega_1^2 C \lambda} - j \frac{1}{Rk \omega_1^2 C}} \quad (14)$$

Dacă armonica de rang k satisface condiția:

$$k^2 \omega_1^2 C \alpha \lambda = 1 \quad (15)$$

unde: $\lambda = \frac{LL_s}{L + L_s}$, intensitatea curentului prin bateria de condensatoare va fi determinată de relația:

$$I_{ck} = j I_k R C k \omega_1 \quad (16)$$

Condiția (15) este îndeplinită pentru:

$$k^2 = \frac{1}{\omega_1 \lambda \omega_1 C} = \frac{S_{sc}}{Q} \cdot \frac{L + L_s}{L} \quad (17)$$

unde: S_{sc} – puterea de s.c. pe frecvența fundamentală, pe barele consumatorului;

Q – puterea reactivă, pe frecvența fundamentală, a bateriei de condensatoare conectată la aceleași bare.

Pe baza relațiilor între mărimile implicate în relația de definiție, rezultă pentru curentul electric pe armonica de rang k ce parcurge bateria de condensatoare expresia:

$$\underline{I}_{ck} = j\underline{I}_{-k} \frac{\sqrt{QS_{sc}}}{P} \sqrt{1 + \frac{Q_{abs}}{S_{sc}}} = j\underline{I}_{-k} q \sqrt{1 + \frac{Q_{abs}}{S_{sc}}} \quad (18)$$

unde cu q s-a notat factorul de calitate al circuitului în absența puterii reactive absorbită de receptoarele liniare.

Frecvența de rezonanță se determină:

i) *în cazul existenței unei surse de curenți armonici:*

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_s C}} = f_1 \sqrt{\frac{S_{sc}}{Q}} \quad (19)$$

ii) *în cazul existenței unei surse de tensiuni armonice:*

$$f_r = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{L_s + L}{C L_s L}} \quad (20)$$

Inductivitatea sistemului de alimentare (în punctul de racord al bateriei) se calculează în funcție de puterea de s.c. în PCC:

$$L_s = \frac{U^2}{2\pi f_1 S_{sc}} \quad (21)$$

Capacitatea bateriei de condensatoare rezultă în funcție de puterea sa reactivă:

$$C = \frac{Q_{BC}}{2\pi f_1 U^2} \quad (22)$$

Pentru amplasarea BC, la marea majoritate a consumatorilor industriali, trebuie avute în vedere următoarele reguli:

- dacă puterea aparentă a receptorului deformant S_{nel} este mai mică decât 10% din cea a transformatorului la care este racordat S_T , bateria poate fi montată fără a apărea probleme de rezonanță;
- dacă $S_{nel} > 0,3 S_T$ și $Q_{BC} < 0,2 S_T$, de asemenea în mod normal, nu apar rezonanțe;
- dacă $S_{nel} > 0,3 S_T$, bateria de condensatoare nu poate fi montată direct la bare și trebuie să fie element component al unui filtru.

ii) *Supraîncărcarea circuitului de nul al rețelelor trifazate*

În cazul rețelelor trifazate cu patru conductoare, existența surselor de curenți armonici determină circulația prin firul neutru a unui curent armonic obținut prin însumarea armonicilor de rang $3m$. Valoarea efectivă a curentului care parcurge conductorul de nul rezultă:

$$I^0 = \frac{3}{\sqrt{2}} \sqrt{\sum_{m=1}^{\infty} I_{\max,3m}^2} \quad (23)$$

unde $I_{\max,3m}$ – amplitudinea armonicii de rang $k=3m$.

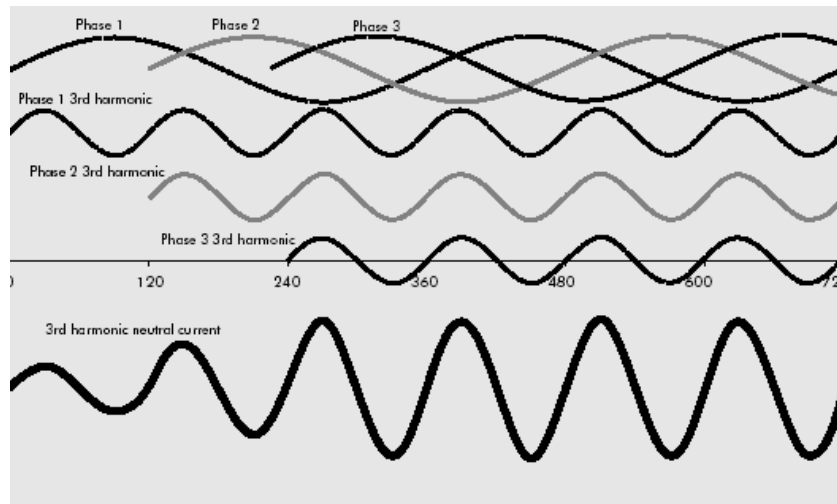


Fig.13. Curentul prin conductorul neutru

Armonica 3 a fiecărei faze este identică, cu o frecvență triplă și are deci o perioadă de trei ori mai mică față de fundamentală. Curentul datorat armonicilor trei în neutru este reprezentat în partea de jos a diagramei. În acest caz curentul armonic pe fază reprezentând 70 % din curentul pe fază va determina, la nivelul conductorului neutru, un curent armonic de 210 % din curentul pe fază.

Măsurători efectuate în imobilele comerciale dau valori de ordinul 150 până la 210 % din curentul pe fază în conductoarele neutru, de multe ori cu secțiuni pe jumătate față de conductorul activ.

Problema supraîncălzirii circuitului de nul (aria secțiunii transversale a acestuia, în construcțiile uzuale, este inferioară celei corespunzătoare conductoarelor de pe fazele active) apare în special în rețelele de distribuție de j.t., în care o pondere însemnată a consumatorilor o reprezintă sistemele de calcul și instalațiile de iluminat cu descărcări în gaze și vapori metalici. Acestea se caracterizează printr-o valoare ridicată a armonicilor de rang 3 (γ_{i3} poate atinge 80%), astfel că prin conductorul de nul vor circula curenți de intensitate ridicată.

Având în vedere că acest conductor nu este prevăzut cu sisteme de protecție, riscul de supraîncălzire și generare de incendii poate fi important.

4.4. Efecte ale poluării armonice asupra echipamentelor din rețelele electrice

Efectele asupra transformatoarelor trifazate

Transformatoarele sunt afectate de armonici pe două căi.

1. În primul rând, pierderile prin curenți Foucault, reprezentând în mod normal aproximativ 10 % din pierderile la sarcină nominală, cresc cu pătratul rangului armonicilor. În practică, pentru un transformator funcționând la puterea nominală și care alimentează o sarcină cuprinzând echipamente informatice (IT), pierderile totale vor fi de două ori mai mari decât în cazul alimentării unei sarcini lineare. Rezultatul este o temperatură mult mai ridicată care conduce la o reducere corespunzătoare a duratei de viață. În fapt, în aceste circumstanțe durata de viață se reduce de la aproximativ 40 ani la circa 40 de zile! Din fericire sunt puține transformatoare încărcate la sarcină nominală, dar efectul trebuie luat în considerare când se selectează instalația.

2. Cel de al doilea efect se referă la armonicile cu rang multiplu de 3. Ele se regăsesc în toate fazele înfășurării unui transformator cu conexiune triunghi, acestea având un traseu circular în înfășurări. Curenții armonici cu rang multiplu de 3 sunt efectiv absorbiți de înfășurare și nu se propagă spre alimentare, astfel că transformatoarele cu înfășurare triunghi sunt utile ca transformatoare de izolare. De precizat că celelalte armonici, care nu au rang

multiplu de 3, trec prin înfășurare. Curentul de circulație, care se închide între înfășurări, trebuie luat în considerare la dimensionarea transformatorului.

Rezultă:

- ✓ Creșterea pierderilor de putere activă în materialul conductor datorită creșterii rezistenței electrice a înfășurărilor, odată cu rangul armonicilor de curent;
- ✓ Creșterea pierderilor în materialele magnetice, în prezența armonicilor superioare datorită, în principal, creșterii pierderilor prin curenți turbionari;
- ✓ Creșterea solicitărilor electrice ale izolațiilor, determinată atât de valoarea maximă a tensiunii la borne, cât și de viteza de variație a acesteia;
- ✓ Solicitări mecanice suplimentare;
- ✓ Creșterea valorii factorului de distorsiune al curentului în cazul funcționării pe porțiunea neliniară a caracteristicii de magnetizare (datorită supraîncărcării, regim ce poate fi determinat tocmai de poluarea armonică; în acest caz, este posibil ca la un nivel redus al armonicilor de tensiune să apară un nivel ridicat al armonicilor de curent).

Aceste efecte duc la reducerea randamentului transformării energiei electrice, dar și la influențarea negativă a modului și regimurilor de funcționare.

Pentru a evita depășirea temperaturii maxim admise de fabricant datorită pierderilor suplimentare în înfășurări și în miez este necesară reducerea încălzirii, respectiv aplicarea unui factor de depreciere k_t a puterii nominale a transformatorului:

$$S = k_t S_N \quad (24)$$

unde S – puterea aparentă în regim nesinusoidal;

S_N – puterea nominală a transformatorului

$$k_t = \frac{1}{\sqrt{1 + 0,1 \sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{I_k}{I_N} \right)^2 k^{1,6}}} \quad (25)$$

cu I_N – curentul nominal al transformatorului;

I_k – valoarea efectivă a armonicilor de rang k .

Efectele asupra funcționării mașinilor rotative constau în:

- ✓ Creșterea temperaturii bobinajelor și a miezului magnetic datorate pierderilor suplimentare în materialul conductor și în materialele magnetice;
- ✓ Modificări ale cuplului mașinii electrice, conducând la reducerea randamentului acesteia;
- ✓ Apariția de oscilații ale cuplului de torsiune pe arborele mașinii, contribuind la îmbătrânirea materialului și la vibrații suplimentare;
- ✓ Modificări ale inducției magnetice în întrefierul mașinii datorită armonicilor de rang superior;
- ✓ Interacțiuni între fluxul magnetic determinat de fundamentală și cel determinat de armonicile superioare.

Au fost puse în evidență aspecte ca:

- armonicile de rang $k = 3m$ nu determină inducție în întrefier;
- armonicile determină creșterea pierderilor de putere activă și deci a temperaturii mașinii;
- armonicile de rang $k = 3m \pm 1$ determină apariția unui cuplu în sensul de rotație, respectiv în sens contrar, având în vedere că viteza relativă de rotație a fazorului inducție magnetică (cu amplitudinea proporțională cu amplitudinea de rang k a curentului electric) în raport cu rotorul este:

- i. $\pm (k \mp 1)\omega_1 = \pm 3m\omega_1$ la mașinile sincrone;

- ii. $\pm (k \mp 1 + s)\omega_1 = \pm (3m \pm s)\omega_1$ la mașinile asincrone (s – alunecarea)

mașinii).

- apar cupluri pulsatorii cu frecvența $\pm 3mf_1$ la mașinile sincrone și $\pm (3m\pm s)f_1$ la mașinile asincrone, care acționează asupra arborelui mașinii și pot conduce la rezonanțe mecanice în cazul unor frecvențe egale cu frecvența proprie de vibrație a arborelui, amplificând astfel zgomotele și solicitând suplimentar materialul.

În cazul motoarelor electrice conectate direct la rețeaua de distribuție, influența armonicilor superioare ale tensiunii de alimentare este, în general, mică (având în vedere valorile impuse factorului de distorsiune armonică). Norma CEI 34 –1 impune fabricanților de mașini ca motoarele de tensiune alternativă să poată funcționa fără probleme în rețelele având factorul armonic de distorsiune $FA \leq 2\%$ (FA se calculează pentru $k \leq 13$).

$$FA = \sqrt{\sum_{k=2}^{\infty} \left(\frac{U_k}{U_1}\right)^2} \frac{1}{k} \quad (26)$$

Dacă rețeaua de alimentare este caracterizată de o distorsiune mai mare, poate apărea necesitatea reducerii încărcării mașinii (o depreciere a puterii motorului cu 5...10% poate fi impusă în cazuri foarte defavorabile).

O problemă specifică apare în cazul acționărilor cu viteză variabilă (AVV), unde motoarele sunt alimentate prin intermediul convertoarelor statice de frecvență. Acestea (mai puțin cele care conțin invertoare cu comandă PWM) realizează o tensiune puternic distorsionată, care poate conduce la solicitări termice și mecanice puternice ale motorului de acționare. În aceste cazuri, este necesară analiza posibilităților practice de reducere a perturbațiilor și limitelor de solicitare ale motorului.

Efecte asupra echipamentelor electronice

Echipamentele electronice utilizate în sistemele de reglaj sunt alimentate, în general, cu tensiune sinusoidală, dar ele pot constitui surse poluante pentru rețeaua la care sunt racordate, datorită modului specific de modificare a mărimilor controlate (reglaj, de fază, reglaj de durată, etc.).

Aplicarea unei tensiuni nesinusoidale la bornele acestor echipamente duce la modificarea caracteristicilor lor tehnice, cu efecte negative asupra comenzilor și o funcționare necorespunzătoare a echipamentului.

Mecanismele prin care echipamentele electronice sunt afectate de poluarea armonică pot fi:

- Posibilitatea trecerilor multiple prin zero ale curbei de tensiune ca urmare a distorsiunii armonice prezintă o problemă deosebită, deoarece un număr mare de circuite electronice își bazează funcționarea pe sincronizarea cu trecerile prin zero ale tensiunii rețelei. Apariția mai multor astfel de puncte (decât cele considerate pentru fundamentală) afectează funcționarea echipamentului, care nu își va îndeplini corect funcțiunile. În multe circuite electronice, comutarea dispozitivelor semiconductoare se face la tensiune zero, pentru a reduce interferențele electromagnetice și șocurile de curent. Trecerile multiple prin zero ale curbei de tensiune pot afecta și în acest caz, funcționarea corectă a echipamentelor.
- Amplitudinea curbei de tensiune, respectiv valoarea factorului de vârf, trebuie avute în vedere deoarece unele surse electronice utilizează această informație pentru a asigura încărcarea condensatorului de filtrare. Prezența armonicilor poate determina însă creșterea sau reducerea amplitudinii (efectul de ascuțire sau aplatizare a curbei) tensiunii rețelei. Ca urmare, tensiunea furnizată de sursă se modifică, chiar dacă valoarea efectivă a tensiunii de intrare este egală cu valoarea nominală. Funcționarea echipamentelor alimentate de sursă este afectată, începând cu creșterea sensibilității la goluri de tensiune și ajungând la grave disfuncționalități. Pentru evitarea acestor efecte, unii fabricanți de calculatoare limitează

valorile factorului de vârf la $k_v = \sqrt{2} \pm 0,1$, iar alții impun ca factorul de distorsiune să nu depășească 5%.

- Interarmonicile și subarmonicile pot afecta funcționarea monitoarelor și televizoarelor prin modularea în amplitudine a frecvenței fundamentale. Pentru niveluri de peste 0,5% ale acestor componente, pot să apară modificări periodice ale imaginii pe tuburile catodice.

Efecte asupra funcționării întreruptoarelor și siguranțelor fuzibile

Distorsiunea curentului electric afectează funcționarea:

■ ***Întreruptoarelor***, prin:

- creșterea pierderilor de putere activă care determină creșterea temperaturii elementelor sensibile ale declanșatoarelor termice și ale altor elemente componente;
- valorile ridicate ale parametrului di/dt afectează eficiența dispozitivelor de stingere a arcului electric;
- *acționarea intempestivă*

Întreruptoarele pentru curentul diferențial rezidual (*Residual Current Circuit Breaker - RCCB*) acționează pe baza însumării curentului de fază și de neutru și, dacă diferența nu este sub limita fixată, deconectează sarcina.

Declanșarea intempestivă poate să apară în prezența armonicilor din două cauze.

În primul rând, întreruptorul, fiind un dispozitiv electromecanic, poate să nu adune corect componentele de înaltă frecvență și ca urmare să declanșeze greșit.

În al doilea rând, tipul de echipament care generează armonici produce și un zgomot datorat comutației care trebuie filtrat înainte de conectarea la alimentare. Filtrele utilizate în acest scop au, în mod normal, câte un condensator între fază și pământ și între conductorul neutru și pământ și deci va exista o mică scurgere de curent spre pământ. Acest curent este limitat prin standarde la sub 3,5 mA și este de obicei mult mai mic, dar când toate echipamentele sunt conectate în același circuit, curentul de scurgere spre pământ poate fi suficient pentru acționarea întreruptorului.

Situația poate fi ușor remediată prin prevederea mai multor circuite, fiecare dintre acestea alimentând un număr mai mic de sarcini.

Declanșarea intempestivă a întreruptoarelor miniaturizate (MCB) este cauzată de obicei de curenți în circuit care sunt mai mari decât cei calculați sau măsoarați, datorită prezenței curenților armonici. Cele mai multe instrumente portabile nu măsoară valoarea efectivă adevărată și pot subestima curenții nesinusoidali cu 40 %.

- *Siguranțelor fuzibile*, care sunt sensibile la încălzirile suplimentare determinate de armonicile superioare. Apare deci o translatare a caracteristicii de funcționare, iar în cazurile foarte severe, o acționare intempestivă.

4.5. Alte efecte ale regimului periodic nesinusoidal

i) Perturbații electromagnetice în schemele de distribuție TNC

În schema de distribuție TNC, cu conductor de nul de lucru și nulul de protecție comune în întreaga rețea, curenții armonici de rang $k = 3m$ care se însumează în conductorul neutru al sistemelor de distribuție cu 4 conductoare, vor parcurge aceste circuite (inclusiv toate legăturile la masă și structurile metalice ale clădirilor), determinând căderi de tensiune importante. Acest fenomen poate genera efecte negative cum ar fi:

- coroziunea pieselor metalice;
- încărcarea anormală a unei legături de telecomunicații care conectează masele a două receptoare (ex. imprimanta și calculatorul);
- radiații electromagnetice care perturbă funcționarea corectă a sistemelor de calcul.

Ca urmare, se recomandă evitarea utilizării schemei TNC în sisteme care conțin surse importante de armonici 3m.

Sunt unele confuzii legate de felul în care să rezolve proiectanții această problemă.

Soluția simplă, acolo unde sunt utilizate cabluri monoconductoare, este să se realizeze dublarea secțiunii neutrului fie ca două conductoare separate, fie ca un singur conductor cu secțiune mai mare.

Nu este simplă situația în care se utilizează cabluri multiconductoare. Dimensionarea cablurilor multiconductoare (de exemplu, indicată în recomandările CEI 60364-5-523 și BS7671) presupune că sarcina este echilibrată și prin conductorul de neutru nu circulă curent, cu alte cuvinte, numai prin trei din patru sau cinci conductoare circulă curent și se încălzesc. Cum capacitatea maximă a cablului este definită numai prin cantitatea de căldură pe care o poate disipa la temperatura maximă admisibilă, rezultă că pentru cablurile prin care circulă curenții armonici de rang multiplu de 3 sarcina admisibilă trebuie redusă.

Recomandările CEI 60364-5-523, anexa C (informativă) sugerează o serie de factori de reducere a sarcinii în funcție de curentul armonic de rang multiplu de 3 existent în instalație. În figura 14 este indicat factorul de reducere în funcție de conținutul de armonici de rang multiplu de trei, conform recomandărilor CEI 60364-5-523, anexa C și conform metodei termice folosită anterior.

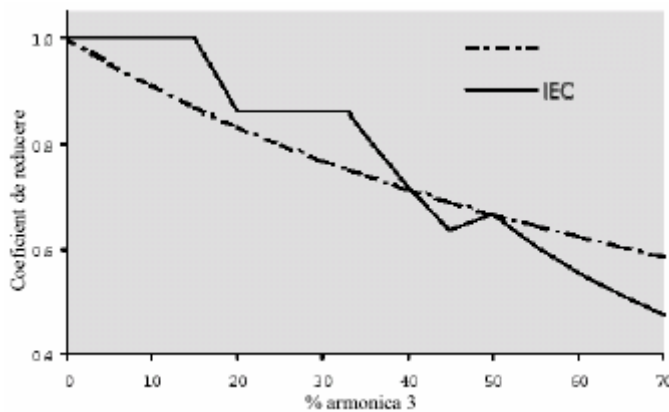


Fig. 14 - Reducerea capacității de încărcare a cablului în funcție de armonicele de rang multiplu de trei

În prezent reglementările sunt în discuție și este posibil ca noi reglementări și noi ghiduri de aplicație să fie introduse în viitorul apropiat în normativele naționale referitoare la dimensionarea conductoarelor.

ii) Influența asupra releelor de protecție

Cercetările efectuate au pus în evidență dificultatea prevederii comportamentului diferitelor rele de protecție în regim nesinusoidal. S-au constatat comportări diferite pentru același tip de releu, produs de fabricanți diferiți sau chiar pentru rele de același tip și model ale aceluiași fabricant. Răspunsul depinde de amplitudinea și faza armonicilor. În cazul releelor de protecție de tensiune, unii producători recomandă respectarea condiției:

$$\frac{1}{k} \frac{U_k}{U_1} < (1,5...2)\% \quad (27)$$

pentru k impar.

iii) Influențe asupra aparatelor de măsurare

Influențele sunt diferite la aparatele analogice și la cele numerice, acestea având o comportare diferită, în funcție de tipul lor.

- ✓ Funcționarea *aparatelor analogice* de măsurare în rețele poluate armonic este însoțită de erori relativ mari (în sens pozitiv și negativ), dependente de tipul aparatului.

Cel mai utilizat aparat pentru măsurarea energiei, contorul de inducție, este puternic afectat de distorsiunea curbelor de curent și tensiune.

Testele au evidențiat :

- erori de până la -20% în cazul unor deformări semnificative ale curbelor de tensiune și curent;
- erori de până la 5% pentru tensiune sinusoidală și curent deformat;
- posibile rezonanțe mecanice în domeniul (400...1000) Hz.
- ✓ *Ampermetrele și voltmetrele numerice* sunt imune la distorsiunea curbei doar dacă sunt prevăzute cu convertor de tensiune continuă – valoare efectivă a tensiunii alternative.
- ✓ Pentru *wattmetrele și contoarele de energie activă electronice*, erorile constatate în cazul conectării la sisteme poluate armonic au fost sub 0,1%. Ele sunt determinate de caracteristicile de frecvență ale canalelor de intrare (curent / tensiune) și de anumite neliniarități.

iv) Perturbații la trecerea prin zero a curbelor

Multe aparate electronice detectează punctul în care tensiunea de alimentare trece prin zero, pentru a determina momentul de cuplare a sarcinii. Aceasta se face deoarece cuplarea unei sarcini reactive la tensiunea zero nu generează fenomene tranzitorii, reducând interferența electromagnetică ca și solicitările la nivelul întrerupătoarelor statice. Dacă există armonici sau fenomene tranzitorii la nivelul alimentării, numărul de treceri prin zero crește, ceea ce conduce la disfuncționalități. În fapt pot fi câteva treceri prin zero într-o semiperioadă.

5. Indicatori de regim deformant

Fenomenele de poluare armonică sunt caracterizate în general de două grupe de indicatori:

1. indicatori caracteristici ai curbelor nesinusoidale;
2. indicatori de calitate ai regimului nesinusoidal.

5.1.Indicatori caracteristici ai curbelor nesinusoidale

O funcție periodică nesinusoidală $y(t)$ care îndeplinește condițiile lui Dirichlet admite o dezvoltare în serie Fourier de forma:

$$y(t) = Y_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \sqrt{2} Y_k \sin(k\omega t + \gamma_k) \quad (28)$$

Această funcție poate fi caracterizată printr-o serie de valori specifice și parametrii semnificativi, după cum urmează:

- *Valoarea medie* pe o perioadă de timp T

$$Y_{med} = \frac{1}{T} \int_0^T y(t) dt = Y_0 \quad (29)$$

Evident, valoarea medie pe o perioadă a unei astfel de funcții corespunde componentei continue, valoarea medie pe același interval a unei funcții sinusoidale (armonice) fiind nulă.

Valoarea medie pe o semiperioadă se definește analog, având expresia:

$$Y_{med,T/2} = \frac{2}{T} \int_0^{T/2} y(t) dt = Y_0 + \frac{2\sqrt{2}}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{Y_k}{k} \quad (29')$$

unde k este un număr impar (valoarea medie a armonicilor pare este nulă și pentru o jumătate de perioadă).

- *Valoarea maximă*

Reprezintă maximul înregistrat de funcția în discuție în intervalul precizat:

$$Y_{max} = \max\{y(t)\}_{t \in [0, T]} \quad (30)$$

- *Valoarea efectivă*

Definiția valorii efective a unei funcții sinusoidale se extinde și în cazul funcțiilor periodice nesinusoidale:

$$Y = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T y^2(t) dt} \quad (31)$$

Pentru o funcție periodică nesinusoidală se poate demonstra în plus că valoarea sa efectivă este egală cu rădăcina pătrată a sumei pătratelor valorilor efective ale amplitudinilor diverselor armonici:

$$Y = \sqrt{\sum_{k=0}^{\infty} Y_k^2} \quad (32)$$

În practică, valoarea efectivă se obține pentru o însumare până la un anumit ordin armonic finit, limitat la ordinul armonicilor superioare preponderente, capabile să ridice probleme tehnice și precizat în descompunerea în serie Fourier.

În cazul sistemelor trifazate simetrice de succesiune pozitivă (directă), în regim sinusoidal raportul dintre valoarea efectivă a tensiunii, respectiv a curentului de linie și valoarea efectivă a tensiunii, respectiv a curentului de fază este egal cu $\sqrt{3}$. În rețelele trifazate echilibrate cu tensiuni și curenți nesinusoidali simetrici intervin însă efecte care depind de modul de conexiune. Lipsa armonicilor de ordinul 3 în tensiunile sau curenții de linie determină pentru tensiunea sau curentul de linie o valoare efectivă mai mică decât valoarea efectivă a tensiunii sau curentului de fază multiplicată cu $\sqrt{3}$.

- Conexiunea stea fără fir neutru:

$$\frac{U_l}{U_f} = \sqrt{\frac{\sum_{\substack{k=1 \\ k \neq 3n}}^{\infty} U_{l,k}^2}{\sum_{k=1}^{\infty} U_{f,k}^2}} = \sqrt{3} \sqrt{1 - \frac{\sum_{k=3n}^{\infty} U_{l,k}^2}{\sum_{k=1}^{\infty} U_{f,k}^2}} < \sqrt{3} \quad (33)$$

- Conexiunea triunghi:

$$\frac{I_l}{I_f} < \sqrt{3} \quad (34)$$

- *Nivelul armonicii*

Reprezintă raportul dintre valoarea efectivă a armonicii de rang k și valoarea efectivă a fundamentalei:

$$\gamma_k = \frac{Y}{Y_1} \quad (35)$$

- *Reziduul deformant*

Reziduul deformant (reziduu) al unei unde periodice nesinusoidale este dat de relația:

$$Y_d = \sqrt{Y^2 - Y_1^2} \cong \sqrt{Y_0^2 + \sum_{k=2}^{\infty} Y_k^2} \quad (36)$$

- *Factorul de distorsiune*

Reprezintă raportul dintre valoarea efectivă a reziduuului deformant și valoarea efectivă a componentei alternative a mărimii reprezentate.

$$k_d = \frac{Y_d}{Y} \quad (37)$$

Deși definiția anterioară pare cea mai realistă, utilizând la numitor o mărime măsurată și controlată în sistem, literatura de specialitate mai recomandă și alte expresii pentru factorul de distorsiune, diferențele de valoare obținute prin utilizarea diferitelor relații fiind însă relativ mici.

$$k_d = \frac{Y_d}{Y_1} \quad (37')$$

sau

$$k_d = \frac{Y_d}{\sqrt{Y^2 - Y_0^2}} \quad (3.16'')$$

Factorul de distorsiune se poate defini atât pentru tensiune, cât și pentru curent, utilizându-se frecvent notațiile din literatura engleză: VTHD(THD_V) – factorul total de distorsiune pentru tensiune și ITHD(THD_I) – factorul total de distorsiune pentru curent.

Tensiunea armonică poate fi evaluată:

- individual cu nivelul armonicii = raportul dintre valoarea efectivă a armonicii h considerate și valoarea efectivă a armonicii fundamentale: $\gamma_{h_u} = \frac{U_h}{U_1} \cdot 100$
- global, de exemplu cu ajutorul factorului total de distorsiune armonică THD:

$$THD = \sqrt{\sum_{k=2}^{40} (u_h)^2}$$

Armonicile tensiunii de alimentare sunt determinate în principal de sarcinile nelineare conectate în sistem. Circulația armonicilor de curent prin impedanțele sistemului determină creșterea armonicilor de tensiune. Armonicile de curent și impedanțele sistemului variază în timp, ducând la modificarea amplitudinii tensiunilor.

Raportul dintre valoarea efectivă a armonicilor (în acest context curenții armonici I_h de rang h) și valoarea efectivă a fundamentalei (CEI-1000-3-4) :

$$THD_I = \sqrt{\sum_2^{40} \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (\text{notat uzual în literatura tehnică din România } \delta_I)$$

Întrucât aparatele de măsurare (distorsiometru) indică valoarea factorului de distorsiune cu raportare la valoarea efectivă a curentului de sarcină este necesară atenție atunci când se compară limitele de planificare cu valorile măsurate.

Factor de distorsiune armonică parțial ponderată: CEI-1000-3-4 :

$$THD_{IP} = \sqrt{\sum_{14}^{40} h \cdot \left(\frac{I_h}{I_1}\right)^2} \quad (\text{notat uzual în literatura tehnică din România } \delta_{IP})$$

Distorsiunea armonică parțial ponderată a fost introdusă pentru a lua în considerare că odată cu creșterea rangului, armonicile descresc.

Indiferent de definiția adoptată, acest indicator constituie un criteriu de caracterizare a unei curbe deformate adoptat încă din 1947 de Comitetul Internațional pentru studiul fenomenelor reactive și deformante. Astfel, o mărime periodică oarecare poate fi considerată sinusoidală dacă factorul ei de distorsiune $THD \leq 5\%$. Se consideră că acele curbe cu THD având o valoare mai mare de 5% prezintă o distorsiune pronunțată.

Avantajul esențial al utilizării acestui indicator pentru caracterizarea distorsiunii curbei studiate este faptul că poate fi ușor determinat. Prezintă însă dezavantajul pierderii unor informații detaliate asupra întregului spectru de frecvențe.

- *Factorul de formă*

Este definit ca raportul dintre valoarea efectivă a mărimii nesinusoidale și valoarea sa medie pe o semiperioadă:

$$k_f = \frac{Y}{Y_{med,T/2}} \quad (38)$$

Pentru o mărime periodică sinusoidală acest coeficient are valoarea $\left(\frac{\pi}{2\sqrt{2}}\right) = 1,111$.

Înlocuind expresiile valorilor efectivă și medie pe o semiperioadă, factorul de formă se mai poate scrie ca:

$$k_f = \frac{\sqrt{Y_0^2 + \sum_{k=1}^{\infty} Y_k^2}}{\frac{\pi Y_0}{2\sqrt{2}} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{Y_k}{k}} \cdot \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \quad (38')$$

Factorul de formă nu poate fi însă considerat izolat, un criteriu de caracterizare a unei mărimi nesinusoidale, existând unde periodice nesinusoidale pentru care el are valoarea 1,111.

- *Factorul de vârf*

Reprezintă raportul dintre valoarea maximă a mărimii nesinusoidale și valoarea sa efectivă. În regim nesinusoidal factorul de vârf este diferit de $\sqrt{2}$.

$$k_v = \frac{Y_{max}}{Y} \quad (39)$$

Pentru o undă periodică sinusoidală factorul de vârf are valoarea $\sqrt{2}$. Se spune că o undă pentru care $k_v < \sqrt{2}$ este o curbă turtită, iar pentru $k_v > \sqrt{2}$ este o curbă ascuțită.

În tehnica încercărilor acest factor se utilizează drept criteriu de caracterizare a mărimilor periodice nesinusoidale.

5.2.Indicatori de calitate ai regimului nesinusoidal

Indicatorii de influență telefonică au fost introduși în scopul cuantificării efectului circulației de armonici în circuitele de putere asupra liniilor de telecomunicații vecine.

- *Factorul de influență telefonică TIF*

Acest factor este utilizat pentru a putea descrie gradul de interferență al mărimilor distorsionate ale liniilor electrice de distribuție funcționând în regim nesinusoidal cu semnalele liniilor de telecomunicații paralele. El se obține din expresia factorului de distorsiune THD prin aplicarea unor factori ponderare pătratelor sumei de sub radical.

Acești factori de ponderare au fost determinați experimental funcție de influența armonicilor asupra audiției telefonice, ținându-se cont și de cuplajul între linia perturbatoare și linia telefonică adiacentă.

Se remarcă faptul că acest indice oferă informații despre modul de cuplare magnetică dintre circuitele vecine în regim nesinusoidal.

$$TIF = \frac{\sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (w_k U_k)^2}}{U} \quad (40)$$

unde: U_k – valoarea efectivă a armonicii k a tensiunii de linie;

w_k – ponderea armonicii k;

U – valoarea efectivă a tensiunii distorsionate.

Literatura de specialitate precizează valorile ponderilor TIF, până la frecvențe de ordinul kHz. De exemplu, pentru frecvența de bază 60 Hz (conform standardului ANSI) valorile maxime ale ponderilor TIF se înregistrează în banda de frecvență 2400–2880 Hz, corespunzând de fapt unei interferențe maxime între circuitele de distribuție a puterii și liniile de comunicație audio.

Uzual, factorul de influență telefonică are valorile: TIF=15...40.

De menționat faptul că interferențele datorate curenților armonici de secvență zero (homopolară) sunt superioare celor ce corespund curenților de secvență pozitivă (directă) sau negativă (inversă). Ca urmare, și standardele și normativele în vigoare sunt mai restrictive în domeniul valorilor corespunzătoare semnalelor de secvență zero.

- *Produsele UT și IT*

Tot în scopul evaluării interferenței telefonice sunt utilizate și produsele U·T și I·T.

Indicatorul U·T reprezintă produsul dintre tensiunea de linie și ponderea influenței telefonice, el fiind de fapt o măsură a interferenței semnalelor circuitelor audio cu tensiunile de linie ale liniilor electrice de distribuție.

$$U \cdot T = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (w_k U_k)^2} \quad (41)$$

Spre deosebire de factorul de distorsiune THD de exemplu, acest indicator oferă totodată o informație și asupra amplitudinii semnalului distorsionat.

Produsul I·T reprezintă o mărime similară asociată curentului de linie.

$$I \cdot T = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} (w_k I_k)^2} \quad (42)$$

Standardul ANSI 386 indică de exemplu în cazul sistemelor de distribuție o interferență posibilă cu liniile de telecomunicații pentru IT=10000...25000.

5.3.Factorul de putere

În scopul caracterizării eficienței transiterii puterii electromagnetice și a aplicării unor procedee mai eficiente de tarifare au fost introduși indicatori suplimentari, care sunt capabili să caracterizeze calitatea energiei electrice furnizate consumatorilor și a comportamentului energetic al acestora.

Factorul de putere este fără îndoială cel mai important.

Definit ca o măsură a capacității unui circuit de c.a. de a furniza sau absorbi putere activă, acest indicator prezintă importanță pentru evaluarea pierderilor de putere (energie) din sistem, atât pe partea dinspre sursă, cât și pe cea dinspre consumator, fiind urmărit de majoritatea sistemelor de tarifare. Valoarea sa limită este inclusă ca cerință în contractele încheiate între furnizorul și consumatorul de energie electrică.

Pentru sistemele în care mărimile variază periodic, există două definiții de interes pentru factorul de putere:

- Prima, așa cum este întâlnită și în IEEE Std.100, este dată de raportul dintre puterea activă totală transmisă prin secțiunea respectivă și puterea aparentă:

$$PF = \frac{P_{tot}^{def}}{U_{ef} I_{ef}} \quad (43)$$

- A doua definiție include raportul dintre puterea activă și puterea aparentă pe fundamentală, purtând numele de *factor de putere de deplasare (de defazaj (DF))*:

$$DF = \cos \theta_1 = \frac{P_1}{U_1 I_1} \quad (44)$$

Raportul de mărime în care se află cei doi parametri este determinat de direcția de circulație a puterilor pe armonicile superioare față de rețea, egalitatea fiind îndeplinită în cazul regimurilor sinusoidale.

Pentru un regim apropiat de cel sinusoidal se poate scrie:

$$PF = \frac{DF}{\sqrt{1 + THD^2}} \quad (45)$$

Această relație poate conduce uneori la supraevaluări ale factorului de putere care nu ar permite aplicarea unor măsuri corecte.

Pentru a veni în întâmpinarea necesității unei penalizări cât mai corecte a armonicilor de ordin superior a fost propusă (IEEE 519 Std.) o definiție suplimentară, *factorul de putere ajustat*:

$$hPF = \frac{P}{U_H I_H} \quad (46)$$

unde $U_H = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} C_n U_n^2}$ reprezintă valoarea efectivă a tensiunii ajustată armonic, iar

$I_H = \sqrt{\sum_{n=1}^{50} k_n I_n^2}$ valoarea efectivă a curentului ajustat armonic

cu C_n – factorul de ajustare pentru armonicile de tensiune (≤ 1)

k_n – factorul de ajustare pentru armonicile de curent (≥ 1).

Valorile unitare ale acestor factori de corecție sunt valabile pentru fundamentale.

Pentru calculul factorilor de ajustare ai curentului se pot utiliza următoarele relații:

Tab.1. Factori de ajustare ai armonicilor de curent

Relația de calcul pentru k_n	Precizări
$k_n = n$	Semnifică creșterea costului curentului (A) pe armonica n de n ori față de cel al curentului pe fundamentală; dificil de justificat economic.
$k_n = n^{1,33}$ (IEEE 519 Std.)	Efectele negative ale armonicilor de curent cresc mai rapid decât proporțional cu ordinul lor.
$k_n = \sqrt{n}$	Utilă în cazul în care se dorește o evaluare mai exactă a efectului periculos în conductoarele consumatorului (pierderi în conductoare).
$k_n = [1+x(n^2-1)];$ $x = 0,01 \dots 0,1$	Se ține seama de dependența rezistenței de frecvență (pierderile în transformatoare); valorile minime ale lui x se recomandă pentru posturile de transformare, iar maximele pentru stațiile de transformare.

În cazul sistemelor trifazate definirea factorului de putere comportă anumite dificultăți în cazul regimurilor de funcționare nesinusoidale și/sau nesimetrice. Dificultatea derivă din lipsa unei definiții general acceptate pentru puterea aparentă, soluțiile propuse până în prezent dovedindu-se utile pentru unele scopuri cum ar fi de exemplu compensarea, dar total inadecvate din alte puncte de vedere, cel mai important fiind măsurarea.

Pornind de la o definiție a puterii aparente care acceptă o descompunere în componente active și reactive de secvență și pe fundamentală sau pe armonici de ordin superior, au fost propuse pentru factorul de putere definiții care iau în considerare fie doar componentele de secvență directă pe fundamentală, fie toate componentele de secvență.

$$PF = \begin{cases} \frac{P_+}{S} \\ \frac{P_+ + P_- + P_0}{S} \end{cases} \quad (47)$$

unde puterea aparentă este definită ca o medie geometrică între componenta activă de secvență directă și o componentă care include efectul suplimentar “poluant” al funcționării în regim nesimetric și/sau deformant $S = \sqrt{P_+^2 + N^2}$, cu N puterea neactivă.

Fiecare din aceste două variante poate fi justificată în anumite cazuri de comportament al sarcinii dezechilibrată. De exemplu, pentru o sarcină care acționează ca un filtru pentru componentele inversă și homopolară este recomandată utilizarea primei variante.

Similar, factorul de putere de deplasare se poate scrie:

$$DF = \frac{P_1^+}{S_1^+} \quad (48)$$

Dacă într-un regim nesinusoidal factorul de defazaj se recomandă a fi utilizat în anumite situații pentru a evita supraevaluările nejustificate determinate de valorile superioare ale factorului de putere, în regim nesimetric el nu se mai dovedește atât de eficient pentru stabilirea unor măsuri de penalizare corecte. Cum este de așteptat, dezechilibrul sarcinii are un efect moderat asupra valorii factorului de defazaj, dar amplitudinea sa poate fi evaluată realist din valoarea factorului de putere.

Tab.2. Nivelul admis al armonicilor de tensiune (EN 50160)

Armonici impare				Armonici pare	
Nemultiplu de 3		Multiplu de 3			
Ordin n	Amplitudine [%]	Ordin n	Amplitudine [%]	Ordin n	Amplitudine [%]
5	6	3	5,0	2	2,0
7	5	9	1.5	4	1,0
11	3,5	15	0,5	6...24	0,5
13	3.0	21	0,5		
17	2.0				
19	1,5				
23	1.5				
25	1.5				

NOTA: Nu au fost indicate valorile corespunzătoare armonicilor de ordin mai mare de 25, de valori în general reduse, dar cu efect imprevizibil la rezonanță. THD < 8% (j.t. și m.t.)