

# ALGORITMI DE COMPENSARE A DEZECHILIBRELOR SARCINILOR TRIFAZATE

Robert Pécsi, UTCB, Facultatea de Utilaj Tehnologic  
e-mail: robert.pecsi@gmail.com

**Abstract** - The three-phase systems were designed for direct symmetrical sinusoidal operation. However, symmetry between the instantaneous line currents of the utility is very rare. Non-symmetrical operations do have a lot of negative effects on the utility and on loads connected to it, causing extra power consumption, reducing efficiency. In his former papers the author has been provided a method and a device to balance a three-phase system by means of a compensation unit connected in derivation with the utility lines and capable of shifting power between the utility lines at a frequency of 10 kHz. This paper is a step forward in these studies detailing some useful algorithms that can be used for this power-shift.

## 1. Introducere

Sistemele trifazate de alimentare cu energie electrică au fost concepute pentru a funcționa în regimuri simetrice. În astfel de regimuri, atât generatoarele, receptoarele, cât și liniile care asigură conectarea acestora sunt distribuite echilibrat pe fazele sistemului, astfel încât parametrii lor de circuit pe fiecare fază să fie egali. În condiții de simetrie, gestiunea puterilor și a energiilor, ameliorarea factorului de putere se realizează la fel ca în regim monofazat, o rețea trifazată echilibrată reprezentând de fapt o multiplicare ingenioasă a unei rețele monofazate. Dar, atunci când unul dintre elementele rețelei dezechilibrează sistemul prezentând parametri de circuit diferiți pe cele trei faze, regimul de tensiuni și curenți devine nesimetric și apar regimuri de funcționare dezechilibrate, în care pierderile suplimentare de putere sunt considerabile iar funcționarea receptoarelor legate la rețea are loc la parametrii având valori diferite de cele nominale, ceea ce conduce la uzura lor prematură.

Sistemele trifazate dezechilibrate se caracterizează nu numai prin curenți diferiți pe cele trei faze, dar și prin valori diferite ale tensiunii. Acest fapt un efect deosebit de dăunător asupra consumatoarelor și în mod special a mașinilor electrice alimentate de la rețeaua respectivă. Având în vedere aceste efecte ale regimurilor dezechilibrate, standardele și recomandările internaționale de specialitate reglementează nivelul maxim admisibil al dezechilibrelor din rețelele de alimentare cu energie electrică, impunând limitarea coeficientului de nesimetrie a curenților, definit prin raportul dintre valorile efective ale componentei inverse și directe a curentului:

$$\varepsilon_i = \frac{I_i}{I_d} \quad (1)$$

și coeficientul de nesimetrie a tensiunilor, definit prin relația:

$$\varepsilon_U = \frac{U_i}{U_d} \quad (2)$$

la valori ce variază între 5% și 15%.

O metodă cunoscută de compensare a sarcinilor dezechilibrate a fost propusă de Ch. P. Steinmetz, care se bazează pe legarea în rețea a unui condensator și a unei bobine convenabil alese. Steinmetz a presupus că sarcina care produce dezechilibrul este pur rezistivă. Dacă sarcina nu e pur rezistivă, situația se complică dar metoda permite compensarea și în acest caz. Această metodă are însă și dezavantajele sale, printre care este necesar să menționăm faptul că pierderile de putere rămân în

continuare mari și faptul că un asemenea circuit de compensare nu permite o compensare dinamică, absolut necesară în cazul unei sarcini trifazate dezechilibrate variabile.

Alte metode de simetrizare a rețelei sunt cele bazate pe conversia puterii electrice trifazate în putere electrică monofazată și presupun intercalarea unui element – dispozitiv convertor – între rețea și sarcina dezechilibrată.

Prin articole anterioare autorul a prezentat introducerea și verificarea experimentală a unei noi metode de simetrizare prin utilizarea unor elemente de compensare capabile să realizeze un transfer al puterii electrice între fazele rețelei. Prin această metodă se realizează nu numai compensarea dezechilibrelor rețelei, dar, de asemenea și compensarea factorului de putere, a armonicilor și perturbațiilor ce apar pe liniile rețelei.

## 2. Simetrizarea rețelei trifazate prin compensare

Pentru compensarea dezechilibrelor de pe rețeaua trifazată autorul utilizează în cadrul metodei menționate un dispozitiv care după ce sesizează încărcarea fiecărei faze, absoarbe putere de pe unele faze și debitează în altele astfel încât să se egaleze curenții de linie ai celor trei faze ale rețelei. Un asemenea dispozitiv ar putea fi ilustrat schematic ca în Fig. 1.

Starea de dezechilibru a rețelei trifazate este determinată de dispozitivul de compensare prin intermediul unui traductor de curenți și în funcție de această stare o unitate de comutație aparținând de același dispozitiv de compensare decide de pe care faze este necesară preluarea de energie și pe care faze trebuie ea debitată pentru realizarea echilibrului. În funcție de aceasta se comută anumite circuite care asigură preluarea energiei de pe fazele mai puțin încărcate (care prezintă curenți absorbiți de valori efective mai mici), stocarea acestei energii (pentru perioade de timp ce țin de faza tensiunilor și a curenților) într-o unitate de înmagazinare a energiei și, apoi comutarea altor circuite ce realizează debitarea energiei în fazele mai încărcate.

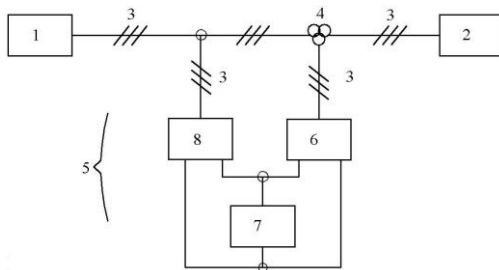


Fig. 1. Schema bloc a unui dispozitiv de compensare

Un asemenea dispozitiv de compensare poate fi conceput în două topologii, în funcție de modul de legare al acestuia la fazele rețelei. Cele două tipologii, paralel și serie sunt ilustrate în Fig. 2. Structura paralel se poate implementa cu invertoare de tensiune sau de curenți, deosebirea constând mai ales în faptul că elementul care acumulează energie este condensatorul în cazul inverterului de tensiune și inductanța în cazul inverterului de curenți. Fig. 3. prezintă schema celei de a doua topologii, dispozitiv de compensare cu inverter de tensiune și cu condensator ca element de stocare.

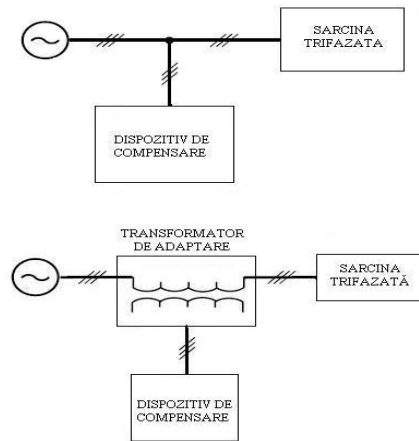


Fig. 2. Tipuri de dispozitive de compensare - paralel și serie

Un avantaj deosebit de important al topologiei paralel este faptul că dispozitivul de compensare conduce doar curentul de compensare, ceea ce permite echilibrarea unor sarcini dezechilibrate de valori mult mai mari. Totodată, mai multe unități de acest tip se pot conecta în paralel, pentru a obține o creștere a puterii totale a sistemului.

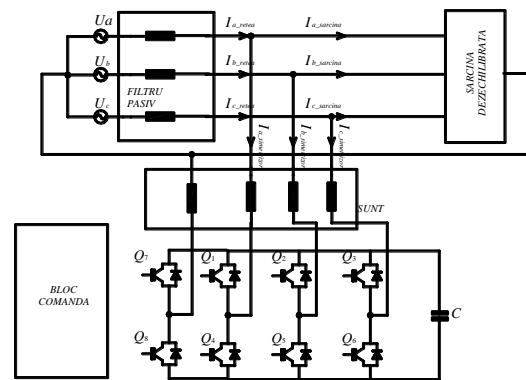


Fig. 3. Dispozitiv de compensare paralel cu inverter de tensiune

### 3. Algoritmii de compensare

Semnalele de referință sunt generate pe baza unui algoritm de comandă. Două dintre algoritmii cei mai bine fundamentați și verificați experimental sunt algoritmii bazați pe teoria puterilor instantanee PQ, descrisă și de Akagi [3] și, respectiv pe metoda detecției sincrone. De asemenea teoria puterilor instantanee PQ cunoaște și o variantă modificată prin introducerea unei transformate Fourier discrete. Etapele de compensare și circuitele necesare sunt destul de complexe în cazul acestor algoritmi. G. Bhuvaneshwari denumește în studiile sale algoritmul de compensare utilizat și de autor în cadrul experimentelor sale prezentate în cadrul lucrărilor anterioare, algoritmul  $I \cdot \cos \varphi$ , iar alte două algoritmi sunt cunoscute sub numele de algoritmul de detecție a curentului în domeniu timp și, respectiv algoritmul de compensare bazat pe o referință sincronă. În cele ce urmează vom descrie acești algoritmi și rezultatele utilizării lor.

### 4. Algoritmul de compensare bazat pe teoria puterilor instantanee

Acest algoritm se bazează pe valorile instantanee ale puterilor din cadrul unui sistem trifazat și constă într-o transformată algebrică Clarke a tensiunilor și curenților trifazați din coordonate  $x-y-z$  în coordonate  $\alpha - \beta - 0$ , urmată de calculul componentelor instantanee ale puterii:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Pe baza acestor relații de transformare se calculează puterea instantanee de secvență zero, puterea instantanee active și puterea instantanee reactivă:

$$\begin{cases} p_0 = v_0 \cdot i_0 \\ p = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta \\ q = v_\alpha \cdot i_\beta - v_\beta \cdot i_\alpha \end{cases} \quad (4)$$

Componentele de putere activă și de putere reactivă  $p$  și  $q$  se determină pe baza tensiunilor și curenților exprimați în coordonate  $\alpha - \beta$  prin relația următoare:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (5)$$

Valoarea medie a puterii instantanee, corespunzătoare cantității de energie care este transferată în regim în unitatea de timp de la sursa de tensiune către sarcină notată cu  $\bar{p}$  este singura componentă din cadrul teoriei p-q care este de dorit. Celelalte componente - adică  $\tilde{p}$  care este valoarea fluctuantă a puterii active și  $q$  care este puterea reactivă instantanee este necesar să fie compensate prin intermediul dispozitivului de compensare. Pornind de la aceste considerații se determină în cadrul acestui algoritm curenții de referință pentru compensare aplicând transformata inversă. Algoritm este destul de complex iar efectuarea fiecărei transformate și a fiecărui calcul în parte necesită circuite și timp - de altfel deosebit de valoros având în vedere necesitatea utilizării unei frecvențe de lucru ridicate.

## 5. Algoritm de compensare bazat pe metoda detecției sincrone

Acest algoritm se bazează pe distribuția uniformă a curenților, dar această teorie în forma sa inițială nu este aplicabilă în cazul perturbațiilor tensiunii. Această problemă poate fi eliminată prin detecția tensiunilor și a curenților de la sursă și de la sarcină din valoarea cărora se deduce forma de undă a curenților de referință pentru compensare. Metoda detecției sincrone este utilizabilă și în cazul în care sarcina trifazată dezechilibrată este puternic neliniară. Metoda inițială pornește de la următoarele ipoteze:

- tensiunea nu prezintă perturbații ale formei de undă;
- pierderile de putere prin conductorul de nul sunt neglijabile.

Se calculează valorile amplitudinii curenților de pe fiecare fază în parte, apoi se determină amplitudinea medie de după compensare și fazele curenților compensați. Din aceste valori se determină curenții de succesiune directă. Aceste metode implică o întârziere considerabilă cauzată de calculul coeficienților transformatei Fourier. Întârzierea poate fi redusă prin utilizarea unor rețele neuronale. Aceste rețele permit numeroase avantaje în privința estimării undelor distorsionate, a analizei FT, a tehnicilor PWM, a filtrării armonicilor fără întârzieri etc. Nu vom detalia în cadrul prezentului articol aceste rețele neuronale, ele reprezentând eventualul subiect al unui articol și a unei cercetări separate.

## 6. Algoritm de compensare bazat pe detecția curenților în domeniu timp

Acest algoritm funcționează după următoarea logică: se detectează curenții de sarcină trifazați, sesizându-se într-o primă fază numai componente simetrice de succesiune directă ale acestor curenți. Astfel se elimină în mod automat armonicile, întrucât aceste componente simetrice implică doar componenta ce oscilează cu frecvența de bază. Se separă apoi din aceste componente simetrice de succesiune directă componentele active și reactive. Componenta activă a curențului simetric de succesiune directă se consideră a fi curențul de referință. Se calculează diferența dintre curenții de referință și curenții de sarcină, aceste valori fiind chiar valorile curenților care este necesar să fie absorbiți sau injectați de dispozitivul de compensare. Astfel se echilibrează curenții rețelei și se asigură și forma absolut sinusoidală a acestora.

## 7. Algoritm de compensare $I \cdot \cos \varphi$

În cadrul acestei metode, curenții de rețea se determină ca fiind produsul dintre valoarea componentei active a curenților de sarcină ( $I \cdot \cos \varphi$ ) și faza de undă sinusoidală identică fazei tensiunii corespunzătoare a rețelei. Mărimea  $I \cdot \cos \varphi$  se deduce ca fiind componenta fundamentală a părții active a curențului de sarcină, „ $I$ ” reprezentând amplitudinea componentei fundamentale a curențului de sarcină, iar „ $\cos \varphi$ ” este factorul de putere al sarcinii. Partea ondulatorie a curenților de rețea se calculează pe baza tensiunilor rețelei și a valorii amplitudinii acestora (valoarea maximă sesizată în cursul unei perioade). În cadrul experimentelor realizate de autor în vederea verificării acestei metode de compensare s-a realizat într-o primă etapă simularea unui asemenea dispozitiv de compensare paralel cu invertor de tensiune și condensator pentru stocarea energiei.

După sursa trifazată simetrică formată din cele trei generatoare conectate în conexiune stea ( $U_a, U_b, U_c$ ) s-a interpus un filtru pasiv pentru a elimina armonicile. În lipsa măsurilor de limitare a ondulației de comutație a curențului absorbit de dispozitivul de compensare, aceste armonici pătrund în sarcină și în rețeaua de alimentare, ceea ce poate avea drept consecință deformarea tensiunii de alimentare. Dacă este proiectat corespunzător, filtrul pasiv atenuază armonicile superioare generate de comutația dispozitivului de compensare. După cum se observă, blocul de simetrizare se interpune între sursa trifazată și sarcină, curenții absorbiți sau injectați de el în linii urmând să modifice numai curenții totali din rețea, nu și cei ce pleacă din aceste noduri spre sarcină, și care sunt invariabile și impuse de natura sarcinii. Așadar, curenții:

$$\left. \begin{aligned} \underline{I}_{a\_retea} &= \underline{I}_{a\_simetrizor} + \underline{I}_{a\_sarcina} \\ \underline{I}_{b\_retea} &= \underline{I}_{b\_simetrizor} + \underline{I}_{b\_sarcina} \\ \underline{I}_{c\_retea} &= \underline{I}_{c\_simetrizor} + \underline{I}_{c\_sarcina} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

ajung să fie simetrice nu prin modificarea curenților absorbiți de sarcină ci prin compensarea acestora de către curenții blocului de compensare. S-a ales o sarcină trifazată dezechilibrată care nu are legătură la punctul de nul al rețelei. Într-un asemenea caz, conform primei teoreme a lui Kirchhoff, suma curenților de linie este nulă, ceea ce permite compensarea sistemului cu un bloc format din trei brațe de tranzistoare de putere (în figură notate cu  $Q1 - Q6$ ). În cazul în care este necesară compensarea dezechilibrelor cauzate de sarcini trifazate conectate la nul, se utilizează în blocul de tranzistoare de putere încă un braț (deci vor fi în total patru) paralel cu celelalte trei și legat la punctul median la linia de nul. Având în vedere faptul că semnalele electrice de curent alternativ variază cu frecvența de 50 Hz, este necesar ca un asemenea dispozitiv de simetrizare să repete anumite operațiuni de evaluare a dezechilibrului din rețea, de calcul al curenților de compensare necesari și de comandă corespunzătoare la intervale de timp suficient de mici și de dese. Ordinul de mărime al frecvenței de eșantionare a semnalului trebuie să fie mai mare decât cel al semnalului electric cu minim două unități. Cu cât mai mare se alege această frecvență de eșantionare cu atât mai fidel se reproduce forma semnalului în blocul de calcul și comandă și cu atât mai exact se pot face comenzile. Limitarea ei superioară este impusă de capacitatea elementelor de circuit utilizate de a sintetiza informațiile necesare și de a realiza comenzile și comutațiile în intervalul de timp corespunzător unei perioade a semnalului de eșantionare.

Dintre numeroasele simulări și verificări de metodă efectuate, se va prezenta aici cazul unui receptor trifazat conexiune triunghi puternic dezechilibrat prin lipsa a două dintre fazele acestuia. Receptorul ales este un rezistor de 5 ohmi conectat între fazele S și T ale rețelei, rețea alimentată de la sursa trifazată de 3 x 380/220 V. Fig. 4 prezintă forma de undă pentru cei trei curenți de rețea iar Fig. 5 coeficientul de asimetrie. În figura 5 se observă că valoarea coeficientului de asimetrie scade de la 0,5 (50%) la o valoare situată sub pragul de 0,05 (5%) impus de cele mai severe normative, ceea ce dovedește o echilibrare foarte bună. Pentru calculul coeficientului de asimetrie, calcul realizat de o subrutină a softului care comandă funcționarea dispozitivului de compensare, s-a utilizat formula (1) și metoda componentelor simetrice. Se observă din Fig. 4 că dispozitivul începe să compenseze dezechilibrul rețelei după primele cca. 0,06 s, înainte de acest moment al pornirii sale, putându-se vizualiza formele de undă a curenților de sarcină – identice cu cele ale curenților de rețea fără compensare. În figuri curenții sunt prezentați cu diferite culori:  $I_R$  cu albastru,  $I_S$  cu negru iar  $I_T$  cu roșu.

## 8. Verificări experimentale

Verificarea experimentală a metodei propuse s-a realizat utilizând ca dispozitiv de compensare un invertor de putere medie, existent în cadrul Facultății de Inginerie Electrică, la Laboratorul de Acționări Electrice Speciale. Schema acestui invertor este ilustrată în Fig. 6.

Dintre diferitele sarcini utilizate pentru măsurări și testări, s-a ales pentru prezentarea rezultatelor o rezistență de 7  $\Omega$ , cu curent maxim de până la 100 A, legată între fazele R și S ale rețelei. Pentru culegerea datelor experimentale, s-au utilizat un osciloscop Tektronix model TDS 2014.

Pe grafice au fost reprezentate câte doi curenți - obținând astfel trei grafice care ilustrează curenții de sarcină și de rețea de pe aceeași fază și trei grafice care grupează curenții de rețea câte doi măsurați simultan.

Dintr-un dezechilibru având un coeficient de asimetrie de 0,5, se obține experimental un regim simetric echilibrat cu un factor de putere global egal cu unitatea. Fig. 7 prezintă aceste rezultate pentru exemplul sugestiv ales. În seria de figuri cu formele de undă ale curenților măsurați, figurile 7.a. -7.c. prezintă

curenții de rețea (culoare albastră, pe canalul 1 al osciloscopului) și curenții de sarcină (culoare roșie, canalul 2 al osciloscopului). Se poate observa pe acest set de trei grafice că, deși curenții de sarcină formează un sistem trifazat asimetric, sub acțiunea dispozitivului de compensare curenții din rețea devin simetrici.

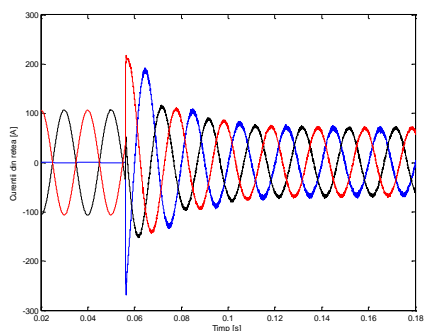


Fig. 4. Forma de undă a curenților din rețea

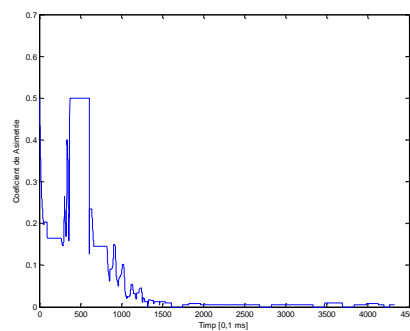


Fig. 5. Variația coeficientului de asimetrie

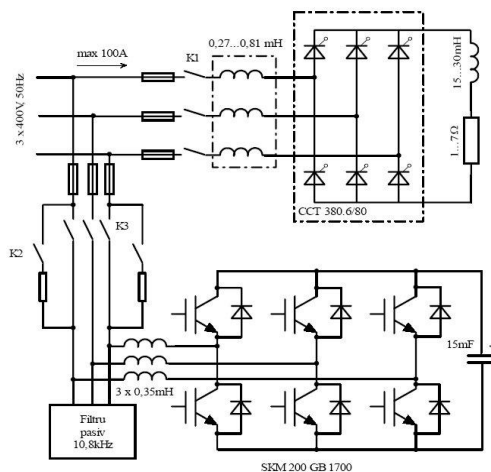


Fig. 6. Schema inverterului de medie putere pe care s-au realizat teste experimentale

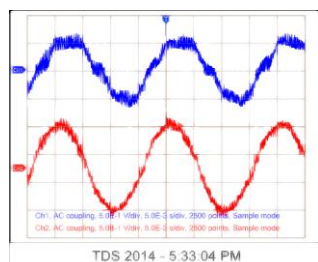


Fig. 7.a. Forma de undă a curenților de sarcină și de rețea de pe faza R

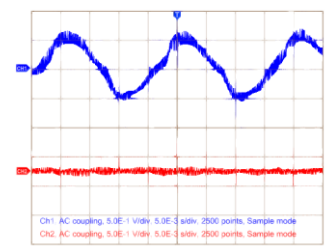


Fig. 7.c. Forma de undă a curenților de sarcină și de rețea de pe faza T

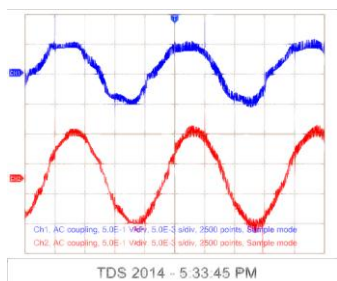


Fig. 7.b. Forma de undă a curenților de sarcină și de rețea de pe faza S

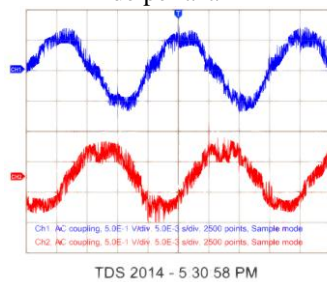


Fig. 7.d. Forma de undă a curenților de rețea de pe fazele R și S

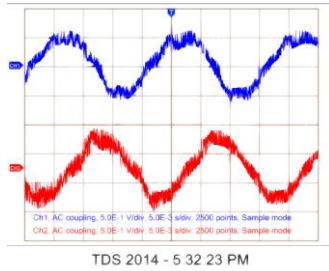


Fig. 7.e. Forma de undă a curenților de rețea de pe fazele  $S$  și  $T$

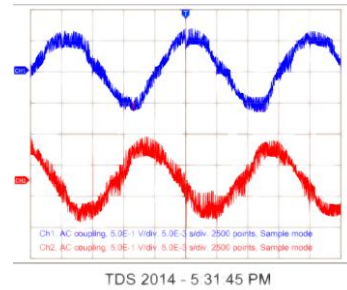


Fig. 7.f. Forma de undă a curenților de rețea de pe fazele  $R$  și  $T$

Următoarele trei imagini (Fig. 7.d. - 7.f.) sunt grafice care grupează câte doi curenți de rețea, măsurati pe cele două canale ale osciloscopului, imagini care permit a se observa defazajul uniform între acești curenți de rețea.

Pentru a analiza graficele și sub aspect cantitativ, trebuie luat în considerare faptul că traductoarele de curent utilizate prezintă un factor de transformare de  $10 \text{ mV/A}$ , iar – așa cum afișează chiar osciloscopul, pe cadranul acestuia – unei diviziuni a acestui cadran îi corespund  $0,5 \text{ V}$ . Aceasta înseamnă că o diviziune a rastrului cadranului corespunde la  $50 \text{ A}$  măsurati. Astfel, amplitudinea curenților de sarcină de pe fazele  $R$  și  $S$  se poate evalua la  $\frac{3}{2} \cdot 50 = 75 \text{ A}$ , iar amplitudinea curenților de

rețea de pe fiecare fază la  $\frac{2}{2} \cdot 50 = 50 \text{ A}$ .

## 10. Concluzii

Graficele și măsurătorile ilustrează echilibrarea rețelei trifazate prin transferul efectiv de putere între fazele acesteia, transfer care are loc fără sau cu pierderi energetice minime. Coeficientul de asimetrie este scăzut sub valoarea limită de  $5\%$ , impusă de normativele europene. S-a verificat funcționarea dispozitivului de compensare pe baza algoritmului  $I \cdot \cos \varphi$ .

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Alexa, D., Ionescu, F., Gâțlan, A., Lazăr, A.: *Convertoare de putere cu circuite rezonante*, Editura tehnică București, 1998
- [2] S. Rahmani, K. Al-Haddad & F. Fnaiech, "A three- phase shunt active power filter for damping of harmonic propagation in power distribution networks", Proc. IEEE International symposium on Industrial Electronics, vol. 3, pp. 1760-1764, July 2006
- [3] B.N.Singh et.al., "Design and Digital Implementation of Active Filter with Power Balance Theory", IEEE Proc on EPA, Vol 2, No.5, Sept 2005 pp.1149-1160
- [4] H. Akagi, Y. Kanazawa & A. Nabae, "Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components," IEEE Trans. Industry Applications, vol. 20(3), pp. 625-630, 1984.
- [5] C.L. Chen, C.E. Lin & C.L. Huang, "Reactive and harmonic current compensation for unbalanced three-phase systems using the synchronous detection method," Electric Power systems Res., vol 26, pp163-170, 1993.
- [6] H.Li, F.Zhuo, Z.Wang, W.Lei and L.Wu "A Novel Time-Domain Current-Detection Algorithm for Shunt Active Power Filters" IEEE Trans. on Power Systems, Vol.20, No.2, May 2005. Pages: 644-651.
- [7] D.Basic, V.S.Ramesdan, P.Mutik, "Digital Implementation of the Synchronous Frame Based Controller for a Selective Hybrid filter control system ", in Proc IEEE Confc,2007
- [8] G.Bhuvaneshwari & M.G Nair, "A novel current compensation technique for shunt active power filters", in Proc. IASTED Conf On Power and Energy Systems, PP . 109-113,2003
- [9] Măgureanu, R., Ambrosi, S., Creangă, D., Staicu, C., Răduț, V., *Unity Power Factor Rectifiers*, Buletinul Institutului Politehnic Iași, tom XLVIII (LII) - 2002, fasc. 5C, pag. 159-164.