

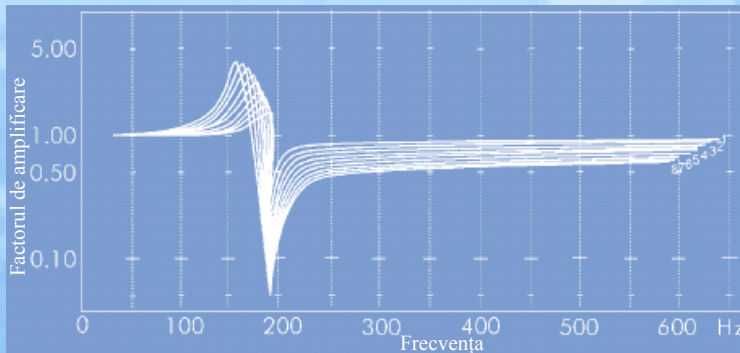
# Ghid de Aplicare - Calitatea Energiei Electrice



## Armonici

### Condensatoarele într-un mediu bogat în armonici

3.1.2



# Armonici

## Condensatoarele într-un mediu bogat în armonici

Stefan Fassbinder  
Deutsches Kupferinstitut  
Iulie 2004



Acest ghid este realizat ca parte a Inițiativei Leonardo pentru Calitatea Energiei Electrice, un program european de educație și învățare, sub egida și cu suportul Comunității Europene (în programul Leonardo da Vinci) și International Copper Association. Pentru alte informații privind acest program a se vedea [www.lpqi.org](http://www.lpqi.org).

### European Copper Institute (ECI)

European Copper Institute este un joint venture între ICA (International Copper Association) și industria europeană de fabricate. Prin membrii săi, ECI acționează în numele celor mai mari producători de cupru din lume și a principalilor prelucrători din Europa, pentru promovarea cuprului în Europa. Apărută în ianuarie 1996, ECI are suportul unei rețele de unsprezece Copper Development Association („CDAs”) în Benelux, Franța, Germania, Grecia, Ungaria, Italia, Polonia, Rusia, Scandinavia, Spania și Regatul Unit.

### Societatea Inginerilor Energeticieni din România

Societatea Inginerilor Energeticieni din România - SIER, constituită în 1990, este o asociație profesională, autonomă, cu personalitate juridică, neguvernamentală, apolitică, fără scop patrimonial. Scopul Societății este de a contribui activ atât la creșterea rolului și eficienței activității inginerilor energeticieni, cât și la stabilirea orientărilor, promovarea progresului tehnic și îmbunătățirea legislației în domeniul energetic. SIER promovează un schimb larg de informații, cunoștințe și experiență între specialiștii din domeniul energetic prin cooperarea cu organizații similare naționale și internaționale. În anul 2004 SIER a semnat un acord de parteneriat cu European Copper Institute pentru extinderea și în România a programului LPQI (Leonardo Power Quality Initiative), program educațional în domeniul calității energiei electrice, realizat cu suportul Comisiei Europene. În calitate de partener al ECI, SIER se va implica în desfășurarea unei ample activități de informare și de consultanță a consumatorilor de energie electrică din România.

### Atenționare

Conținutul acestui proiect nu reflectă în mod necesar poziția Comunității Europene și nu implică nici o responsabilitate din partea Comunității Europene.

European Copper Institute, Deutsches Kupferinstitut și Societatea Inginerilor Energeticieni din România își declină răspunderea pentru orice daune directe, indirecte, subsidiare sau incidentale care ar putea să rezulte în urma utilizării informațiilor sau a inabilității de a utiliza informațiile și datele cuprinse în această publicație.

Copyright© European Copper Institute, Deutsches Kupferinstitut și Societatea Inginerilor Energeticieni din România.

Reproducerea prezentului document este permisă numai sub forma sa integrală și cu menționarea sursei.



Membră a  
EUROEL

Societatea Inginerilor Energeticieni din România  
No. 1, Lacul Tei Avenue, PO/BOX 30-33  
020371 Bucharest  
Romania

Tel: 4 0722 36 19 54  
Fax: (4 021) 610 52 83  
Email: [office@sier.ro](mailto:office@sier.ro)  
Websites: [www.sier.ro](http://www.sier.ro)



European Copper Institute  
168 Avenue de Tervueren  
B-1150 Brussels  
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70  
Fax: 00 32 2 777 70 79  
Email: [eci@eurocopper.org](mailto:eci@eurocopper.org)  
Website: [www.eurocopper.org](http://www.eurocopper.org)

## Condensatoarele într-un mediu bogat în armonici

### Întreprinderi vechi într-un mediu nou

Bateriile de condensatoare, utilizate pentru compensarea puterii reactive de frecvență fundamentală sunt esențiale pentru funcționarea economică a rețelei care include sarcini rezistiv-inductive. În realitate, sarcinile rezistiv-inductive au fost omniprezente încă de la începutul sistemelor energetice. Sarcinile neliniare nou apărut sunt, de asemenea, omniprezente, astfel că au rezultat două noi riscuri în jurul și în bateria de condensatoare:

- ◆ supraîncărcarea în curent a condensatoarelor
- ◆ rezonanța paralelă a condensatoarelor cu bobinele aflate în vecinătatea (electrică) lor.

Bateriile de condensatoare pentru compensare continuă să fie indispensabile și este simplu să se proiecteze sau să se dezvolte acestea pentru a face față noilor condiții. Acest Ghid identifică modul optim de abordare atunci când se referă la noi întreprinderi sau la dezvoltarea unor baterii de condensatoare existente pentru a preveni problemele determinate de armonici.

### Aspecte de bază: caracteristici ale bobinelor și condensatoarelor

Din punct de vedere electric, o bobină este analoagă inerției maselor într-un sistem mecanic. Bobina, o componentă cu o inductivitate intenționat realizată și valoare bine definită, reprezintă un echivalent electric al unui volant cu ajutorul căruia a fost definită inerția. Desigur, orice are masă are și inerție; în același mod se poate spune că orice element al unui conductor are o inductivitate parazită.

Atât inductivitatea  $L$  cât și capacitatea  $C$  reprezintă componente reactive cu o reactanță și o putere reactivă primită/debitată, având în vedere faptul că puterea reactivă capacitivă absorbită este echivalentă cu puterea reactivă inductivă debitată și invers. Puterea reactivă nu are, în consecință, un sens clar definit al propagării. Reactanța este calculată în modul următor:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad \text{și} \quad X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$$

Reactanța inductivă  $X_L$  este proporțională cu frecvența  $f$ , iar reactanța capacitivă este invers proporțională cu frecvența  $f$ . La conectarea în paralel a unei bobine cu inductivitatea  $L$  și a unui condensator cu capacitatea  $C$  există o frecvență  $f_0$  la care reactanțele sunt egale – aceasta este frecvența de rezonanță. Frecvența oscilațiilor din circuitul rezonant  $LC$  este calculată cu relația:

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}}$$

Relativ la curentul capacitiv, ar părea că rezultă mici dificultăți în a imagina în ce fel curentul capacitiv este suficient de inteligent să cunoască ceea ce tensiunea la bornele echipamentului va determina cu un sfert de perioadă mai târziu, deși în realitatea acest lucru chiar are loc. Trebuie precizat că, variația curentului electric este inductivă sau capacitivă în raport cu variația tensiunii, de exemplu, la trecerea prin zero. Aceasta este datorată energiei acumulate în condensator și a caracteristicilor particulare ale formei curbelor.

Capacitatea electrică corespunde rezilienței (elasticității) componentelor mecanice. Un condensator poate fi realizat cu o capacitate definită, corespunzând resortului unui sistem mecanic, însă, așa cum un material este rezilient (elastic) la orice întindere, la fel este, într-o oarecare măsură, și capacitatea parazită între două piese din material conductor.

Problema este dacă această reactanță parazită are un rol important în practica inginerescă. La înaltă tensiune și la frecvență înaltă, de cele mai multe ori are, însă nu acesta este cazul la nivelul tensiunilor joase și la frecvența industrială.

# Condensatoarele într-un mediu bogat în armonici

Energia corespunzătoare fiecărei dintre cele două energii acumulate este dată de relațiile:

$$W_{\text{resort}} = \frac{D}{2} \cdot s^2, \quad W_{\text{masa}} = \frac{m}{2} \cdot v^2$$

în care:

$D$  este constanta de elasticitate (alungirea raportată la forță, legea lui Hook)

$s$  – alungirea (distanța momentană față de punctul de repaos)

$m$  – masa

$v$  – viteza maselor în mișcare

unde  $s$  și  $v$  ar putea și ar trebui să fie scrise ca funcții de timp  $s(t)$  și  $v(t)$ , deoarece acestea au o variație periodică în raport cu timpul.

Dacă se analizează împreună cele două marimi, masa inerțială și elasticitatea resortului, rezultă un sistem cu două elemente de stocare a energiei. Energia care este eliberată de către unul dintre elemente poate fi transferată direct în celălalt element. Dacă resortul este întins și comprimat, masa va fi accelerată, cu forța determinată de relaxarea resortului. La trecerea prin zero a forței, resortul este într-o poziție de repaos, iar masa se mișcă cu viteza maximă. Deoarece masa are inerție, ea își va continua mișcarea, comprimând resortul, astfel că energia este transferată de la masele în mișcare înapoi la resort. Atunci când energia acumulată este într-un condensator și într-o bobină, tensiunea mecanică în resortul care se alungește și se comprimă poate fi corelată cu polaritatea pozitivă/negativă a tensiunii electrice la bornele condensatorului, iar viteza maselor cu curentul electric, cu modificarea polarității la intervale regulate. Toate modificările de polaritate au loc alternativ și la intervale constante, mai întâi tensiunea și apoi curentul electric, la fiecare sfert de perioadă (sau la fiecare  $90^\circ$  deoarece toate variațiile celor două mărimi, tensiunea mecanică și viteza în modelul mecanic, precum și tensiunea și curentul electric, în modelul electric, urmăresc o variație sinusoidală). Dacă se are în vedere defazajul de  $90^\circ$ , se poate spune că una dintre mărimi urmează o funcție cosinusoidală și, dacă se consideră componentele liniare și fără pierderi, la un moment dat pe durata oscilației

$$\sin^2(\omega \cdot t) + \cos^2(\omega \cdot t) = 1$$

iar energia internă

$$W = \frac{C}{2} \cdot u^2(t) + \frac{L}{2} \cdot i^2(t) = \text{constant}$$

în orice moment. Pentru componente reale apar pierderi și defazajul curentului electric în raport cu tensiunea, cu componente inductive/capacitive, are o valoare puțin mai mică de  $\pm 90^\circ$ , deoarece, dacă se funcționează în limitele normale, pierderile sunt reduse și influența neliniarității miezului magnetic al bobinei este neglijabilă din punct de vedere tehnic, dacă bobina este corect dimensionată.

## Ce este special relativ la curba sinusoidală?

Tensiunea sinusoidală determină un curent sinusoidal și un curent sinusoidal determină căderi de tensiune sinusoidale. Este acest lucru valabil numai pentru funcții sinusoidale sau și pentru alte funcțiuni? Răspunsul direct este că reprezintă o caracteristică a curbelor sinusoidale. Aceasta se observă dacă se urmăresc exemplele pentru alte forme de unde cum sunt cele din figura 1 și figura 2. Numai pentru elementele rezistive, valoarea instantanee a tensiunii este proporțională cu valoarea instantanee a curentului electric, astfel încât o curbă de tensiune determină o curbă de curent electric de aceeași formă și invers. În cazul sarcinilor reactive (de exemplu, în cazul unei bobine  $L$ ) valoarea instantanee a tensiunii este proporțională cu derivata curentului electric în raport cu timpul ( $di/dt$ ) sau (în cazul unui condensator  $C$ ) curentul electric este proporțional cu derivata valorii instantanee a tensiunii în raport cu timpul ( $du/dt$ ). Același lucru rezultă pentru curbele în sinus și cosinus (fig. 3).

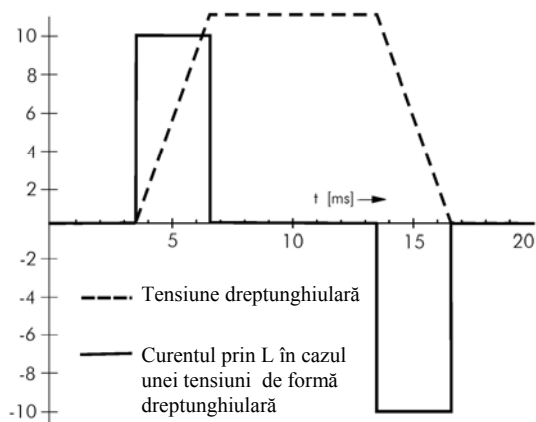


Fig. 1 – Tensiunea dreptunghiulară determină un curent de formă trapezoidală într-o bobină ideală (fără pierderi)

# Condensatoarele într-un mediu bogat în armonici

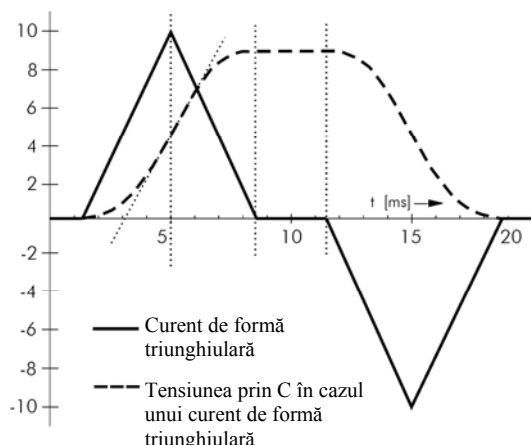


Fig. 2 – Curent electric de formă triunghiulară ce parcurge un condensator

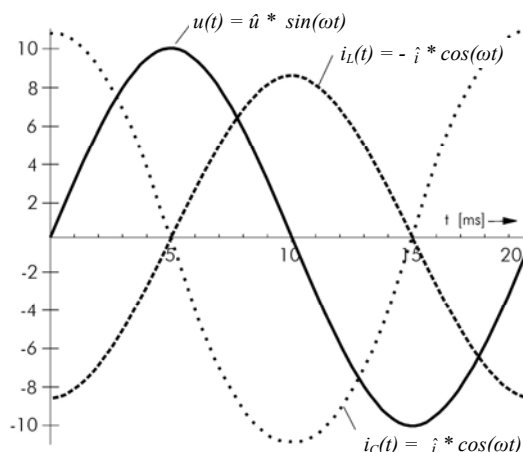


Fig. 3 – Tensiunea sinusoidală determină un curent sinusoidal

Curbele sinusoidale de tensiune și de curent electric au aceeași formă pentru componentele rezistive și reactive, luând în considerare defazațele. Pentru componentele reactive, tensiunea este proporțională cu derivata curentului. Deoarece derivata sinusului este cosinusul, care are aceeași formă a curbei, dar numai punctul de origine este diferit. Atunci când punctele inițiale ale tensiunii de rețea și curentului sunt undeva în trecut, ceea ce nu mai prezintă interes, apare ca și cum tensiunea sinusoidală determină un curent sinusoidal și curenții sinusoidale determină căderi de tensiune sinusoidale cu un anumit defazaj între curbe.

## Ce este puterea reactivă?

În sarcinile rezistive, valorile instantanee ale tensiunii și curentului electric sunt proporționale (fig. 4), dar în cazul componentelor pur reactive acest lucru nu este adevărat (fig. 6). În ultimul caz, dacă una dintre mărimi are o curbă de formă sinusoidală, la fel este și cealaltă, însă cu un defazaj între ele; rezultă că pe durata a două intervale ale fiecărei perioade a tensiunii alternative, cele două mărimi au același semn, însă pe durata altor două intervale au semne diferite. Pe durata intervalelor în care tensiunea și curentul electric au polarități diferite, puterea instantanee este negativă, astfel încât, pe aceste intervale, puterea se întoarce de la consumator spre „sursa” de alimentare. Energia electrică absorbită cu un sfert de perioadă înainte nu a fost consumată (de exemplu, transformată în altă formă de energie, cum ar fi căldura) ci a fost stocată și este apoi retransmisă înapoi în rețeaua de alimentare. Puterea „activă” real transferată pe durata fiecărei perioade este egală cu integrala puterii instantanee, ceea ce corespunde ariei sub curba valorilor instantanee ale tensiunii înmulțite cu valorile instantanee ale curentului electric (suprafețele hașurate în figurile 4, 5 și 6) din care trebuie scăzute ariile de sub abscisă. Puterea reactivă fundamentală este de fapt o oscilație a energiei.

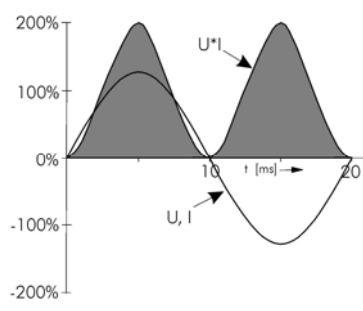


Fig. 4 – Sarcină rezistivă

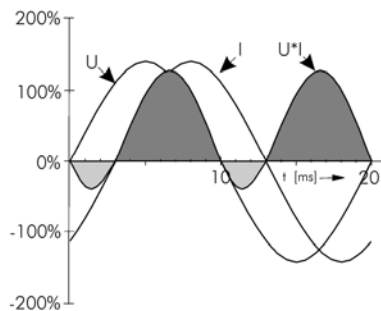


Fig. 5 – Sarcină rezistiv-inductivă

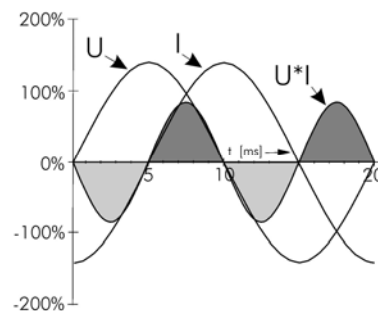


Fig. 6 – Sarcină inductivă

În continuare, definiția puterii reactive, dacă se referă la tensiune sinusoidală și sarcină reactivă este relativ simplă. Însă, puterea reactivă este prezentă și în cazul controlului sarcinilor rezistive prin modificarea unghiului de intrare în conducție (variatoarele de tensiune alternativă). În revista inginerilor electricieni din Germania, un autor pretinde că o astfel de sarcină (de exemplu, o lampă cu incandescență cu variator de tensiune) nu poate determina putere reactivă fundamentală, deoarece nu sunt intervale de timp în care curbele tensiunii instantanee

## Condensatoarele într-un mediu bogat în armonici

și curentului au polarități diferite. A fost un potop de reproșuri la adresa autorului, precizând că în analiza Fourier a curentului determinat de variator, curba fundamentală are un defazaj inductiv față de tensiune, astfel încât este evident că este putere reactivă fundamentală. Ambele puncte de vedere sunt logice însă care dintre ele este corect ?

În figura 7 sunt prezentate explicațiile. Dacă se privește din simplul punct de vedere al sarcinii (rândul de sus din fig. 7), aceasta nu este putere reactivă, curentul fiind în fază cu tensiunea (deși sunt forme distorsionate ale curbelor) și factorul de putere pe armonica fundamentală este unitar. Însă toate sarcinile sunt conectate într-un sistem comun și trebuie examinate din perspectiva sistemului, ceea ce este indicat în rândul de jos din figura 7). Acum tensiunea are formă sinusoidală, iar factorul de putere pentru armonica fundamentală este inductiv și egal cu 0,8 (a se vedea valorile măsurate W, VA și VAR).

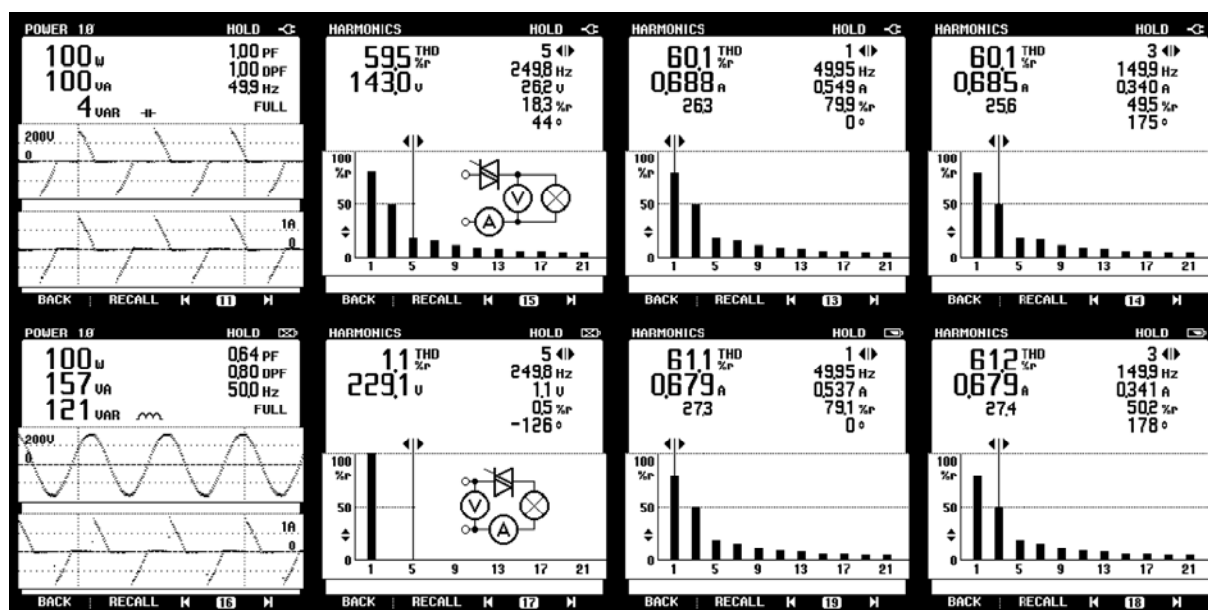


Fig. 7 – Este variatorul de tensiune alternativă cauza apariției puterii reactive pe fundamentală sau nu? Din punctul de vedere al furnizorului de energie, impactul adițional al rețelei este firește acela că deși oscilațiile de energie pe care unii experți le văd ca o premiză a existenței puterii reactive există, nu determină putere reactivă pe fundamentală

### De ce trebuie compensat?

Într-o rețea electrică obișnuită sunt mai multe sarcini simultan în funcțiune. Multe sunt rezistive, unele au componentă capacitivă, a căror curent este cu puțin în avans față de curba tensiunii (curent capacitiv), iar altele au o componentă inductivă, al căror curent este în urma tensiunii aplicate. În cele mai multe rețele electrice sarcinile rezistiv-inductive sunt preponderente, astfel încât curentul total are o caracteristică rezistiv-inductivă (fig. 5). În acest fel, în mod permanent, deși nedorit, oscilațiile de energie reprezintă o circulație adițională a curentului electric în cabluri și transformatoare, ceea ce crește încărcarea acestora, determină pierderi active suplimentare și utilizează o parte importantă a capacității acestora de încărcare. Din această cauză, principalele motive pentru compensare sunt de a evita:

- ♦ o cerere nedorită de capacitate de transport;
- ♦ pierderi de energie determinate astfel;
- ♦ determinarea unor căderi suplimentare de tensiune și a unor curenți suplimentari în rețeaua de distribuție.

Căderile suplimentare de tensiune în rețea sunt importante; curentul reactiv circulând printr-un element rezistiv determină pierderi active. Atunci când o impedanță este în principal reactivă, o modificare rapidă a curentului reactiv poate determina flicker. Un bun exemplu în acest sens, este conectarea unei macarale de construcții la un transformator de distribuție de putere relativ redusă atunci când noi locuințe se ridică într-o zonă industrială.

## Condensatoarele într-un mediu bogat în armonici

Macaraua este în mod obișnuit acționată de motoare cu inducție, comandate cu contactoare, care desigur că prezintă comutări frecvente de la stop la start, de la încet la repede și de la coborâre la urcare. Curentul de pornire al acestor motoare este foarte mare, de câteva ori mai mare decât curentul nominal și, deoarece acest curent de pornire are o componentă inductivă foarte mare, factorul de putere este  $\cos \varphi \approx 0,3$  sau mai mic la mașinile mari. Căderea de tensiune în transformator este puternic inductivă, fiind determinată de curentul de pornire al motorului și contribuie mult mai mult la apariția flickerului față de același curent electric care ar fi absorbit de o sarcină rezistivă (fig. 8). Totuși, un mijloc simplu pentru limitarea flickerului constă în conectarea unui condensator pentru a compensa componenta inductivă a curentului de pornire al motorului.

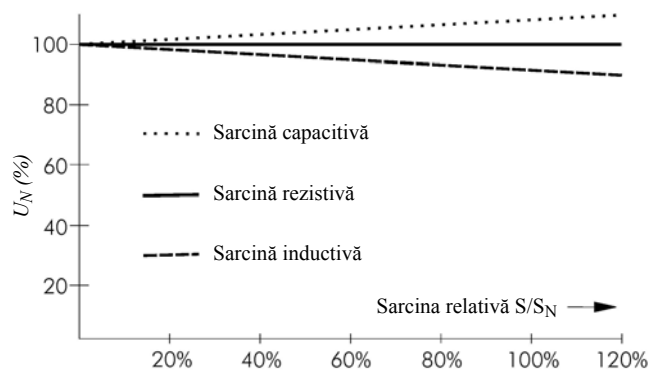


Fig. 8 – Căderea de tensiune într-un transformator (630 kVA corespunzător Normei HD 428 lista C), cea mai mică corespunde sarcinii rezistive, cea mai mare sarcinii inductive și cea negativă sarcinii capacitive

## Cum se poate compensa în condițiile actuale

### Controlul și reglarea puterii reactive

În mod normal este de dorit să se compenseze puterea reactivă. Este foarte simplu să se realizeze acest lucru prin conectarea unei sarcini capacitive adecvate în paralel cu sarcina rezistiv-inductivă, astfel încât componenta inductivă să fie anulată. Astfel că, atunci când elementul capacitiv este încărcat, transmite energia sa acumulată înapoi în rețea, iar elementul inductiv o preia și vice-versa, având în vedere faptul că curenții capacitivi și inductivi circulă în sensuri opuse, în fiecare moment. În acest mod, curentul total este **redus** prin **adunarea** curentului capacitiv la curentul de sarcină. Această operație se numește compensare paralelă.

Este necesar să se cunoască cea mai mare sarcină inductivă în instalație, în caz contrar poate apărea o supracompensare. În acest caz, instalația va căpăta caracteristicile unei sarcini rezistiv-capacitive și în cazurile extreme ar putea agrava situația față de starea de necompensat. Dacă sarcina – mai precis, componenta sa inductivă – variază, este necesară o compensare variabilă. În mod normal aceasta se obține prin gruparea condensatoarelor în secții și conectarea și deconectarea unor secții, în mod adecvat, cu ajutorul întreruptoarelor. Aceste operații determină, bineînțeles, vârfuri de curent care cu timpul conduc la uzura contactelor, riscul sudării contactelor și inducerea de tensiuni în circuitele de transmisii de date paralele. Este necesar a acorda atenție la conectare; atunci când unui condensator complet neîncărcat i se aplică tensiunea, în momentul când aceasta are valoarea de vârf, curentul inițial este egal cu cel din cazul unui scurtcircuit. Situația este și mai grea atunci când are loc conectarea la scurt timp după o deconectare, condensatorul fiind aproape complet încărcat cu polaritate inversă, rezultând astfel un curent inițial aproape dublu față de valoarea de vârf a curentului de scurtcircuit în zonă. Dacă în zonă sunt mai multe surse în comutație pentru alimentarea unor sarcini, deoarece lucrează în același sistem, atunci condensatorul pentru compensare încărcat, la reconectarea la sursa de alimentare, poate încărcă direct multiplele condensatoare de filtrare descărcate, mai mult sau mai puțin direct de la un condensator la altul cu o impedanță redusă între ele. Valoarea de vârf a curentului rezultat are o durată extrem de redusă însă este extrem de mare, mult peste valoarea curentului de scurtcircuit. În acest caz sunt raportate, în mod frecvent, avarii la echipamente, în special la contactele contactoarelor care controlează secțiile de condensatoare, determinate de întreruperile scurte în rețeaua electrică care sunt rezolvate automat, de exemplu cu ajutorul reanclanșării automate, pentru a stinge arcul electric pe liniile aeriene de înaltă sau medie tensiune. Se afirmă de multe ori că această dublare a valorii de vârf nu este posibilă în cazul condensatoarelor echipate cu rezistor de descărcare în conformitate cu CEI 831. Totuși, standardul cere ca reducerea tensiunii până la sub 75 V să se facă într-un interval de 3 minute, astfel încât aceasta are un efect redus pe durata întreruperilor scurte de câteva zeci de milisecundă până la câteva secunde.

Dacă în momentul reconectării condensatorului la tensiunea de linie, tensiunea reziduală la bornele condensatorului se întâmplă să fie egală cu tensiunea de alimentare, atunci nu apare șoc de curent. Acest lucru este adevărat dacă condensatorul prezintă o capacitate pură, iar tensiunea corespunde unei surse ideale de

## Condensatoarele într-un mediu bogat în armonici

tensiune, ceea ce înseamnă că prezintă o impedanță internă nulă. Dacă inductanța internă a sistemului se ia în considerație, pot să apară unele fenomene de rezonanță între aceasta și condensatoare. Să considerăm următorul caz: tensiunea reziduală a condensatorului este jumătate din valoarea de vârf și egală cu valoarea instantanee a tensiunii de linie, ceea ce rezultă la unghiul de  $45^\circ$  după trecerea tensiunii prin zero:

$$u_C = u\left(\frac{\pi}{4}\right) = 400 \text{ V} \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} = 283 \text{ V}$$

În acest moment, curentul în condensator ar trebui să fie:

$$i_C = -\frac{\hat{i}}{2}$$

aceasta însă nu este adevărat deoarece condensatorul a fost deconectat de la sursă până în acest moment. În momentul conectării, dacă se neglijează inductivitatea sistemului, curentul va crește imediat la această valoare și nimic nu ar putea să apară în plus în acest regim staționar. Dar sistemul real nu este fără inductivitate, astfel încât curentul să ajungă la această valoare fără oscilații la început, apoi accelerează și – din nou datorită inductivității, corespunzător „inerției” – rezultă un impuls peste valoarea finală, pe un traseu apropiat, până la dublul valorii finale. Apoi valoarea sa scade și așa mai departe și astfel rezultă oscilații pe o perioadă redusă care se reduc până la zero, pe durata a câtorva perioade după conectare. Frecvența acestor oscilații poate fi mai mare atunci când inductivitatea sistemului este mică și poate determina perturbații în instalații. Numai atunci când valoarea instantanee a tensiunii de linie și tensiunea reziduală la bornele condensatorului au amândouă aceeași valoare negativă sau pozitivă, moment în care valoarea instantanee a curentului are valoarea zero, curentul rezistiv inductiv nu va prezenta oscilații în momentul conectării.

Mai precis, trebuie să fie îndeplinite două condiții. Prima, suma căderilor de tensiune la bornele condensatorului și la bornele bobinei serie (parazită sau pentru dezacordare intenționată) trebuie să fie egală cu tensiunea de linie. A doua condiție, curentul instantaneu din rețea, considerat că este conectat de mult timp înainte, trebuie să fie egal cu curentul actual din condensator, care, bineînțeles, era nul înainte de conectare. Această a doua condiție este îndeplinită numai dacă valoarea de vârf a tensiunii de linie este egală cu tensiunea la bornele condensatorului. Se obține acest lucru dacă condensatorul este preîncărcat de la o sursă suplimentară. Soluția are un avantaj secundar minor care constă în aceea că această valoare corespunde energiei maxime acumulată în condensator când acesta nu este conectat, astfel încât în momentul conectării poate ajuta la limitarea unor goluri de scurtă durată și, în subsidiar, flickerul care altfel ar putea să apară.

Contactoarele sunt, în orice caz, prea lente și nu au o precizie de funcționare suficientă pentru a realiza conectarea la un moment dat al curbei. Dacă se folosesc contactoare, trebuie luate măsuri pentru a limita curentul de vârf inițial, de exemplu cu ajutorul unui rezistor de limitare sau cu o bobină serie. Cea de a doua soluție este mai des utilizată totuși pentru alte motive (a se vedea secțiunea 3.3.1 a acestui Ghid) și uneori este cerută de către furnizorul de energie. Deși această bobină serie deplasează vârful curentului inițial de la operația de conectare la operația de deconectare în momentul maximului de tensiune a sursei, totuși este mai puțin dăunător, deoarece puterea reactivă a bobinei este o fracțiune din puterea reactivă a condensatorului, astfel încât puterea rezultantă este mai mică.

Întreruptoarele electronice, cum sunt cele cu tiristoare, pot în mod simplu să controleze în mod precis momentul conectării într-un punct dat al curbei. Este deci posibil să se controleze procesul de conectare astfel încât să se limiteze flickerul rapid determinat de sarcina inductivă cu variație în limite largi, ca de exemplu motorul unei macarale, menționată mai sus, un cuptor cu arc electric sau o instalație de sudare.

O soluție alternativă, utilizată frecvent în unele zone din Europa este SVC (*Static VAr Compensator*), cuprinzând un condensator fix, conectat în paralel cu o bobină controlată (*Thyristor Controlled Reactor – TRC*).

### Centralizat sau local ?

Din motive comerciale, utilizatorii de energie au, în mod obișnuit, instalații de compensare, deoarece unii furnizori urmăresc puterea reactivă – fără a acorda o atenție tot așa de mare puterii active deși aceasta are o valoare semnificativă – pentru a realiza compensarea „capacității neutilizate” a sistemului de distribuție. În unele țări practica urmării puterii reactive este declinată și îmbunătățirea factorului de putere este mai puțin utilizată. Consumatorii de energie electrică văd în aceasta un avantaj, însă în fapt aceasta duce la creșterea sarcinii în rețea, care de cele mai multe ori este astfel încărcată la maximum.

În mod obișnuit este plasată o instalație de compensare statică, de putere mare, în punctul comun de conectare, la intrarea consumatorului, care corectează factorul de putere până la nivelul cerut pentru a evita creșterea facturii, în mod obișnuit  $\cos\varphi = 0,9$  sau  $\cos\varphi = 0,95$ . O alternativă constă în dispersarea mijloacelor de compensare în apropierea sarcinilor rezistiv-inductive și, în caz limită, individual la bornele receptoarelor de putere reactivă.

## *Condensatoarele într-un mediu bogat în armonici*

---

Compensarea centralizată este de obicei preferată fiind mai ieftină, deoarece unitatea centrală are un cost de achiziție mai redus față de aceeași putere reactivă plasată în unități mici. Capacitatea de compensare instalată poate fi mai mică deoarece se poate considera că nu toate receptoarele de putere reactivă sunt simultan în funcțiune. Totuși trebuie reamintit faptul că puterea reactivă determină pierderi active în interiorul sistemului industrial – căderile de tensiune în elementele rezistive, cum sunt cablurile, sunt în fază cu curentul electric, astfel că produsul, pierderile de putere, este mereu pozitiv. Compensarea centralizată nu va reduce aceste pierderi, ci reduce numai factura datorată factorului de putere impus de către furnizor. Pe de altă parte, atunci când compensarea este descentralizată (locală), costul total al unităților individuale este mai mare decât costul unei singure unități mari, iar capacitatea de compensare instalată este în mod obișnuit mai mare – fiecare receptor este compensat, aflat sau nu sau în funcțiune. Pierderile sunt reduse deoarece puterea reactivă circulă numai între instalația de compensare și receptor, față de cazul de mai sus până la instalația centralizată de compensare aflată în punctul comun de cuplare.

Făcând abstracție de eficiență, sunt și argumente tehnice pentru și contra compensării centralizate. De exemplu, dacă sarcina totală a unui transformator este capacitivă, tensiunea de ieșire crește peste cea nominală. Acest efect era odată utilizat pentru anularea căderii de tensiune datorată transformatoarelor puternic încărcate. Sarcina este supracompensată astfel încât sarcina totală apare ca fiind capacitivă la transformator și, reducând astfel căderea de tensiune inductivă în transformator [1]. În cazurile în care sunt conectate și deconectate, în mod frecvent sarcini mari, determinând probleme de flicker, aceasta poate fi o soluție mai robustă și fiabilă față de o instalație electronică de compensare a flickerului, cu o eficiență considerabil mai mare în privința costurilor, în cazurile în care un nivel de compensare ar fi necesar în orice caz.

În general, supratensiunile la transformator în cazul sarcinii capacitive reprezintă un risc, iar acesta trebuie evitat sau trebuie redus într-un mod adecvat, de exemplu, utilizând o tensiune de dimensionare puțin mai mare decât tensiunea nominală (cu circa 6 %). Uneori este necesar sau acceptabil să se conecteze instalația de compensare la nivelul MT și poate fi avantajos să se conecteze condensatoarele de JT prin intermediul unui transformator MT/JT decât să se plătească prețuri ridicate pentru condensatoarele de MT. În aceste cazuri, sarcina transformatorului este capacitivă și tensiunea de ieșire este mai mare decât cea dorită. Acest lucru poate fi redus printr-o selecție adecvată a componentelor cu o tensiune corespunzătoare de dimensionare sau alegând raportul de transformare, utilizând prizele acestuia, pentru a reduce tensiunea. Această ultimă soluție este preferabilă atunci când, în acest fel, se evită funcționarea transformatorului în stare supraexcitată și în consecință cu pierderi mari. Soluția poate fie evitată datorită unor economii false; deși costurile totale ale instalației scad, cresc costurile de operare. Puterea reactivă din instalație este transferată de două ori – de la instalația de JT la sistemul de MT și de la sistemul de MT la condensatoarele de JT – cu două pierderi de putere, plătite de consumator.

Alte dezavantaje ale puterii reactive constau în necesitatea unei capacități de transmisie și căderi de tensiune, care au loc și în interiorul întreprinderii, prin orice linie și în orice transformator, între sarcina capacitivă și instalația de compensare. Este mai bine să se consume 100 % din buget când 100 % este în funcțiune, decât 75 % din buget când numai 50 % este în funcțiune.

În schemele descentralizate, fiecare și totdeauna, sarcinile rezistiv-inductive – chiar și cele mici – sunt compensate prin integrarea unor condensatoare. Aceasta a condus la satisfacție deplină, de exemplu, în corpurile de iluminat cu una sau două lămpi fluorescente și balast magnetic. În Germania și Elveția acestea sunt în mod curent conectate cu o compensare serie, în care numai una sau două lămpi cu un balast rămân fără compensare și cealaltă este (supra) – compensată cu ajutorul unui condensator serie, dimensionat ca să absoarbă exact același curent ca și ramura necompensată, însă cu un defazaj invers (montaj duo).

Totuși descentralizarea are limitele sale în cazurile motoarelor asincrone cu compensare locală. Dacă condensatorul este plasat înaintea întreruptorului motorului, atunci acesta rămâne conectat dacă motorul este deconectat, determinând supracompensarea sistemului. Dacă condensatorul este plasat după întreruptorul motorului, el este deconectat odată cu motorul și apare riscul autoexcitației în mașină și accelerarea sa. Tensiunea este generată chiar dacă echipamentul a fost izolat față de rețea și pot rezulta supratensiuni în cazul în care condensatorul este prost dimensionat.

Trebuie de subliniat aici și faptul că puterea reactivă nu este totdeauna indezirabilă. Astfel, este bine a se genera puterea reactivă capacitivă adecvată necesară pentru a acoperi puterea reactivă inductivă și, în cazul în care sarcina rezistiv-capacitivă este preponderentă, vice versa. Puterea reactivă capacitivă este desigur avantajoasă și conduce la reducerea pierderilor, de exemplu prin excitarea generatoarelor asincrone ca la turbinele eoliene sau la grupurile cu cogenerare, atunci când acestea sunt conectate direct la rețea fără intermediul unui invertor. Acesta rezultă absolut necesar în cazul în care aceste generatoare se consideră că alimentează o rețea insulară, în caz contrar acestea nu sunt pentru excitare, nici pentru controlul tensiunii și nici pentru alimentare, cât timp mașina este în funcțiune.

# Condensatoarele într-un mediu bogat în armonici

## Dezacordare

Dezacordarea se referă la practica conectării în serie cu fiecare condensator a unei bobine. Un motiv pentru dezacordare, reducerea curentului inițial, a fost deja menționat. Dar principalul motiv pentru dezacordare este recomandat la toți consumatorii care au instalații de compensare și la cei mai mulți furnizori – și pe care cei mai mulți consumatori l-au adoptat – este problema perturbațiilor de tensiune în rețeaua electrică. Sarcinile electronice moderne generează curenți armonici, determinând distorsiuni armonice (a se vedea secțiunea 3.1 a acestui Ghid) și antrenând perturbații de înaltă frecvență în rețeaua electrică. Deoarece reactanța unui condensator este invers proporțională cu frecvența, frecvențele ridicate pot determina depășirea curentului de dimensionare al condensatorului. Acest lucru poate fi prevenit prin prezența unei bobine de dezacord. Puterea reactivă de dimensionare a bobinei de dezacord este în mod obișnuit de 5 %, 7 % sau 11 % din puterea reactivă a condensatorului pentru compensare. Aceste valori sunt numite „factor de dezacordare”.

Când se vorbește despre dimensionare, sunt posibile confuzii importante privind puterea reactivă indicată pe placa de identificare a instalației de compensare. Se referă la tensiunea de dimensionare a rețelei sau la tensiunea de dimensionare a condensatorului (care este mai mare) și dacă factorul de dezacordare este luat în calcul. În realitate, puterea reactivă declarată trebuie totdeauna să se refere la unitatea compusă – condensator plus bobina de dezacordare – la tensiunea de alimentare și la frecvența fundamentală.

Deoarece reactanța bobinei crește proporțional cu frecvența, aceasta determină o reducere a capacității la 50 Hz la un factor de dezacordare de 11 % și cu 100 % la frecvența de 150 Hz<sup>1</sup>, înțelegând faptul că reactanțele inductive și capacitive sunt egale (în rezonanță) și se anulează. În acest fel, se asigură o opțiune pentru alegerea factorului de dezacordare ca o cale pentru „a absorbi” armonici determinate din rețeaua electrică, în timp ce caracteristicile de bază privind funcția de compensare rămân satisfăcătoare. Acest aspect este prezentat mai în detaliu în secțiunea 3.3.1. În general, în scopul de a preveni supraîncărcarea condensatorului (și a bobinei) este preferabil să se evite factorul de dezacordare care determină frecvențe de rezonanță la una dintre frecvențele predominante. Este de preferat ca factorul de dezacordare să fie ales astfel încât combinația condensator-bobină să rămână inductivă pentru frecvențe puțin mai mici față de cea mai mică frecvență armonică ce apare și mai sus (fig. 9). Rezonanțele evitate în acest fel (fig. 10) ar putea de altfel să apară între condensator și alte elemente ale rețelei, în special cu inductivitatea de scăpări a celui mai apropiat transformator, fiind excitate de una sau alta dintre armonici. În figurile de mai sus, este prezentat factorul de amplificare în funcție de frecvență. Prin factor de amplificare se înțelege aici raportul dintre mărimile din regimul în care instalația de compensare este conectată și regimul în care aceasta lipsește.

Însă aceasta nu este singurul motiv pentru dezacordare. Condensatoarele actuale pot să fie supraîncărcate de către frecvențele ridicate omniprezente în rețea, frecvențe mai mari decât cele corespunzătoare celor mai întâlnite armonici. Orice tensiune redusă de înaltă frecvență, atât de mică încât nu poate fi observată de echipamentele de monitorizare de înaltă exactitate ale analizoarelor de rețea, suprapusă peste tensiunea de rețea, poate determina un curent de înaltă frecvență prin condensator (fig. 11).

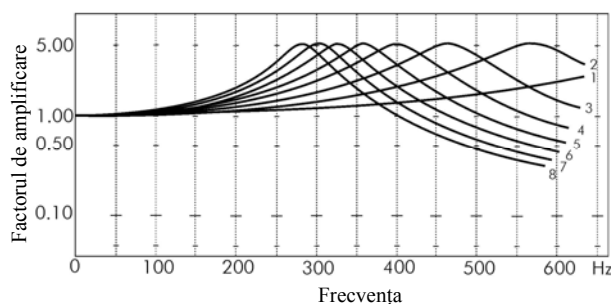


Fig. 9 – Curbele de rezonanță pentru diferite puteri ale instalației de compensare, de la 50 kVAr (curba 1) până la 400 kVAr (curba 2), operând cu un transformator de 1250 kVA (Frako)

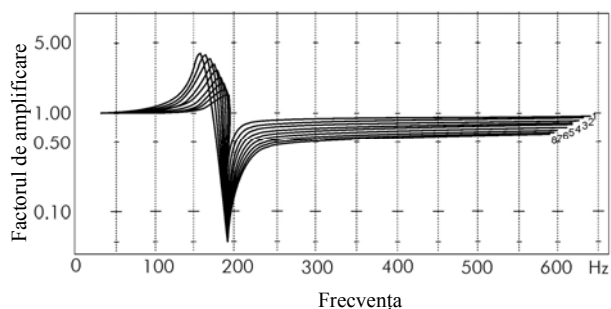


Fig. 10 – Curbele de rezonanță pentru diferite instalații de compensare dezacordate, dimensionate de la 50 kVAr (curba 1) până la 400 kVAr (curba 8), operând cu un transformator de 1250 kVA (Frako)

<sup>1</sup>  $X_L$  la 50 Hz = 11 % și  $X_L$  la 150 Hz = 33 % (relativ la  $X_C$  la 50 Hz).  $X_C$  la 150 Hz = 33 %. Ambele sunt egale ca amplitudine, de aici rezultă un „factor de dezacordare” de 100 %.

## Condensatoarele într-un mediu bogat în armonici

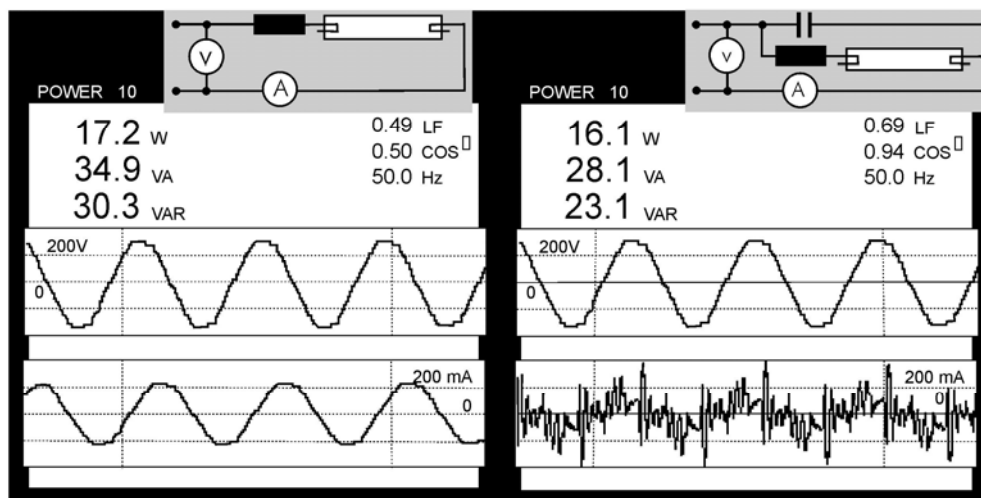


Fig. 11 – Lampă fluorescentă de 11 W fără compensare (stânga) și cu compensare paralelă (dreapta)

În partea stângă este o lampă fluorescentă de 11 W funcționând cu balast magnetic, însă fără compensare. Dar cantitatea mare de putere reactivă necesită compensarea cu condensator. În partea dreaptă, în circuitul lămpii (conexiunea serie a lămpii cu balastul și totul în paralel cu un condensator adecvat) rezultă un curent bizar, apropiat însă unei curbe sinusoidale. Mixtura adițională de frecvențe ridicate ar parcurge condensatorul atunci când nimic altceva nu ar fi în circuit. Măsurătorile confirmă acest fapt. Deoarece curentul este aproape sinusoidal, în partea stângă, diferența între factorul de putere (numit factorul de sarcină *LF- Load Factor*) și  $\cos\phi$  (numit factor de defazare) este redusă, pe când în partea dreaptă este semnificativ. Motivul este că factorul de putere este raportul dintre puterea activă (la 50 Hz) și puterea aparentă, incluzând puterea reactivă fundamentală, puterile pe armonici și puterile de zgomot de fond, pe când vechiul  $\cos\phi$  – factorul de defazare – include numai puterea reactivă fundamentală determinată de defazajul dintre curbe fundamentale de tensiune și curent electric. Condensatorul este destinat să producă puterea reactivă (stânga) însă este parcurs de curenții armonici (dreapta), dacă nu este dezacordat. Acesta este cel de al doilea motiv pentru care, în prezent, este larg utilizată practica dezacordării și rezultă importanța deosebită pentru durata de viață a condensatoarelor destinate să funcționeze la 50 Hz. Experimentul poate fi repetat cu rezultate similare în aproape toate rețelele moderne. Simpla conectare a unui condensator la tensiunea de linie și înregistrarea curentului electric conduce, pretutindeni, la rezultate similare. Poate fi foarte bine evidențiat acest lucru dacă curentul printr-un condensator circulă în apropierea unui difuzor dimensionat corespunzător. Zgomotele sunt de-a dreptul impresionante, deși trecerea la liniște și un zgomot numai de 50 Hz se poate face imediat dacă condensatorul este dezacordat cu o bobină.

Exemplul prezentat arată faptul că practica compensării serie pentru lămpile fluorescente este complet avantajoasă și reprezintă o compensare capacitivă cu un factor de dezacordare de 50 %, iar aceasta se realizează cu o bobină care este necesară în orice caz și nu trebuie adăugată.

## Concluzii

Este deosebit de important, în primul rând, să se înțeleagă comportarea complementară a elementelor *L* și *C*, pentru a înțelege problema compensării. Condensatoarele pentru compensare trebuie totdeauna dezacordate pentru a evita rezonanța cu armonici și supraîncărcarea la curenți de înaltă frecvență. Secțiunile instalației de compensare trebuie să fie proiectate pentru comutații rapide utilizând întreruptoare statice și algoritmi inteligenți de control. Plasarea optimă a instalațiilor de compensare, dacă trebuie centralizat sau descentralizat, poate fi discutată.

## Bibliografie

- [1] Wolfgang Hofmann, Wolfgang Just: *Blindleistungs-Kompensation in der Betriebspraxis*, VDE Verlag, Offenbach, Germany, 4th edition, 2003

## *Note*

---

## *Note*

---

## *Note*

---

## Parteneri de Referință & Fondatori\*

<b>European Copper Institute* (ECI)</b> <a href="http://www.eurocopper.org">www.eurocopper.org</a>	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid <a href="http://www.etsii.upm.es">www.etsii.upm.es</a>	LEM Instruments <a href="http://www.lem.com">www.lem.com</a>
<b>Akademia Gorniczo-Hutnicza (AGH)</b> <a href="http://www.agh.edu.pl">www.agh.edu.pl</a>	Fluke Europe <a href="http://www.fluke.com">www.fluke.com</a>	MGE UPS Systems <a href="http://www.mgeups.com">www.mgeups.com</a>
<b>Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA)</b> <a href="http://www.citcea.upc.es">www.citcea.upc.es</a>	<b>Hochschule für Technik und Wirtschaft* (HTW)</b> <a href="http://www.htw-saarland.de">www.htw-saarland.de</a>	Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg <a href="http://www.uni-magdeburg.de">www.uni-magdeburg.de</a>
<b>Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI)</b> <a href="http://www.ceiuni.it">www.ceiuni.it</a>	Hogeschool West-Vlaanderen Departement PIH <a href="http://www.pih.be">www.pih.be</a>	<b>Polish Copper Promotion Centre* (PCPC)</b> <a href="http://www.miedz.org.pl">www.miedz.org.pl</a>
<b>Copper Benelux*</b> <a href="http://www.copperbenelux.org">www.copperbenelux.org</a>	<b>International Union for Electricity Applications (UIE)</b> <a href="http://www.ue.org">www.ue.org</a>	<b>Università di Bergamo*</b> <a href="http://www.unibq.it">www.unibq.it</a>
<b>Copper Development Association* (CDA UK)</b> <a href="http://www.cda.org.uk">www.cda.org.uk</a>	<b>ISR - Universidade de Coimbra</b> <a href="http://www.isr.uc.pt">www.isr.uc.pt</a>	<b>University of Bath</b> <a href="http://www.bath.ac.uk">www.bath.ac.uk</a>
<b>Deutsches Kupferinstitut* (DKI)</b> <a href="http://www.kupferinstitut.de">www.kupferinstitut.de</a>	<b>Istituto Italiano del Rame* (IIR)</b> <a href="http://www.iir.it">www.iir.it</a>	<b>University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST)</b> <a href="http://www.umist.ac.uk">www.umist.ac.uk</a>
<b>Engineering Consulting &amp; Design* (ECD)</b> <a href="http://www.ecd.it">www.ecd.it</a>	<b>Katholieke Universiteit Leuven* (KU Leuven)</b> <a href="http://www.kuleuven.ac.be">www.kuleuven.ac.be</a>	<b>Wroclaw University of Technology*</b> <a href="http://www.pwr.wroc.pl">www.pwr.wroc.pl</a>
EPRI PEAC Corporation <a href="http://www.epri-peac.com">www.epri-peac.com</a>	Laborelec <a href="http://www.laborelec.com">www.laborelec.com</a>	

## Consiliul de redacție

David Chapman (Chief Editor)	CDA UK	<a href="mailto:david.chapman@copperdev.co.uk">david.chapman@copperdev.co.uk</a>
Prof Angelo Baggini	Università di Bergamo	<a href="mailto:angelo.baggini@unibq.it">angelo.baggini@unibq.it</a>
Dr Araceli Hernández Bayo	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid	<a href="mailto:ahernandez@etsii.upm.es">ahernandez@etsii.upm.es</a>
Prof Ronnie Belmans	UIE	<a href="mailto:ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be">ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be</a>
Dr Franco Bua	ECD	<a href="mailto:franco.bua@ecd.it">franco.bua@ecd.it</a>
Jean-Francois Christin	MGE UPS Systems	<a href="mailto:jean-francois.christin@mgeups.com">jean-francois.christin@mgeups.com</a>
Prof Anibal de Almeida	ISR - Universidade de Coimbra	<a href="mailto:adealmeida@isr.uc.pt">adealmeida@isr.uc.pt</a>
Hans De Keulenaer	ECI	<a href="mailto:hdk@eurocopper.org">hdk@eurocopper.org</a>
Prof Jan Desmet	Hogeschool West-Vlaanderen	<a href="mailto:jan.desmet@howest.be">jan.desmet@howest.be</a>
Dr ir Marcel Didden	Laborelec	<a href="mailto:marcel.didden@laborelec.com">marcel.didden@laborelec.com</a>
Dr Johan Driesen	KU Leuven	<a href="mailto:johan.driesen@esat.kuleuven.ac.be">johan.driesen@esat.kuleuven.ac.be</a>
Stefan Fassbinder	DKI	<a href="mailto:sfassbinder@kupferinstitut.de">sfassbinder@kupferinstitut.de</a>
Prof Zbigniew Hanzelka	Akademia Gorniczo-Hutnicza	<a href="mailto:hanzel@uci.agh.edu.pl">hanzel@uci.agh.edu.pl</a>
Stephanie Horton	LEM Instruments	<a href="mailto:sho@lem.com">sho@lem.com</a>
Dr Antoni Klajn	Wroclaw University of Technology	<a href="mailto:antoni.klajn@pwr.wroc.pl">antoni.klajn@pwr.wroc.pl</a>
Prof Wolfgang Langguth	HTW	<a href="mailto:wlang@htw-saarland.de">wlang@htw-saarland.de</a>
Jonathan Manson	Gorham & Partners Ltd	<a href="mailto:jonathanm@gorham.org">jonathanm@gorham.org</a>
Prof Henryk Markiewicz	Wroclaw University of Technology	<a href="mailto:henryk.markiewicz@pwr.wroc.pl">henryk.markiewicz@pwr.wroc.pl</a>
Carlo Masetti	CEI	<a href="mailto:masetti@ceiuni.it">masetti@ceiuni.it</a>
Mark McGranaghan	EPRI PEAC Corporation	<a href="mailto:mmcgranaghan@epri-peac.com">mmcgranaghan@epri-peac.com</a>
Dr Jovica Milanovic	UMIST	<a href="mailto:jovica.milanovic@umist.ac.uk">jovica.milanovic@umist.ac.uk</a>
Dr Miles Redfern	University of Bath	<a href="mailto:eesmar@bath.ac.uk">eesmar@bath.ac.uk</a>
Dr ir Tom Sels	KU Leuven	<a href="mailto:tom.sels@esat.kuleuven.ac.be">tom.sels@esat.kuleuven.ac.be</a>
Prof Dr-Ing Zbigniew Styczynski	Universität Magdeburg	<a href="mailto:Sty@E-Technik.Uni-Magdeburg.de">Sty@E-Technik.Uni-Magdeburg.de</a>
Andreas Sumper	CITCEA	<a href="mailto:sumper@citcea.upc.es">sumper@citcea.upc.es</a>
Roman Targosz	PCPC	<a href="mailto:cem@miedz.org.pl">cem@miedz.org.pl</a>
Hans van den Brink	Fluke Europe	<a href="mailto:hans.van.den.brink@fluke.nl">hans.van.den.brink@fluke.nl</a>



*Stefan Fassbinder*



Deutsches Kupferinstitut  
Am Bonnhof 5  
D-40474 Düsseldorf  
Germany

Tel: 00 49 211 4796300

Fax: 00 49 211 4796310

Email: [Sfassbinder@kupferinstitut.de](mailto:Sfassbinder@kupferinstitut.de)

Web: [www.kupferinstitut.de](http://www.kupferinstitut.de)



Membră a  
**EUROEL**

Societatea Inginerilor Energeticieni din România  
No. 1, Lacul Tei Avenue, PO/BOX 30-33  
020371 Bucharest  
Romania

Tel: 4 0722 36 19 54

Fax: (4 021) 610 52 83

Email: [office@sier.ro](mailto:office@sier.ro)

Websites: [www.sier.ro](http://www.sier.ro)



European Copper Institute  
168 Avenue de Tervueren  
B-1150 Brussels  
Belgium

Tel: 00 32 2 777 70 70

Fax: 00 32 2 777 70 79

Email: [eci@eurocopper.org](mailto:eci@eurocopper.org)

Website: [www.eurocopper.org](http://www.eurocopper.org)