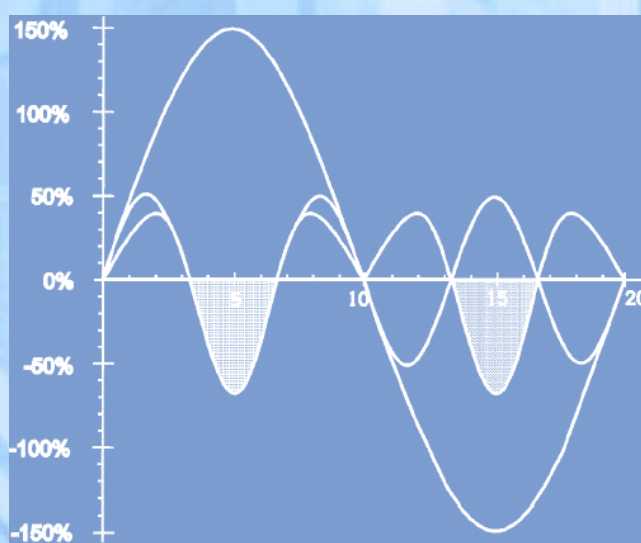


Ghid de Aplicare - Calitatea Energiei Electrice



Armonici *Filtre pasive*

3.3.1



Armonici

Filtre Pasive

Stefan Fassbinder
Deutsches Kupferinstitut
Iunie 2003



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.

European Copper Institute (ECI)

European Copper Institute este un joint venture între ICA (International Copper Association) și membrii IWCC (International Wrought Copper Council). 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 zece Copper Development Association („CDAs”) în Benelux, Franța, Germania, Grecia, Ungaria, Italia, Polonia, Scandinavia, Spania și Regatul Unit. ECI continuă eforturile întreprinse inițial de către Copper Products Development Association, apărută în 1959 și INCRA (International Copper Research Association), apărută în 1961.

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 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, Università di Bergamo & Engineering Consulting and Design și Societatea Inginerilor Energeticieni din România.

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



Membră a
EURCOP

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
Websites: 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
Website: www.eurocopper.org

Filtre pasive

Elemente de bază

În secțiunea 3.1.2 a acestui Ghid s-a explicat faptul că puterea reactivă trebuie să fie compensată și modul în care aceasta este realizată cel mai bine. Puterea reactivă pe fundamentală este întotdeauna o oscilație păguboasă de energie (datorită defazajului oscilațiile au și valori negative). Faptul că curbele de tensiune și de curent electric nu variază proporțional, este o condiție suficientă pentru existența puterii reactive. Dacă se iau în considerație și armonicile de curent nu este clar dacă acestea pot fi considerate ca o altă formă a puterii reactive. Armonicile de curent pot să apară în sisteme în care ele nu determină energie și când pe întreaga durată a unei perioade, curbele de tensiune și de curent electric total pot să aibă același semn (de exemplu, în cazul variatoarelor de tensiune alternativă pentru controlul lămpilor cu incandescență). Noțiunea de „curent reactiv” se aplică uneori curenților armonici când aceștia nu determină armonici de tensiune substanțiale, de același rang, astfel că produsul între curentul și tensiunea de același rang rezultă zero. În calculul puterii instantanee, la un moment dat poate fi o valoare momentană redusă a curentului electric (chiar zero ca în cazul variatoarelor de lumină) înmulțită cu o valoare mare a tensiunii, iar în alt moment ar putea fi un curent mare și o tensiune redusă. La calculul valorii medii a integralei valorilor puterii instantanee rezultă o valoare mai mică decât produsul valorilor efective ale tensiunii și curentului electric. Acest lucru înseamnă că undeva trebuie să existe putere reactivă, deși în nici un moment nu are loc un transfer de energie de la receptor spre rețea, așa cum are loc în cazul puterii reactive pe armonica fundamentală. Totuși armonicile de curent au multe aspecte comune cu puterea reactivă:

- ambele conduc la încărcarea suplimentară nedorită a generatoarelor, cablurilor și transformatoarelor, deși nu participă la producerea și transferul de energie electrică utilă;
- ambele determină pierderi suplimentare – deoarece căderea de tensiune este proporțională cu curentul electric, produsul lor este real și diferit de zero;
- armonicile apar, în cea mai mare parte, la consumator și se propagă în sens invers transferului de energie (fig. 1) (cu excepția surselor distribuite cu energie regenerabilă, care sunt conectate la rețea prin intermediul unui invertor și a cărui armonici se propagă de la sursa de energie). Puterea reactivă pe armonica fundamentală nu are un sens definit, cu excepția faptului că absorbția puterii reactive inductive se consideră identică cu producerea de putere reactivă capacitivă și invers.

Ar fi astfel posibil, ca atât puterea reactivă pe fundamentală cât și armonicile să fie „compensate” cu aceleași mijloace. În realitate chiar așa și este și acest lucru este subiectul acestei aplicații. Aspectele de bază sunt reluate mai amănunțit în continuare pentru a asigura înțelegerea informațiilor prezentate în secțiunea 3.1.2:

- Bobinele de inductivitate L și condensatoarele de capacitate C au în comun cu rezistorul de rezistență electrică R mult mai puțin decât s-ar putea crede. Practic în toată literatura tehnică din domeniul electrotehnic, inclusiv acest Ghid, aceste elemente sunt considerate liniare, adică tensiunea și curentul electric sunt proporționale. În realitate acest lucru corespunde numai în cazul curbelor pur sinusoidale. Dacă se consideră valorile instantanee, tensiunea la bornele bobinei este proporțională cu variația în raport cu timpul a curentului electric, iar în cazul condensatorului curentul este proporțional cu variația în raport cu timpul a tensiunii la borne. Aceste observații conduc direct la cel de-al doilea aspect:

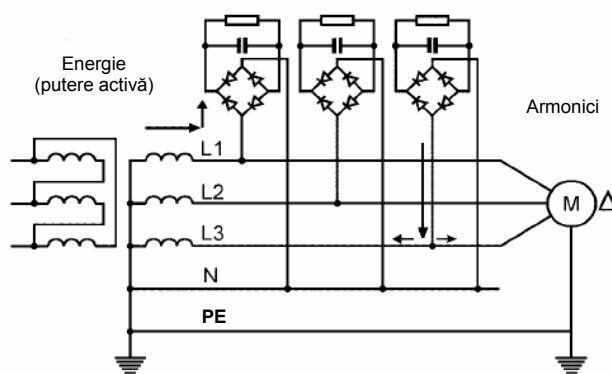


Figura 1 : Apariția armonicilor la receptor și propagarea în sens invers, spre sursa de alimentare

- Într-un element rezistiv, o tensiune sinusoidală determină un curent sinusoidal și un curent sinusoidal determină o cădere de tensiune sinusoidală. Având în vedere proporționalitatea acestor mărimi acest lucru este banal. În cazul unui element reactiv o tensiune sinusoidală determină, de asemenea, un curent electric sinusoidal, iar un curent sinusoidal determină o cădere de tensiune sinusoidală; acest lucru nu este însă banal. Strict vorbind acest lucru nu este însă adevărat. O tensiune sinusoidală determină într-un condensator un curent cosinusoidal și într-o bobină un curent cosinusoidal negativ. În practică acest aspect nu conduce la schimbări prea mari, deoarece curbele sinusoidale și cosinusoidale au aceeași formă, diferind numai în momentul inițial, adică au defazaje diferite (în practică, momentul inițial este undeva departe în trecut și nu prezintă nici un interes și nici o influență, numai defazajul prezintă interes).

Filtre pasive

Aceste observații conduc direct la următoarele aspecte:

- În cazul elementelor reactive, curbele nesinusoidale de tensiune nu conduc la aceeași formă a curbelor de curent electric. Curbele dreptunghiulare devin triunghiulare, liniile drepte devin curbe, iar cele înclinate devin horizontale. Este invers față de proporționalitatea indicată mai sus.
- Rezistența electrică a unui element rezistiv este în principiu aceeași, în cazul unei tensiuni sinusoidale sau nesinusoidale, continue sau alternative, dacă se neglijează efectul pelicular. Reactanța elementelor inductive însă crește proporțional cu frecvența, iar reactanța elementelor capacitive scade invers proporțional cu creșterea frecvenței. Acest lucru are consecințe asupra modului de variație a curbelor nesinusoidale de tensiune sau curent electric, care, așa cum s-a arătat mai sus, sunt defazate între ele. Aceste curbe pot fi descrise de o sumă infinită de curbe sinusoidale de diferite frecvențe (așa numita analiză Fourier). Această comportare conduce la anumite riscuri, de exemplu, cum s-a menționat în secțiunea 3.1.2, supraîncărcarea condensatoarelor, dar poate fi un avantaj la utilizarea filtrelor pasive.

Circuit de filtrare dedicat pentru fiecare frecvență

O anumită inductivitate L și o anumită capacitate C determină, într-un circuit, pentru o anumită frecvență, o așa numită frecvență de rezonanță f_0

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

În afară de aceasta, unul dintre elemente determină un defazaj de 90° și altul de -90° , pentru curenții electrici prin cele două elemente conectate în paralel și pentru căderile de tensiune, dacă cele două elemente sunt conectate în serie. În cazul circuitelor de filtrare sunt utilizate, în mod obișnuit, circuite LC serie (circuite absorbante), în timp ce circuitele rezonante paralel (circuite refulante) sunt utilizate numai în unele cazuri speciale. În continuare sunt analizate numai circuitele cu conexiune serie. Cele două căderi de tensiune, la bornele bobinei L și la bornele condensatorului C sunt defazate între ele cu 180° , având astfel polarități diferite. Chiar fără a apela aici la calculul factorial este clar faptul că reactanțele bobinei L și condensatorului C nu se adună ci se scad, sau, altfel spus, se adună dar au semne diferite, ceea ce conduce la același rezultat. La frecvența de rezonanță, la care cele două reactanțe au aceeași valoare, diferența lor dă zero. În acest fel, un circuit absorbant, pentru această frecvență, este practic un scurtcircuit. Numai rezistența electrică a circuitului, în principiu cea a înfășurării bobinei, poate fi luată în considerație, însă aceasta este foarte mică în raport cu reactanțele elementelor.

Circuitul serie acordat se comportă ca absorbant (adică prezintă o impedanță redusă) pentru curentul electric de frecvența pentru care este el acordat. Este utilizat pentru limitarea armonicilor de curent produse de echipamentul unei instalații sau de un grup de echipamente și astfel curenții armonici nu se mai propagă înapoi către sursa de alimentare. Curentul armonic generat de către sarcină și care se propagă înapoi către sursă, precum și curentul care parcurge circuitul absorbant rezultă, conform teoremei lui Kirchhoff, invers proporțional cu reactanțele corespunzătoare. La trecerea curentului armonic printr-o impedanță rezultă o tensiune armonică care determină distorsiunea curbei tensiunii de alimentare. Rolul filtrului este de a reduce amplitudinea curentului armonic care se propagă înapoi în rețeaua electrică de alimentare și în consecință nivelul de distorsiune al curbei de tensiune ar trebui să fie diferit. Astfel, dacă se dorește reducerea nivelului tensiunii armonice de la o valoare oarecare până la mai mult de 50%, cu ajutorul unui circuit absorbant, este necesar ca acesta să aibă o impedanță mai mică decât impedanța de scurtcircuit a rețelei de alimentare, la frecvența specificată.

Pierderile care apar în filtrele pasive și în instalațiile de compensare a puterii reactive conduc la încălzirea circuitelor. În mod obișnuit pierderile se mențin reduse prin creșterea necesarului de material – secțiuni mai mari ale conductoarelor, material magnetic mai mult și mai bun, ceea ce determină creșterea costurilor. În cazurile extreme, utilizând echipamente ieftine (pierderi mari), banii care se economisesc prin compensarea puterii reactive sunt pierduți sub formă de pierderi active în elementele echipamentului. Pierderile de magnetizare și prin curenți turbionari în fier, precum și pierderile active în condensator sunt în mod obișnuit atât de mici, încât pot fi neglijate, din punctul de vedere al comportării circuitului absorbant în rețeaua electrică. Aceste pierderi determină însă împreună căldură, determină creșterea temperaturii echipamentului în funcționare normală, pot determina o supraîncălzire sau defectarea acestuia și sunt importante în proiectare. Pierderile active influențează calitatea filtrării, precizia de separare între frecvențele acceptate și cele nedorite este mai ridicată dacă pierderile sunt mai reduse. Pentru definirea calității circuitului este utilizat factorul de calitate, ca raportul dintre reactanța și rezistența electrică ale circuitului.

Compensarea puterii reactive

Instalațiile actuale de compensare a puterii reactive sunt afectate de prezența armonicilor (așa cum s-a arătat în secțiunea 3.1.2 a acestui Ghid) și cele mai multe dintre normele societăților de electricitate recomandă și unele chiar prescriu ca instalațiile actuale de compensare a puterii reactive să fie completate cu o bobină. Acest lucru înseamnă că aceste condensatoare trebuie conectate cu o bobină în serie, astfel încât circuitul să se comporte pentru armonicile superioare ca un element inductiv, iar pentru frecvența fundamentală să rămână ca element capacitiv.

Condensatorul simplu utilizat pentru îmbunătățirea factorului de putere este în fond parte a unui circuit absorbant format cu componentele inductive din rețea, în primul rând cu inductivitățile de dispersie ale transformatoarelor. Procesele de rezonanță pot să conducă la curenți de rezonanță foarte mari și în unele cazuri la supratensiuni în apropiere de transformatorul considerat.

După cum s-a arătat, la frecvența de rezonanță, căderile de tensiune la bornele elementului inductiv și a celui capacitiv sunt egale, dar defazate cu 180° , determinând astfel o cădere totală de tensiune nulă. Însă, la rezonanță sau în apropierea acesteia, căderile de tensiune la bornele fiecărui element, de exemplu la bornele impedanței sistemului în punctul comun de conectare, sunt mult mai mari decât cele normale. Considerând fiecare element în parte, fiecare va avea la borne o cădere mare de tensiune, deși căderea de tensiune pe ansamblul elementelor este redusă. Astfel se explică de ce la circuitele absorbante „accidentale” apar probleme – instalațiile sunt conectate la bornele elementului capacitiv și sunt supuse la tensiunea ridicată a acestuia. Atunci când elementul inductiv este adăugat în mod intenționat, instalațiile sunt conectate la tensiunea rezultantă a întregului circuit absorbant. Supratensiunile rămân însă în interiorul instalației de compensare, apar la bornele condensatorului dimensionat corespunzător, însă la bornele întregii instalații nu rezultă supratensiuni.

Este important de amintit faptul că, în special atunci când este conectată o sarcină monofazată, neliniară, pentru rețelele de 50 Hz, apar armonici începând cu 100 Hz până la peste 1 kHz, încât rezultă un câmp larg de rezonanțe care pot fi excitate.

Instalații combinate pentru compensare și filtrare

În practică, funcțiile de compensare a puterii reactive și de filtrare a curentului deformat sunt, de cele mai multe ori, combinate. Este uzual ca să se stabilească frecvența de rezonanță a circuitului LC la o frecvență care nu corespunde unei armonici pentru a evita supraîncărcarea instalației de compensare. Dimensionarea bobinei se face în mod normal ca procent din puterea reactivă a condensatorului, la 50 Hz. De exemplu, pentru un dezacord de 5 % , ceea ce reprezintă o cădere de tensiune de $1/20$ la bornele bobinei și o cădere de tensiune de $21/20$ la bornele condensatorului, astfel că prin scădere rezultă în total 100 %. Pentru o frecvență de 20 ori mai mare, deci pentru 1000 Hz, relația este inversă; pentru această frecvență cele două elemente prezintă o impedanță identică, iar frecvența de rezonanță a circuitului rezultă ca media geometrică a celor două frecvențe, adică la valoarea:

$$50 \text{ Hz} * \sqrt{20} = 224 \text{ Hz.}$$

O altă valoare uzuală, de 7 %, determină o frecvență de rezonanță de 189 Hz și se evită astfel apariția unui scurtcircuit pentru o armonică apropiată. Deoarece circuitul LC este conectat în rețeaua electrică, armonicile determinate de surse exterioare pot să-l parcurgă în același timp cu cele ale surselor interne pentru care a fost dimensionat. De aceea, dacă un consumator folosește un filtru, însă cei din apropiere nu folosesc, este necesară supradimensionarea filtrului. În unele cazuri, supradimensionarea nu asigură numai preluarea suprasarcinilor neprevăzute, ci conduce și la creșterea factorului de calitate al filtrului, asigurând o separare mai precisă a frecvențelor dorite de cele nedorite, cu reducerea pierderilor din circuit. Supraîncărcarea este redusă dacă instalația este separată de celelalte printr-un transformator de distribuție, cu inductivitatea corespunzătoare.

Filtrele active (*Active Harmonic Conditioners* - AHC) sunt, în mod normal, conectate paralel cu rețeaua. Însă situația este puțin diferită. Aceste echipamente electronice analizează curentul armonic pe partea consumatorului neliniar și generează exact reziduul deformant în perioada următoare. În acest fel, reziduul deformant este asigurat de către filtrul activ, iar curentul fundamental este preluat din rețeaua de alimentare. Dacă curentul rezidual este peste capacitatea filtrului, atunci acesta realizează numai parțial corecția necesară și o parte dintre armonicile de curent sunt preluate din rețea.

Filtrele active acționează numai pentru armonicile de curent care sunt prezente în curentul de sarcină, adică în curentul din punctul de măsurare. Efectiv acest lucru înseamnă că atâta timp cât parametrii filtrului sunt suficienți pentru sarcină, aceasta nu va afecta calitatea energiei electrice din rețea. Dacă sarcina nu este în funcțiune, filtrul activ nu are nici un efect, deși ar putea fi utilizat, în acest timp, pentru îmbunătățirea calității

Filtre pasive

energiei electrice în rețea. Secțiunea 3.3.3 a acestui Ghid (figurile 1, 5 și 6) oferă informații suplimentare privind filtrele active.

Filtrul pasiv, din contră, este totdeauna în funcțiune și este pregătit, în orice moment, să asigure absorbția armonicilor pentru care este dimensionat. Datorită controlului electronic, filtrele active nu pot să fie supraîncărcate. Atunci când capacitatea de lucru a filtrului activ este depășită, se asigură o reducere parțială a nivelului de distorsiune. Filtrele pasive, din contră, acordate, de exemplu la 150 Hz (11 % grad de dezacordare) sau 250 Hz (4 % grad de dezacordare) absorb orice nivel al armonicilor de rang trei respectiv de cinci, până la limita lor de supraîncărcare. Curenții absorbiți depind de nivelul total de distorsiune din rețea și nu de o anumită sarcină. Acesta este motivul pentru care soluția trebuie să fie larg dimensionată. Aceasta, în mod normal, nu implică costuri suplimentare în comparație cu filtrele active.

Puterea reactivă

Așa cum a fost menționat, acolo unde apare putere reactivă în rețelele de distribuție (în mod obișnuit putere reactivă inductivă), o parte a energiei pe linie nu este transmisă de la sursă la sarcină. De fapt aceasta oscilează cu frecvența de 100 Hz între capacitate și inductivitate. În unele intervale de timp, tensiunea și curentul electric au polarități diferite (fig. 2). La analiza armonicilor se obține o imagine asemănătoare. În figura 3 este prezentată numai puterea transferată pe armonica de rang trei. Puterea instantanee transferată se obține ca produsul dintre armonica trei de curent și tensiunea de pe linie, considerând că aceasta este pur sinusoidală. Se poate observa că ariile suprafețelor de deasupra și de sub axa absciselor sunt egale, ceea ce semnifică faptul că energia transferată este nulă. Armonica a treia de curent, în acest fel, nu transferă nici o putere utilă.

Deoarece armonicile determină pierderi suplimentare, este necesar ca undeva să le asociem o putere activă. Contradicția aparentă este determinată de faptul că s-a considerat tensiunea de la rețea ca fiind perfect sinusoidală. Acest lucru este imposibil, deoarece atunci când circulă un curent cu frecvența de 150 Hz, el determină o oarecare cădere de tensiune, activă și chiar reactivă de aceeași frecvență – 150 Hz. Atâta timp cât curentul electric include frecvențe suplimentare, tensiunea va cuprinde componente de o anumită amplitudine, cu aceleași frecvențe. Numai dacă atât tensiunea cât și curentul cuprind aceeași frecvență poate să rezulte putere activă, pe această frecvență. Trebuie să fie clar faptul că, aceasta este situația în toate cazurile. Rezistența existentă în circuit determină căderi de tensiune în fază cu curentul și de aceea apare o putere activă pentru orice fel de curent care o parcurge: activ, reactiv sau armonic.

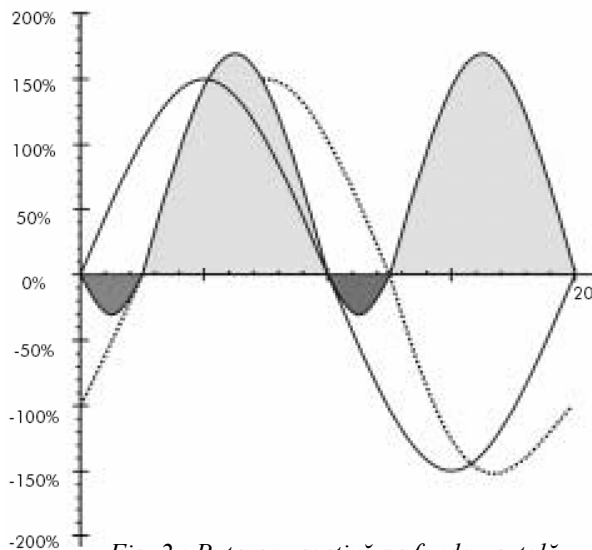


Fig. 2 : Puterea reactivă pe fundamentală

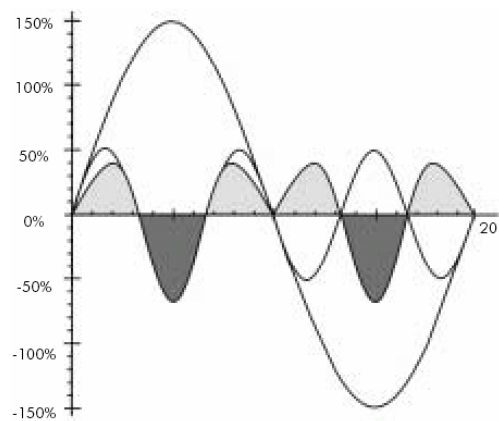


Fig. 3: Puterea pe armonici

Experiențe simple

Lămpile fluorescente sunt singurele echipamente uzuale la care cel mai eficient mod de compensare a puterii reactive și anume la locul de producere este o practică curentă. Această soluție este cea mai eficientă deoarece se transmite numai componenta activă a curentului în circuitele instalației, componenta reactivă fiind compensată în interiorul echipamentului. Dacă este utilizată o soluție centralizată de compensare se poate combina circuitul de compensare a puterii reactive cu filtrul de armonici, pentru a rezolva mai multe probleme cu același echipament. Avantajul soluției centralizate, cu un control adecvat, constă în aceea că nu toate echipamentele funcționează simultan și este posibil, de multe ori, de a instala o capacitate totală de compensare mai mică decât în cazul în

Filtre pasive

care s-ar asigura compensarea locală la toate echipamentele. Se reduce în acest fel riscul de supracompensare a motoarelor. Folosind un echipament combinat de filtrare și compensare se reduce riscul de rezonanță și se asigură că armonicile corespunzătoare rangului filtrului sunt atenuate.

Riscul preluării din rețea a poluării determinate de alții nu este atât de mare precum se consideră în general, cel puțin atunci când echipamentul este alimentat dintr-un transformator propriu. Căderea de tensiune în transformator, exprimată în funcție de tensiunea sa de scurtcircuit, este puternic inductivă. Astfel că un transformator cu o tensiune de scurtcircuit nominală de 4 % are o reactanță relativă de circa 12 % la 150 Hz și ajunge la 20 % la 250 Hz. Dacă echipamentele din vecinătate sunt, de asemenea, conectate prin intermediul unui transformator propriu, impedanța dintre cei doi consumatori se dublează. De asemenea, impedanța armonică a transformatorului depinde în mare măsură de:

- grupa de conexiuni a transformatorului, adică dacă are o conexiune în triunghi sau nu ;
- dacă armonica analizată este multiplu de trei (rangul ei este divizibil cu trei) sau nu.

Acestea sunt aspecte speciale ale secțiunii 3.1 a acestui Ghid sau a altor referințe [1].

Următoarea serie de măsurători în circuite monofazate pun în evidență faptul că un circuit absorbant poate, în mod eficient și fără costuri mari, să limiteze problemele determinate de armonici.

Ca model monofazat de test se folosesc, de exemplu, două balasturi magnetice pentru lămpi fluorescente de 58 W. Rezistența lor electrică este de 13,8 Ω , iar inductivitatea de 878 mH. Dacă în serie cu unul dintre acestea se conectează un condensator de 1,3 μ F și unul de 0,46 μ F, rezultă circuite absorbante cu frecvența de rezonanță de 150 Hz și 250 Hz. Dacă se conectează acestea în rețea, într-o zonă rezidențială, într-o seară de sâmbătă, pe durata unui meci de fotbal, când sunt în funcțiune toate televizoarele și numai un număr redus de lămpi fluorescente, iar echipamentele electrocasnice nu sunt conectate, curba de tensiune poate avea un factor total de distorsiune (Total Harmonic Distortion - THD) de circa 4,7 %. Această distorsiune este determinată în special de armonica de rang 5 care poate ajunge la 10 V; celelalte armonici sunt în general ne semnificative. Armonica de rang trei, care este dominantă în curentul absorbit de televizoare sau echipamente similare, are un efect redus asupra curbei de tensiune (determinat de prezența înfășurării triunghi a transformatorului), atâta timp cât sarcina este practic echilibrată. Nu același lucru rezultă într-o rețea monofazată, sau dacă numai o fază a rețelei trifazate este încărcată. Într-o rețea normală, cu sarcini neliniare, dar încărcată practic simetric, în circuitul de filtrare de 150 Hz practic nu trece curent electric. Însă în circuitul de 250 Hz se poate măsura un curent de circa 75 mA cu frecvența de 250 Hz. Această valoare este practic dublă față de valoarea cu frecvența de 50 Hz, deși la bornele circuitului de filtrare se aplică o tensiune de 230 V cu frecvența de 50 Hz și numai circa 10 V cu frecvența de 250 Hz. Se subliniază astfel principiul care stă la baza metodei de filtrare. Un efect măsurabil asupra rețelei electrice de alimentare însă nu rezultă deoarece puterea filtrului (670 mA, reprezentând circa 180 VAR) este mult mai mică și rezistența înfășurării mult prea mare pentru a curăța rețeaua încărcată cu estimativ 400 kVA.

Pentru a pune în evidență toate posibilitățile sale de curățire, modelul de filtru trebuie să fie instalat într-o rețea adecvată, ideal cu o poluare substanțială, care trebuie limitată. Acest lucru rezultă de exemplu dacă în rețeaua electrică este plasat un variator de tensiune alternativă (cu reglare a unghiului de intrare în conducție) care controlează o putere adecvată. De exemplu, dacă se dorește ca o lampă cu incandescență de 200 W să absoarbă numai 100 W. Variatorul de tensiune alternativă separă, într-o anumită măsură, sarcina de rețeaua de alimentare și realizează o „insulă” de consum. În mod logic, dacă sarcina controlată este pur rezistivă, tensiunea la bornele lămpii și curentul prin lampă au aceeași distorsiune, cantitativ și calitativ. Poate fi aceasta limitată cu ajutorul filtrului amintit? Răspunsul este da (fig. 4). Conectarea în paralel cu această sarcină a două circuite absorbante, reduce factorul de distorsiune al tensiunii la borne și al curentului electric prin sarcină de la circa 61 % la circa 37 %. În multe cazuri această reducere este suficientă, ca dintr-o instalație perturbată să rezulte o instalație funcțională. Nimeni nu cere o curbă sinusoidală absolut curată, exceptând măsurătorile de laborator.

Rezultatele arată că circuitul absorbant de 150 Hz, în acest caz, nu este nefolositor și în orice caz nu este inutil.

Din contră are rolul cel mai important în corectarea curbei. Curentul electric prin acesta prezintă o valoare de 395 mA la 150 Hz (suplimentar apare un curent de 22 mA cu frecvența de 250 Hz, deoarece al doilea circuit absorbant nu asigură o limitare completă). Curentul de 250 Hz în circuitul filtrului de 250 Hz este de 184 mA, încă semnificativ, deși este mai mic decât curentul de 150 Hz. Acest fapt este caracteristic pentru o sarcină monofazată, funcționând mai mult sau mai puțin izolat față de rețeaua de alimentare.

Cum poate fi îmbunătățită performanța ?

Desigur că trebuie adăugat și un circuit de filtrare pe 350 Hz, însă acest lucru nu răspunde miezului problemei. Deși sunt conectate circuitele de filtrare pentru armonicile trei și cinci, armonicile reziduale de rang trei (34 V) și de rang 5 (26 V) sunt superioare armonicilor de rang 7, deși lipsește circuitul de filtrare pentru armonica de rang 7 (fig. 4). Circuitele de filtrare analizate se pare că prezintă probleme în privința factorului de calitate. Desigur că o

Filtre pasive

rezistență electrică de $13,8 \Omega$ este prea mare. Dacă impedanța de 150 Hz pentru armonica de rang trei a circuitului absorbat ar fi zero, ceea ce ar fi ideal, atunci tensiunea la frecvența de 150 Hz ar fi zero. În realitate se găsesc 34 V și un curent de 395 mA care parcurge circuitul de filtrare de 150 Hz și 26 V și un curent de 184 mA la circuitul de filtrare de 250 Hz. Ambele valori sunt însă mult peste cele corespunzătoare valorii de $13,8 \Omega$.

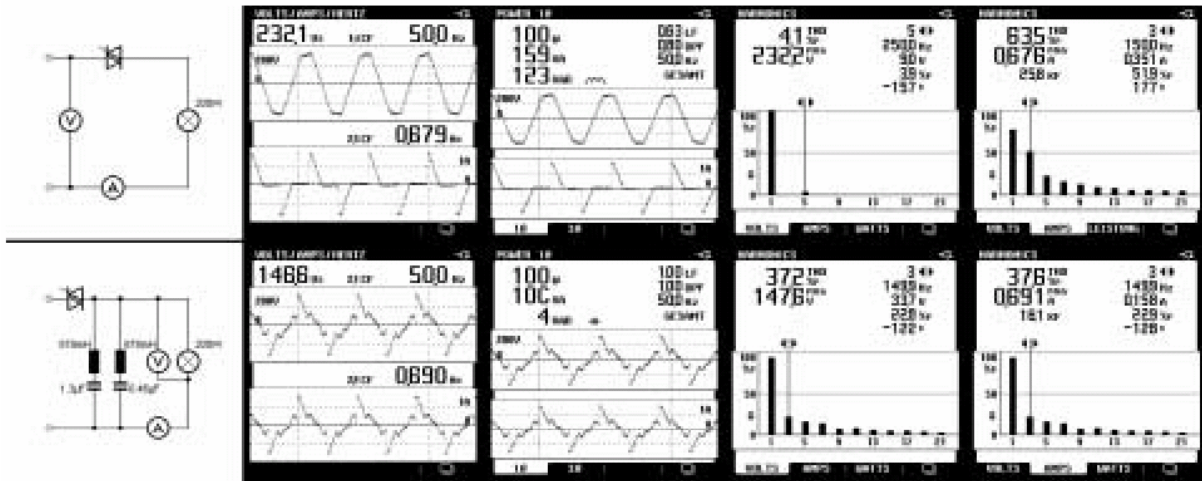


Fig. 4 – Tensiunea și curentul electric la o lampă cu incandescență de 200 W reglată la 100 W, într-un circuit obișnuit și cu circuite absorbante pentru armonicile de rang 3 și 5.

Acest lucru indică faptul că apar pierderi substanțial mai mari, determinate de curenții turbionari și histerezis datorate reducerii calității a fierului. Variabilitatea inductanței (variația cu intensitatea curentului electric, valoare variabilă în timp etc.) împiedică acordarea precisă pentru frecvența dorită. Aceasta arată importanța alegerii unor componente de înaltă calitate, în special relativ la bobină, deoarece aceasta determină cele mai multe pierderi și inexactități. Toate pierderile rezistive/pierderile prin curenți turbionari/pierderile prin histerezis conduc la imprecizia acordării circuitului de filtrare, astfel încât este important să se selecteze componente dedicate, de înaltă calitate, în locul bobinelor existente uzuale, care ar putea fi mai ieftine, dar sunt destinate pentru alte aplicații la care pierderile, toleranțele și abaterea față de valorile nominale nu sunt atât de importante. Utilizarea filtrelor pasive este una dintre metodele pentru limitarea armonicilor cu cel mai mic cost. Este necesară doar o modificare minoră în instalația de compensare a puterii reactive, aflată în funcțiune, pentru ca să se limiteze pierderile financiare importante printr-o investiție moderată.

Central sau dispersat?

Următoarea problemă atașată alegerii corecte a modelului este conexiunea în stea sau în triunghi. Instalațiile de compensare sunt în mod obișnuit conectate în triunghi. În cazul filtrelor pasive această schemă este numai parțial eficientă, deoarece cele mai semnificative armonici în zonele cu birouri sunt determinate de echipamentele monofazate și circulă între fază și nul. Există și unele soluții intermediare cu condensatoare conectate în triunghi, însă bobinele necesare sunt realizate în schemă trifazată cu neutru. Ofertantul de echipament trebuie să aibă capacitatea de a propune cea mai bună soluție pentru fiecare caz particular.

Așa cum s-a arătat mai sus, circuitele absorbante asigură trecerea curentului armonic astfel că aceștia nu mai circulă înapoi, în rețeaua de alimentare. De remarcat însă că curenții armonici circulă prin instalație – de fapt acest lucru conduce la creșterea valorii efective a curentului electric între sursa de armonici și filtru, deoarece impedanța buclei a scăzut. Toate măsurile luate trebuie să aibă în vedere, în mod normal, și efectul curenților armonici în instalație. În prezența circuitelor de filtrare, suma dintre curentul de sarcină și curenții din circuitele de filtrare (valoare ce trebuie acoperită de sursa de alimentare) este mai mică decât curentul de sarcină în lipsa filtrului, deoarece curentul de sarcină în sine este mai mare când în apropiere de echipament se află filtrul, față de cazul în care nu există filtru. În acest sens, trecerea spre descentralizare deși este mai scumpă, conduce însă la o soluție mai eficientă (având în vedere creșterea curentului în buclele formate cu circuitele de filtrare).

În nici un caz nu poate fi însă acceptată implementarea unor instalații de filtrare ca pretext pentru a realiza instalații vechi de tip TN-C, întâlnite în unele țări, și să se reducă secțiunea conductorului neutru (aspecte practice privind dimensionarea conductorului neutru sunt indicate în secțiunea 3.5.1 a acestui Ghid). Sistemele TN-C permit curentului prin conductorul neutru, inclusiv armonicilor, să circule prin elementele conductoare din exteriorul zonei. Dezavantajele sistemului TN-C, din punctul de vedere al compatibilității electromagnetice, sunt prezentate pe larg în secțiunea 6 a acestui Ghid.

Filtre pasive

Aspectele privind descentralizarea sunt valabile la orice tip de filtru. Filtrele active sunt dezavantajate față de circuitele absorbante prin faptul că cu cât puterea unitară este mai mică cu atât raportul de prețuri este mai mare. Raportul de prețuri este circa 2 : 1 în cazul instalațiilor de putere mare și ajunge la 3 : 1 în cazul instalațiilor de putere redusă. Plecând de aici, în unele cazuri, este îndoielnică eficiența lor [2]. Filtrele active sunt rațional de utilizat, atunci când sunt combinate cu echipamente UPS, care limitează golurile și întreruperile. Aceste servicii nu le poate realiza filtrul pasiv. Pentru a asigura o curățire bună a formei curbelor, ceea ce de multe ori este suficient, filtrul pasiv este echipamentul care cu un preț mult mai redus, asigură o fiabilitate ridicată și, în cazul unei dimensionări corecte, pierderi reduse. Se oferă astfel posibilitatea instalării descentralizate. În acest fel, sunt evitate surprizele neplăcute, care pot să apară la instalațiile centralizate datorită curenților armonici și a căderilor corespunzătoare de tensiune pe conductoare.

Instalațiile descentralizate trebuie adoptate cu atenție. Se consideră două circuite absorbante pentru armonica 5. Acestea nu pot fi absolut identice, datorită toleranțelor componentelor și datorită temperaturilor diferite la care funcționează. Astfel încât, pentru două circuite de filtrare cu frecvența nominală de rezonanță de 250 Hz, unul poate avea în realitate 248 Hz și un altul 252 Hz. La 250 Hz primul circuit se comportă capacitiv, iar al doilea inductiv și împreună formează un circuit aproximativ sau perfect refulant, ceea ce este în contradicție cu efectul dorit. În continuare, curentul de 250 Hz poate parcurge circuitul format de cele două filtre și poate conduce la supraîncărcarea ambelor filtre precum și a conductoarelor instalației (fig. 5). Într-un alt caz, dacă unul dintre circuitele de filtrare rezultă exact pe 250 Hz și altul are frecvența de rezonanță, de exemplu, de 254 Hz, atunci o mare parte din poluarea pe 250 Hz va trece prin primul circuit și îl va supraîncărca, pe când al doilea este practic nefolosit. Din păcate acest efect este cu atât mai pregnant cu cât factorul de calitate este mai bun. De fapt un factor de calitate bun al unui circuit absorbat/refulant definește panta de creștere/descrștere a impedanței circuitului în apropierea frecvenței de rezonanță. Apare în acest fel necesitatea plasării unei impedanțe între cele două circuite de filtrare, pentru a realiza o oarecare separare a acestora, astfel încât să nu fie conectate direct în paralel. Acest lucru implică faptul că o largă dispersare a unui mare număr de circuite de filtrare de putere redusă nu este o soluție practică și, ca întotdeauna în domeniul ingineriei, trebuie căutată o soluție de mijloc.



Fig. 5 – Urmările unei rezonanțe necontrolate

Atenție la raportul L/C

Pentru fiecare frecvență există un număr infinit de perechi L și C cu aceeași frecvență de rezonanță. Valoarea condensatorului determină nivelul puterii reactive disponibile (care nu poate, bineînțeles, să fie zero), iar inductivitatea este calculată pentru a determina comportarea armonică. Odată ce selecția a fost făcută aceste valori rămân fixe pentru totdeauna. Acesta poate fi un dezavantaj al filtrului pasiv. De exemplu, modelul de filtru de 150 Hz și 250 Hz analizat anterior preia, la 50 Hz, curenții de 100 mA și respectiv 37 mA. Aceste valori sunt relativ mici în comparație cu valorile măsurate ale curenților armonici, având în vedere faptul că aceste filtre au fost dimensionate cu inductivitate L mare și capacitate C mică. O soluție ar putea să fie realizarea filtrelor sub forma unor grupe mici și conectarea lor în funcție de puterea reactivă necesară, ceea ce se realizează în cazul compensatoarelor controlate.

Evident capacitatea filtrului crește atunci când crește și puterea reactivă a acestuia, iar acest lucru poate fi dezavantajos deoarece atunci când sarcina scade, se reduce și curentul armonic.

Poate fi luată în considerație și deconectarea circuitelor de filtrare pentru armonicile superioare atunci când necesarul de putere reactivă (de compensare) este mai redus, conform schemei din figura 6. Aceasta nu este o soluție perfectă, dar este eficientă din punct de vedere al costurilor. Filtrele pasive, despre care s-a discutat mai sus, nu reprezintă decât un proiect modificat sau o alegere adecvată a instalației de compensare necesară. Atunci când se utilizează această metodă este necesar a preciza faptul că deconectarea se face de la valorile mari spre cele mici ale frecvenței (de la dreapta spre stânga în figura 6), așa cum este prezentat în secțiunea 3.1.2 a acestui Ghid. În caz contrar, este posibil ca unul sau altul dintre circuitele de filtrare de frecvență ridicată să intre în rezonanță cu elemente inductive sau cu unul sau altul dintre circuitele rezonante de frecvență mai redusă.

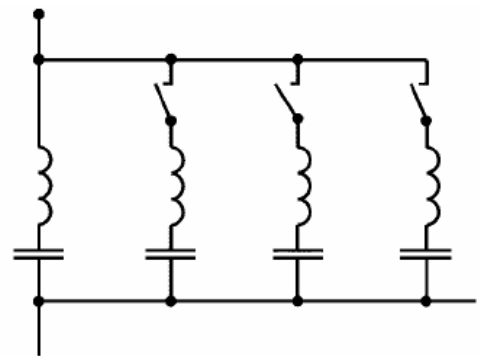


Fig. 6 – Combinație de circuite de filtre

Nu trebuie filtrate frecvențele audio !

Unele societăți de electricitate utilizează frecvențele audio pentru controlul iluminatului stradal, a sistemelor de încălzire cu acumulare, precum și a altor sisteme pentru managementul consumului (DSM) în rețeaua lor. Trebuie urmărit ca aceste semnale să nu fie scurtcircuitate astfel încât să devină ineficiente. Cu cât frecvența semnalului este mai apropiată de o frecvență de rezonanță a unui circuit absorbant, cu atât mai redusă este impedanța acestui circuit pentru frecvența semnalului. Atunci când instalația este alimentată printr-un transformator propriu, inductivitatea asociată ar putea fi suficient de mare pentru a asigura că nu sunt afectate frecvențele audio. În caz contrar este necesar să se conecteze un circuit de refulare format din elemente LC în paralel, acordat pe frecvența audio, așa cum este indicat în figura 7 (pentru o societate de electricitate care utilizează frecvența de 183,3 Hz a semnalului, care reprezintă 13/3 din frecvența rețelei de alimentare).

Circuitele refulante prezintă o caracteristică inversă celei a filtrului absorbant. Relația de calcul a frecvenței de rezonanță este aceeași, astfel încât dacă sunt utilizate aceleași elemente rezultă aceeași frecvența de rezonanță. Trebuie totuși să se aibă în vedere faptul că în acest caz noțiunea de rezonanță are un alt înțeles: impedanța circuitului devine maximă și, în cazul unor elemente ideale (fără pierderi), tinde la infinit.

Concluzii

Sunt necesare eforturi și costuri relativ reduse pentru a limita armonicile dominante împreună cu compensarea puterii reactive, deoarece aceasta este necesară în orice caz și cele mai multe instalații de compensare sunt prevăzute cu bobine pentru „dezacordare”. În cele mai multe cazuri, reglarea unui asemenea circuit la o frecvență de rezonanță care ar putea corespunde unei armonici din rețea este evitată deliberat. Cea mai mare eficiență se obține dacă se dimensionează la rezonanță – curentul armonic este redus cel mai mult și riscul supraîncălzirii instalației de compensare nu este atât de mare pe cât este în general considerat. Bine înțeles, este necesar să se ia o oarecare rezervă la instalarea echipamentului. Aceasta nu ridică probleme, deoarece rezultă un efect de curățire mai bun și o reducere a pierderilor, cu un cost suplimentar foarte redus. Filtrele active sunt mult mai scumpe și țintesc deseori în afara scopului sau determină, deși prezintă o eficiență mai ridicată a unui echipament, rezultate slabe în general. Aceasta este determinată de faptul că datorită structurii de cost, sunt utilizate mai mult centralizat decât descentralizat.

Curenții armonici determină mai multe probleme în rețeaua electrică decât puterea reactivă, încât este de prevăzut că întreprinderile de electricitate vor lua în considerare pierderile datorită armonicilor la fel ca cele datorate puterii reactive fundamentale – nu are sens să se ia în considerare numai puterea reactivă pe fundamentală și nu și armonicile.

În nici un caz, instalarea echipamentelor de filtrare, cu excepția filtrelor instalate odată cu sarcina sau chiar în interiorul acestuia, nu poate fi utilizată ca argument convingător pentru a reduce secțiunea conductorului neutru sau să nu se ia în considerație armonicile la dimensionarea cablurilor sau a altor echipamente.

Menținerea impedanței sistemului la valoare redusă este mai importantă atunci când există filtru decât în cazul în care acesta lipsește. În caz contrar, efectul filtrului ar putea fi dăunător.

Bibliografie

- [1] Fender, Manfred: *Vergleichende Untersuchungen der Netzrückwirkungen von Umrichtern mit Zwischenkreis bei Beachtung realer industrieller Anschluss-Strukturen*, Wiesbaden 1997.
- [2] Clewig, *Statische USV im Leistungsbereich unter 6 kVA*, ETZ 3-4/200, p.26.

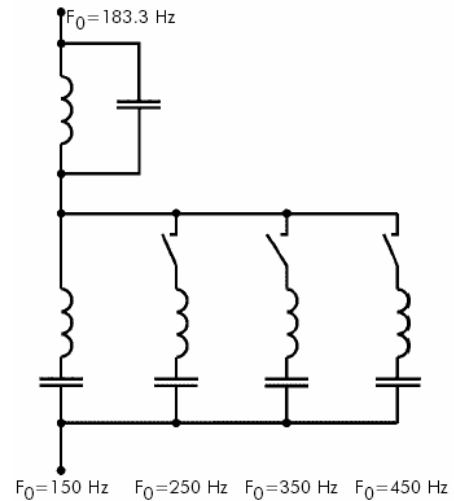


Fig. 7 – Schemă combinată cuprinzând circuite refulante ale unui filtru și un circuit refulant contra pierderii semnalului audio

Parteneri de Referință & Fondatori*

European Copper Institute* (ECI) www.eurocopper.org	Engineering Consulting & Design* (ECD) www.ecd.it	Polish Copper Promotion Centre* (PCPC) www.miedz.org.pl
Akademia Gorniczo-Hutnicza (AGH) www.agh.edu.pl	Hochschule für Technik und Wirtschaft* (HTW) www.htw-saarland.de	Provinciale Industriële Hogeschool (PIH) Web: www.pih.be
Centre d'Innovació Tecnològica en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA) www-citcea.upc.es	Istituto Italiano del Rame* (IIR) www.iir.it	Università di Bergamo* www.unibg.it
Comitato Elettrotecnico Italiano (CEI) www.ceiuni.it	International Union for Electrotechnology Applications (UIE) www.uie.org	University of Bath www.bath.ac.uk
Copper Benelux* www.copperbenelux.org	ISR - Universidade de Coimbra www.isr.uc.pt	University of Manchester Institute of Science and Technology (UMIST) www.umist.ac.uk
Copper Development Association* (CDA UK) www.cda.org.uk	Katholieke Universiteit Leuven* (KU Leuven) www.kuleuven.ac.be	Wroclaw University of Technology* www.pwr.wroc.pl
Deutsches Kupferinstitut* (DKI) www.kupferinstitut.de	La Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) Web: www.etsii.upm.es	

Consiliul de redacție

David Chapman (Chief Editor)	CDA UK	david.chapman@copperdev.co.uk
Prof Angelo Baggini	Università di Bergamo	angelo.baggini@unibg.it
Dr Araceli Hernández Bayo	ETSII - Universidad Politécnica de Madrid	ahernandez@etsii.upm.es
Prof Ronnie Belmans	UIE	ronnie.belmans@esat.kuleuven.ac.be
Dr Franco Bua	ECD	franco.bua@ecd.it
Prof Anibal de Almeida	ISR - Universidade de Coimbra	adealmeida@isr.uc.pt
Hans De Keulenaer	ECI	hdk@eurocopper.org
Gregory Delaere	Lemcko	gregory.delaere@howest.be
Prof Jan Desmet	Hogeschool West-Vlaanderen	jan.desmet@howest.be
Dr ir Marcel Didden	Laborelec	marcel.didden@laborelec.com
Dr Johan Driesen	KU Leuven	johan.driesen@esat.kuleuven.ac.be
Stefan Fassbinder	DKI	sfassbinder@kupferinstitut.de
Prof Zbigniew Hanzelka	Akademia Gorniczo-Hutnicza	hanzel@uci.agh.edu.pl
Dr Antoni Klajn	Wroclaw University of Technology	antoni.klajn@pwr.wroc.pl
Reiner Kreutzer	HTW	rkreutzer@htw-saarland.de
Prof Wolfgang Langguth	HTW	wlang@htw-saarland.de
Jonathan Manson	Gorham & Partners Ltd	jonathanm@gorham.org
Prof Henryk Markiewicz	Wroclaw University of Technology	henryk.markiewicz@pwr.wroc.pl
Carlo Masetti	CEI	masetti@ceiuni.it
Dr Jovica Milanovic	UMIST	jovica.milanovic@umist.ac.uk
Dr Miles Redfern	University of Bath	eesmar@bath.ac.uk
Andreas Sumper	CITCEA	sumper@citcea.upc.es
Roman Targosz	PCPC	cem@miedz.org.pl



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
Web: www.kupferinstitut.de



Membră a
EUREL

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
Websites: 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
Website: www.eurocopper.org