

ASPECTE PRIVIND IMPLICAREA METROLOGIEI LEGALE LA MĂSURAREA PUTERII/ENERGIEI REACTIVE ÎN SISTEMUL ELECTROENERGETIC

*Carmen Ionescu GOLOVONAV**

*Sorin Dan GRIGORESCU**

*Ioana- Izabela ODOR***

*Nicolae TROGMAER****

Rezumat: Instalațiile pentru îmbunătățirea factorului de putere în sistemul electroenergetic sunt dimensionate pe baza puterii reactive; multe societăți furnizoare de energie electrică, din dorința de a penaliza abaterile importante ale puterii aparente față de puterea activă au inclus în sistemul de tarifare componente proporționale cu puterea reactivă absorbită sau generată de receptor. În consecință, este evidentă importanța cunoașterii modului în care rezultă informațiile furnizate de mijloacele de măsurare.

În regimurile reale din rețele electrice, practic totdeauna perturbate, determinări experimentale au pus în evidență faptul că, din cauza utilizării în procesul de procesare a datelor a diferite algoritme pentru determinarea puterii reactive la contoarele digitale, se obțin valori diferite ale energiei reactive, neasigurând o echitabilă relație furnizor – consumator.

Se propune ca Biroul Român de Metrologie Legală să aibă în atenție elaborarea unor reglementări, care să asigure specificarea algoritmului de calcul implementat în mijlocul de măsurare a puterii/energiei reactive.

Abstract: The installations for improving the power factor of the power system are designed on the reactive power value, and many power supplying societies, though the desideratum to penalise the important aberrance of the apparent power against the active power have included in the tariff system proportional components with the reactive power absorbed or supplied by the receiver. According, the importance of the knowing how the information given by the measuring devices is important.

In the real regime from the power network, practically always perturbed, experimental data accentuate the fact that thought the use of different algorithms in the data processing for the reactive power determination in static meters, different values for the reactive energy are obtained, bringing about a reasonable relationship between the supplier and the consumer.

The paper proposes that The Romanian Bureau of Legal Metrology to pay attention in the elaboration of some regulations, to assure the statement of the processing algorithm implemented in the measuring device of the reactive power/energy.

Cuvinte cheie: putere/energie reactivă

Key words: reactive power/energy

1 Introducere

Definirea, măsurarea și limitarea circulației puterii reactive în sistemul energetic au reprezentat o preocupare permanentă a specialiștilor, încă din primii ani ai proiectării, construcției și exploatării rețelelor electrice de tensiune alternativă. Definirea puterii reactive ca o componentă a puterii aparente a suscitât, în decursul timpului, numeroase discuții în literatura de specialitate [1 ... 5]. Noi concepte, bazate pe mărimi instantanee, nu sunt unanim acceptate, și din acest motiv, problemele legate de controlul circulației puterilor în rețeaua electrică se bazează pe definiții clasice, care pot să beneficieze de informații obținute de la sistemele moderne de operare în timp real.

* *Universitatea « POLITEHNICA » Splaiul Independentei nr.313, cod 060042, București, www.pub.ro, telefon:(021)4029513;e-mail:cgolov@electro.masuri.pub.ro;telefon:(021)4029271,e-mail:sgrig@electro.masuri.pub.ro*

** *BRML - Institutul Național de Metrologie, șos. Vitan-Bârzești nr.11,cod 042122, București, România, telefonl: (021)334 48 30; 334 50 60, fax: (+4021) 334 53 45; 334 55 33; www.inm.ro, e-mail: ioana.odor@inm.ro*

*** *SC Nico Electroservice SRL, Str. Rădiței, nr.41, cod051801, București, www.nicoelectroservice.ro, tel: (021) 4571510*

La o succintă analiză a problemelor specifice producerii, circulației și controlului puterii reactive, se evidențiază următoarele aspecte:

- instalațiile de distribuție sunt dimensionate în funcție de *curentul tranzitat*, corespunzător puterii aparente;
- regimul puterii reactive vehiculate influențează direct nivelurile de tensiune și pierderile în rețele electrice;
- puterea reactivă, prin intermediul *factorului de putere*, afectează factura de energie electrică a consumatorilor.

Dorința de a penaliza abaterile importante ale puterii aparente față de puterea activă a făcut ca multe societăți furnizoare de energie electrică să includă în sistemul de tarifare componente proporționale cu puterea reactivă absorbită sau generată de receptor [3].

Pe baza puterii reactive se dimensionează instalațiile pentru îmbunătățirea factorului de putere, deci este evidentă importanța cunoașterii modului în care rezultă informațiile furnizate de mijloacele de măsurare [8,9].

Pentru urmărirea și controlul puterii reactive sunt utilizate informațiile obținute de la instrumentele de măsurare clasice și de la contoare digitale.

Verificarea contoarelor digitale, în conformitate cu normativele CENELEC [1], deși conduce la rezultate care pot corespunde clasei lor de exactitate, nu este suficientă pentru a asigura beneficiarul că informațiile acestor mijloace de măsurare vor fi exacte și în regimuri perturbate.

În regimurile reale din rețele electrice, practic totdeauna perturbate, determinări experimentale [7] au pus în evidență faptul că, din cauza utilizării în procesul de prelucrare a datelor a diferite algoritme pentru determinarea puterii reactive, se obțin valori diferite ale energiei reactive, neasigurând o echitabilă relație furnizor – consumator.

a. Reglementări privind tarifarea consumului energetic în țara noastră

Mărimile folosite în România pentru tarifarea *la consumatorii captivi*, cu excepția consumatorilor casnici, sunt *energia electrică activă*, *puterea activă maximă* și *energia electrică reactivă*. În cazul în care valoarea factorului de putere, calculată în punctul de delimitare, este mai mică decât cea a factorului de putere neutral, de 0,92, consumatorul plătește diferența dintre energia reactivă consumată și cea corespunzătoare factorului de putere neutral. Așa după cum este bine cunoscut, mărimea folosită pentru tarifare la consumatorii casnici este energia electrică activă.

Mărimea folosită pentru tarifare la consumatorii casnici este energia electrică activă. În condițiile prezenței sarcinilor neliniare la consumatorii casnici urbani și rurali, se constată, pe plan mondial, tendința de a se ține seama în facturarea consumului nu numai de energia electrică activă, ci și de energia reactivă. Astfel, în Italia s-a decis instalarea a mai mult de 20 000 000 contoare la consumatori casnici, care să măsoare energia activă și energia reactivă.

b. Situația mijloacelor de măsurare din țara noastră

În ultimii 10 ani, în ROMÂNIA au primit aprobare de model și au fost introduse în sistemul energetic, peste 120 de tipodimensiuni de contoare monofazate și trifazate, provenind de la peste 20 de fabricanți [9]. Dintre cele aproximativ 8 500 000 de contoare, 500 000 sunt trifazate.

În marea lor majoritate, contoarele utilizate în actualele rețele de transport și distribuție sunt de inducție. Se remarcă însă introducerea contoarelor electronice digitale, de clase de exactitate și tipuri constructive, după cum urmează:

- pe liniile de interconexiune cu alte sisteme, în toate punctele de schimb între rețelele de transport și distribuție, contoare electronice cu trei sisteme de măsurare, clase de exactitate pentru energia activă 0,2 S – 0,5 S/0,2 S – 1 S pentru energia reactivă;

- la consumatorii – agenți economici cu putere activă maximă absorbită cel puțin egală cu 30 kW/consum lunar de energie electrică activă cel puțin egal cu 5 MWh, contoare trifazate multitarif, care permit aplicarea tarifelor binom, tip: ALPHA A1R, SPECTRA, INDIGO-SCHLUMBERGER și CEET – AEM – LLC etc., clase de exactitate 1 S pentru energia activă și 2 S pentru energia reactivă, cu sau fără indicarea puterii active maxime absorbite;

- la consumatorii – agenți economici și casnici cu consum lunar de energie electrică activă cel puțin egal cu 1, respectiv 0,5 MWh, contoare monofazate multitarif și monotarif, tip: ALPHA – A1R,

CEEM, ENERLUX – AEM - LLC, CSM – Electromagnetica, clasă de exactitate 1 S pentru energie activă, cu sau fără indicarea puterii active maxime absorbite.

c) Reglementări pentru verificarea contoarelor digitale de energie reactivă

În tabelul 1 se prezintă prescripțiile CENELEC [10] referitoare la verificarea contoarelor de energie reactivă.

Tabelul 1

Testele prescrise de CENELEC referitoare la verificarea contoarelor de energie reactivă

Test	Tipul testului	Variația în timp a curentului și a tensiunii (Valori normalizate prin raportare la valoarea efectivă)
1	IEC1268 – Test de referință Tensiune și curent de frecvența rețelei și defazaj 0.	
2	IEC1268 - Test de variație a frecvenței (±2 %) Testul de referință cu variația de frecvență de ±2% și defazaj între fundamentalele tensiunii și curentului de 30°.	
3		
4	IEC1268 - Test armonice Testul de referință + 10 % armonica a 3-a de curent.	
5		

În IEC 1268 mai este prescris și un test de referință cu un curent redresat monoalternanță.

Marea diversitate a contoarelor existente în prezent, având clase diferite de exactitate, diverse principii de funcționare, unele inadecvate operării în regimuri poluate (nesinusoidal și nesimetric), ridică problema necesității asigurării unei tratări echitabile a tuturor consumatorilor.

Lucrarea abordează următoarele aspecte:

1) Pe parcursul a peste 80 de ani, s-a constatat existența unei definiții “concreționale” pentru puterea reactivă, implementate în mijloacele de măsurare moderne (contoare digitale).

Informațiile furnizate sunt acceptabile în regimul nesinusoidal, generalizat la toate treptele de tensiuni și la toți consumatorii?

2) Diversitatea mijloacelor de măsurare din țara noastră mai poate asigura o echitabilă tratare a tuturor consumatorilor, indiferent de principiul constructiv și de regimul în care acestea funcționează?

3) Sunt necesare reglementări speciale din partea Biroului Român de Metrologie Legală?

2 Definiții “concreționale” pentru puterea reactivă implementate în contoare din ROMANIA

2.1 Definiții pentru puterea reactivă

În literatură, pe parcursul a peste 80 de ani, sunt referiri la diferite definiții pentru puterea reactivă, A. Iliovici (1924), A. Lienard (1926), C. Budeanu (1927), S. Fryze (1932), W. Schepherd și P. Zakikhani (1972), D. Sharon (1980), N. Kusters și W. More (1980). Mai sunt însă și alte definiții, mai recente, propuse de H. Akagi și Y. Kanazawa (1984), J. Enslin și J. Van Wyk (1988), A. Ferrero

(1988), J. Willems (1992), M. Depenbrock (1993), L. Rossetto și P. Tenti (1994), A. Nabae și T. Tanaka (1996), F.Z. Peng și J.S.Lai (1996), F.Z. Peng și L. Tolbert (2000).

Principalul motiv care creează și astăzi controverse este faptul că nici una dintre definiții nu își menține semnificația fizică în regim nesinusoidal. Dintre acestea, cele mai utilizate în realizarea instrumentației de măsurare sunt definițiile formulate de C. Budeanu (1927) și Fryze (1932).

1. *Definiția C. Budeanu* (1927) se bazează pe descompunerea puterii aparente în doi termeni ortogonali:

$$\underline{S} = P \pm jQ \quad (1)$$

semnul \pm corespunde puterii reactive inductive, respectiv capacitive.

- În regim sinusoidal, puterea reactivă este

$$Q = UI \sin \varphi \quad (2)$$

și:

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (3)$$

- În regim nesinusoidal, puterea reactivă este

$$Q_B = \sum_{h=1}^{\infty} U_h \cdot I_h \cdot \sin \varphi_h \quad (4)$$

h fiind rangul armonicii.

Puterea aparentă poate fi descompusă în trei termeni ortogonali: puterea activă P , puterea reactivă Q_B și puterea deformantă D_B

$$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D_B^2 \quad (5)$$

2. *Definiția Fryze* (1932) se bazează pe descompunerea curentului în doi termeni ortogonali. Puterea reactivă este dată, indiferent de tipul regimului, de relația

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (6)$$

În prezența armonicilor, cele două definiții vor furniza rezultate diferite; diferența este denumită putere deformantă, D_B , și se calculează cu relația

$$D_B = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2} = \sqrt{Q_F^2 - Q_B^2} \quad (7)$$

Când nu există armonici, ambele relații, ca și multe altele din cele existente în literatură, vor fi identice cu definiția puterii reactive în regim sinusoidal

$$Q = UI \sin \varphi \quad (8)$$

În acest caz, $D_B = 0$.

2.2 Comparație între rezultatele aplicării celor două definiții. Aplicație numerică

Vom calcula, în conformitate cu cele două definiții, puterea reactivă, [3, 8], considerând factorii de distorsiune de tensiune și curent: $THD_U = 0,04$; $THD_I = 0,5$.

Sarcina neliniară, din domeniul electronicii de putere, are: $\varphi_1 = 0$, $\varphi_h = \pi$.

Puterea reactivă în concordanță cu definiția Budeanu va fi

$$Q_B = U_1 I_1 \sin 0 + \sum_h U_h I_h \sin \pi = 0 \quad (9)$$

Puterea reactivă în concordanță cu definiția Fryze va fi

$$Q_F = \sqrt{Q_B^2 + D_B^2} = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (10)$$

În [3], se arată că puterea reactivă Fryze rezultă în acest caz

$$Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} = 0,54 U_1 I_1$$

Aceasta înseamnă o diferență între puterile reactive calculate cu formulele BUDEANU și FRYZE de mai mult decât 50 % din puterea aparentă totală.

2.3 Implementarea celor două definiții în două tipuri de contoare digitale din ROMÂNIA

În contoarele electronice instalate în țara noastră sunt implementate ambele definiții: astfel, spre exemplu, contorul CEET - Timișoara (fig.1)măsoară puterea reactivă în concordanță cu formula Budeanu (4), iar contorul ALPHA AIR (fig.2), în concordanță cu formula Fryze (6).

Diferențele dintre valorile obținute folosind cele două relații depind de spectrul armonic al semnalelor de intrare (tensiune și curent) și de defazajele între armonicile de același rang din curbele de tensiune și de curent.

În tabelul 2 se prezintă rezultatele testelor la care au fost supuse cele două tipuri de contoare.

Tabelul 2

Erori la măsurarea puterii reactive cu două tipuri de contoare, având implementate în procesorul de semnal definiția Budeanu (transformata Hilbert) și definiția Fryze (triunghiul puterilor).

Testul	Tipul de test	Transformata Hilbert Erori	Triunghiul puterilor Erori
IEC1268 test de referință	tensiune și curent de frecvența rețelei, factor de putere (PF) zero	neglijabile	neglijabile
IEC1268 variația frecvenței	testul de referință cu variația frecvenței de +/-2 % PF=0,87	neglijabile	neglijabile
IEC1268 test de armonice	testul de referință plus 10 % armonica a 3-a de curent	neglijabile	0,5 %
IEC1268 test de c.c.	testul de referință cu curentul redresat monoalternanță	neglijabile	neglijabile
testul de referință plus 10 % armonica a 3-a de tensiune, 20 % armonica a treia de curent, fundamentalele și armonicile defazate cu 30 °		neglijabile	1,9 %

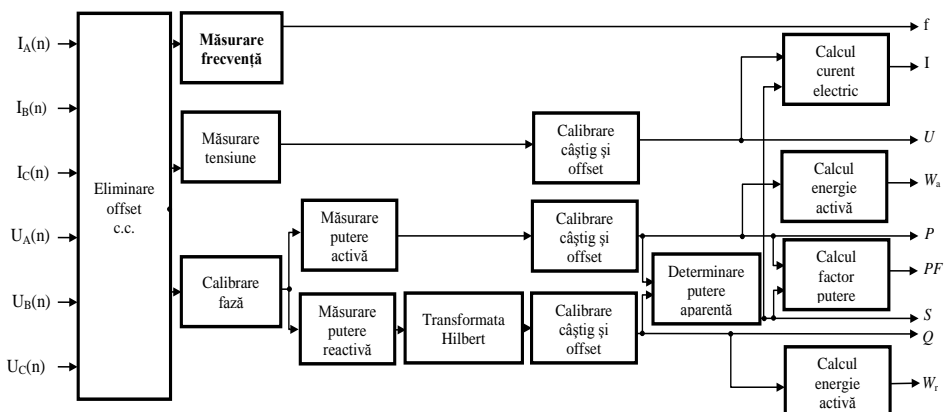


Fig.1. Schema bloc a procesorului AT73C500 ATMEL pentru calculul mărimilor electrice (contor CEET Timișoara)

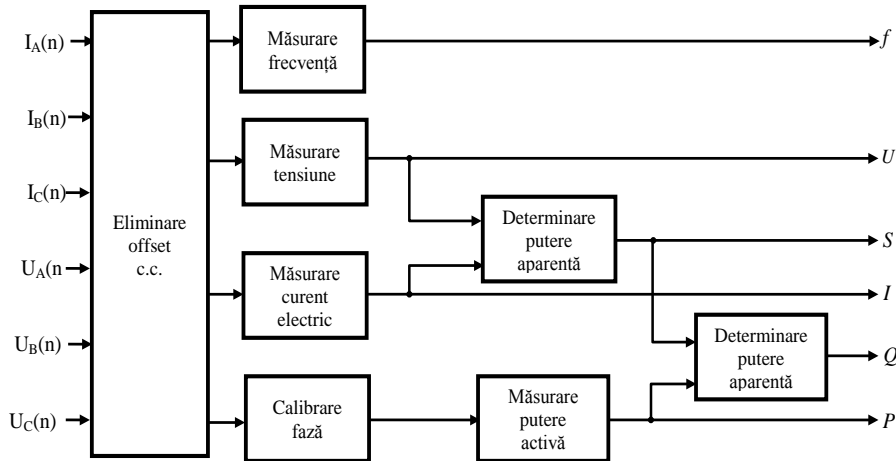


Fig.2. Schema bloc a procesorului pentru calculul mărimilor electrice la contorul ABB Power Plus

3 Studii de caz

1) S-a studiat un consumator industrial, care cuprinde un redresor trifazat dublă alternanță comandat, având, pe partea de tensiune continuă, un filtru capacitiv. Receptoarele de acest tip, monofazate sau trifazate, sunt din ce în ce mai utilizate în industria modernă, fiind caracterizate de absorbția, din rețeaua de alimentare, a unui curent electric puternic deformat.

Pe una dintre fazele circuitului de alimentare s-au vizualizat și măsurat mărimile electrice generale ale consumatorului, cu un analizor FLUKE 41 (fig.3 și fig.4).

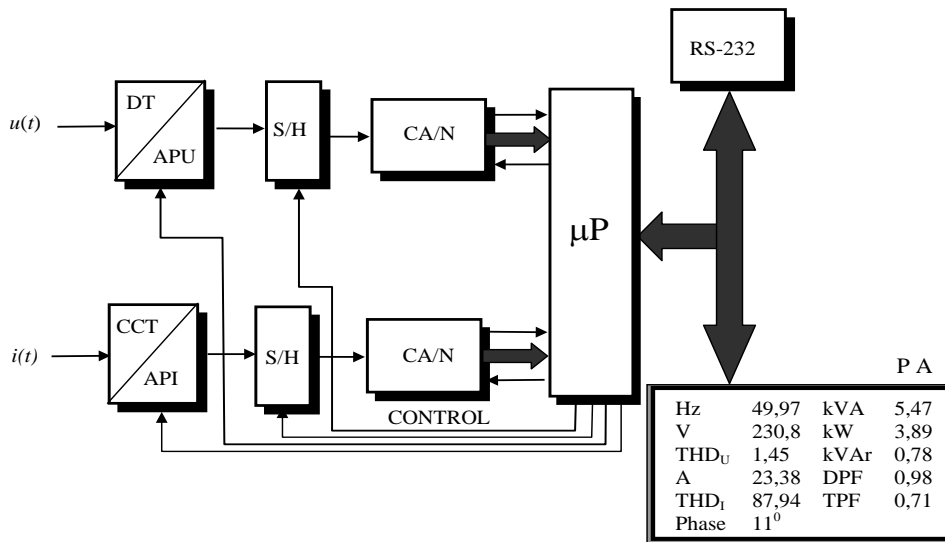


Fig.3. Schema bloc a analizorului de putere FLUKE 41 și mărimi electrice afișate

unde:

DT – divizor de tensiune

CCT – convertor de curent

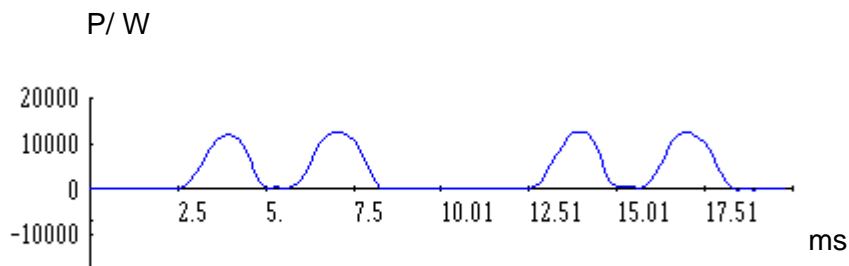
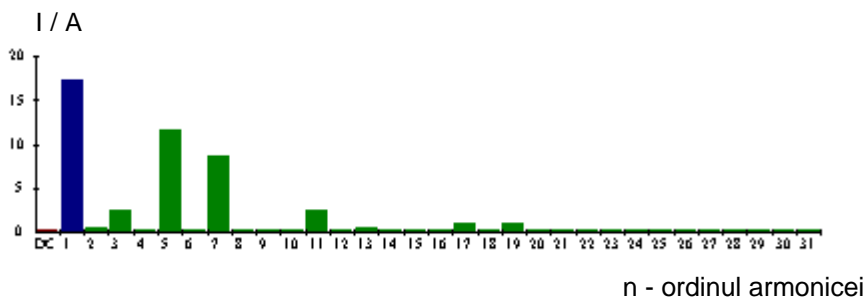
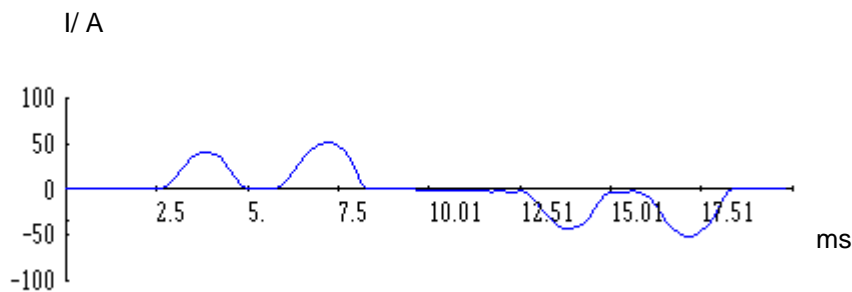
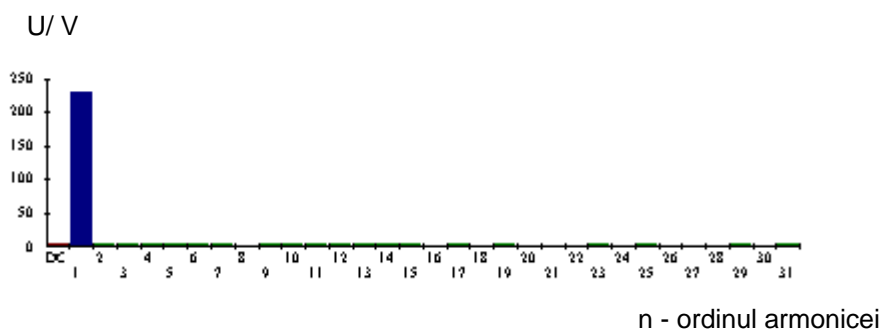
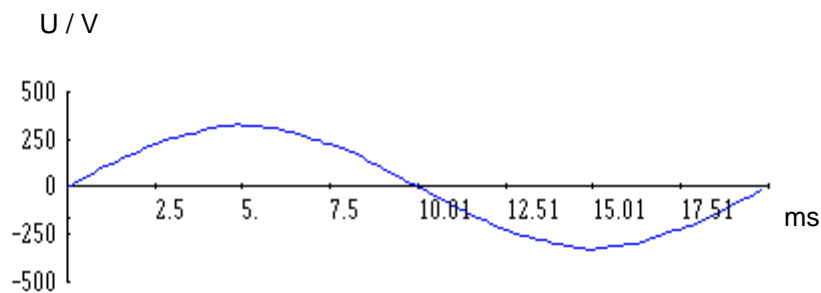
APU și API – amplificatoare de izolare programabile pentru separarea galvanică și pentru schimbarea automată a intervalului de măsurare

S/H – circuite de eșantionare și memorare

CAN – convertoare A/N

μP – microprocesor rapid sau procesor de semnal

PA – panou frontal al aparatului
 PS 232 – interfață de comunicație cu un calculator personal



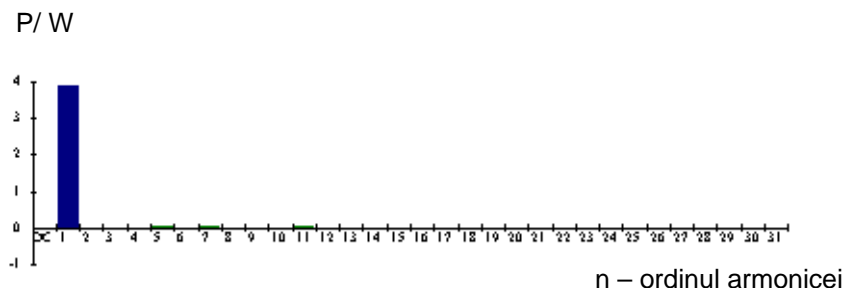


Fig. 4. Formele curbelor de tensiune, curent electric și putere activă, și aspectele armonice ale acestora pentru consumatorul analizat, vizualizate cu analizorul de putere FLUKE 41

Comentarii

Analiza datelor pune în evidență următoarele aspecte principale:

- tensiunea la barele de alimentare ale consumatorului este practic sinusoidală (factorul de distorsiune 1,45);
- receptorul are un caracter practic rezistiv (curbele de curent electric și tensiune pe fază sunt practic în fază (factorul de putere pentru armonica fundamentală ($\lambda_1 = 0,98$);
- receptorul are o caracteristică puternic neliniară (factorul de distorsiune de curent raportat la fundamentală 87,94;
- consumatorul absoarbe practic numai putere activă (curba puterii instantanee are numai valori pozitive);
- factorul de putere $\lambda = P/S = 0,71$, ceea ce pune în evidență faptul că acest consumator va fi penalizat pentru un factor de putere sub valoarea neutrală (de cele mai multe ori 0,92);
- având în vedere valoarea redusă a factorului de putere λ , consumatorul are tendința de a-și reduce factura de energie electrică prin montarea de instalații de compensare a puterii reactive, deformând și mai mult curba curentului electric absorbit;
- deoarece tensiunea are practic numai componenta fundamentală, iar curentul de armonică fundamentală este practic în fază cu tensiunea la bare, factorul de putere poate fi calculat, ca valoarea aproximativă, ca raportul dintre valoarea efectivă a curentului de armonică fundamentală și valoarea efectivă a curentului total ($\lambda = I_1/I$).
- sarcina neliniară este alimentată cu puterea activă $P_1 = 3914,61 W$; factorul de putere total $\lambda = 0,71$ și factorul de putere fundamental $\lambda_1 = 0,98$;
- defazajul dintre curent și tensiune este $\varphi = 11^\circ$, iar puterea reactivă Budeanu este $Q_B = 780 \text{ var}$;
- puterea reactivă Fryze ce rezultă: $Q_F = \sqrt{S^2 - P^2} = 3846 \text{ var}$.

2) Un al doilea studiu de caz vizează date din literatură [7]: s-a măsurat energia reactivă într-un post de transformare PT4 Călărași SDFEE Brăila, în perioada 09.08.2002 – 02.10.2002, cu două tipuri de contoare, obținându-se următoarele valori: $W_{r1} \text{ ALPHA AI} - R = 6042 \text{ k var}$ și $W_{r2} \text{ CEET} = 2070 \text{ k var}$.

În fig.5 se prezintă graficul curbelor de sarcină pentru aceste două tipuri de contoare. S-a calculat și s-a reprezentat și energia deformată, pe baza relației dintre puterea deformată, puterea reactivă Budeanu și puterea reactivă Fryze (7).

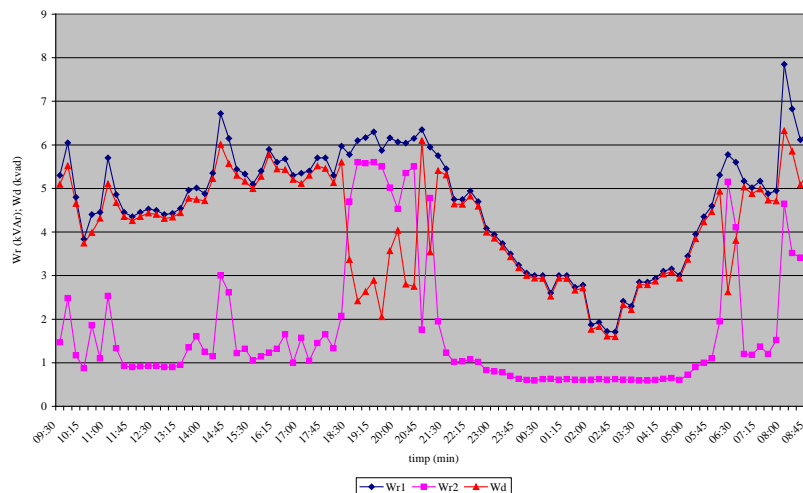


Fig. 5 Graficele curbelor de sarcină pentru contoare tip ALPHA A1-R și CEET

4 Concluzii

- Diferențele importante între valori, necesită intervenția BRML, care, la aprobarea de model, să oblige constructorul să precizeze modalitatea de calcul al puterii reactive.
- Valorile armonicilor superioare sunt mai scăzute la niveluri mai înalte de tensiuni, și diferența va fi mai mică, dar rămâne totuși considerabilă.
- Pentru a se evita întreaga problemă a armonicilor în definițiile puterii reactive s-a lansat ideea de a se rezerva termenul de putere reactivă pentru componenta de frecvență fundamentală Q_1 , care rezultă din definiția:

$$Q_1 = U_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (11)$$

Această definiție are anumite avantaje, în special în analiza circulației de puteri. În plus, se evită diferența valorică obținută la aplicarea diferitelor formule.

Bibliografie

- [1] Budeanu, C., *Puissances Réactives et Fictives*, Inst. Roumain de l'Energie, Bucharest, 1929.
- [2] Fryze, S., *Wirk – Blind – und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nichtsinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung*, Elektrotechnische Zeitschrift, 1932.
- [3] Svensson, S., *Power Measurement Techniques for Nonsinusoidal Situations*, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg, 1999.
- [4] IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations, *IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced or Unbalanced Conditions*, IEEE Std 1459-2000.
- [5] IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations, *Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalances Loads: a Discussion*, IEEE Transaction on Power Delivery, vol.11, No.1, January 1996, pp. 79-87.
- [6] *** *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4 – 7; Testing and Measurement Techniques” – General Guide on Harmonics and Interharmonics. Measurements and Instrumentation for Power Supply Systems and Equipment Connected Thereto*, IEC 61000 – 4 – 2002.
- [7] Apetrei, D., Pinteau, V., *Comparație în condiții reale între metodele de înregistrare a energiei reactive în regim nesinusoidal*, CEE 2003, Târgoviste, 30 – 31 octombrie 2003, p.42 – 49.
- [8] Golovanov Ionescu Carmen, Gheorghe, Ș., Scutariu, M., *Aspects on Measuring Electrical Energy in Electrical Networks Under Non-Sinusoidal Operation Regime*. Proceedings of POWER QUALITY 2003, Long Beach, California, USA, pp.314 – 324.

- [9] Golovanov Ionescu Carmen,ș.a., *The Impact of the Consumption Reshape on the Electric Power Measurement and Billing*. FOREN 2004, WEC REGIONAL ENERGY FORUM, Sustainable Energy Development and European Integration. Neptun – Olimp, ROMANIA, June 13 – 17, 2004.

- Primit în data de 25 ianuarie 2006; acceptat în data de 10 martie 2006
- Revizia științifică: **dr.ing. Ion ASAVINEI**



**Carmen Ionescu
GOLOVANOV**

- Profesor universitar dr.ing la Catedra de Măsurări, Aparate Electrice si Converteare Static de Putere, Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea „Politehnica” București.
- Conducător de doctorat, premiul Constantin BUDEANU al Academiei Române, 1994
- Senior member IEEE, Președinte al IEEE Ro IM (Instrumentation & Measurement)
- Membru al Research Board of Advisors American Biographical Institute, RALEIGH, USA



**Sorin-Dan
GRIGORESCU**

- Profesor universitar dr. ing. la Catedra Măsurări, Aparate Electrice și Converteare Statice de Putere, Facultatea de Inginerie Electrică, Universitatea „Politehnica” București
- Director Tehnic al Centrului de Metrologie și Ingineria Măsurării din UPB.



**Ioana-Izabela
ODOR**

- Cercetător științific II, dr.ing., BRML- Institutul National de Metrologie, Laboratorul Marimi Electrice
- Președinte al CT 13 al CER si al CT 164 „Echipamente de măsurare a energiei electrice și controlul sarcinii” al ASRO
- Membru al IEEE, si al IEEE Ro IM (Instrumentation & Measurement)
- Membru al Societății Inginerilor Energeticieni din Romania



- Director SC Nico Electroservice SRL, Bucuresti

- Doctorand la Universitatea „Politehnica” București, Facultatea de Inginerie Electrică, Catedra Măsurări, Aparate Electrice și Conversoare Statice de Putere

**Nicolae
TROGMAER**