Uporedna analiza definicija reaktivne snage u prisustvu viših harmonika

BOJANA P. ŠKRBIĆ, Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički fakultet, Beograd,
JOVAN Č. MIKULović, Univerzitet u Beogradu,
Elektrotehnički fakultet, Beograd

Stručni rad
UDC: 621.313.322.011.23
DOI: 10.5937/tehnika1704547S

U ovom radu su predstavljene najznačajnije definicije reaktivne snage u monofaznim i trofaznim trožičnim sistemima sa nesinusoidalnim naponima i strujama i izvršena je njihova uporedna analiza. Izloženi su osnovni principi na kojima se ove definicije zasnivaju i objašnjena je njihova primena u rešavanju problema kompenzacije reaktivne snage potrošača. Za razliku od prostoperiodičnih režima u monofaznom ili trofaznom simetričnom sistemu, kompenzacijom reaktivne snage u sistemima sa nesinusoidalnim uslovima rada ne postiže se maksimalna efikasnost isporuke električne energije. Manja efikasnost u odnosu na teorijski maksimum, objašnjava se prisustvom viših harmonika i nesimetrija u sistemu. Stoga u kontekstu smanjenja gubitaka prilikom isporuke električne energije potrošaču treba razmatrati mogućnosti smanjenja neaktivne umesto reaktivne snage potrošača.

Ključne reči: reaktivna snaga, definicija snage, harmonici

1. UVOD

Usled sve većeg broja nelinearnih potrošača u distributivnim i industrijskim mrežama, elektroenergetski sistem je sve više izložen nesinusoidalnim i neuravnoteženim režimima rada. Postojeće definicije snaga, na kojima se zasniva princip rada mernih instrumenata, nisu adekvatne za primenu u ovakvim sistemima. U praksi se pokazalo da postoji potreba za novim algoritmima na kojima se zasniva rad instrumenata za merenje snage i energije [1]. Definicije snaga u prisustvu viših harmonika utiču na obračun električne energije. Naime, ne postoji opšteprihvaćena definicija reaktivne snage u prisustvu viših harmonika i nesimetrija napona i struja, a način na koji se određuje vrednost reaktivne snage utiče na vrednost penala koji potrošači moraju da plate zbog prekomerno preuzete reaktivne energije. Takođe, definicije snaga bi uticale i na potencijalnu podelu odgovornosti za zaprljanje mreže višim harmonicima između elektroprivrednih preduzeća i klijenata. Definicije snaga u ovakvim sistemima treba da daju odgovore na sledeća pitanja:

Koje su komponente snage korisne za potrošača?

Koje komponente snage nisu korisne i u kojoj meri povećavaju gubitke pri isporuci električne energije?

Kako treba dimenzionisati izolaciju opreme koja može da podnese termičko opterećenje pri isporuci električne energije?

Koje se mere mogu preduzeti u cilju povećanja efikasnosti prenosa?

Budući da istražuje pitanja povećanja efikasnosti isporuke, merenja i obračuna električne energije, teorija snaga je privukla veliko interesovanje inženjerske zajednice. Problem definisanja snaga u polifaznim, nesimetričnim sistemima sa nesinusoidalnim naponima i strujama je star oko sto godina i ni danas ne postoje univerzalno prihvaćene definicije snaga koje bi zadovoljile sve zahteve koje problemi distribucije električne energije nameću. U monofaznom sistemu sa sinusoidalnim naponima i strujama, za reaktivnu snagu se nedvosmisleno uzima vrednost $VI\sin\varphi$ (gde je V efektivna vrednost napona, I efektivna vrednost struje, a φ fazni pomeraj između napona i struje). Ovako definisana reaktivna snaga predstavlja amplitudu oscilatorne komponente trenutne snage čija je srednja vrednost jednaka nuli. Međutim, slučajevi kada su u naponu i/ili struji monofaznog ili trofaznog sistema prisutni viši harmonici doveli su do brojnih polemika o tome koje oscilacije trenutne snage treba posmatrati u kontekstu reaktivne snage i kolika je amplituda tih oscilacija. Kod trofaznih sistema se problem definisanja reaktivne snage dodatno komplikuje prisustvom

Adresa autora: Bojana Škrbić, Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički fakultet, Beograd, Bulevar kralja Aleksandra 73

e-mail: Bojana_skrbic@hotmail.com

Rad primljen: 02.06.2017.

Rad prihvaćen: 18.07.2017.

nesimetrije u naponu i struji. Zatim, posebno je interesantan trofazni sistem sa neutralnim provodnikom i pitanje kako tretirati taj četvrti provodnik čija primarna namena nije transfer električne energije, ali se ipak deo električne energije prenosi ovim provodnikom u određenim radnim režimima. Iz navedenih razloga danas ne postoji opšteprihvaćena definicija reaktivne snage u nesinusoidalnim uslovima rada, već se nekoliko definicija snaga izdvojilo svojom interpretacijom reaktivnog fenomena.

U ovom radu su predstavljene najznačajnije definicije reaktivne snage u monofaznim i trofaznim trožičnim sistemima i izvršena je njihova uporedna analiza. Izloženi su osnovni principi na kojima se ove definicije zasnivaju i informacije koje definisane veličine pružaju za potrebe kompenzacije.

2. DEFINICIJE REAKTIVNE SNAGE

Klasičan koncept reaktivne snage je vezan za sinusoidalni režim u monofaznom ili trofaznom uravnoteženom sistemu. Reaktivna snaga je amplituda oscilatorne komponente trenutne snage koja je posledica razmene energije između izvora i potrošača, pri čemu je srednja snaga ove komponente jednaka nuli. Ovako definisana reaktivna snaga ima dve važne osobine:

1) Može se eliminisati otočnom kompenzacijom potrošača pasivnim kolom, a da se pri tome aktivna snaga potrošača ne promeni.

2) Eliminacijom reaktivne snage smanjuju se gubici pri prenosu energije potrošaču.

U pokušajima da se u opštem slučaju polifaznog sistema na sličan način objasne fenomeni koji prate isporuku električne energije i ustanove uzroci povećanja gubitaka pri isporuci u odnosu na teorijski minimalne gubitke, različiti koncepti reaktivne snage su razvijeni. Dva pristupa su prepoznatljiva u pokušajima da se objasni razlika između aktivne i prividne snage, koju IEEE standard [2] opisuje pomoću neaktivne snage N , dok je DIN standard [3] opisuje pomoću neaktivne snage koju označava sa Q_{tot}

$$N = \sqrt{S_{IEEE}^2 - P^2}, \quad (1)$$

$$Q_{tot} = \sqrt{S_{DIN}^2 - P^2}, \quad (2)$$

gde su S_{IEEE} i S_{DIN} prividne snage izračunate prema definicijama IEEE i DIN standarda, a P je aktivna snaga.

Prvi pristup je pokušaj generalizacije klasičnog koncepta snaga. Drugi pristup je da se u polifaznim sistemima definišu snage, a zatim da se iz nove definicije izvede klasičan koncept snaga kao poseban slučaj opšte teorije [4].

Koncepte reaktivne i neaktivne snage pojedini autori čak nisu ni razdvojili i neaktivnom ili reaktivnom snagom nazivaju komponentu snage kojom se korisna energija ne prenosi. Drugi su ipak posmatrali reaktivnu snagu kao jednu od komponenata neaktivne snage, u nastojanju da izdvoje, objasne i nezavisno kvantifikuju različite uzroke pojave neaktivne snage u sistemu.

Prema tome, prilikom definisanja reaktivne snage izdvojili su se različiti koncepti [5] koji su dalje razmatrani u ovom radu.

Budeanu-ov koncept [6]

Reaktivna snaga predstavlja meru amplitude jedne ili više oscilatornih komponenata trenutne snage razmene energije između izvora i potrošača, pri čemu je srednja snaga ovih komponenata jednaka nuli. Izračunava se pomoću sledećeg izraza:

$$Q_B = \sum_h V_h I_h \sin \varphi_h, \quad (3)$$

gde su V_h i I_h efektivne vredosti h -tog harmonika napona i struja, a φ_h fazni pomeraj između njih. Budeanu-ova definicija snaga je najstarija i najviše zastupljena u inženjerskoj praksi.

Originalna definicija namenjena je za primenu u monofaznim sistemima ali je ubrzo proširena za primenu u trofaznim sistemima [7]. Iako su je prihvatile sve vodeće međunarodne organizacije IEC, CIGRE i IEEE, tokom godina je ova definicija oštro kritikovana [8], [9] i danas je praktično napuštena. Osnovna zamerka ovoj definiciji jeste što redukcija ili eliminacija Q_B ne dovodi uvek do smanjenja gubitaka snage. *Willems* je pokazao u kojim slučajevima se kompenzacijom snage Q_B postiže smanjenje prividne snage, odnosno smanjenje gubitaka [5].

Fryze-ov koncept [10]

Reaktivna snaga je mera izobličenja talasnog oblika struje u odnosu na talasni oblik napona u monofaznom sistemu i obuhvata sve komponente snage koje uzrokuju povećanje prividne snage u odnosu na aktivnu snagu. Stoga *Fryze*-ova reaktivna snaga predstavlja u stvari neaktivnu snagu. *Fryze*-ova reaktivna snaga je:

$$Q_F = VI_q, \quad (4)$$

gde je V efektivna vrednost napona v , a I_q efektivna vrednost reaktivne komponente i_q struje i :

$$i_q = i - i_a. \quad (5)$$

U izrazu (5) struja i_a je aktivna komponenta struje i , koja se određuje kao:

$$i_a = \frac{P}{V^2} v. \quad (6)$$

Struja i_a je struja najmanje efektivne vrednosti kojom se pri naponu v energija prenosi snagom P . Prema tome, eliminacijom struje i_q odnosno anuliranjem reaktivne snage Q_F postiže se minimizacija gubitaka snage. Međutim, sama veličina Q_F ne pruža nikakve informacije o tome kako treba projektovati kompenzator reaktivne snage potrošača.

Dekompoziciju struja kao u relacijama (5) i (6) su primenili mnogi kasnije u svojim definicijama primenjujući različite napone i različite snage.

Definicija Kusters-a i Moore-a [11]

Kusters i Moore su dali teorijsku osnovu za popravku faktora snage otočnim kondenzatorom ili otočnom prigušnicom. Oni su definisali kapacitivnu Q_C i induktivnu reaktivnu snagu Q_L optimalnog kapacitivnog i induktivnog kompenzatora kojim se minimiziraju gubici snage pri datom naponu idealnog izvora na sledeći način :

$$Q_C = \frac{V}{\tilde{V}} \frac{1}{T} \int_0^T i \tilde{v} dt \quad (7)$$

$$Q_L = \frac{V}{\tilde{V}} \frac{1}{T} \int_0^T i \tilde{v} dt \quad (8)$$

gde su $V, \dot{V}, \tilde{V}$ redom efektivne vrednosti napona v idealnog naponskog izvora, napona $\dot{v} \equiv \frac{dv}{dt}$ i

$\tilde{v} \equiv \int v dt$, a T je osnovna perioda napona odnosno struje. Vrednosti parametara ovih kompenzatora određuju se pomoću sledećih izraza:

$$C^{opt} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T i \tilde{v} dt}{\tilde{V}^2}, \quad (9)$$

$$L^{opt} = \frac{\tilde{V}^2}{\frac{1}{T} \int_0^T i \tilde{v} dt} \quad (10)$$

Slično definiciji Kusters-a i Moore-a, ali za trofazne sisteme, Tenti i ostali [12] su u svojoj Konzervativnoj teoriji snaga definisali reaktivnu snagu koja odgovara induktivnoj reaktivnoj snazi (8) dok je Czarnecki [13] u svojoj Teoriji fizičkih komponenata struja reaktivnu snagu definisao po uzoru na kapacitivnu reaktivnu snagu (7).

Za razliku od izraza (3),(4),(7) i (8) u kojima je reaktivna snaga definisana primenom operatora usrednjavanja, što u osnovi onemogućava upotrebu tako dobijene veličine za potpunu kompenzaciju uticaja viših harmonika, definicije (5) i (6) koje koriste trenutne vrednosti daju veličine koje se mogu upotrebiti za potpunu eliminaciju viših harmonika struje pri neizobličenom naponu.

Teorije trenutnih snaga [14]-[20]

Teorije trenutnih snaga trenutnu reaktivnu snagu q objašnjavaju kao veličinu proporcionalnu trenutnoj snazi razmene energije između faza. Ovakvo fizičko objašnjenje trenutne reaktivne snage je izazvalo različite reakcije [19], [21], [22]. Ono što se ne može osporiti je njihov značaj kao algoritama za upravljanje aktivnim filterima i kao važan doprinos ovih teorija ističe se zaključak da se ovako definisana reaktivna snaga teorijski može kompenzovati bez upotrebe elemenata za skladištenja električne energije (prigušnica i kondenzatora).

Važna praktična primena definicija reaktivne snage jeste projektovanje kompenzatora. Primena definicija (3), (4), (7) i (8) u projektovanju pasivnih kompenzatora podrazumeva da su talasni oblici napona i struje kvazistacionarni i na osnovu njih se mogu odrediti elementi filtersko-kompenzacionog električnog kola kojim se postiže potpuna kompenzacija reaktivne snage. U slučajevima kada talasni oblici struje i napona nisu kvazistacionarni, pasivnim filtersko-kompenzacionim kolom može se postići samo parcijalna kompenzacija reaktivne snage. Važno ograničenje pri projektovanju ovakvog pasivnog kompenzatora je izbegavanje rezonantnog izbijanja napona odnosno nastanka paralelne rezonancije u mreži nakon priključenja pasivnog kompenzatora. Za kompenzaciju reaktivne (neaktivne) snage potrošača u slučaju kada talasni oblici napona i struje nisu kvazistacionarni neophodno je koristiti aktivne filtere (VAR kompenzatore sa prekidačkim pretvaračima) kojima se kontinualno kontroliše reaktivna snaga i otklanja mogućnost pojave rezonancije. Ukoliko se potrošač kompenzuje uz uslov da se energija potrošaču isporučuje istom srednjom snagom kao i pre kompenzacije, a da se pri tome minimiziraju gubici prilikom isporuke, primena različitih definicija snaga bi kao rešenje dala kompenzatore različitih naznačenih struja. Osim toga, kapacitet sistema za skladištenje koji je potreban za realizaciju kompenzatora takođe zavisi od primenjene definicije snaga i cilja kompenzacije. Praktično projektovanje ovih kompenzatora se neće dalje razmatrati u ovom radu, već će biti pokazano koja od razmatranih definicija najbolje opisuje fenomene koji utiču na pojavu komponenata struje koje ne učestvuju u transferu korisne energije. U tu svrhu je za kompenzaciju reaktivne

snage upotrebljen kondenzator kao primer najjednostavnijeg pasivnog kompenzacionog kola.

Osim pojedinačnih kondenzatora ili prigušnica, za kompenzaciju reaktivne snage primenjuju se i složenija pasivna kompenzaciona kola koja se mogu sintetisati Fosterovom metodom. Fosterova metoda se zasniva na razvoju impedanse ili admitanse na parcijalne razlomke i uzastopnom uklanjanju polova. Na ovaj način se realizuje više paralelnih filterskih

grana kojima se podešavaju rezonantne učestanosti tih grana tako da se vrši eliminacija pojedinih harmonika, pri čemu se obezbeđuje ista kapacitivnost.

3. REZULTATI I DISKUSIJA

Uparedna analiza proračuna reaktivne snage na osnovu različitih definicija je izvršena na primeru monofaznog potrošača napajanog preko trofaznog tiristorskog mosta (slika 1).

Slika 1 – Potrošač iskorišćen u analizi definicija snaga

Parametri potrošača su $R_p=10\ \Omega$, $X_p=5\ \Omega$. Trofazni tiristorski most je priključen na idealni trofazni izvor simetričnih prostoperiodičnih napona v_a, v_b, v_c , čija je efektivna vrednost $V=220\ \text{V}$. Naponi i struje izvora dati su na slici 2, dok su napon i struja potrošača prikazani na slici 3.

U tabelama 1 i 2 date su prividna, reaktivna i neaktivna snaga određene na strani izvora i na strani potrošača. Snage na strani izvora određene su prema definicijama snaga za trofazni trožični sistem: IEEE standarda [2], DIN standarda [3], p-q teorije trenutnih snaga koje su dali Akagi [9], Nabae [13], Willems [14], Teorije fizičkih komponenata struje [13] i Konzervativne teorije snaga [12].

Takođe je primenjena i definicija prema Kusters-u i Moore-u za svaku fazu ponaosob, s obzirom na to da se radi o simetričnom uravnoteženom sistemu. Snage na strani potrošača određene su korišćenjem definicija Fryze-a, Kusters-a i Moore-a, i Budeanu-a. Napon i struja na strani potrošača imaju dominantnu jednosmernu komponentu, ali je zbog fluktuacija ovih veličina opravdano primeniti definicije snaga za monofazne sisteme sa naizmeničnim naponima i strujama. S obzirom na to da na strani potrošača ne

postoji osnovni harmonik napona i struje, na izračunavanje reaktivne snage dominantno utiču viši harmonici. Na ovom primeru se izrazito ispoljavaju razlike u definicijama tako da pojedine definicije daju negativnu vrednost reaktivne snage iako je u pitanju induktivni potrošač.

Dati potrošač je kompenzovan sa strane izvora kondenzatorima čija je kapacitivnost optimalna sa stanovišta minimizacije efektivnih vrednosti struja, odnosno gubitaka prilikom isporuke energije potrošaču. Na osnovu podataka iz table 3 može se zaključiti da je nakon optimalne kompenzacije kondenzatorima reaktivna snaga izračunata na osnovu definicije Kusters-a i Moore-a najmanja. Prvu veću vrednost reaktivne snage je dala Konzervativna teorija snaga, a zatim Teorija fizičkih komponenata struja čija je vrednost reaktivne snage dva reda veličine veća od prethodne dve snage. Vrednosti neaktivnih snaga koje daju IEEE i DIN standard su značajno smanjene. Važan zaključak koji sledi iz dobijenih rezultata je da kompenzacija koja anulira reaktivnu snagu izračunatu korišćenjem neke od pomenutih definicija, nije optimalna sa stanovišta potpune kompenzacije neaktivne

snage, što je bitna razlika ovih definicija u odnosu na tradicionalno shvatanje reaktivne snage.

Teorije trenutne snage su upoređene sa ostalim teorijama na osnovu norme trenutne reaktivne snage. Ova veličina nije bliska niti vrednosti neaktivne niti bilo kojoj od vrednosti reaktivne snage.

Slika 2 – Naponi i struje trofaznog izvora pre kompenzacije

Slika 3 – Napon i struja monofaznog potrošača

Tabela 1. Rezultati proračuna snaga sa strane potrošača

Definicija snaga	S [kVA]	Q [kvar]
Fryze	20.288	35.040
Kusters i Moore		-0.167 (kap.) 0.019 (ind.)
Budeanu	20.288	-0.126

Tabela 2. Rezultati proračuna snaga sa strane izvora pre kompenzacije

Definicija snaga	S [kVA]	Q [kvar]	$\ q\ $ [kvar]	N [kVA]
IEEE	24.126			13.519
DIN	24.126			13.519
Kusters i Moore		11.500 (kap.) 11.531 (ind.)		
p - q teorija (Akagi)			12.955	
p - q teorija (Nabae)	24.126		12.955	
p - q teorija (Willems)	24.126		12.955	
CPC	24.126	12.217		
CPT	24.126	11.537		

4. ZAKLJUČAK

Prikazani numerički rezultati proračuna reaktivne snage pokazuju da definicije snaga koje se mogu pronaći u literaturi različito kvantifikuju ovaj fenomen. Za dati induktivni potrošač najbolje rezultate je dala definicija Kusters-a i Moore-a, a približno isti rezultati dobijeni su primenom Konzervativne teorije snaga.

Pri tome, budući da je posmatrani sistem uravnotežen, pod najboljim rezultatom smatra se činjenica da je vrednost njihove reaktivne snage najmanja kada je potrošač kompenzovan tako da su gubici prilikom isporuke najmanji mogući za datu vrednost aktivne snage i pri datom naponu. Za razliku od prostoperiodičnih režima u monofaznom ili trofaznom simetričnom sistemu, potpunom kompenzacijom reaktivne snage u sistemima sa nesinusoidalnim uslovima rada ne postiže se maksimalna efikasnost isporuke električne energije.

Kako se isporuka energije koja nije optimalna ne može objasniti samo jednim fenomenom - reaktivnim fenomenom koji definiše neka od postojećih definicija, sledi zaključak da u kontekstu smanjenja gubitaka prilikom isporuke električne energije potrošaču treba razmatrati mogućnosti smanjenja neaktivne snage.

5. ZAHVALNICA

Autori se zahvaljuju Ministarstvu za nauku i tehnološki razvoj Republike Srbije za finansijsku podršku ovom radu u okviru tehnoloških projekata TR-33037.

LITERATURA

- [1] Zhang T, Orr JA, Emanuel AE. The need for a new generation of var meters. *IEEE Power Energy Soc Gen Meet 2015*; Vol. 2015–September, pp. 1–5. September 2015.
- [2] *1459-2010 IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*.
- [3] Späth H, A general purpose definition of active current and non-active power based on German standard DIN 40110. *Electrical Engineering*, Vol 89, No. 3, pp. 167–175, 2007.
- [4] Morsi WG, El-Hawary ME. Defining power components in nonsinusoidal unbalanced polyphase systems: The issues. *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 22, No. 4, pp. 2428–2438, 2007.
- [5] Willems J. L. Budeanu's Reactive Power and Related Concepts Revisited. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 60, No. 4, pp. 1182–1186, 2011.
- [6] Budeanu C, *Puissances reactives et fictives Institut Romain de l'Energie Bucharest*, 1927.
- [7] Curtis H. L, Silsbee FB. Definitions of power and related quantities. *Electrical Engineering*, Vol. 54, No. 4, pp. 394–404, 1935.
- [8] Czarnecki L. S. What is wrong with the Budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. IM-36, No. 3, pp. 834–837, 1987.
- [9] Akagi H, Watanabe EH, Aredes M., *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, Wiley-Interscience, Piscataway, NJ, 2007. (book)
- [10] Fryze S. Wirk, Blind-und Scheinleistung in elektrischen Stromkreisen mit nichtsinusförmigem Verlauf von Strom und Spannung, *Elektrotechnische Zeitschrift*, 1932.
- [11] Kusters N. L, Moore WJM. On the Definition of Reactive Power Under Non-Sinusoidal Conditions, *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-99, No. 5, pp. 1845–1854, 1980.
- [12] Tenti P, Mattavelli P, Morales Paredes HK. Conservative Power Theory, sequence components and accountability in smart grids. *Proc. 2010 10th Conf. Int. Sch. Nonsinusoidal Curr. Compens. ISNCC 2010*, pp. 37–45, 2010.
- [13] Czarnecki L. S. Orthogonal decomposition of the currents in a 3-phase nonlinear asymmetrical circuit with a nonsinusoidal voltage source, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 37, No. 1, pp. 30–34, 1988.
- [14] Akagi H, Kanazawa Y, Nabae A, Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components, *IEEE Transactions on Industrial Applications*, Vol. IA-20, No. 3, pp. 625–630, 1984.
- [15] Nabae A, Tanaka T. A new definition of instantaneous active-reactive current and power based on instantaneous space vectors on polar coordinates in three-phase circuits, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 3, pp. 1238–1243, 1996.
- [16] Willems J. L, A new interpretation of the Akagi-Nabae power components for nonsinusoidal three-phase situations. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 41, No. 4, pp. 523–527, 1992.
- [17] Peng F. Z, Lai J. S, Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, Vol. 45, No. 1, pp. 293–297, 1996.
- [18] Kim H, Blaabjerg F, Bak-Jensen B, Jaeho Choi. Instantaneous power compensation in three-phase systems by using p-q-r theory., *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 17, No. 5, pp. 701–710, 2002.
- [19] Dai X, Liu G, Gretscher R, Generalized Theory of Instantaneous Reactive Quantity for Multiphase Power System, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 19, No. 3, pp. 965–972, 2004.
- [20] Rossetto L, Tenti P, Evaluation of instantaneous power terms in multi-phase systems: techniques and application to power-conditioning equipment. *European Transactions on Electrical Power*, Vol. 4, No. 6, pp. 469–474, 2007.
- [21] Czarnecki L. S. On Some misinterpretation of the Instantaneous Reactive Power p - q Theory, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 19, No. 3, pp. 828–836, 2004.
- [22] Willems J. L. Critical analysis of different current decomposition and compensation schemes. *2008 Int. Sch. Nonsinusoidal Curr. Compens.*, IEEE 2008; pp. 1–6, 2008.

SUMMARY

COMPARATIVE ANALYSIS OF REACTIVE POWER DEFINITIONS IN THE PRESENCE OF HARMONICS

In this paper, the most significant definitions of reactive power in single-phase and three-phase three-wire systems with non-sinusoidal voltages and currents are presented. Comparative analysis of these definitions has been performed. Fundamental principles on which these definitions rely are stated, and the application of these definitions to solving the problems of compensation is explained. Contrary to single-phase or three-phase symmetrical systems operating under sinusoidal conditions, reactive power compensation in systems operating under non-sinusoidal conditions does not result in maximal efficiency of electric energy delivery. Less efficiency in comparison to the theoretical maximum is being explained by the presence of harmonics and asymmetries in the system. Therefore, in the context of the reduction of losses during electric energy delivery to the load, the possibilities of nonactive power reduction should be contemplated instead of the possibilities of reactive power reduction.

Key words: reactive power, power definition, harmonics