

OPTIMALNA KOMPENZACIJA NEAKTIVNE SNAGE U TROFAZNIM ČETVOROŽIČNIM SISTEMIMA

Jovan Č. Mikulović, Tomislav B. Šekara, *Elektrotehnički fakultet u Beogradu*

Sadržaj - U radu je prikazana nova metoda za kompenzaciju neaktivne snage u trofaznim četvorožičnim sistemima pri složenoperiodičnim režimima rada. Osnovna ideja za izvođenje optimizacionog postupka proističe iz uslova minimuma efektivnih vrednosti struja faznih provodnika i struje neutralnog provodnika. Primenom postupka optimizacije, uz uvažavanje navedenog kriterijuma, dobijaju se potrebni kompenzatori. Razmatrana su dva načina minimizacije struja: bez ograničenja na kompenzator i korišćenjem reaktivnog kompenzatora. Rezultati simulacija na računaru potvrđuju valjanost i primenljivost postupka za kompenzaciju za različite struje potrošača.

1. UVOD

Reaktivna snaga u sistemima sa prostoperiodičnim naponima i strujama predstavlja meru oscilatorne razmene energije između generatora i potrošača. Problem definisanja i kompenzacije reaktivne snage je znatno složeniji pri složenoperiodičnim naponima i strujama jer se oscilatorna razmena energije između potrošača i izvora ne može jasno odvojiti od gubitaka energije koji su prouzrokovani harmonijskim izobličenjima i zbog toga se umesto reaktivne snage uvodi pojam neaktivne snage. Kod trofaznih sistema pri složenoperiodičnim naponima i strujama problem je još složeniji i zbog oscilatorne razmene energije koja se javlja između pojedinih faza sistema. Zbog svega toga ne postoji opšte prihvaćena definicija snaga i faktora snage pri složenoperiodičnim naponima i strujama. U dosadašnjoj literaturi veliki broj radova se bavi definicijama snaga [1-10]. Pristup koji je najčešće korišćen se sastoji u dekompoziciji struje na aktivnu i reaktivnu komponentu. Reaktivna snaga se zatim definiše kao proizvod efektivne vrednosti napona i efektivne vrednosti reaktivne komponente struje. Problemi kod postojećih definicija snaga nastupaju kada se pristupi projektovanju kola za kompenzaciju neaktivne snage. Za većinu poznatih definicija snaga moguće je izabrati oblike napona i struja tako da postoji oscilatorna razmena energije iako definicija snage pokazuje da nema reaktivne snage (i obrnuto).

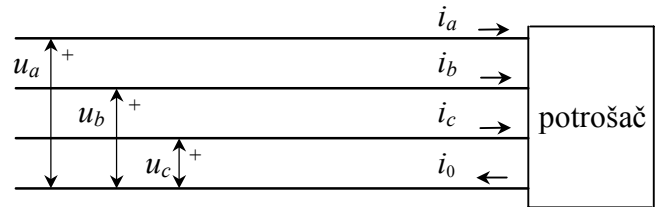
U ovom radu problem definisanja i kompenzacije neaktivne snage potrošača se razmatra sa stanovišta minimizacije efektivnih vrednosti struja napojnog voda potrošača. Razmatran je trofazni četvorožični elektroenergetski sistem. Kako su gubici u napojnom vodu proporcionalni kvadratu efektivne vrednosti struje, postupak optimizacije se svodi na minimizaciju gubitaka snage u provodnicima napojnog voda potrošača. Razmatrana su dva optimizaciona postupka za određivanje minimuma efektivnih vrednosti struja napojnog voda. Prvi postupak optimizacije daje kompenzator koji potpuno kompenzuje neaktivnu snagu a drugi postupak optimizacije daje optimalne kapacitivnosti kondenzatora za otopnu kompenzaciju. Razmatran je problem minimizacije struja faznih provodnika i struje neutralnog provodnika sa težinskim faktorom.

2. MINIMIZACIJA STRUJE TROFAZNOG POTROŠAČA BEZ OGRANIČENJA NA KOMPENZATOR

Trenutne vrednosti napona i struja faznih provodnika u trofaznom četvorožičnom sistemu se mogu predstaviti preko trodimenzionalnih vektora (Slika 1):

$$\mathbf{u}(t) = [u_a(t) \quad u_b(t) \quad u_c(t)]^T \quad (1)$$

$$\mathbf{i}(t) = [i_a(t) \quad i_b(t) \quad i_c(t)]^T \quad (2)$$



Slika 1: Trofazni četvorožični sistem

Vrednosti napona se posmatraju u odnosu na neutralni provodnik sa strujom i_0 :

$$i_0(t) = i_a(t) + i_b(t) + i_c(t) \quad (3)$$

Naponi i struje su složenoperiodične veličine označene sa:

$$u_j(t) = \sum_{k=1}^n \sqrt{2} U_{jk} \cos(k\omega t + \theta_{jk}), \quad j = a, b, c \quad (4)$$

$$i_j(t) = \sum_{k=1}^m \sqrt{2} I_{jk} \cos(k\omega t + \psi_{jk}), \quad j = a, b, c \quad (5)$$

Veličine U_{jk} i I_{jk} su efektivne vrednosti k -tih harmonika napona i struje sa odgovarajućim faznim uglovima θ_{jk} i ψ_{jk} . Trenutna snaga potrošača u trofaznom sistemu se može dobiti kao skalarni proizvod vektora napona i vektora struja i predstavlja zbir trenutnih snaga pojedinih faza:

$$p(t) = \mathbf{u}(t)^T \mathbf{i}(t) = p_a(t) + p_b(t) + p_c(t) \quad (6)$$

Aktivna snaga P se definiše kao srednja vrednost trenutne snage $p(t)$ u jednoj periodu $T = 2\pi / \omega$:

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt \quad (7)$$

U opštem slučaju trenutna snaga svake faze se može razložiti na aktivnu komponentu i na neaktivnu komponentu

$$p_j(t) = p_{jp}(t) + p_{jq}(t), \quad j = a, b, c \quad (8)$$

tako da aktivne komponente trenutne snage daju srednju snagu P a da neaktivne komponente daju srednju snagu koja je jednaka nuli. Neaktivne komponente snaga predstavljaju nekorisnu snagu tako da se problem može posmatrati sa stanovišta eliminisanja odnosno kompenzacije neaktivnih komponenti trenutne snage.

Gubici energije pri prenosu snage su u bliskoj relaciji sa efektivnom vrednošću struje u napojnomvodu potrošača. Zbog toga se problem prenosa neaktivne snage može rešiti kroz minimizaciju efektivnih vrednosti struja napojnog voda potrošača pri čemu se formira sledeći funkcional:

$$J_1 = \int_0^T f(i(t)) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\alpha (i_a^2(t) + i_b^2(t) + i_c^2(t)) + (1-\alpha) i_0^2(t) \right) dt \quad (9)$$

uz ograničenje

$$\int_0^T g(i(t), u(t)) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_{j=a,b,c} u_j(t) i_j(t) \right) dt = P \quad (10)$$

koje predstavlja uslov da se aktivna snaga trofaznog potrošača ne može menjati. Faktor α ($\alpha \in (0,1]$) u jednačini (9) predstavlja težinski faktor u minimizaciji struja faznih provodnika i struje neutralnog provodnika. Izborom $\alpha=1$ minimizuju se efektivne vrednosti struja faznih provodnika bez obzira na struju neutralnog provodnika [11], kada $\alpha \rightarrow 0$ minimizuje se efektivna vrednost struje neutralnog provodnika bez obzira na struje faznih provodnika čime se teži simetriranju sistema. Za vrednost $\alpha=0.5$ podjednako se minimizuju efektivne vrednosti struja faznih provodnika i efektivna vrednost struje neutralnog provodnika.

Da bi funkcional J_1 imao ekstremum, potreban uslov je da funkcije f i g zadovoljavaju odgovarajuće jednačine:

$$\frac{\partial f}{\partial i_j} - \mu \frac{\partial g}{\partial i_j} = 0, \quad \mu \in R, \quad j = a, b, c \quad (11)$$

Rešavanjem prethodnih relacija dobijaju se struje faznih provodnika koje imaju minimalne efektivne vrednosti (minimalne struje):

$$\mathbf{i}_{\min}(t) = \frac{P}{\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{u}^T(t) \mathbf{A}^{-1} \mathbf{u}(t) dt} \mathbf{A}^{-1} \mathbf{u}(t) \quad (12)$$

Matrica \mathbf{A} ima sledeći oblik:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 1-\alpha & 1-\alpha \\ 1-\alpha & 1 & 1-\alpha \\ 1-\alpha & 1-\alpha & 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

Relacija (12) pokazuje da struje ne moraju biti proporcionalne naponima za razliku od Fryze-ove definicije aktivnih struja za trofazne sisteme koja ne uzima u obzir struju neutralnog provodnika [11]. Relacija (12) predstavlja originalnu definiciju komponenti struja koje imaju minimalne efektivne vrednosti za trofazni četvorožični sistem.

Struja u neutralnom provodniku minimalne efektivne vrednosti (minimalna struja neutralnog provodnika) je:

$$i_{0\min}(t) = i_{a\min}(t) + i_{b\min}(t) + i_{c\min}(t) \quad (14)$$

Faktor koji definiše udeo aktivne komponente trenutne snage potrošača u trenutnoj snazi (faktor snage potrošača) je:

$$\eta_1 = \frac{\sqrt{I_{a\min}^2 + I_{b\min}^2 + I_{c\min}^2 + I_{0\min}^2}}{\sqrt{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_0^2}} \quad (15)$$

gde su I_a, I_b, I_c i I_0 efektivne vrednosti struja potrošača i $I_{a\min}, I_{b\min}, I_{c\min}$ i $I_{0\min}$ minimalne efektivne vrednosti struja.

Aktivne i neaktivne komponente trenutne snage su:

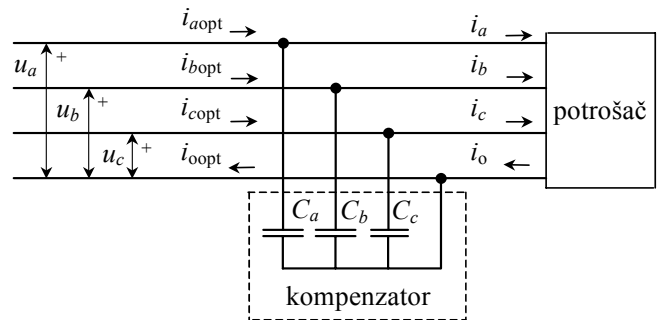
$$p_{jp}(t) = u_j(t) i_{j\min}(t), \quad j = a, b, c \quad (16)$$

$$p_{jq}(t) = p_j(t) - p_{jp}(t), \quad j = a, b, c \quad (17)$$

Potpuna kompenzacija neaktivnih komponenti trenutne snage pri izobličenim naponima i strujama teorijski je moguća ali je za njenu praktičnu realizaciju neophodan složen kompenzator imajući u vidu složene talasne oblike neaktivnih komponenti trenutne snage.

3. MINIMIZACIJA STRUJE TROFAZNOG POTROŠAČA KORIŠĆENJEM KONDENZATORA

Postavlja se pitanje ostvarljivosti kompenzacije korišćenjem realnih kompenzatora, kao što su kondenzatorske baterije. Priključivanjem odgovarajućeg kompenzatora paralelno potrošaču (slika 2) postiže se da kompenzator bude generator neaktivne komponente snage.



Slika 2: Kompenzacija neaktivne snage potrošača u trofaznom četvorožičnom sistemu

U svrhu određivanja optimalnih kapacitivnosti kondenzatora kojim se minimizuju efektivne vrednosti struja polazi se od sledećeg funkcionala:

$$J_2 = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\alpha \sum_{j=a,b,c} \left(C_j \frac{du_j}{dt} + i_j \right)^2 + (1-\alpha) \left(\sum_{j=a,b,c} \left(C_j \frac{du_j}{dt} + i_j \right) \right)^2 \right) dt \quad (18)$$

gde se prvi član odnosi na struje u faznim provodnicima a drugi član na struje u neutralnom provodniku. Faktor α predstavlja težinski faktor u minimizaciji struja faznih provodnika i struje neutralnog provodnika.

Da bi funkcional J_2 imao ekstremum, potrebni uslovi su:

$$\frac{\partial J_2}{\partial C_j} = 0, \quad j = a, b, c \quad (19)$$

Rešavanjem prethodnih relacija dolazi se do optimalnih kapacitivnosti kondenzatora $\mathbf{C}_{\text{opt}} = [C_{a\text{opt}} \quad C_{b\text{opt}} \quad C_{c\text{opt}}]^T$:

$$\mathbf{C}_{\text{opt}} = -\left(\frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \mathbf{A} \mathbf{D}\mathbf{u}(t) dt\right)^{-1} \cdot \frac{1}{T} \int_0^T \mathbf{D}\mathbf{u}(t) \mathbf{A} \mathbf{i}(t) dt \quad (20)$$

gde je matrica $\mathbf{D}\mathbf{u}(t)$ definisana relacijom:

$$\mathbf{D}\mathbf{u}(t) = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} u_a(t) & 0 & 0 \\ 0 & u_b(t) & 0 \\ 0 & 0 & u_c(t) \end{bmatrix} \quad (21)$$

Struje u napojnom vodu koje se dobijaju nakon kompenzacije kondenzatorima optimalnih kapacitivnosti (optimalne struje) su:

$$i_{j\text{opt}}(t) = C_{j\text{opt}} \frac{du_j(t)}{dt} + i_j(t), \quad j = a, b, c \quad (22)$$

$$i_{0\text{opt}}(t) = i_{a\text{opt}}(t) + i_{b\text{opt}}(t) + i_{c\text{opt}}(t) \quad (23)$$

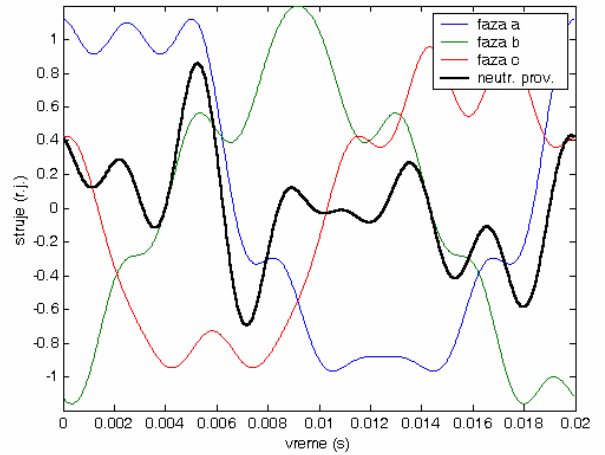
Faktor koji definiše udeo aktivne komponente trenutne snage potrošača u trenutnoj snazi (faktor snage) nakon kompenzacije je:

$$\eta_2 = \frac{\sqrt{I_{a\text{min}}^2 + I_{b\text{min}}^2 + I_{c\text{min}}^2 + I_{0\text{min}}^2}}{\sqrt{I_{a\text{opt}}^2 + I_{b\text{opt}}^2 + I_{c\text{opt}}^2 + I_{0\text{opt}}^2}} \quad (24)$$

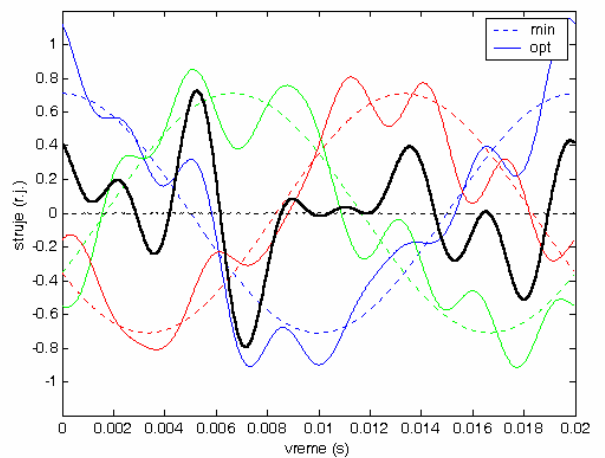
gde su $I_{a\text{opt}}$, $I_{b\text{opt}}$, $I_{c\text{opt}}$ i $I_{0\text{opt}}$ optimalne efektivne vrednosti struja.

4. REZULTATI TESTIRANJA PUTEM SIMULACIJA NA RAČUNARU

Najpre je razmatran slučaj kada su naponi mreže prostoperiodični i simetrični a struje faznih provodnika složenoperiodične i nesimetrične. Usvojeno je da struje faznih provodnika sadrže neparne harmonike do sedmog reda u procentima do 10% (slika 3). Na slici 4 su prikazane struje nakon potpune kompenzacije neaktivne snage (minimalne struje) i struje nakon kompenzacije kondenzatorima optimalnih kapacitivnosti ($C_{a\text{opt}}=0.0026$ r.j., $C_{b\text{opt}}=0.0021$ r.j. i $C_{c\text{opt}}=0.0021$ r.j.). Nakon potpune kompenzacije neaktivne snage pri prostoperiodičnim i simetričnim naponima struje faznih provodnika postaju prostoperiodične i simetrične (na slici 4). Na osnovu (15) faktor snage potrošača je $\eta_1=0.6626$, a nakon kompenzacije kondenzatorima optimalnih kapacitivnosti faktor snage na osnovu (24) postaje $\eta_2=0.8949$.



Slika 3: Struje faznih provodnika i struja neutralnog provodnika trofaznog četvorožičnog sistema



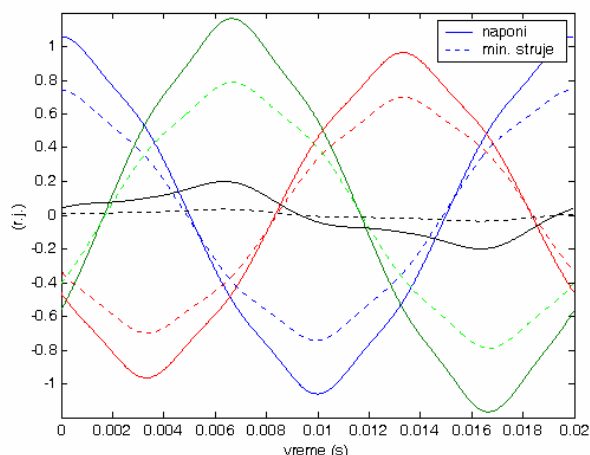
Slika 4: Minimalne struje nakon potpune kompenzacije i struje nakon kompenzacije kondenzatorima optimalnih kapacitivnosti

Slučaj kada su i naponi i struje faznih provodnika složenoperiodični i nesimetrični je zatim razmatran. Strujna izobličenja su ostala ista kao u prethodnom primeru. Uzeto je da naponi sadrže karakteristične vrednosti viših harmonika za elektroenergetski sistem: 1.5% trećeg, 3.5% petog i 1% sedmog harmonika (slika 5). Na slici 6 su prikazane struje nakon potpune kompenzacije neaktivne snage i nakon kompenzacije kondenzatorima optimalnih kapacitivnosti. U ovom slučaju su i minimalne i optimalne struje izobličene i nesimetrične i minimalne struje više nisu proporcionalne naponima.

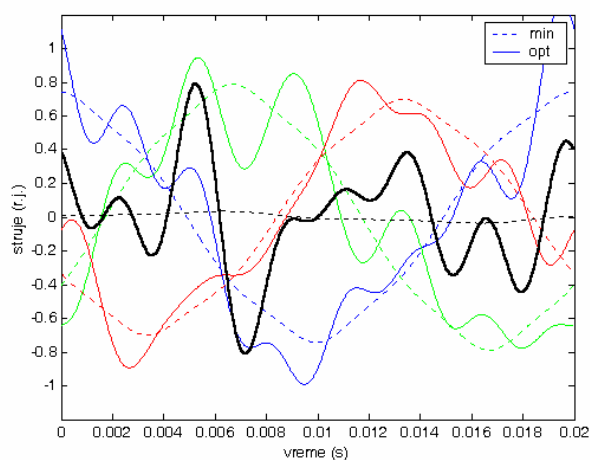
U prethodnim primerima je uzeto da se podjednako minimizuju efektivne vrednosti struja faznih provodnika i efektivna vrednost struje neutralnog provodnika ($\alpha=0.5$) zato što je kompenzacija neaktivne snage najefikasnija pri $\alpha=0.5$. Faktori snage pre i posle kompenzacije u funkciji nekoliko vrednosti faktora α za prethodni primer su dati u tabeli 1.

	$\alpha=1$	$\alpha=0.75$	$\alpha=0.5$	$\alpha=0.25$	$\alpha \rightarrow 0$
η_1	0.6658	0.6637	0.6634	0.6635	0.6637
η_2	0.8841	0.8834	0.8841	0.8849	0.8912

Tabela 1: Faktor snage pre i posle kompenzacije u funkciji nekoliko vrednosti težinskog faktora α



Slika 5: Naponi i minimalne struje nakon potpune kompenzacije neaktivne snage



Slika 6: Minimalne struje nakon potpune kompenzacije i struje nakon kompenzacije kondenzatorima optimalnih kapacitivnosti

5. ZAKLJUČAK

U radu je diskutovan problem kompenzacije neaktivne snage u trofaznim četvorožičnim sistemima sa stanovišta minimizacije efektivnih vrednosti struja faznih provodnika i struje neutralnog provodnika. Razmatran je slučaj minimizacije efektivnih vrednosti struja pri potpunoj kompenzaciji neaktivne snage i pri kompenzaciji neaktivne snage pomoću kondenzatorskih baterija. Diskutovan je problem nejednake minimizacije struja faznih provodnika i struje neutralnog provodnika. Ako osnovni cilj nije da se sistem učini simetričnim, kompenzacija neaktivne snage je efikasnija kada se jednako minimizaciju struje faznih provodnika i struja neutralnog provodnika.

LITERATURA

- [1] C. I. Budeanu, "Puissances Reactives et Fictives", Institut Romain de l'Energie, Publ. 2, Bucharest, Romania, 1927.
- [2] S. Fryze, "Active, Reactive and Apparent Power in Nonsinusoidal Systems" Przegled Elektrotek. No 7, pp. 193-203, 1931.

[3] W. Shepherd, P. Zakikhani, "Suggested Definition of Reactive Power for Non-Sinusoidal Systems", IEE Proceedings, Vol.119, pp.1361-1362, Sept. 1972.

[4] N. L. Kusters and W. J. M. Moore, "On the Definition of Reactive Power Under Non-sinusoidal Conditions", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-99, pp. 1845-1854, Oct. 1980.

[5] J. Willems, "A New Interpretation of the Akagi-Nabae Power Components for Nonsinusoidal Three-Phase Situations", IEEE Trans. On Instr. And Meas., pp. 698-703, Vol.41, August 1992.

[6] A. Nabae, T. Tanaka, "A New Definition of Instantaneous Active-Reactive Current and Power Based on Instantaneous Space Vectors on Polar Coordinates in Three-Phase Circuits", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol.11, No. 3, pp. 1238-1243, July 1996.

[7] F. Peng, G. Ott, D. Adams, "Harmonic and Reactive Power Compensation Based on the Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Four-Wire Systems", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 13, No. 6, pp 1174-1181, November 1998

[8] F. Peng, L. Tolbert, "Compensation of Nonactive Current in Power Systems - Definition from a Compensation Standpoint", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, July 15-20 2000, Seattle, WA, pp 983-987.

[9] Y. Xu, L. M. Tolbert, F. Peng, "Compensation-Based Non-Active Power Definition", IEEE Power Electronics Letters, vol 1, no.2, pp. 45-50, June 2003.

[10] X. Dai, G. Liu, R. Gretsche, "Generalized Theory of Instantaneous Reactive Quantity for Multiphase Power System", IEEE Trans. Power Delivery, vol 19, no.3, pp. 956-972, July 2004.

[11] J. Mikulović, T. Šekara, J. Vranjković, "Optimalni kompenzatori neaktivne snage pri složenoperiodičnim režimima rada u trofaznim elektroenergetskim sistemima", Zbornik 48. konferencije ETRAN, tom I, pp. 250-253, Čačak, 6-10 jun, 2004.

Abstract - The paper presents a new method of non-active power compensation in three-phase four-wire power systems under non-sinusoidal conditions. The basic idea of the optimization procedure stems from the condition for the minimum rms value of line currents including also the neutral current. The application of optimization procedure, observing the above criterion, results in the required compensators. Two different types of current minimization are considered: minimization without compensator constraint, and minimization using reactive compensator. Simulation results confirm the validity and applicability of the compensation procedure for a diversity of load currents.

OPTIMAL NON-ACTIVE POWER COMPENSATION IN THREE-PHASE FOUR-WIRE POWER SYSTEMS

Jovan Č. Mikulović, Tomislav B. Šekara