

УПОРЕДНА АНАЛИЗА ДЕФИНИЦИЈА РЕАКТИВНЕ СНАГЕ ЗА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТСКЕ СИСТЕМЕ СА СЛОЖЕНОПЕРИОДИЧНИМ НАПОНИМА И СТРУЈАМА COMPARATIVE ANALYSIS OF REACTIVE POWER DEFINITIONS FOR POWER SYSTEMS WITH NONSINUSOIDAL VOLTAGES AND CURRENTS

Бојана Новаковић, *Електротехнички факултет, Источно Сарајево*
Јован Микуловић, *Електротехнички факултет, Београд*

Садржај - Компоненте снага као што су активна, реактивна и привидна снага обезбјеђују неопходне информације за пројектовање елемената електроенергетских система, одређивање перформанси система, управљање у систему и обрачун енергије. Овај рад се бави дефиницијама реактивне снаге за електроенергетске системе са сложенепериодичним напонима и струјама. У раду је дат преглед до сада објављених теорија и поређење дефиниција реактивне снаге на основу вриједности компоненти снага услед реактивних елемената у потрошачу. Рад истиче релације и разлике између различитих дефиниција као и могућности примјене појединих дефиниција у компензацији реактивне снаге.

Abstract - Power components such as active, reactive and apparent power provide information needed for power system design, evaluation of its performance, system control and energy accounts. This paper deals with reactive power definitions for power systems with nonsinusoidal voltages and currents. The paper summarizes previously published power theories and compares reactive power definitions according to values of power components due to reactive elements in the load. The paper outlines the relationships and differences among the various definitions as well as each one's applicability to reactive power compensation.

Кључне ријечи – Реактивна снага, неактивна снага, реактивни елементи потрошача.

Key words – Reactive power, non-active power, reactive elements of the load.

1. УВОД

У електричним колима са простопериодичним напонима и струјама реактивна снага се дефинише као некорисна снага потрошача настала услед фазног помјераја напона и струја потрошача. Многим потрошачима је неопходна реактивна снага за стварање магнетских и електричних поља и због тога такви потрошачи оптерећују електричну дистрибутивну мрежу струјом чија је ефективна вриједност већа од ефективне вриједности струје коју би узимали само за исту активну снагу. Са становишта произвођача и дистрибутера електричне енергије пренос реактивне снаге кроз мрежу је неповољан због смањених капацитета преноса електроенергетских водова, неповољних напонских прилика и повећаних губитака енергије у систему. Због тога се настоји да се потребе потрошача за реактивном снагом обезбиједе коришћењем уређаја који се лоцирају у близини потрошача да би се избјегао пренос реактивне снаге у мрежи и на тај начин се врши компензација реактивне снаге. Тарифним системом за продају електричне енергије се наплаћује и прекомјерно преузета реактивна енергија, тако да сам потрошач има економски интерес да минимизује реактивну снагу коју преузима из дистрибутивне мреже.

Проблем дефинисања реактивне снаге у електричним колима са сложенепериодичним напонима и струјама је знатно сложенији због тога што некорисној снази потрошача доприносе и виши хармоници и могуће

несиметрије напона и струја у систему. Због тога се као општији појам уводи неактивна снага која обухвата све облике некорисне снаге потрошача. Реактивна снага у системима са сложенепериодичним напонима и струјама се везује за снагу реактивних елемената потрошача. У случају када структура потрошача није позната, реактивна снага потрошача се може дефинисати на основу снаге реактивног линеарног еквивалента потрошача. Постоји велики број дефиниција реактивне снаге при сложенепериодичним напонима и струјама. Међутим, иако те дефиниције претендују да буду генералне и практичне за примјену, још увек не постоји општеприхваћена дефиниција за реактивну (или неактивну) снагу.

У овом раду је дат преглед најпознатијих теорија које се баве дефиницијама реактивне снаге у вишефазним системима са сложенепериодичним напонима и струјама. Извршено је поређење дефиниција реактивне снаге на основу вриједности које су добијене рачунарским симулацијама за различите случајеве сложенепериодичних напона и струја потрошача.

2. ДЕФИНИЦИЈЕ РЕАКТИВНЕ СНАГЕ ЗА СИСТЕМЕ СА СЛОЖЕНОПЕРИОДИЧНИМ НАПОНИМА И СТРУЈАМА

За реактивну снагу је дуго времена традиционално коришћена Будеануова (*Budeanu*) дефиниција према којој се реактивна снага Q у једнофазним системима може

израчунати као сума реактивних снага свих хармоника [1]:

$$Q = \sum_k U_k I_k \sin \varphi_k, \quad (1)$$

гдје U_k и I_k представљају ефективне вриједности k -тих хармоника напона и струје са одговарајућим фазним угловима θ_k и ψ_k , при чему је $\varphi_k = \theta_k - \psi_k$.

Фризе (*Fryze*) [2] је увео временски домен у дефинисању снага и разложио струју на активну компоненту i_p (која је у фази са напонам u и обезбјеђује исту активну снагу P) и преосталу реактивну компоненту i_q :

$$i_p = \frac{P}{U^2} u, \quad i_q = i - i_p. \quad (2)$$

Реактивна снага према Фризеу је дефинисана као производ ефективних вриједности напона U и реактивне струје I_q :

$$Q_F = U I_q. \quad (3)$$

Кустерс и Мур (*Kusters, Moore*) [3] су дефинисали индуктивну и капацитивну реактивну снагу (Q_L и Q_C) као неактивне снаге које могу да буду компензоване оптималним реактивним елементима:

$$Q_L = \frac{\sqrt{\sum_k U_k^2}}{\sqrt{\sum_k \frac{U_k^2}{k}}} \sum_k \frac{U_k I_k}{k} \sin \varphi_k, \quad Q_C = -\frac{\sqrt{\sum_k U_k^2}}{\sqrt{\sum_k k U_k^2}} \sum_k k U_k I_k \sin \varphi_k. \quad (4)$$

Полазећи од основних принципа који су коришћени у претходним теоријама, дефиниције за реактивну снагу су развијане даље за вишефазне системе при чему је више коришћен временски домен [4-11]. Поједини аутори су, осим дефиниција за неактивне компоненте снага, покушали да дају физичку интерпретацију компонентама неактивне снаге. У својој *CPC* теорији (*Theory of Current's Physical Component*) Чарњецки (*Czarnecki*) [4] дефинише симетричне еквивалентне адмитансе потрошача $\underline{Y}_{ek}$ при учестаности k -тог хармоника $k\omega_1$ (где је ω_1 учестаност основног хармоника) и вектор реактивних струја потрошача $\mathbf{i}_r$:

$$\underline{Y}_{ek} = G_{ek} + jB_{ek} = \frac{\underline{S}_k^*}{\|\underline{U}_k\|^2}, \quad \mathbf{i}_r = \sum_k \sqrt{2} \operatorname{Re} \{ jB_{ek} \underline{U}_k e^{jk\omega_1 t} \}, \quad (5)$$

гдје су: $\underline{S}_k$ комплексна снага потрошача и $\underline{U}_k$ вектор ефективних вриједности напона при учестаности $k\omega_1$. Реактивна снага се дефинише као производ норми вектора ефективних вриједности напона и ефективних вриједности реактивних струја:

$$Q = \|\underline{U}_r\| \cdot \|\mathbf{i}_r\|. \quad (6)$$

Фереро и Фурга (*Ferrero, Furga*) [5] су дефинисали Паркову (*Parc*) тренутну комплексну снагу $\underline{a}_p(t)$ на основу Паркових вектора напона $\underline{v}(t)$ и струје $\underline{i}(t)$, а затим

су дефинисали реактивну снагу као имагинарни дио средње вриједности Паркове комплексне снаге:

$$\underline{A}_p = P_p + jQ_p = \frac{1}{T} \int_0^T \underline{a}_p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T \underline{v}(t) \cdot \underline{i}^*(t) dt. \quad (7)$$

Група теорија која се заснива на концепту тренутне снаге дефинише реактивну снагу у временском домену као тренутну величину. Акаги (*Akagi*) [6] је примијенио α - β трансформацију на напоне и струје у трофазном систему и дефинисао тренутну реактивну снагу q преко напона и струја у α - β координатном систему:

$$q = u_\alpha i_\beta - u_\beta i_\alpha. \quad (8)$$

Теорије које се заснивају на концепту тренутне снаге (*Instantaneous Reactive Power theories*) дефинишу активне струје као минималне струје које потрошачу обезбјеђују исту тренутну снагу p и преостале реактивне струје [7]:

$$\mathbf{i}_p(t) = \frac{p(t)}{\|\mathbf{u}(t)\|^2} \mathbf{u}(t), \quad \mathbf{i}_q(t) = \mathbf{i}(t) - \mathbf{i}_p(t). \quad (9)$$

Теорије које се заснивају на концепту тренутне снаге дефинишу тренутну неактивну снагу q као производ норми вектора тренутних вриједности напона и тренутних вриједности реактивних струја:

$$q = \|\mathbf{u}\| \|\mathbf{i}_q\|. \quad (10)$$

Тенти и Матавели (*Tenti, Mattavelli*) [8] су за n -фазни систем дефинисали реактивну енергију W на основу интеграла напона $\hat{u}_n$:

$$W = \sum_n W_n = \sum_n \left(\frac{1}{T} \int_0^T \hat{u}_n i_n dt \right), \quad (11)$$

На основу реактивне енергије W израчунат је вектор ефективних вриједности балансираних реактивних струја $\mathbf{I}_r$, а затим и реактивна снага Q :

$$\mathbf{I}_r^b = \frac{W}{\|\hat{\mathbf{U}}\|^2}, \quad Q = \|\underline{U}\| \cdot \|\mathbf{I}_r^b\|, \quad (12)$$

гдје је $\underline{U}$ вектор ефективних вриједности напона, а $\hat{\mathbf{U}}$ је вектор ефективних вриједности интеграла напона.

Дефиниције за реактивну (или неактивну) снагу су разматране и у стандардима (IEEE и DIN). IEEE стандард [9] наводи да се Будеануова дефиниција може примијенити на вишефазне системе и такође даје реактивну снагу основног хармоника у директном компонентном систему (+):

$$Q_1^+ = 3U_1^+ I_1^+ \sin(\theta_1^+ - \psi_1^+). \quad (13)$$

IEEE стандард дефинише и неактивну снагу N преко привидне снаге S и активне снаге P :

$$N = \sqrt{S^2 - P^2}. \quad (14)$$

DIN стандард [10] се заснива на теорији Депенброка (*Depenbrock*) која је позната као *FBD* метод (садржи теорије Фризеа, Бухолца (*Buchholz*) и Депенброка). DIN стандард дефинише активне струје $i_{\mu p}$ и неактивне струје $i_{\mu q}$, при чему се користе напони n проводника $u_{\mu 0}$ ($\mu=1,2,\dots,n$) у односу на виртуелну неутралну тачку 0:

$$i_{\mu p} = G u_{\mu 0} = \frac{P_{\Sigma}}{U_{\Sigma}^2} u_{\mu 0}, \quad i_{\mu q} = i_{\mu} - i_{\mu p}. \quad (15)$$

DIN стандард дефинише неактивну снагу $Q_{\Sigma \text{tot}}$ преко сумарних ефективних вредности напона U_{Σ} и сумарних ефективних вредности неактивних компоненти струја $I_{\Sigma q}$:

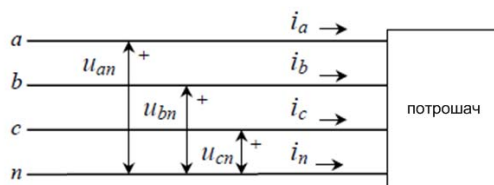
$$Q_{\Sigma \text{tot}} = U_{\Sigma} \cdot I_{\Sigma q}, \quad U_{\Sigma} = \sqrt{\sum_{\mu=1}^n U_{\mu 0}^2}, \quad I_{\Sigma q} = \sqrt{\sum_{\mu=1}^n I_{\mu q}^2}. \quad (16)$$

Неактивна снага према DIN стандарду се такође може израчунати на основу привидне снаге S_{Σ} и активне снаге P_{Σ} :

$$Q_{\Sigma \text{tot}} = \sqrt{S_{\Sigma}^2 - P_{\Sigma}^2}. \quad (17)$$

3. УПОРЕДНА АНАЛИЗА ДЕФИНИЦИЈА РЕАКТИВНЕ СНАГЕ

Реактивна снага рачуната је за потрошач у трофазном четворожичном систему са симетричним и несиметричним напајањем, при чему су посматрани сложенепериодични сигнали напона и струја. Тренутне вриједности фазних напона означене су са u_{an} , u_{bn} и u_{cn} , док су тренутне вриједности струја проводника означене са i_a , i_b и i_c , а тренутна вриједност струје неутралног проводника са i_n . Потенцијал неутралног проводника једнак је нули.

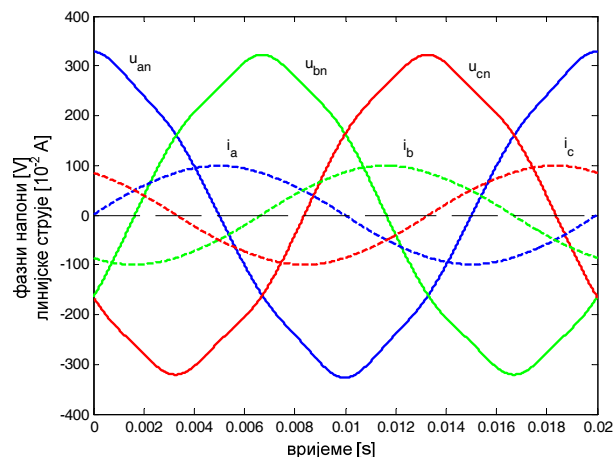


Слика 1. Потрошач у трофазном четворожичном систему

У раду су презентовани случајеви симетричног и несиметричног система са сложенепериодичним сигнаlima. Претпостављени сложенепериодични сигнали напона, поред основног, садрже други, трећи, пети и седми хармоник, чији су садржаји у сигналу (посматрано у односу на основни хармоник) 0,3 %, 1,3 %, 3 % и 1 %, респективно. Посматрана су три различита трофазна потрошача – чисто индуктивни потрошач, чисто капацитивни потрошач и пасивни потрошач сложене структуре. Пасивни потрошач сложене структуре је дефинисан преко струја потрошача.

На Слици 2 приказани су таласни облици напона и струја за случај када је на систем прикључен чисто индуктивни потрошач ($L = 1$ H). Рачунарским симулацијама система чији су напони и струје приказани на Слици 2, добијене су вриједности за привидну, реактивну и неактивну снагу, рачунате према различитим дефиницијама. За дефиниције које израчунавају привидну и реактивну снагу као тренутне величине израчунате су ефективне

вриједности у сврху поређења са осталим дефиницијама. У Табели 1 дат је преглед добијених вриједности.

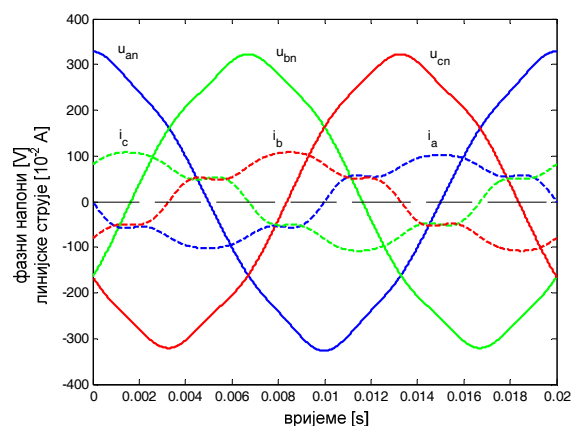


Слика 2. Фазни напони и линијске струје у трофазном четворожичном систему за чисто индуктивни потрошач

Табела 1. Вриједности снага чисто индуктивног потрошача израчунате према различитим дефиницијама

Дефиниција	S [VA]	Q [var]	N [VA]
Будеану [1]		462,31	
Фризе [2]		462,47	
Кустерс и Мур [3]		$Q_L=462,47$ $Q_C=-456,44$	
Чарњецки [4]	462,47	462,47	
Фереро и Фурга [5]	462,47	462,14	
Акаги [6]		462,31	
IRP теорије [7]	462,41	462,31	
Тенти и Матавели [8]	462,47	462,47	
IEEE стандард [9]	462,47	$Q_B=462,31$ $Q_I^+=462,19$	462,47
DIN стандард [10]	462,47		462,47

На Слици 3 приказани су таласни облици напона и струја за случај када је на систем прикључен чисто капацитивни потрошач ($C = 1$ μ F). Рачунарским симулацијама система чији су напони и струје приказани на Слици 3 добијене су вриједности за привидну, реактивну и неактивну снагу, рачунате према различитим дефиницијама, а њихов преглед је дат у Табели 2.

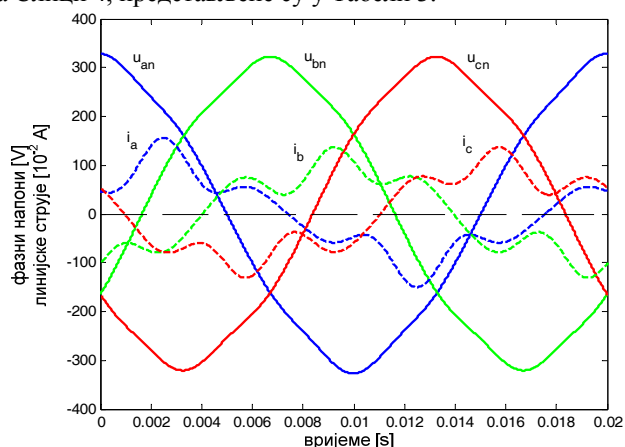


Слика 3. Фазни напони и линијске струје у трофазном четворожичном систему за чисто капацитивни потрошач

Табела 2. Вриједности снага чисто капацитивног потрошача израчунате према различитим дефиницијама

Дефиниција	S [VA]	Q [var]	N [VA]
Будеану [1]		-458,78	
Фризе [2]		462,99	
Кустерс и Мур [3]		$Q_L = -456,96$ $Q_C = 462,99$	
Чарњецки [4]	462,99	462,99	
Фереро и Фурга [5]	462,99	-454,65	
Акаги [6]		455,14	
IRP теорије [7]	461,77	455,14	
Тенти и Матавели [8]	462,99	-456,96	
IEEE стандард [9]	462,99	$Q_B = -458,78$ $Q_1^+ = -456,16$	462,99
DIN стандард [10]	462,99		462,99

На Слици 4 приказани су таласни облици напона и струја за случај када је на систем прикључен пасивни потрошач сложене структуре. При рачунарској симулацији, за овакав потрошач су претпостављене тренутне вриједности струја проводника. Вриједности за привидну, реактивну и неактивну снагу, рачунате према различитим дефиницијама и добијене рачунарским симулацијама система чији су напони и струје приказани на Слици 4, представљене су у Табели 3.

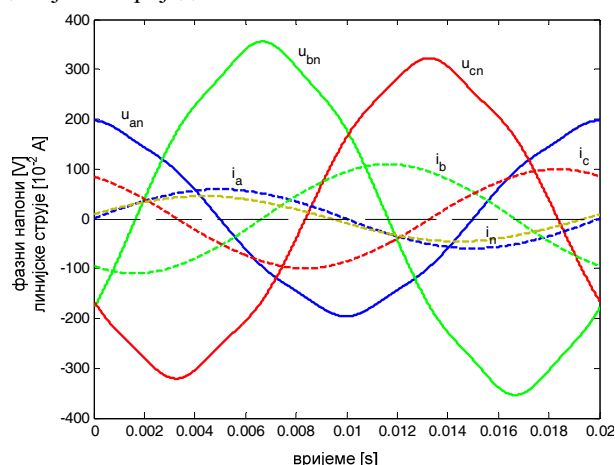


Слика 4. Фазни напони и линијске струје у трофазном четворожичном систему за пасивни потрошач сложене структуре

Табела 3. Вриједности снага пасивног потрошача сложене структуре према различитим дефиницијама

Дефиниција	S [VA]	Q [var]	N [VA]
Будеану [1]		327,30	
Фризе [2]		370,06	
Кустерс и Мур [3]		$Q_L = 329,76$ $Q_C = -310,32$	
Чарњецки [4]	493,71	348,97	
Фереро и Фурга [5]	493,71	333,16	
Акаги [6]		355,04	
IRP теорије [7]	493,67	355,04	
Тенти и Матавели [8]	493,71	329,76	
IEEE стандард [9]	493,71	$Q_B = 327,30$ $Q_1^+ = 330,00$	370,06
DIN стандард [10]	493,71		370,06

На Слици 5 приказани су таласни облици напона и струја за случај када је на изразито несиметричан систем напона напајања прикључен чисто индуктивни потрошач. Несиметрија трофазног система напона напајања у разматраним случајевима представљена је два пута нижом амплитудом фазног напона u_{an} и 1,1 пута већом амплитудом напона u_{bn} у односу на фазни напон u_{cn} . Рачунарским симулацијама система чији су напони и струје приказани на Слици 5 добијене су вриједности за привидну, реактивну и неактивну снагу, рачунате према различитим дефиницијама. У Табели 4 дат је преглед добијених вриједности.

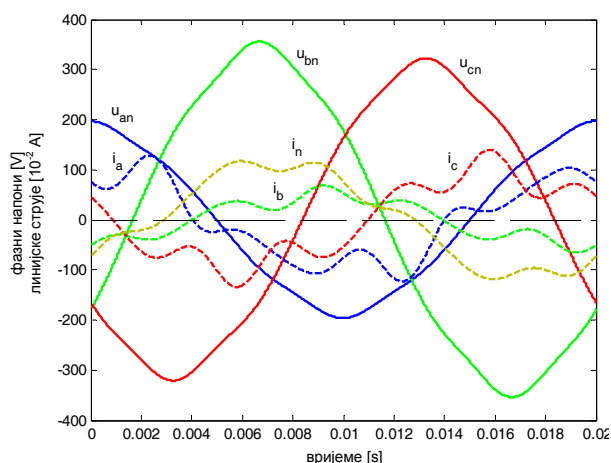


Слика 5. Несиметрични фазни напони и линијске струје у трофазном четворожичном систему за чисто индуктивни потрошач

Табела 4. Вриједности снага чисто индуктивног потрошача према различитим дефиницијама при изразитој несиметрији система напона напајања

Дефиниција	S [VA]	Q [var]	N [VA]
Будеану [1]		396,04	
Фризе [2]		396,17	
Кустерс и Мур [3]		$Q_L = 396,17$ $Q_C = -391,09$	
Чарњецки [4]	396,18	396,18	
Фереро и Фурга [5]	385,38	363,54	
Акаги [6]		363,67	
IRP теорије [7]	387,58	377,99	
Тенти и Матавели [8]	396,17	396,17	
IEEE стандард [9]	409,23	$Q_B = 396,04$ $Q_1^+ = 374,37$	409,23
DIN стандард [10]	407,81		407,81

На Слици 6 приказани су таласни облици напона и струја за случај када је на изразито несиметричан систем напона напајања прикључен потрошач сложене структуре. При рачунарској симулацији, за овакав потрошач су претпостављене тренутне вриједности струја проводника. Рачунарским симулацијама система чији су напони и струје приказани на Слици 6 добијене су вриједности за привидну, реактивну и неактивну снагу, рачунате према различитим дефиницијама. У Табели 5 дат је преглед добијених вриједности.



Слика 6. Несиметрични фазни напони и линијске струје у трофазном четворожичном систему за пасивни потрошач сложене структуре

Табела 5. Вриједности снага пасивног потрошача сложене структуре према различитим дефиницијама при изразитој несиметрији система напона напајања

Дефиниција	S [VA]	Q [var]	N [VA]
Будеану [1]		168,42	
Фризе [2]		223,82	
Кустерс и Мур [3]		$Q_L=170,24$ $Q_C=-156,90$	
Чарњецки [4]	394,72	187,88	
Фереро и Фурга [5]	353,11	144,74	
Акаги [6]		184,13	
IRP теорије [7]	392,91	281,02	
Тенти и Матавели [8]	394,73	170,24	
IEEE стандард [9]	485,22	$Q_B=168,42$ $Q_1^+=148,50$	408,60
DIN стандард [10]	483,54		406,61

4. ЗАКЉУЧАК

На основу симулација извршених у раду закључује се да у општем случају вишефазних система са сложенопериодичним и несиметричним напонима и струјама не постоји јединствена дефиниција за реактивну снагу.

У случају симетричног система са чисто реактивним потрошачем (индуктивним или капацитивним) реактивна снага је једнака неактивној снази и представља једину компоненту привидне снаге. У том случају се на основу дефиниција Кустерса и Мура [3] може извршити потпуна компензација реактивне снаге коришћењем пасивних елемената (кондензатора и пригушница). Поједине дефиниције [2,4,8] представљају варијанте дефиниција Кустерса и Мура [3].

У случају симетричног система са потрошачем сложене структуре или у општем случају несиметричног напајања без обзира на потрошач, реактивна снага је мања од неактивне снаге, што значи да постоје друге компоненте снага које доприносе неактивној снази потрошача. У том случају се на основу дефиниција Кустерса и Мура [3] може извршити оптимална (али не и

потпуна) компензација неактивне снаге коришћењем пасивних елемената (кондензатора и пригушница) [3,12]. Остале познате дефиниције за реактивну снагу [1-2,4-8] у општем случају се не могу користити за пројектовање компензатора реактивне снаге.

Стандарди (IEEE и DIN) дефинишу неактивну снагу као снагу која садржи све видове некорисне снаге потрошача. Међутим, при израчунавању неактивне снаге при несиметричним напонима на основу IEEE и DIN стандарда јављају се незнатне разлике у вриједностима за неактивну снагу због незнатне разлике у израчунавању привидне снаге. При већим несиметријама напона ове разлике постају значајне. Због тога, универзална дефиниција за снаге за општи случај наизмјеничне струје остаје предмет даљих истраживања и полемика.

ЛИТЕРАТУРА

- [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" *Przegląd Elektrotechniczny*. No 7, pp. 193-203, 1931.
- [3] N. L. Kusters, 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.
- [4] L. Czarnecki, "Orthogonal Decomposition of the Currents in a 3-Phase Nonlinear Asymmetrical Circuit with a Nonsinusoidal Voltage Source", *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurement*, Vol 37, No. 1, pp. 30-34, March 1988.
- [5] A. Ferrero, G. Superti-Furga, "A New Approach to the Definition of Power Components in Three-Phase Systems under Nonsinusoidal Conditions", *IEEE Transaction on Instrumentation and Measurements*, Vol. 40, June 1991, pp 568-577.
- [6] H. Akagi, Y. Kanazawa, A. Nabae, "Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices without Energy Storage Components", *IEEE Transaction on Industrial Applications*, Vol. IA-20, No. 3, pp. 625-630, May/June 1984
- [7] L. Rosseto, P. Tenti, "Evaluation of Instantaneous Power Terms in Multi-Phase Systems: Techniques and Applications to Power-Conditioning Equipments", *ETEP*, Vol. 4, Nov. 1994, pp. 469-475
- [8] P. Tenti, P. Mattavelli, H. K. M. Paredes, "Conservative Power Theory, Sequence Components and Accountability in Smart Grids", *Przegląd Elektrotechniczny*, pp. 30-37, 6' 2010.
- [9] IEEE Trial-Use Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, IEEE Std 1459-2000.
- [10] H. Spath, "A general purpose definition of active current and non-active power based on German standard DIN 40110", *Electrical engineering*, vol 19, no. 4, pp. 1968-1974, October 2004.
- [11] J. Mikulović, T. Šekara, "A New Formulation of Apparent Power for Nonsinusoidal Unbalanced Polyphase Systems", *International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, Lagow, Poland, June 2010.
- [12] T. Šekara, J. Mikulović, Ž. Djurišić "Optimal Reactive Compensators in Power Systems under Asymmetrical and Non-sinusoidal Conditions" *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol.23, No. 2, April 2008.