



УТИЦАЈ НЕСИМЕТРИЈЕ НАПОНА НА ИЗРАЧУНАВАЊЕ СНАГА И ФАКТОРА СНАГЕ

IMPACT OF VOLTAGE UNBALANCE ON POWER AND POWER FACTOR CALCULATIONS

Бојана ЧОЛИЋ, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет, Србија;
Универзитет у Источном Сарајеву, Електротехнички факултет, БиХ

Марко ИКИЋ, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет, Србија;
Универзитет у Источном Сарајеву, Електротехнички факултет, БиХ

Јован Ч. МИКУЛОВИЋ, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет, Србија

КРАТАК САДРЖАЈ

У раду су приказани резултати испитивања утицаја несиметрије напона на израчунавање снага и фактора снаге у дистрибутивним мрежама. Приказани су различити показатељи несиметрије напона и извршено је њихово поређење и вредновање. За израчунавање снага и фактора снаге коришћене су дефиниције према стандардима IEEE 1459-2010 и DIN 40110. Резултати испитивања показују да се у присуству нултих компоненти напона добијају различити резултати за привидну снагу и за фактор снаге, што има за последицу различите оптимизационе критеријуме при пројектовању компензатора реактивне снаге.

Кључне ријечи: несиметрија напона, хармоници, дефиниције снага, фактор снаге

ABSTRACT

This paper presents research results on impact of voltage unbalance on power and power factor calculations in distribution networks. Different voltage unbalance indexes are presented, and their comparison and valuation are performed. For power and power factor calculations definitions provided by standards IEEE 1459-2010 and DIN 40110 are used. Research results indicate different values in power and power factor when zero voltages are present, which results in different optimization criteria when designing power compensator.

Key words: voltage unbalance, harmonics, power definitions, power factor

Контакт: bojana.novakovic@etf.ues.rs.ba, marko.ikic@etf.ues.rs.ba, mikulovic@etf.rs

1. УВОД

О квалитету електричне енергије у систему најбоље говори напон напајања крајњих потрошача. У бројним оптимизационим проблемима пажња је најчешће посвећена другим показатељима квалитета електричне енергије, а проблем несиметрије напона се занемарује. У трофазном електроенергетском систему напони фаза треба да буду симетрични – да су им једнаке амплитуде, а фазни помаци између узастопних напона да су $2\pi/3$. Несиметрија напона је стање у коме се фазни напони разликују по амплитуди или су им фазори помјерени у односу на њихов равнотежни положај. Аналогно се дефинише несиметрија струја. Несиметрија напона је широко распрострањена у дистрибутивним мрежама у континенталној Европи, Великој Британији, САД, Кини и другим државама. [1-2]

Узроци напонске несиметрије могу бити системски (несиметрија импеданси водова и намотаја трансформатора, прегорили осигурачи трофазних кондензаторских батерија...) и функционални (неједнака расподјела потрошача електричне енергије између три фазе, случајна природа понашања линеарних и нелинеарних потрошача). Примјери потрошача који утичу на несиметрију напона су велики монофазни потрошачи (расвјета, електрична возила, електричне топлотне пумпе), мотори, велики индустријски потрошачи (електролучне пећи), погони са промјенљивом брзином обртања, монофазна вуча, железнички саобраћај... Различита истраживања показују да се напонска несиметрија може јавити зависно од производње и положаја фотонапонских извора. [1-3] Узрок несиметрије могу бити и несиметрични кварови. Најчешће се не узимају у обзир током анализе несиметрије напона као показатеља квалитета електричне енергије, већ само уобичајени радни режим. [1]

Бројне су последице несиметрије напона у систему: прерана потреба за повећањем преносних капацитета мреже, додатни губици енергије у трансформаторима и проводницима, непотребно реаговање заштитних уређаја, смањење ефикасности, прегријавање и прерани отказ мотора... Уколико су напони несиметрични, назначена снага мотора треба се множити са фактором умањења (*derating factor*). Напонска несиметрија утиче и на електроенергетске претвараче, код којих се у улазној струји могу појавити некарактеристични хармоници који су умношци броја 3, прекомјерне струје у једној или двије фазе, реаговање прекострујне заштите, смањење животног вијека кондензатора... Опрема се класификује у групе, према вјероватноћи изложености и осјетљивости на несиметрију напона нападања. За опрему осјетљиву на напонску несиметрију треба обезбиједити посебна напојна кола. [4-6]

Конвенционално се регулација напона у дистрибутивним системима врши употребом преклопке за контролу преносног односа трансформатора и степенстих напонских регулатора. Употреба статичких компензатора реактивне енергије је ефикасан приступ, али мана му је висока цијена опреме. Прерасподјела оптерећења по фазама је традиционалан начин борбе против несиметрије напона, при коме се са најоптерећеније фазе оптерећење пребаци на мање оптерећене фазе (или фазу), под напоном, или током планираних прекида испоруке енергије. [3-7]

Ради прорачуна показатеља несиметрије напона, различите организације, као што су *IEC (International Electrotechnical Commission)*, *IEEE (Institute of Electrical and Electronic Engineers)*, *NEMA (National Electrical Manufacturer Association)*, *ANSI (American National Standard Institute)* дефинишу показатеље несиметрије. Показатељ несиметрије јавља се као значајан параметар при рјешавању различитих проблема повезаних са несиметријом: компензација несиметрије [11], контрола реактивне снаге фотонапонских инвертора [3], оптимизација пуњења електричних возила употребом генетског алгорита [12], оптималан распоред употребе дистрибуираних извора у микро-мрежи [13], итд.

Пошто се у пракси све чешће срећу системи са несиметричним и сложенопериодичним напонима и струјама, у новијим верзијама стандарда који разматрају проблематику дефинисања и мјерења параметара електричне снаге дате су дефиниције и препоруке за такве системе.

У овом раду анализиран је утицај несиметрије напона на прорачун снага у трофазном тројичном и трофазном четворожичном систему. За бројне сценарије рачунати су параметри несиметрије по различитим дефиницијама. Показано је да је се према стандардима IEEE 1459 [14] и DIN 40110 [15] добијају различите вриједности за привидну и неактивну снагу уколико напони нису балансирани, односно уколико је присутна нулта компонента напона.

2. ДЕФИНИСАЊЕ ПОКАЗАТЕЉА НЕСИМЕТРИЈЕ НАПОНА

2.1 Симетричан и несиметричан систем

У трофазним системима напони фазних проводника могу се описати простопериодичним функцијама основне кружне учестаности ω , или одговарајућим фазором, односно комплексном вриједношћу. Параметри тих величина су ефективне вриједности фазних напона V_a , V_b и V_c , и почетне фазе одговарајућих напона θ_a , θ_b и θ_c . У идеалном случају генерисани напони су симетрични – једнаких ефективних вриједности ($V_a = V_b = V_c$), са међусобним фазним помацима од $2\pi/3$ ($\theta_a - \theta_b = 2\pi/3$, $\theta_b - \theta_c = 2\pi/3$, $\theta_c - \theta_a = 2\pi/3$).

Напони у дистрибутивном дијелу система, у тачкама прикључења потрошача, често нису простопериодични, ни симетрични. Несиметрија се може појавити због различитости амплитуда, односно ефективних вриједности напона фаза (амплитудска несиметрија) и као одступање фазних помака одговарајућих фаза од вриједности $2\pi/3$ (фазна несиметрија). При амплитудској несиметрији напони фаза могу бити већи или мањи од назначеног напона у датом систему. Одступања почетних фаза напона при фазној несиметрији могу бити у смислу предњачења или кашњења фазора за равнотежним положајем. Различити типови несиметрије су спрегнути једни са другима и често се јављају истовремено. При анализи несиметрије, посматрају се основни хармоници фазних напона, чак и када постоје хармонијска изобличења фазних напона. [3]

2.2 Симетричне компоненте

За анализу несиметричних система користи се чињеница да се сваки несиметричан систем може представити као збир три симетрична система: директног V_d , инверзног V_i и нулног редослиједа V_0 . Симетричне компоненте се користе и за прорачун показатеља несиметрије система. Симетричне компоненте задатог несиметричног система рачунају се помоћу Fortescue-ове трансформације [16-17]:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{V}_0 \\ \mathbf{V}_d \\ \mathbf{V}_i \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{V}_a \\ \mathbf{V}_b \\ \mathbf{V}_c \end{bmatrix}, \quad (1)$$

гдје је $a = e^{j2\pi/3}$ комплексни оператор који ротира фазор за $2\pi/3$. Код симетричних система и инверзна и нулта компонента једнаке су нули.

У препорукама IEEE, IEC, NEMA и CIGRE користе се различите математичке дефиниције показатеља напонске несиметрије. Неке од њих користе симетричне компоненте, неке линијске напоне, а неке фазне напоне. У наставку су описане најчешће кориштене дефиниције.

2.3 Фактор несиметрије напона (*VUF – Voltage Unbalance Factor*)

Препоруке IEC 61000-2-2 [7] и IEEE 1159 [8] дефинишу фактор несиметрије преко симетричних компоненти система фазних напона. Фактор несиметрије напона *VUF* дефинише се као однос амплитуда инверзне и директне компоненте, изражен у процентима:

$$VUF = \frac{|\mathbf{V}_i|}{|\mathbf{V}_d|} \cdot 100. \quad (2)$$

Недостатак ове дефиниције је то што се на основу ње може добити фактор несиметрије једнак нули чак и у ситуацији када несиметрија постоји. Примјер амплитудске и фазне несиметрије која резултује са $VUF = 0$ је сљедећи случај: $\mathbf{V}_a = 230 + j108$ [V], $\mathbf{V}_b = -115 - j91,2$ [V], $\mathbf{V}_c = -115 + j307,2$ [V]. Детаљнија анализа сличних случајева описана је у [18].

Додатни фактор несиметрије напона VUF_0 дефинише се као однос амплитуда нулте и директне компоненте, изражен у процентима:

$$VUF_0 = \frac{|\mathbf{V}_0|}{|\mathbf{V}_d|} \cdot 100. \quad (3)$$

Дефиниција несиметрије напона која садржи показатеље *VUF* и VUF_0 се често помиње као „права“ дефиниција. Широко је распрострањена као примарни показатељ несиметрије напона. У обзир узима и амплитудску и фазну несиметрију, јер одступање од равнотежног положаја фазора једне фазе утиче на амплитуде линијских напона који се рачунају на основу те фазе, те на појаву напона инверзног и нултог редослиједа.

2.5 Практична дефиниција процента несиметрије (дефиниција CIGRE 36-203)

Дефиниције *VUF* и VUF_0 у обзир узимају и несиметрију и по амплитудама и по фазама фазора напона, без икаквих апроксимација. Непрактичност ове дефиниције је немогућност одређивања симетричних компоненти при мјерењима на терену када се располаже са једноставним уређајима који мјере ефективне вриједности. У тим случајевима, несиметрија се може мјерити употребом практичне дефиниције која користи ефективне вриједности линијских напона [8], [6]:

$$NESIMETRIJA = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \cdot 100, \quad (4)$$

гдје је:

$$\beta = \frac{|\mathbf{V}_{ab}|^4 + |\mathbf{V}_{bc}|^4 + |\mathbf{V}_{ca}|^4}{\left(|\mathbf{V}_{ab}|^2 + |\mathbf{V}_{bc}|^2 + |\mathbf{V}_{ca}|^2\right)^2}. \quad (5)$$

Сви елементи једнакости (5) су ефективне вриједности линијских напона.

2.6 Ниво несиметрије линијског напона (*LVUR – Line Voltage Unbalance Rate*)

Често се као показатељ несиметрије користи показатељ *LVUR* дефинисан у стандарду NEMA – MG1 [4]: Он такође може дати податак о амплитудској несиметрији, добијен мјерењем уређајима који мјере ефективну вриједност. Дефинише као однос максималног одступања ефективне вриједности линијског напона од аритметичке средине ефективних вриједности линијских напона и те аритметичке средине:

$$LVUR = \frac{\max(|V_{ab} - V_{lsr}|, |V_{bc} - V_{lsr}|, |V_{ca} - V_{lsr}|)}{V_{lsr}} \cdot 100, \quad (6)$$

гдје је:

$$V_{lsr} = \frac{V_{ab} + V_{bc} + V_{ca}}{3}. \quad (7)$$

2.7 Ниво несиметрије фазног напона (*PVUR – Phase Voltage Unbalance Rate*)

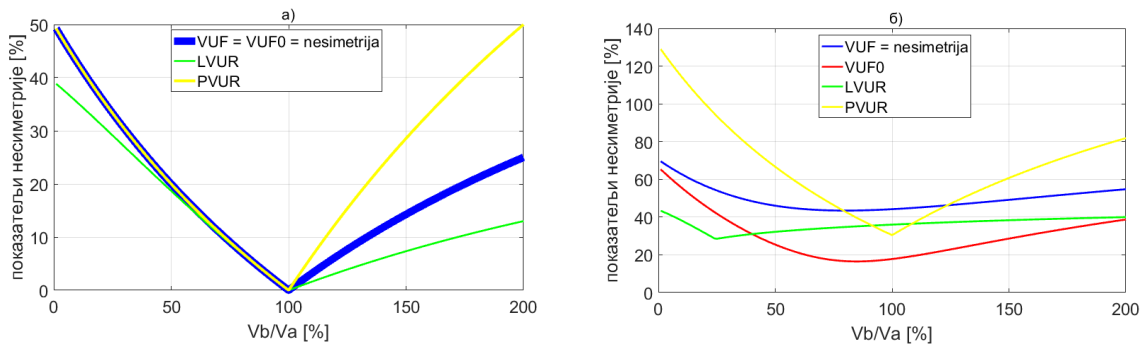
Показатељи VUF и VUF_0 садрже информацију и о амплитудској и о фазној несиметрији, те не могу дати независан податак о амплитудској несиметрији. Стандарди IEEE 141 [5] и ANSI C84.1 [10] дефинишу показатељ $PVUR$, као однос максималног одступања ефективне вриједности фазног напона од аритметичке средине ефективних вриједности фазних напона и те аритметичке средине:

$$PVUR = \frac{\max(|V_a - V_{fsr}|, |V_b - V_{fsr}|, |V_c - V_{fsr}|)}{V_{fsr}} \cdot 100, \quad (8)$$

гдје је:

$$V_{fsr} = \frac{V_a + V_b + V_c}{3}. \quad (9)$$

На слици 1 приказани су резултати прорачуна показатеља несиметрије. Случај а) представља амплитудску несиметрију при којој се напон V_b мијења од 0 до 200% напона V_a , при чему је $V_c = V_a$. Случај б) је случај амплитудске и фазне несиметрије: напон V_b мијења се од 0 до 200% V_a , те предњачи равнотежном положају за 20° , а напон V_c има вриједност 30% V_a , те касни за равнотежним положајем за 5° .



СЛИКА 1: Показатељи несиметрије: а) амплитудска несиметрија, б) амплитудска и фазна несиметрија

За случај амплитудске несиметрије једне фазе уочава се да VUF , VUF_0 и $NESIMETRIJA$ имају исте вриједности. Показатељ $PVUR$ има исту вриједност као VUF када се напон V_b мијења од 0 до 100% V_a , док након тога има значајно вишу вриједност. Показатељ $LVUR$ има исту вриједност као VUF када се напон V_b мијења од 55% до 100% V_a , док након тога има значајно нижу вриједност. Истраживања повезаности различитих показатеља несиметрије показала су да при умјереној напонској несиметрији важи [13]:

$$LVUR \leq VUF \leq \frac{2}{\sqrt{3}} LVUR. \quad (10)$$

Занимљиво је се добија већи VUF у случају када је напон једне фазе мањи од напона осталих фаза (за одређени проценат) него у случају када је напон једне фазе већи од напона осталих фаза (за исти проценат). Разлог је умањење директне компоненте напона у првом случају (а увећања у другом), иако је исти проценат одступања у питању.

Уколико се посматра случај са значајном амплитудском и фазном асиметријом, слика 2 – десно, виде се значајна одступања вриједности различитих показатеља несиметрије.

Показатељ $LVUR$ има вриједности приближне онима добијеним на основу „праве“ дефиниције уколико је садржај хармоника низак и нулта компонента напона мала.

Уколико је нулта компонента напона мала, показатељ $NESIMETRIJA$ даје резултате јако блиске онима добијеним на основу „праве“ дефиниције. Уколико је нулта компонента напона значајна, ова формула доводи до нетачних резултата. [6-9]

Приликом анализе несиметрије напона, јако је битно назначити који стандард, односно који показатељ несиметрије је кориштен, јер усљед различитих типова несиметрије дефиниције могу дати вриједности које се значајно разликују. Погрешно прорачунат показатељ несиметрије може узроковати грешке у поступању са опремом и рјешавању проблема узрокованих несиметријом.

3. ДЕФИНИЦИЈЕ СНАГЕ

У пракси се све чешће срећу системи са сложенопериодичним и несиметричним напонима и струјама. Том проблему је посвећена значајна пажња у новијим верзијама стандарда који разматрају проблематику дефинисања и мјерења компоненти електричне снаге. У овом раду биће размотрене дефиниције активне, привидне и неактивне снаге према стандардима IEEE 1459 и DIN 40110.

Према наведеним стандардима, неактивна снага се даље разлаже на компоненте према различитим дефиницијама, те стога компоненте неактивне снаге неће бити посебно анализирани.

3.1 Дефиниције снага према стандарду IEEE 1459-2010

У овом стандарду дате су дефиниције снага трофазних система четворожични и за тројични систем.

За четворожични трофазни систем тренутна снага p дефинише се као:

$$p = v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c, \quad (11)$$

гдје су v_a , v_b и v_c тренутни напони фазних проводника према неутралном.

Тренутна снага за тројични трофазни систем, у коме је збир струја фазних проводника једнак нули ($i_a + i_b + i_c = 0$), дефинише се као:

$$p = v_{ab} i_a + v_{cb} i_c = v_{ba} i_b + v_{ca} i_c = v_{ac} i_a + v_{bc} i_b, \quad (12)$$

гдје су v_{ab} , v_{bc} и v_{ca} тренутне вриједности линијских напона.

Активна снага P је:

$$P = \frac{1}{kT} \int_0^T p dt, \quad (13)$$

гдје је T трајање периоде [s], а k позитиван цио број.

За дефинисање ефективне привидне снаге у системима са сложенопериодичним и несиметричним напонима и струјама, посматра се виртуелно симетрично коло који има губитке једнаке постојећем систему. Еквивалентна ефективна вриједност струја I_e дефинише се изједначавањем губитака у проводницима виртуелног симетричног и стварног несиметричног кола. За четворожични систем је:

$$3rI_e^2 = r(I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2), \quad (14)$$

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2}{3}}.$$

Еквивалентна ефективна вриједност напона V_e дефинише се изједначавањем губитака на активним елементима потрошача (претпоставља се да су активне компоненте потрошача три активне отпорности R везане у звијезду и три активне отпорности $3R$ везане у троугао):

$$\frac{V_a^2 + V_b^2 + V_c^2}{R} + \frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{3R} = 3 \frac{V_e^2}{R} + \frac{9V_e^2}{3R}, \quad (15)$$

$$V_e = \sqrt{\frac{1}{18} [3(V_a^2 + V_b^2 + V_c^2) + V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2]}.$$

За трофазни тројични систем је:

$$I_e = \sqrt{\frac{I_a^2 + I_b^2 + I_c^2}{3}}, \quad (16)$$

$$V_e = \sqrt{\frac{V_{ab}^2 + V_{bc}^2 + V_{ca}^2}{9}}. \quad (17)$$

Ефективна привидна снага S_e је [14]:

$$S_e = 3V_e I_e. \quad (18)$$

Неактивна снага N дефинише се на основу израза:

$$S_e^2 = P^2 + N^2. \quad (19)$$

Фактор снаге је дефинисан као:

$$PF = \frac{P}{S_e}. \quad (20)$$

3.2 Дефиниције снага према стандарду DIN 40110

Овај стандард има два дијела – Једнофазна електрична кола и Вишефазна електрична кола. У другом дијелу је, осим сложенопериодичних напона и струја, размотрена и несиметрија напона система. Збир струја i_μ свих n проводника система једнак је нули:

$$\sum_{\mu=1}^n i_\mu = 0. \quad (21)$$

За дефиниције снага према [15] потребно је користити напоне проводника $u_{\mu 0}$ рачунате у односу на виртуелну референтну тачку 0 за коју им је збир једнак нули. Они се могу израчунати на основу измјерених напона између проводника $u_{\mu\nu}$:

$$\sum_{\mu=1}^n u_{\mu 0} = 0, \quad (22)$$

$$u_{\mu 0} = \frac{1}{n} \sum_{\nu=1}^n u_{\mu\nu} = u_{\mu\rho} - \frac{1}{n} \sum_{\nu=1}^n u_{\nu\rho}; \quad \rho \in \{1, 2, \dots, n\}. \quad (23)$$

Преко сумарне тренутне снаге $p_\Sigma(t)$ дефинисана је сумарна активна снага P_Σ :

$$p_\Sigma = \sum_{\mu=1}^n u_{\mu 0} i_\mu, \quad (24)$$

$$P_\Sigma = \sum_{\mu=1}^n \frac{1}{T} \int_0^T u_{\mu 0} i_\mu dt = \sum_{\mu=1}^n \bar{p}_\mu. \quad (25)$$

Помоћу сумарне ефективне вриједности струје I_Σ и сумарне ефективне вриједности напона U_Σ дефинише се сумарна привидна снага S_Σ :

$$I_\Sigma = \sqrt{\sum_{\mu=1}^n I_\mu^2}, \quad (26)$$

$$U_\Sigma = \sqrt{\sum_{\mu=1}^n U_\mu^2}, \quad (27)$$

$$S_\Sigma = U_\Sigma I_\Sigma \geq P_\Sigma. \quad (28)$$

Активне струје се дефинишу као симетричне пропорционалне компоненте струја преко симетричних

кондуктанси G које обезбеђују исту активну снагу P_Σ : $i_{\mu p} = G u_{\mu 0}$ ($\mu = 1, 2, \dots, n$), $G = \frac{P_\Sigma}{U_\Sigma^2}$. (29)

Неактивне струје $i_{\mu q}$ се могу израчунати на следећи начин:

$$i_{\mu q} = i_\mu - i_{\mu p} \quad (\mu = 1, 2, \dots, n). \quad (30)$$

Сумарне ефективне вриједности активних и неактивних струја, респективно, су:

$$I_{\Sigma p} = \sqrt{\sum_{\mu=1}^n I_{\mu p}^2}, \quad (31)$$

$$I_{\Sigma q} = \sqrt{\sum_{\mu=1}^n I_{\mu q}^2}. \quad (32)$$

Ове компоненте су међусобно ортогоналне, тако да важи:

$$I_\Sigma^2 = I_{\Sigma p}^2 + I_{\Sigma q}^2. \quad (33)$$

Множењем релације (33) са U_Σ^2 , долази се до израза на основу којег се сумарна привидна снага S_Σ може разложити на сумарну активну снагу P_Σ и сумарну неактивну снагу $Q_{\text{tot}\Sigma}$:

$$S_\Sigma^2 = P_\Sigma^2 + Q_{\text{tot}\Sigma}^2. \quad (34)$$

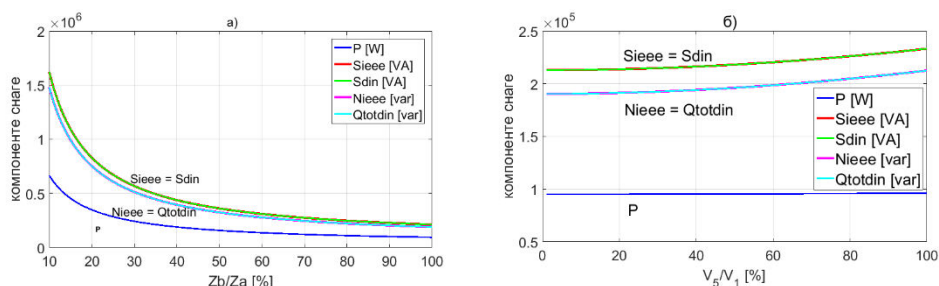
Сумарни фактор снаге, који даје информацију о потребној компензацији, је [15]:

$$\lambda_\Sigma = \frac{|P_\Sigma|}{S_\Sigma} = \frac{I_{\Sigma p}}{I_\Sigma} = \sqrt{1 - \left(\frac{I_{\Sigma q}}{I_\Sigma}\right)^2} \leq 1. \quad (35)$$

4. РЕЗУЛТАТИ СИМУЛАЦИЈА И ДИСКУСИЈА

Ефекти утицаја несиметрије потрошача, садржаја виших хармоника и несиметрије напона на израчунавање снага и фактора снаге у дистрибутивним мрежама анализирани су за случај трофазног потрошача чије су компоненте повезане у троугао. Импеданса потрошача везана између фаза a и b на основној фреквенцији је $\mathbf{Z}_{ab} = R_p + j\omega L_p = (10 + j20) \Omega$. Ради анализе утицаја несиметрије потрошача на компензацију, вриједности импеданси \mathbf{Z}_{bc} и \mathbf{Z}_{ca} су вариране у опсегу од 10% до 100% \mathbf{Z}_{ab} . Резултати прорачуна компоненти снаге при напајању симетричним системом напона у трофазном четворожичном систему (ефективне вриједности фазног напона 230 V) приказани су на слици 2а. Параметри несиметрије напона рачунати по свим дефиницијама за овај случај једнаки су нули (за њихово дефинисање не користи се несиметрија потрошача).

Анализирано је и како садржај хармоника утиче на прорачун вриједности снага. Посматран је у трофазни четворожични систем у коме основни хармоници фазних напона v_{a1} , v_{b1} и v_{c1} чине симетричан систем, ефективне вриједности фазног напона 230 V. На слици 2б приказани су резултати добијени за случај када, поред основног хармоника, напон сваког проводника садржи и пети хармоник чија је ефективна вриједност варирана од 0% до 10% ефективне вриједности основног хармоника. Пети хармоник је одабран за анализу случаја јер и поред његовог присуства, напони остају балансирани. Уколико су у напонима садржани хармоници нултог редослиједа (трећи, девети, итд.), онда напони више нису балансирани (њихов збир није нула, јер су хармоници нултог редослиједа исти у свакој фази). Хармоници директног и инверзног редослиједа фаза су балансирани (на пример седми и пети хармоник). Може се закључити да не постоје разлике у прорачунатим вриједностима компоненти снага, а тиме и фактора снаге, према различитим дефиницијама уколико напони напојних проводника чине симетричан балансиран систем, без обзира на несиметрију потрошача и садржај виших хармоника.



СЛИКА 2: а) Компоненте снаге несиметричног потрошача напајаног симетричним системом простопериодичних напона, б) компоненте снаге симетричног потрошача напајаног симетричним системом сложенопериодичних напона

Затим је разматран случај када се потрошач импедансе $\mathbf{Z}_{ab} = \mathbf{Z}_{bc} = \mathbf{Z}_{ca} = (10 + j20) \Omega$ напаја трофазним системом чије су тренутне вриједности фазних напона v_a , v_b и v_c . Претпостављено је да ти напони садрже основне хармонике v_{a1} , v_{b1} и v_{c1} . Ефективна вриједност напона v_{a1} је 230 V, а ефективне вриједности напона осталих проводника вариране су у опсегу $230 V \pm 100\%$, ради анализе напонске амплитудске несиметрије. Ова одступања су екстремно велика, али су приказана због јаснијег уочавања ефеката несиметрије. Максимална одступања при испитивању опреме на напонску несиметрију према [6] су $\pm 20\%$. Поред основног, напон сваког проводника садржи и пети хармоник чија је ефективна вриједност 5% од 230 V.

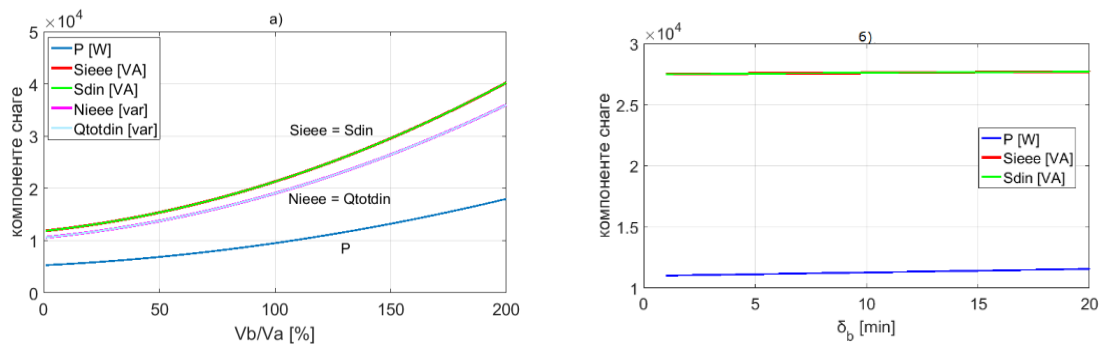
Посматрана је и фазна несиметрија – ситуација када фазор напона \mathbf{V}_{b1} одступа од равнотежног положаја за угао δ_b чије су вриједности вариране између 0 и 20° . Ова одступања су назначена као максимална одступања при испитивању опреме на напонску несиметрију према [6]. Импедансе потрошача су $\mathbf{Z}_{ab} = \mathbf{Z}_{bc} = \mathbf{Z}_{ca} = (10 + j20) \Omega$, а ефективна вриједност основног хармоника напона сваког проводника је 230 V. Поред основног хармоника, напон сваког проводника садржи и пети хармоник чија је ефективна вриједност 5% ефективне вриједности основног хармоника.

На слици 3 дати су резултати прорачунатих вриједности активне и привидне снаге за случај потрошача у трофазном тројичном систему за разматране случајеве амплитудске и фазне несиметрије. Уочава се да без обзира на тип несиметрије, нема разлика у вриједностима снага, самим тим ни у фактору снаге рачунатом према различитим стандардима.

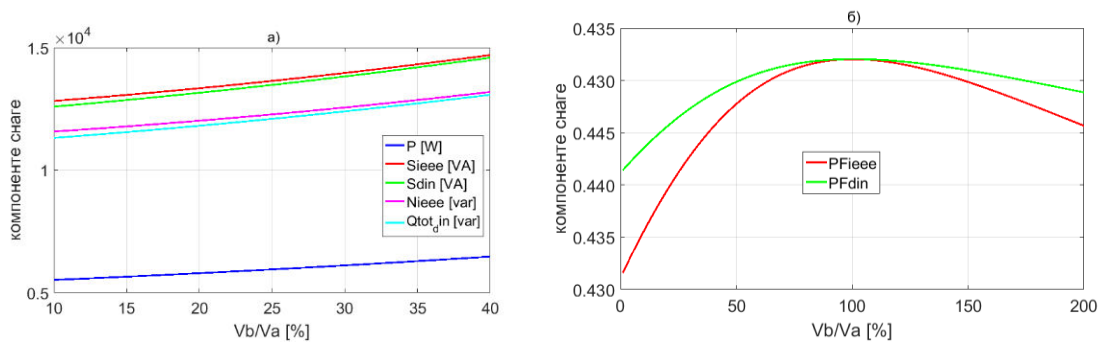
На слици 4 приказани су резултати за потрошач у трофазном четворожичном систему при амплитудској несиметрији, при чему је за тренутну вриједност напона неутралног проводника v_n усвојена вриједност 0. Јасне су разлике у вриједностима рачунатим према различитим стандардима. Разлике су веће уколико је већа несиметрија. Слика 5 приказује резултате за потрошач у трофазном четворожичном систему при описаној фазној несиметрији.

Анализирана је комбинована несиметрија – присуство и амплитудске и фазне несиметрије. Потрошач $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca} (10 + j20) \Omega$ напаја се трофазним системом за који је v_{a1} је 230 V, ефективна вриједност напона v_{b1} варира се у опсегу $230 V \pm 100\%$, док је ефективна вриједност напона v_{c1} 90% од 230 V. Фазор напона V_{b1} предњачи у односу на равнотежни положај за 20° , док фазор напона V_{c1} касни за равнотежним положајем за 5° . Поред основног хармоника, напон сваког проводника садржи и пети хармоник чија је ефективна вриједност 5% од 230 V. У случају потрошача у трофазном тројичном систему нема разлике у вриједностима прорачунатих компоненти снага. За потрошач у трофазном четворожичном систему уочавају се веће разлике при већим несиметријама.

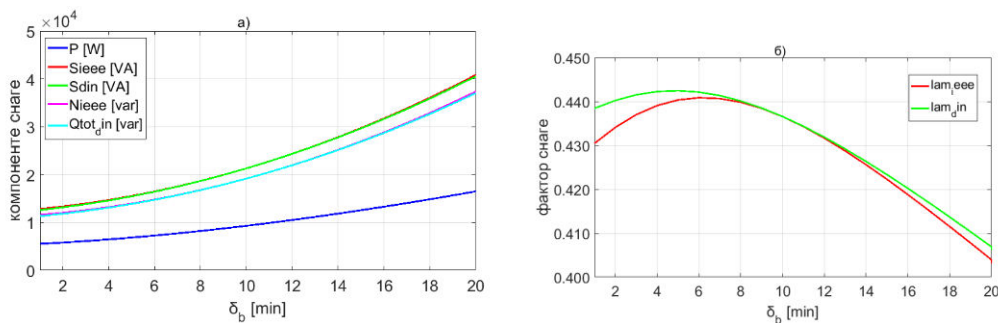
На слици 6 приказана је разлика у вриједностима привидне снаге за потрошач у трофазном четворожичном систему рачунатим при различитим одступањима напона v_b и v_c од вриједности напона v_a .



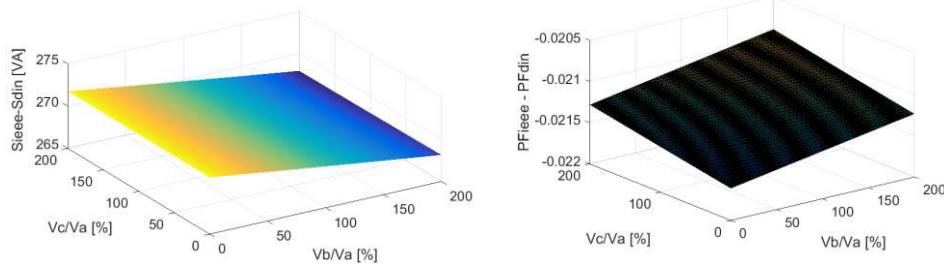
СЛИКА 3: Компоненте снаге потрошача у трофазном тројичном систему: а) амплитудска несиметрија, б) фазна несиметрија



СЛИКА 4: Потрошач у четворожичном трофазном систему при амплитудској несиметрији: а) компоненте снага, б) фактор снаге



СЛИКА 5: Потрошач у четворожичном трофазном систему при фазној несиметрији: а) компоненте снага, б) фактор снаге



СЛИКА 6: Разлика у вриједностима привидне снаге (лијево) и фактора снаге (десно) при амплитудској несиметрији двије фазе у трофазном четворожичном систему

Према оба разматрана стандарда, напони у трофазном тројичном систему су балансирани (збир им је једнак нули), мада могу бити несиметрични по амплитуди и фази. Због балансираности напона, нема одступања између вриједности привидне снаге и фактора снаге прорачунатих на основу различитих дефиниција. Напони у трофазном четворожичном систему могу бити небалансирани, и у тој ситуацији јављају се различити резултати при прорачуну снага према IEEE и DIN стандарду.

5. ЗАКЉУЧАК

У овом раду разматрани су узроци несиметрије напона и наведени њени штетни ефекти. Дат је преглед показатеља несиметрије напона према различитим дефиницијама, те је извршено њихово поређење и вредновање. Иако изискује сложенији прорачун, за прорачун показатеља несиметрије препоручује се употреба „праве“ дефиниције, која је данас прихваћена у већини стандарда, док су остале наведене као алтернативе, уз назнаке под којим условима их је могуће користити.

Дат је и преглед дефиниција снага према стандардима IEEE 1459-2010 и DIN 40110. Привидна снага и фактор снаге према различитим дефиницијама рачунати су за различите сценарије несиметрије. Резултати симулација показују да се у присуству нултих компоненти напона (случај када напони нису балансирани) добијају различите вриједности за привидну снагу и фактор снаге. Једна од могућих посљедица је примјена различитих оптимizacionих критеријума при пројектовању компензатора неактивне снаге.

Будућа истраживања на ову тему бавиће се пројектовањем оптималног компензатора неактивне снаге у несиметричним системима напајања, рјешењима за симетрирање система, прогнозом напонске несиметрије, те анализом трошкова цијелог система узрокованих несиметријом.

РЕФЕРЕНЦЕ

- [1] K. Ma, L. Fang и W. Kong, „Review of Distribution Network Phase Unbalance: Scale, Causes, Consequences, Solutions, and Future Research Direction,“ *CSEE Journal of Power and Energy Systems*, т. 6, бр. 3, pp. 479 - 488, May 2020.
- [2] A. von Jouanne и B. Banerjee, „Assessment of voltage unbalance,“ *IEEE Transactions on Power Delivery*, т. 16, бр. 4, pp. 782-790, October 2001.
- [3] A. K. Singh, G. K. Singh и R. Mitra, „Some Observations on Definitions of Voltage Unbalance,“ у *39th North American Power Symposium*, Las Cruces, NM, USA, 2007.
- [4] *NEMA Standard MG1- 2007: Motors and generators*, National Electrical Manufacturers Association.
- [5] *IEEE Std 141-1993: Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants*, Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [6] *IEC 61000-4-27:2000: Testing and measurement techniques - Unbalance, immunity test*, International Electrotechnical Commission.
- [7] *IEC Standard 61000-2-2, EMC Part 2-2: Environment-compatibility levels for low-frequency conducted disturbances and signalling in public low-voltage power supply systems*, International Electrotechnical Commission.
- [8] *IEEE Std 1159™-2019: Recommended Practice for Monitoring Electric Power Quality*, Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [9] *IEEE Std 519™-2014: Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems*, Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [10] *ANSI C84.1-2020: Electric Power Systems And Equipment - Voltage Ratings*, American National Standards

Institute.

- [11] A. Nakadomari, R. Shigenobu, T. Kato, N. Krishnan, A. Hemeida, H. Takahashi и T. Senjyu, „Unbalanced Voltage Compensation with Optimal Voltage Controlled Regulators and Load Ratio Control Transformer,“ *Energies*, т. 14, бр. 2997, May 2021.
- [12] Y. Zhang и A. Srivastava, „Voltage Control Strategy for Energy Storage System in Sustainable Distribution System Operation,“ *Energies*, т. 14, бр. 832, 2021.
- [13] G. Kshitij и R. Line A., „On the impact of different voltage unbalance metrics in distribution system optimization,“ *Electric Power Systems Research*, т. 189, бр. 106656, august 2020.
- [14] *IEEE Std 1459-2010: Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions*, Institute of Electrical and Electronics Engineers.
- [15] *DIN 40110 AC Quantities- part 2. Multi-conductor-circuits*, German Standard, November 2002.
- [16] Б. Д. Рељин, *Анализа трофазних електричних кола*, 2 ур., Београд: Академска мисао, 2005, р. 159.
- [17] С. Милојковић, *Теорија електричних кола*, Сарајево: "Свјетлост" - ООУР Завод за уџбенике и наставна средства, 1987.
- [18] R. Shigenobu, A. Nakadomari, Y.-Y. Hong, P. Mandal, H. Takahashi и T. Senjyu, „Optimization of Voltage Unbalance Compensation by Smart Inverter,“ *Energies*, т. 13, бр. 4623, 2020.
- [19] A. D. Rodriguez, F. M. Fuentes и A. J. Matta, „Comparative analysis between voltage unbalance definitions,“ у *2015 Workshop on Engineering Applications - International Congress on Engineering (WEA)*, Bogota, Colombia, 2015.
- [20] C. H. Y. N. C. Y. Tsai Hsiang Chen, „Examination of the definitions of voltage unbalance,“ *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, т. 9, pp. 380-385, 2013.