

ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТЕЙ ТРИФАЗНИХ МЕРЕЖ В НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМАХ

¹Вінницький національний технічний університет;

²ДП «НЕК «Укренерго» ВП Південно-Західна ЕС

Проаналізовано можливість визначення миттєвих та комплексних потужностей за несиметричних режимів трифазних мереж із заземленою нейтраллю. Показано, що несиметричність режиму доцільно характеризувати комплексними та миттєвими активною і реактивною умовними потужностями зворотної та нульової послідовностей. Отримано вирази для вказаних величин.

Ключові слова: електричні мережі, несиметричні режими, активна і реактивна умовні потужності, зворотна та нульова послідовності.

Вступ

Несиметричні режими виникають в електричних мережах внаслідок несиметрії навантажень, обриву проводів ліній електропередавання без замикання на землю, незамикання контактів вимикачів тощо. Для їх оцінювання та виявлення аномальних режимів необхідні інформативні параметри.

Сучасний підхід до визначення потужностей трифазних навантажень полягає у використанні повної миттєвої потужності трифазної системи $s(t)$ за базову величину, яку розкладають на ортогональні складники [1—4]. Вираз для квадрата миттєвої повної потужності можна подати у вигляді суми квадратів скалярного та векторного добутків векторів трифазних напруг і струмів:

$$s^2 = (\mathbf{I} \cdot \mathbf{U})^2 + (\mathbf{I} \times \mathbf{U})^2, \quad (1)$$

де \mathbf{I} , \mathbf{U} — вектори струмів і напруг в системі фазних координат $[i_A, i_B, i_C]^T$, $[u_A, u_B, u_C]^T$ або системі координат Кларка $[i_\alpha, i_\beta, i_0]^T$, $[u_\alpha, u_\beta, u_0]^T$.

Скалярний та векторний добуток виразу (1) є відповідно миттєвими активною та реактивною потужностями.

У разі застосування системи координат Кларка вирази для миттєвих активної та реактивної потужностей відповідно будуть

$$p = (\mathbf{I} \cdot \mathbf{U}) = (i_\alpha u_\alpha + i_\beta u_\beta + i_0 u_0); \quad (2)$$

$$q = (\mathbf{I} \times \mathbf{U}) = \sqrt{\begin{vmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ u_\alpha & u_\beta \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} i_\beta & i_0 \\ u_\beta & u_0 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} i_0 & i_\alpha \\ u_0 & u_\alpha \end{vmatrix}^2}. \quad (3)$$

Ортогональні складники напруги та струму в системі координат Кларка визначають за формулами

$$u_\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}}(u_A - u_0); \quad u_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}u_{BC}; \quad u_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}(u_A + u_B + u_C); \quad (4)$$

$$i_\alpha = \sqrt{\frac{3}{2}}(i_A - i_0); \quad i_\beta = \frac{1}{\sqrt{2}}(i_B - i_C); \quad i_0 = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_A + i_B + i_C). \quad (5)$$

З виразу (3) випливає, що реактивна потужність містить три складники [3]:

$$q_0 = i_\alpha u_\beta - i_\beta u_\alpha; \quad q_\alpha = i_\beta u_0 - i_0 u_\beta; \quad q_\beta = i_0 u_\alpha - i_\alpha u_0. \quad (6)$$

Складник q_0 відповідає поняттю реактивної потужності для мережі з ізольованою нейтраллю. Два інших складники (6) характеризують появу напруги або струму нульової послідовності в мережі із заземленою нейтраллю. Складники q_α і q_β можна об'єднати в один [4]:

$$q_r = u_{\alpha\beta} i_0 - \frac{u_0}{u_{\alpha\beta}} (u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta), \quad (7)$$

з дотриманням умови

$$q_0^2 + q_\alpha^2 + q_\beta^2 = \left(\frac{u_{\alpha\beta 0}}{u_{\alpha\beta}} q_0 \right)^2 + q_r^2, \quad (8)$$

де $u_{\alpha\beta} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}$, $u_{\alpha\beta 0} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2 + u_0^2}$.

У разі симетричного джерела живлення та симетричного навантаження трифазної системи миттєві потужності не змінюються в часі. Пульсації величин p та q_0 відбуваються з періодом вдвічі меншим від періоду напруги живлення мережі (рис. 1). Складник q_r має нульове середнє значення і містить лише пульсуючу потужність $N_r = -q_r$, причому період коливань цієї потужності дорівнює періоду коливань напруги живлення.

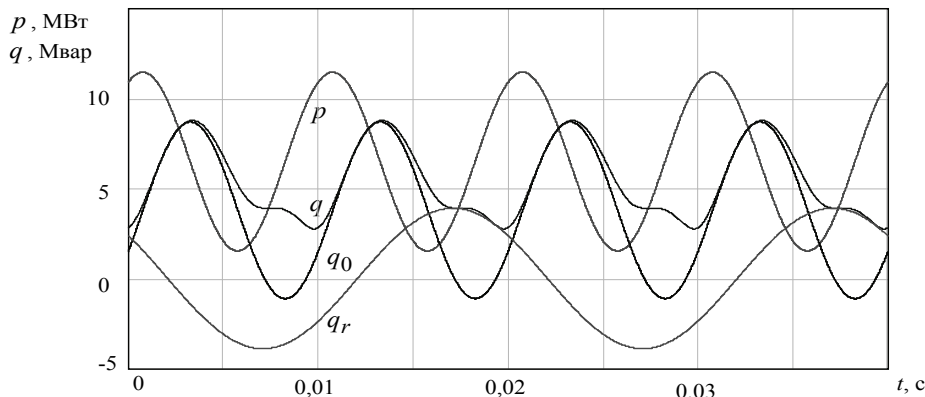


Рис. 1. Залежності миттєвих активної та реактивної потужностей, а також її складників за обриву фази в кільцевій мережі напругою 110 кВ

Активну та реактивну потужності вимірюють шляхом інтегрування відповідних миттєвих потужностей на періоді напруги живлення

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt; \quad Q = \frac{1}{T} \int_0^T q_0(t) dt. \quad (9)$$

Пульсації миттєвих потужностей характеризують за допомогою поняття пульсуючої потужності. За визначенням [5] пульсуючі потужності є змінними складовими миттєвих активної та реактивної потужностей, які можна визначити як різницю (зі знаком мінус) миттєвої активної потужності $p(t)$ і активної потужності P та миттєвої реактивної потужності $q_0(t)$ і реактивної потужності Q трифазного навантаження:

$$N(t) = -(p(t) - P); \quad N_q(t) = -(q_0(t) - Q). \quad (10)$$

Однак застосування пульсуючих миттєвих потужностей для оцінювання несиметричності режиму пов'язане зі складністю вимірювань їх параметрів і в багатьох випадках не забезпечує необхідної інформації для розв'язання практичних задач симетрування навантажень, виявлення неповнофазних режимів.

Мета роботи полягає в обґрунтуванні комплексних та миттєвих потужностей для оцінювання несиметричних режимів в трифазних мережах із заземленою нейтраллю.

Обґрунтування результатів дослідження

За синусоїдних напруг і струмів несиметричність режиму доцільно характеризувати комплексними пульсуючими та умовними потужностями зворотної послідовності [5—9]. Причому комплексні потужності \underline{N} та \underline{S}_2 , які однозначно характеризують пульсації активної потужності, доцільно доповнити комплексними потужностями \underline{N}_q та \underline{S}_{2q} , які однозначно характеризують пульсації реактивної потужності [10], тобто:

$$\underline{N} = 3(\dot{U}_1 \dot{I}_2 + \dot{U}_2 \dot{I}_1); \quad \underline{N}_q = 3(\dot{U}_1 \dot{I}_2 - \dot{U}_2 \dot{I}_1); \quad (11)$$

$$\underline{S}_2 = 3\left(\dot{U}_1^* \dot{I}_2 + \dot{U}_2^* \dot{I}_1\right); \quad \underline{S}_{2q} = 3\left(\dot{U}_1^* \dot{I}_2 - \dot{U}_2^* \dot{I}_1\right). \quad (12)$$

де $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{U}_0, \dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$ — комплексні напруги та струми відповідно прямої, зворотної та нульової послідовностей; $\dot{I}_1^*, \dot{I}_2^*, \dot{I}_0^*$ — комплексні спряжені струми відповідних послідовностей.

Комплексні пульсуючі та умовні потужності зворотної послідовності можна записати із застосуванням системи координат Кларка

$$\underline{N} = \dot{U}_\alpha \dot{I}_\alpha + \dot{U}_\beta \dot{I}_\beta, \quad \underline{N}_q = j(\dot{U}_\beta \dot{I}_\alpha - \dot{U}_\alpha \dot{I}_\beta); \quad (13)$$

$$\underline{S}_2 = \dot{U}_\alpha \dot{I}_\alpha^* - \dot{U}_\beta \dot{I}_\beta^*; \quad \underline{S}_{2q} = j(\dot{U}_\alpha \dot{I}_\beta^* + \dot{U}_\beta \dot{I}_\alpha^*), \quad (14)$$

де $\dot{U}_\alpha, \dot{U}_\beta, \dot{I}_\alpha, \dot{I}_\beta, \dot{I}_\alpha^*, \dot{I}_\beta^*$ — комплексні напруги і струми та комплексні спряжені струми в ортогональній системі координат Кларка.

Згідно з виразами (14) пульсації величин p та q_0 можна характеризувати складниками миттєвих умовних потужностей зворотної послідовності, відповідно:

$$p_2 = u_\alpha i_\alpha - u_\beta i_\beta; \quad q_2 = u'_\alpha i_\alpha - u'_\beta i_\beta; \quad (15)$$

$$p_{2q} = -u'_\alpha i_\beta - u'_\beta i_\alpha; \quad q_{2q} = u_\beta i_\alpha + u_\alpha i_\beta, \quad (16)$$

де штрихом позначено фазовий зсув миттєвих величин на 90 ел. градусів.

Недоліком застосування величин, визначених за формулами (15), (16), є велика амплітуда коливань їх змінних складових, що призводить до перерегулювання в системах автоматичного керування пристроями симетрування. Значно менша амплітуда пульсацій величин забезпечується у випадку їх визначення за формулами [11]

$$p_2 = u_\alpha i_\alpha - u'_\beta i'_\beta; \quad q_2 = u'_\alpha i_\alpha + u_\beta i'_\beta; \quad (17)$$

$$p_{2q} = u_\alpha i'_\beta - u'_\beta i_\alpha; \quad q_{2q} = u_\beta i_\alpha + u'_\alpha i'_\beta. \quad (18)$$

У цьому випадку змінна складова p_2 збігається зі змінною складовою потужності p , а змінна складова q_2 близька до змінної складової потужності q_0 . Водночас змінна складова p_{2q} близька до змінної складової потужності p , а змінна складова q_{2q} збігається зі змінною складовою потужності q_0 . Кожен зі складників миттєвих умовних потужностей (15)—(18) мають постійні складові, які є інформативними параметрами (рис. 2). Постійні складові p_2 та q_2

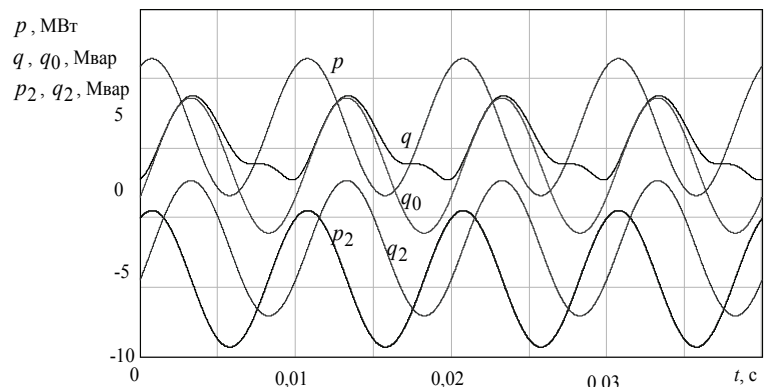


Рис. 2. Залежності миттєвих активної та реактивних потужностей, а також умовних потужностей зворотної послідовності за обриву фази лінії в кільцевій мережі

характеризують дійсну та уявну частини потужності \underline{S}_2 , а постійні складові p_{2q} та q_{2q} — дійсну та уявну частини потужності \underline{S}_{2q} .

Неврівноваженість режиму мережі із заземленою нейтраллю, згідно з виразами (6), можна характеризувати умовними комплексними потужностями нульової послідовності

$$\underline{S}_\alpha = -\dot{U}_\beta I_0^* + \dot{U}_0 I_\beta^*; \quad \underline{S}_\beta = \dot{U}_\alpha I_0^* - \dot{U}_0 I_\alpha^*, \quad (19)$$

дійсні складники яких характеризують постійні складові, відповідно, величин q_α , q_β , а модулі — амплітуду пульсацій q_α , q_β і опосередковано q_r , та можуть бути використані для компенсації струму нульової послідовності в мережах із заземленою нейтраллю (симетрування навантажень за нульовою послідовністю).

Достатнім наближенням до виразу (7) є такий вираз:

$$\hat{q}_r = u_{\alpha\beta} i_0 - u_0 i_{\alpha\beta}, \quad (20)$$

де $i_{\alpha\beta} = \sqrt{i_\alpha^2 + i_\beta^2}$. Відмінність амплітудних значень миттєвих залежностей \hat{q}_r та q_r не перевищує 0,1 %.

Це дає підставу для оцінювання неврівноваженості режиму мережі із заземленою нейтраллю використати комплексну пульсуючу потужність нульової послідовності

$$\underline{N}_0 = 3(|\dot{U}_0| |\dot{I}_1 - \dot{I}_0|), \quad (21)$$

яка достатньо точно характеризує ортогональні складники пульсуючої потужності N_r .

Результати розрахунків пульсуючої потужності нульової послідовності за різних співвідношень навантажень підстанцій споживачів для двох ліній електропередавання кільцевої мережі напругою 110 кВ після обриву фази А лінії Л-3 (рис. 3) подано в таблиці.

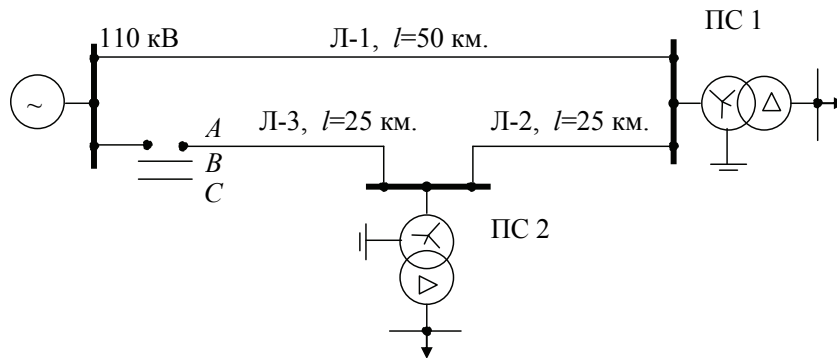


Рис. 3. Розрахункова схема кільцевої мережі

Результати розрахунків пульсуючої потужності нульової послідовності для кільцевої мережі за різних співвідношень навантажень

Режим роботи: обрив фази А лінії Л-3		$\max N_r$, Мвар	$ N_r $, Мвар	$\arg N_r$, ел. град.	$ N_0 $, Мвар	$\arg N_0$, ел. град.
Л-3 ПС-2	$S_{n2} = S_{n1}$	3,887	3,882	-37,39	3,882	-37,56
	$S_{n1} = 0,5 S_{n2}$	3,132	3,132	-37,34	3,129	-37,54
	$S_{n2} = 0,5 S_{n1}$	2,741	2,741	-37,30	2,739	-37,51
Л-2 ПС-1	$S_{n2} = S_{n1}$	2,097	2,098	146,64	2,095	146,51
	$S_{n1} = 0,5 S_{n2}$	1,690	1,690	146,71	1,689	146,55
	$S_{n2} = 0,5 S_{n1}$	1,480	1,481	146,67	1,479	146,51

Визначення параметрів величин під час обчислювального експеримента проводилося таким чином. Найбільше значення $\max N_r$ визначалося за графіком q_r . Модуль $|N_r|$ і аргумент $\arg N_r$ визначалися на основі дійсної та уявної складових q_r , обчислених шляхом інтегрування, використовуючи графік N_r на половині періоду напруги живлення.

З таблиці випливає, що комплексна пульсуюча потужність \underline{N}_0 достатньо точно характеризує потужність N_r . Похибка по модулю становить приблизно 0,1 %, а по фазі — 0,2 ел. градуса.

Висновки

Проаналізовано можливості визначення потужностей несиметричних режимів в трифазних мережах із заземленою нейтраллю з використанням ортогональних складників миттєвих потужностей. Показано, що несиметричність режиму мережі доцільно характеризувати з використанням пульсуючих потужностей. Показано, що більш повними характеристиками несиметричності режиму мережі є комплексні та миттєві умовні потужності зворотної послідовності, які несуть інформацію як про амплітуду пульсацій, так і про характер несиметрії, що виникла в мережі. На прикладі несиметричного режиму кільцевої мережі показано можливість використання комплексної пульсуючої потужності нульової послідовності.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Akagi H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning [Текст] / H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes // IEEE Press . Willy-Interscience, 2007. — 379 p.
2. Akagi H. Instantaneous Reactive Power Compensators Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components [Текст] / H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae // IEEE Trans. Ind. App. — 1984. — Vol. 20, No.3, May/June. — P. 625—630.
3. Peng F. Z. Generalized Instantaneous Reactive Power Theory for Three-Phase Power Systems [Текст] / F. Z. Peng and J.-S. Lai // IEEE Trans. Inst. Meas. — 1996. — Vol. 45, No. 1, Feb. — P. 293—297.
4. Instantaneous power compensation in three-phase systems using p-q-r theory [Текст] / H. S. Kim, F. Blaabjerg, B. Bak-Jensen, J. Choi // IEEE Trans. Power Electronics. — 2002. — Vol. 17, No 5. — P. 701—710.
5. Мельников Н. А. Реактивная мощность в электрических сетях [Текст] / Н. А. Мельников. — М. : Энергия, 1975. — 128 с.
6. Маркушевич Н. С. Качество напряжения в городских электрических сетях [Текст] / Н. С. Маркушевич, Л. А. Солдаткина. — М. : Энергия, 1975. — 128 с.
7. Шидловский А. К. Повышение качества энергии в электрических сетях [Текст] / А. К. Шидловский, В. Г. Кузнецов. — К. : Наукова думка, 1985. — 268 с.
8. Кузнецов В. Г. Снижение несимметрии и несинусоидальности напряжений в электрических сетях [Текст] / В. Г. Кузнецов, А. С. Григорьев, В. Б. Данилюк — К. : Наукова думка, 1992. — 240 с.
9. Бурбело М. Й. Квазірівноважені частотно-варіаційні вимірювальні системи [Текст] / М. Й. Бурбело. — Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2004. — 225 с.
10. Бурбело М. Й. Визначення потужностей трифазної несиметричної системи з ізольованою нейтраллю [Текст] / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук // Технічна електродинаміка. — 2013. — № 6. — С. 66—70.
11. Бурбело М. Й. Вимірювання параметрів несиметричних швидкозмінних трифазних навантажень [Текст] / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук, М. В. Никитенко // Технічна електродинаміка. — 2011. — № 2. — С. 54—56.

Рекомендована кафедрою електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 9.02.2015

Бурбело Михайло Йосипович — д-р техн. наук, професор, професор кафедри електротехнічних систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, e-mail: burbelomj@gmail.com;

Вінницький національний технічний університет, Вінниця;

Мельничук Сергій Миколайович — начальник сектору релейного захисту електричних станцій, Державне підприємство «НЕК «Укренерго» ВП Південно-Західна ЕС; e-mail: melnichuk7sm@gmail.com

M. Y. Burbelo¹
S. M. Melnychuk²

Powers determination of three-phase networks in asymmetrical conditions

¹Vinnitsia National Technical University;

²State Enterprise «NPC «Ukrenergo» SU South-western Electric Power System

There has been analyzed the possibility of determination complex and instantaneous powers at the asymmetrical conditions of three-phase networks with the grounded neutral. It has been shown that asymmetrical condition is expedient to characterize with complex and instantaneous active and reactive conditional powers of negative and zero sequences. Expressions for these quantities have been obtained in the paper.

Keywords: power networks, relay protection, *asymmetrical conditions*, active and reactive conditional powers, negative and zero sequence.

Burbelo Mykhailo Y. — Dr. Sc. (Eng.), Professor of the Chair of Electrical Systems of Power and Energy Management, e-mail: burbelomj@gmail.com;

Melnichuk Sergii M. — Head of the Section of Relay Protection of Power Plants, e-mail: melnichuk7sm@gmail.com

М. И. Бурбело¹
С. М. Мельничук²

Определение мощностей трехфазных сетей в несимметричных режимах

¹Винницкий национальный технический университет;

²ГП «НЭК «Укрэнерго» ОП Юго-Западная ЭС

Проанализирована возможность определения комплексных и мгновенных мощностей при несимметричных режимах трехфазных сетей с заземленной нейтралью. Показано, что несимметричность режима целесообразно характеризовать комплексными и мгновенными активной и реактивной условными мощностями обратной и нулевой последовательностей. Получены выражения для этих величин.

Ключевые слова: электрические сети, релейная защита, несимметричные режимы, активная и реактивная условные мощности, обратная и нулевая последовательность.

Бурбело Михаил Иосифович — д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры электротехнических систем электропотребления и энергетического менеджмента, e-mail: burbelomj@gmail.com;

Мельничук Сергей Николаевич — начальник сектора релейной защиты электрических станций, e-mail: melnichuk7sm@gmail.com