

УДК 621.317.7

М.Й. БУРБЕЛО, С.М. МЕЛЬНИЧУК, В.О. КОШКАЛДА

Вінницький національний технічний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ПОТУЖНОСТЕЙ НЕСИМЕТРИЧНОГО РЕЖИМУ
ТРИФАЗНОЇ СИСТЕМИ ІЗ ЗАЗЕМЛЕНОЮ НЕЙТРАЛЛЮ

В статті проаналізовано можливість визначення комплексних потужностей за несиметричного режиму трифазної мережі із заземленою нейтраллю. Показано, що несиметричність режиму доцільно характеризувати комплексними умовними потужностями зворотної та нульової послідовностей. Отримано вирази для вказаних комплексних величин.

Ключові слова: несиметричний режим, пульсуюча потужність, ортогональні складники.

M. Y. BURBELO, S.M. MEL'NYCHUK, V.O. KOSHKALDA

Vinnitsa national technical university

DETERMINATION POWER OF THREE-PHASE SYSTEMS WITH EARTHED NEUTRAL
IN ASYMMETRIC MODE

Abstract - In the article analyzes the possibility of determining the complex capacity of three-phase systems with earthed neutral in asymmetric mode. It is shown that the asymmetrical mode advisable to characterize complex conditional power reverse and zero sequence. Expressions are obtained for these complex values.

Keywords: asymmetric mode, throbbing power, orthogonal components.

Розгляд проблеми

Сучасний підхід до визначення потужностей несиметричних режимів трифазних систем із заземленою нейтраллю (відповідно до p - q теорії миттєвої потужності) полягає у розкладанні миттєвих напруг і струмів на ортогональні складники в системі $\alpha\beta 0$ -координат Кларка [1-4]. Перехід від фазних координат до ортогональних складників здійснюється за формулами

$$\mathbf{I}_p = \mathbf{p}^T \mathbf{I}; \quad \mathbf{U}_p = \mathbf{p}^T \mathbf{U}, \quad (1)$$

де $\mathbf{I}_p = [i_\alpha \quad i_\beta \quad i_0]^T$, $\mathbf{U}_p = [U_\alpha \quad U_\beta \quad U_0]^T$ – вектори струму і напруги в системі $\alpha\beta 0$ -координат; $\mathbf{I} = [I_A \quad I_B \quad I_C]^T$, $\mathbf{U} = [U_A \quad U_B \quad U_C]^T$ – вектори струму і напруги в системі фазних координат; τ – індекс транспонування вектора або матриці;

$$\mathbf{p} = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & 0 & \sqrt{1/3} \\ -\sqrt{1/6} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/3} \\ -\sqrt{1/6} & -\sqrt{1/2} & \sqrt{1/3} \end{bmatrix} \text{ – матриця переходу від ортогональних до фазних координат.}$$

Вираз для квадрата миттєвої повної потужності трифазної системи із заземленою нейтраллю в системі $\alpha\beta 0$ -координат можна представити у такому вигляді:

$$s^2 = |\mathbf{I}_p|^2 \cdot |\mathbf{U}_p|^2 = (i_\alpha^2 + i_\beta^2 + i_0^2)(u_\alpha^2 + u_\beta^2 + u_0^2). \quad (2)$$

При цьому квадрат миттєвої повної потужності трифазного кола можна розкласти у вигляді суми скалярного та векторного добутків векторів ортогональних складників струмів і напруг

$$|\mathbf{I}_p|^2 \cdot |\mathbf{U}_p|^2 = (\mathbf{I}_p \cdot \mathbf{U}_p)^2 + (\mathbf{I}_p \times \mathbf{U}_p)^2. \quad (3)$$

Скалярний та векторний добутки (3) є відповідно миттєвими активною та реактивною (за визначенням С. Фрізе) потужностями

$$p = (\mathbf{I}_p \cdot \mathbf{U}_p) = (i_\alpha u_\alpha + i_\beta u_\beta + i_0 u_0); \quad (4)$$

$$q = (\mathbf{I}_p \times \mathbf{U}_p) = \sqrt{\begin{vmatrix} i_\alpha & i_\beta \\ u_\alpha & u_\beta \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} i_\beta & i_0 \\ u_\beta & u_0 \end{vmatrix}^2 + \begin{vmatrix} i_0 & i_\alpha \\ u_0 & u_\alpha \end{vmatrix}^2}. \quad (5)$$

З (5) випливає, що реактивна потужність містить у даному випадку 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 С. Фрізе для мережі з ізольованою нейтраллю. Що стосується складників q_α і q_β , то вони характеризують появу струму та напруги нульової послідовності (неврівноваженості) в мережі із заземленою нейтраллю.

Останні два складники можна прямою підстановкою величин об'єднати в один складник

$$q_r = \pm \sqrt{q_\alpha^2 + q_\beta^2} = u_{\alpha\beta} i_0 - \frac{u_0}{u_{\alpha\beta}} (u_\alpha i_\alpha + u_\beta i_\beta), \quad (7)$$

який відповідає p - q - r теорії реактивної потужності [4] (тут $u_{\alpha\beta} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}$).

Мета роботи

Мета роботи полягає в аналізі можливостей визначення комплексних потужностей за несиметричних режимів в трифазних мережах із заземленою нейтраллю з використанням ортогональних складників напруги та струму.

Обґрунтування результатів

На рис. 1 наведено залежності миттєвих повної, активної та реактивної (за визначенням С. Фрізе) потужностей у разі несиметрії, що виникла внаслідок обриву фази однієї з ліній електропередавання в кільцевій мережі. На рис. 2 наведено залежності миттєвої реактивної потужності та її складників q_0 , q_α , q_β для вказаного режиму. На рис. 3 зображено миттєві потужності, які отримано згідно з теорією p - q - r для вказаного режиму мережі.

Виникнення пульсацій миттєвої активної потужності p та реактивної потужності q_0 свідчить про наявність в мережі несиметрії за зворотною послідовністю струму та напруги. Поява складників q_α і q_β , а також потужності q_r свідчить про наявність в мережі несиметрії за нульовою послідовністю струму та напруги.

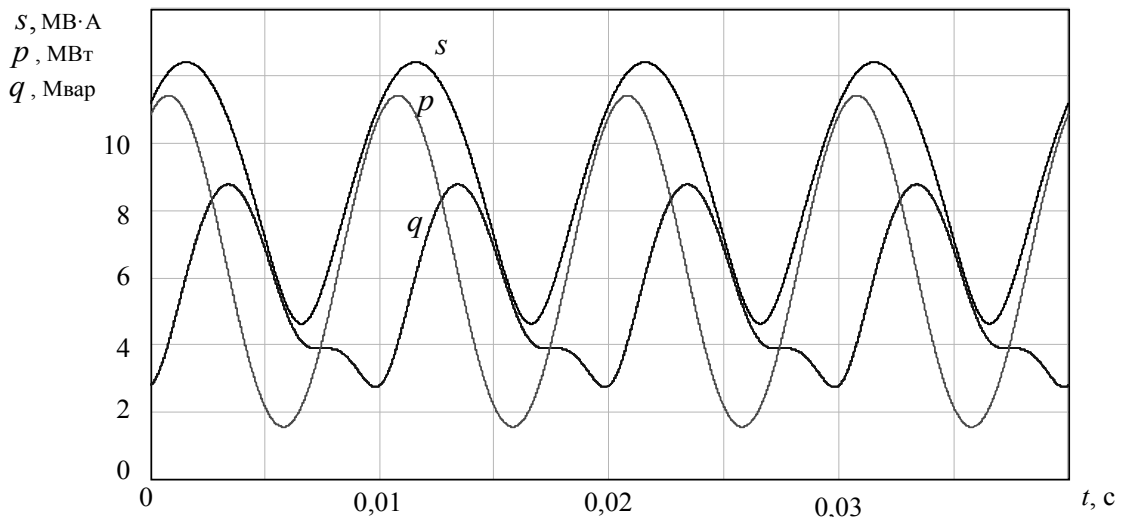


Рис. 1. Залежності миттєвих повної, активної та реактивної потужностей за обриву фази в кільцевій мережі

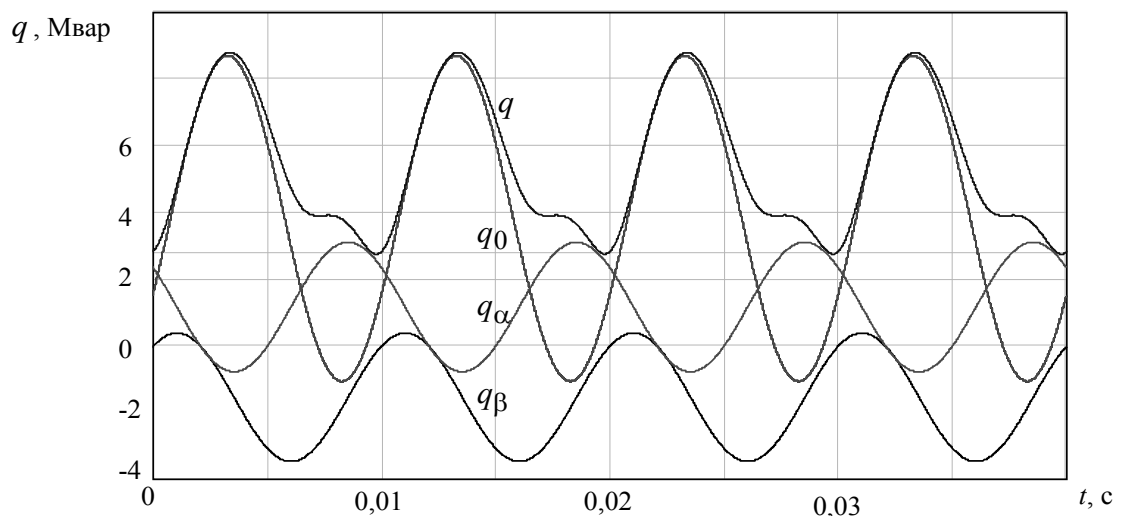


Рис. 2. Залежності миттєвої реактивної потужності та її складників за обриву фази в кільцевій мережі

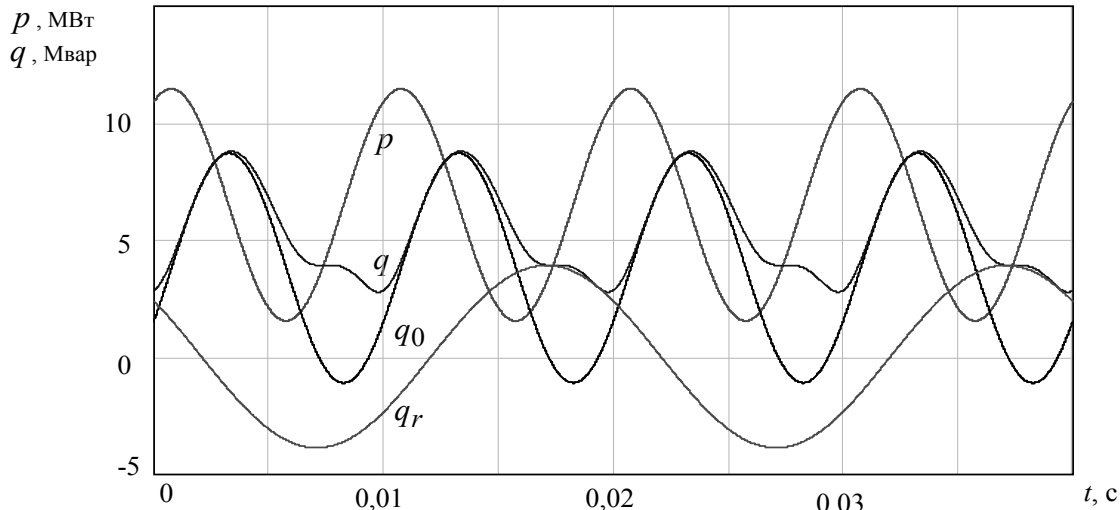


Рис. 3. Залежності миттєвих активної та реактивної потужностей, а також її складників згідно теорії p - q - r за обриву фази в кільцевій мережі

Ппульсуючі потужності, які характеризують пульсації миттєвих активної p та реактивної q_0 потужностей, можна визначити за формулами [5]

$$N(t) = -(p(t) - P); \quad N_q(t) = -(q_0(t) - Q), \quad (8)$$

де P, Q – активна і реактивна потужності, які визначають шляхом інтегрування миттєвих активної та реактивної потужностей на періоді напруги живлення T .

$$P = \int_0^T p dt = \int_0^T (i_\alpha u_\alpha + i_\beta u_\beta + i_0 u_0) dt; \quad Q = \int_0^T q_0 dt = \int_0^T (i_\alpha u_\beta - i_\beta u_\alpha) dt. \quad (9)$$

Враховуючи синусоїдний характер пульсацій миттєвих активної p та реактивної q_0 потужностей несиметричність режиму мережі із заземленою нейтраллю, як і мережі з ізольованою нейтраллю, можна характеризувати комплексними пульсуючими потужностями [6]

$$\underline{N} = 3(\dot{U}_1 \dot{I}_2 + \dot{U}_2 \dot{I}_1) = \dot{U}_\alpha \dot{I}_\alpha + \dot{U}_\beta \dot{I}_\beta; \quad (10)$$

$$\underline{N}_q = 3(\dot{U}_1 \dot{I}_2 - \dot{U}_2 \dot{I}_1) = j(\dot{U}_\beta \dot{I}_\alpha - \dot{U}_\alpha \dot{I}_\beta), \quad (11)$$

де $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dot{I}_1, \dot{I}_2$ – комплексні напруги і струми відповідно прямої та зворотної послідовностей;

$\dot{U}_\alpha, \dot{U}_\beta, \dot{I}_\alpha, \dot{I}_\beta$ – комплексні напруги і струми в ортогональній системі координат.

Модулі комплексних пульсуючих потужностей \underline{N} та \underline{N}_q дорівнюють відповідно амплітудним значенням $N(t)$ та $N_q(t)$.

Більш зручним (з точки зору простоти та точності вимірювань) показником несиметричності режиму за зворотною послідовністю є комплексна умовна потужність зворотної послідовності [7, 8]:

$$\underline{S}_2 = 3(\dot{U}_1 \dot{I}_2 + \dot{U}_2 \dot{I}_1) = (\dot{U}_\alpha \dot{I}_\alpha - \dot{U}_\beta \dot{I}_\beta), \quad (12)$$

де \dot{I}_1, \dot{I}_2 – комплексні спряжені струми відповідно прямої та зворотної послідовностей; $\dot{I}_\alpha, \dot{I}_\beta$ – комплексні спряжені струми в ортогональній системі координат.

Аналогічно формулам (10) та (11), доцільно ввести ще одну комплексну умовну потужність:

$$\underline{S}_{2q} = 3(\dot{U}_1 \dot{I}_2 - \dot{U}_2 \dot{I}_1) = j(\dot{U}_\alpha \dot{I}_\beta + \dot{U}_\beta \dot{I}_\alpha). \quad (13)$$

Модулі умовних потужностей зворотної послідовності характеризують амплітуду пульсацій відповідно активної та реактивної потужностей, а дійсні та уявні складові забезпечують ефективне симетрування навантажень за зворотною послідовністю.

Складники q_α і q_β мають постійні складові, а частота їх пульсацій дорівнює подвійній частоті напруги живлення мережі. 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.

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

$$\underline{S}_\alpha = -\dot{U}_\beta \dot{I}_0 + \dot{U}_0 \dot{I}_\beta; \quad \underline{S}_\beta = \dot{U}_\alpha \dot{I}_0 - \dot{U}_0 \dot{I}_\alpha, \quad (14)$$

дійсні складники яких характеризують амплітуду пульсацій відповідно величин q_α , q_β , і опосередковано – q_r , і можуть бути використані для компенсації струму нульової послідовності (симетрування навантажень за нульовою послідовністю).

Отже, несиметричність режиму мережі із заземленою нейтраллю доцільно характеризувати миттєвими пульсуючими потужностями N, N_q, N_r , а також комплексними умовними потужностями $\underline{S}_2, \underline{S}_{2q}, \underline{S}_\alpha, \underline{S}_\beta$.

Висновки

Проаналізовано можливості визначення потужностей несиметричних режимів в трифазних системах із заземленою нейтраллю з використанням ортогональних складників миттєвих потужностей. Показано, що несиметричність режиму мережі доцільно характеризувати з використанням пульсуючих потужностей N, N_q та N_r . Доведено, що більш повними характеристиками несиметричності режиму мережі є комплексні умовні потужності $\underline{S}_2, \underline{S}_{2q}, \underline{S}_\alpha, \underline{S}_\beta$, які несуть інформацію як про амплітуду пульсацій, так і про характер несиметрії. Отримано вирази для комплексних умовних потужностей $\underline{S}_2, \underline{S}_{2q}, \underline{S}_\alpha, \underline{S}_\beta$.

Література

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. Kim H. S. 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. Бурбело М. Й. Визначення потужностей трифазної несиметричної системи з ізолюваною нейтраллю [Текст] / М. Й. Бурбело, С. М. Мельничук // Технічна електродинаміка. – 2013. – № 6. – С. 66–70.
7. Маркушевич Н. С. Качество напряжения в городских электрических сетях [Текст] / Н. С. Маркушевич, Л. А. Солдаткина – М.: Энергия, 1975. – 128 с.
8. Бурбело М. Й. Аналіз умов симетрування навантажень з використанням компенсаційних симетрувальних установок [Текст] / М. Й. Бурбело, М. В. Кузьменко // Енергетика та електрифікація. – 2009. – № 5. – С. 3–6.

References

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. Kim H. S. 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. Melnykov N. A. Reaktivnaya moshchnost v elektrycheskykh setiakh [Текст] / N. A. Melnykov. – М.: Enerhiya, 1975. – 128 s.
6. Burbelo M. Y. Vyznachennia potuzhnosti tryfaznoi nesymetrychnoi systemy z izolovanoiui neutralliu [Текст] / M. Y. Burbelo, S. M. Melnychuk // Tekhnichna elektrodynamika. – 2013. – # 6. – S. 66–70.
7. Markushevych N. S. Kachestvo napriazheniya v horodskykh elektrycheskykh setiakh [Текст] / N. S. Markushevych, L. A. Soldatkyna – М.: Enerhiya, 1975. – 128 s.
8. Burbelo M. Y. Analiz umov symetruvannia navantazhen z vykorystanniam kompensatsiinykh symetruvalnykh ustanovok [Текст] / M. Y. Burbelo, M. V. Kuzmenko // Enerhetika ta elektryfikatsiia. – 2009. – # 5. – С. 3–6.

Рецензія/Peer review : 7.1.2015 р. Надрукована/Printed :24.1.2015 р.
Стаття рецензована редакційною колегією