

С. П. Денисюк¹
Д. С. Горенко¹
П. В. Соколовський¹

АНАЛІЗ НЕСИМЕТРИЧНИХ РЕЖИМІВ РОБОТИ В ТРИФАЗНИХ МЕРЕЖАХ З ВИКОРИСТАННЯМ ОБМІННОЇ ПОТУЖНОСТІ

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Проаналізовано несиметричні режими в трифазних автономних системах електроживлення. Проведено математичне моделювання роботи спрощеної однофазної системи електроживлення з несинхронними синусоїдальними генераторами. Виконано оцінку дії на трифазну автономну систему електроживлення джерела перешкод змінної частоти. Проаналізовано баланс потоків енергії для трифазної системи через відповідні перетини.

Ключові слова: Smart Grid, діючі струми, перетоки енергії, несиметричні режими роботи, реактивна потужність, обмінні процеси.

Вступ

Сучасний розвиток розосереджених електроенергетичних систем базується на основі положень концепції Smart Grid. Нині технології Smart Grid використовують для модернізації та інноваційного розвитку систем електроживлення як централізованих, так і децентралізованих [2], [3]. Необхідність вирішення питань, пов'язаних з несинусоїдальними несиметричними режимами, зумовлено збільшенням частки вищих гармонічних складових в токах нелінійних навантажень [4], [5]. Збільшення числа і рівня вищих гармонічних складових струмів і напруг, несиметрія навантаження призводить до зростання втрат в лініях електропередач, виникнення перешкод в електрообладнанні, погіршення електромагнітної обстановки та якості електроенергії [5]—[7].

Проблема підвищення енергоефективності в автономних системах з нетрадиційними та відновлювальними джерелами електроенергії (НВДЕ) пов'язана з оцінкою якості електроенергії та забезпеченням заданих рівнів електромагнітної сумісності (ЕМС) [7]—[9]. Для її оцінки використовується реактивна потужність та показники на її основі [3], [10]—[12]. Визначення реактивної потужності в несинусоїдальних несиметричних режимах роботи суперечать один одному [3], [11]—[14]. Критерії оцінки ефективності процесів, які отримані відомими класичними методами розрахунку не завжди відображають суть процесів [3], [10], [12]—[16].

В світі проводяться дослідження з оптимізації рівнів реактивної потужності в системах електропостачання з джерелами розосередженої генерації [8], [17]. У січні 2000 року IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers — Інститут інженерів з електротехніки та електроніки) оголосив про створення стандарту IEEE 1459-2000 для обчислення повної потужності трифазних електричних мереж з несиметричним нелінійним навантаженням, в умовах балансу і дисбалансу. В березні 2010 року опубліковано стандарт IEEE 1459-2010 з важливими змінами та поправками [18]. У стандарті IEEE 1459-2010 для реалізації алгоритму визначення складових потужності висунута вимога передачі максимальної потужності від джерела споживачеві, а саме — прямої послідовності основної гармоніки [19].

Проведений аналіз показав, що важливим є вирішення багатьох проблем, пов'язаних з обмінними процесами в автономних системах у несиметричних несинусоїдальних режимах роботи.

Метою дослідження є оцінка обмінних процесів з аналізом несиметричних режимів в трифазних автономних системах електроживлення. Для досягнення поставленої мети, необхідно виконати такі завдання:

– провести математичне моделювання роботи спрощеної однофазної системи електроживлення з несинхронними синусоїдальними генераторами;

- виконати баланс потоків енергії для трифазної системи через відповідні перетини;
- виконати оцінку дії на трифазну автономну систему електроживлення джерела перешкод змінної частоти.

Матеріал і результати дослідження

В дослідженнях виявлено невідповідність між загальною обмінною потужністю та сумарною обмінною потужністю кожної фази, що пояснюється електромагнітною взаємодією [21]. Для уточнення складових потоку миттєвої потужності трифазних автономних мереж електроживлення та для виявлення перетоків потужності розглянемо приклад однофазної моделі двох генераторів, що живлять одне навантаження (рис. 1). Навантаження моделі Z_H має активно-індуктивний характер.

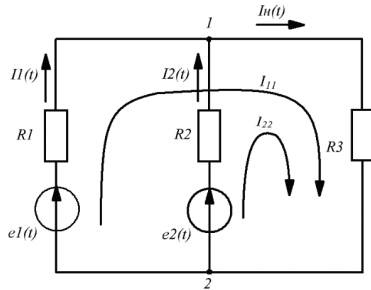


Рис. 1. Модель системи два генератори, одне навантаження

Для визначення перетоків потужності на параметри системи побудуємо графічні залежності діючих струмів в ланцюгах моделі від параметрів допоміжного генератора Г2 таких, як: амплітудне значення ЕРС E_2 (рис. 2), внутрішній опір R_2 (рис. 3), кут зсуву фаз φ_2 (рис. 4). Як видно з графіків сума квадратів діючих значень струмів генераторів не є адитивною (сума вхідних струмів вузла 1 не дорівнює сумі вихідних).

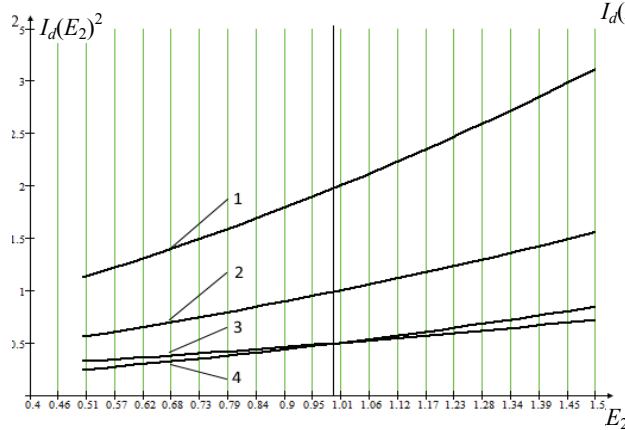


Рис. 2. Графіки залежностей діючих значень струмів від зміни амплітудного значення ЕРС E_2 : 1 — $I_{d3}(E_2)^2$; 2 — $\Delta(E_2)^2$; 3 — $I_{d1}(E_2)^2$; 4 — $I_{d2}(E_2)^2$

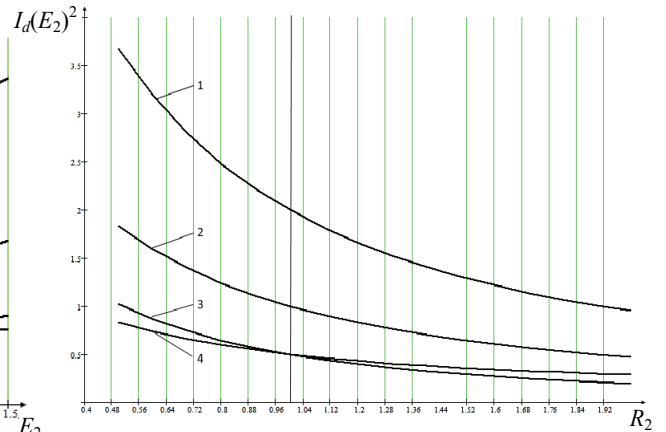


Рис. 3. Графіки залежностей діючих значень струмів від зміни амплітудного значення внутрішнього опору R_2 : 1 — $I_{d3}(R_2)^2$; 2 — $\Delta^2(R_2)$; 3 — $I_{d1}(R_2)^2$; 4 — $I_{d2}(R_2)^2$

Отже, визначимо аналітично та графічно, чому дорівнює ця нев'язка

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 + \dot{I}_2 &= \dot{I}_3; \\ I_{m1}e^{j\psi_1} + I_{m2}e^{j\psi_2} &= I_{m3}e^{j\psi_3}; \\ I_{m1} \sin(\omega t + \psi_1) + I_{m2} \sin(\omega t + \psi_2) &= I_{m3} \sin(\omega t + \psi_3). \end{aligned} \quad (4)$$

Провівши математичні спрощення, отримаємо квадратичну нев'язку діючих значень струмів:

$$I_{d1}^2 + I_{d2}^2 = I_{d3}^2 - \Delta_3^2, \quad (5)$$

де $I_{d1} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_1(t)^2 dt}$ — діюче значення струму в i -му ланцюзі моделі.

$$\Delta_I^2 = \frac{2}{T} \int_0^T i_1(t) \cdot i_2(t) dt. \quad (6)$$

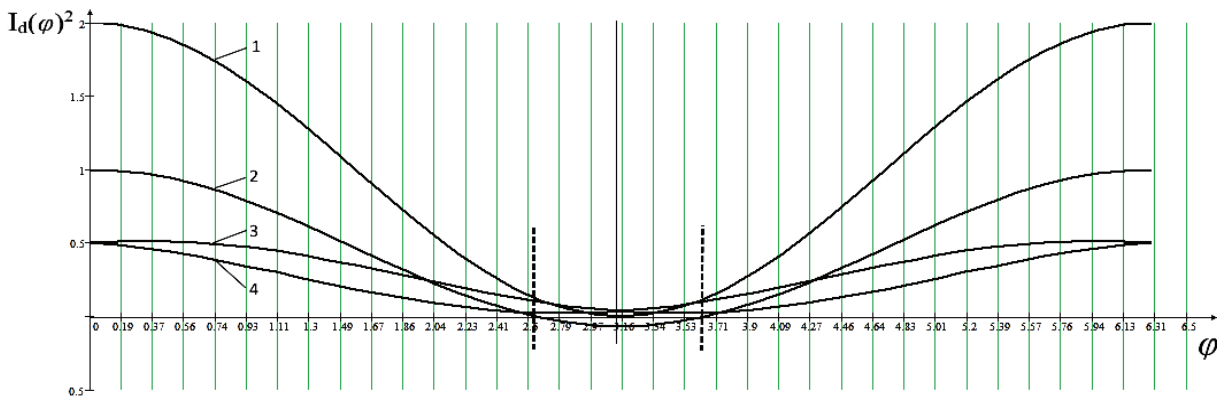


Рис. 4. Графіки залежностей діючих значень струмів від зміни кутах зсуву фаз між ЕРС генераторів Г1 і Г2:
1 — $I_{d3}(\varphi)^2$; 2 — $\Delta_I^2(\varphi)$; 3 — $I_{d2}(\varphi)^2$; 4 — $I_{d1}(\varphi)^2$

Якщо значення ЕРС E_2 генератора Г2 більше ЕРС E_1 генератора Г1, то діюче значення струму в гілці генератора Г2 більше ніж в гілці генератора Г1. Зі збільшенням значення E_2 збільшується квадратична нев'язка, зі зменшенням E_2 зменшується Δ_I^2 (див. рис. 2). Збільшення значення внутрішнього опору R_2 приводить до зменшення значення Δ_I^2 , та навпаки (рис. 3). З кутами зсуву фаз між ЕРС генераторів Г1 і Г2 (рис. 4), в діапазоні від 0 до 6,3 рад., на ділянці від 2,7 до 3,6 рад., Δ_I^2 між різними значеннями струму від'ємна. Тобто сума квадратів дійсних значень струмів генераторів Г1 і Г2 більша за квадрат значення струму навантаження. Це явище може бути пояснене втратами в елементах моделі та відповідає електричним законам. Зі зменшенням значення кута зсуву фаз φ як в більшому, так і меншому значеннях його інтервалу, Δ_I^2 зростає симетрично відносно π і набуває найбільшого значення за зсуву фаз, рівному 0. Така залежність є періодичною з періодичністю 2π . Квадратична нев'язка пояснюється взаємним впливом генераторів Г1 і Г2. Оскільки діюче значення струму в гілці визначається як інтегральний показник і є вже скомпенсованим взаємними перетоками потужності значенням. Тому сума діючих значень струмів в гілках буде значно меншою ніж діюче значення струму навантаження. Аналізуючи, виявлено, що як в простих, так і складних системах виникають проблеми трьох типів: незбігом за амплітудою, фазою та внутрішнім опором. В системі присутні перетоки енергії між елементами моделі. Внаслідок чого сума квадратів діючих значень струмів генераторів не є адитивною відносно діючого струму в навантаженні.

Квадратична нев'язка діючих значень струмів дозволяє виявити взаємний обмін між генераторами, але не дає можливості оцінити перетоки енергії навіть в такій простій моделі як два генератори, що живлять одне навантаження. Тому доцільним є використання інтегрального показника обмінної потужності як для однофазних систем, так і трифазних.

Для трифазної моделі (рис. 5), проведемо аналіз з точки зору обмінних процесів. Для визначення загальної обмінної потужності системи необхідно визначити суму обмінних потужностей в окремих перетинах фаз

$$\Sigma Q_{\text{ОБ}} = Q_{\text{ОБ},A} + Q_{\text{ОБ},B} + Q_{\text{ОБ},C}, \quad (7)$$

де $Q_{\text{Об}i} = \frac{1}{2T} \int_0^T u_i(t) \cdot i_{pi}(t) dt$ — обмінні потужності i -ї фази ($i = [1, \dots, 3]$); $u_i(t)$ — фазна напруга i -ї фази;

$i_{pi}(t) = i_i(t) - i_{ai}(t)$ — реактивна складова струму i -ї фази; $i_{ai}(t) = u_i(t) \cdot P_i / U_{di}^2$ — активна

складова струму i -ї фази; $U_{di} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_i(t)^2 dt}$ — діюче значення напруги в i -й фазі;

$P_i = \frac{1}{T} \int_0^T u_i(t) \cdot i_i(t) dt$ — активна потужність i -ї фази.

Також визначається загальна обмінна потужність через перетин кола

$$Q_{\text{Об}\Sigma} = \frac{1}{2T} \int_0^{t^+} e_{\text{екв}}(t) \cdot i_p(t) dt. \quad (8)$$

Для симетричного та несиметричного режиму роботи в результаті проведених розрахунків виявилася тенденція

$$Q_{\text{Об}\Sigma} \leq \Sigma Q_{\text{Об}}. \quad (9)$$

Для наочнішого представлення нерівності проведено аналітичний розрахунок зміни відхилення $\Delta Q_{\text{Об}}$ (9) від навантаження у відносних одиницях

$$\Delta Q_{\text{Об}} = (\Sigma Q_{\text{Об}} - Q_{\text{Об}\Sigma}) / \Sigma Q_{\text{Об}}. \quad (10)$$

З вищесказаного випливає, що аналіз обмінних процесів в трифазній системі через загальний перетин (рис. 5а) є не ефективним. Це пояснюється взаємною компенсацією перетоків енергії в трифазному генераторі. Проте істинні фізичні процеси залишаються недослідженими. Тому взаємний зв'язок між окремими фазами трифазного джерела живлення необхідно розглядати через відповідні перетини $A-A$, $B-B$, $C-C$ та $D-D$ (рис. 5б).

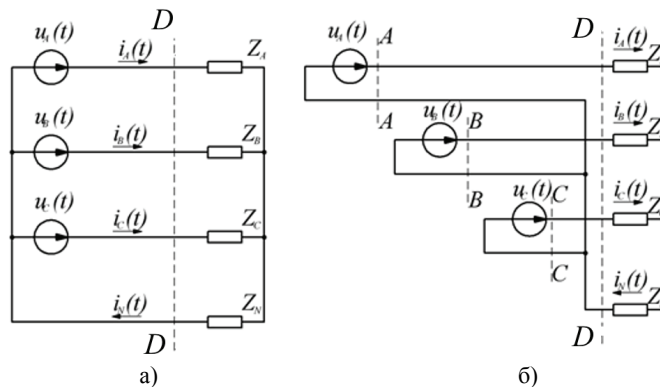


Рис. 5. Аналіз обмінних процесів в трифазній системі: а — трифазна система через загальний перетин фаз; б — перетини фаз $A-A$, $B-B$, $C-C$ та $D-D$

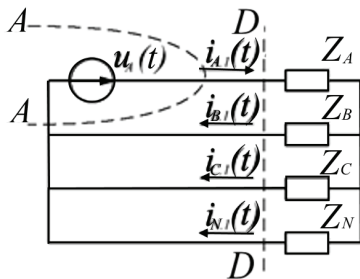


Рис. 6. Накладання контурів окремих фаз

На рис. 6 за допомогою методу накладання виконано виокремлення взаємозалежних контурів, для прикладу, фази A та навантаження. За законом Ома визначають струми, які створюються окремою фазою генератора в системі.

За початковими даними (законом зміни напруги в кожній фазі) та розрахованими значеннями струмів визначається миттєва потужність відповідних перетинів та будуються графічні залежності (рис. 7):

$$p_A(t) = u_A(t) \cdot i_A(t); \quad p_B(t) = u_B(t) \cdot i_B(t); \quad p_C(t) = u_C(t) \cdot i_C(t);$$

$$p_N(t) = u_N(t) \cdot i_N(t).$$

Як впливає з рис. 7, потужність, що споживається навантаженням, додатна. Але під час генерації миттєва потужність окремої фази має як додатні так і від'ємні проміжки. Наприклад, фаза A генерує потужність лише на інтервалі t_3-t_7 , тоді як на інтервалі t_1-t_3 акумулює енергію. В таблиці наведено баланс потоків енергії через перетини кола за відповідні проміжки часу. Оскільки функції струму та напруги, а відповідно, і миттєвої потужності, є періодичними (рис. 8), то баланс складається за півперіод ($\Delta t = T/2$).

Для опису та графічного представлення особливостей енергетичних процесів використовують поняття енергетичного незмінного стану (ЕНС) — стану, що характеризується інтервалом роботи кола ($t_{i-1} - t_i$), для якого незмінними є номер інтервалу сталості структури та напрямок потоків миттєвих значень енергії через контрольований перетин.

$$\text{Загальна обмінна енергія } W_{\text{Об}} = W_{\text{Обн.1}} + W_{\text{Обн.2}} + W_{\text{Обн.3}} + W_{\text{Обн.4}} + W_{\text{Обн.5}} + W_{\text{Обн.6}}.$$

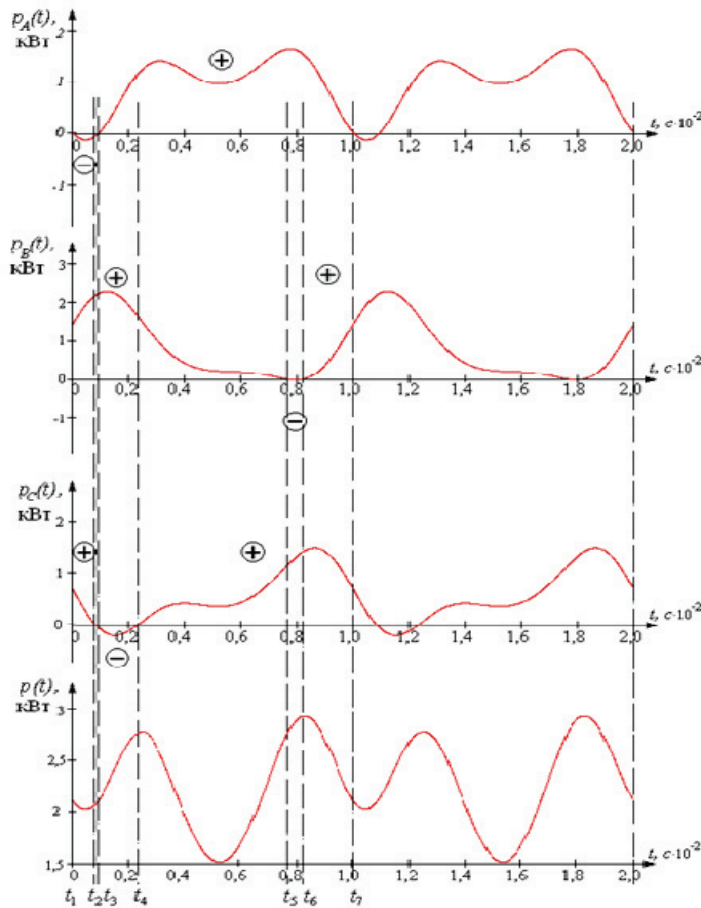
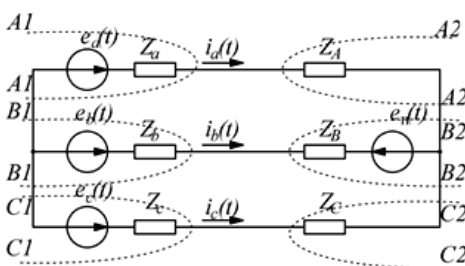


Рис. 7. Накладання графіків миттєвої потужності

Баланс потоків енергії для трифазної системи через відповідні перетини

№ ЕНС	Інтервал часу	Режим роботи				Рівняння балансу на <i>i</i> -му ЕНС
		A	B	C	H	
1	t_1-t_2	С	Г	Г	С	$W_{B,1}^+ + W_{C,1}^+ = \int_{t_1}^{t_2} p_H(t)dt + W_{OБH,1}^- - W_{A,1}^-$
2	t_2-t_3	С	Г	С	С	$W_{B,2}^+ = \int_{t_2}^{t_3} p_H(t)dt + W_{OБH,2}^- - W_{A,2}^- - W_{C,2}^-$
3	t_3-t_4	Г	Г	С	С	$W_{A,3}^+ + W_{B,3}^+ = \int_{t_3}^{t_4} p_H(t)dt + W_{OБH,3}^- - W_{C,3}^-$
4	t_4-t_5	Г	Г	Г	С	$W_{A,4}^+ + W_{B,4}^+ + W_{C,4}^+ = \int_{t_4}^{t_5} p_H(t)dt + W_{OБH,4}^-$
5	t_5-t_6	Г	С	Г	С	$W_{A,5}^+ + W_{C,5}^+ = \int_{t_5}^{t_6} p_H(t)dt + W_{OБH,5}^- - W_{B,5}^-$
6	t_6-t_7	Г	Г	Г	С	$W_{A,6}^+ + W_{B,6}^+ + W_{C,6}^+ = \int_{t_6}^{t_7} p_H(t)dt + W_{OБH,6}^-$



Такий підхід актуально використовувати і для аналізу обмінних процесів в трифазних системах з джерелом завад (рис. 8). Для прикладу розглядається джерело, що генерує деякий періодичний сигнал різної частоти

$$u_n(t) = U_m \sin(k\omega t + \phi). \tag{11}$$

Моделювання проводилось для несиметричного генератора. Розглянуто амплітудну та фазну несиметрію.

Рис. 8. Трифазна система з джерелом завад
З графіків випливає, що значна частина енергії повертається до генератора, це в свою чергу призводить до значних втрат потужності. Очевидно, що вплив стороннього джерела є суттєвим і залежить як від амплітуди сигналу так і від його частоти.

Проте несуттєві коливання цих параметрів призводить до коливань екстремумів (рис. 9).

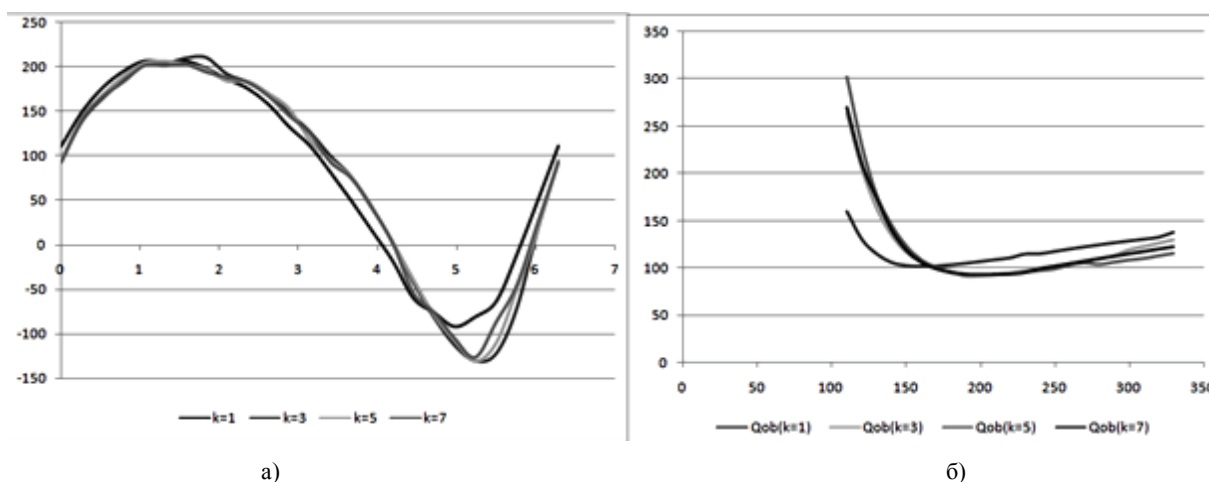


Рис. 9. Залежності обмінної потужності від частоти: а — за фазної несиметрії; б — за амплітудної несиметрії

Отримані результати дають можливість оцінити взаємний вплив різнотипних генераторів та їх вплив на навантаження як на лінійне та нелінійне, проаналізувати вплив зовнішніх завад різного характеру, форми та тривалості на генератори електроенергії, охарактеризувати вплив різних гармонічних складових частоти сигналів та різних завад на обмінні, продіагностувати процеси рекуперації електроенергії в мережу, задля покращення якісних характеристик електроенергії на всіх етапах її протікання.

Висновки

1. Математичне моделювання роботи спрощеної однофазної системи електроживлення з несинхронними синусоїдальними генераторами показало, що квадратична нев'язка діючих значень струмів дозволяє виявити взаємний обмін між генераторами, але не дає можливості оцінити перетоки енергії навіть в такій простій моделі як два генератори, що живлять одне навантаження. Тому доцільним є використання інтегрального показника обмінної потужності як для однофазних систем, так і трифазних.

2. Аналіз обмінних процесів через загальний перетин «генератор—навантаження», після повного еквівалентування схеми, не дозволяє повноцінно оцінити перетоки енергії в трифазній системі в цілому та в генераторі зокрема. Такий підхід враховує лише енергію, що генерує трифазний генератор та споживає трифазне навантаження. Аналіз поданої моделі показує необхідність деталізувати обмінні процеси по кожному генератору і навантаженню та між фазами.

3. Наведений баланс потоків енергії за інтервалами енергетичних незмінних станів дозволяє використовувати цей підхід не лише для конкретного прикладу, а й для будь-якої трифазної системи. Також викладена методика дозволить проводити оцінку енергетичних процесів групи трифазних генераторів, що можуть працювати в різних несумісних режимах.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] С. Ф. Артюх, К. В. Махотило, и К. В. Сапельников, «Предпосылки к созданию энергогенерирующих узлов гибридного типа на базе возобновляемых источников энергии,» *Наукові праці ДонНТУ*, № 1(17), с. 13-17, 2015.
- [2] Smart Grids Strategic Research Agenda (SRA) for RD&D1 needs towards 2035 “SmartGrids SRA 2035”. [Online]. Available: www.oxfordjournals.org.
- [3] E. Brown, and S. Busche, «State of the States 2008: Renewable Energy Development and the Role of Policy,» *Technical Report NREL/TP*, с. 16-35, 2008.
- [4] В. Я. Жуйков, та С. П. Денисюк, *Енергетичні процеси в електричних колах з ключовими елементами*, Київ, Україна: НТУУ «КПІ», 2010, 264 с.
- [5] И. В. Жежеленко и др., *Электромагнитная совместимость потребителей*. М., Россия: Машиностроение, 2012, 351 с.
- [6] О. В. Кириленко, С. П. Денисюк, та О. Б. Рибіна, «Особенности обеспечения электромагнитной совместимости в электрических сетях Украины,» *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць*, Київ, ІЕД НАНУ, № 1(16), с. 27-30, 2007.
- [7] B. Journals, «EMC and Smart Grid applications,» *IEEE Electromagnetic Compatibility Magazine*, 2010.
- [8] P. M. D. Oliveira, P. M. Jesus., E. D. Castronuovo, and M. T. Leao, «Reactive Power Response of Wind Generators Under an Incremental Network — Loss Allocation Approach,» *IEEE Transactions on Energy Conversion*, no. 2 (23), p. 612-621, 2008.

- [9] S. P. Verma, and P. Kumar, «Smart Grid, Its Power Quality and Electromagnetic Compatibility,» *Islam, MIT International Journal of Electrical and Instrumentation Engineering*, no. 1, p. 55-64, 2012.
- [10] H. Akagi, E. H. Watanabe, and M. Aredes, *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*, New York: Wiley, 2007. 380 p.
- [11] S. Leszek, and K. Czarnecki, «Instantaneous Reactive Power p-q Theory and Power Properties of Three,» *IEEE Transactions on Power Delivery*, no. 21, p. 362-367, 2006.
- [12] М. В. Загирняк, и Д. И. Родькин, «Анализ процессов преобразования энергии в электромеханических системах,» *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*, № 3(19), с. 30-36, 2012.
- [13] М. В. Загирняк, Д. И. Родькин, А. П. Черный, и Т. В. Коренькова, «Направления развития теории мгновенной мощности и ее применение в задачах электромеханики,» *Міжнар. наук.-техн. конф. «Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика»*, 2011, с. 347-354.
- [14] С. П. Денисюк, «Аналіз взаємного впливу елементів системи електроживлення з перетворювачами,» *Пр. Ін-ту електродинаміки НАН України: Зб. наук. праць*, № 2(17), с. 13-17, 2007.
- [15] Н. А. Костин, и А. В. Петров, «Методы определения составляющих погной мощности в системах электрической тяги,» *Технічна електродинаміка. Тем. вип. «ПІСЕ-2011»*, № 3, с. 53-59, 2011.
- [16] Г. Г. Жемеров, Д. С. Крылов, и Д. В. Тугай, «Система составляющих полной мощности и энергетических коэффициентов на основе р-г теории мощности,» *Техн. електродинаміка. Тем. випуск «Проблеми сучасної електротехніки»*, № 1, с. 69-74, 2004.
- [17] L. Xu, and Ph. Cartwright, «Direct Active and Reactive Power Control of DFIG for Wind Energy Generation,» *IEEE Trans. Energy Conversion*, no. 3(21), с. 750-758, September. 2006.
- [18] IEEE Standard, «Definition for the measurement of Electric Power Quantities under sinusoidal, nonsinusoidal, balanced or unbalanced conditions,» (*IEEE std. 1459TM – 2010*), *IEEE Power and Energy Society*, New York, 2010.
- [19] J. L. Willems, J. A. Ghijselen, and A. E. Emanuel, «The Apparent Power Concept and the IEEE standard 1459,» *IEEE Trans. on Power Delivery*, no. 2(20), April 2005.
- [20] Г. Г. Жемеров, и О. В. Ильина, «Теория мощности Фризе и современные теории мощности,» *Електротехніка і Електромеханіка*, № 6, с. 63-65, 2007.
- [21] С. П. Денисюк, та Д. С. Горенко, «Обмінні процеси в трифазних автономних системах електроживлення,» *Праці Інституту електродинаміки НАН України*, № 45, с. 9-15, 2016.
- [22] Л. А. Бессонов, *Теоретические основы электротехники: Электрические цепи*. Москва, Россия: Высш. школа, 1978, 528 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 12.01.2018

Денисюк Сергій Петрович — д-р техн. наук, професор, директор Інституту енергозбереження та енергоменеджменту, e-mail: spdens@ukr.net ;

Горенко Дар'я Сергійівна — аспірантка кафедри електропостачання. e-mail: gorenko.darya@gmail.com ;

Соколовський Павло Валерійович — аспірант кафедри електропостачання. e-mail: ps_8@ukr.net

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», Київ

S. P. Denysiuk¹
D. S. Gorenko¹
P. V. Sokolovskiy¹

Analysis of Asymmetric Operating Modes in Three-Phase Network with the Use of Exchange Power

¹National Technical University of Ukraine “Ihor Sikorskyi Kyiv Polytechnic Institute”

The work analyzes the operation modes of renewable energy sources as part of autonomous power supply systems. The possible variants of distortion in the system and the influence of these distortions on three-phase power generators are presented. The problems of electromagnetic compatibility of renewable sources, in particular, wind generators, and autonomous systems (Smart Grid) are considered. A simplified model of a three-phase low-power generator and its exposure with a single-phase model is presented.

The analysis of asymmetric modes in three-phase autonomous power supply systems is carried out. A mathematical simulation of the operation of a simplified single-phase power supply system with nonsynchronous sinusoidal generators has shown that the quadratic residual of the current values of currents makes it possible to detect the mutual exchange between the generators, but does not provide an opportunity to estimate energy flows even in such a simple model of two generators feeding a single load. The expediency of using the integral indicator of exchange capacity for both single-phase systems and three-phase systems is proved. The effect on the three-phase autonomous power supply system of the source of interference of a variable frequency has been assessed.

Exchange processes are analyzed through the common section "Generator - Load", after complete equivalence of the circuit. It is indicated that such an approach does not allow to fully appreciate the energy flows in the three-phase system as a whole and in the generator in particular, but takes into account only the energy generating a three-phase generator and consumes three-phase loads. The analysis of the model is presented and the necessity to detail the exchange processes for each generator and load and between phases is argued.

The balance of energy flows along the intervals of energy invariant states is given, which makes it possible to use this approach not only for a specific model but for any three-phase system. Also presented is a technique that will allow evaluating the energy processes of a group of three-phase generators that can operate in various incompatible modes.

Keywords: Smart Grid, operating currents, cross flows of energy, asymmetrical conditions, reactive-power, exchange processes.

Denysiuk Sergii P. — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Director of the Institute of Energy Saving and Energy Management. e-mail: spdens@ukr.net ;

Gorenko Dariia S. — Post-Graduate Student of the Chair of Power Supply, e-mail: gorenko.darya@gmail.com ;

Sokolovskyi Pavlo V. — Post-Graduate Student of the Chair of Power Supply, e-mail: ps_8@ukr.net

С. П. Денисюк¹
Д. С. Горенко¹
П. В. Соколовский¹

Анализ несимметричных режимов работы в трехфазной сети с использованием обменной мощности

¹Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»;

Проанализированы несимметричные режимы в трехфазных автономных системах электропитания. Проведено математическое моделирование работы упрощенной однофазной системы электропитания с несинхронно синусоидальными генераторами. Выполнена оценка воздействия на трехфазную автономную систему электропитания источника помех переменной частоты. Проанализированы баланс потоков энергии для трехфазной системы через соответствующие сечения.

Ключевые слова: Smart Grid, действующие токи, перетоки энергии, несимметричные режимы работы, реактивная мощность, обменные процессы.

Денисюк Сергей Петрович — д-р техн. наук, профессор, директор Института энергосбережения и энергоменеджмента, e-mail: spdens@ukr.net ;

Горенко Дарья Сергеевна — аспирант кафедры электроснабжения, e-mail: gorenko.darya@gmail.com ;

Соколовский Павел Валерьевич — аспирант кафедры электроснабжения, e-mail: ps_8@ukr.net