

using the discrete Fourier transform. It has been suggested and recommended to use the spectral analysis of current channel to solve a number of problems of electric power engineering. References 6, figures 3.

Key words: current transformer, saturation, spectral analysis, Fourier transform.

1. Tankevich E. M. Primary measuring channels of electric power systems objects complex automation: diss. doct. tech. sciences: 05.14.02 / Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv. 2004. 445 p. (Ukr)
2. Podgorny E.V. Technical application and development of the theory of electromagnetic processes for the construction of high-speed relay protection: dis. ... doct. tech. Sciences: 05.14.02 / Novochoerkassk. 1989. 454 p. (Rus)
3. Phadke A. G., Thorp J. S. Computer relaying for power systems. Second edition. N-Y.: Willey. 2009. 326 p. (Eng)
4. Stognii B.S., Sopel M.F., Pankiv V.I., Tankevych E.M. Current transformer mathematical model based on the Jiles-Atherton theory of ferromagnetic hysteresis. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2016. No 3. P. 58–65. (Ukr)
5. Elhaffar A., Elkalashy N. I., Lehtonen M. Experimental investigations on multi-end fault location system based on current traveling waves. 2007 IEEE *Lausanne power tech conference*. Lausanne, Switzerland, 1-5 July 2007. P. 1141–1146. (Eng)
6. Pradhan A. K., Routray A., Mohanty S. R. A mowing sum approach for fault detection of power systems. *Electric Power Components and Systems*. 2006. Vol. 34. P. 385–399. (Eng)

Надійшла 01.08.2018

Received 01.08.2018

УДК 621.31

ОЦІНКА ОБМІННОЇ ПОТУЖНОСТІ В ТРИФАЗНИХ ЛОКАЛЬНИХ СИСТЕМАХ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ З ВРАХУВАННЯМ НОРМОВАНИХ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

С.П. Денисюк, докт. техн. наук, **Д.С. Горенко**, асп.

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського»,
Інститут енергозбереження та енергоменеджменту,
вул. Борщагівська, 115, Київ, 03056, Україна
e-mail: spdens@ukr.net, gorenko.darya@gmail.com

Проведено аналіз взаємного впливу елементів у перетині трифазної три- та чотирипровідної локальної системи електропостачання (ЛСЕ). Проаналізовано діючі нормативні документи, що регламентують електромагнітну сумісність електротехнічних засобів та систем як в Україні, так і за кордоном. Запропоновано використовувати частку взаємного впливу елементів фаз для оцінки обмінних процесів у перетині трифазної ЛСЕ. Представлено послідовність визначення частки взаємного впливу в перетині трифазної ЛСЕ три- та чотирипровідного виконання. Побудовано графічні залежності зміни частки взаємного впливу та коефіцієнтів несиметрії у разі різного рівня несиметрії для три- та чотирипровідних трифазних ЛСЕ. Наведено аналітичні вирази зв'язку коефіцієнтів несиметрії за зворотною та нульовою послідовностями від частки взаємного впливу в перетині трифазної ЛСЕ. Аргументовано можливість нормування частки взаємного впливу як додаткового показника обмінних процесів у трифазних ЛСЕ. Бібл. 17, рис. 3, таблиця.

Ключові слова: трифазні системи електроживлення, показники якості електроенергії, електромагнітна сумісність, обмінна потужність.

Вступ. Впровадження технологій Smart Grid передбачає модернізацію мереж електропостачання, використання інформаційних та комунікаційних мереж і технологій для збору інформації про генерацію та споживання, що дасть змогу автоматично підвищити ефективність, надійність, економічність, а також стійкість виробництва та розподілу електроенергії [1]. У локальних системах електропостачання (ЛСЕ) за рахунок широкого використання пристроїв силової електроніки для узгодження великої кількості різнотипних джерел розосередженої генерації виникає проблема електромагнітної сумісності (ЕМС) [2, 3-5]. Показниками, що характеризують рівні ЕМС, є показники якості електроенергії (ПЯЕ). Частина ПЯЕ характеризує впливи в усталеному режимі роботи обладнання. До них належать відхилення напруги та частоти, спотворення синусоїдальності форми кривої напруги, несиметрія і коли-

вання напруги, для яких нормуються усталені допустимі значення ПЯЕ [2, 6]. Інша частина ПЯЕ характеризує короточасні електромагнітні завади, що виникають у результаті комутаційних процесів, грозових і атмосферних явищ і післяаварійних режимів (провали та імпульси напруги, короточасні перерви електропостачання) [7-11]. До ПЯЕ несиметричних режимів належать коефіцієнти несиметрії за зворотною $k_{U2\%}$ та нульовою $k_{U0\%}$ послідовностями, які визначаються за формулами [2, 6]

$$k_{U2\%} = \frac{U_2}{U_H} \cdot 100\%; \quad k_{U0\%} = \frac{U_0}{U_H} \cdot 100\%, \quad (1)$$

де U_2 , U_0 – діючі значення напруги відповідно зворотної та нульової послідовностей; U_H – діюче значення номінальної лінійної напруги.

Коефіцієнт несиметрії за нульовою послідовністю $k_{U0\%}$ відповідно до ГОСТ 13109-97 та ДСТУ EN 50160:2014 має бути не більше 2 % протягом 95 % часу вимірювання та 4 % протягом 100 % часу вимірювання від напруги прямої послідовності U_1 [1, 2, 15]. Тоді як коефіцієнт несиметрії за зворотною $k_{U2\%}$ послідовністю має складати 2 % протягом 95 % часу вимірювання та протягом 100 % часу вимірювання відповідно до [2] 4 %, а відповідно до [6] 3 % від напруги прямої послідовності U_1 .

У роботах [12-14] було проведено ряд досліджень трифазних ЛСЕ та запропоновано визначати обмінну потужність за виразом

$$\sum Q_{\text{Об}} = \sum_{i=1}^n Q_{\text{Об},i}, \quad (2)$$

де $Q_{\text{Об},i} = \frac{1}{T} \int_0^{t^+} u_i(t) \cdot i_{pi}(t) dt$ – обмінна потужність, що передається через перетин ЛСЕ в i -й фазі; t^+ – частина періоду T , протягом якого потужність передається через виділений перетин від генератора до навантаження $p_i(t) = u_i(t)i_i(t) > 0$; $u_i(t)$ – миттєве значення напруги у виділеному перетині ЛСЕ для однофазного еквівалента; $i_{pi}(t) = i_i(t) - i_{ai}(t)$ – реактивна складова струму, що протікає в i -й фазі; $i_{ai}(t) = \frac{u_i(t) \cdot P_i}{U_i^2}$ – активна складова струму, що протікає в i -й фазі; U_i^2 – діюче значення фазної напруги i -ї фази; P_i – активна потужність, що передається через i -й перетин за період T .

Обмінна потужність у різних перетинах системи буде відрізнятися, і визначити її оптимальне значення для конкретного перетину інколи є неможливим. Тому в [15, 16] було запропоновано ввести поняття частки взаємного впливу, яка визначається за формулою

$$\Delta_i = \frac{Q_{\text{Об},i}}{\sum Q_{\text{Об}}} \cdot 100\%. \quad (3)$$

Для симетричного режиму трифазної системи має місце співвідношення (4) частки взаємного впливу в перетинах фаз [16]:

$$\Delta_H = \Delta_A = \Delta_B = \Delta_C = 33,3(3)\%, \quad (4)$$

де Δ_H – нормальне значення частки взаємного впливу.

Враховуючи зазначене вище актуальним є визначення зв'язку між існуючими ПЯЕ (в цій роботі показниками несиметрії за зворотною та нульовою послідовностями) та часткою взаємного впливу в перетині трифазної ЛСЕ.

Мета та завдання. Метою цієї роботи є оцінка обмінної потужності в трифазних локальних системах електропостачання з урахуванням нормованих показників якості електроенергії. Для досягнення поставленої мети було сформульовано такі задачі:

- проаналізувати обмінні процеси в трифазних три- та чотирипровідних ЛСЕ у разі симетричного та несиметричного режиму навантаження;
- визначити зв'язок між обмінною потужністю та коефіцієнтами несиметрії в трифазних ЛСЕ.

Аналіз обмінних процесів у трифазних ЛСЕ у разі несиметричного режиму навантаження. Під час аналізу енергетичних процесів через перетин трифазної ЛСЕ (рис. 1) неможливо повноцінно оцінити енергообмін між трифазним генератором та трифазним навантаженням, оскільки необхідно враховувати взаємний вплив фаз у перетині ЛСЕ.

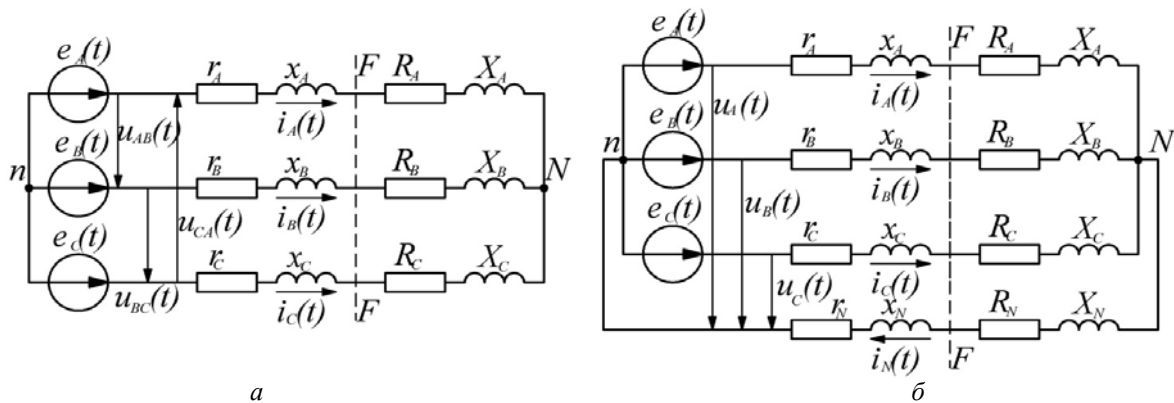


Рис. 1

Для подальшого викладення було використано та розширено формули (1) – (3). Особливості визначення частки взаємного впливу фаз у перетині $F-F$ трифазної ЛСЕ для три- (рис. 1 а) та чотирипровідного (рис. 1 б) виконання наведено в таблиці.

У таблиці прийнято такі позначення: \dot{U}_{nN} – симетруюча напруга; $\underline{Z}_A = r_A + jx_A + R_A + jX_A$; $\underline{Z}_B = r_B + jx_B + R_B + jX_B$; $\underline{Z}_C = r_C + jx_C + R_C + jX_C$; $\underline{Z}_N = r_N + jx_N + R_N + jX_N$ – повні опори відповідно фаз A, B, C та нульового проводу N ; $\underline{g}_A = 1/\underline{Z}_A$; $\underline{g}_B = 1/\underline{Z}_B$; $\underline{g}_C = 1/\underline{Z}_C$ – провідності відповідних фаз A, B, C ; $i_{pA}(t) = i_A(t) - u_A(t) \cdot P_A / U_A$; $i_{pB}(t) = i_B(t) - u_B(t) \cdot P_B / U_B$; $i_{pC}(t) = i_C(t) - u_C(t) \cdot P_C / U_C$ – реактивні складові струмів у перетині $F-F$ трифазної ЛСЕ.

На основі отриманих виразів у таблиці побудуємо залежності частки взаємного впливу в перетині трифазної ЛСЕ три- (рис. 2) та чотирипровідного (рис. 3) виконання. Несиметрія створюється шляхом зміни опору навантаження фази A (R_A) в межах $0 \dots 2$ в.о. Значення опору $R_A = 1$ в.о. відповідає симетричному режиму, тобто $\Delta_A = \Delta_B = \Delta_C$, що підтверджують побудовані графіки залежності частки взаємного впливу фаз від навантаження (рис. 2, 3).

На рис. 2 та 3 побудуємо зміну коефіцієнтів несиметрії від навантаження R_A , що дасть змогу порівняти нормовані ПЯЕ у разі несиметрії ($k_{U2\%}$, $k_{U0\%}$) та частку взаємного впливу елементів фаз. Щоб визначити коефіцієнти несиметрії за зворотною $k_{U2\%}$ та нульовою $k_{U0\%}$ послідовностями, використаємо співвідношення (1). Напруга відповідно прямої U_1 , зворотної U_2 та нульової U_0 послідовностей визначається методом симетричних складових відповідно до системи рівнянь [17]:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a\dot{U}_B + a^2\dot{U}_C) \\ \dot{U}_2 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + a^2\dot{U}_B + a\dot{U}_C) \\ \dot{U}_0 = \frac{1}{3}(\dot{U}_A + \dot{U}_B + \dot{U}_C), \end{cases} \quad (5)$$

де $a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$; $a^2 = e^{-j\frac{2\pi}{3}}$.

Як видно з рис. 2 та 3, коефіцієнти несиметрії досягають 13 % у разі зростання опору навантаження в діапазоні $0 \dots 2$ в.о. Основні діючі документи, що нормують ПЯЕ та електромагнітну сумісність

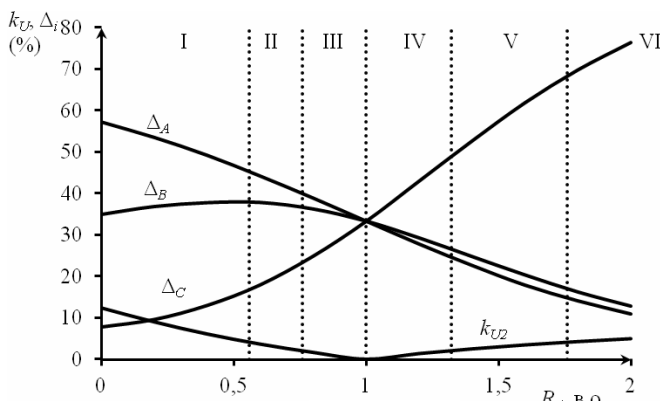


Рис. 2

технічних засобів [2, 6], розрізняють нормально (НДМ) та гранично допустимі межі (ГДМ) значень ПЯЕ. НДМ та ГДМ значень коефіцієнтів несиметрії для електричних мереж напругою до 1 кВ відповідно дорівнюють $\pm 2,0$ та $\pm 4,0$ %.

№ з.п.	Тип трифазної ЛСЕ	
	Трипровідна ЛСЕ (рис. 1 а)	Чотирипровідна ЛСЕ (рис. 1 б)
1	Розрахунок струмів у фазах ЛСЕ	
	$\dot{I}_A = \frac{\dot{E}_A - \dot{U}_{nN}}{Z_A}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{E}_B - \dot{U}_{nN}}{Z_B}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{E}_C - \dot{U}_{nN}}{Z_C},$	
2	Визначення фазної напруги відповідних фаз у перетині F-F трифазної ЛСЕ	
	$\dot{U}_{A.F} = \frac{\dot{U}_{AB} \cdot \underline{g}_B - \dot{U}_{CA} \cdot \underline{g}_C}{\underline{g}_A + \underline{g}_B + \underline{g}_C} - \dot{I}_A(r_A + jx_A)$ $\dot{U}_{B.F} = \frac{\dot{U}_{BC} \cdot \underline{g}_C - \dot{U}_{AB} \cdot \underline{g}_A}{\underline{g}_A + \underline{g}_B + \underline{g}_C} - \dot{I}_B(r_B + jx_B),$ $\dot{U}_{C.F} = \frac{\dot{U}_{CA} \cdot \underline{g}_A - \dot{U}_{BC} \cdot \underline{g}_B}{\underline{g}_A + \underline{g}_B + \underline{g}_C} - \dot{I}_C(r_C + jx_C)$	$\dot{U}_{nN} = \frac{\frac{\dot{E}_A}{Z_A} + \frac{\dot{E}_B}{Z_B} + \frac{\dot{E}_C}{Z_C}}{\frac{1}{Z_A} + \frac{1}{Z_B} + \frac{1}{Z_C}},$ $\dot{U}_{A.F} = \dot{U}_A - \dot{I}_A(r_A + jx_A) + \dot{I}_N(r_N + jx_N)$ $\dot{U}_{B.F} = \dot{U}_B - \dot{I}_B(r_B + jx_B) + \dot{I}_N(r_N + jx_N)$ $\dot{U}_{C.F} = \dot{U}_C - \dot{I}_C(r_C + jx_C) + \dot{I}_N(r_N + jx_N)$
3	Запис миттєвих значень напруг та струмів у перетині F-F трифазної ЛСЕ	
	$\begin{cases} i_A(t) = \dot{I}_A \cdot \sin(\omega t + \arg(\dot{I}_A)) \\ i_B(t) = \dot{I}_B \cdot \sin(\omega t + \arg(\dot{I}_B)); \\ i_C(t) = \dot{I}_C \cdot \sin(\omega t + \arg(\dot{I}_C)) \end{cases} \quad \begin{cases} u_A(t) = \dot{U}_A \cdot \sin(\omega t + \arg(\dot{U}_A)) \\ u_B(t) = \dot{U}_B \cdot \sin(\omega t + \arg(\dot{U}_B)) \\ u_C(t) = \dot{U}_C \cdot \sin(\omega t + \arg(\dot{U}_C)) \end{cases}$	
4	Визначення обмінних потужностей через перетини фаз трифазної ЛСЕ	
	$\begin{cases} Q_{об.А} = \frac{1}{T} \int_0^{t_A^+} u_A(t) \cdot i_{pA}(t) dt \\ Q_{об.В} = \frac{1}{T} \int_0^{t_B^+} u_B(t) \cdot i_{pB}(t) dt, \\ Q_{об.С} = \frac{1}{T} \int_0^{t_C^+} u_C(t) \cdot i_{pC}(t) dt \end{cases}$	
5	Визначення обмінної потужності через перетин ЛСЕ	
	$\Sigma Q_{об} = Q_{об.А} + Q_{об.В} + Q_{об.С}$	
6	Визначення частки взаємного впливу	
	$\Delta_A = \frac{Q_{об.А}}{\Sigma Q_{об}} \cdot 100\%; \quad \Delta_B = \frac{Q_{об.В}}{\Sigma Q_{об}} \cdot 100\%; \quad \Delta_C = \frac{Q_{об.С}}{\Sigma Q_{об}} \cdot 100\%$	

Відповідно до допустимих меж коефіцієнтів несиметрії визначимо та позначимо на рис. 2 і 3 шість зон, де I, VI – коефіцієнти несиметрії, що перевищують ГДМ (тобто $k_{U2(0)} > 4\%$); II, V – коефіцієнти несиметрії, що перевищують НДМ, але не перевищують ГДМ (тобто $4\% > k_{U2(0)} > 2\%$); I, IV – коефіцієнти несиметрії, що знаходяться в НДМ (тобто $k_{U2(0)} < 2\%$).

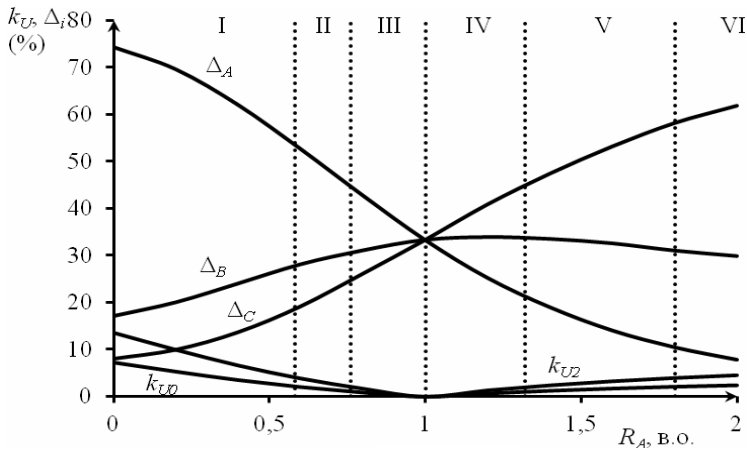


Рис. 3

Відповідно до твердження (4) та рис. 2 і 3 можна визначити допустимі відхилення частки взаємного впливу:

$$\lambda_i = \Delta_i - \Delta_H, \quad (6)$$

де λ_i – відхилення частки взаємного впливу Δ_i від нормального значення Δ_H .

Проте якщо розглядати трипровідну систему (рис. 2), то таке відхилення у разі НДМ $-8\% < \lambda_i < +19,5\%$, а у разі ГДМ $-19,5\% < \lambda_i < +36,5\%$. Ця розбіжність є досить суттєвою, що вимагає визначення допустимих меж з виділенням аналітичних залежностей частки взаємного впливу Δ_i та коефіцієнтів несиметрії $k_{U2\%}$ та $k_{U0\%}$.

Визначення зв'язку між обмінною потужністю та коефіцієнтами несиметрії в трифазних ЛСЕ. За отриманими результатами моделювання обмінні процеси відбуваються в системі як у разі несиметричного, так і симетричного режиму роботи. За умови, що трифазна система живиться від симетричної напруги, діючі значення напруг рівні діючому значенню номінальної напруги $U_A = U_B = U_C = U_H$. Отже, з формул (1) виведемо рівності для номінальної напруги U_H з врахуванням коефіцієнтів несиметрії k_{U2} , k_{U0} , які визначаються у відносних одиницях (в.о.):

$$U_H = U_2 \cdot k_{U2}; \quad U_H = U_0 \cdot k_{U0}. \quad (7)$$

Для розрахунку обмінної потужності $\sum Q_{Об}$ за формулою (2) необхідно визначити реактивні складові миттєвого струму i -ї фази. Враховуючи співвідношення (7), отримуємо вираз

$$i_{pi}(t) = i_i(t) - \frac{u_i(t)P_i}{U_2^2 k_{U2}^2}. \quad (8)$$

Обмінну потужність у перетині i -ї фази визначимо шляхом підстановки виразу (8) в формулу обмінної потужності $Q_{Обi}$:

$$Q_{Обi} = \frac{1}{T} \int_0^{t_i^+} u_i(t) \left(i_i(t) - \frac{u_i(t)P_i}{U_2^2 k_{U2}^2} \right) dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_i^+} \left(u_i(t)i_i(t) - \frac{u_i(t)^2 P_i}{U_2^2 k_{U2}^2} \right) dt =$$

$$= \frac{1}{T} \int_0^{t_i^+} \left(p_i(t) - \frac{u_i(t)^2 P_i}{U_2^2 k_{U2}^2} \right) dt = \frac{1}{T} \int_0^{t_i^+} p_i(t) dt - \frac{1}{T} \frac{P_i}{U_2^2 k_{U2}^2} \int_0^{t_i^+} u_i(t)^2 dt = P_i^+ - \frac{1}{T} \frac{P_i}{U_2^2 k_{U2}^2} \int_0^{t_i^+} u_i(t)^2 dt, \quad (9)$$

де $P_i^+ = \frac{1}{T} \int_0^{t_i^+} p_i(t) dt$ – частина потужності, що надходить до навантаження через перетин системи за період t_i^+ в i -й фазі системи.

Підставивши вирази (9) у формулу (2), отримуємо рівність для сумарної обмінної потужності через перетин трифазної системи залежно від коефіцієнта несиметрії за зворотною послідовністю k_{U2} :

$$\sum Q_{Об} = P_A^+ - \frac{1}{T} \frac{P_A}{U_2^2 k_{U2}^2} \int_0^{t_A^+} u_A(t)^2 dt + P_B^+ - \frac{1}{T} \frac{P_B}{U_2^2 k_{U2}^2} \int_0^{t_B^+} u_B(t)^2 dt + P_C^+ - \frac{1}{T} \frac{P_C}{U_2^2 k_{U2}^2} \int_0^{t_C^+} u_C(t)^2 dt;$$

$$\Sigma Q_{\text{ОБ}} = P^+ - \frac{\sum_{n=1}^3 \left(P_n \int_0^{t_n^+} u_n(t)^2 dt \right)}{T \cdot U_2^2 k_{U2}^2}, \quad (10)$$

де $P^+ = \frac{1}{T} \sum_{n=1}^3 \int_0^{t_n^+} p_n(t) dt$ – частина потужності, що надходить до навантаження через перетин трифазної системи за період t_i^+ .

Сумарна обмінна потужність через перетин трифазної системи залежно від коефіцієнта несиметрії за нульовою послідовністю k_{U0} визначається аналогічно:

$$\Sigma Q_{\text{ОБ}} = P^+ - \frac{\sum_{n=1}^3 \left(P_n \int_0^{t_n^+} u_n(t)^2 dt \right)}{T \cdot U_0^2 k_{U0}^2}. \quad (11)$$

Отже, з виразів (10) та (11) випливає зв'язок коефіцієнтів несиметрії за зворотною k_{U2} та нульовою k_{U0} послідовностями від обмінної потужності:

$$k_{U2} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^3 \left(P_n \int_0^{t_n^+} u_n(t)^2 dt \right)}{T \cdot U_2^2 (\Sigma Q_{\text{ОБ}} - P^+)}}; \quad k_{U0} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^3 \left(P_n \int_0^{t_n^+} u_n(t)^2 dt \right)}{T \cdot U_0^2 (\Sigma Q_{\text{ОБ}} - P^+)}}. \quad (12)$$

Як було зазначено раніше, обмінні процеси в трифазних ЛСЕ відбуваються як у разі симетричного, так і несиметричного навантаження. Тому визначимо зв'язок між часткою взаємного впливу Δ_i (у в.о.) та коефіцієнтами несиметрії:

$$\Delta_i(k_{U2}) = \frac{Q_{\text{ОБ}i}}{\Sigma Q_{\text{ОБ}}} = \frac{P_i^+ \cdot T \cdot U_2^2 \cdot k_{U2}^2 - P_i \int_0^{t_i^+} u_i(t)^2 dt}{P^+ \cdot T \cdot U_2^2 \cdot k_{U2}^2 - \sum_{n=1}^3 \left(P_n \int_0^{t_n^+} u_n(t)^2 dt \right)}; \quad (13)$$

$$\Delta_i(k_{U0}) = \frac{Q_{\text{ОБ}i}}{\Sigma Q_{\text{ОБ}}} = \frac{P_i^+ \cdot T \cdot U_0^2 \cdot k_{U0}^2 - P_i \int_0^{t_i^+} u_i(t)^2 dt}{P^+ \cdot T \cdot U_0^2 \cdot k_{U0}^2 - \sum_{n=1}^3 \left(P_n \int_0^{t_n^+} u_n(t)^2 dt \right)}. \quad (14)$$

Формули (13) та (14) характеризують зв'язок між нормованими ПЯЕ у разі несиметрії та взаємним впливом елементів фаз у пертині трифазної ЛСЕ. Підставивши значення НДМ та ГДМ коефіцієнтів несиметрії у виведені залежності (13) та (14), можна визначити відповідні допустимі межі частки взаємного впливу.

Висновки. За рахунок аналізу ПЯЕ у разі несиметрії, регламентованих діючими нормативними документами, та частки взаємного впливу побудовано графічні залежності й виконано порівняння існуючих ПЯЕ та характеристик обмінних процесів у перетині трифазних ЛСЕ.

Побудовано та виведено аналітичні функціональні залежності, що пов'язують характеристики обмінних процесів (часткою взаємного впливу Δ_i) з нормованими ПЯЕ у разі симетричних та несиметричних (коефіцієнтами несиметрії за зворотною k_{U2} та нульовою k_{U0} послідовностями) режимів роботи трифазних ЛСЕ.

Виведені залежності дають можливість виконати нормування частки взаємного впливу та використовувати її як додатковий ПЯЕ для аналізу у несиметричних режимах роботи

трифазних ЛСЕ. Цей показник дає змогу враховувати не тільки несиметрію, а й несинусоїдальність у перетині трифазної ЛСЕ.

1. Денисюк С.П. Аналіз та оптимізація енергопроцесів у розосереджених електроенергетичних системах. *Технічна електродинаміка*. 2016. № 4. С. 62–64.
2. ГОСТ 13109-97. Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. 2000.
3. Жежеленко И.В., Шидловский А.К., Пивняк Г.Г., Саенко Ю.Л., Нойбергер Н.А. Электромагнитная совместимость потребителей: монография. Москва: Машиностроение. 2012. 351 с.
4. Кириленко О.В., Денисюк С.П., Буткевич О.Ф., Рибіна О.Б. Задачі забезпечення електромагнітної сумісності потужного електроенергетичного обладнання і електричних мереж ОЕС України. *Технічна електродинаміка*. 2010. № 26. С. 21–30.
5. Коепке G. Electromagnetic Compatibility and Smart Grid Interoperability Issues. *SGIP Document*. 2012. № 5. С. 118.
6. ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, IDT). Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності. 2014.
7. Горенко Д.С., Мельничук Г.В. Аналіз впливу кондуктивних завод на систему з нетрадиційними джерелами електроенергії. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2016. № 4. С. 72–80.
8. Лютий О.П. Комплексний аналіз несиметрії і несинусоїдальності в системах електропостачання з різкозмінним навантаженням. *Технічна електродинаміка*. 2002. № 2. С. 104–107.
9. Саенко Ю.Л., Каложний Д.Н., Свергуненко С.В. Идентификация линейной обобщенной загрузки в задаче распределения фактических вкладов в искажение напряжений в трехфазных четырехпроводных сетях. *Технічна електродинаміка*. 2018. № 2. С. 67–74.
10. Трунова І.М., Лебедева Я.А. Порівняльний аналіз основних нормативних документів щодо якості електричної енергії. *Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка*. 2015. № 165. С. 19–22.
11. Denysiuk S., Horenko D. Analysis of exchange processes during parallel operation of wind electric units. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 4(82). С. 26–32.
12. Денисюк С.П., Горенко Д.С. Обмінні процеси в трифазних автономних системах електроживлення. *Праці Інституту електродинаміки НАН України*. 2016. Вип. 45. С. 9–15.
13. Денисюк С.П., Горенко Д.С. Аналіз обмінних процесів при паралельній роботі двох трифазних вітроустановок. *Відновлювана енергетика*. 2018. № 2(53). С. 46–56.
14. Денисюк С.П., Горенко Д.С., Соколовський П.В. Аналіз несиметричних режимів роботи в трифазних мережах з використанням обмінної потужності. *Вісник ВНТУ*. 2018. № 1(136). С. 45–52.
15. Горенко Д.С. Взаємний вплив груп елементів в локальних системах електроживлення. 5-та Міжнародна науково-технічна та навчально-методична конференція *Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – 2018*. Київ. 17 – 19 квітня 2018. С. 17–18.
16. Горенко Д.С., Денисюк С.П., Радиш І.П. Электромагнитная совместимость та обмінні процеси в автономних системах електроживлення. The international research and practical conference *The development of technical sciences: problems and solutions*. Brno. Czech Republic. 27-28 april. 2018. С. 1–5.
17. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Москва: Высш. школа. 1978. 231 с.

УДК 621.31

С.П. Денисюк, докт. техн. наук, **Д.С. Горенко**, аспірант

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт им. Игоря Сикорского»,
Институт энергосбережения и энергоменеджмента,
ул. Борщаговская, 115, Киев, 03056, Украина

ОЦЕНКА ОБМЕННОЙ МОЩНОСТИ В ТРЕХФАЗНЫХ ЛОКАЛЬНЫХ СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ С УЧЕТОМ НОРМИРОВАННЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Проведен анализ взаимного влияния элементов в сечении трехфазной трех- и четырехпроводной локальной системы электроснабжения (ЛСЭ). Осуществлен анализ действующих нормативных документов, которые регламентируют электромагнитную совместимость электротехнических средств и систем как в Украине, так и за рубежом. Предложено использовать долю взаимного влияния элементов фаз для оценки обменных процессов в сечении трехфазной ЛСЭ. Представлены последовательность определения доли взаимного влияния в сечении трехфазной ЛСЭ трех- и четырехпроводного выполнения. Построены графические зависимости изменения доли взаимного влияния и коэффициентов несимметрии при различном уровне несимметрии для трех- и четырехпроводных трехфазных ЛСЭ. Приведены аналитические выражения связи коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательностям от доли взаимного влияния в сечении трехфазной ЛСЭ. Аргументирована возможность нормирования доли взаимного влияния как дополнительного показателя обменных процессов в трехфазных ЛСЭ. Библ. 17, рис. 3, таблица.

Ключевые слова: трехфазные системы электропитания, показатели качества электроэнергии, электромагнитная совместимость, обменная мощность.

S.P. Denisyuk, D.S. Horenko

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute", Institute of Energy Saving and Energy Management,
st. Borschagivska, 115, Kyiv, 03056, Ukraine

EVALUATION OF EXCHANGE CAPACITY IN THREE-PHASE LOCAL ELECTRICAL SUPPLY SYSTEMS WITH REGISTRATION OF NOVEMIROVAL INDICATORS OF ELECTRICITY QUALITY

The analysis of the mutual influence of elements in the intersection of three-phase tri-conductor and four-conductor Local Electrical Supply Systems (LESS) is carried out. The analysis of the current normative documents that normalize the electromagnetic compatibility of electrotechnical facilities and systems both in Ukraine and abroad is carried out. It is suggested to use the share of mutual influence of phase elements to evaluate the exchange processes in the intersection of three-phase LESS. The sequence of determination of the share of mutual influence in the intersection of three-phase LESS triple-conductor and four-conductor execution is presented. The graphic dependences of the change in the proportion of mutual influence and the coefficients of asymmetry at different levels of asymmetry for three conductive and four-conductor three-phase LESS are constructed. The analytical expressions of the connection of the asymmetry coefficients in reciprocal and zero sequences are given from the share of mutual influence in the intersection of the three-phase LESS. The possibility of the normalization of the share of mutual influence, as an additional indicator of exchange processes in three-phase LESS, is argued. References 17, figures 3, table.

Key words: three-phase power supply systems, indicators of electric power quality, electromagnetic compatibility, exchange power.

1. Denisyuk S.P. Analysis and optimization of energy processes in dispersed power systems. *Technical electro-dynamics*. 2016. № 4. P. 62–64.
2. State Standard of Ukraine 13109-97. Interstate standard. Electric power. Compatibility of technical means is electromagnetic. Standards of quality electric energy in general power supply systems. 2000 (Rus)
3. Zhezhelenko I.V., Shidlovsky A.K., Pivnyk G.G., Saenko Yu.L., Neuberger N.A. Electromagnetic Compatibility of Consumers: Monograph. Moscow: Mechanical Engineering. 2012. 351 p.
4. Kyrylenko O.V., Denisyuk S.P., Butkevich O.F., Rybina O.B. Tasks of providing of electromagnetic compatibility of powerful electric power equipment and electric networks of UES of Ukraine. *Technical electro-dynamics*. 2010. № 26. P. 21–30.
5. Koepke G. Electromagnetic Compatibility and Smart Grid Interoperability Issues. *SGIP Document*. 2012. №5. C. 118.
6. State Standard of Ukraine EN 50160: 2014 (EN 50160: 2010, IDT). Characteristics of power supply voltage in electric networks of general purpose. 2014 (Ukr)
7. Horenko D.S., Melnichuk G.V. Analysis of the influence of conductive noise on a system with non-traditional sources of electricity. *Power engineering: economics, technology, ecology*. 2016. №. 4. P. 72–80.
8. Lyutyi O.P. Complex analysis of asymmetry and non-sinusoidality in power supply systems with a sharp change load. *Technical electro-dynamics*. 2002. № 2. P. 104–107.
9. Sayenko Yu.L., Kalyuzhny D.N., Sverhunencko S.V. Identification of a linear generalized load in the task of allocating actual contributions to distortion of stresses in three-phase four-wire networks. *Technical electro-dynamics*. 2018. № 2. P. 67–74.
10. Trunova I.M., Lebedeva Ya.A. Comparative analysis of the basic normative documents on the quality of electric energy. *Bulletin ChNTUSH Petr Vasilenko*. 2015. № 165. P. 19–22.
11. Denysiuk S., Horenko D. Analysis of exchange processes during parallel operation of wind electric units. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. № 4(82). C. 26–32.
12. Denisyuk S.P., Horenko D.S. Interchange processes in three-phase autonomous power supply systems. *Works of the Institute of Electro-dynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine*. 2016. №. 45. P. 9–15.
13. Denisyuk S.P., Horenko D.S. Analysis of exchange processes in parallel operation of two three-phase wind turbines. *Renewable energy*. 2018. №. 2 (53). P. 46–56.
14. Denisyuk S.P., Gorenko D.S., Sokolovsky P.V. Analysis of asymmetric operating modes in three-phase networks using exchange power. *Herald of VNTU*. 2018. №. 1 (136). P. 45–52.
15. Horenko D.S. Mutual influence of groups of elements in local power systems. 5th International Scientific, Technical and Educational Conference Conference on Energetic Management: Status and Prospects of Development - 2018. Kyiv. April 17 – 19, 2018. P. 17–18.
16. Horenko D.S., Denisyuk S.P., Radish I.P. Electromagnetic compatibility and exchange processes in autonomous power systems. The international research and practical conference *The development of technical sciences: problems and solutions*. Brno Czech Republic 27–28 april 2018. P. 1–5.
17. Bessonov L.A. Theoretical foundations of electrical engineering. Moscow: Ex. school. 1978. 231 p.