

DOI 10.31891/2307-5732-2019-273-3-220-225
 УДК 621.316.1

М.Й. БУРБЕЛО, Ю.В. ЛОБОДА, О.В. СТЕПУРА
 Вінницький національний технічний університет

**АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ ПОМИЛОК РОЗПОДІЛЬНИХ СТАТКОМ, ЩО
 ЗУМОВЛЕНІ НЕТОЧНІСТЮ ФОРМУВАННЯ ЗАДАВАЛЬНИХ СТРУМІВ**

В статті проаналізовано динамічні помилки симетрування навантажень та фільтрування вищих гармонік за допомогою СТАТКОМ, що зумовлені неточністю формування задавальних струмів.

Ключові слова: симетрування навантажень, фільтрування гармонік.

M.J. BURBELO, Y.V. LOBODA, O.V. STEPURA
 Vinnytsia National Technical University

**ANALYSIS OF DYNAMIC ERRORS OF DISTRIBUTIONAL FITTING, MADE BY INSUFFICIENCY OF FORMING
 DETENTION CURRENCIES**

In the article the algorithm of control of static synchronous compensators is analysed which is based on the theory of instantaneous capacities on dynamic errors. The structural scheme of control systems based on the theory of instantaneous power, the mathematical division of the transition mode for increasing and reducing the asymmetric active-inductive nonlinear load is shown, and the response of the device to this mode is shown. Dynamic errors of load balancing and filtering of higher harmonics are shown with the help of static synchronous compensators, which are caused by inaccuracy of the formation of presumptive currents. From the analysis of dependencies, it follows that the current of the zero sequence is compensated for precisely, and the current of the reverse sequence of the fundamental harmonic, as well as the currents of the direct and reciprocal sequences of the higher harmonics, are compensated by errors which depend on the speed of the load change. Graphs of required consumption for small loads and generation at high loads of active and reactive power during load balancing and filtering of higher harmonics are shown. Dynamic errors of load balancing and filtering of higher harmonics by means of static synchronous compensators, in case of fixation of active and reactive capacities of static synchronous compensators, there are no errors.

Keywords: load balancing, harmonic filtering.

Постановка проблеми

При дослідженні режиму роботи статичного синхронного компенсатора, такого як збільшення та зменшення несиметричного активно-індуктивного нелінійного навантаження, виникають помилки його роботи, що зумовлені неточністю формування задавальних струмів.

Аналіз останніх джерел

Одним із методів керування розподільними СТАТКОМ є метод, що оснований на теорії миттєвої потужності [1–9]. Структурну схему систем керування на основі теорії миттєвої потужності зображено на рис. 1.

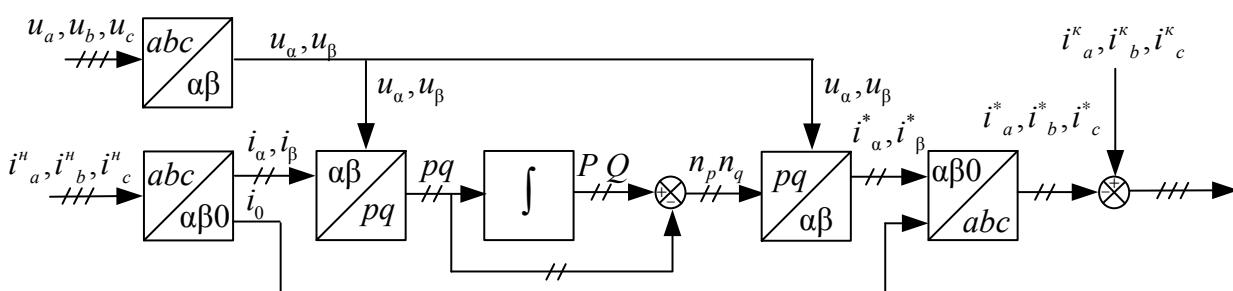


Рис. 1. Система керування на основі теорії миттєвої потужності

Алгоритм керування з використанням теорії миттєвих потужностей складається з таких кроків.

1. Перехід від фазних координат до ортогональних складників напруг і струмів в системі $\alpha\beta$ -координат:

$$\begin{bmatrix} u_{\alpha}(t) \\ u_{\beta}(t) \\ u_0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & -\sqrt{1/6} & -\sqrt{1/6} \\ 0 & \sqrt{1/2} & -\sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_a(t) \\ u_b(t) \\ u_c(t) \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha}(t) \\ i_{\beta}(t) \\ i_0(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & -\sqrt{1/6} & -\sqrt{1/6} \\ 0 & \sqrt{1/2} & -\sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a(t) \\ i_b(t) \\ i_c(t) \end{bmatrix},$$
(1)

де $[u_{\alpha}(t), u_{\beta}(t), u_0(t)]^T$, $[i_{\alpha}(t), i_{\beta}(t), i_0(t)]^T$ – вектори напруг і струмів в системі $\alpha\beta 0$ -координат;
 $[u_a(t), u_b(t), u_c(t)]^T$, $[i_a(t), i_b(t), i_c(t)]^T$ – вектори миттєвих фазних напруг і струмів;

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

2. Формуванні миттєвих активної та реактивної потужностей:

$$p(t) = i_{\alpha}(t)u_{\alpha}(t) + i_{\beta}(t)u_{\beta}(t); \quad q(t) = i_{\alpha}(t)u_{\beta}(t) - i_{\beta}(t)u_{\alpha}(t).$$
(2)

3. Визначення активної та реактивної потужностей навантаження:

$$P(t) = \frac{4}{T} \int_{t-T/2}^t p(t)dt - \frac{1}{T} \int_{t-T}^t p(t)dt; \quad Q(t) = \frac{4}{T} \int_{t-T/2}^t q(t)dt - \frac{1}{T} \int_{t-T}^t q(t)dt.$$
(3)

4. Визначення складників потужності пульсацій, які повинен генерувати АФ для симетрування та фільтрування вищих гармонік:

$$n_p(t) = p(t) - P(t); \quad n_q(t) = q(t) - Q(t).$$
(4)

5. Знаходження бажаної залежності компенсаційного струму АФ в системі $\alpha\beta$ -координат:

$$i_{\alpha}^*(t) = \frac{n_p(t)u_{\alpha}(t) + n_q(t)u_{\beta}(t)}{u_{\alpha}^2(t) + u_{\beta}^2(t)}; \quad i_{\beta}^*(t) = \frac{-n_q(t)u_{\alpha}(t) + n_p(t)u_{\beta}(t)}{u_{\alpha}^2(t) + u_{\beta}^2(t)}.$$
(5)

6. Перехід до системи фазних координат за формулою

$$\begin{bmatrix} i_a^*(t) \\ i_b^*(t) \\ i_c^*(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2/3} & 0 & \sqrt{1/3} \\ -\sqrt{1/6} & \sqrt{1/2} & \sqrt{1/3} \\ -\sqrt{1/6} & -\sqrt{1/2} & \sqrt{1/3} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{\alpha}^*(t) \\ i_{\beta}^*(t) \\ i_0^*(t) \end{bmatrix},$$
(6)

де $[i_a^*(t), i_b^*(t), i_c^*(t)]^T$, $[i_{\alpha}^*(t), i_{\beta}^*(t), i_0^*(t)]^T$ – вектори задавальних значень компенсаційних струмів в системі фазних та $\alpha\beta 0$ -координат.

7. Порівняння компенсаційних струмів фаз з фактичними струмами компенсатора та їх регулювання за відхиленням з використанням ПІД-регулятора.

Мета роботи полягає у дослідженні помилок статичного синхронного компенсатора, що зумовлені неточністю формування задавальних струмів, при зміні навантаження.

Виклад основного матеріалу. Аналіз помилок статичного синхронного компенсатора, зумовлених неточністю формування задавальних струмів, проводиться у випадку збільшення та зменшення несиметричного активно-індуктивного нелінійного навантаження (рис. 2).

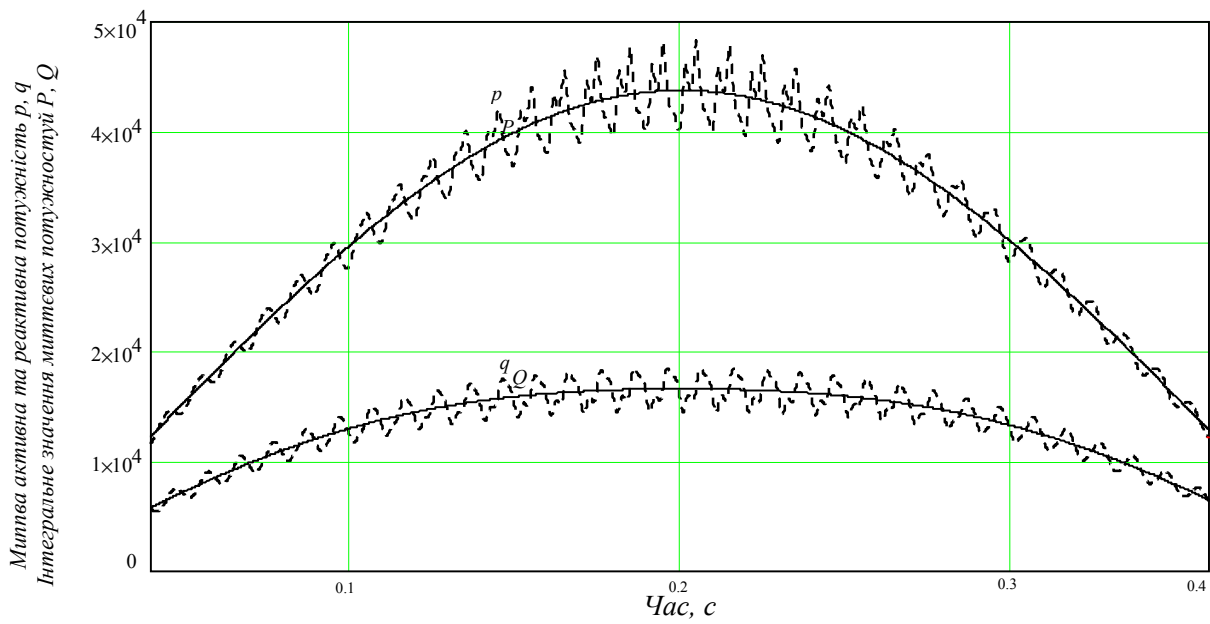


Рис. 2. Часові залежності зміни активної та реактивної потужностей навантаження

Основними показниками ефективності роботи СТАТКОМ є мінімальні значення струмів зворотної та нульової послідовностей основної гармоніки, а також струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей вищих гармонік.

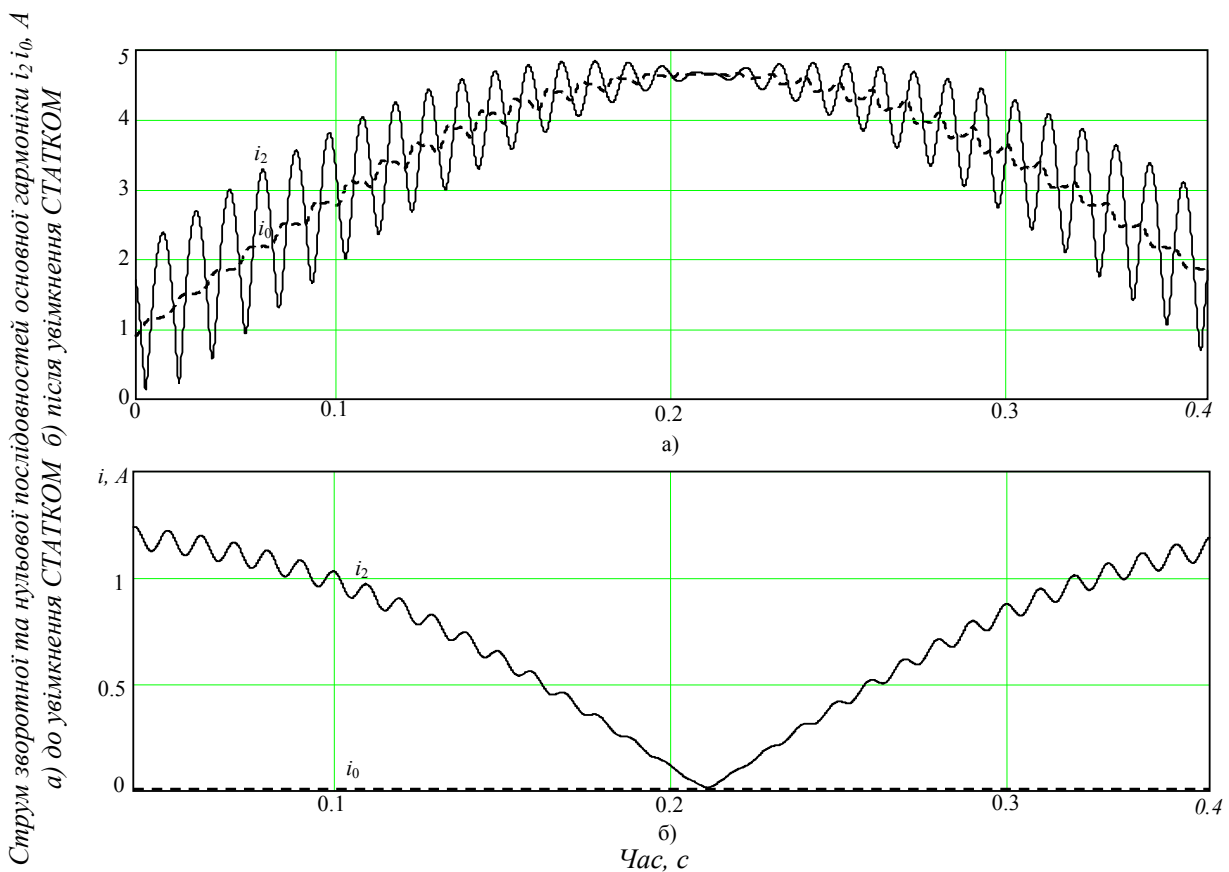


Рис. 3. Залежності струмів зворотної та нульової послідовностей основної гармоніки а) до увімкнення СТАТКОМ б) після увімкнення СТАТКОМ

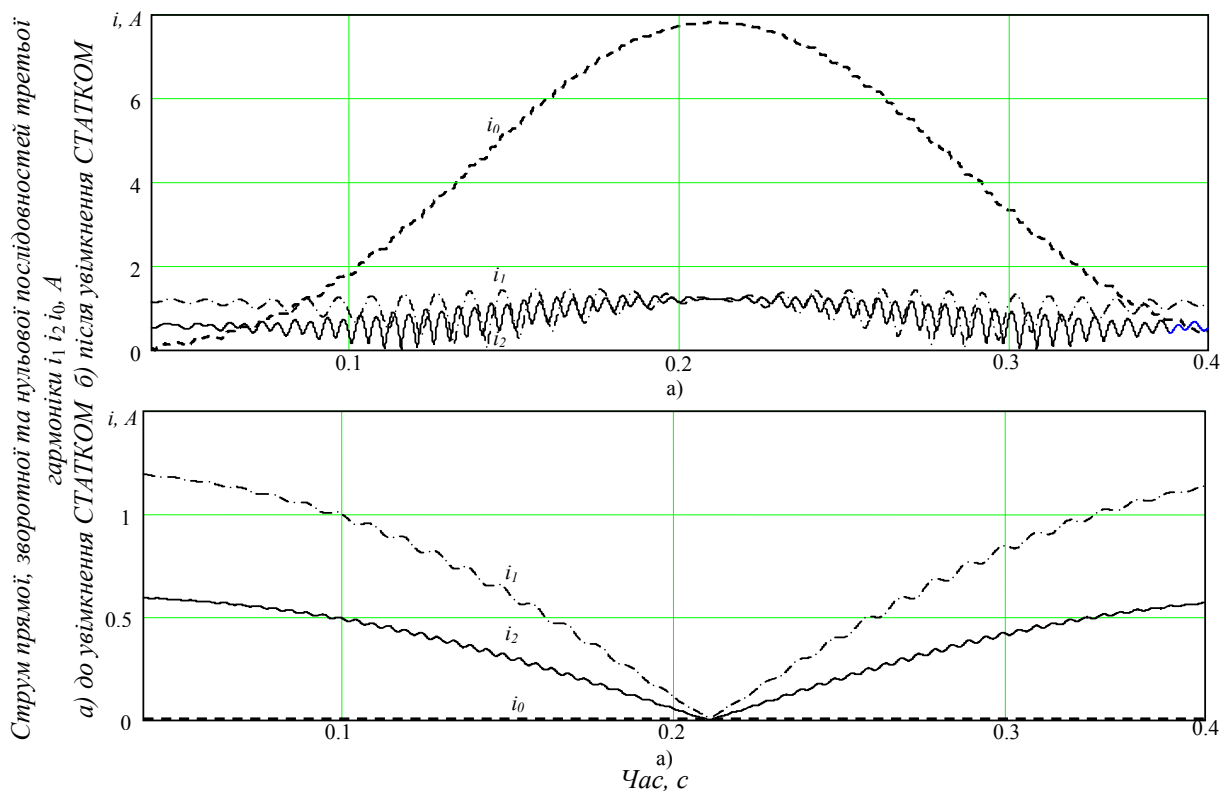


Рис. 4. Залежності струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей 3-ї гармоніки а) до увімкнення СТАТКОМ б) після увімкнення СТАТКОМ

На рис. 3 показано залежності струмів зворотної та нульової послідовностей основної гармоніки: а) до увімкнення СТАТКОМ; б) після увімкнення СТАТКОМ, а на рис. 4, ..., рис. 7 – струмів прямої, зворотної та нульової послідовностей, відповідно, 3, 5 і 7 гармонік: а) – до увімкнення СТАТКОМ, б) після увімкнення СТАТКОМ.

З наведених рисунків видно, що помилки симетрування та фільтрування вищих гармонік є досить істотними і залежать від швидкості зміни навантаження. З аналізу залежностей випливає, що струм нульової послідовності компенсується точно, а струм зворотної послідовності основної гармоніки, а також струми прямої та зворотної послідовностей вищих гармонік компенсуються з помилками, які залежать від швидкості зміни навантаження. Причиною помилок є інерційність формування потужностей. Помилки може характеризувати залишковий струм зворотної послідовності (рис. 5).

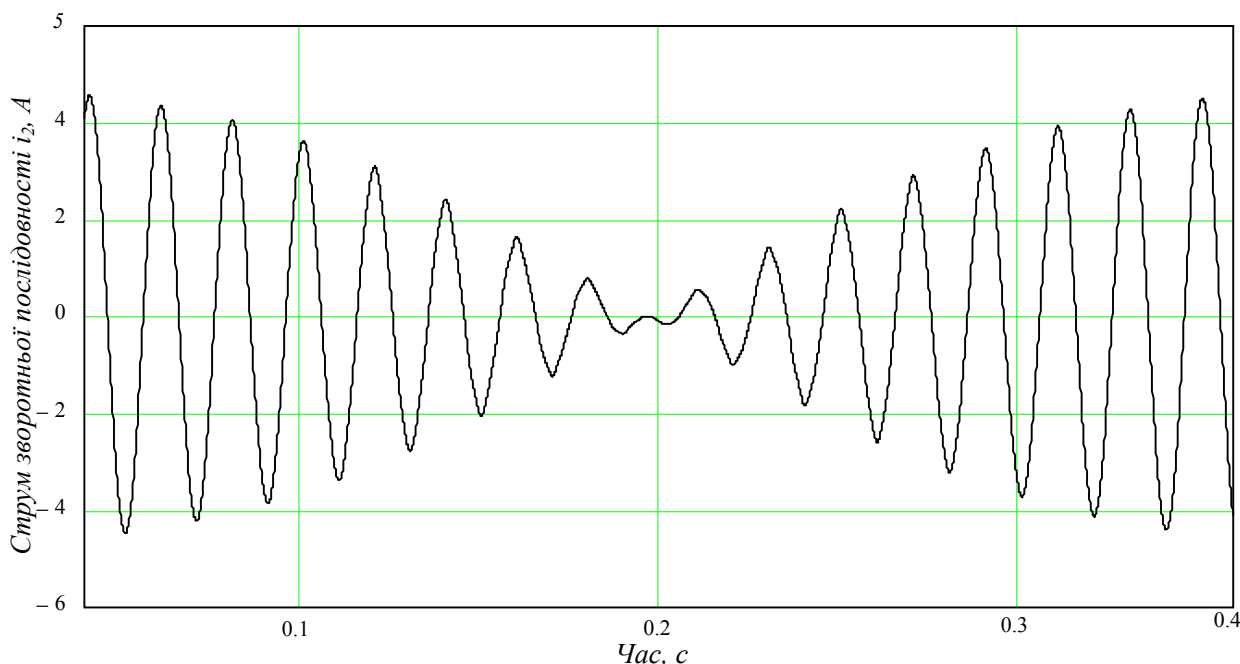


Рис. 5. Залишковий струм зворотної послідовності

Динамічні помилки відсутні у разі фіксування активної та реактивної потужностей на певних середніх значеннях, але при цьому СТАТКОМ повинен генерувати (споживати) активну і реактивну потужності. На рис. 8 показано графіки необхідного споживання за малих навантажень і генерування за великих навантажень активної та реактивної потужностей в процесі кондиціонування якості електроенергії (симетрування навантажень та фільтрування вищих гармонік).

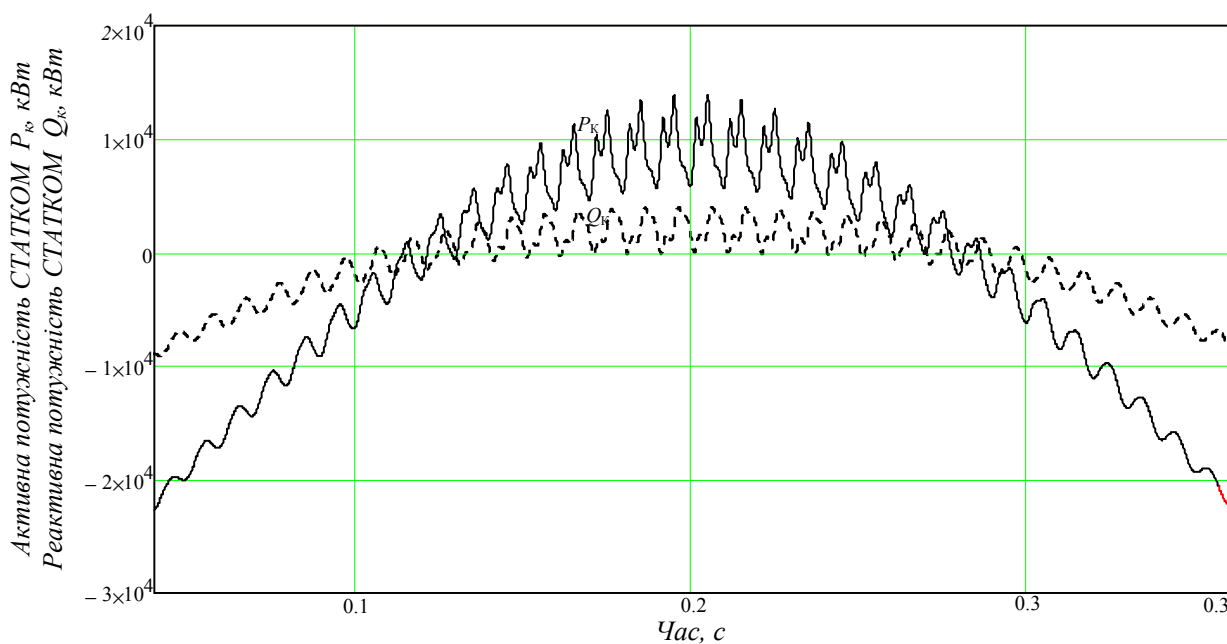


Рис. 6. Залежності споживаних та генерованих потужностей СТАТКОМ у разі фіксування активної та реактивної потужностей

Необхідність споживання та генерування активної та реактивної потужностей в процесі кондиціонування якості електроенергії приводить до необхідності збільшення потужності СТАТКОМ і, відповідно, додаткових матеріальних витрат.

Висновки

Динамічні помилки симетрування навантажень та фільтрування вищих гармонік за допомогою СТАТКОМ залежать від швидкості зміни навантаження. За великих швидкостей збільшення та зменшення навантажень помилки істотні. У разі фіксування активної та реактивної потужностей СТАТКОМ помилки відсутні, однак при цьому СТАТКОМ повинен споживати активну та реактивну потужності за малих навантажень і генерувати – за великих навантажень.

Література

1. Akagi H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning / H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes. – IEEE Press / Wiley-Interscience, 2007. – 379 p.
2. Gyugyi L. and Strycula E. C. Active AC power filters, Conf. Rec., IEEE IAS, 1976, p. 529–535.
3. Akagi H. Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components / H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1984. – Vol. IA-20, No. 3. – P. 625–630.
4. Akagi H., Naba A. & Atoh S. Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters. *IEEE transactions on industry applications*, 1986, Vol. 22, No. 3. P. 460–465.
5. Akagi H., Nabae A. The p - q theory in three - phase systems under non - sinusoidal conditions / H. Akagi, A. Nabae // European Transactions on Electrical Power. – 1993. – Т. 3. – №. 1. – P. 27–31.
6. Akagi H. Trends in Active Power Line Conditioners / H. Akagi // IEEE Trans. on PEELS. – 1994. – Vol. 9, No. 3. – P. 263–268.
7. Ginn III H. L. A Hybrid Reference Signal Generator for Active Compensators // *Electrical Power Quality and Utilization, Journal*. – Vol XIII, No 1, 2007. – P. 51–57.
8. Firlit A. Currents Physical Components Theory and p-q Power Theory in the Control of the Three-phase Shunt Active Power Filter // *Electrical Power Quality and Utilization, Journal*. – 2007. – Vol XIII, No 1. – P. 59–66.
9. Бурлака В. В. Обзор методов управления активными фильтрами / В. В. Бурлака, С. К. Поднебенная, М. Д. Дьяченко // *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. – 2011. – № 1. – С. 51–54.

References

1. Akagi H. Instantaneous power theory and applications to power conditioning / H. Akagi, E. H. Watanabe, M. Aredes. – IEEE Press / Wiley-Interscience, 2007. – 379 p.
2. Gyugyi L. and Strycula E. C. Active AC power filters, Conf. Rec., IEEE IAS, 1976, p. 529–535.
3. Akagi H. Instantaneous Reactive Power Compensator Comprising Switching Devices Without Energy Storage Components / H. Akagi, Y. Kanazawa, and A. Nabae // IEEE Trans. Ind. Appl. – 1984. – Vol. IA-20, No. 3. – P. 625–630.
4. Akagi H., Naba A. & Atoh S. Control strategy of active power filters using multiple voltage-source PWM converters. IEEE transactions on industry applications, 1986, Vol. 22, No. 3. P. 460–465.
5. Akagi H., Nabae A. The p - q theory in three - phase systems under non - sinusoidal conditions / H. Akagi, A. Nabae // European Transactions on Electrical Power. – 1993. – Т. 3. – №. 1. – P. 27–31.
6. Akagi H. Trends in Active Power Line Conditioners / H. Akagi // IEEE Trans. on PELS. – 1994. – Vol. 9, No. 3. – P. 263–268.
7. Ginn III H. L. A Hybrid Reference Signal Generator for Active Compensators // Electrical Power Quality and Utilization, Journal. – Vol XIII, No 1, 2007. – P. 51–57.
8. Firlit A. Currents Physical Components Theory and p-q Power Theory in the Control of the Three-phase Shunt Active Power Filter // Electrical Power Quality and Utilization, Journal. – 2007. – Vol XIII, No 1. – P. 59–66.
9. Burlaka V. V. Obzor metodov upravleniya aktivnymi filtrami / V. V. Burlaka, S. K. Podnebennaya, M. D. Dyachenko // Elektromehanichni i energozberigayuchi sistemi. – 2011. – № 1. – S. 51–54.

Рецензія/Peer review : 17.5.2019 р.

Надрукована/Printed : 3.6.2019 р.
Рецензент: д.т.н., проф. Кугін В.М.