

УДК 621.316.1

## СИСТЕМА ПРЯМОГО КЕРУВАННЯ СТРУМОМ СТАТИЧНОГО СИНХРОНОГО КОМПЕНСАТОРА

---

**М.Й. Бурбело,**

доктор технічних наук, професор  
Вінницький національний технічний університет

**Ю.В. Лобода**

Вінницький національний технічний університет

---

*Обґрунтовано метод прямого керування струмом статичного синхронного компенсатора з формуванням несинусоїдних сигналів, що дорівнюють різниці струмів навантаження та їх основних гармонік, з метою компенсації вищих гармонік, а також синусоїдних несиметричних сигналів для симетрування струмів навантаження, що дозволяє забезпечити розділення контурів керування фільтрування вищих гармонік та симетрування нелінійних несиметричних навантажень. Критеріями ефективності системи керування прийнято: сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень струмів, несиметричність струмів, значення пульсуючих активної та реактивної потужностей, які інтегрально характеризують несиметрію та гармонічні спотворення струмів і напруг в перехідному режимі. Бібл. 8, рис. 4.*

**Ключові слова:** статичний синхронний компенсатор (СТАТКОМ), електричні мережі, несиметричні несинусоїдні режими, симетричні складові, вищі гармоніки.

**Keyword:** Static Synchronous Compensator (STATCOM ), electrical networks, asymmetric non-sinusoidal modes, symmetric components, higher harmonics.

**Постановка проблеми.** На електричних мережах є однією із сьогоденішній день проблема якості актуальних. В більшості сучасних електричної енергії в розподільчих підприємств використовують

електробладнання, яке знижує якість електричної енергії. До них відносять: випрямлячі, які спотворюють синусоїдність форми струму та напруги; потужні однофазні електроприймачі, що спричиняють виникнення несиметрії навантажень. Ці фактори призводять до завчасного виходу з ладу технологічного обладнання та до збільшення втрат електричної енергії.

Одним із способів покращення якості електричної енергії є встановлення пристроїв динамічної компенсації реактивної потужності таких як статичні синхронні компенсатори (СТАТКОМ), що вирішують комплексно низку вказаних проблем.

Існує велика кількість як систем керування, так і схем виконання силового блоку СТАТКОМ [1-3]. Всі ці варіації мають як переваги, так і недоліки в певних режимах роботи розподільчих мереж. Дуже велика кількість наукових праць пов'язані із вдосконаленням роботи цих пристроїв [4-7].

*Метою роботи є* вдосконалення системи керування статичними синхронними компенсаторами.

В даній роботі було запропоновано підхід до побудови системи прямим керуванням струмом з використанням струмів зворотної послідовності  $i_{d2}$  та  $i_{q2}$ .

**Обґрунтування результатів.** Умови симетрування струмів за синусоїдних напруг і струмів отримують з критеріїв компенсації реактивної складової струму прямої послідовності та обох складових струмів зворотної та нульової послідовностей навантаження. Комплексні струми фаз компенсатора можуть бути визначені за однією з формул:

$$\begin{matrix} I_a^* & 1 & 1 & 1 & jk_1 \operatorname{Im} I_1^* \\ I_b^* & a^2 & a & 1 & k_2 I_2^* \\ I_c^* & a & a^2 & 1 & k_0 I_0^* \end{matrix} ; \quad (1)$$

$$\begin{array}{ccc}
 I_a & I_A & 1 & 1 & 1 & \operatorname{Re} I_1 & j & 1 & k_1 & \operatorname{Im} I_1 \\
 I_b & I_B & a^2 & a & 1 & & & 0 & & \\
 I_c & I_C & a & a^2 & 1 & & & 0 & & 
 \end{array} \quad , (2)$$

де  $a = e^{j120^\circ}$  – фазовий оператор;  $k_1, k_2, k_0$  – ступені компенсації, відповідно, реактивної потужності, струму зворотної та нульової послідовностей.

Визначення струмів компенсатора за формулою (1) відноситься до методу прямого керування струмом СТАТКОМ. Визначення струмів компенсатора за формулою (2) відноситься до опосередковано визначення струмів СТАТКОМ, що реалізовано, наприклад, в методі синхронного детектування.

Для отримання миттєвих струмів прямої та зворотної послідовностей можуть бути використані лінійні перетворення миттєвих синусоїдних струмів [8]:

$$i_1(t) = \frac{1}{\sqrt{6}}(i_\alpha(t) - i'_\beta(t)); \quad i_2(t) = \frac{1}{\sqrt{6}}(i_\alpha(t) + i'_\beta(t)), \quad (3)$$

де  $i_\alpha(t) = \frac{1}{\sqrt{6}}(2i_A(t) - i_B(t) - i_C(t))$ ,  $i'_\beta(t) = \frac{1}{\sqrt{2}}(i'_B(t) - i'_C(t))$  – миттєві струми в системі  $\alpha\beta$ -координат; штрихом позначено фазовий зсув миттєвих величин на  $-90$  ел. градусів.

Оскільки перетворення (3) є достатньо складними в реалізації, то їх можна замінити наближеними виразами:

$$i_1(t) \approx \frac{1}{\sqrt{6}} i(t - T/4); \quad i_2(t) \approx \frac{1}{\sqrt{6}} i(t + T/4), \quad (4)$$

$$\text{де } i(t - T/4) \approx \frac{1}{\sqrt{2}} i_B(t - T/4) - i_C(t - T/4).$$

Від струмів прямої та зворотної послідовностей можна перейти до системи  $dq$ -координат:

$$i_{d1}(t) = i_1(t) \cdot \sin \omega t; \quad i_{q1}(t) = i_1(t) \cdot \cos \omega t; \quad (5)$$

$$i_{d2}(t) = i_2(t) \cdot \sin \omega t; \quad i_{q2}(t) = i_2(t) \cdot \cos \omega t. \quad (6)$$

Для компенсації вищих гармонік пропонується метод прямого формування струмів фаз СТАТКОМ, згідно з яким за фазними несинусоїдними струмами навантаження визначаються їх діючі значення і формуються синусоїдні одиничні сигнали з початковими фазами, які дорівнюють початковим фазам несинусоїдних струмів. Добуток цих величин забезпечує формування синусоїдних струмів, що дорівнюють основній гармоніці несинусоїдних струмів фаз навантаження. Різниця струмів навантаження і сформованих синусоїдних струмів компенсується СТАТКОМ.

Реалізація методу прямого керування струмом СТАТКОМ зображена на рис. 1. На схемі позначено: PLL1 – блок трьох однофазних фазочастотних автоналаджувачів частоти; RMS1 – блок трьох однофазних перетворювачів ефективних значень; перетворювачі координат « $a, b, c/1, 2, 0$ », « $1, 2/d, q$ », « $d, q/\alpha\beta$ », « $\alpha\beta/a, b, c$ »; БІ – блок інтегрування; PLL2 – блок трифазного фазочастотного автоналаджувача частоти; ШІМ-контролер.

В блоці PLL1 за фазними несинусоїдними струмами навантаження формуються синусоїдні одиничні сигнали з початковими фазами, які дорівнюють початковим фазам несинусоїдних струмів. В блоці RMS1 визначаються діючі значення несинусоїдних струмів навантаження. За допомогою перемноження цих величин забезпечується формування синусоїдних сигналів, що дорівнюють основній гармоніці несинусоїдних струмів фаз навантаження. На виході формується різниця струмів навантаження і сформованих синусоїдних струмів. Цей сигнал використовується для компенсації вищих гармонік.

Проміжний сигнал з виходу помножувача пропорційний основній гармоніці фазних струмів навантаження. Останній пропонується використати для симетрування навантажень за зворотною та нульовою послідовностями.

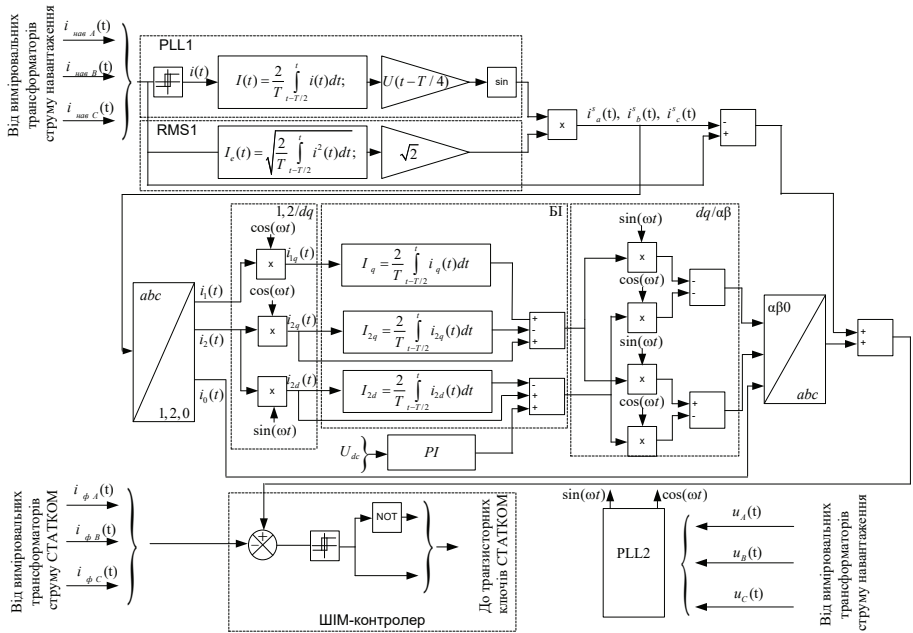


Рис. 1. Блок керування на основі прямого формування струмів СТАТКОМ

В подальшому виконуються такі дії:

1. Перетворення синусоїдних струмів в систему  $d, q$ -координат;
2. Інтегрування струмів прямої та зворотної послідовностей, представлених в системі  $d, q$ -координат;
3. Підтримання на заданому рівні напруги в колі постійного струму в статичних і динамічних режимах шляхом визначення активної потужності, яку повинен генерувати або споживати СТАТКОМ.
4. Знаходження бажаної залежності компенсаційного струму СТАТКОМ в системі  $\alpha\beta$ -координат та в системі фазних  $a, b, c$ -координат.
5. Формування імпульсів керування транзисторами інвертора напруги.

Моделювання СТАТКОМ з системою прямого керування струмом виконано в Matlab Simulink. На рис. 2 представлені часові залежності струмів навантаження. В інтервалі часу 0,1-0,18 с відбувається накид однофазного лінійного навантаження на фазу А.

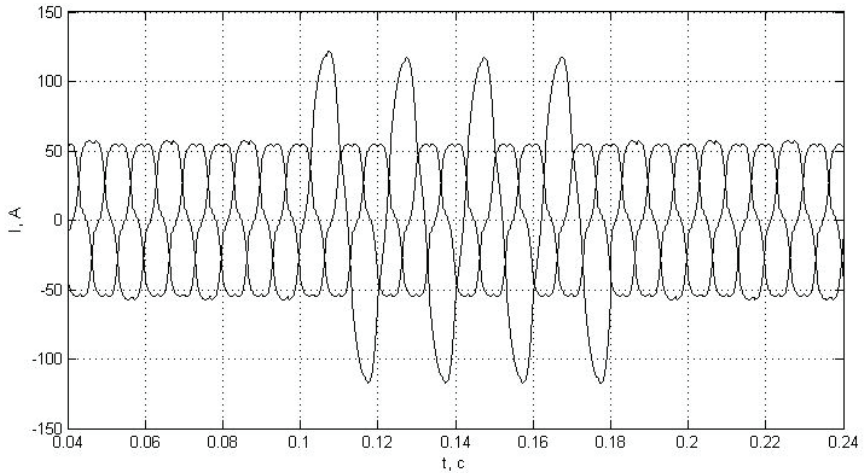


Рис. 2. Струми несиметричного несинусоїдного навантаження

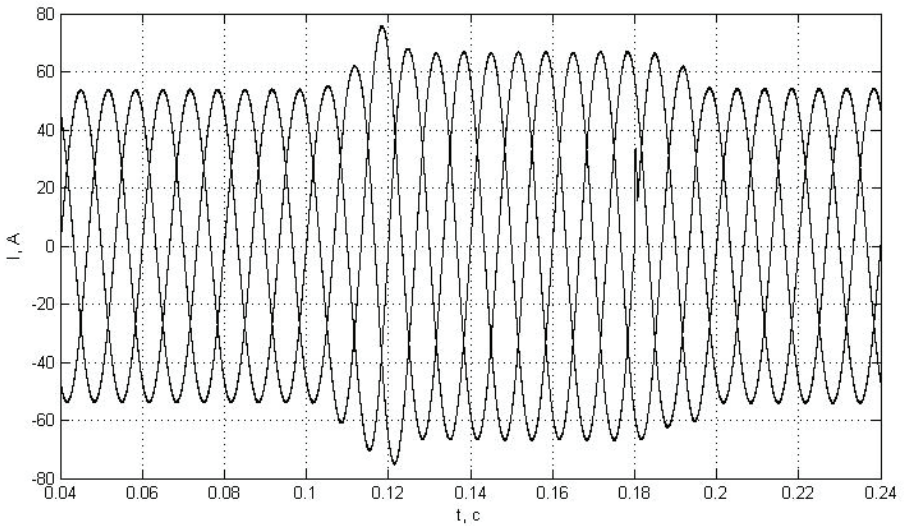


Рис. 3. Струми мережі у разі компенсації реактивної потужності

Критеріями ефективності системи керування прийнято: сумарний коефіцієнт гармонічних спотворень струмів фаз мережі, несиметричність струмів фаз мережі. Якість перехідного режиму при зміні навантаження можна характеризувати коефіцієнтом перерегулювання та тривалістю перехідного процесу. Ще одним критерієм якості перехідного режиму є

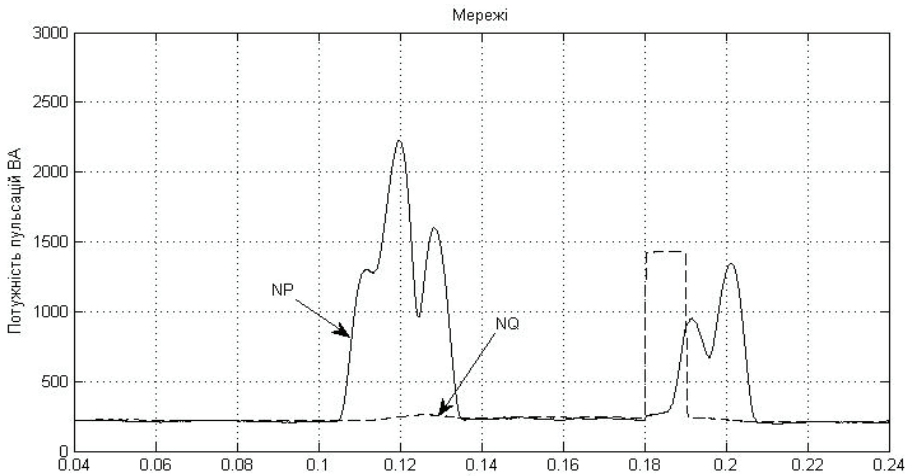


Рис. 4. Пульсуючі потужності мережі у разі компенсації реактивної потужності

значення пульсуючих активної та реактивної потужностей, які інтегрально характеризують несиметрію та гармонічні спотворення струмів і напруг.

На рис. 3 зображено залежності струмів мережі за наявності СТАТКОМ.

Значення фізичних величин за несиметричного несинусоїдного навантаження

| Значення фізичних величин для несиметричного режиму                     | Фаза А            | Фаза В             | Фаза С            |
|---|-------------------|--------------------|-------------------|
| Діючі значення струмів навантаження ( $I_I, A$ )                        | $83,64 e^{j34,7}$ | $41,16 e^{j216,7}$ | $41,16 e^{j97,7}$ |
| Коефіцієнт нелінійного спотворення струмів навантаження ( $THD_p, \%$ ) | 5,78              | 12,8               | 11,75             |
| Діючі значення струмів мережі ( $I_S, A$ )                              | $47,08 e^0$       | $47,08 e^{j240}$   | $47,13 e^{j120}$  |
| Коефіцієнт нелінійного спотворення струмів мережі ( $THD_p, \%$ )       | 0,34              | 0,44               | 0,34              |

Як впливає з таблиці, точність симетрування навантажень та якість компенсації вищих гармонік СТАТКОМ з прямим керуванням струмом достатньо високі.

На рис. 4 зображено залежності пульсуючих активної та реактивної потужностей мережі за наявності СТАТКОМ.

## Висновки

Розроблено метод прямого керування струмом з використанням струмів зворотної послідовності в  $dq$ -координатах, що дозволяє більш ефективно керувати СТАТКОМ за рахунок розділення контуру визначення гармонічних спотворень та струмів симетрування. За рахунок цього підходу за необхідності можливе обмеження як компенсації реактивної потужності, так і симетрування навантаження.

## Література

- [1] В. И. Кочкин О. П. Нечаев, «Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий» М. : Изд-во НЦ ЭНАС, 248 с. 2002.
- [2] А. В. Николаев, «Разработка принципов управления статическим компенсатором (СТАТКОМ) и исследование его работы на подстанциях переменного и постоянного тока,» Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальность 05.14.02. Санкт-Петербург. 2005.
- [3] М. В. Пешков, «Разработка и исследование системы управления статическим компенсатором реактивной мощности типа СТАТКОМ для электроэнергетических систем» Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук. Специальности: 05.14.02, 05.09.12. М.: ОАО «НТЦ электроэнергетики». 2009.
- [4] А. Б. Лоскутов, Б. Ю. Алтунин, И. А. Карнавский, «Модель многоуровневого каскадного инвертора для компенсации реактивной мощности и мощности искажений в сетях с выпрямительной нагрузкой,» PROBLEMELE ENERGETICII REGIONALE. № 2(16), с. 32–38. 2011.
- [5] Б. Ю. Алтунин, И. А. Карнавский, А. А. Кралин, «Имитационная модель системы управления СТАТКОМ для симметрирования сетевых токов,» Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева. № 4(97), с. 232–236. 2012.
- [6] С. В. Кузьмин, «Принцип построения и математическое моделирование статического компенсатора реактивной мощности в тяговой сети переменного тока,» Известия ПГУПС. № 3. С. 70–77. 2011.
- [7] Bhim Singh, Sabha Raj Arya, «Design and control of a DSTATCOM for power quality improvement using cross correlation function approach,» International Journal of Engineering, Science and Technology. Vol. 4, No. 1. P. 74–86. 2012.
- [8] М. Й. Бурбело, та О. В. Степура, „Застосування узагальнених симетричних складових для виявлення споживачів, які спотворюють якість електроенергії,» Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут». Енергетика: надійність та енергоефективність, № 14 (1339), с. 78–82, 2019.