

УДК 621.313

В. М. Михальський, докт. техн. наук, С. Й. Поліщук, В. М. Соболев, канд. техн. наук  
 В. В. Чопик, І. А. Шаповал, канд. техн. наук  
 Інститут електродинаміки НАН України, м. Київ, Україна, E-mail: mikhalsky@ied.org.ua

**СПОСОБИ МІНІМІЗАЦІЇ НЕБАЖАНИХ СКЛАДОВИХ МИТТЄВОЇ ПОТУЖНОСТІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ПАРАЛЕЛЬНИХ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ**

*Рассмотрены возможности компенсации нежелательных составляющих мгновенной мощности, предоставляемые различными топологиями активных фильтров. Получены соотношения, обеспечивающие упрощенный расчет токов компенсатора без применения преобразований координат. Рассмотрена совокупность составляющих мгновенной мощности, которые отражает p-q-r теория, и приведены основные условия их появления и способы компенсации. Библи. 3, табл. 1.*

**Ключевые слова:** параллельный активный фильтр, мгновенная мощность, несимметрия, несинусоидальность

*Розглянуто можливості компенсації небажаних складових миттєвої потужності, які надаються різними топологіями активних фільтрів. Отримано співвідношення, які забезпечують спрощений розрахунок струмів компенсатора без застосування перетворень координат. Розглянуто сукупність складових миттєвої потужності, які відображає p-q-r теорія, наведено основні умови їх появи та способи компенсації. Бібл. 3, табл. 1.*

**Ключові слова:** паралельний активний фільтр, миттєва потужність, несиметрія, несинусоїдальність

**Вступ**

Паралельні активні фільтри – системи з контрольованим генеруванням струму, який узгоджується зі струмом навантаження таким чином, щоб результуючий струм мережі був симетричним, близьким до синусоїдальної форми та протікав у фазі з прямою послідовністю напруг мережі живлення. Розробки принципів роботи та алгоритмів керування системами фільтрації небажаних складових потужності були започатковані з появою p-q теорії миттєвої потужності [3]. Подальший розвиток теорії миттєвої потужності здійснювався шляхом розширення її можливостей та створенням підходів до визначення складових миттєвої потужності в різних координатних системах з метою відокремлення окремих складових, які не відтворюються в базовій p-q та інших теоріях [1, 2]. В даній статті розглядається p-q-r теорія миттєвих потужностей, яка відображає енергетичні процеси в трифазних мережах. Розглянуто топологічні відмінності між трифазними трипровідними та чотирипровідними системами (з накопичувачем енергії та без нього), та способами розрахунку струмів компенсації, які узгоджуються з можливостями, наданими окремо взятою топологією силової схеми компенсатора.

**Метою** статті є створення безпосередніх способів розрахунку струмів з мінімальною кількістю операцій обчислення для застосування в компенсаторах з визначеною топологією без використання перетворень координат. При аналізі кривих миттєвих значень потужності на інтервалі повторюваності, розрахованих з використанням p-q-r теорії, виділено наступні її складові:

$\bar{p}$  – постійна складова активної потужності;  $\bar{q}$  – постійна складова реактивної потужності;  $\bar{r}$  – постійна складова потужності, що замикається через нульовий провід;  
 $\tilde{p}$  – змінна складова активної

		Складові потужності						Складові, що мінімізуються
		$\bar{p}$	$\bar{q}$	$\bar{r}$	$\tilde{p}$	$\tilde{q}$	$\tilde{r}$	
навантаження мережа		○	○	○	○	○	○	○
3-х провідна система	симетричне	R	■	■	■	■	■	$\tilde{p}, \tilde{q}$
		RLC	■	■	■	■	■	$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}$
		S+RLC	■	■	■	■	■	$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}$
	несиметричне	R	■	■	■	■	■	$\tilde{p}, \tilde{q}$
		RLC	■	■	■	■	■	$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}$
		S+RLC	■	■	■	■	■	$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}$
4-х провідна система	симетричне	R	■	■	■	■	■	$\tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$
		RLC	■	■	■	■	■	$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$
		S+RLC	■	■	■	■	■	$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$
	несиметричне	R	■	■	■	■	■	$\tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$
		RLC	■	■	■	■	■	$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$
		S+RLC	■	■	■	■	■	$\bar{q}, \tilde{r}, \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$

потужності;  $\tilde{q}$  – змінна складова реактивної потужності;  $\tilde{r}$  – змінна складова потужності, що

замикається через нульовий провід.

Відповідно з визначенням складових потужності по їх уявному розділенню на постійні та змінні можна стверджувати, що всі складові потужності, крім  $\bar{p}$ , є небажаними та спонукають до застосування заходів для їх мінімізації. Умови, при яких з'являються небажані складові миттєвої потужності, обумовлені властивостями мережі та навантаження. Мережі живлення можна розбити на три основних групи: симетрична синусоїдальна, несиметрична синусоїдальна, несинусоїдальна. Навантаження розділяються на: симетричні та несиметричні; з нульовим проводом та без нього. Іншим критерієм для класифікації навантажень є їх імпедансна характеристика: активна, активно-реактивна, нелінійна. Таким чином, з'являється велика кількість варіантів за типами мереж та навантажень, при яких можна очікувати виникнення небажаних складових миттєвої потужності та окреслити основні способи їх мінімізації. В таблицю зведено умови появи небажаних складових потужності, що підлягають мінімізації. Типи навантаження позначені як «R», «RLC» та «S+RLC» (нелінійне з ключовими елементами). Сірим кольором позначено клітинки, які відповідають наявності складових потужності за даних умов. В останню колонку зведено складові потужності, які підлягають мінімізації для зазначених типів навантаження. Характеристики мережі живлення позначено таким чином: «O» - симетрична синусоїдальна, «O» - несиметрична синусоїдальна, «◇» - несинусоїдальна. Як видно з таблиці, для типових систем «мережа живлення – навантаження» в переважній більшості випадків присутні складові потужності, які повинні бути мінімізовані з використанням активного способу фільтрації. Пасивні системи компенсації дозволяють мінімізувати лише постійну складову реактивної потужності  $\bar{q}$ . До пасивних віднесено системи компенсації реактивної потужності з використанням статичних компенсаторів, найхарактернішими з яких є комутовані конденсаторні батареї. Активними названо системи компенсації з використанням напівпровідникових перетворювачів, які відслідковують криві струмів та напруг у реальному часі. За результатами аналізу даних таблиці отримано співвідношення, що відповідають варіантам реалізації компенсаторів та враховують їх можливості. Шляхом прямих та зворотніх  $p-q-r$  перетворень з додаванням складової струму, що регулює передачу активної потужності, отримано вираз для розрахунку струмів компенсатора для трифазних трипроводних систем «мережа живлення-навантаження»:

$$\begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} = \frac{-1}{\Delta} \begin{bmatrix} u_{bc}^2 & u_{ca}u_{bc} & u_{ab}u_{bc} \\ u_{bc}u_{ca} & u_{ca}^2 & u_{ab}u_{ca} \\ u_{bc}u_{ab} & u_{ca}u_{ab} & u_{ab}^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{3(\Delta p - \tilde{p})}{(u_{ab} - u_{bc})^2 + (u_{bc} - u_{ca})^2 + (u_{ca} - u_{ab})^2} \begin{bmatrix} u_{ab} - u_{ca} \\ u_{bc} - u_{ab} \\ u_{ca} - u_{bc} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

де  $\tilde{p} = p - P_{\tilde{n}0}$ ;

$\Delta = u_{ab}^2 + u_{bc}^2 + u_{ca}^2$ ,  $p = u_A i_a + u_B i_b + u_C i_c$   $P_{cp}$  – усереднена на інтервалі повторюваності активна потужність,  $\Delta p$  – додаткова активна складова потужності для регулювання напруги буферного джерела та забезпечення власних потреб компенсатора.

Використання миттєвих значень лінійних напруг мережі визначає застосування даного виразу для компенсації струмів трифазного навантаження, коли у вимірюваній системі відсутні нульовий провід та інформація про фазні напруги мережі. Визначено, що трифазне навантаження з нульовим проводом створює умови для появи небажаних складових потужності, усунення яких вимагає використання компенсаторів з використанням буферного джерела активної потужності та керуванням струмами нульової послідовності. За допомогою прямих та зворотніх  $p-q-r$  перетворень і з врахуванням всіх небажаних складових потужності отримано вираз:

$$i_{Ca,b,c} = (P_{cp} + \Delta p) \cdot (u_A^2 + u_B^2 + u_C^2)^{-1} u_{A,B,C} i_{a,b,c}. \quad (2)$$

В умовах несиметрії та несинусоїдальності напруг мережі живлення компенсація небажаних складових за виразом (2) створює умови, при яких отримуються виключно несинусоїдальні струми мережі [2]. Щоб уникнути цього, необхідно здійснити перехід від миттєвих до інтегральних значень модулів векторів, а також фільтрувати миттєві значення напруг, за якими розраховується струм компенсатора:

$$i_{Ca,b,c} = (P_{cp} + \Delta p) \cdot \Delta_u^{-1} u_{A,B,C}^1 i_{a,b,c}, \quad (3)$$

де  $\Delta_u \sim (u_A^2 + u_B^2 + u_C^2)$  – усереднене значення на інтервалі повторюваності;

$u_{A,B,C}^1$  – відфільтровані миттєві значення напруг мережі живлення (миттєві значення перших

гармонік фазних напруг мережі живлення).

#### Висновки

Отримано співвідношення, які забезпечують спрощений розрахунок струмів компенсатора без застосування перетворень координат. Наведено основні умови появи небажаних складових потужності, що підлягають мінімізації. Визначено необхідність використання інтегральних показників та фільтрації значень миттєвих величин при розрахунку струмів компенсатора в умовах несиметрії та несинусоїдальності напруг мережі живлення.

#### Список літератури

1. Домнин И. Ф., Жемеров Г. Г., Крылов Д. С., Сокол Е. И. Современные теории мощности и их использование в преобразовательных системах силовой электроники // Техн. электродинамика. Темат. выпуск "Проблеми сучасної електротехніки". – 2004. – Ч. 1. – С. 80–91.
2. Михальський В. М., Соболев В. М., Чехет Е. М., Чопик В. В., Шаповал І. А. Особливості формування струмів в системі "мережа живлення з несиметричними напругами – матричний перетворювач" // Техн. электродинамика. Силовая электроника та енергоефективність. – Темат. вип. – 2009. – Ч.1. – С. 16–23.
3. Grzegorz Benysek, Marian Pasko Power Theories for Improved Power Quality (Power Systems). – London: Springer-Verlag. – 2012. – 213 p.

### THE WAYS TO MINIMIZE UNDESIRABLE INSTANTANEOUS POWER COMPONENTS WITH DIFFERENT TOPOLOGIES OF SHUNT ACTIVE FILTER

V. M. Mykhalskyi, S.Y. Polishchuk, V. M. Sobolev, V. V. Chopyk, I. A. Shapoval  
Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine,  
e-mail: [mikhalsky@ied.org.ua](mailto:mikhalsky@ied.org.ua)

*The possibilities of compensation of undesirable components of instantaneous power provided by different topologies of active filters are considered. Ratios which provide a simplified calculation of compensator currents without the use of coordinate transformations have been obtained. The set of components of the instantaneous power, which reflects the p-q-r theory, and provides the basic conditions of their appearance and ways of compensation have been considered.*

**Keywords:** shunt active filter, instantaneous power, unbalance, non-sinusoidal waveform

1. Domnin I.F., Zhemerov H.H., Krylov D.S., Sokol E.I. Modern theories of power and its use in the converter power electronic systems // Tekhnichna elektrodynamika. Problems of the modern electrical engineering. – Temat. vyp. – 2004. – Vol. 1. – P. 80–91. (Rus)
2. Mykhalskyi V.M., Sobolev V.M., Chopyk V.V., Shapoval I.A. Features of currents formation in the "supply network with unbalanced voltages - matrix converter" system // Tekhnichna elektrodynamika. Sylova elektronika ta enerhoeffektyvnist. – Temat. vyp. – 2009. – Vol. 1. – P. 16–23. (Ukr)
3. Grzegorz Benysek, Marian Pasko Power Theories for Improved Power Quality (Power Systems). – London: Springer-Verlag. – 2012. – 213 p.