

СТРАТЕГІЯ МІНІМІЗАЦІЇ НЕБАЖАНИХ СКЛАДОВИХ МИТТЄВОЇ ПОТУЖНОСТІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ РІЗНИХ ТОПОЛОГІЙ ПАРАЛЕЛЬНИХ АКТИВНИХ ФІЛЬТРІВ

В.М.Михальський, докт.техн.наук, **В.М.Соболев**, канд.техн.наук, **В.В.Чопик**, **І.А.Шаповал**, канд.техн.наук

Інститут електродинаміки НАН України,
пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна,
e-mail: mikhalsky@ied.org.ua

Розглянуто сукупність складових миттєвої потужності, які відображає p-q-r теорія. Наведено основні умови появи та можливості компенсації небажаних складових миттєвої потужності за допомогою різних топологій паралельних активних фільтрів. Отримано співвідношення, які забезпечують спрощений розрахунок струмів компенсатора без застосування перетворень координат. Бібл. 7, табл. 1, рис. 8.

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 зі складовою прямої послідовності напруги мережі живлення. Розробки принципів роботи та алгоритмів керування системами фільтрації небажаних складових потужності були започатковані з появою p-q теорії миттєвої потужності [4]. Подальший розвиток цієї теорії здійснювався шляхом розширення її можливостей та створенням підходів до визначення складових миттєвої потужності в різних координатних системах з метою розділення окремих складових, які не відтворюються в базовій p-q та інших теоріях [1–6].

Метою статті є розробка стратегії безпосередніх розрахунків струмів компенсації паралельних активних фільтрів з різною топологією для мінімізації небажаних складових потужності.

Для вирішення поставленої задачі за основу взято p-q-r теорію миттєвих потужностей, оскільки вона відрізняється від базової p-q теорії наявністю додаткової складової, що відокремлює нульову послідовність при розрахунку складових потужностей, і може бути застосована як для трипровідних, так і для чотирипровідних трифазних систем.

Розрахунок миттєвих значень складових потужності здійснюється шляхом почергового використання матричних перетворень миттєвих значень напруг і струмів для представлення їх у різних координатних системах. Математичне перетворення миттєвих значень напруг та струмів у координати $\alpha\beta 0$ здійснюється за допомогою Clarke оператора [4], який представляє собою ортогональну матрицю

$$\begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \\ u_0 \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = K \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad \text{де } K = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \\ 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$u_A, u_B, u_C, i_a, i_b, i_c$ – миттєві значення фазних напруг та струмів відповідно; $u_\alpha, u_\beta, i_\alpha, i_\beta$ – миттєві значення напруг та струмів в координатах $\alpha\beta$; u_0 та i_0 – миттєві значення напруги та струму нульової послідовності. Модуль вектора напруги в $\alpha\beta 0$ координатах представляє собою просторову діагональ системи $(u_\alpha - u_\beta - u_0)$

$$u_{\alpha\beta 0} = \sqrt{u_{\alpha\beta}^2 + u_0^2} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2 + u_0^2} = \sqrt{u_A^2 + u_B^2 + u_C^2} = u_p, \quad (2)$$

де $u_{\alpha\beta} = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2}$ – діагональ прямокутника $(u_\alpha - u_\beta)$ на площині. Перехід до координат p-q-r для струму здійснюється шляхом перемноження отриманого вектора струму $i_{\alpha\beta 0}$ на матрицю коефіцієнтів, нормованих за модулем вектора напруги $u_{\alpha\beta 0}$. В такий спосіб отримуються відокремлені модулі струмів для різних складових потужності. Складові струму в системі координат потужності p-q-r визначаються таким чином:

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} u_\alpha & u_\beta & u_0 \\ -u_\beta \cdot u_{\alpha\beta 0}/u_{\alpha\beta} & u_\alpha \cdot u_{\alpha\beta 0}/u_{\alpha\beta} & 0 \\ -u_0 \cdot u_\alpha/u_{\alpha\beta} & -u_0 \cdot u_\beta/u_{\alpha\beta} & u_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix}. \quad (3)$$

Складові потужності в p-q-r координатах є добутками модуля вектора напруги на складові струму та отримуються наступним способом:

$$\hat{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} p \\ q_q \\ q_r \end{bmatrix} = u_p \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{p} \\ \bar{q} \\ \bar{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{p} \\ \tilde{q} \\ \tilde{r} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

де $\hat{\mathbf{p}}$ – просторовий вектор складових потужностей, u_p – модуль просторового вектора напруг мережі живлення (2), p – миттєва активна потужність, q_q – миттєва реактивна потужність, q_r – миттєва реактивна потужність, що замикається через нульовий провід. Отримані значення складових потужностей повною мірою характеризують енергетичні процеси в системі, де проводиться вимірювання. Тобто, застосування p - q - r теорії дозволяє проаналізувати складові повної потужності у вказаній системі і використовувати отримані значення для аналізу, контролю, метрології та інших потреб. Також, розглядаючи криві миттєвих значень потужності, можна розділити кожну складову потужності в p - q - r теорії на постійну та змінну для кожного виду потужності.

Таким чином, p - q - r теорія оперує складовими потужностями з наступними визначеннями:

\bar{p} – постійна складова активної потужності на інтервалі повторюваності;

\bar{q} – постійна складова реактивної потужності на інтервалі повторюваності, яка відображає додатковий енергообмін між джерелом та навантаженням;

\bar{r} – постійна складова потужності, що замикається через нульовий провід;

\tilde{p} – змінна складова активної потужності, яка споживається навантаженням (представлена як пульсація споживання активної потужності);

\tilde{q} – змінна складова реактивної потужності (представлена як пульсація споживання реактивної потужності, в загальному випадку виявляється при несиметрії і несинусоїдальності напруг мережі живлення чи струмів навантаження);

\tilde{r} – змінна складова потужності, що замикається через нульовий провід (відтворюється при несиметричному навантаженні).

Відповідно до визначення всіх можливих складових потужності p , q , r та їх уявним розділенням на додаткові складові можна стверджувати, що всі складові потужності, крім \bar{p} , які споживає навантаження, є небажаними та спонукають до створення умов для їхньої мінімізації. Зазначені вище складові вимагають роз'яснення умов їхньої появи, причин появи та наслідків їхньої дії в системі «мережа живлення – навантаження». Поява небажаних складових миттєвих потужностей обумовлена властивостями мережі та навантаження. Різновиди мережі можна розбити за трьома основними ознаками: симетрична синусоїдальна, несиметрична синусоїдальна, несинусоїдальна. Навантаження поділено наступним чином: симетричне та несиметричне; з нульовим проводом та без нього. Іншим критерієм для класифікації навантажень є їхня імпедансна характеристика: чисто 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 їхньої мінімізації. Кожний варіант може бути окремо розглянутий з точки зору причин та наслідків виникнення цих складових. У системі «мережа живлення – навантаження», що схематично показана на рис. 1, *а*, за основу взято джерела синусоїдальних та симетричних напруг необмеженої потужності (струми навантаження не викликають спотворення напруг мережі).

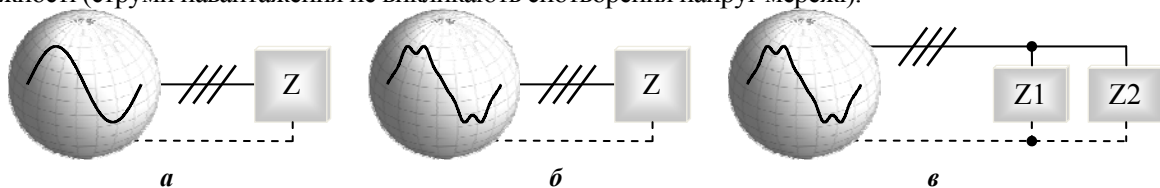


Рис. 1

Негативними явищами в такій системі будуть тільки реактивні і/або несинусоїдальні струми навантаження, що призводять до перевантаження ліній електропостачання. Використання компенсатора на стороні навантаження зменшить перевантаження ліній електропостачання. Іншим випадком є варіант на рис. 1, *б*, коли мережа живлення має обмежену потужність, співрозмірну з потужністю навантаження. Негативними явищами в такій системі будуть реактивні і/або несинусоїдальні струми навантаження, що призводять до перевантаження ліній електропостачання та спотворюють криві напруг мережі. Використання компенсатора на стороні навантаження зменшить перевантаження мережі та усуне спотворення кривих напруги мережі. Третім випадком є ситуація (рис. 1, *в*), коли навантаження розгалужені. Припустимо, що мережа має обмежену потужність, співрозмірну з потужністю навантажень, і при цьому потужність навантаження P_{Z1} значно більша за потужність навантаження P_{Z2} . Також приймемо, що навантаження $Z1$ спотворює криві напруг мережі живлення. В такому випадку навантаження $Z2$ отримує спотворені криві напруг мережі живлення з несиметрією і/або несинусоїдальністю. При цьому, навіть якщо навантаження $Z2$ є симетричним та лінійним, споживані ним стру-

ми можуть бути несиметричними та несинусоїдальними, а крива активної потужності буде з пульсаціями. Основні умови появи небажаних складових потужності та вибір тих, що підлягають мінімізації, зведено в таблицю.

		Складові потужності						Складові, що мінімізуються
		\bar{p}	\bar{q}	\bar{r}	\tilde{p}	\tilde{q}	\tilde{r}	
мережа		○	○	◇	○	○	◇	
навантаження		○	○	◇	○	○	◇	
3-и 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-и 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						$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$
		RLC						$\bar{q}, \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$
		S+RLC						$\bar{q}, \tilde{r}, \tilde{p}, \tilde{q}, \tilde{r}$

Типи навантаження позначені як «R», «RLC» та «S+RLC» (нелінійне навантаження з ключовими елементами). Сірим кольором позначено клітинки, які відповідають наявності вказаних складових потужності за даних умов. В останню колонку зведено складові потужності, які підлягають мінімізації для зазначених типів навантаження. Символами «○» «◇» та «◇» позначено характеристики мережі живлення: «○» – симетрична синусоїдальна, «◇» – несиметрична синусоїдальна, «◇» – несиметрична несинусоїдальна.

Як видно з таблиці, для типових систем «мережа живлення – навантаження» в переважній більшості випадків циркулюють складові потужності, які повинні бути мінімізовані. Причому, як правило, небажані складові потужності можна мінімізувати лише з використанням активних фільтрів (активного способу). Пасивні системи компенсації дозволяють мінімізувати лише постійну складову реактивної потужності \bar{q} . До пасивних належать системи компенсації реактивної потужності з використанням статичних компенсаторів, найхарактернішими з яких є комутовані конденсаторні батареї, активними названо системи компенсації з використанням напівпровідникових перетворювачів, які

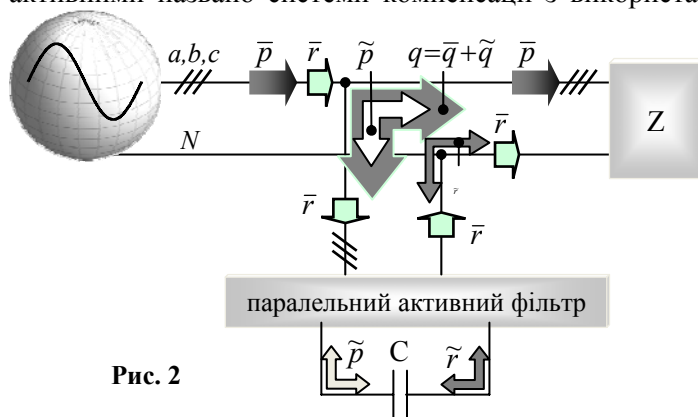


Рис. 2

відслідковують криві струмів та напруг у реальному часі. На рис. 2 схематично представлено циркуляцію складових миттєвої потужності в системі «мережа живлення – навантаження з паралельним активним фільтром».

Розрахунок струму, який може компенсувати небажані складові потужності, здійснюється шляхом зворотного $p-q-r$ перетворення складових потужності, взятих з від'ємним знаком. В загальному випадку струми компенсації в системі координат $p-q-r$ розраховуються наступним чином:

$$\begin{bmatrix} i_{Cp} \\ i_{Cq} \\ i_{Cr} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_p} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot (-\tilde{\mathbf{p}}) = \frac{1}{u_p} \cdot \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta p - \tilde{p} \\ -\tilde{q} - \tilde{q} \\ -\tilde{r} - \tilde{r} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

де Δp – деяка частина активної потужності, яку може споживати чи віддавати компенсатор. Вона використовується буферним джерелом (ємнісний накопичувач) та споживається компенсатором для врахування активних втрат та забезпечення власних потреб. Крім того, даний параметр використовується як регульована змінна, що впливає на рівень напруг буферного джерела; $\tilde{p} = p - P_{cp}$, де

$P_{cp} = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt$ – середнє значення активної потужності на періоді частоти мережі,

$p = u_A \cdot i_a + u_B \cdot i_b + u_C \cdot i_c$. Після цього здійснюється подальше зворотне перетворення для отримання струмів компенсації в системі координат $\alpha\beta 0$. За допомогою зворотного перетворення Clarke отримуємо необхідні фазні струми компенсації i_{Ca}, i_{Cb}, i_{Cc} :

$$\begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} = K^T \cdot \begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \\ i_{C0} \end{bmatrix}, \quad \text{де} \quad \begin{bmatrix} i_{C\alpha} \\ i_{C\beta} \\ i_{C0} \end{bmatrix} = \frac{1}{u_{\alpha\beta 0}} \begin{bmatrix} u_{\alpha} & -u_{\beta} \cdot u_{\alpha\beta 0} / u_{\alpha\beta} & -u_0 \cdot u_{\alpha} / u_{\alpha\beta} \\ u_{\beta} & u_{\alpha} \cdot u_{\alpha\beta 0} / u_{\alpha\beta} & -u_0 \cdot u_{\beta} / u_{\alpha\beta} \\ u_0 & 0 & u_{\alpha\beta} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{Cp} \\ i_{Cq} \\ i_{Cr} \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Перетворення миттєвих значень напруг та струмів в системах $p-q-r$ координат і в зворотному напрямку з коригуванням складових потужності в практичному застосуванні вимагають значних обчислень у реальному часі на кожному модуляційному періоді. Тому для практичного застосування актуальними будуть такі вирази, за якими після отримання миттєвих значень енергетичних параметрів вимірюваної системи розраховуються миттєві значення струмів компенсатора без надлишкових просторових перетворень. З використанням виразу (5) для розрахунку струмів компенсатора можна врахувати всі небажані складові потужності. Як буде показано нижче, при такому підході цикл математичних перетворень може бути значно спрощено. Але слід зазначити, що дана стратегія розрахунку може бути використана для компенсаторів, які мають у своєму складі відповідний накопичувач енергії (для компенсації пульсацій активної потужності) та потенціальний зв'язок з нульовим проводом мережі для формування струмів нульової послідовності. Компенсація небажаних складових миттєвої потужності і розрахунок струмів компенсатора повинні здійснюватись у відповідності з топологією силової схеми компенсатора з врахуванням можливостей, які вона забезпечує. Тобто, при розрахунку струмів компенсатора потрібно користуватись такими складовими миттєвої потужності, якими може оперувати дана топологія силової схеми. Відповідні спрощення розрахунків отримуються при деяких припущеннях та використанні варіантів топологій силових схем фільтрів, для яких дані спрощення припустимі. За результатами аналізу даних таблиці отримуються співвідношення, що відповідають варіантам реалізації компенсаторів та враховують їхні можливості.

Для трифазного трипровідного навантаження складові потужності \bar{q} та \tilde{q} є основними, що підлягають компенсації. Для їхнього виділення у вираз (5) записується наступний вектор складових потужностей $\hat{\mathbf{p}}$:

$$\hat{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -q \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (7)$$

За рахунок використання миттєвих значень виключно лінійних напруг мережі живлення повний цикл математичних перетворень при розрахунку струмів компенсатора може бути спрощено таким чином:

$$\begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} = \frac{-1}{\Delta} \begin{bmatrix} u_{bc}^2 & u_{ca}u_{bc} & u_{ab}u_{bc} \\ u_{bc}u_{ca} & u_{ca}^2 & u_{ab}u_{ca} \\ u_{bc}u_{ab} & u_{ca}u_{ab} & u_{ab}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad \text{де} \quad \Delta = u_{ab}^2 + u_{bc}^2 + u_{ca}^2, \quad \begin{matrix} u_{ab} = u_A - u_B \\ u_{bc} = u_B - u_C \\ u_{ca} = u_C - u_A \end{matrix}. \quad (8)$$

Використання миттєвих значень лінійних напруг мережі підкреслює застосування даного виразу для компенсації струмів трифазного трипровідного навантаження, коли у вимірюваній системі відсутня інформація про фазні напруги мережі. Для практичної реалізації у виразі (8) потрібно передбачити регулювання активної складової потужності для підтримання заданого рівня напруги буферного джерела. Наступний вираз отримано шляхом зворотніх $p-q-r$ перетворень з додаванням складової, що регулює передачу активної потужності:

$$\hat{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} \Delta p \\ -q \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \text{звідки} \quad \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} = \frac{-1}{\Delta} \begin{bmatrix} u_{bc}^2 & u_{ca}u_{bc} & u_{ab}u_{bc} \\ u_{bc}u_{ca} & u_{ca}^2 & u_{ab}u_{ca} \\ u_{bc}u_{ab} & u_{ca}u_{ab} & u_{ab}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{3\Delta p}{(u_{ab}-u_{bc})^2 + (u_{bc}-u_{ca})^2 + (u_{ca}-u_{ab})^2} \begin{bmatrix} u_{ab}-u_{ca} \\ u_{bc}-u_{ab} \\ u_{ca}-u_{bc} \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Якщо в компенсаторі існує можливість накопичувати та віддавати активну складову потужності або отримувати її ззовні, то для компенсації пульсацій активної потужності вираз (10) перетворюється таким чином:

$$\hat{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} \Delta p - \tilde{p} \\ -q \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \text{звідки} \quad \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} = \frac{-1}{\Delta} \begin{bmatrix} u_{bc}^2 & u_{ca}u_{bc} & u_{ab}u_{bc} \\ u_{bc}u_{ca} & u_{ca}^2 & u_{ab}u_{ca} \\ u_{bc}u_{ab} & u_{ca}u_{ab} & u_{ab}^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{3(\Delta p - \tilde{p})}{(u_{ab}-u_{bc})^2 + (u_{bc}-u_{ca})^2 + (u_{ca}-u_{ab})^2} \begin{bmatrix} u_{ab}-u_{ca} \\ u_{bc}-u_{ab} \\ u_{ca}-u_{bc} \end{bmatrix}. \quad (10)$$

Як показано в таблиці, трифазне чотирипровідне навантаження створює умови для появи більшості небажаних складових, усунення яких вимагає застосування компенсаторів з примусовим формуванням струмів у нульовому проводі. На рис. 2 показано, що компенсація складової \tilde{r} може бути здійснена без використання накопичувача енергії, в той час як компенсація складової \tilde{r} можлива лише за наявності такого накопичувача. У випадку відсутності буферного джерела компенсація струму нульової послідовності відбуватиметься за рахунок формування несинусоїдального струму мережі таким чином, щоб утримувався баланс миттєвої активної потужності, споживаної з мережі

$$\tilde{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} 0 \\ -q \\ -r \end{bmatrix}, \quad \text{звідки} \quad \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} = \frac{p}{u_A^2 + u_B^2 + u_C^2} \cdot \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Так, для ситуації, коли необхідно компенсувати всі небажані складові потужності з використанням топології компенсатора, який має потенціальний зв'язок з нульовим проводом у чотирипровідній трифазній системі, алгоритм розрахунку струмів компенсатора в цілому може бути спрощений до більш компактного вигляду з використанням тільки необхідних миттєвих значень фазних напруг та струмів

$$\tilde{\mathbf{p}} = \begin{bmatrix} \Delta p - \tilde{p} \\ -\tilde{q} - \tilde{q} \\ -\tilde{r} - \tilde{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{cp} - p + \Delta p \\ -q \\ -r \end{bmatrix}, \quad \text{звідки} \quad \begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} = \frac{P_{cp} + \Delta p}{u_A^2 + u_B^2 + u_C^2} \cdot \begin{bmatrix} u_A \\ u_B \\ u_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}. \quad (12)$$

В умовах несиметрії і/або несинусоїдальності напруг мережі живлення компенсація небажаних складових за виразами (8)–(12) створює умови, за яких формуються виключно несинусоїдальні струми мережі [2, 7]. Щоб уникнути цього, необхідно здійснити перехід від миттєвих до інтегральних значень суми квадратів миттєвих значень напруг мережі, а також фільтрувати миттєві значення напруг, за якими розраховується струм компенсатора

$$\begin{bmatrix} i_{Ca} \\ i_{Cb} \\ i_{Cc} \end{bmatrix} = \frac{P_{cp} + \Delta p}{\Delta u} \cdot \begin{bmatrix} u^1_A \\ u^1_B \\ u^1_C \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}, \quad (13)$$

де $\Delta u \sim (u_A^2 + u_B^2 + u_C^2)$ – усереднене значення на інтервалі повторюваності, $u^1_{A,B,C}$ – відфільтровані миттєві значення напруг мережі живлення (миттєві значення перших гармонік фазних напруг мережі живлення).

Практична реалізація систем компенсації небажаних складових миттєвої потужності може бути здійснена з використанням різних топологій силових схем. Відмінності, за якими ці топології розрізняють, полягають у способі формування струмів нульової послідовності для чотирипровідних систем та наявності буферного накопичувача або допоміжного джерела активної потужності. На рис. 3 показано структурні схеми компенсаторів, які можуть бути використані лише для компенсації струмів трипровідної трифазної системи навантаження, де відсутній нульовий провід та відповідні складові нульової послідовності для автономного інвертора напруги (АІН) та матричного перетворювача (МП) відповідно.

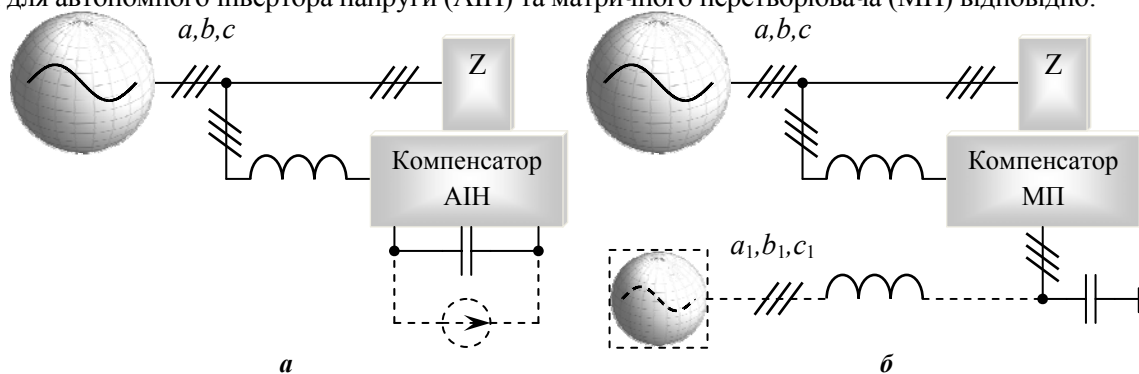


Рис. 3

Представлені на рис. 3 схеми компенсаторів не мають зв'язку з нейтраллю мережі і, навіть якщо в завданні струмів компенсації будуть фігурувати складові нульової послідовності, вони не будуть реалізовані. Компенсація складових нульової послідовності, а саме потужності електроспоживання, що здійснюється через нульовий провід, можлива, коли перетворювач має безпосередній зв'язок з нульовим виводом мережі. На рис. 4 показано варіанти реалізації силових схем компенсаторів, які мають безпосередній чи опосередкований зв'язок з нульовим виводом мережі живлення.

На рис. 4, а, б джерело ЕРС компенсатора потенціально з'єднане з нульовим виводом мережі

для АІН та МП відповідно. На рис. 4, в, з зображено схеми з опосередкованим зв'язком, в яких струм нульової послідовності протікає за рахунок додаткової ланки перетворювача (АІН чи МП). Кожен з представлених варіантів компенсатора має свої переваги та недоліки. Слід зазначити, що наявність струму нульової послідовності свідчить про пульсацію активної потужності, яка споживається навантаженням. Її компенсація може бути реалізована лише за наявності в компенсаторі відповідного накопичувача. Якщо накопичувач активної потужності відсутній, то компенсація струмів нульової послідовності здійснюється за рахунок трансформації пульсацій потужності з однієї фази мережі чи з нульового проводу в сумарну потужність (рис. 2), що неминуче призводить до спотворення струмів мережі. З цих причин доцільним є застосування буфера активної потужності достатньої величини з метою створення умов для формування неспотворених струмів мережі.

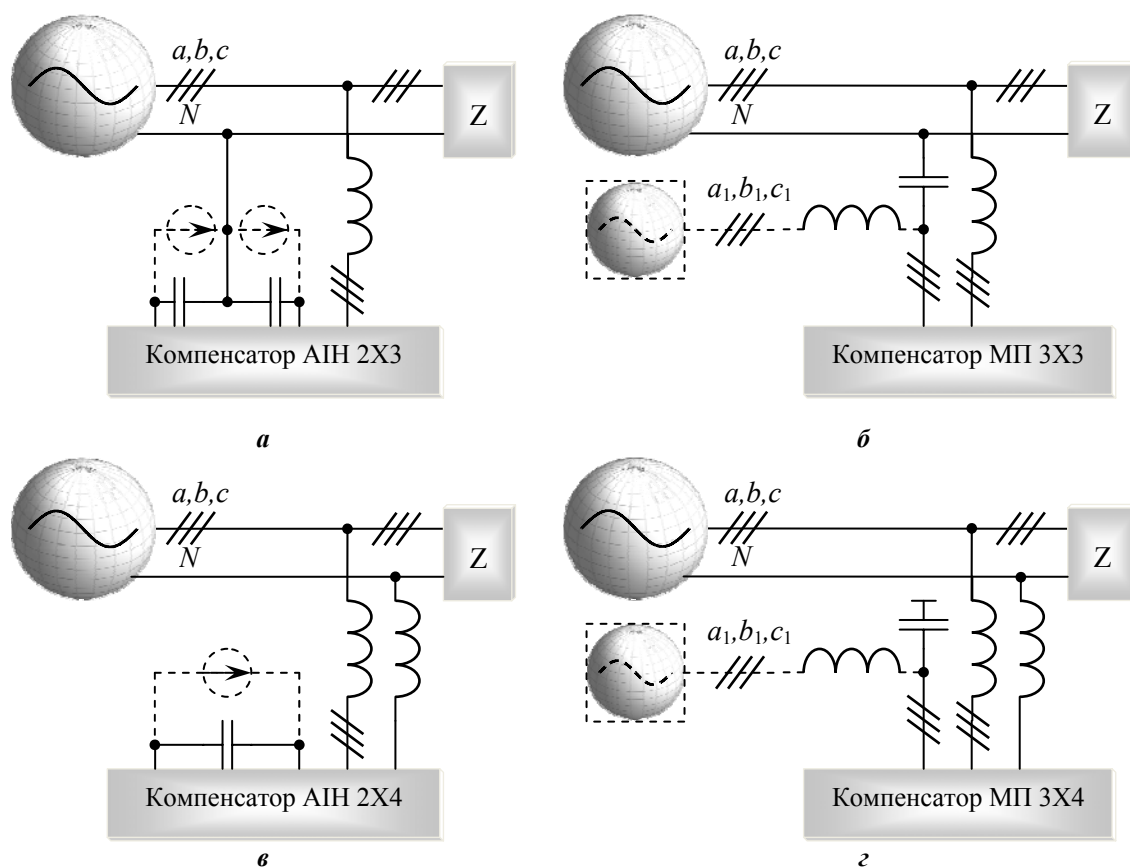
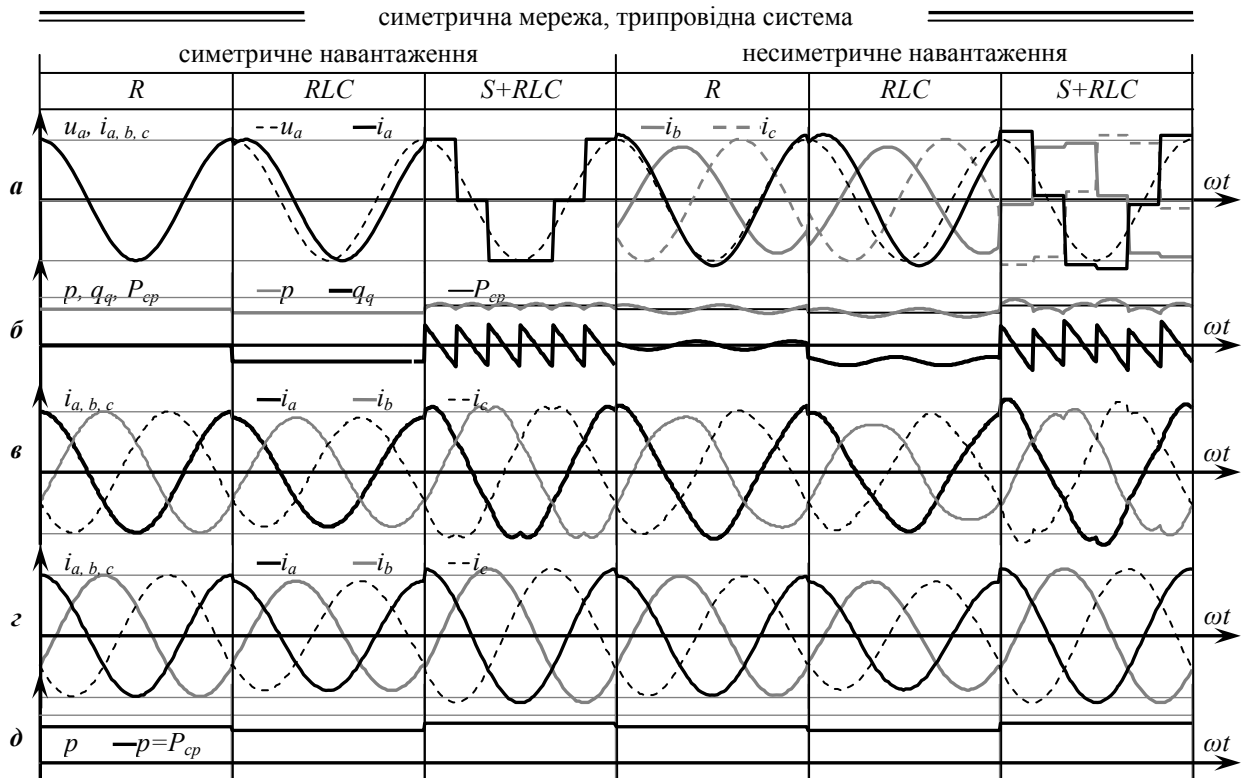


Рис. 4

На рис. 5–8 представлено результати моделювання електромагнітних процесів у системі «мережа живлення – навантаження з паралельно під'єднаним компенсатором». Моделювання проводилося для двох типів мережі: синусоїдальна симетрична (рис. 5, 7) та синусоїдальна несиметрична (рис. 6, 8). Рис. 5, рис. 6 відповідають трипровідному навантаженню, а рис. 7, рис. 8 – чотирипровідному навантаженню. Кожний рисунок розділено на групи за типом навантаження (симетричне та несиметричне), а групи поділено за імпедансною характеристикою як « R », « RLC » та « $S+RLC$ ». Таким чином, результати моделювання охоплюють всі варіанти взаємодій за типами мережі та навантаження, представленими в таблиці. Результати моделювання в умовах несинусоїдальної несиметричної мережі не приводяться, оскільки вони співпадають з результатами для синусоїдальної несиметричної мережі. Метою моделювання є визначення якісних відмінностей при застосуванні виразів (9)–(13) для розрахунку струмів компенсатора в різних умовах, визначення здатності запропонованих математичних підходів коректно коригувати складові миттєвої потужності для формування неспотворених струмів мережі. На рис. 5, а представлено діаграми фазної напруги u_a та струмів навантаження, на рис. 5, б – складові миттєвої потужності, які розраховано з використанням миттєвих значень напруг та струмів для кожного типу навантаження. На рис. 5, в показано результуючі струми мережі при використанні виразу (9) для розрахунку струмів компенсатора, на рис. 5, з – результуючі струми мережі при використанні виразу (10) для розрахунку струмів компенсатора. На рис. 5, д представлено складові миттєвої потужності, які розраховано з використанням миттєвих значень напруг мережі та струмів

мережі, показаних на рис. 5, з. На рис. 6 показано порівняння кривих, аналогічне порівнянню на рис. 5, причому рис. 6, в відповідає виразу (9), рис. 6, з – виразу (10), а рис. 6, д – виразу (13). На рис. 6, е показано складові миттєвої потужності, які розраховано з використанням



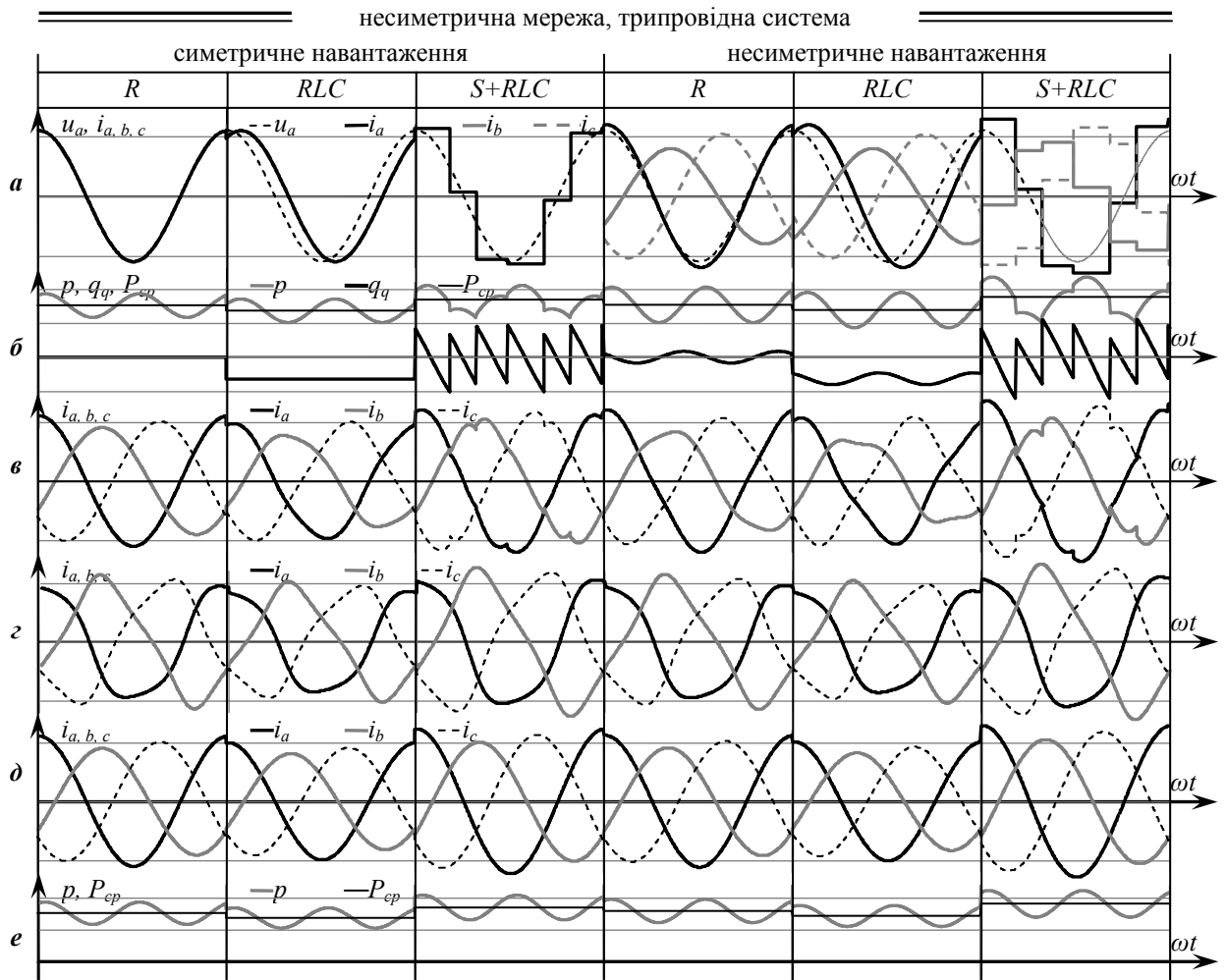


Рис. 6

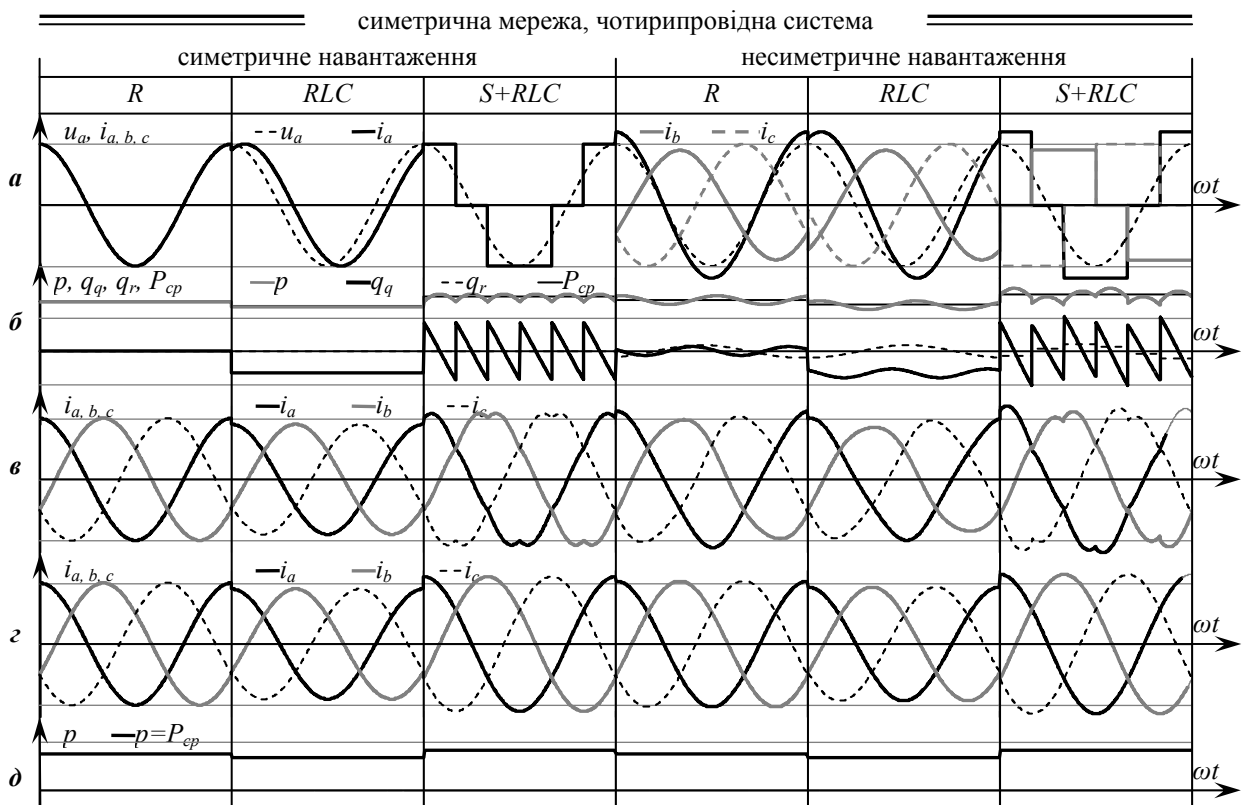


Рис. 7

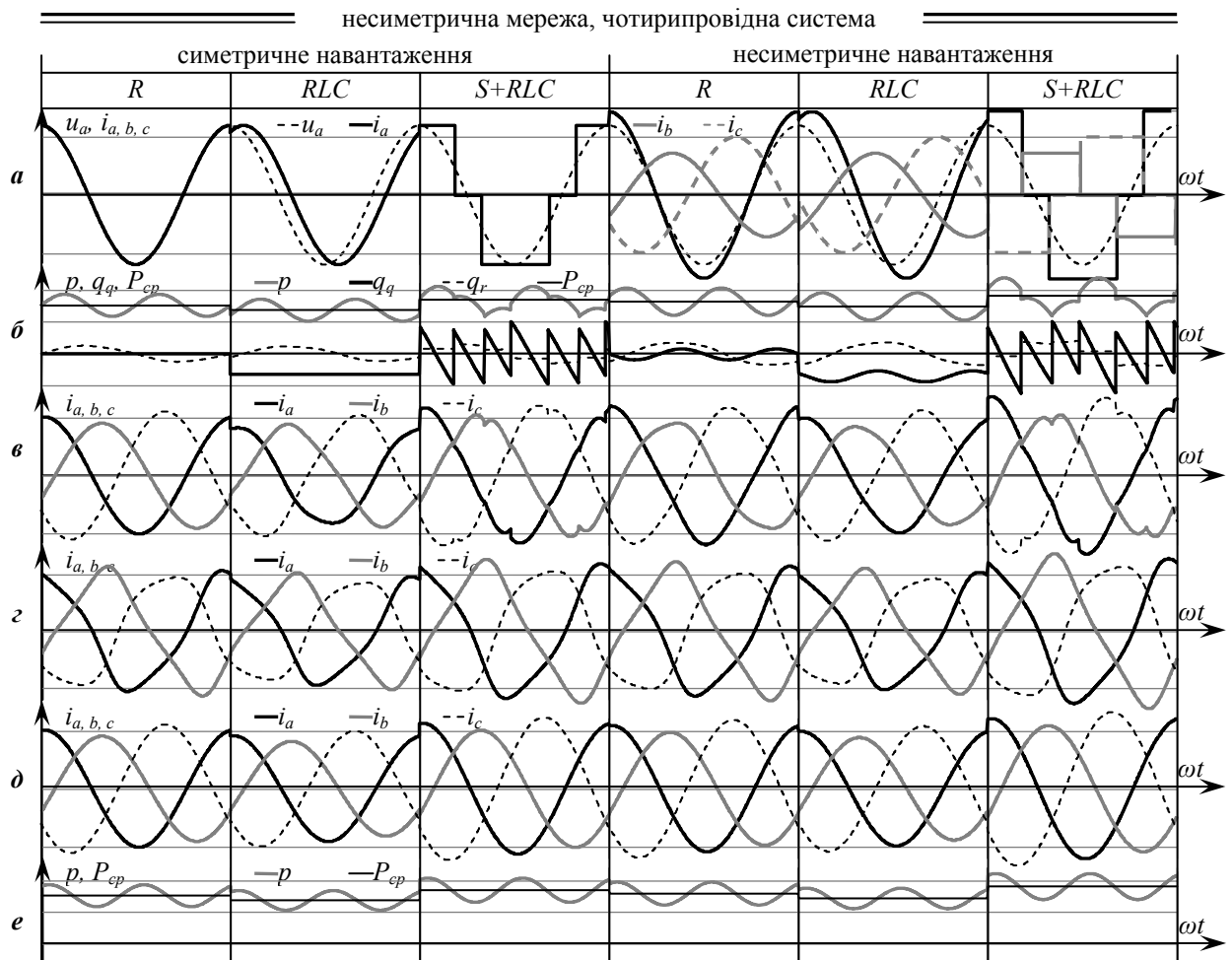


Рис. 8

миттєвих значень напруг мережі та струмів мережі, показаних на рис. 6, *д*. На рис. 7 та 8 відображено результати моделювання, яке проводилося по аналогії з системою з чотирипровідним навантаженням, з використанням послідовного порівняння виразів (11) та (12), рис. 8, *д* відповідає застосуванню виразу (13). На рис. 7, *д* представлено складові миттєвої потужності, які розраховано з використанням миттєвих значень напруг мережі та струмів мережі, показаних на рис. 7, *з*; на рис. 8, *е* – складові миттєвої потужності, які розраховано з використанням миттєвих значень напруг мережі та струмів мережі, показаних на рис. 8, *д*.

Відмінності між кривими, представленими на рис. 5–8, полягають у наявності чи відсутності відповідних складових миттєвої потужності, аналогічно тому, як вони показані в таблиці. При порівнянні рис. 5 та 7, що відображають ситуацію для симетричної мережі при трипровідному або чотирипровідному навантаженні, можна зробити висновок, що відмінності в формі кривих проявляються лише для випадку несиметричного навантаження. За умов симетричного навантаження фазні напруги трипровідної системи навантаження відповідають тим самим напругам для чотирипровідної системи, тобто потенціал нульової точки навантаження дорівнює потенціалу нульового проводу. Однак при несиметрії навантаження в трипровідній системі розподіл фазних струмів змінюється, оскільки порушується рівновага нульового потенціалу. В чотирипровідній системі нульовий потенціал залишається незмінним, але виникає струм нульової послідовності та відповідна складова миттєвої потужності в нульовому проводі. При порівнянні рис. 6 та 8, що відповідають несиметричній мережі з трипровідним чи чотирипровідним навантаженням, зафіксовано відмінності для всіх типів навантажень. Використання нульового проводу змінює розподіл фазних напруг на навантаженні, але в обох випадках система напруг залишається несиметричною. Несиметрія напруг мережі живлення призводить до пульсації активної складової споживаної потужності. Несиметрія ж навантаження призводить до пульсації реактивної складової потужності та збільшення пульсації активної складової. Використання розрахунку струмів компенсації, за яким усувається пульсація активної складової, призводить до формування несинусоїдальних струмів мережі. З порівняння рис. 6, *з* та 8, *з* зроблено висновок про однаковість струму мережі

для симетричного та несиметричного навантаження, оскільки він визначається усередненою активною потужністю та формою кривих напруг мережі живлення, яка незмінна для обох випадків.

Висновки. Розроблена з використанням $p-q-r$ теорії миттєвих потужностей та врахуванням топологічних відмінностей між трифазними трипровідними і чотирипровідними системами (з накопичувачем енергії або без нього) стратегія розрахунку струмів компенсації узгоджується з поставленою метою мінімізації небажаних складових потужності. В роботі наведено основні умови появи небажаних складових потужності, що підлягають мінімізації. Отримані співвідношення забезпечують спрощений розрахунок струмів компенсатора без застосування перетворень координат. Проведено порівняння способів компенсації на основі описаної стратегії та визначено, що електромагнітна сумісність системи «мережа живлення – навантаження» досягається шляхом поєднання миттєвих та інтегральних способів розрахунку струмів компенсатора, тобто усуненням всіх небажаних складових миттєвої потужності. Визначено, що у випадку, коли застосування компенсатора не впливає на форму напруг мережі живлення, доцільно здійснювати перехід до усереднених (інтегральних) показників та фільтрувати значення миттєвих величин при розрахунку струмів компенсатора. Розрахунок струмів компенсатора повинен здійснюватися у відповідності з можливостями його силової схеми, але доцільним є застосування компенсаторів, які здійснюють фільтрацію всіх небажаних складових миттєвої потужності. Результати моделювання підтверджують ефективність отриманих математичних підходів до розрахунків струмів компенсації небажаних складових потужності.

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. Тематичний випуск "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. Особенности формирования струмів в системі "мережа живлення з несиметричними напругами – матричний перетворювач" // Техн. электродинамика. Тематичний випуск "Силовая электроника та енергоефективність". – 2009. – Ч.1. – С. 16–23.

3. Чопик В.В., Михальський В.М., Поліщук С.Й., Соболев В.М., Шаповал І.А. Просторово-векторне керування паралельними активними фільтрами // Техн. электродинамика. – 2013. – №4. – С. 34–41.

4. Akagi H., Kanazawa Y., Nabai A. Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits // Proc. of Int. Power Electronics Conf. – Tokyo (Japan). – 1983. – Pp. 1375–1386.

5. Aredes M., Monteiro Luis F.C., Miguel Jaime M. Control strategies for series and shunt active filters // Proc. of IEEE Bologna Power Tech Conference. – Bologna (Italy). – 2003. – Vol. 2. – P. 6.

6. Grzegorz Benysek, Marian Pasko. Power Theories for Improved Power Quality (Power Systems). – London: Springer-Verlag. – 2012. – 213 p.

7. Popescu M., Bitoleanu A., Suru V. A DSP-based implementation of the $p-q$ theory in active power filtering under nonideal voltage conditions // IEEE Trans. on Industrial Informatics. – Mar. 2013. – Vol. 9. – No.2. – Pp. 880–889.

УДК 621.314

СТРАТЕГИЯ МИНИМИЗАЦИИ НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫХ СОСТАВЛЯЮЩИХ МГНОВЕННОЙ МОЩНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ РАЗЛИЧНЫХ ТОПОЛОГИЙ ПАРАЛЛЕЛЬНЫХ АКТИВНЫХ ФИЛЬТРОВ

В.М. Михальский, докт. техн. наук, В.Н. Соболев, канд. техн. наук, В.В. Чопик, И.А. Шаповал, канд. техн. наук

Институт электродинамики НАН Украины, пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина.

e-mail: mikhalsky@ied.org.ua

Рассмотрена совокупность составляющих мгновенной мощности, которые отображает $p-q-r$ теория. Приведены основные условия появления и возможности компенсации нежелательных составляющих мгновенной мощности с помощью разных топологий параллельных активных фильтров. Получены соотношения, которые обеспечивают упрощенный расчет токов компенсатора без применения преобразований координат. Библ. 7, табл. 1, рис. 8.

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

THE MINIMIZATION STRATEGY OF UNDESIRABLE INSTANTANEOUS POWER COMPONENTS WITH DIFFERENT TOPOLOGIES OF SHUNT ACTIVE FILTER

V.M.Mikhailskyi, V.M.Sobolev, V.V.Chopyk, I.A.Shapoval

Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy pr., 56, Kyiv-57, 03680, Ukraine.

e-mail: mikhalsky@ied.org.ua

The aim of the paper is to develop strategy of direct calculations of compensation currents of the shunt active filter with

different topologies for minimization of undesirable instantaneous power components. The set of instantaneous power components, which $p-q-r$ theory represents, has been considered. Basic conditions for the appearance and possibilities of compensation of undesirable components of instantaneous power using different topologies of shunt active filter have been presented. The topological differences between the three-phase three-wire and three-phase four-wire systems (with and without energy storage) have been considered. Calculation strategy of compensation currents which is consistent with the goal of minimization of undesirable instantaneous power components has been studied. Ratios which provide a simplified calculation of compensator currents without the use of coordinate transformations have been obtained. Simulation results confirm the applicability of the obtained mathematical approaches to calculate the compensator currents. Qualitative differences in the application of expressions for calculation of currents in different conditions have been determined. Boundaries of correct adjustment of instantaneous power components to form undistorted network currents have been defined. References 7, table 1, figures 8.

Key words: 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. Tematychnyi vypusk "Problemy suchasnoi elektrotekhniky"*. – 2004. – Vol. 1. – Pp. 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. Tematychnyi vypusk "Sylova elektronika ta enerhoefektyvnist"*. – 2009. – Vol. 1. – Pp. 16–23. (Ukr)

3. *Chopyk V.V., Mykhalskyi V.M., Polishchuk S.Y., Sobolev V.M., Shapoval I.A.* Space vector control of shunt active filters // *Tekhnichna elektrodynamika*. – 2013. – №4. – Pp. 34–41. (Ukr)

4. *Akagi H., Kanazawa Y., Nabai A.* Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits // *Proc. of Int. Power Electronics Conf.* – Tokyo (Japan). – 1983. – Pp. 1375–1386.

5. *Aredes M., Monteiro Luis F.C., Miguel Jaime M.* Control strategies for series and shunt active filters // *Proc. of IEEE Bologna Power Tech Conference*. – Bologna (Italy). – 2003. – Vol. 2. – P. 6.

6. *Grzegorz Benysek, Marian Pasko.* *Power Theories for Improved Power Quality (Power Systems)*. – London: Springer-Verlag. – 2012. – 213 p.

7. *Popescu M., Bitoleanu A., Suru V.* A DSP-based implementation of the $p-q$ theory in active power filtering under nonideal voltage conditions // *IEEE Trans. on Industrial Informatics*. – Mar. 2013. – Vol. 9. – No.2. – Pp. 880–889.

Надійшла 04.07.2013