

УДК 621.3

УПРАВЛЕНИЕ СИЛОВЫМ АКТИВНЫМ ФИЛЬТРОМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРАВЛЕНИЯ ПОТОКА ЭНЕРГИИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ С НЕЛИНЕЙНОЙ НАГРУЗКОЙ

М. С. Малякова, В. С. Дзюбан, В. П. Колосюк, Т. В. Землянская, И. А. Малякова
Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского
ул. Первомайская, 20, г. Кременчуг, 39600, Украина. E-mail: mariia.maliakova@gmail.com

На основе анализа в аналитическом виде электрической цепи с тиристором предложен метод определения направления потока энергии в электротехнической системе на базе анализа знака соответствующей составляющей активной мощности. Показано, что соответствие знака составляющей активной мощности нагрузки знаку этой же составляющей активной мощности сети означает, что соответствующая гармоника напряжения вызвана искажением сети. Если знаки не совпадают, то соответствующая гармоника напряжения вызвана нелинейной нагрузкой. Следовательно, из гармонического состава напряжения исключаются гармоники, вызванные искажением сети. Таким образом, были определены косинусная и синусная гармонические составляющие напряжения n -й гармоники без учета составляющих напряжения, вызванных искажениями питающей сети. Проведенное моделирование в математическом пакете исследуемой системы, а также анализ полученных численных данных показали эффективность работы предложенного метода и возможность его использования для усовершенствования способа управления силовым активным фильтром с интеграцией системы сепарации в систему управления компенсатором.

Ключевые слова: сеть электроснабжения, система управления, компенсация, анализ, поток энергии.

КЕРУВАННЯ СИЛОВИМ АКТИВНИМ ФІЛЬТРОМ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДУ ВИЗНАЧЕННЯ НАПРЯМУ ПОТОКУ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНІЙ МЕРЕЖІ З НЕЛІНІЙНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

М. С. Малякова, В. С. Дзюбан, В. П. Колосюк, Т. В. Землянська, І. А. Малякова
Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського
вул. Першотравнева, 20, м. Кременчук, 39600, Україна. E-mail: mariia.maliakova@gmail.com

На основі аналізу в аналітичному вигляді електричної мережі з тиристором запропоновано метод визначення напрямку потоку енергії в електротехнічній системі на базі аналізу знака відповідної складової активної потужності. Показано, що відповідність знаку складової активної потужності навантаження знаку цієї ж складової активної потужності мережі означає, що відповідна гармоніка напруги викликана спотворенням мережі живлення. Якщо знаки не співпадають, то відповідна гармоніка напруги викликана нелінійним навантаженням. Відповідно, з гармонічного складу напруги виключаються гармоніки, викликані спотворенням мережі. Таким чином, були визначені косинусна та синусна гармонічні складові напруги n -ї гармоніки без урахування складових напруги, викликаних спотворенням мережі живлення. Проведене моделювання в математичному пакеті системи, що досліджувалась, а також аналіз отриманих чисельних даних показали ефективність роботи запропонованого методу та можливість його використання для вдосконалення способу керування силовим активним фільтром з інтеграцією системи сепарації в систему керування компенсатором.

Ключові слова: мережа живлення, система керування, компенсація, аналіз, потік енергії.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. На сегодня значительно увеличилось количество энергоемких потребителей низковольтных систем электроснабжения. Такое оборудование часто характеризуется нелинейностью своих вольт-амперных характеристик (ВАХ) и несимметричностью параметров по фазам. К таким видам оборудования можно отнести сварочные аппараты, дуговые сталеплавильные печи, регулируемые электроприводы, электрохимические установки и т.д. Работа данных установок приводит к появлению высших гармоник в токах и напряжениях, а также к несимметрии напряжений и токов в системе электроснабжения. При этом увеличиваются потери в трансформаторах, линиях электропередач, конденсаторах компенсаторов реактивной мощности и прочее. Как следствие, снижается эффективность работы низковольтных систем электроснабжения.

Современная экономическая ситуация, в частности повышение стоимости электроэнергии для промышленных предприятий, обуславливает необходимость и актуальность задачи по повышению эффективности компенсации негативных воздействий нелинейного и несимметричного энергоемкого оборудования на низковольтную сеть питания [1]. Для решения этой проблемы применяют различные фильтрокомпенсирующие устройства (ФКУ) – пассивные [2, 3], активные [4, 5] фильтры.

Следует отметить, что пассивные фильтры являются более простыми в проектировании, эксплуатации и более доступными по стоимости. Однако эффективность подавления высших гармоник тока нагрузки, особенно в низкочастотной области, с использованием пассивных ФКУ не всегда удовлетворяет поставленные требования. Также использование пассивных фильтров не позволяет устранить

несимметрию токов нагрузки. Поэтому на сегодня для уменьшения влияния несимметричных и нелинейных нагрузок на сеть питания используют силовые активные фильтры (САФ).

Расчеты компенсационных токов для САФ осуществляются на базе известных теорий мгновенной мощности (ММ): кросс-векторной [4], $p-q$ [5] и $p-q-r$ [3]. Критический обзор литературных источников [7, 8] показал, что каждой из известных теорий присущи определенные достоинства и недостатки.

В работах [6–8] ставятся перед авторами [5] $p-q$ теории мощности очень важные вопросы, а именно: возможно ли качественно идентифицировать свойства трехфазных систем только по двум составляющим p и q , при том, что трехпроводная трехфазная система даже с синусоидными напряжением питания и токами описывается тремя составляющими ММ: активной P , реактивной Q и мощностью искажения D . Особенно этот вопрос касается случая, когда напряжение питания искажено.

Много вопросов возникает при использовании $p-q$ теории ММ для систем с искаженным напряжением питания. Существует мнение [8, 11], что использование $p-q$ теории мгновенной мощности для расчета компенсационных токов САФ в системе с искаженным и несимметричным напряжением питания сомнительно. Это объясняется тем, что интерпретация составляющих мощностей, согласно $p-q$ теории ММ, как, кстати, и других теорий, не дает ответа на вопрос: чем вызвана несинусоидальность и несимметрия – нагрузкой или сетью. В источниках [8, 12, 13] отмечено, что работа САФ на базе $p-q$ теории ММ при искаженных напряжениях сети может вызвать еще большие значения коэффициентов искажения синусоидальности кривых токов после коррекции САФ.

Целью данной работы является определение направления потока энергии в электрических системах с нелинейной нагрузкой для усовершенствования способа управления САФ в условиях искажения напряжения питающей сети.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Необходимо отметить, что на сегодня полупроводниковые преобразователи являются неотъемлемой составляющей практически всех нелинейных электротехнических устройств и систем. С учетом вышесказанного, целесообразно проводить анализ процессов энергопотребления именно на примере цепи с полупроводниковым преобразователем [9, 10].

Необходимо отметить, что авторами данной работы уже была рассмотрена задача уточнения анализа электрических цепей с полупроводниковыми приборами (рис. 1) путем использования метода на основе формирования и аналитического и численного анализа уравнений баланса составляющих ММ в частотной области [10].

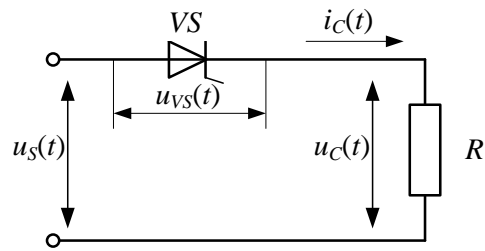


Рисунок 1 – Исследуемая электрическая цепь с тиристором

Для анализа процесса энергопреобразования в исследуемой цепи можно воспользоваться уравнением баланса активной мощности:

$$P_{0S1} = \sum_{k=0}^K P_{0Ck} \quad (1)$$

где P_{0S1} – активная мощность источника питания; P_{0Ck} – k -е составляющие активной мощности нагрузки.

При представлении уравнений баланса через ортогональные составляющие напряжения и тока получим

$$\underbrace{U_{aS1}I_{a1} + U_{bS1}I_{b1}}_{P_0} = U_0I_0 + \underbrace{U_{aC1}I_{a1} + U_{bC1}I_{b1}}_{P_{0C1}} + \sum_{k=2}^K (U_{aCk}I_{ak} + U_{bCk}I_{bk}),$$

или

$$(U_{aS1} - U_{aC1})I_{a1} + (U_{bS1} - U_{bC1})I_{b1} = U_0I_0 + \sum_{k=2}^K (U_{aCk}I_{ak} + U_{bCk}I_{bk}),$$

где I_{an} , I_{bn} – соответственно косинусная и синусная гармонические составляющие тока n -й гармоники; U_{an} , U_{bn} – соответственно косинусная и синусная гармонические составляющие напряжения n -й гармоники.

Приведенное выражение можно интерпретировать следующим образом: уровень составляющих активной мощности от неосновных гармоник напряжений и токов зависит от искажения основной гармоники напряжения на выходе полупроводникового элемента. Под основной гармоникой понимается гармоника, которая по номеру совпадает с гармоникой напряжения идеальной питающей сети. В качестве коэффициента нелинейности полупроводниковых преобразователей можно использовать отношение активной составляющей мощности основной гармоники на нагрузке к активной составляющей мощности этой гармоники на источнике питания:

$$k_{nl} = P_{0C1} / P_{0S1} \quad (2)$$

Для линейного элемента $k_{nl} = 1$, для абсолютно нелинейного – $k_{nl} = 0$. Под абсолютно нелинейным элементом понимается полупроводниковый преобразователь, на выходе которого отсутствуют составляющие тока или напряжений с частотой питающей сети.

Для угла управления $\alpha = 0$, что соответствует схеме с диодом, $k_{nl} = 0,5$ (рис. 1), где на выходе диода отсекается один полупериод напряжения питающей сети.

Таблица 1 – Значение коэффициента нелинейности при различных углах управления

Control angle α	0°	30°	70°	90°	130°
k_{nl}	0,5	0,49	0,41	0,35	0,20

На основе полученного заключения выдвигается предположение, что анализ гармонических составляющих активной мощности позволит определить направление потока энергии в электрической системе [10, 12, 13].

На основании анализа знака соответствующих составляющих активной мощности P_0 (3) предложено определение направления потока энергии в электрической системе с нелинейными элементами:

$$P_0 = P_{01} + P_{02} + \dots + P_{0n}, \quad (3)$$

где $P_{0n} = I_{an}U_{an} + I_{bn}U_{bn}$; n – номер гармоники.

При этом для примера были проанализированы такие конфигурации электрических цепей: неискаженная электродвижущая сила (ЭДС) – линейная нагрузка (рис. 2,а); искаженная ЭДС – линейная нагрузка (рис. 2,б); неискаженная ЭДС – нелинейная нагрузка (рис. 2,в).

Так, для случая электрической цепи с неискаженным ЭДС и линейной нагрузкой (рис. 2,а), когда сигналы тока нагрузки и ЭДС питания имеют в своем составе только первую гармонику \dot{E}_{S1} и \dot{I}_1 соответственно, активная мощность P_0 будет состоять из P_{01} , которую формирует первая гармоника тока и ЭДС питания.

В случае электрической цепи с искаженной ЭДС (рис. 2,б) ЭДС источника имеет в своем составе первую \dot{E}_{S1} и третью \dot{E}_{S3} гармонические составляющие.

В результате в цепи будут присутствовать первая \dot{I}_1 и третья \dot{I}_3 гармоники тока. Итак, составляющие ЭДС и тока формируют первую P_{01} и третью P_{03} гармонические составляющие активной мощности. Поскольку гармонические искажения вызваны именно ЭДС, а нагрузка имеет линейный характер, то результирующая активная мощность P_0 будет формироваться как сумма $P_{01} + P_{03}$. То есть P_{01} и P_{03} будут иметь тот же знак, что и P_0 . Таким образом, потоки энергии первой и третьей гармоник напряжения будут направлены от сети к нагрузке.

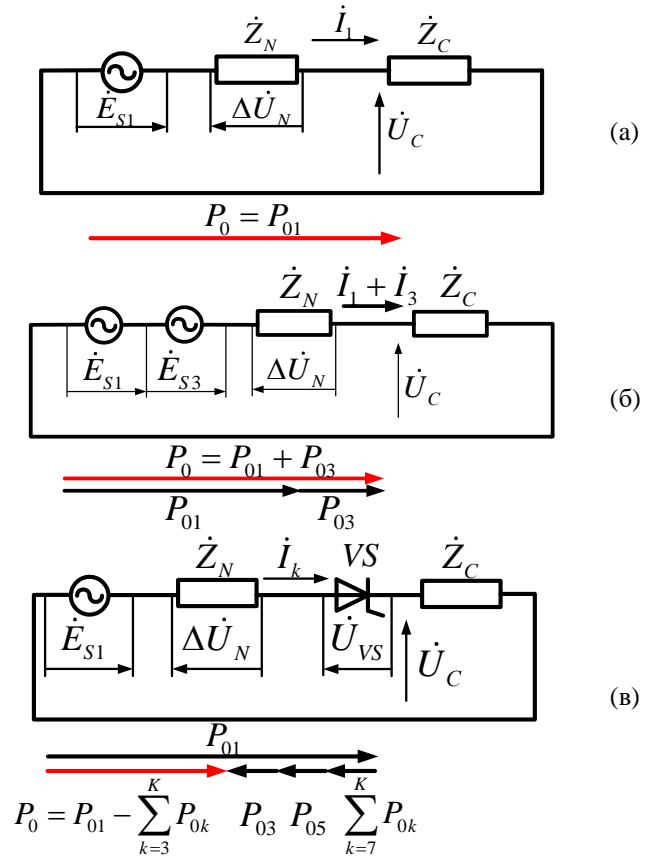


Рисунок 2 – Схемы замещения электрических цепей следующих конфигураций: а) неискаженная ЭДС – линейная нагрузка; б) искаженная ЭДС – линейная нагрузка; в) неискаженная ЭДС – нелинейная нагрузка

В случае, когда цепь имеет в своем составе неискаженную ЭДС и нелинейный элемент, который является генератором высших гармоник (рис. 2,в), первая гармоника ЭДС \dot{E}_{S1} и первая гармоника тока нагрузки \dot{I}_1 сформируют первую составляющую активной мощности P_{01} , которая будет иметь тот же знак, что и P_0 .

Направление потока энергии – от источника к нагрузке. В свою очередь, третья \dot{I}_3 , пятая \dot{I}_5 и k -я \dot{I}_k гармоники тока, сгенерированные нелинейным элементом, будут формировать соответственно третью P_{03} , пятую P_{05} и k -ую P_{0k} составляющие активной мощности. То есть активная мощность P_0 будет определяться как $P_0 = P_{01} - \sum_{k=0}^K P_{0k}$.

Итак, P_{03} , P_{05} и P_{0k} имеют знак, противоположный знаку P_0 . Тогда потоки энергии от третьей, пятой и других k -х составляющих будут направлены в противоположном направлении относительно P_0 и P_{01} , т.е. от нагрузки к источнику питания.

Проведенний в аналітичному вигляді аналіз показав: якщо знак відповідної складової активної потужності збігається з знаком P_0 , це означає, що відповідна гармоніка напруги викликана спотворенням мережі. Якщо знаки не збігаються, то відповідна гармоніка напруги викликана нелінійною навантаженням. Це пояснюється тим, що в разі, коли джерелом спотворень є мережа живлення, струм m -ї гармоніки буде протікати в фазі ($0 \leq \varphi \leq \pi/2$) з відповідною гармонікою напруги навантаження. В разі, коли джерелом спотворень є нелінійна навантаження, струм m -ї гармоніки буде протікати в протифазі ($2\pi \leq \varphi \leq 5\pi/2$) з тією ж гармонікою напруги навантаження.

На основі отриманих результатів [12, 13] було запропоновано вдосконалений спосіб управління САФ для компенсації неактивних складових струмів в умовах несинусоїдності напруги живлючої мережі. При цьому була доведена гіпотеза про те, що з алгоритму розрахунку струмів компенсації необхідно видалити вищі гармонічні складові напруги живлення, які викликані навантаженням, до якого приєднано компенсатор, а напругою живлючої мережі. Такі спотворення можуть бути викликані потужними нелінійними споживачами, які підключені ближче до джерела живлення. Для реалізації запропонованого авторами методу було розроблено спосіб управління компенсатором з використанням системи сепарації (СС) вищих гармонік напруги, які викликані протіканням струмів навантаження, а спотворенням джерела живлення. Дана СС інтегрована в систему управління (СУ) компенсатором. Алгоритм реалізації запропонованого способу управління компенсатором показано на рис. 3.

В відповідності з представленим алгоритмом виконуються наступні дії. На вхід СС подаються сигнали струму навантаження: $i_a(t)$, $i_b(t)$, $i_c(t)$ і напруги живлення $u_a(t)$, $u_b(t)$, $u_c(t)$. З використанням прямого швидкого перетворення Фур'є (ПБПФ) здійснюється перехід в частотну область. Це дозволяє визначити гармонічний склад струмів і напруги в точці підключення компенсатора. Визначення гармонік напруги, викликаних гармонічними спотвореннями мережі, в СС відбувається за рахунок аналізу знаку відповідної частотної складової активної потужності P_0 . Якщо знак відповідної частотної складової P_{0n} збігається з знаком активної потужності P_0 ($F = 1 \text{ sign}(P_0) = \text{sign}(P_{0n})$), це означає, що відповідна гармоніка напруги живлення U_n викликана спотворенням мережі. Якщо знаки не збігаються, $F_{sign} = 0$, відповідна гармоніка напруги живлення викликана протіканням несинусоїдальних струмів нелінійною навантаженням.

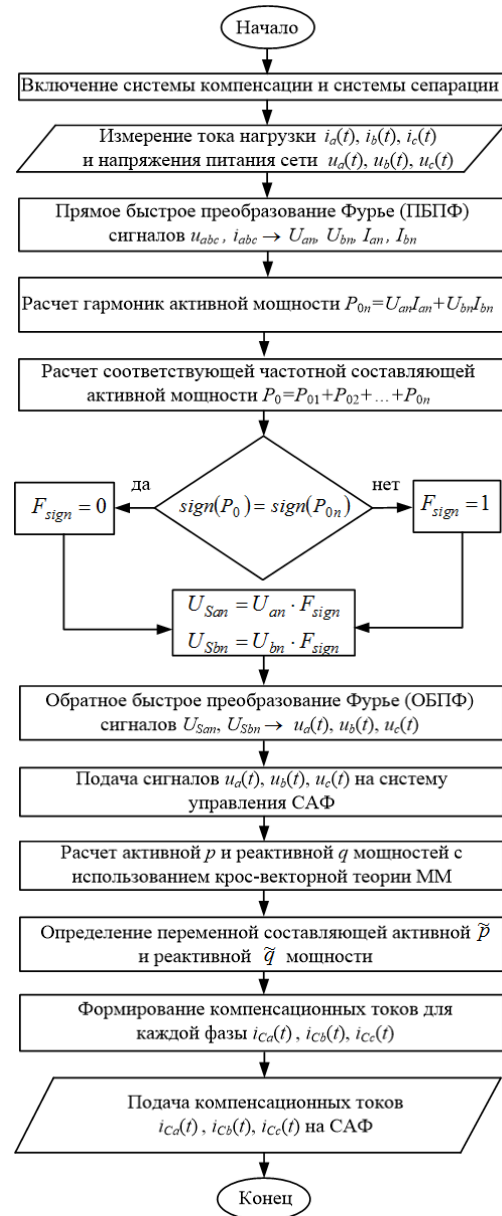


Рисунок 3 – Алгоритм реалізації способу управління САФ з СС

Під час виконання операції множення відповідно косинусних і синусних гармонічних складових напруги на F_{sign} ($U_{an} F_{sign}$, $U_{bn} F_{sign}$) з гармонічного складу напруги виключаються гармоніки, викликані спотворенням мережі. Таким чином, визначаються U_{San} , U_{Sbn} – відповідно косинусна і синусна ортогональні гармонічні складові напруги n -ї гармоніки без урахування складових напруги, викликаних спотвореннями живлючої мережі, т.е. з отриманого гармонічного складу напруги виключаються гармоніки, викликані спотворенням мережі.

Далі з використанням зворотного швидкого перетворення Фур'є (ОБПФ) здійснюється пе-

реход в область времени. После выполненных данных операций полученные сигналы $u_a(t)$, $u_b(t)$, $u_c(t)$ без гармонических составляющих, вызванных искажением напряжения питающей сети, подаются на систему управления САФ, где выполняется расчет активной p и реактивной q ММ, а также их переменных составляющих \tilde{p} , \tilde{q} . Далее, в соответствии с кросс-векторной теорией ММ, реализуется расчет компенсационных токов для каждой фазы $i_{ca}(t)$, $i_{cb}(t)$, $i_{cc}(t)$.

Рассмотрим работу разветвленного участка сети электроснабжения с нелинейной нагрузкой в условиях, когда напряжение питания искажено влиянием более мощного нелинейного потребителя, подключенного ближе к источнику [14]. При моделировании в математическом пакете MATLAB были получены кривые тока до и после работы САФ (рис. 4).

При работе классического компенсатора (рис. 4, II) улучшение формы сигналов тока не происходит, а даже наоборот, работа компенсатора ухудшает форму тока. При компенсации с разработанным способом управления (рис. 4, III) удается достичь синусоидальной формы сигналов токов с достаточным быстродействием компенсатора.

Для подтверждения эффективности предложенного метода усовершенствования процесса компенсации путем сепарации высших гармоник напряжения во время моделирования были рассчитаны и приведены значения показателей работы сети (табл. 2) [15, 16], что иллюстрирует уменьшение коэффициента искажения синусоидальности сигнала тока THD_I и, соответственно, напряжения THD_U .

Таблица 2 – Показатели работы САФ в сети с искаженным напряжением питания и нелинейной нагрузкой

Параметр Режим	ΔU , В	THD_U , %	THD_I , %	\tilde{q}_{rms} , ВА	\tilde{p}_{rms} , ВА	Q , вар	ΔP , Вт	ΔP_k , Вт	η , %	η_k , %
До компенсации	32,2	11,84	10,8	$3,68 \cdot 10^4$	$1,45 \cdot 10^4$	$-9,04 \cdot 10^4$	$1,86 \cdot 10^4$	$1,89 \cdot 10^4$	68,1	67,7
После компенсации	32,2	9,59	14,15	$1,59 \cdot 10^4$	$0,31 \cdot 10^4$	7950	$1,51 \cdot 10^4$	$1,51 \cdot 10^4$	72,4	72,3
После компенсации с СС	26,8	10,48	0,1	$1,49 \cdot 10^4$	$1,51 \cdot 10^4$	-8	$1,21 \cdot 10^4$	$1,21 \cdot 10^4$	72,4	72,4

ВЫВОДЫ. Проведенный в работе анализ в частотной области знака соответствующей составляющей активной мощности исследуемой цепи с нелинейной нагрузкой позволил разработать метод определения направления потока энергии в электрической системе. Было показано, что если знак соответствующей составляющей активной мощности совпадает со знаком активной мощности, это означает, что соответствующая гармоника напряжения вызвана искажением сети. Если знаки не совпадают, то соответствующая гармоника напряжения вызвана нелинейной нагрузкой.

Предложенный метод был положен в основу усовершенствования способа управления САФ с интеграцией СС в СУ компенсатором. Эффектив-

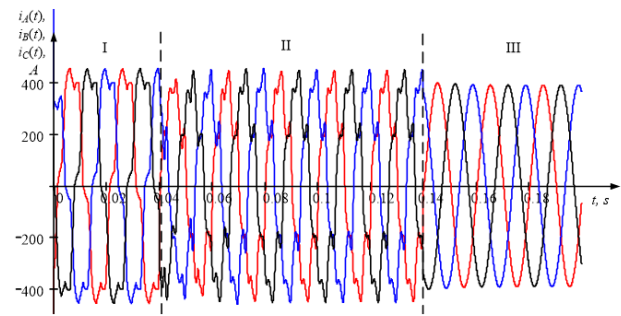


Рисунок 4 – Токи сети до (I), после (II) включения САФ и после включения САФ, управляемого предложенным способом (III)

Также наблюдается значительное уменьшение падения напряжения ΔU на сопротивлениях сети и среднеквадратического значения тока I_{rms} , увеличение значения активной мощности сети P_0 . Анализ изменения составляющих мгновенной мощности демонстрирует уменьшение уровня переменных составляющих активной \tilde{p}_{rms} и реактивной \tilde{q}_{rms} мощностей, а также постоянной составляющей реактивной мощности Q после компенсации. Также при исследовании режимов компенсации определялись потери на активных сопротивлениях сети питания без учета вытеснения токов ΔP и с учетом вытеснения токов в проводниках сети путем увеличения активного сопротивления ΔP_k . Соответственно, с рассчитанными значениями потерь в сети рассчитывались коэффициенты полезного действия исследуемой системы электроснабжения η и η_k .

ность использования такого способа управления компенсатором при компенсации неактивных составляющих тока в условиях гармонических искажений напряжения питания была подтверждена результатами численного моделирования.

ЛИТЕРАТУРА

1. IEEE Std. 1459-2010 Trial-Use Standard, IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.
2. Salmerón P., Litrán S.P. Improvement of the Electric Power Quality Using Series Active and Shunt Passive Filters // IEEE Transactions On Power Delivery. – 2010. – Iss. 25 (2).

3. Ginn H.L., Czarnecki L.S. An optimization based method for selection of resonant harmonic filter branch parameters // *IEEE Transactions on Power Delivery*. – 2006. – Iss. 21 (3). – PP. 1445–1451.
4. Kim H., Blaabjerg F., Bak-Jensen B., Choi J. Instantaneous Power Compensation in Three-Phase Systems by Using p–q–r Theory // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – Iss. 17 (5). – 2002. – PP. 701–710.
5. Akagi H., Watanabe E.H., Aredes M. Instantaneous power theory and applications to power conditioning // Wiley-Interscience a John Wiley & Sons, Inc. Publication, Mohamed E.El, Hawary, ISBN 978-0-470-10761-4, 2007.
6. Czarnecki L.S. Comments to the paper: Instantaneous p–q Theory for Compensating Nonsinusoidal Systems // *Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review)*. – Iss. 85 NR 6/2009. – 2009. – PP. 167–169.
7. Czarnecki L.S. On Some Misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p–q Theory // *IEEE Transactions on Power Electronics*. – Iss. 19/2004 (3). – PP. 828–836.
8. Czarnecki L.S., Samuel S. Pearce CPC-based comparison of compensation goals in systems with nonsinusoidal voltages and currents // *International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*. – Poland: Łagow, 2010. – PP. 27–36.
9. Zagirnyak M., Maliakova M., Kalinov A. Analysis of electric circuits with semiconductor converters with the use of a small parameter method in frequency domain // *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*. – Iss. 34/2015 (3). – PP. 808–823.
10. Zagirnyak M., Maliakova M., Kalinov A. Analysis of instantaneous power components of electric circuit with a semiconductor element // *Archive of Electrical Engineering*. – Iss. 62/2013 (3). – PP. 473–486.
11. Mulla M.A., Chudamani R., Chowdhury A. Series, Hybrid, Active Power Filter for Mitigating Voltage Unbalance and Harmonics under Unbalanced Non-Sinusoidal Supply Conditions // *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, 2–5 December 2012. – Kota Kinabalu Sabah, Malaysia, 2012. – PP. 671–676.
12. Zagirnyak M., Maliakova M., Kalinov A. Analysis of operation of power components compensation systems at harmonic distortions of mains supply voltage // *Proceedings 2015 ACEMP–OPTIM–Electromotion 2015 Joint Conference*. – Side, Turkey, 2015. – PP. 355–362.
13. Zagirnyak M., Maliakova M., Kalinov A. Compensation of higher current harmonics at harmonic distortions of mains supply voltage // *Proceedings 2015 16th International conference on computational problems of electrical engineering (CPEE)*. – Lviv, Ukraine, 2015. – PP. 245–248.
14. Землянська Т.В. Компенсація неактивних складових струму систем електропостачання в умовах несинусоїдності напруги мережі живлення // *Збірник тез доповідей Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузі «Електротехніка та електромеханіка»*. – Дніпродзержинськ: ДДТУ, 2016. – С. 125–126.
15. Землянська Т.В. Удосконалення системи компенсації негативного впливу на мережу живлення роботи індукційної печі опору в умовах ливарного цеху ПАТ «АвтоКрАЗ» // *Збірник тез доповідей Всеукраїнського конкурсу студентських наукових робіт з галузі «Електротехніка та електромеханіка»*. – Кам'янське: ДДТУ, 2017. – С. 115–116.
16. Землянська Т.В. Підвищення ефективності компенсації неактивних складових струму при роботі тигельної печі опору в умовах ливарного виробництва ПАТ «АвтоКрАЗ» // *Електромеханічні та енергетичні системи, методи моделювання та оптимізації. Збірник наукових праць XV Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених та спеціалістів у місті Кременчук 11–12 квітня 2017 р.* – Кременчук, КрНУ, 2017. – С. 119–120.

ACTIVE POWER FILTER CONTROL WITH THE USE OF THE METHOD FOR THE ENERGY FLOW DIRECTION DETERMINATION IN THE ELECTRIC CIRCUIT WITH THE NONLINEAR LOAD

M. Maliakova, V. Dzyuban, V. Kolosyuk, T. Zemlianskaya, I. Maliakova

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

ul. Pervomayskaya, 20, Kremenchug, 39600, Ukraine. E-mail: mariia.maliakova@gmail.com

Purpose. The purpose of this paper is to determine the direction of the energy flow in electrical systems with nonlinear load for the improvement of the method of controlling power active filters under conditions of voltage distortion of the supply network. **Originality.** On the grounds of the analytical analysis of an electric circuit by a thyristor the method for the determination of the direction of the energy flow in the electric circuit with a nonlinear load on the basis of the analysis of the sign of the active power corresponding component is proposed. **Methodology.** It is demonstrated that the correspondence of the sign of the load active power component to the sign of the same component of the network active power signifies that the corresponding voltage harmonic is caused by the network distortion. If the signs do not coincide, the corresponding voltage harmonic is caused by a nonlinear load. Consequently, harmonics due to distortion of the network are excluded from the harmonic composition of the voltage. Thus, the cosine and sinus harmonic components of the n -th harmonic voltage were determined without taking into account the voltage components caused by the distortions of the power supply network. **Results.** The simulation in the mathematical package of the system under study, as well as the analysis of the obtained numerical data, showed the efficiency of the proposed method and the possibility of its use for the improvement of active power filter control with the integration of the separation system into the system of compensator control.

Key words: power network, control system, compensation, energy flow, analysis.

REFERENCES

1. IEEE Std. 1459-2010 Trial-Use Standard, IEEE Standard Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions.
2. Salmerón, P. and Litrán, S.P. (2010), "Improvement of the Electric Power Quality Using Series Active and Shunt Passive Filters", *IEEE Transactions On Power Delivery*, Vol. 25, no. 2.
3. Ginn, H.L. and Czarnecki, L.S. (2006), "An optimization based method for selection of resonant harmonic filter branch parameters", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 21, no. 3, pp. 1445–1451.
4. Kim, H., Blaabjerg, F., Bak-Jensen, B. and Choi, J. (2002), "Instantaneous Power Compensation in Three-Phase Systems by Using p–q–r Theory", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 17, no. 5, pp. 701–710.
5. Akagi, H., Watanabe, E.H. and Aredes, M. (2007), "Instantaneous power theory and applications to power conditioning," *Wiley-interscience a john wiley & sons, inc. Publication*, Mohamed E.El, Hawary, ISBN 978-0-470-10761-4.
6. Czarnecki, L.S. (2009), "Comments to the paper: Instantaneous p–q Theory for Compensating Nonsinusoidal Systems", *Przegląd elektrotechniczny (Electrical Review)*, R. 85 NR 6/2009, pp. 167–169.
7. Czarnecki, L.S. (2004). "On Some Misinterpretations of the Instantaneous Reactive Power p–q Theory", *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 19, no. 3, pp. 828–836.
8. Czarnecki, L.S. and Pearce, Samuel S. (2010), "CPC-based comparison of compensation goals in systems with nonsinusoidal voltages and currents", *International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*, Łagow, Poland, pp. 27–36.
9. Zagirnyak, M., Maliakova, M. and Kalinov, A. (2015), "Analysis of electric circuits with semiconductor converters with the use of a small parameter method in frequency domain", *COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 34, no. 3, pp. 808–823.
10. Zagirnyak, M., Kalinov, A. and Maliakova, M. (2013), "Analysis of instantaneous power components of electric circuit with a semiconductor element", *Archive of Electrical Engineering*, Vol. 62, no. 3, pp. 473–486.
11. Mulla, M.A., Chudamani, R. and Chowdhury, A. (2012), "Series Hybrid, Active Power Filter for Mitigating Voltage Unbalance and Harmonics under Unbalanced Non-Sinusoidal Supply Conditions" *IEEE International Conference on Power and Energy (PECon)*, 2–5 December 2012, Kota Kinabalu Sabah, Malaysia, pp. 671–676.
12. Zagirnyak, M., Kalinov, A. and Maliakova, M. (2015), "Analysis of operation of power components compensation systems at harmonic distortions of mains supply voltage", *Proceedings 2015 ACEMP–OPTIM–Electromotion 2015 Joint Conference*. Side, Turkey, pp. 355–362.
13. Zagirnyak, M., Kalinov, A. and Maliakova, M. (2015), "Compensation of higher current harmonics at harmonic distortions of mains supply voltage", *Proceedings 2015 16th International conference on computational problems of electrical engineering (CPEE)*, Lviv, Ukraine, pp. 245–248.
14. Zemlianska, T. (2016), "Compensation of nonactive components of current of electric power systems in conditions of non-sinusoidal voltage of a power supply", *Proceedings 2016 Ukrainian competition of student's scientific works in the field of "Electrical engineering and electromechanics"*, Dniprodzerzhinsk, pp. 125–126. (in Ukrainian)
15. Zemlianska, T. (2017), "Improvement of the system of compensation of the negative impact on the power supply network of the induction furnace resistance in the conditions of the foundry shop of PJSC "AvtoKrAZ", *Zbirnyk tez dopovidey Vseukrayinskoho konkursu studentskykh naukovykh robit z haluzi «Elektrotehnika ta elektromekhanika* [Proceedings 2017 All-Ukrainian competition of student's scientific works in the field of "Electrical engineering and electromechanics"], Kamianske, DDTU, pp. 115–116. (in Ukrainian)
16. Zemlianska, T. (2017), "Increasing the efficiency of compensation of inactive components of current at the work of the crucible furnace resistance in the conditions of foundry production of PJSC "AvtoKrAZ", *Zbirnyk naukovykh prats XV Mizhnarodnoyi nauково–tekhnichnoyi konferentsiyi molodykh uchenykh ta spetsialistiv* [Proceedings 15th International scientific and technical conference of young scientists and specialists], Kremenchuk, KrNU, April 11–12, 2017, pp. 119–120. (in Ukrainian)

Стаття надійшла 08.09.2017.