

А.В.Волков, докт.техн.наук (Запорожская государственная инженерная академия), **В.П.Метельский**, канд.техн.наук, **В.А.Волков** (Запорожский национальный технический университет)

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ И ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ СИЛОВОГО АКТИВНОГО ФИЛЬТРА ДЛЯ ЧЕТЫРЕХПРОВОДНОЙ ТРЕХФАЗНОЙ СЕТИ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Выполнен анализ электромагнитных процессов в силовом активном фильтре с релейно-векторным регулированием и осуществлена количественная оценка сетевого коэффициента мощности, асимметрии сетевых фазных токов и снижения сетевых потерь мощности в четырехпроводной сети переменного напряжения с использованием данного фильтра.

Виконано аналіз електромагнітних процесів в силовому активному фільтрі з релейно-векторним регулюванням та здійснено кількісну оцінку коефіцієнта потужності мережі, асиметрії фазних струмів мережі та зниження втрат потужності у чотирипровідній мережі змінної напруги з використанням даного фільтру.

В связи с наблюдающимся в последние годы удорожанием электроэнергии все большее внимание в Украине и за рубежом уделяется энергосбережению в сетях электроснабжения. Общеизвестными основными направлениями решения указанной задачи энергосбережения являются: во-первых, компенсация реактивной мощности (РМ) и мощности искажений (МИ); во-вторых, симметрирование сетевых фазных токов (СФТ). При этом существующие технические средства для компенсации РМ представляют собой: батареи конденсаторов (подсоединенных постоянно или подключаемых периодически с помощью контакторов либо тиристорных коммутаторов), синхронные электрические машины (с регулируемым током возбуждения) или тиристорные компенсаторы реактивной мощности, а устройства для компенсации МИ выполняются на базе резонансных LC-фильтров высших гармоник [3]. В основу же существующих технических средств для симметрирования СФТ в четырехпроводной трехфазной сети переменного напряжения (ТСПН) положены трансформаторно-ключевые устройства и корректирующие устройства с электромагнитными или электрическими связями, устройства с пофазной коррекцией фазных токов (осуществляемой как с помощью подключаемых конденсаторов, так и посредством применения однофазных либо трехфазных тиристорных преобразователей [6], а также – поперечные фильтры с регулируемой индуктивностью [8]). Однако все выше перечисленные технические средства на практике оказываются недостаточно эффективными, так как не обеспечивают высокой точности и быстродействия: во-первых, компенсации РМ и МИ (при изменении во время эксплуатации текущих значений РМ и МИ, потребляемых трехфазными линейными и нелинейными активно-реактивными нагрузками); во-вторых, симметрирования СФТ (при варьировании в процессе эксплуатации степени несимметрии фазных токов несимметричных трехфазных нагрузок).

С появлением в последние годы силовых активных фильтров (САФ) и их промышленным освоением рядом инофирм (ABB, ABS Holdings, Danfoss, Nokian Capacitors и др.) стало возможным не только осуществлять компенсацию РМ и МИ, потребляемых из четырехпроводной ТСПН линейными и нелинейными трехфазными активно-реактивными нагрузками (ТАРН), но и одновременно симметрировать СФТ [2,4,9–11]. Несмотря на отмеченную техническую эффективность САФ, их практическое внедрение сдерживается недостаточностью существующих исследований энергоэффективности их применения. А именно, в известной научно-технической литературе до настоящего времени, несмотря на актуальность и востребованность практикой, вопросам достигаемого энергосбережения в четырехпроводной ТСПН с использованием САФ посвящены лишь единичные работы [2,4]. При этом в известных публикациях совершенно отсутствуют результаты исследований для четырехпроводной ТСПН в части: во-первых, количественной оценки достигнутых с использованием САФ сетевого коэффициента мощности и несимметрии СФТ; во-вторых, достигаемого энергосбережения в указанной сети при питании комбинированных (т.е. одновременно несимметричных, линейных и нелинейных) ТАРН и при несимметрии СФТ не только по амплитудам, но и по электрическим углам; в-третьих, электромагнитных процессов в упрощенной схеме САФ [10,11] (не содержащей подключе-

ния общей точки соединения конденсаторов, установленных на выходе фильтра, к нейтрали сети) с релейно-векторным регулированием [1] и энергоэффективности применения данной схемы и способа регулирования в четырехпроводной ТСПН.

Заметим, что упомянутые упрощенная схема и способ релейно-векторного регулирования на практике более предпочтительны для четырехпроводной ТСПН (по сравнению с более сложной схемой САФ и кросс-векторным управлением, рассмотренными в [4,10]). Во-первых, – из-за отсутствия необходимости перераспределения напряжения на последовательно соединенных конденсаторах (установленных на выходе фильтра) при компенсации тока нейтрали сети (что, в свою очередь, повышает быстродействие и точность симметрирования СФТ и компенсации МИ для несимметричных нелинейных трехфазных нагрузок). Во-вторых, – вследствие исключения при симметричной линейной трехфазной нагрузке инъекции постоянной и переменной составляющих тока (от общей точки соединения упомянутых последовательно соединенных конденсаторов фильтра) в нейтральный провод сети (что, в свою очередь, приводит к дополнительным потерям электроэнергии в сети).

Целью предложенной статьи является анализ электромагнитных процессов в упрощенной схеме САФ [10,11] с релейно-векторным регулированием [1] и количественная оценка сетевого коэффициента мощности, несимметрии СФТ и снижения сетевых потерь мощности, достигнутых с использованием данной схемы САФ для четырехпроводной ТСПН при питании несимметричных нелинейной и линейных ТАРН.

Исследуемая электрическая схема САФ показана на рис. 1 и содержит трехфазный параллельный активный фильтр АФ (соединенный своим выходом с его нагрузкой R_3) и устройство компенсации тока нейтрали (УКТН). При этом упомянутая схема АФ состоит из трехфазного реактора L_3 ; трехфазной мостовой схемы активного выпрямителя (АВ) на IGBT-транзисторах $V_1 - V_6$, шунтированных обратными диодами $V_7 - V_{12}$; фильтрового конденсатора C_2 ; системы управления АФ, выполненной на основе релейно-векторного регулирования [1]. В УКТН входят: IGBT-транзисторы V_{13} и V_{14} , шунтированные обратными диодами V_{15} и V_{16} , однофазный реактор L_4 , компараторы К1, К2 и

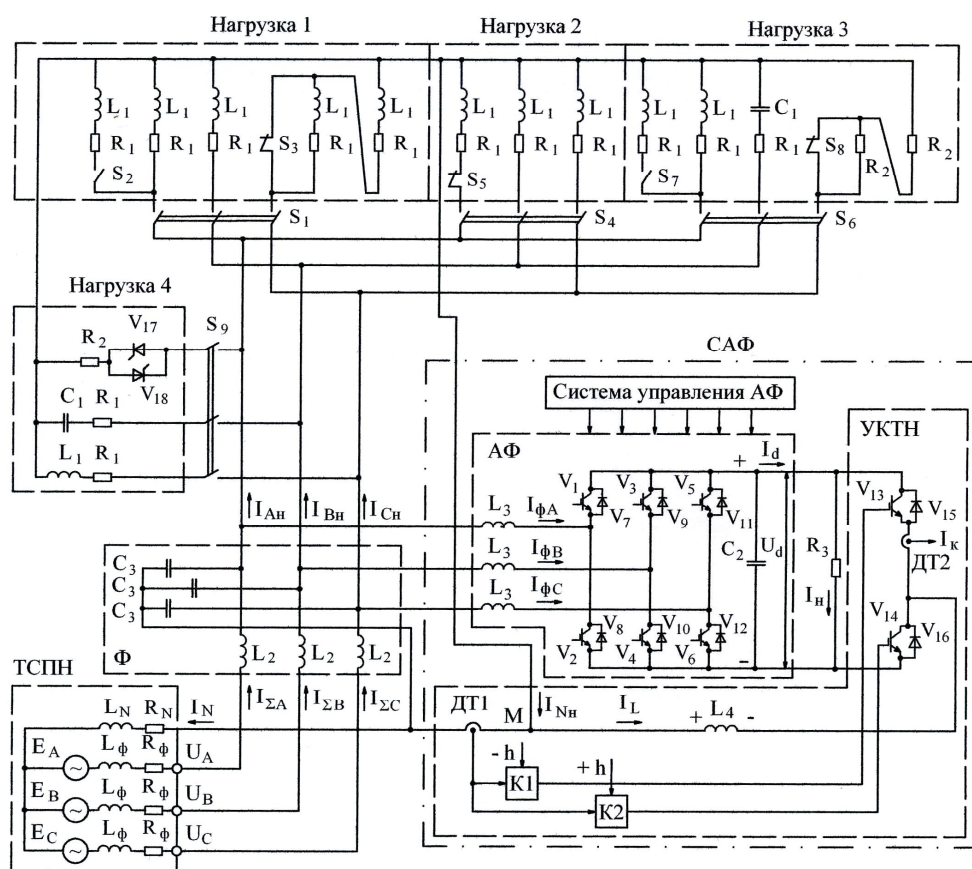


Рис. 1

датчик тока ДТ1, установленный в нейтральном проводе ТСПН. Для уменьшения в сетевых фазных токах высокочастотных составляющих, вызванных переключениями (с частотой от 1 до 10 кГц) силовых ключей $V_1 - V_6$ и V_{13}, V_{14} в САФ, между ТСПН и АФ (с параллельно подключенными к последнему нагрузками 1–4) установлен трехфазный $L_2 - C_3$ фильтр Ф.

Эффективность функционирования рассмотренной схемы САФ исследовалась для различных несимметричных нагрузок 1–4, снабженных нейтраль-

ным выводом, показанных на рис. 1 и характеризующихся следующими видами несимметрии:

– **в нагрузке 1** – амплитудной несимметрией токов для однофазных линейных нагрузок; указанная трехфазная активно-индуктивная нагрузка 1 подключается к ТСПН посредством выключателя S_1 ; в ней амплитудная несимметрия фазных токов однофазных нагрузок (с соотношением между собой соответственно 2:1:0,5 для фаз A, B и C) задается с помощью одновременного замыкания выключателя S_2 и размыкания выключателя S_3 ;

– **в нагрузке 2** – обрывом одной из фаз трехфазной симметричной линейной нагрузки; данная трехфазная активно-индуктивная нагрузка 2 подключается к ТСПН посредством выключателя S_4 ; обрыв фазы A нагрузки осуществляется путем размыкания выключателя S_5 ;

– **в нагрузке 3** – одновременно амплитудной и фазовой несимметрией фазных токов однофазных линейных нагрузок; нагрузка 3 подключается к ТСПН выключателем S_6 ; в ней фазовая несимметрия вызвана различным (активно-индуктивным, активно-емкостным и активным) характером однофазных нагрузок, а амплитудная несимметрия фазных токов однофазных нагрузок (с соотношением токов между собой 2:1:0,5 соответственно для фаз A, B и C) задается путем одновременного замыкания выключателя S_7 и размыкания выключателя S_8 ;

– **в нагрузке 4** – одновременно амплитудной и фазовой несимметрией фазных токов трехфазной нагрузки при введении нелинейности в одну из однофазных нагрузок; нагрузка 4 подключается к ТСПН посредством выключателя S_9 ; введение нелинейности и создание амплитудной несимметрии для одной из однофазных нагрузок (в фазе A) осуществляется путем одновременного изменения угла управления α тиристорами V_{17} и V_{18} от нуля до 90 эл.град.

Проанализируем функционирование УКТН в два этапа: при работе с симметричными и несимметричными трехфазными нагрузками. На первом этапе при питании симметричной трехфазной нагрузки (например, нагрузки 1 при замкнутых состояниях выключателей S_1, S_3 и разомкнутом S_2) от симметричных синусоидальных сетевых фазных напряжений U_A, U_B, U_C в нейтральном проводе такой нагрузки отсутствует ток ($I_{Nn}=0$). Также, очевидно, что при этом равен нулю ток I_N , протекающий в нейтрали питающей сети и контролируемый датчиком тока ДТ1. Оба компаратора К1 и К2 в этом случае формируют на своих выходах сигналы, которые обеспечивают закрытые состояния силовых ключей V_{13} и V_{14} , а, следовательно, – отсутствие тока ($I_L=0$) через реактор L_4 . Одновременно с этим посредством трехфазного АВ формируются близкие к синусоидальным сетевые фазные токи $I_{\Sigma A}, I_{\Sigma B}, I_{\Sigma C}$, а на выходе АВ – постоянное напряжение с полярностью, показанной в схеме на рис. 1 [1].

На втором этапе проанализируем функционирование УКТН при возникновении несимметрии в фазных токах трехфазной линейной нагрузки (например, вызванной замыканием выключателя S_2 и размыканием выключателя S_3), в результате которой в нейтральном проводе нагрузки ток $I_{Nn} \neq 0$. При этом на выходах компараторов К2 или К1 формируются сигналы, при которых открываются силовые ключи V_{14} или V_{13} , отрицательный или положительный потенциал с выхода АВ прикладывается к реактору L_4 , через который протекает ток I_L такого направления и величины, который обеспечивает примерно равный нулю ток в нейтрали питающей сети. Последнее осуществляется за счет автоматической компенсации в узле М (от действия тока I_L реактора L_4) текущего значения тока I_{Nn} , протекающего в нейтрали несимметричной трехфазной нагрузки: $I_L \approx I_{Nn}$. Аналогично функционирует УКТН при возникновении несимметрии фазных токов в нелинейной трехфазной нагрузке.

В результате описанного функционирования УКТН осуществляется эффективное подавление до нуля тока I_N в нейтрали четырехпроводной ТСПН, благодаря чему, очевидно, указанная четырехпроводная ТСПН (при отсутствии тока в ее нейтральном проводе) фактически становится эквивалентной трехфазной ТСПН (не имеющей конструктивно нулевого провода). Это, в свою очередь, является важной предпосылкой для обеспечения эффективного функционирования активного фильтра АФ (работа которого при питании от трехфазной ТСПН в достаточной мере уже исследована и характеризуется хорошими симметрирующими свойствами в отношении СФТ, быстродействующей и точной компенсацией РМ и МИ [1]).

При этом с помощью системы управления АФ (выполненной релейно-векторной согласно [1]) осуществляется во вращающейся ортогональной координатной системе «х-у», ориентированной осью «х» по обобщенному вектору сетевого напряжения \bar{U} , регулирование активной $I_{\Sigma x}$ и реактивной $I_{\Sigma y}$ проекций обобщенного вектора сетевого тока \bar{I}_{Σ} на заданном для них уровне $I_{\Sigma x}^*$ и $I_{\Sigma y}^*$ соответственно:

$$I_{\Sigma x} \approx I_{\Sigma x}^* \quad \text{и} \quad I_{\Sigma y} \approx I_{\Sigma y}^*. \quad (1)$$

В результате данной обработки проекций сетевого тока становятся симметричными и близкими по форме к синусоидальным текущие сетевые фазные токи $I_{\Sigma A}, I_{\Sigma B}, I_{\Sigma C}$, которые для указанного регулирования описываются следующими зависимостями [5]:

$$I_{\Sigma A} \approx I_{\Sigma}^* \cos \Theta_{I\Sigma}^*, \quad I_{\Sigma B} \approx I_{\Sigma}^* \cos(\Theta_{I\Sigma}^* - 2\pi/3), \quad I_{\Sigma C} \approx I_{\Sigma}^* \cos(\Theta_{I\Sigma}^* + 2\pi/3), \quad (2)$$

где I_{Σ}^* и $\Theta_{I\Sigma}^*$ – заданные значения соответственно модуля и аргумента обобщенного вектора сетевого тока.

Заданные значения модуля I_{Σ}^* и аргумента $\Theta_{I\Sigma}^*$ рассчитываются через заданные значения активной $I_{\Sigma x}^*$ и реактивной $I_{\Sigma y}^*$ проекций сетевого тока из соотношений [5]:

$$I_{\Sigma}^* = \sqrt{(I_{\Sigma x}^*)^2 + (I_{\Sigma y}^*)^2}, \quad \Theta_{I\Sigma}^* = \Theta_U + \varphi, \quad (3)$$

где φ – фазовый сдвиг между обобщенными векторами сетевого тока \bar{I}_{Σ} и напряжения \bar{U} , $\varphi = \arctg(I_{\Sigma y}^*/I_{\Sigma x}^*) + 0,5\pi [1 - \text{sign}(I_{\Sigma x}^*)]$; Θ_U – аргумент обобщенного вектора сетевого напряжения \bar{U} , рассчитываемый в виде [5]:

$$\Theta_U = \arctg[(U_B - U_C)/\sqrt{3} U_A] + \pi [1 - \text{sign}(U_A)]/2. \quad (4)$$

Если заданное значение реактивной составляющей сетевого тока равно нулю $I_{\Sigma y}^* = 0$, то (2) преобразуется к следующему виду:

$$I_{\Sigma A} \approx |I_{\Sigma x}^*| \cos \Theta_{I\Sigma}^*, \quad I_{\Sigma B} \approx |I_{\Sigma x}^*| \cos(\Theta_{I\Sigma}^* - 2\pi/3), \quad I_{\Sigma C} \approx |I_{\Sigma x}^*| \cos(\Theta_{I\Sigma}^* + 2\pi/3). \quad (5)$$

Последние зависимости теоретически подтверждают возможность для четырехпроводной ТСПН с использованием рассмотренного САФ одновременно: во-первых, симметризовать СФТ (по амплитуде и с заданным фазовым сдвигом между собой, равным ± 120 эл.град.); во-вторых, приблизить форму СФТ к синусоидальной; в-третьих, эффективно компенсировать РМ и МИ, потребляемые подключенной к четырехпроводной ТСПН трехфазной нагрузкой; в-четвертых, с учетом последнего потреблять из питающей сети практически только активную мощность, $S \approx P$ (где S и P – потребляемые из сети соответственно полная и активная мощности) и активную составляющую сетевого тока $I_{\Sigma}^* \approx |I_{\Sigma x}^*|$; в-пятых, поддерживать между обобщенными векторами сетевых тока \bar{I}_{Σ} и напряжения \bar{U} фазовый сдвиг, равный $\varphi \approx 0$ или $\varphi \approx \pi$ – соответственно при потреблении из сети или при рекуперации активной энергии в сеть.

Для исследуемого электротехнического комплекса, показанного на рис. 1, была создана цифровая имитационная модель, на которой (для параметров САФ, Ф, ТСПН и нагрузок из табл. 1) рассчитаны протекающие в этом комплексе электромагнитные процессы. Временные диаграммы для нагрузок 1, 2, 3 и 4 показаны соответственно на рис. 2 – рис. 5 (на приведенных диаграммах переход к несимметричным режимам осуществляется при текущем времени $t=0,02$ с). На временных диаграммах используются следующие обозначения: U_{An}, U_{Bn}, U_{Cn} – фазные напряжения нагрузки; I_{An}, I_{Bn}, I_{Cn} – фазные токи трехфазной нагрузки; $I_{\phi A}, I_{\phi B}, I_{\phi C}$ – входные фазные токи выпрямителя; I_k – ток, контролируемый датчиком тока ДТ2; U_d и I_d – напряжение и ток на выходе выпрямителя соответственно; I_N и I_{Nn} – токи в нейтрали сети и нейтрали нагрузки соответственно; I_n – ток нагрузочного резистора R_3 . Четырехпроводная ТСПН при моделировании задавалась (согласно схемы на рис. 1) последовательно подключенными: симметричными (со сдвигом на ± 120 эл.град., частотой 50 Гц и амплитудой 310 В) синусоидальными фазными ЭДС E_A, E_B, E_C , индуктивностями L_{ϕ} и L_N , активными сопротивлениями R_{ϕ} и R_N (параметры которых даны в табл. 1).

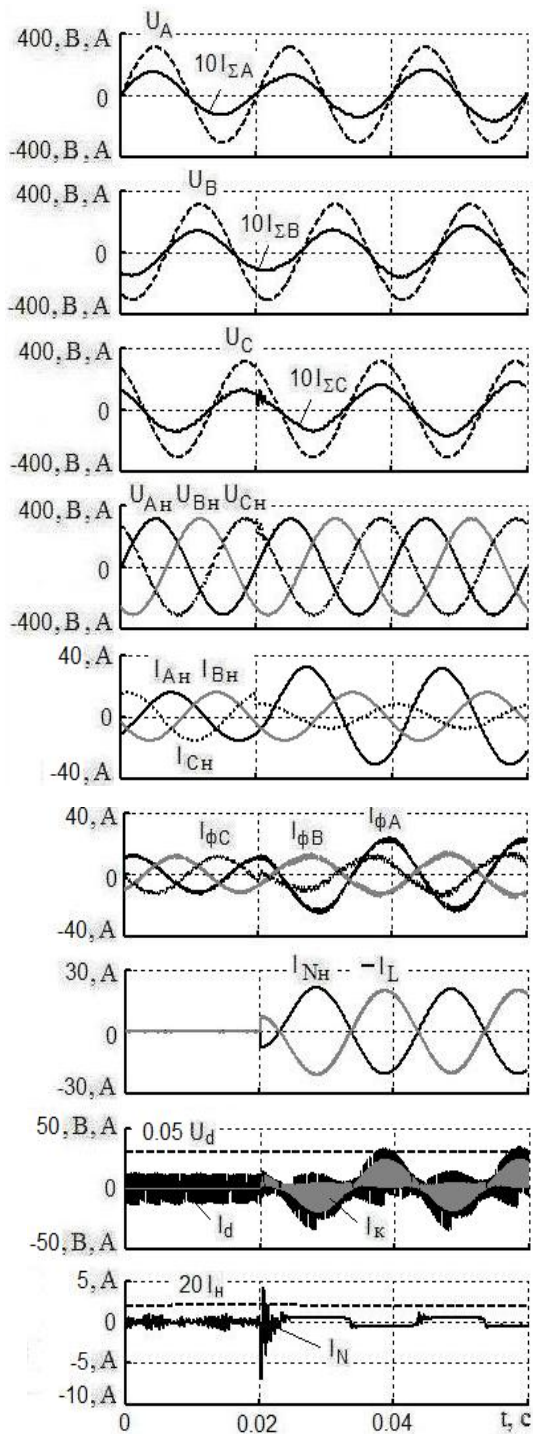


Рис. 2

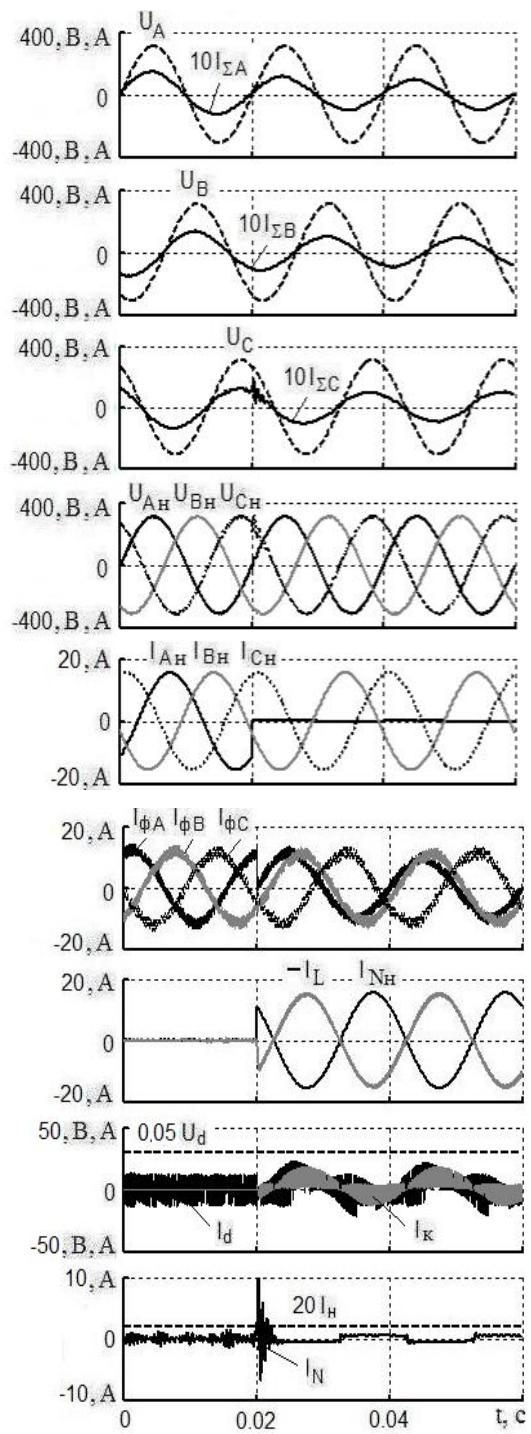


Рис. 3

Таблица 1

Параметр	R_1	R_2	R_3	R_ϕ	R_N	L_1	L_2, L_3	L_4	L_ϕ	L_N	C_1	C_2	C_5	$V_1 - V_6, V_{13}, V_{14}$
Размерн.	Ом	Ом	кОм	Ом	Ом	мГн	мГн	мГн	мГн	мГн	мкФ	мкФ	мкФ	IGBT-модуль
Значение	14.1	20	6	0.01	0.015	45	1	10	0.05	0.02	226	1100	10	PM50C5D 120, 6IGBT 1200V, 50A

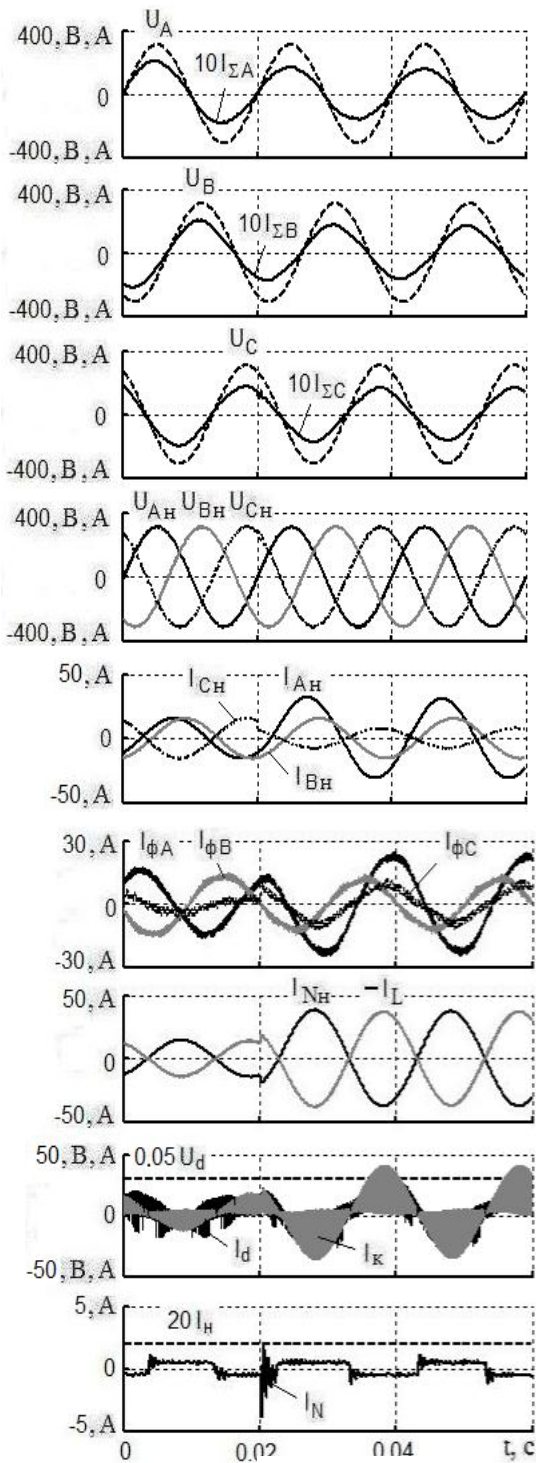


Рис. 4

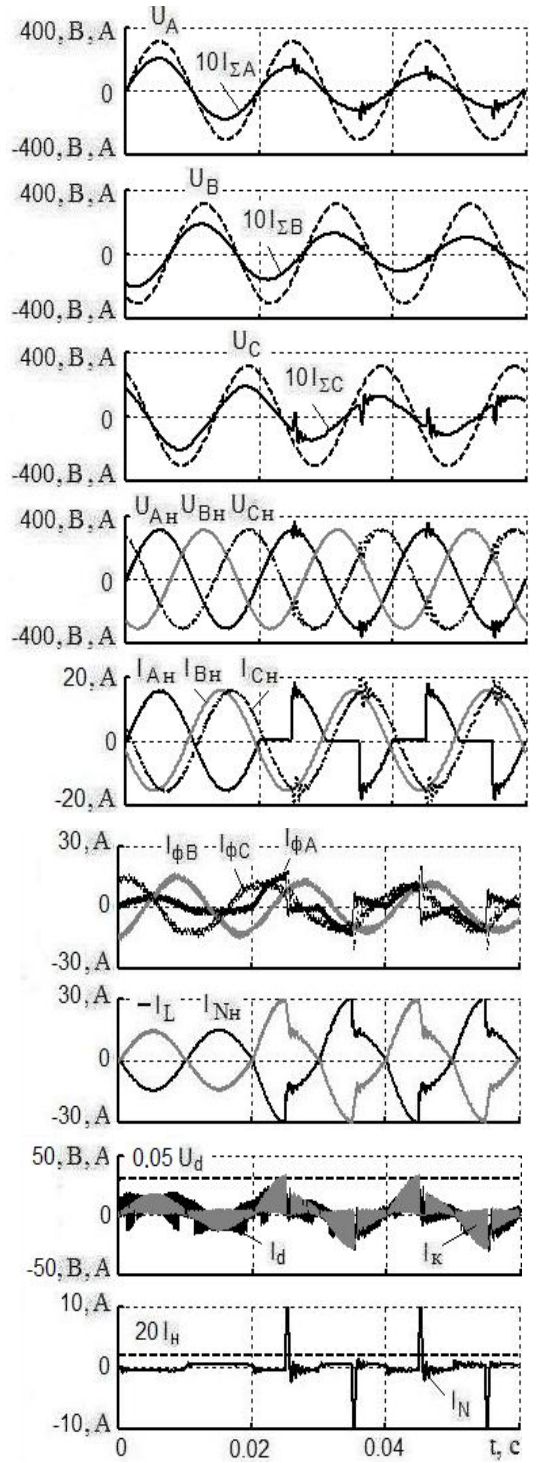


Рис. 5

С учетом [5] рассчитаны значения сетевого коэффициента мощности K_M и коэффициента мощности нагрузки K'_M :

$$K_M = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} (U_A I_{\Sigma A} + U_B I_{\Sigma B} + U_C I_{\Sigma C}) dt}{U_{\Delta d} I_{\Sigma \Delta d} + U_{Bd} I_{\Sigma Bd} + U_{Cd} I_{\Sigma Cd}}, \quad K'_M = \frac{P'}{S'} = \frac{\frac{1}{T_1} \int_0^{T_1} (U_{Aн} I_{Aн} + U_{Bн} I_{Bн} + U_{Cн} I_{Cн}) dt}{U_{\Deltaнд} I_{\Deltaнд} + U_{Bнд} I_{Bнд} + U_{Cнд} I_{Cнд}}, \quad (6)$$

а также коэффициентов несимметрии $K_{нт}$ и $K'_{нт}$ соответственно для действующих значений сетевых токов $I_{\Sigma \Delta d}, I_{\Sigma Bd}, I_{\Sigma Cd}, I_{\Sigma Nd}$ и токов трехфазных нагрузок $I_{\Deltaнд}, I_{Bнд}, I_{Cнд}, I_{Nd}$:

$$K_{нт} = \frac{3}{2} \left(\frac{I_{\Sigma д. max} - I_{\Sigma д. min}}{I_{\Sigma Ад} + I_{\Sigma Вд} + I_{\Sigma Сд}} \right), \quad K'_{нт} = \frac{3}{2} \left(\frac{I_{нд. max} - I_{нд. min}}{I_{Анд} + I_{Внд} + I_{Снд}} \right), \quad (7)$$

где $U_{Ад}, U_{Вд}, U_{Сд}$ и $U_{Анд}, U_{Внд}, U_{Снд}$ – действующие значения сетевых фазных напряжений U_A, U_B, U_C и фазных напряжений нагрузок $U_{Ан}, U_{Вн}, U_{Сн}$ соответственно; S' и P' – соответственно полная и активная мощности, потребляемые трехфазной нагрузкой; $T_1 = 0,02$ с – период вычисления (на интервале текущего времени t от 0,04 до 0,06 с на диаграммах рис. 2 – рис. 5) действующих значений фазных токов и напряжений, активных P, P' и полных S, S' мощностей, а также значений K_r и K'_r общего коэффициента гармоник (THD) для фазных (в фазе A) сетевого тока и тока нагрузки соответственно; $I_{\Sigma д. max}$ и $I_{\Sigma д. min}$ – соответственно максимальное и минимальное действующие значения СФТ; $I_{нд. max}$ и $I_{нд. min}$ – соответственно максимальное и минимальное действующие значения фазных токов трехфазной нагрузки. Упомянутые вычисленные (для интервала времени от 0,04 до 0,06 с) сетевые параметры режима исследуемого электротехнического комплекса и параметры режима нагрузок 1–4 приведены в табл. 2 и табл. 3 соответственно.

Таблица 2

Вид нагрузки	Значения параметров (при $t \geq 0.04$ с)							
	$I_{\Sigma Ад}$	$I_{\Sigma Вд}$	$I_{\Sigma Сд}$	$I_{\Sigma Нд}$	K_M	$K_{нт}$	K_r	K_c
Размерность	А	А	А	А	о.е.	%	%	о.е.
нагрузка 1	11,90	11,90	11,92	0,5443	0,997	0,12	2,91	0,4484
нагрузка 2	6,658	6,569	6,912	0,4912	0,993	2,56	3,13	0,3211
нагрузка 3	11,25	11,59	11,38	0,5212	0,997	1,47	3,66	0,2314
нагрузка 4	7,691	7,513	7,945	2,346	0,975	2,77	6,48	0,2599

Таблица 3

Вид нагрузки	Значения параметров (при $t \geq 0.04$ с)						
	$I_{\Sigma Анд}$	$I_{\Sigma Внд}$	$I_{\Sigma Снд}$	$I_{\Sigma Ннд}$	K'_M	$K'_{нт}$	K'_r
Размерность	А	А	А	А	о.е.	%	%
нагрузка 1	21,96	10,99	5,49	14,52	0,7065	64,27	0,08
нагрузка 2	0	10,99	10,99	10,98	0,706	75	0,20
нагрузка 3	21,97	11,01	5,481	26,52	0,7485	64,3	0,08
нагрузка 4	7,810	10,99	11,06	16,64	0,7095	16,33	62,8

Обратим внимание, что введенный авторами в употребление коэффициент несимметрии ($K_{нт}$ или $K'_{нт}$) действующих фазных токов трехфазной системы ныне существующими стандартами на качество электроэнергии [7] не регламентируется. При этом предложено указанный коэффициент несимметрии токов вычислять через действующие значения измеренных (или рассчитанных) фазных токов ($I_{\Sigma Ад}, I_{\Sigma Вд}, I_{\Sigma Сд}$ или $I_{Анд}, I_{Внд}, I_{Снд}$) простым образом: в виде отношения половины разности между наибольшим и наименьшим действующими значениями фазных токов к среднему арифметическому значению всех действующих значений фазных токов. Для трехпроводных ТСПН диапазон изменения данного коэффициента изменяется от нуля (при равных действующих значениях токов $I_{\Sigma Ад} = I_{\Sigma Вд} = I_{\Sigma Сд}$) до 0,75 (что соответствует полному отсутствию тока в одной из фаз). Такое вычисление коэффициента несимметрии фазных токов для трехфазной системы (принимая во внимание возможную на практике в значительной мере более несинусоидальную форму фазных токов по сравнению с формой фазных сетевых напряжений), на наш взгляд, оправдано, так как позволяет производить расчеты предложенного коэффициента несимметрии фазных токов из более простых и точных (вносящих меньшую погрешность расчета) математических зависимостей (чем это предложено в действующем стандарте [7] применительно к расчету коэффициента несимметрии по напряжению, осуществляемому через отношения составляющих обратной и нулевой последовательностей напряжения к составляющей прямой последовательности напряжения).

В заключение рассчитаем достигнутые с помощью предложенного САФ (в результате симметрирования СФТ и компенсации РМ и МИ) значения коэффициента снижения K_c потерь мощности

в четырехпроводной ТСПН из зависимости:

$$K_c = \frac{R_\phi(I_{\Sigma A_d}^2 + I_{\Sigma B_d}^2 + I_{\Sigma C_d}^2) + R_N I_{\Sigma N_d}^2}{R_\phi(I_{A_d}^2 + I_{B_d}^2 + I_{C_d}^2) + R_N I_{N_d}^2} = \frac{I_{\Sigma A_d}^2 + I_{\Sigma B_d}^2 + I_{\Sigma C_d}^2 + \xi I_{\Sigma N_d}^2}{I_{A_d}^2 + I_{B_d}^2 + I_{C_d}^2 + \xi I_{N_d}^2} \quad (8)$$

при различных соотношениях $\xi = R_N / R_\phi$.

Рассчитанные значения коэффициента снижения K_c потерь мощности в функции соотношения ξ показаны кривыми 1, 2, 3 и 4 на рис. 6 применительно к рассмотренным нагрузкам 1, 2, 3 и 4 соответственно, а также приведены в табл. 2 (при $\xi = 1,5$ для параметров ТСПН из табл. 1).

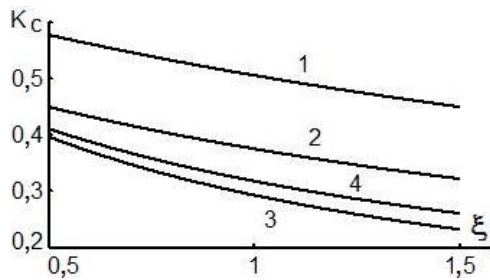


Рис. 6

Выводы. Проведены впервые исследования для упрощенной схемы САФ с релейно-векторным регулированием применительно к нелинейной и линейным ТАРН, характеризующимся несимметрией фазных токов этих нагрузок не только по амплитудам, но и по электрическим углам. Данные исследования свидетельствуют об эффективности симметрирования СФТ и компенсации РМ и МИ в четырехпроводных ТСПН с использованием указанного САФ, что подтверждается согласно табл. 2 следующими показателями: сетевым коэффициентом мощности K_M , составляющим для линейных нагрузок не менее 0,99, а для нелинейной нагрузки – не менее 0,975; коэффициентом несимметрии сетевых токов $K_{нт}$ – менее, чем 2,8 %; общим сетевым коэффициентом гармоник (ТНД) тока K_r – не более, чем 3,66 % – для линейных нагрузок или 6,48 % – для нелинейных нагрузок. Установлено, что с помощью указанных регулирования и схемы САФ в четырехпроводной ТСПН достигается энергосбережение, характеризующееся значениями коэффициента снижения потерь мощности K_c в пределах от 0,2314 до 0,4484. При этом становится возможным (с учетом существенного уменьшения тока в нейтрали) снижение сечения нейтрального провода сети.

1. Волков А.В. Компенсация мощности искажений и реактивной мощности посредством активного фильтра с прогнозируемым релейным управлением // Электротехника. – 2008. – № 3. – С. 2–10.

2. Жемеров Г.Г., Домнин И.Ф., Ильина О.А., Тугай Д.В. Энергоэффективность коррекции фазы тока и компенсации пульсаций активной и реактивной мощностей в трехфазной системе электроснабжения // Техн. электродинамика. – 2007. – № 1. – С. 52–57.

3. Зиновьев Г.С. Основы силовой электроники: Учеб. пособие. – Изд. 2-е, испр. и доп. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2003. – 664 с.

4. Пивняк Г.Г. Современные частотно-регулируемые асинхронные электроприводы с широтно-импульсной модуляцией. – Днепропетровськ: НГУ, 2006. – 470 с.

5. Шидловский А.К. Стабилизация параметров электрической энергии в распределительных сетях. – К.: Наук. думка, 1989. – 312 с.

6. Ильина О.В. Энергозберігаючі напівпровідникові перетворювачі для комунальних мереж електропостачання: дис. ... канд. техн. наук. – Х., 2008. – 199 с.

7. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. – М.: Госстандарт, 1998. – 30 с.

8. Патент № 26699 РФ, МПК⁷ H 02 J 3/26. Устройство для симметрирования токов и напряжений в трехфазной сети с нулевым проводом и саморегулируемой индуктивностью Заявка №2001130410/09 от 09.11.01. Опубл. 27.07.03.

9. Peng F. Harmonic and reactive power compensation based on the generalized instantaneous reactive power theory for three-phase four-wire systems // IEEE Trans Power Electronics. – 1998. – Vol. 13. – № 6. – Pp. 1174–1181.

10. Pettersson S. Applying an LCL-filter to a four-wire active power filter / 37th IEEE Power Electronics Specialists Conference. – 2006. – June, 18–22. – Pp. 1413–1419.

11. Shen D. Fixed-frequency space-vector-modulation control for three-phase four-leg active filters / IEEE Proc.-Electr. Power Appl. – 2002. – Vol. 149. – № 4. – Pp. 268–274.

Надійшла 20.05.2009