

УДК 621.314.621
Ж 85

ФИЛЬТРОКОМПЕНСИРУЮЩЕЕ УСТРОЙСТВО С УПРАВЛЯЕМЫМ РЕАКТОРНЫМ КОМПЕНСАТОРОМ

А.К. Жук, доц., канд. техн. наук;
Д.А. Жук, доц., канд. техн. наук

Национальный университет кораблестроения, г. Николаев

Аннотация. Предложены усовершенствованные схемы управляемого фильтрокомпенсирующего устройства для электроэнергетических систем с полупроводниковыми преобразователями, содержащие управляемый реакторный компенсатор с широтно-импульсным регулированием. Выполнен анализ и предложена методика расчета основных характеристик разработанного компенсатора.

Ключевые слова: фильтрокомпенсирующее устройство, гармоники напряжения, широтно-импульсное регулирование.

Анотація. Запропоновано вдосконалені схеми керованого фільтрокомпенсуючого пристрою для електроенергетичних систем з напівпровідниковими перетворювачами, які містять керований реакторний компенсатор із широтно-імпульсним регулюванням. Виконано аналіз та запропоновано методику розрахунку основних характеристик розробленого компенсатора.

Ключові слова: фільтрокомпенсуючий пристрій, гармоніки напруги, широтно-імпульсне регулювання.

Abstract. The modified schematics of controlled harmonic's and reactive power compensator are proposed in the article. Mentioned schematics include reactor compensator with time-proportional control. The analysis of regulator and methodic of it's characteristics calculation are proposed.

Keywords: reactive power and harmonic compensator, time-proportional control.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Снижение качества электроэнергии в электро-энергетических системах (ЭЭС) с полупроводниковыми преобразователями (ПП) обусловлено двумя факторами: наличием высших гармоник в составе тока, потребляемого нелинейной нагрузкой, и фазовым сдвигом основной гармоники этого тока относительно напряжения сети. В качестве основного средства обеспечения электромагнитной совместимости (ЭМС) автономных, например судовых, ЭЭС и полупроводниковых преобразователей широкое распространение получили сравнительно простые фильтрокомпенсирующие

устройства (ФКУ) на базе пассивных индуктивно-емкостных фильтров, которые обеспечивают как улучшение формы сетевого тока и напряжения, так и компенсацию реактивной мощности. Усовершенствованные методы расчета электромагнитных процессов и показателей качества электроэнергии в автономных ЭЭС с ПП и ФКУ разработаны в [1, 2].

Основным недостатком наиболее распространенных пассивных ФКУ с фиксированными параметрами элементов является их неуправляемость, приводящая при широком диапазоне регулирования нагрузок ПП к возникновению режимов как недокомпенсации реактивной мощности, так

и ее перекомпенсации [3]. Данное обстоятельство вызывает необходимость завышения установленной мощности генераторов и приводит к снижению эффективности и технико-экономических показателей ЭЭС в целом. Указанные отрицательные факторы устраняются при использовании регулируемых ФКУ, которые обеспечивают дополнительные преимущества: уменьшение потерь активной мощности и снижение колебаний напряжения сети.

ЦЕЛЮЮ СТАТЬИ является разработка и анализ усовершенствованной схемы эффективного управляемого ФКУ, отвечающего требованиям ЭМС в условиях переменных нагрузочных режимов ПП.

ИЗЛОЖЕНИЕ ОСНОВНОГО МАТЕРИАЛА

Обобщенная однолинейная схема автономной ЭЭС с ПП и управляемым ФКУ представлена на рис. 1.

На схеме генератор (питающая сеть) представлен синусоидальной ЭДС e_s с амплитудой E_m и сопротивлением короткого

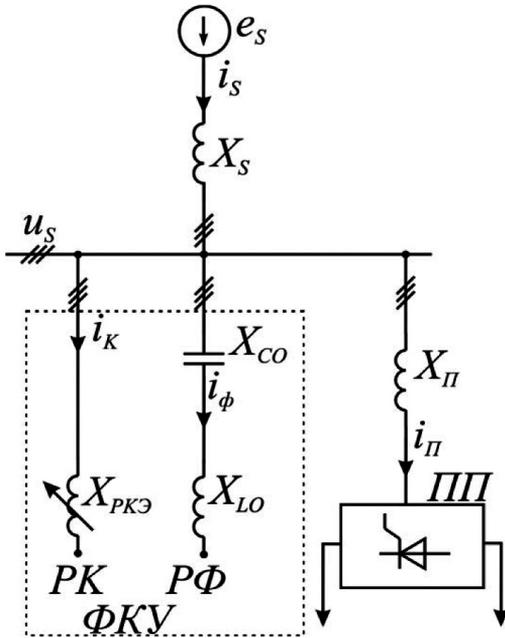


Рис. 1. Обобщенная схема автономной ЭЭС с полупроводниковым преобразователем и управляемым ФКУ

замыкания X_s , трансформатор или входной реактор ПП — сопротивлением $X_{П}$.

В состав ФКУ входит нерегулируемый резонансный LC фильтр (РФ) и управляемый реакторный компенсатор (РК). Каждая из фаз резонансного фильтра, включенных по схеме «звезда», состоит из соединенных последовательно конденсатора и реактора с сопротивлениями X_{CO} и X_{LO} . Порядок частоты настройки РФ соответствует нулю частотной характеристики сопротивления системы и, как правило, выбирается из условия $\xi = \omega_0 / \omega = \sqrt{X_{CO} / X_{P0}} \leq m - 1$, где ω_0 — резонансная частота фильтра; ω — частота сети; m — пульсность ПП.

В [1, 2] показано, что снижение коэффициента искажения синусоидальности напряжения на шинах ЭЭС при включении РФ обусловлено не только полным исключением в токе и напряжении сети гармоник, на которые настроен фильтр, но и существенным снижением гармоник более высоких порядков. Одновременно РФ является генератором реактивной мощности на основной гармонике $Q_{PФ} = U_{Л}^2 / (X_{CO} - X_{P0})$, где $U_{Л}$ — действующее значение линейного напряжения сети ($U_{Л} \approx \sqrt{3/2} E_m$).

Реакторный компенсатор условно показан в виде индуктивного элемента с регулируемым эквивалентным сопротивлением на основной гармонике $X_{PKЭ}$. Компенсатор, фазы которого включены в «треугольник», потребляет реактивную мощность $Q_{PK} = 3U_{Л}^2 / X_{PKЭ}$.

На практике наибольшее применение нашла схема РК, выполненная на основе реакторов с индуктивностью, включенных последовательно со встречно-параллельно соединенными однооперационными тиристорами с фазовым управлением (рис. 2, а) [4]. Временные диаграммы фазного тока данного РК представлены на рис. 3. Действующее значение основной гармоники фазного тока компенсатора определяется из выражения

$$I_{ФК(1)} = \frac{U_{Л}}{\pi X_{LK}} (2\pi - 2\alpha_p + \sin 2\alpha_p),$$

где $X_{LK} = \omega L_K$ — сопротивление реактора компенсатора; α_p — угол регулирования.

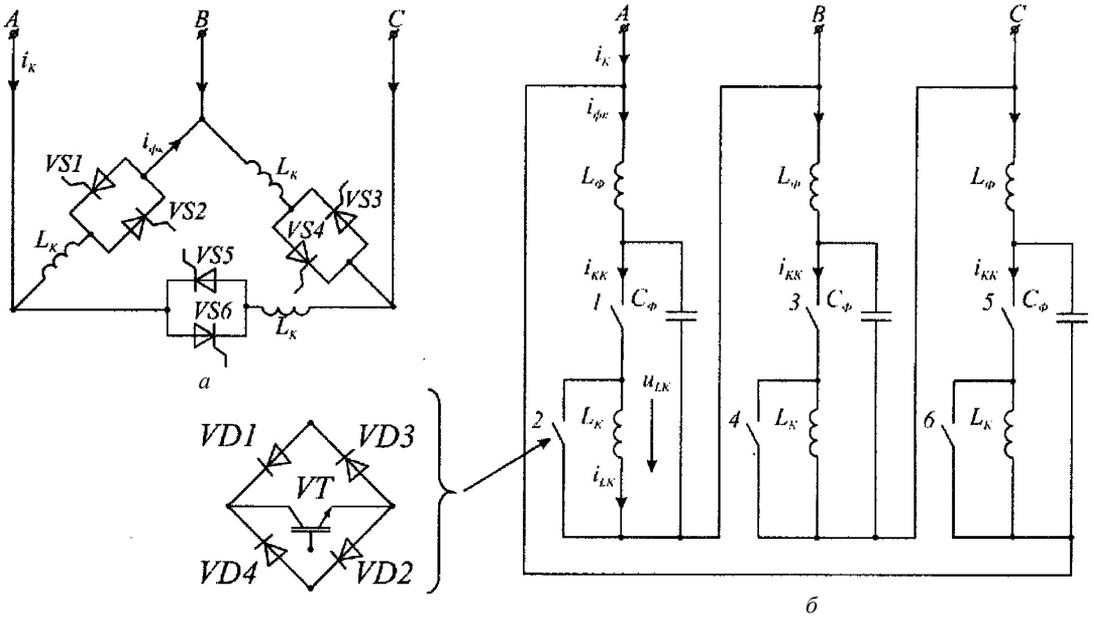


Рис. 2. Схемы реакторных компенсаторов: а — с тиристорными ключами; б — с диодно-транзисторными ключами

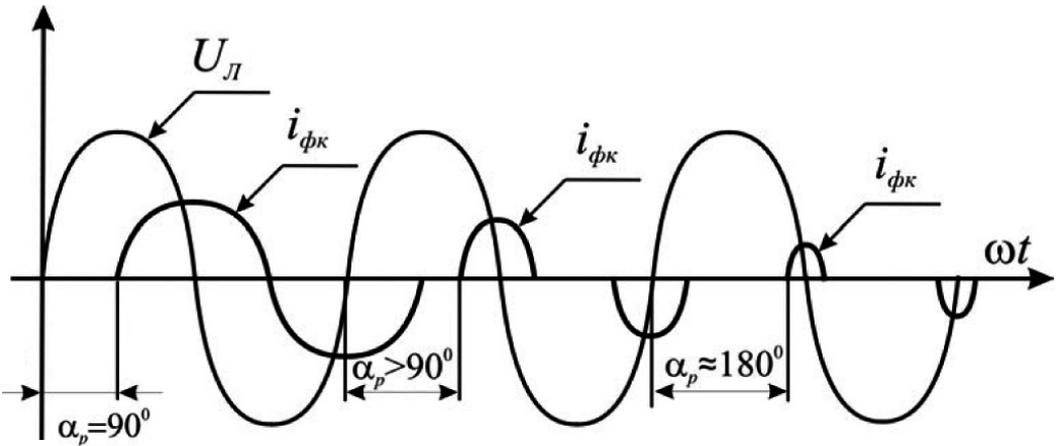


Рис. 3. Временные диаграммы фазного тока РК с тиристорными ключами и фазовым управлением

При минимальном значении $\alpha_p = 90^\circ$ РК потребляет максимальную реактивную мощность, соответствующую $X_{PKЭ} = X_{LK}$. Увеличение угла регулирования от 90 до 180° эквивалентно увеличению сопротивления $X_{PKЭ}$ от X_{LK} до бесконечности в соответствии с выражением:

$$X_{PKЭ} = X_{LK} \pi / (2\pi - 2\alpha_p + \sin 2\alpha_p).$$

$$I_{\phi K(v)} = \frac{4U_{\text{Л}}}{\sqrt{2}X_{LK}} \left[\frac{\sin(v+1)\alpha_p}{2(v+1)} + \frac{\sin(v-1)\alpha_p}{2(v-1)} - \cos\alpha_p \frac{\sin v\alpha_p}{v} \right].$$

Реактивная мощность Q_{PK} снижается при этом до нуля. Основными недостатками рассмотренной схемы являются генерация низкочастотных гармоник тока в питающую сеть, а также существенное время задержки регулирования, составляющее половину периода. Действующее значение v -й нечетной гармоники фазного тока РК определяется из выражения

Благодаря включению фаз РК в «треугольник» третья и кратные ей гармоники исключаются из линейного тока компенсатора i_K . Однако наличие в этом токе низкочастотных гармоник остальных порядков приводит к необходимости увеличения установленной мощности РФ исходя из условий ограничения показателей несинусоидальности.

Указанных недостатков не имеет схема РК, показанная на рис. 2, б. Основу схемы составляют три индуктивных элемента L_K и шесть полупроводниковых ключей переменного тока (1–6), условно показанных в виде контактов. Ключевые элементы могут быть реализованы на базе мостовой диодно-транзисторной схемы (см. рис. 2, б). В диагональ моста вместо IGBT могут быть включены

двухоперационные тиристоры (GTO, IGCT). В каждой фазе предлагаемой схемы РК имеются два ключа: один из них соединен последовательно, другой параллельно с L_K .

Использован принцип широтно-импульсного регулирования (ШИР) эквивалентной индуктивности РК, когда угловая частота коммутации элементов ω_K во много раз больше частоты сети ω ($\omega \gg \omega_K$). Величина частоты коммутации $f_K = \omega_K/2\pi$ современных силовых полупроводниковых ключей достигает 10...20 кГц. Временные диаграммы напряжения и токов описываемой схемы представлены на рис. 4.

В течение каждого периода коммутации $T_K = 2\pi/\omega_K$ оба ключа каждой фазы РК получают инверсные по отношению друг к другу управляющие импульсы.

Например, в течение интервала t_1 ключ 1 замкнут, а ключ 2 — разомкнут, т. е. напряжение на индуктивности близко к линейному. В течение следующего интервала t_2 ключ 1 разомкнут, а ключ 2 замкнут, т. е. индуктивность L_K отключена от внешней цепи и замкнута накоротко, напряжение на ней равно нулю. Форма напряжения u_{LK} на индуктивности L_K показана на рис. 4, а.

Действующее значение основной гармоники этого напряжения

$$U_{LK(1)} = \gamma U_L$$

где $\gamma = t_1/T$ — скважность регулирования.

Соответственно, действующее значение основной гармоники тока индуктивности i_{LK} (см. рис. 4, б)

$$I_{LK(1)} = \gamma I_L / X_{LK}$$

Каждый индуктивный элемент с соответствующей парой противофазных ключей по отношению к внешней цепи может быть рассмотрен как источник импульсного квазисинусоидального тока i_{KK} (см. рис. 4, в). Кроме основной гармоники $i_{KK(1)}$, этот ток содержит импульсную искажающую составляющую (помеху), спектр которой смещен в высокочастотную область в окрестностях частоты коммутации. Для защиты питающей сети от указанных помех разработанная схема РК содержит помехозащитный фильтр низких частот, образованный элементами

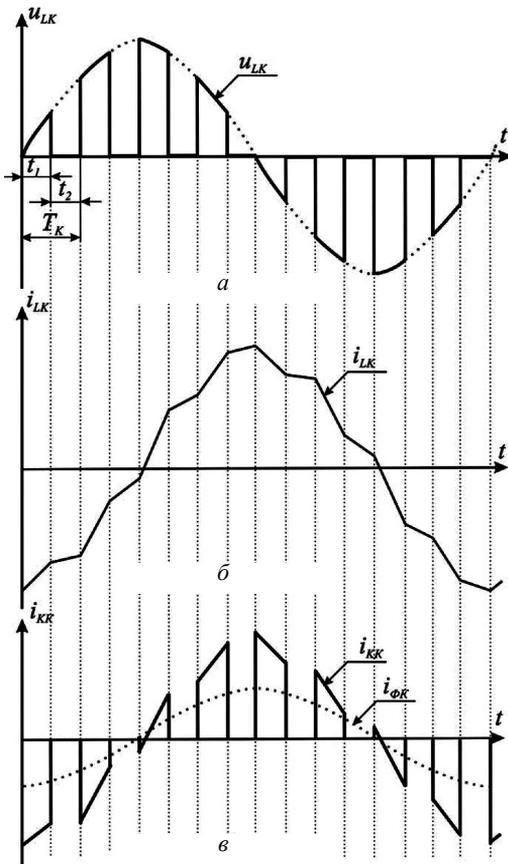


Рис. 4. Временные диаграммы: а — напряжение на реакторе u_{LK} ; б — ток реактора i_{LK} ; в — ток ветви последовательного ключа i_{KK} и фазы компенсатора $i_{\Phi K}$

L_ϕ, C_ϕ . Значение $L_\phi \ll L_K$ ($L_\phi \approx 0,05L_K$). Величина C_ϕ выбирается исходя из того, что собственная резонансная частота фильтра $\omega_\phi = \sqrt{1/(L_\phi C_\phi)}$ должна быть меньше частоты коммутации ($\omega_\phi < \omega_K$), при этом

$$C_\phi = 1/(\omega_\phi^2 L_\phi).$$

При выборе достаточно высокой частоты коммутации ($f_K \geq 10$ кГц) в отличие от силового резонансного фильтра, входящего в состав ФКУ, помехозащитный фильтр РК является «легким».

Коэффициент фильтрации, показывающий, во сколько раз амплитуда остаточной помехи на частоте коммутации в составе фазного тока компенсатора $i_{\phi K}$ меньше исходной в точке i_{KK} , определяется из соотношения

$$K_\phi \approx \omega_K^2 / \omega_\phi^2. \quad (1)$$

Из (1) следует, что при $K_\phi = 100$, $\omega_\phi \approx 0,1\omega_K$.

Благодаря наличию помехозащитного фильтра фазный ток компенсатора $i_{\phi K}$ имеет практически синусоидальную форму. Его действующее значение:

$$I_{\phi K} = I_{KK(1)} = \gamma^2 U_L / X_{LK}.$$

Реактивная мощность, потребляемая РК,

$$Q_{PK} = 3U_L I_{\phi K} = 3\gamma^2 U_L^2 / X_{LK}.$$

Следовательно, эквивалентное сопротивление фазы предлагаемого РК определяется из выражения

$$X_{PK\Delta} = X_{LK} / \gamma^2.$$

Параметры РФ выбираются исходя из двух условий: ограничения несинусоидальности напряжения сети и компенсации реактивной мощности ПП.

Реактивная мощность, потребляемая ПП,

$$Q_{ПП} = P_d \operatorname{tg} \varphi_{(1)} \approx I_d \sqrt{U_{d0}^2 - U_d^2},$$

где P_d — активная мощность ПП; $\varphi_{(1)}$ — фазовый сдвиг основных гармоник входных напряжения и тока ПП; U_{d0} — максимальное выпрямленное напряжение; I_d, U_d — текущие значения выпрямленного тока и напряжения.

Если во всем диапазоне регулирования ПП выпрямленный ток равен номинально-

му ($I_d = I_{dH}$), то $Q_{ПП}$ принимает максимальное значение при наименьшем значении выпрямленного напряжения $U_{d\min}$:

$$Q_{ПП\max} = I_{dH} \sqrt{U_{d0}^2 - U_{d\min}^2}.$$

Из условия компенсации реактивная мощность РФ,

$$Q_{R\phi} = Q_{ПП\max}. \quad (2)$$

Соотношение (2) является необходимым, но недостаточным.

Выбор параметров РФ из условия минимизации коэффициента несинусоидальности напряжения сети [1, 2] может привести к завышению необходимой мощности РФ ($Q_{R\phi} > Q_{ПП\max}$), которая и принимается в качестве расчетной.

Индуктивное сопротивление реактора компенсатора определяется из соотношения

$$X_{LK} = 3U_L^2 / (Q_{R\phi} - Q_{ППXX}),$$

где $Q_{ППXX}$ — реактивная мощность, потребляемая ПП в режиме холостого хода.

На рис. 5 показан модифицированный, по сравнению с рис. 2, б, вариант схемы трехфазного управляемого реакторного компенсатора с широтно-импульсным регулированием.

Здесь последовательные ключи выполнены на встречно-параллельно соединенных транзисторах и диодах, а вместо пофазного закорачивания реакторов параллельными ключами применено общее межфазное закорачивание с помощью трехфазного диодного моста и общего однонаправленного ключа-транзистора. При сохранении основных характеристик модифицированный вариант предусматривает использование четырех транзисторных ключей вместо шести, как на рис. 2, б.

Рассматриваемый тип ФКУ улучшает форму напряжения сети. Это объясняется тем, что обычно мощность РК выбирается из условия полной компенсации мощности РФ, которая может оказаться больше максимальной реактивной мощности ПП, поэтому к шинам ЭЭС оказывается постоянно подключенной эквивалентная индуктивность РК, что уменьшает эквивалентное сопротивление и искажения напряжения питающей сети.

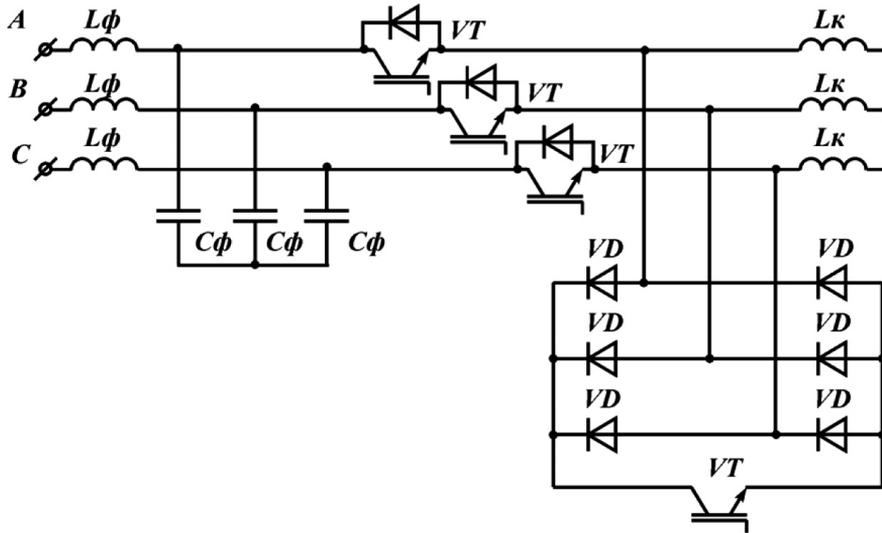


Рис. 5. Модифицированная схема трехфазного управляемого реакторного компенсатора с ШИР

ВЫВОДЫ

1. Разработанная усовершенствованная схема управляемого ФКУ, содержащая реакторный компенсатор с диодно-транзисторными ключами и широтно-импульсным регулированием, позволяет обеспечить ЭМС в автономных ЭЭС с ПП, исходя из двух условий: компенсации реактивной мощности и необходимого снижения несинусоидальности напряжения и тока в сети.

2. Благодаря высокому быстродействию предложенная схема обеспечивает повы-

шенную точность компенсации реактивной мощности в динамических режимах, что позволяет снизить колебания напряжения и потери активной мощности в сети.

3. Дальнейшее улучшение статических и динамических характеристик управляемых ФКУ может быть достигнуто путем совершенствования алгоритмов микроконтроллерного управления в сочетании с повышением точности датчиков реактивных составляющих основных гармоник токов ПП и элементов ФКУ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- [1] Жук А.К. Анализ влияния сетевых фильтров на несинусоидальность напряжения в автономных электроэнергетических системах с тиристорными преобразователями // Техн. электродинаміка. Темат. вип. Силова електроніка та енергоефективність. — 2004. — Ч. 2 — С. 93–98.
- [2] Жук А.К., Трибулькевич С.Л. Несинусоидальность напряжения в автономных электроэнергетических системах с двенадцатифазными преобразователями и фильтрокомпенсирующими устройствами // Техн. электродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. — 2005. — Ч. 1 — С. 99–105.
- [3] Жук А.К., Запальский В.Н., Трибулькевич С.Л. Несинусоидальность напряжения в ЭЭС морских сооружений с полупроводниковыми преобразователями // Техн. электродинаміка. Тем. вип. Силова електроніка та енергоефективність. — 2006. — Ч. 5 — С. 49–54.
- [4] Reactive power compensation technologies // Proceedings of the IEEE ISSN0018-9219. / J. Dixon, L. Moran, J. Rodriguez, R. Domke. — 2005. — Vol. 93, nr 12. — P. 2144–2164.