

УДК 621.3

А.А. Кралин, А.А. Асабин, Е.В. Крюков

**ФАЗОПОВОРОТНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ
СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ**

Нижегородский государственный технический университет им. П.Е. Алексеева

Статья посвящена принципам работы фазоповоротного устройства (ФПУ) для распределительных сетей среднего напряжения при продольном, поперечном и продольно- поперечном способе регулирования напряжения.

Ключевые слова: фазоповоротное устройство, продольное, поперечное, продольно-поперечное регулирование, узел регулирования, устройство регулирования потоков мощности.

Ключевое направление развития электроэнергетики России связано с созданием интеллектуальной энергосистемы, характеризующейся возможностью автоматического управления потоками активной и реактивной мощности в электрических сетях всех классов напряжений [1-3]. Управление потоками мощности электрической энергии позволяет добиться снижения дефицита электроэнергии, повышения пропускной способности линий электропередачи, увеличения уровня надежности электроснабжения, повышения эффективности использования электрической энергии. Эти возможности могут быть реализованы внедрением в структуру электрической сети автоматизированных узлов регулирования потоков мощности, построенных на основе преобразовательных устройств силовой электроники с быстродействующими цифровыми системами управления.

Одним из наиболее эффективных способов регулирования параметров электроэнергии в распределительных сетях среднего напряжения является использование фазоповоротных устройств (ФПУ) на основе трансформаторно-тиристорных регуляторов напряжения.

Силовая схема предлагаемого ФПУ (рис. 1) содержит параллельный трансформатор $TV1$ и последовательный трансформатор $TV2$ [4,5]. Первичные обмотки параллельного трансформатора, соединенные по способу «треугольник», подключены к входным зажимам ФПУ. На базе вторичных обмоток $TV1$ и тиристорных коммутаторов ТК1 – ТК16 реализуются модули поперечного и продольно-поперечного регулирования, включенные последовательно друг относительно друга. Выходные напряжения данных модулей питают первичные обмотки последовательного трансформатора $TV2$. Вторичные обмотки данного трансформатора включены между входными (A, B, C) и выходными ($A2, B2, C2$) зажимами ФПУ.

Модули поперечного регулирования всех фаз выполняются на тиристорных коммутаторах ТК1-ТК8 по схеме реверсивного тиристорного регулятора с разбиением регулировочной обмотки на равные секции с напряжением u_2 . Такое секционирование исключает необходимость одновременной коммутации более чем двух тиристорных коммутаторов в пределах одного модуля. Это существенно упрощает коммутационные процессы в сравнении с секционированием обмоток по двоичной или троичной числовой последовательностям.

Модуль продольно-поперечного регулирования фазы C фазоповоротного устройства выполняется на тиристорных коммутаторах ТК9-ТК12 фазы B и тиристорных коммутаторах ТК13-ТК16 фазы C . Тиристорные коммутаторы обеих фаз соединены по мостовой схеме, в диагональ каждого моста включены регулировочные секции соответствующих фаз с напряжением u_3 . Такое включение регулировочных секций позволяет реверсировать их напряжение или исключать его из цепи питания первичных обмоток трансформатора $TV2$. Аналогично выполняются модули продольно-поперечного регулирования фаз A и B .

Отдельно рассмотрим работу модуля поперечного регулирования. При этом считаем,

что регулировочные секции модуля продольно-поперечного регулирования исключены из цепи питания первичных обмоток трансформатора *TV2*. Этот режим реализуется при включенных коммутаторах ТК9-ТК10 и ТК13-ТК14 всех фаз. В зависимости от состояния тиристорных коммутаторов модуля поперечного регулирования имеется семь режимов его работы с синусоидальным выходным напряжением.

При включенных коммутаторах ТК1-ТК2 и выключенных коммутаторах ТК3-ТК8 все секции регулировочных обмоток исключаются из цепи питания первичных обмоток трансформатора *TV2*. В этом режиме первичные обмотки последовательного трансформатора оказываются замкнутыми на нейтраль и их напряжения, а также напряжения вторичных обмоток (Δu), равны нулю. В результате этого выходные напряжения ФПУ (u_{A2B2} , u_{B2C2} , u_{C2A2}) равны входным напряжениям (u_{AB} , u_{BC} , u_{CA}) соответственно.

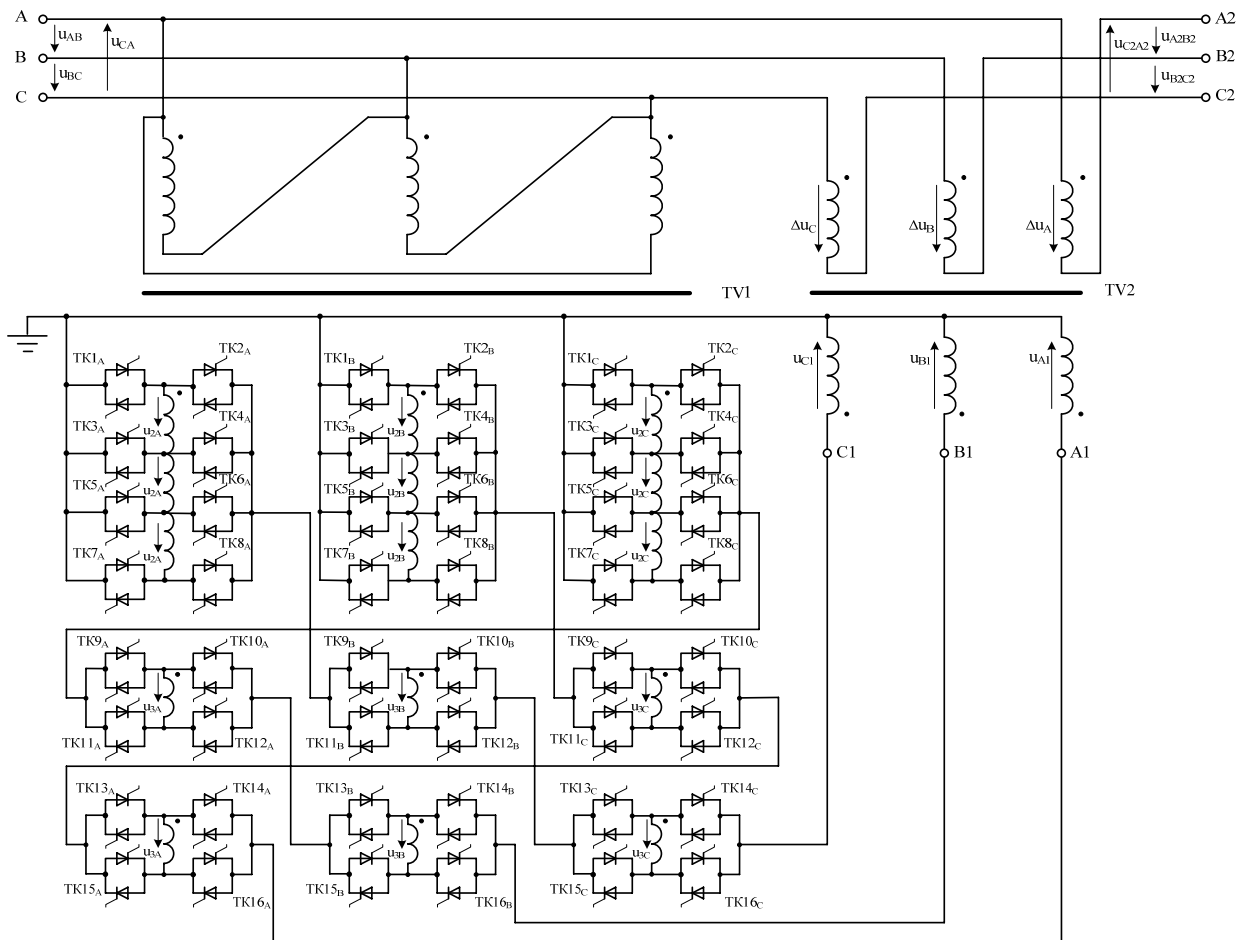


Рис. 1. ФПУ с согласующим трансформатором для распределительных сетей

При включенных коммутаторах ТК1 и ТК4 всех фаз в цепи питания первичных обмоток последовательного трансформатора вводятся инверсные напряжения ступеней поперечного регулирования ($u_{C1} = -u_{2A}$, $u_{B1} = -u_{2C}$, $u_{A1} = -u_{2B}$). Соответственно, в рассечку линий ФПУ вводятся напряжения вторичных обмоток (Δu), отличающиеся от напряжений u_2 пропорционально коэффициенту трансформации (K_2) последовательного трансформатора.

Следует отметить, что для поперечного регулирования напряжения фазы *A* применяется напряжение фазы *B* (u_{2B}) трансформатора *TV1*, пропорциональное линейному напряжению u_{BC} . Аналогично для поперечного регулирования напряжений фаз *B* и *C* используются напряжения фаз *C* (u_{2C}) и *A* (u_{2A}), соответственно. Указанные напряжения находятся в фазе с входными линейными напряжениями u_{CA} , u_{AB} . На основании изложенного и с учетом коэффициента трансформации регулировочных секций модуля поперечного регулирования ($K_{1.2}$)

трансформатора $TV1$ и коэффициента трансформации последовательного трансформатора (K_2) можно записать

$$\Delta u_C = -K_{1,2} \cdot K_2 \cdot u_{AB}; \quad \Delta u_B = -K_{1,2} \cdot K_2 \cdot u_{CA}; \quad \Delta u_A = -K_{1,2} \cdot K_2 \cdot u_{BC}. \quad (1)$$

Указанные напряжения составляют одну ступень поперечного регулирования. Векторная диаграмма входных и выходных линейных напряжений для рассматриваемого режима приведена на рис. 2.

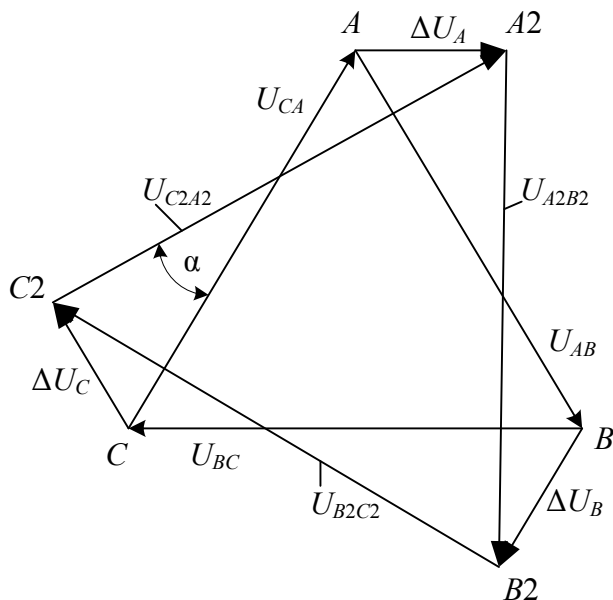


Рис. 2. Векторная диаграмма ФПУ с согласующим трансформатором при поперечном регулировании

Из представленной на рис. 2 диаграммы следует, что введение в линию каждой фазы ступени поперечного регулирования позволяет получить на выходе ФПУ линейные напряжения, отстающие по фазе относительно входных напряжений на угол α . Можно показать, что линейные выходные напряжения, отстающие от входных напряжений ФПУ на углы 2α и 3α получаются путем последовательных переключений с коммутатора ТК4 на коммутаторы ТК6 и ТК8, соответственно. В этих режимах в линию каждой фазы вводится удвоенная, а затем утроенная ступени поперечного регулирования. Линейные выходные напряжения, опережающие входные напряжения ФПУ на углы α , 2α и 3α , получаются при включенном коммутаторе ТК2 реверсированием ступеней поперечного регулирования путем последовательных переключений с ТК1 на ТК3, ТК5 и ТК7 соответственно.

Следует отметить, что в данном варианте ФПУ при поперечном регулировании используется арифметическое суммирование векторов напряжений регулировочных секций (u_2). Это позволяет снизить на 15% расчетную мощность регулировочной обмотки модуля поперечного регулирования в сравнении с ФПУ, использующими геометрическое суммирование векторов напряжений регулировочных секций разных фаз. Из векторной диаграммы, показанной на рис. 2, следует, что при поперечном регулировании увеличиваются линейные напряжения на выходе ФПУ. Стабилизация линейных напряжений по величине с возможностью дополнительного поперечного регулирования может быть выполнена модулями продольно-поперечного регулирования. В зависимости от состояния тиристорных коммутаторов регулировочные секции данных модулей могут быть исключены из цепи питания трансформатора $TV2$, а также обеспечивать продольное, продольно-поперечное и дополнительное поперечное регулирование.

Отдельно рассмотрим работу модулей в перечисленных режимах регулирования. При

этом считаем, что регулировочные секции модуля поперечного регулирования исключены из цепи питания первичных обмоток трансформатора *TV2*. Данный режим реализуется при включенных коммутаторах ТК1-ТК2 всех фаз.

Режим продольного регулирования реализуется путем встречно последовательного соединения регулировочных секций *TV1* с напряжением u_3 . Такое соединение секций позволяет получить систему напряжений, сдвинутых по фазе относительно линейных напряжений на 90° . Увеличение выходного напряжения ФПУ получается при включении тиристорных коммутаторов ТК10, ТК11, ТК13, ТК16. При этом в цепи питания первичных обмоток последовательного трансформатора вводится геометрическая разность напряжений, описываемая выражениями:

$$u_{C1} = u_{3B} - u_{3C}; u_{A1} = u_{3C} - u_{3A}; u_{B1} = u_{3A} - u_{3B}. \quad (2)$$

Соответственно, в расщелку линий ФПУ вводятся напряжения вторичных обмоток (Δu), отличающиеся от указанной геометрической разности напряжений u_3 пропорционально коэффициенту трансформации (K_2) последовательного трансформатора. Векторная диаграмма напряжений для данного режима, построенная с учетом совпадения по фазе напряжений u_{3A} , u_{3B} , u_{3C} и входных напряжений u_{AB} , u_{BC} , u_{CA} , показана на рис. 3. Можно показать, что уменьшение выходного напряжения ФПУ получается при включении тиристорных коммутаторов ТК9, ТК12, ТК14, ТК15.

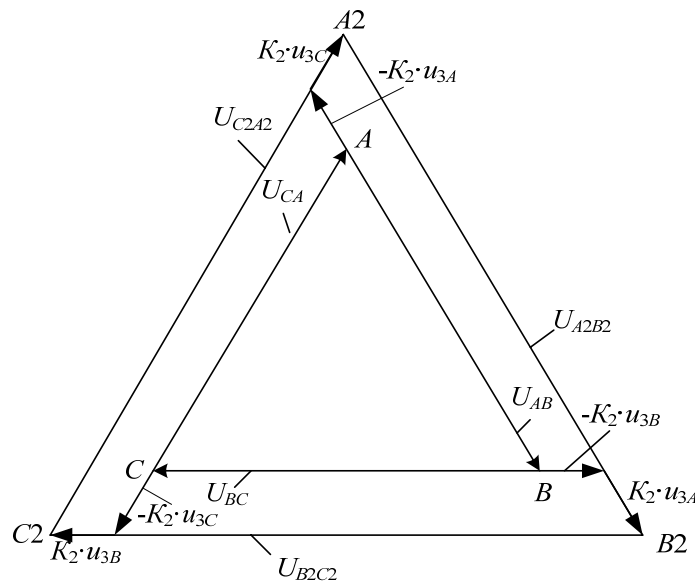


Рис. 3. Векторная диаграмма ФПУ с согласующим трансформатором при продольном регулировании

Режим продольно-поперечного регулирования реализуется при питании первичной обмотки последовательного трансформатора только от одной регулировочной секций *TV1* с напряжением u_3 . Вторая регулировочная секция рассматриваемого модуля должна быть исключена из цепи питания первичной обмотки трансформатора *TV1*. Один из четырех вариантов такого режима реализуется при включенных коммутаторах ТК9, ТК10, ТК13, ТК16. Векторная диаграмма напряжений для данного режима приведена на рис. 4.

Режим дополнительного поперечного регулирования реализуется путем согласно - последовательного соединения регулировочных секций *TV1* с напряжением u_3 . При этом в цепи питания первичных обмоток последовательного трансформатора вводятся геометрические суммы напряжений регулировочных секций *TV1*. Этот режим имеет место при включенных коммутаторах ТК9, ТК12, ТК13, ТК16. Первичные напряжения последовательного трансформатора в данном случае описываются выражениями $u_{C1} = -u_{3B} - u_{3C}$; $u_{A1} = -u_{3C} - u_{3A}$; $u_{B1} = -u_{3A} - u_{3B}$. Вследст-

вие этого, в расщелку линий ФПУ вводятся напряжения вторичных обмоток (Δu), отличающиеся от указанной геометрической суммы напряжений u_3 пропорционально коэффициенту трансформации (K_2) последовательного трансформатора.

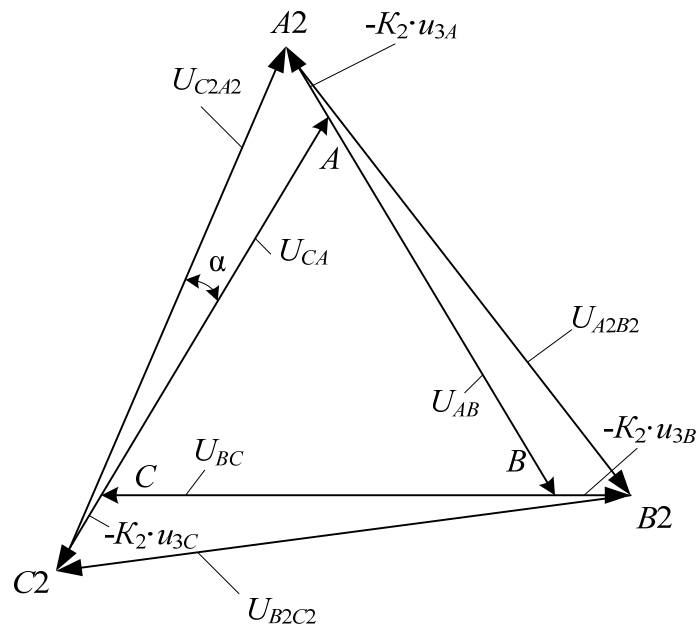


Рис. 4. Векторная диаграмма ФПУ с согласующим трансформатором при продольно-поперечном регулировании

Векторная диаграмма напряжений при дополнительном поперечном регулировании, построенная с учетом совпадения по фазе напряжений u_{3A} , u_{3B} , u_{3C} и входных напряжений u_{AB} , u_{BC} , u_{CA} , показана на рис. 5.

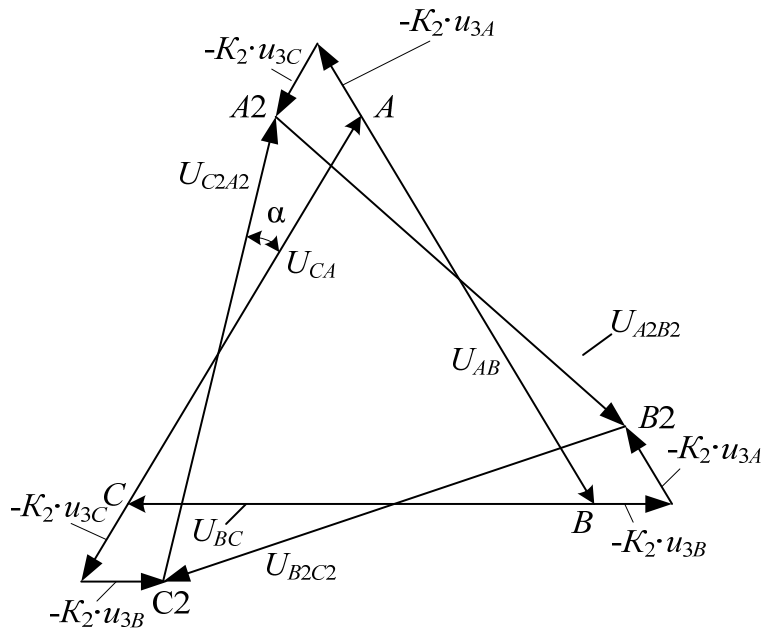


Рис. 5. Векторная диаграмма ФПУ с согласующим трансформатором при дополнительном поперечном регулировании

Из представленной на рис. 5 диаграммы следует, что указанная ранее комбинация включенных коммутаторов позволяет получить на выходе ФПУ линейные напряжения, опе-

режающие по фазе входные напряжения на дополнительный угол. Отстающие по фазе выходные напряжения получаются при включении коммутаторов ТК10, ТК11, ТК14, ТК15.

Выводы

1. Совместное использование модулей поперечного и продольно-поперечного регулирования позволяет регулировать фазу и величину выходного напряжения ФПУ
2. Для повышения точности целесообразно применение импульсно – фазового способа регулирования между соседними уровнями синусоидальных напряжений обоих модулей.

Библиографический список

1. Концепция реализации национального проекта “Интеллектуальная энергетическая система России”. – М., 2015. – 25 с.
2. **Hadjsaid N.** Smart grids: motivation, rates and perspective / N. Hadjsaid, J. Cl. Cabonnadiere // *Energetics abroad.* – 2014. – V. 3. – P. 2–24.
3. **Соснина Е.Н.** Основные направления развития интеллектуальных электрических сетей на основе адаптивного управления / Е.Н. Соснина, Р.Ш. Бедретдинов // *Электрооборудование: эксплуатация и ремонт.* – 2012. – №5. – С. 25–28.
4. Пат. на полезную модель №157116. Полупроводниковое фазоповоротное устройство / Асабин А.А., Верховский С.Я., Соснина Е.Н., Гардин А.И., Бедретдинов Р.Ш., Кисель Д.А. 2016. Бюл. № 3.
5. **Соснина, Е.Н.** Исследование твердотельного регулятора напряжения и мощности в сети 6–20 кВ. / Е.Н. Соснина [и др.] // Сборник трудов 2-й Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг». – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2016. – С. 322–327.

*Дата поступления
в редакцию 10.04.2017*

A.A. Kralin, A.A. Asabin, E.V. Kryukov

PHASE-SHIFTING DEVICE FOR MEDIUM VOLTAGE NETWORK

Nizhny Novgorod state technical university n.a. R.E. Alexeyev

The article is devoted to the principles of operation of the phase-shifting device for medium-voltage distribution networks for longitudinal, transverse and longitudinal-transverse voltage regulation.

Key words: phase-shifting device, transversal voltage control, longitudinal voltage control, control unit, device controlling the flow of power, power flows control device.