

Особенности управления полупроводниковым ФПУ со средней точкой

Татьяна Ремизевич, к. т. н.

RemizevichTV@mail.ru

Павел Рашитов

Современное развитие ЕЭС России предусматривает применение в сложившихся электрических сетях управляемых линий электропередачи. Фазоповоротные устройства (ФПУ) являются одним из перспективных классов оборудования, позволяющего управлять потоками мощности путем введения дополнительного управляемого фазового сдвига между напряжениями на концах линии электропередачи [1].

В настоящее время активно исследуются конфигурации ФПУ с коммутаторами на основе силовых полупроводниковых ключей. Такие устройства именуют полупроводниковыми ФПУ. Базовая топология ФПУ с тиристорным коммутатором приведена в [1]. Эта схема реализует способ поперечного регулирования, который находит применение при

формировании фазового сдвига напряжения в линии, не превышающего 20 град. эл. Известно, что для поворота вектора напряжения линии на угол, превышающий это значение, следует использовать способ продольно-поперечного регулирования [5] и соответствующие ему схмотехнические решения.

В 2008–2009 гг. в ОАО «ЭНИН» («Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского») было разработано ФПУ с применением силовых полупроводниковых приборов (тиристоров) для установки на ВЛ 220 кВ электропередачи Томск–Нижевартовск, реализующее способ продольно-поперечного регулирования и осуществляющее регулирование фазового сдвига выходного напряжения в диапазоне от -40 до $+40$ град. эл. с шагом дискретизации 2,67. В статье [2] представлена разработанная схема ФПУ, описан принцип его работы, приведены данные о подборе элементов, входящих в состав устройства. В данной статье мы рассмотрим режимы управления ФПУ с топологией схемы, предложенной в [2].

Регулировочная характеристика ФПУ

Схема исследуемого ФПУ представлена на рис. 1. ФПУ состоит из трехфазного серийного (вольтодобавочного) трансформатора Т1, трехфазного шунтового (возбуждающего) трансформатора Т2 и 12 тиристорных мостов: ТК1-А–ТК4-А, ТК1-В–ТК4-В, ТК1-С–ТК4-С.

Начала первичных обмоток шунтового трансформатора Т2 соединены со средней точкой вторичных обмоток серийного трансформатора Т1, концы первичных обмоток шунтового трансформатора Т2 соединены в «звезду» и заземлены. Вторичные обмотки шунтового трансформатора имеют по четыре отдельные секции на каждую фазу и подсоединены ко входам соответствующего тиристорного моста, например, обмотка $a1-x1$ подсоединена к мосту ТК1-А. Тиристорные мосты ТК1-А–ТК4-А, ТК1-В–ТК4-В, ТК1-С–ТК4-С объединены в группы по фазам и соединены между собой последовательно внутри группы. По одному из выводов группы тиристорных мостов объединены между собой в «звезду» и заземлены. Первичные обмотки серийного трансформатора Т1 соединены в «треугольник» и подключены к выводам двух различных групп тиристорных мостов. Представленная схема ФПУ получила название «ФПУ со средней точкой».

В [2] предложено выбирать соотношение числа витков четырех секций каждой фазы вторичной обмотки

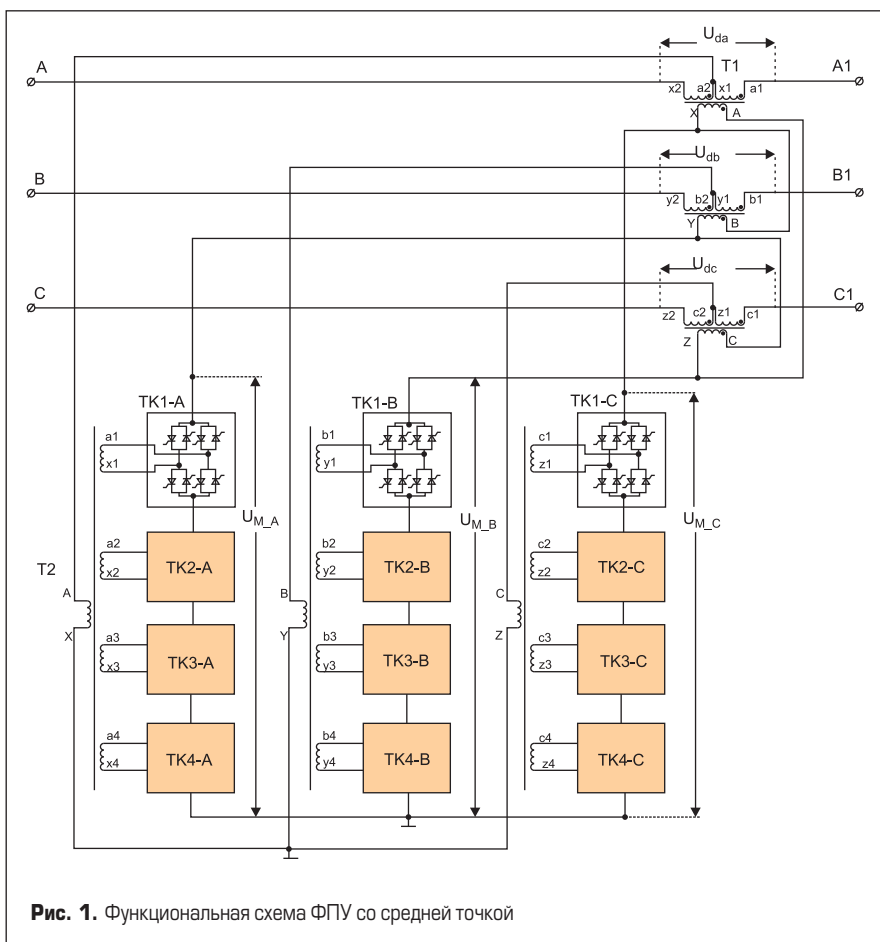


Рис. 1. Функциональная схема ФПУ со средней точкой

возбуждающего трансформатора Т2 равным 1:2:4:8. При этом в зависимости от режима работы тиристорных мостов ТК1-А–ТК4-А, ТК1-В–ТК4-В, ТК1-С–ТК4-С можно получить 31 различных угол фазового сдвига вектора выходного напряжения ФПУ: по 15 ступеней регулирования в диапазонах от 0 до +40 град. эл. и от 0 до –40 град. эл., а также нулевую ступень.

В представленном варианте схемы ФПУ заведена обратная связь по формируемому вольтдобавочному напряжению, половина которого складывается с входным напряжением линии и подается на первичную обмотку возбуждающего трансформатора. Номер ступени регулирования, по сути, задает коэффициент передачи между напряжением первичной обмотки возбуждающего трансформатора и вольтдобавочным напряжением. На рис. 2 показаны векторные диаграммы формирования выходного напряжения для угла регулирования –40° град. эл.

Для получения регулировочной характеристики запишем основные соотношения:

$$\begin{cases} \dot{U}_{A1} = \dot{U}_A + \dot{U}_{da} \\ \dot{U}_{B1} = \dot{U}_B + \dot{U}_{db} \\ \dot{U}_{C1} = \dot{U}_C + \dot{U}_{dc} \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{da} = 2(\dot{U}_{M_B} - \dot{U}_{M_C}) \times n1 \\ \dot{U}_{db} = 2(\dot{U}_{M_C} - \dot{U}_{M_A}) \times n1, \\ \dot{U}_{dc} = 2(\dot{U}_{M_A} - \dot{U}_{M_B}) \times n1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{U}_{M_A} = (\dot{U}_{da}/2 + \dot{U}_A) \times n2 \times k \\ \dot{U}_{M_B} = (\dot{U}_{db}/2 + \dot{U}_B) \times n2 \times k, \\ \dot{U}_{M_C} = (\dot{U}_{dc}/2 + \dot{U}_C) \times n2 \times k \end{cases} \quad (3)$$

где $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ — напряжение на входе ФПУ; $\dot{U}_{A1}, \dot{U}_{B1}, \dot{U}_{C1}$ — напряжение на выходе ФПУ; $U_{M_A}, U_{M_B}, U_{M_C}$ — напряжение на выходе группы мостов; U_{da}, U_{db}, U_{dc} — вольтдобавочное напряжение; $n1$ — коэффициент трансформации серийного трансформатора; $n2$ — коэффициент трансформации шунтового трансформатора, отношение числа витков секции вторичной обмотки с наименьшим напряжением к числу витков первичной обмотки; k — целое число в диапазоне от –15 до 15, определяющее эквивалентное значение коэффициента трансформации при различных комбинациях включе-

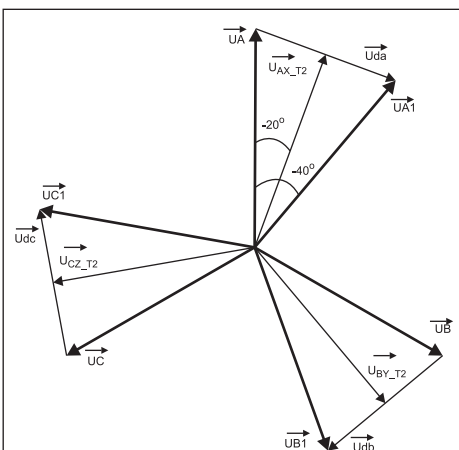


Рис. 2. Векторная диаграмма формирования выходного напряжения ФПУ для угла 40 град. эл.

ния секций вторичных обмоток шунтового трансформатора (число, противоположное по знаку номеру ступени регулирования).

Проделав преобразования систем уравнений (1), (2) и (3), получим выражение для регулировочной характеристики ФПУ (приведено для фазы А):

$$U_{A1} = U_A \times e^{-j \times \arctg\left(\frac{2 \times \sqrt{3} \times n2 \times n1 \times k}{1 - 3 \times (n2 \times n1 \times k)^2}\right)} \quad (4)$$

При симметрии схемы и одинаковом состоянии тиристорных мостов в трех фазах выражения для двух других фаз аналогичны.

Выражение (4) отражает основное свойство схемы ФПУ со средней точкой — модуль вектора выходного напряжения ФПУ определяется только модулем вектора входного напряжения и не зависит от степени регулирования угла фазового сдвига.

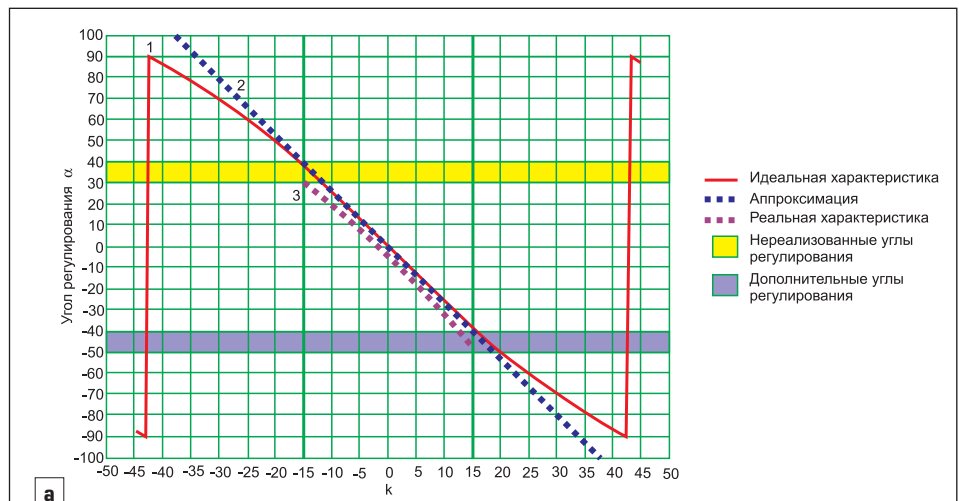
На рис. 3а представлена полученная аналитически зависимость угла регулирования α от значения переменной k — кривая 1. В диапазоне изменения фазового сдвига выходного

напряжения от –40 до +40 град. эл. у кривой 1 хорошая степень аппроксимации с прямой 2. Уравнение аппроксимации прямой 2:

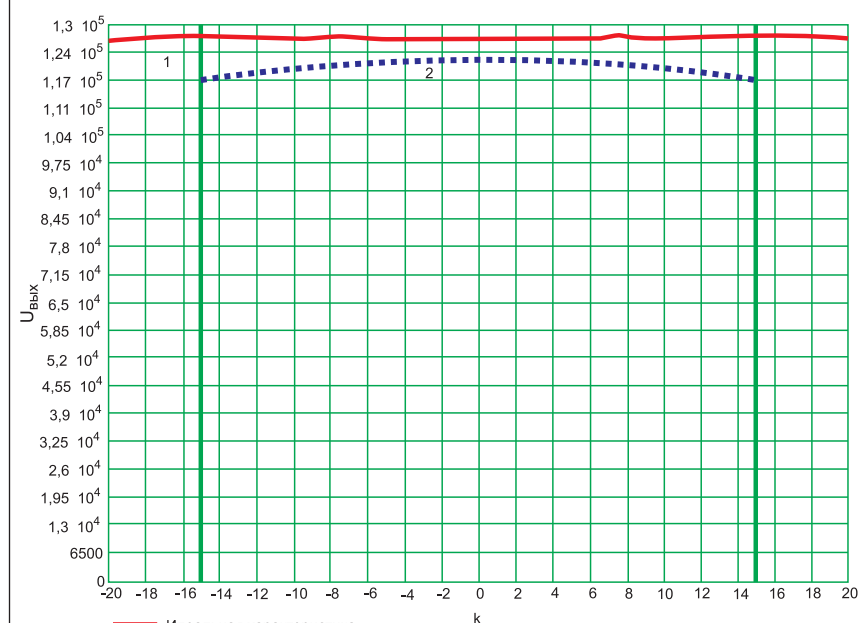
$$\alpha_{ann} = -2\sqrt{3} \times n2n1k \times (180/\pi). \quad (5)$$

Исходя из выражения (5), в требуемом диапазоне изменения фазового сдвига получается линейная зависимость от k . При этом дискретность изменения угла $\Delta\alpha = 40/15 = 2,67$.

Полученная регулировочная характеристика (4) является идеальной, поскольку не учитывает параметры реальных трансформаторов, такие как индуктивность рассеивания и активное сопротивление обмоток. Проведенное математическое моделирование в среде MATLAB+Simulink показало, что индуктивности рассеивания трансформаторов оказывают существенное влияние на регулировочную характеристику ФПУ. На рис. 3а кривая 3 соответствует реальной характеристике. Диапазон регулирования угла фазового сдвига отклонился от теоретического (от –40 до +40 град. эл.)



а



б

Рис. 3. Регулировочная характеристика: а) зависимость угла регулирования α от значения переменной k , б) зависимость модуля выходного напряжения от значения переменной k

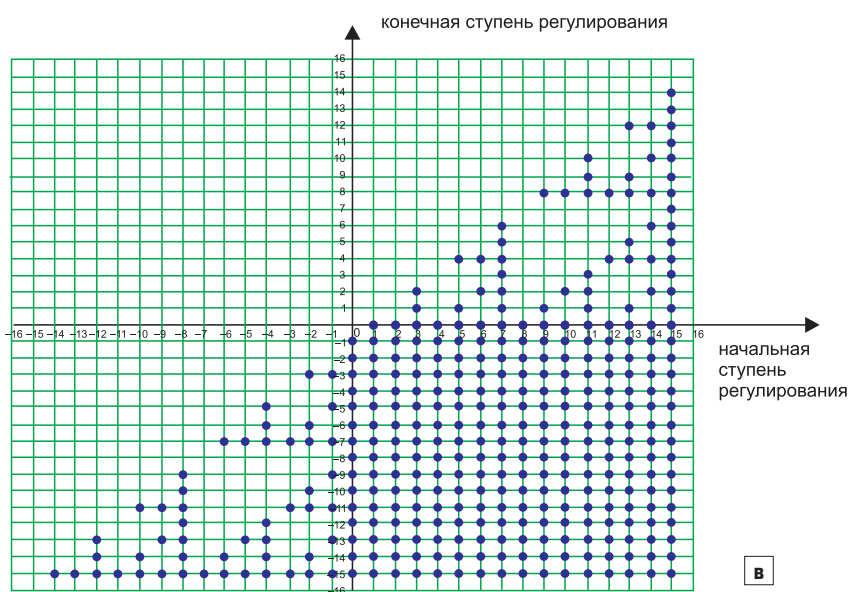
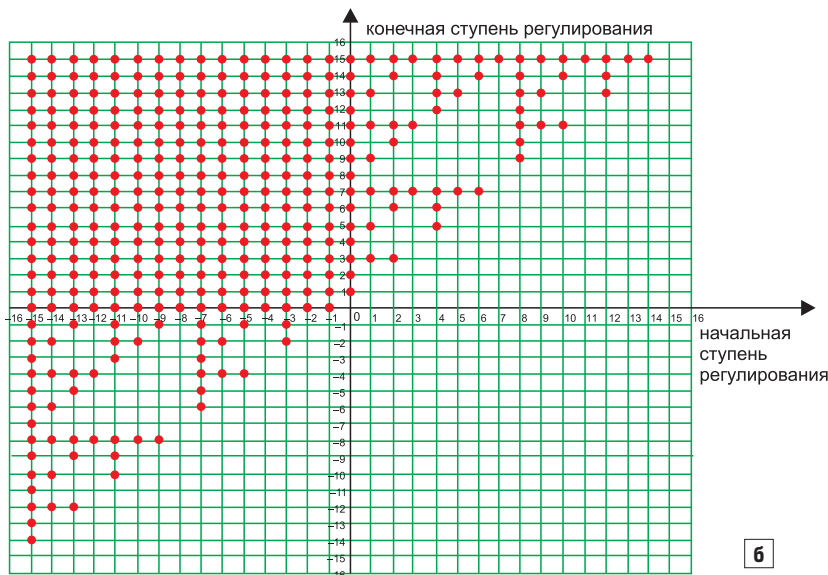
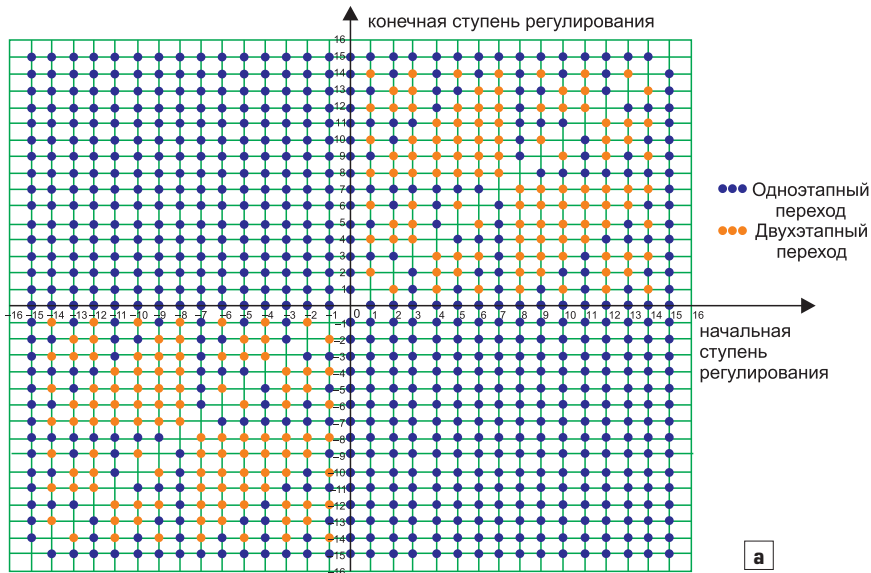


Рис. 4. Возможные переключения при полном диапазоне значений угла φ : а) полная управляемость при значениях угла от -180 до -117 , от -90 до 63 , от 90 до 180 град.эл., б) частичная управляемость при значениях угла от -117 до -90 град.эл. (отсутствие интервала типа 1), в) частичная управляемость при значениях угла φ от 63 до 90 град.эл. (отсутствие интервала типа 0).

и составил от -46 до $+29$ град. эл., дискретность угла регулирования стала неравномерной. При этом образовался диапазон нереализованных значений углов регулирования (от 29 до 40 град. эл.) и появился диапазон дополнительных значений углов регулирования (от -46 до -40 град. эл.).

Учет параметров реальных трансформаторов оказывает существенное влияние и на величину выходного напряжения. На рис. 3б показаны реальная (кривая 2) и идеальная (кривая 1) характеристики модуля выходного напряжения. Максимальное отклонение составляет 8% и наблюдается при наибольших значениях k по модулю.

Для обеспечения желаемого диапазона углов регулирования фазового сдвига необходимо скорректировать расчетные коэффициенты трансформации шунтового и сериесного трансформаторов. Устранить эффект снижения величины выходного напряжения относительно входного для данной схемы ФПУ, к сожалению, невозможно.

Алгоритмы переключения вентилялей

В процессе работы ФПУ необходимо производить смену угла регулирования α . Для этого нужно изменить режимы работы тиристорных мостов в каждой группе. Тиристорный мост может работать в одном из трех режимов: 11 — обнуление выходных напряжений мостов ФПУ, 01 — сложение выходных напряжений мостов ФПУ, 10 — вычитание выходных напряжений мостов ФПУ [3]. Например, для угла регулирования 0 град. эл. режимы работы мостов ТК1-х, ТК2-х, ТК3-х, ТК4-х следующие: 11, 11, 11, 11, где под x понимается одна из трех фаз А, В, С, а для угла регулирования -40 град. эл. — 10, 10, 10, 10. Указанное состояние тиристорных мостов и все дальнейшие выводы получены относительно идеальной регулировочной характеристики.

Переключение режима работы моста подразумевает коммутацию тока из одного тиристорного двунаправленного ключа в другой. При этом к группе последовательно соединенных тиристорных мостов подводятся синфазные напряжения. Поэтому для смены режима работы мостов в группе необходимо найти интервалы, где ток, протекающий через тиристорные мосты соответствующей группы, и напряжение в группе мостов имеют один знак (интервал типа 0) и противоположные знаки (интервал типа 1). Таким образом, для того чтобы переключить состояния мостов группы фазы А, достаточно найти интервалы А₀ или А₁; для мостов группы фазы В — интервалы В₀ или В₁; для мостов группы фазы С — интервалы С₀ или С₁. В таблице указано, какие переключения режима работы мостов возможны в интервалах обоих типов.

На рис. 4а представлены все возможные переходы для смены номера ступени регули-

Таблица 1. Условие смены режимов тиристорных мостов

Интервал	Смена режимов
Тип 0	11 в 01, 10 в 11, 10 в 01
Тип 1	11 в 10, 01 в 11, 01 в 10

рования, осуществимые посредством однократного переключения режимов работы мостов при наличии интервалов типа 0 и 1. Как следует из рис. 4а, не все переходы могут быть осуществлены за один этап. При нахождении алгоритмов управления для смены углов регулирования выявлены переходы, когда для переключения части мостов в группе требовался интервал типа 0, а для других мостов — интервал типа 1. В результате некоторые переходы становились двухэтапными.

Двухэтапные переходы возможно осуществлять двумя способами: сначала произвести переключение части мостов, которым требовался интервал типа 0, а потом мосты с интервалом типа 1, и наоборот. На основе математического моделирования установлено, что на первом этапе предпочтительнее производить переключение той части мостов, которые вносят меньшее изменение угла регулирования в промежуточном состоянии относительно исходного. Это обуславливает минимизацию искажения выходного напряжения ФПУ во время переходного процесса.

В результате для всех двухэтапных переходов определен порядок переключения, который определяет алгоритмы управления тиристорными ключами в этом случае. После получения алгоритмов управления было проведено моделирование в среде MATLAB+Simulink при постоянном коэффициенте мощности в линии ($\cos\varphi = 0,94$), в ходе которого все переходы были успешно совершены. На рис. 5 показаны временные диаграммы выходного напряжения в трех фазах при выполнении двухэтапного перехода из номера ступени регулирования -8 ($-27,6$ град. эл.) в -4 ($-16,3$ град. эл.): первый этап из -8 в -12 , а второй — из -12 в -4 .

Первый этап переключения начинается в момент времени t_1 , и сначала переключается группа тиристорных мостов фазы С; в момент времени t_2 — группа мостов фазы В; в момент t_3 — группа мостов фазы А. Общее время переключения для первого этапа составляет около 8 мс. Второй этап переключения начинается после трех периодов сети от времени начала первого этапа в момент времени t_4 . Сначала переключается группа тиристорных мостов фазы А, затем фазы С (в момент t_5) и потом фазы В (в момент t_6). Время переключения второго этапа составило около 9 мс.

В результате моделирования показано, что время переключения тиристорных мостов трех фаз не превышает 10 мс. Для повышения быстродействия при двухэтапном переходе задержку между переключениями допустимо делать равной 20 мс. Таким образом, минимальное время для осуществления двухэтапного перехода составляет 40 мс.

Свойство частичной управляемости

Полученные алгоритмы управления синтезированы при наличии интервалов обоих типов (тип 0 и тип 1) при постоянном коэффициенте мощности линии ($\cos\varphi = 0,94$), то есть при постоянном угле φ , который представляет собой фазовый сдвиг между током и напряжением в месте включения ФПУ. Однако при работе ФПУ в реальной энергосистеме при изменении фазового сдвига между входным и выходным напряжением (угол регулирования α ФПУ) будет меняться и фазовый сдвиг между током и напряжением (угол φ) линии. Реальные значения угла φ при разных углах регулирования ФПУ также зависят и от режимов работы энергосистемы: нормальные в различные времена суток и года и после-

аварийные со всеми возможными отключениями участков линий. Предварительный анализ диапазона изменений угла φ для различных мест установки ФПУ показал, что φ может меняться в широких пределах. Поэтому для обеспечения надежной работы ФПУ алгоритмы управления тиристорными мостами должны синтезироваться для полного диапазона угла $\varphi = -180...+180$ град. эл.

В целом для полной управляемости достаточно, чтобы для каждой фазы имелись всегда интервалы типа 0 и 1. Однако это условие выполняется не для всех углов φ , что связано с необходимостью учитывать для надежной коммутации тиристорных мостов время восстановления ими управляющих свойств. Вследствие этого нужно вводить ограничения на длительность допустимого интервала, что было подробно исследовано в [4]. После введения ограничений один из интервалов может пропасть в зависимости от фазового сдвига между током и напряжением, подводимым к мосту. Так, при фазовом сдвиге от 153 до 180 град. эл. (диапазон углов φ от 63 до 90 град. эл.) пропадает интервал типа 0, а в пределах от -27 до 0 град. эл. (диапазон углов φ от -117 до -90 град. эл.) пропадает интервал типа 1 (общий интервал ограничения 1,5 мс, что соответствует 27 град. эл.).

В итоге в диапазоне углов φ от 63 до 90 град. эл. и от -117 до -90 град. эл. существуют только интервалы A_1, B_1, C_1 и A_0, B_0, C_0 соответственно. В этих случаях возможно переключение состояния мостов только в одну сторону. Например, при наличии интервала только типа 0 возможна смена режима работы мостов из 11 в 01, 10 в 11, 10 в 01 и возникает потеря управляемости в другую сторону, что существенно сужает диапазон регулирования углов α . На рис. 4 представлены возможные переключения в полном диапазоне значений углов φ с учетом полной и частичной потерь управляемости.

Из рис. 4б и рис. 4в можно выделить две мертвые точки: это ступени регулирования 15 при углах φ от -117 до -90 град. эл. и -15 при φ от 63 до 90 град. эл. В этом случае вообще нельзя осуществить никакой переход из этих состояний, и ФПУ может достаточно долго оставаться в них, пока угол φ не сменится до той величины, где наблюдается уже полная управляемость. Во всех остальных случаях ФПУ можно переключить в другие состояния, которые могут не соответствовать требуемому углу регулирования. При этом может возникнуть ситуация, когда измененное состояние ФПУ способствует благоприятному изменению угла φ , а может быть и так, что угол φ останется в том же диапазоне, и тогда, с точки зрения управления, ситуация ухудшится, поскольку останется меньшее число возможных переключений состояний ФПУ или их не останется вовсе (переключение в одну из мертвых точек).

На основе всего выше сказанного предлагается произвести корректирование алгоритмов работы системы управления для ФПУ со средней точкой с учетом возможного попадания в зоны частичной управляемости.

Для этого необходимо знать зависимость угла φ от номера ступени регулирования ($\varphi(\alpha)$),

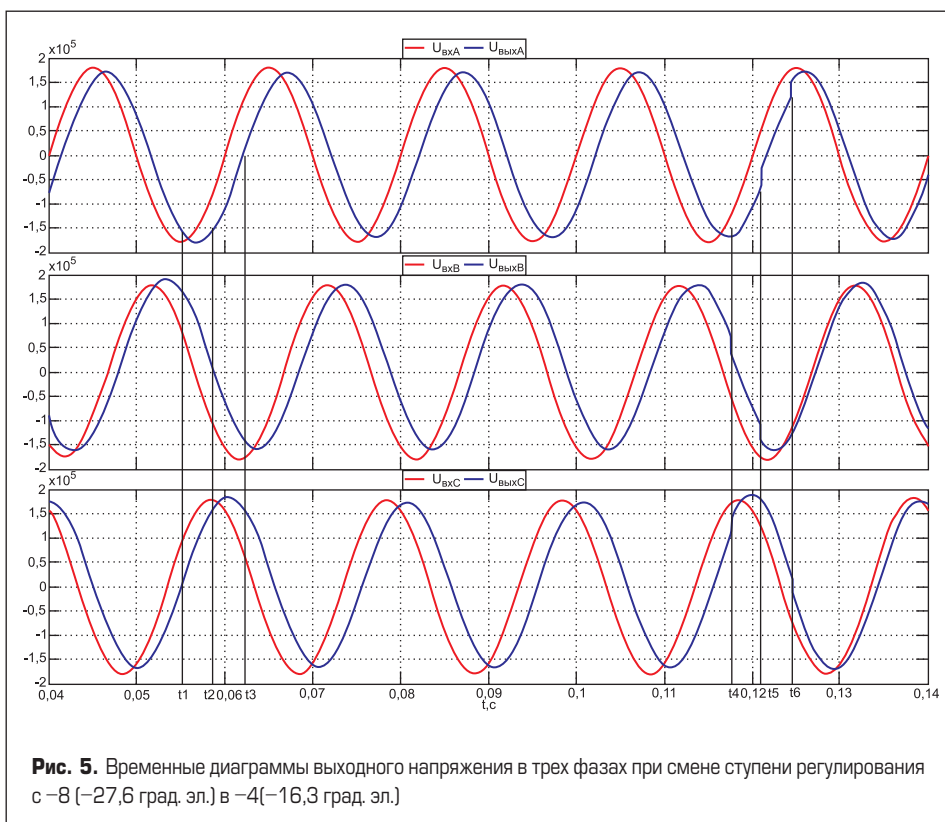


Рис. 5. Временные диаграммы выходного напряжения в трех фазах при смене ступени регулирования с -8 ($-27,6$ град. эл.) в -4 ($-16,3$ град. эл.)

чтобы прогнозировать ситуацию. Вначале для выбранного места установки ФПУ специалистами в области электроэнергетики с помощью специализированных программных средств может быть получена теоретическая зависимость. Однако реальная зависимость угла φ от номера ступени регулирования может отличаться от теоретической, и ее необходимо вычислять в ходе работы ФПУ. Это позволит, со временем накопления результатов, более точно прогнозировать ситуацию и при попадании в области частичной управляемости осуществлять наиболее быстрое требуемое переключение.

Для определения зависимости $\varphi(\alpha)$ нужно знать ее профиль, который представляет собой массив значений $d\varphi/d\alpha$ между соседними номерами ступеней регулирования. Если профиль определен, то, зная текущее значение угла $\varphi_{\text{тек}}$ при заданной ступени регулирования, можно спрогнозировать значения угла φ для всех остальных ступеней регулирования. В самом начале работы ФПУ предполагается использовать профиль теоретический. Впоследствии в ходе работы ФПУ необходимо производить корректировку профиля под реальные значения угла φ , при этом перерасчет будет выполняться каждый раз, когда произойдет смена состояния ФПУ.

В связи со всем этим появляется необходимость создания интеллектуальной системы управления, которая собирает данные об изменениях угла φ , что позволит ей прогнозировать ситуацию, а также внутри себя производить генерацию оптимального маршрута переключения для каждого случая. Система в результате получается гибкой и приспособляемой к каждой конкретной ситуации.

Выводы

- Для рассчитанных коэффициентов трансформации схемы ФПУ со средней точкой реальный диапазон углов регулирования фазового сдвига напряжения α находится в диапазоне от -46 до $+29$ град. эл. Для удовлетворения заявленным техническим характеристикам (α от -40 до $+40$ град. эл.) следует произвести перерасчет коэффициентов трансформации с учетом параметров шунтового и серийного трансформаторов: активного сопротивления обмоток и индуктивности рассеивания.
- Модуль вектора напряжения на выходе ФПУ всегда будет меньше модуля напряжения на входе ФПУ. Наибольшее отклонение составляет 8%.
- Смена углов регулирования ФПУ осуществляется посредством как одноэтапного, так и двухэтапного изменения режимов работы тиристорных мостов. Среди множества возможных переключений для первого этапа двухэтапного перехода желательно совершать тот переход, который приведет в промежуточном состоянии ФПУ к наименьшему изменению угла регулирования относительно исходного. Такой порядок переключения обуславливает минимизацию искажения выходного напряжения ФПУ во время переходного процесса.
- ФПУ со средней точкой обладает полной управляемостью при работе линии электропередачи с углами φ сдвига фазы между напряжением и током в диапазонах: от -180 до -117 ; от -90 до 63 ; от 90 до 180 град. эл. Под полной управляемостью следует понимать возможность изменения угла фазового сдвига напряжения ФПУ из любой исходной ступени регулирования в любую конечную.

- ФПУ со средней точкой обладает частичной управляемостью при работе линии электропередачи с углами φ от -117 до -90 град. эл. и от 63 до 90 град. эл. При этих углах общее число возможных переходов сокращается более чем в два раза. При углах φ от -117 до -90 град. эл. при номере ступени регулирования 15 и при углах φ от 63 до 90 град. эл. при номере ступени регулирования -15 невозможно осуществить никакой переход. Ширина области частичной управляемости определяется режимами коммутации тиристорных мостов и временем обратного восстановления тиристором управляющих свойств.
- Система управления ФПУ должна быть снабжена наблюдателем состояния для прогнозирования возможности перехода в зоны неполной управляемости и своевременного изменения угла фазового сдвига напряжения на выходе ФПУ.

Литература

1. Рыжов Ю. П. Дальние электропередачи сверхвысокого напряжения. М.: Издательство МЭИ. 2007.
2. Стельмаков В. Н., Жмуров В. П., Тарасов А. Н., Гринштейн Б. И., Тузлукова Е. В. Фазоповоротные устройства с тиристорным управлением // Энергетик. 2010. № 8.
3. Жмуров В. П., Стельмаков В. Н., Ремизевич Т. В., Рашитов П. А. Исследование алгоритмов переключения вентилей мощного фазоповоротного устройства // Электро. 2010. № 5.
4. Рашитов П., Ремизевич Т. Анализ режимов коммутации тиристорного моста переменного тока в среде PSpice // Силовая электроника. 2010. № 2.
5. Мельников Н. А. Электрические сети и системы. М.: Энергия. 1975.