

Фазопоротные устройства с тиристорными коммутаторами для активно-адаптивных электрических сетей

АСТАШЕВ М.Г., ПАНФИЛОВ Д.И.

Рассмотрены основные характеристики фазопоротных устройств с тиристорными коммутаторами, обеспечивающие возможность их эффективного применения в активно-адаптивных электрических сетях. Показаны основные особенности проектирования фазопоротных устройств с коммутаторами на базе силовых полупроводниковых приборов.

Ключевые слова: фазопоротное устройство, фазопоротный трансформатор, активно-адаптивная сеть, управляемые линии переменного тока, тиристорный коммутатор, цифровая система управления

В настоящее время повышение эффективности функционирования энергосистем ведущих мировых стран осуществляется за счёт развития и широкомасштабного внедрения активно-адаптивных электрических сетей (Smart Grid, FACTS) [1]. Одними из наиболее распространенных элементов FACTS являются фазопоротные трансформаторы (ФПТ). Данные устройства используются для решения широкого круга задач, в основе которого лежит активное управление потоками мощности в линиях электропередачи (ЛЭП), достигаемое путём воздействия на фазовый сдвиг напряжений различных участков ЛЭП. Среди таких задач наиболее характерными по применению ФПТ являются:

- направленное перераспределение потоков мощности в сложных замкнутых электрических сетях;
- увеличение пропускной способности отдельных сечений энергосистемы;
- ограничение перегрузок ЛЭП, шунтированных ЛЭП высшего напряжения;
- снижение транспортных потерь активной мощности;
- повышение статической и динамической устойчивости энергосистемы;
- удаление льда с воздушных ЛЭП.

На сегодня в мире работают более 100 ФПТ [2, 3] (Великобритания, Франция, Бельгия, Нидерланды, США и Канада). Выпускают ФПТ такие крупные компании, как ABB, Simens, General Electric, Alstom и др. Установленные мощности устройств варьируются в диапазоне от сотен до тысяч мегавольт-ампер [3]. Изменение фазового сдвига выходного напряжения практически всех эксплуатируемых управляемых ФПТ осуществляется регуля-

The main characteristics of phase shifting devices with thyristor switches, the use of which allows these devices to be efficiently applied in active-adaptive electric networks, are considered. The main specific features of designing phase shifting devices equipped with switches on the basis of power semiconductors are shown.

Key words: phase shifting device, phase shifting transformer, active-adaptive network, controlled AC power lines, thyristor switch, digital control system

торами под нагрузкой (РПН), характеризующимися сравнительно невысоким быстродействием (единицы секунд) и относительно невысокой надёжностью [4]. В свою очередь, концепция активно-адаптивной сети предъявляет к элементам, входящим в ее структуру, довольно жесткие требования к их характеристикам, оказывающим непосредственное влияние на качество управления процессами транзита электроэнергии в различных режимах работы сети. Часто такое управление должно быть быстродействующим и воздействовать на сеть в темпе процесса [1].

Повысить быстродействие фазопоротных устройств (ФПУ) можно путем применения в них коммутаторов на силовых полупроводниковых приборах. Динамические характеристики таких полупроводниковых ключей и их высокая коммутационная способность и надежность значительно превосходят аналогичные характеристики механических переключателей. При этом большое разнообразие схмотехнических вариантов построения коммутаторов на полупроводниковых силовых ключах в полной мере отвечает широкому спектру структур и различных схмотехнических вариантов построения фазопоротных устройств, имеющих различные характеристики и функциональное назначение [5–9].

По режиму работы, уровням коммутируемых токов и напряжений из полупроводниковых приборов в наибольшей степени на сегодня подходят для построения коммутаторов ФПУ однооперационные тиристоры, широко и успешно применяемые в таких устройствах FACTS, как СТК, УПК, УШР, вставки постоянного тока и др. В качестве примера

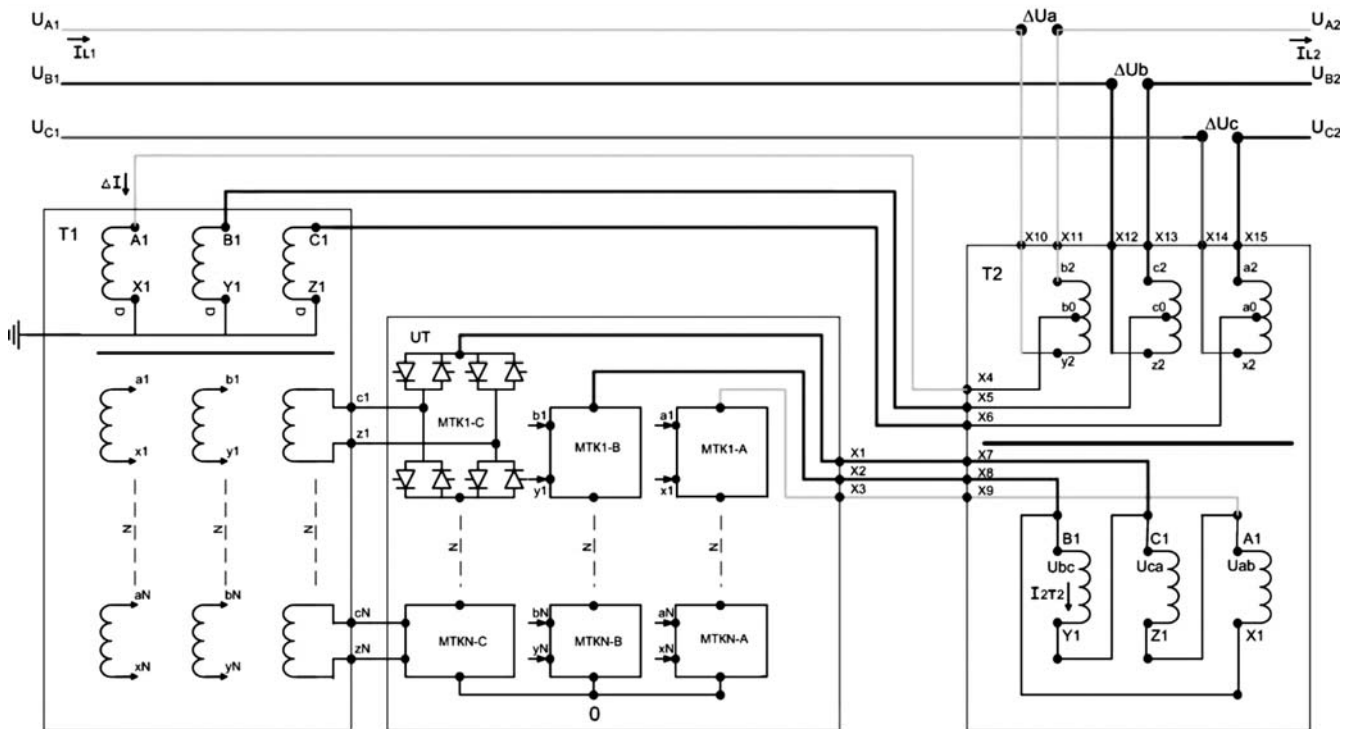


Рис. 1. Функциональная схема ФПУ с тиристорным коммутатором

на рис. 1 приведен один из возможных вариантов схемотехнической реализации ФПУ с тиристорным коммутатором (ТК). Этот вариант известен как схема со средней точкой серийного трансформатора [5]. В числе её основных особенностей – неизменное значение амплитуды вольтодобавочного напряжения ФПУ при любом формируемом фазовом сдвиге. Векторная диаграмма напряжений, поясняющая работу данного устройства, представлена на рис. 2.

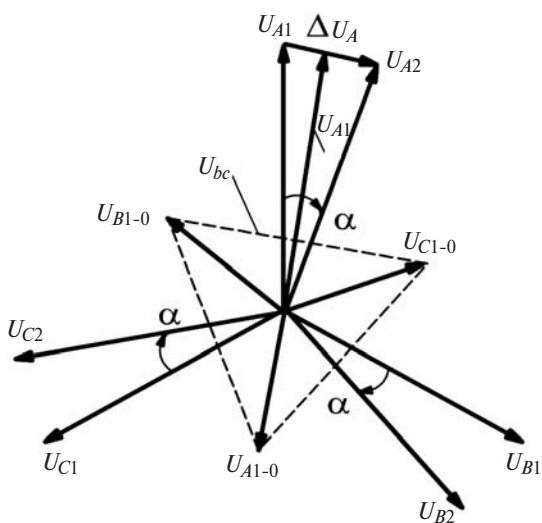


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений ФПУ

Структура ФПУ включает три основные части (рис. 1): шунтовой (параллельный) трансформатор $T1$, серийный (последовательный) трансформатор $T2$ и тиристорный коммутатор UT . Фазовый сдвиг на выходе устройства формируется путем подключения (комбинации) различного числа секций вторичных обмоток шунтового трансформатора ($aN-xN, \dots, cN-zN$), имеющих различные выходные напряжения, к первичным обмоткам серийного трансформатора ($B1-Y1, C1-Z1, A1-X1$) с помощью тиристорных мостов коммутатора (МТК).

Управление значением фазового сдвига выходного напряжения ФПУ осуществляется путём изменения состояний тиристорных мостов. Возможные состояния тиристорных мостов коммутатора приведены на рис. 3. Каждое плечо моста содержит два встречно включённых тиристорных ключа, что обеспечивает возможность двухсторонней проводимости тока первичной обмотки серийного трансформатора. При одновременном включении вертикальных плеч одной стороны тиристорного моста (например рис. 3,а) коммутируемая им секция вторичной обмотки шунтового трансформатора исключается из контура протекания тока моста и, соответственно, не участвует в процессе формирования выходного напряжения ФПУ. Диагональная коммутация плеч позволяет включать соответствующую секцию вторичной обмотки шунтового трансформатора в контур первичной обмотки серийного трансформатора согласно (рис. 3,б) и

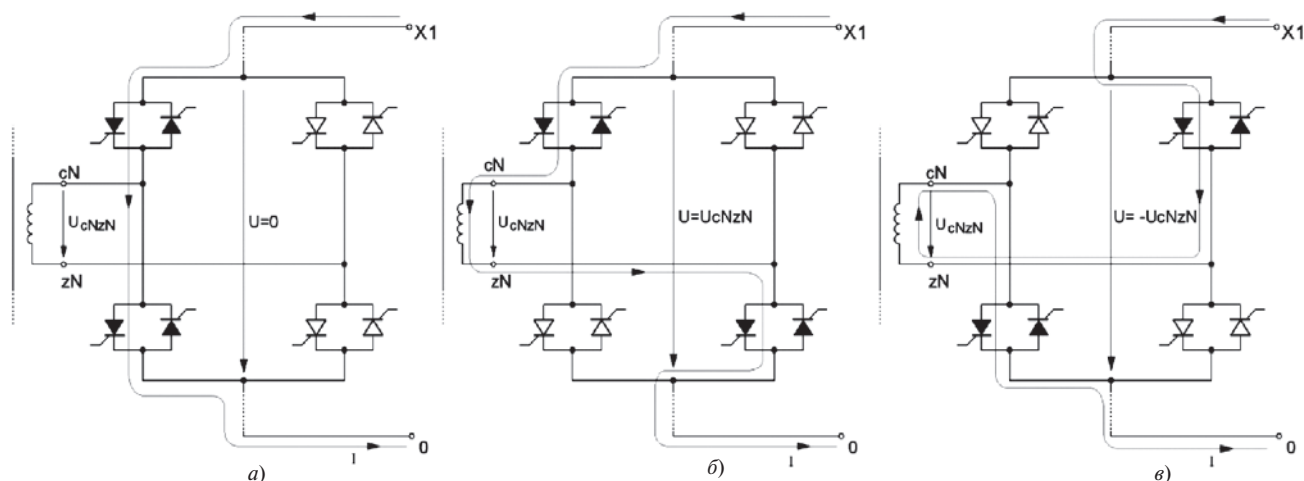


Рис. 3. Состояния тиристорных мостов ФПУ

встречно (рис. 3,в). Такой мостовой коммутатор позволяет при неизменной мощности и конструкции электромагнитных элементов ФПУ обеспечивать симметричное формирование как положительных, так и отрицательных углов фазового сдвига. Другие комбинации включения плеч мостов недопустимы, поскольку приводят к КЗ секции вторичной обмотки шунтового трансформатора.

Если, например, каждая фаза вторичной обмотки шунтового трансформатора имеет по четыре изолированных секции, коммутируемых четырьмя тиристорными мостами, то за счёт описанных выше свойств тиристорных мостов в каждом направлении (положительном либо отрицательном) обеспечивается 2^4 ступеней фазового сдвига (т.е. 16 с учётом нуля). При соотношении числа витков секций вторичной обмотки шунтового трансформатора 1:2:4:8 обеспечивается равномерное изменение фазового сдвига между соседними ступенями.

При аналогичной конструкции вторичной обмотки шунтового трансформатора применение РПН позволило бы получить всего по четыре ступени изменения фазового сдвига в каждом направлении. Таким образом, мостовой коммутатор позволяет добиться существенно более высокой дискретности изменения фазового сдвига ФПУ.

Полное изменение угла фазового сдвига на выходе ФПУ по каждой фазе, достигаемое за счёт изменения состояний тиристорных мостов, в предельном случае может быть реализовано на одном периоде сетевого напряжения, что не превышает 20 мс. При этом максимальное число коммутаций тиристорных ключей коммутатора не лимитируется, что позволяет существенно улучшить показатели надёжности устройства в целом.

Совокупность рассмотренных особенностей ФПУ с тиристорными коммутаторами, включающая высокое быстродействие, высокую дискретность изменения фазового сдвига, повышенную надёжность, даёт возможность формировать практически любой закон изменения фазового сдвига напряжения на выходе ФПУ. В конечном счете, это позволяет получить качественно новые характеристики ФПУ, необходимые для использования устройства в активно-адаптивных электрических сетях.

Для практической реализации потенциальных возможностей ФПУ с тиристорным коммутатором требуются современные подходы к проектированию как силовой схемы преобразователя, так и его системы управления. Одной из важнейших задач, решаемых на этапе проектирования, прежде всего является обеспечение высокой надёжности работы тиристорного коммутатора в условиях непрерывно изменяющегося режима работы сети. При этом основная ответственность за обеспечение надёжности, в отличие от широко применяемых ФПТ с РПН, возлагается не только на конструктивные особенности силового электромагнитного оборудования ФПУ, но и на меры по эффективному управлению тиристорным преобразователем в различных режимах его работы. Как показывает анализ, надёжное переключение тиристорного коммутатора можно реализовать лишь с учетом электромагнитных процессов, происходящих в сети и трансформаторах ФПУ [10–12]. При этом формирование управляющих воздействий на тиристорный преобразователь должно осуществляться с использованием информации о мгновенных значениях токов и напряжений на каждом периоде работы сети.

В результате, структура и алгоритмы работы системы управления ФПУ с тиристорным коммутатором значительно усложняются. Задачи, решаемые системой управления, становятся комплексными, многофункциональными и многокритериальными. При этом сама система должна быть цифровой, работать в режиме реального времени и отслеживать состояние ФПУ на каждом периоде работы сети. К основным функциям системы управления можно отнести:

надежное переключение тиристорных мостов коммутатора в процессе изменения выходного состояния устройства;

реализация различных законов управления ФПУ в соответствии с требованиями и текущим состоянием энергосистемы;

осуществление диагностики и защиты устройства в различных критических режимах работы.

Достижение высокой надежности работы тиристорного коммутатора при работе ФПУ в различных схемно-режимных ситуациях сети обеспечивается, прежде всего, реализацией надежной коммутации тиристорных ключей в мостах коммутатора. Детальный анализ процессов коммутации тиристор в тиристорных мостах ФПУ, проведенный с целью определения требований к обеспечению надежного процесса регулирования фазы выходного напряжения ФПУ, выявил определенные ограничения, накладываемые на интервалы времени в пределах одного периода работы сети, когда переключения мостов можно гарантированно осуществлять [10,12]. На эти ограничения влияют факторы:

режим работы линии (фазовый сдвиг между током и напряжением и их абсолютные значения), в которой установлен ФПУ;

время восстановления запирающих свойств тиристор коммутатора;

электромагнитные процессы в шунтовом трансформаторе на интервале коммутации, связанные с процессами переключения одной или нескольких секций его вторичных обмоток;

реальные физические параметры шунтового трансформатора;

начальное и конечное значения угла фазового сдвига при переключении ФПУ.

Таким образом, необходимые изменения фазового угла ФПУ можно осуществлять лишь в определенные (разрешенные) интервалы времени. По существу это является следствием того факта, что применяемые ключевые приборы не являются идеальными и требуются определенные условия для их переключения. Длительность этих интервалов на периоде работы сети меняется в зависимости от ре-

жима работы линии (угла сдвига фаз между напряжением и током в линии), начальных и конечных углов регулирования ФПУ. Система управления должна непрерывно отслеживать режим работы линии и определять временные интервалы для безопасного переключения тиристорных мостов на каждом периоде работы сети в соответствии с необходимым изменением угла ФПУ [13]. Таким образом, уже на этапе проектирования алгоритмы работы СУ ФПУ должны разрабатываться с учетом возможности адаптации устройства к любым возможным состояниям сети.

Благодаря наличию у ФПУ с тиристорным коммутатором широких функциональных возможностей, в частности высокой дискретности изменения фазового угла, в процессе переключения появляется возможность выбора наиболее рационального пути (маршрута) движения системы из начального состояния (с текущим значением угла сдвига ФПУ) в заданное конечное (с заданным новым значением угла сдвига ФПУ). При этом критерии выбора маршрута переключения углов фазового сдвига ФПУ в процессе управления могут быть различны. Они могут базироваться на различных требованиях:

максимально быстрой, медленной или заданной оператором динамики отработки ФПУ внешних управляющих воздействий. Это требование может вытекать из анализа переходных процессов в линии при изменении фазового сдвига ФПУ;

минимального негативного воздействия на ресурс силового оборудования ФПУ в переходном процессе;

отработка системой управления заданного функционала при работе ФПУ по различным сценариям (например, режим ограничения тока в линии, оптимизации транзитных потерь в линиях, управления перетоками в сечениях ЕНЭС и т.д.).

В зависимости от выбранной стратегии система управления будет реализовывать различные алгоритмы управления тиристорным коммутатором, что, в конечном счете, будет определять маршрут движения системы из одного состояния в другое [11, 13].

Последняя, диагностическая, функция системы управления необходима из-за наличия в тиристорном коммутаторе быстродействующих полупроводниковых приборов (тиристоров), включенных, как правило, группами (последовательно) ввиду относительно высоких напряжений на вторичных обмотках шунтового трансформатора. При разработке коммутатора учитывается, что, хотя выход из строя одного или нескольких приборов в группе не при-

водит к фатальным последствиям и отказу ФПУ, важно обеспечить своевременную диагностику, контроль и соответствующее управление коммутатором. Кроме того, необходимо также обеспечивать надежную и устойчивую работу устройства при различных аварийных режимах как линии электропередачи, так и внутри самого ФПУ. В этих режимах система управления должна обеспечивать своевременное диагностирование аварийной ситуации и формирование соответствующего управляющего воздействия на коммутатор. Для реализации этой функции система управления должна иметь широкую сеть обратных связей на базе датчиков тока и напряжения, расположенных в соответствующих цепях преобразователя.

Благодаря большим вычислительным мощностям и быстрдействию современные цифровые микропроцессорные системы позволяют успешно реализовывать одновременное выполнение всех отмеченных функций системы управления ФПУ в режиме реального времени. Поэтому комплексное решение отмеченных задач с аппаратной точки зрения не представляет на сегодня существенной технической сложности.

Ввиду того что мощности ФПУ для конкретных применений в энергетических системах составляют десятки, сотни и даже тысячи мегавольт-ампер, исследование электромагнитных процессов в ФПУ и отладка алгоритмов работы их систем управления в полном объеме непосредственно на объекте установки не представляются возможными. В этом случае разработке конструкторской документации на силовое оборудование и программно-аппаратное обеспечение ФПУ должен предшествовать большой объем математического моделирования и экспериментальных исследований электромагнитных процессов на физических моделях. Для этих целей в ОАО «ЭНИН» была создана физическая модель ФПУ с тиристорным коммутатором и микропроцессорной системой управления. Физическая модель позволила выявить, проверить и отработать основные принципы и особенности управления тиристорным коммутатором для применения в составе ФПУ.

Для эффективного использования ФПУ с тиристорными коммутаторами в энергосистеме их управление должно осуществляться в режиме реального времени (в темпе процесса) с учетом информации о текущем состоянии энергосистемы и задания законов регулирования ФПУ в каждом конкретном случае, определяемом режимом работы сети. При работе в нормальных и ремонтных режимах во многих случаях высокое быстрдействие

ФПУ может и не потребоваться. Однако в аварийных режимах и других предельных ситуациях такие ФПУ позволяют осуществлять управление процессами в линии электропередачи на каждом периоде работы сети. Это может быть использовано, например, для быстрого ограничения тока в линии электропередачи в послеаварийных схемах сети. Реакция ФПУ с тиристорным коммутатором на резкое возрастание тока в линии может быть более быстрой, чем реакция систем противоаварийной защиты.

В заключение подчеркнем, что замена электро-механического переключателя отпаек обмотки шунтового трансформатора на полупроводниковый коммутатор приводит к качественному изменению характеристик ФПУ. При этом проектирование таких устройств должно базироваться на силовой полупроводниковой электронике и цифровых системах управления. Эти технологии, в конечном счете, и определяют результирующий высокий технико-экономический эффект.

Получить максимальный эффект от использования ФПУ с тиристорными коммутаторами в электроэнергетической системе возможно лишь в сочетании с современными системами мониторинга процессов в ВЛ, позволяющими оперативно отслеживать состояние сети и определять необходимые требования по управлению состоянием ФПУ в режиме реального времени. Активно внедряемые сегодня цифровые подстанции предполагают наличие комплекса необходимого оборудования как для мониторинга процессов в ВЛ, так и для формирования сигналов оптимального управления всем оборудованием подстанции, в том числе и ФПУ. В данных условиях ФПУ с ТК будет являться как раз тем гибким инструментом управления, который необходим для активно-адаптивных сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бурман А.П., Розанов Ю.К., Шакарян Ю.Г.** Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем: Учебное пособие.— М.: Издат. дом МЭИ, 2012.
2. www.abb.com
3. **Добрусин Л.А.** Тенденции применения фазоповоротных трансформаторов в электроэнергетике. — Энергоэксперт, 2012, № 3.
4. **Алексеев Б.А.** Контроль состояния устройств регулирования напряжения трансформаторов под нагрузкой. — Электро, 2008, № 4.
5. **Патент** на полезную модель №106060 «Фазоповоротное устройство» от 31.01.2011 г.
6. **Патент** на полезную модель №107005. Фазоповоротное устройство от 25.03.2011.

7. Патент на полезную модель №107421. Фазопоротное устройство от 08.04.2011.

8. Патент на полезную модель №2450420. Полупроводниковое фазопоротное устройство от 13.05.2011.

9. Патент на полезную модель №110558. Полупроводниковое фазопоротное устройство от 08.06.2011.

10. **Рашитов П.А., Ремизевич Т.В.** Анализ режимов коммутации тиристорного моста переменного тока в среде PSpice. — Силовая электроника, 2010, № 3.

11. **Ремизевич Т., Рашитов П.** Особенности управления полупроводниковым ФПУ со средней точкой. — Силовая электроника, 2011, № 1.

12. **Новиков М.А., Панфилов Д.И., Ремизевич Т.В., Рашитов П.А.** Анализ процессов одновременной коммутации тиристорных мостов в преобразователях с многообмоточными трансформаторами. — Электричество, 2013, № 5.

13. Патент на полезную модель №122814 Система управления поэтапным переключением обмоток шунтового трансформатора фазопоротного устройства и фазопоротное устройство с такой системой управления от 09.06.2012.

[25.04.13]

А в т о р ы : Асташев Михаил Георгиевич окончил факультет электронной техники (ЭТФ) Московского энергетического института (МЭИ) в 2006 г. В 2010 г. защитил кандидатскую диссертацию «Разработка и исследование преобразователей для вентильно-индукторных двигателей с конфигурируемыми обмотками». Заведующий лабораторией преобразовательной техники им. К.А. Круга ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского».

Панфилов Дмитрий Иванович окончил ЭТФ МЭИ в 1971 г. В 1999 г. защитил докторскую диссертацию «Программно-аппаратные средства построения систем управления объектами промышленной электроники». Заместитель генерального директора по науке ОАО «Энергетический институт им. Г.М. Кржижановского», заведующий кафедрой промышленной электроники НИУ «МЭИ».