ПРИМЕНЕНИЕ ФАЗОПОВОРОТНЫХ УСТРОЙСТВ С ТИРИСТОРНЫМИ КОММУТАТОРАМИ В АКТИВНО-АДАПТИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

АВТОРЫ:

АСТАШЕВ М.Г.,
К.Т.Н.
ОАО «ЭНИН»

НОВИКОВ М.А.
ОАО «ЭНИН»

ПАНФИЛОВ Д.И.,
Д.Т.Н.
ОАО «ЭНИН»

Идеология активно-адаптивной сети предъявляет повышенные требования к характеристикам элементов, входящих в ее структуру. В такой сети управление должно быть достаточно быстродействующим. Фазовый сдвиг выходного напряжения эксплуатируемых в настоящее время фазоповоротных трансформаторов осуществляется с помощью регуляторов под нагрузкой, обладающих довольно низким быстродействием и недостаточной надежностью. Повысить быстродействие таких устройств можно за счет применения коммутаторов, построенных на основе силовых полупроводниковых приборов.

Самый эффективный способ управления потоками мощности – применение фазоповоротных трансформаторов

Реализация концепции интеллектуальной электроэнергетической системы России с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС) предполагает широкомасштабное внедрение в ЕНЭС различных устройств преобразовательной техники и силовой электроники, являющихся элементами гибких электропередач переменного тока – FACTS [1, 2]. В мировой практике значительное распространение получили такие устройства FACTS, как фазоповоротные трансформаторы (ФПТ). Они реализуют следующие функции:

1. Направленное перераспределение потоков мощности в сложных замкнутых электрических сетях.
2. Повышение пропускной способности отдельных сечений энергосистемы.
3. Ограничение перегрузок линий электропередачи, шунтированных ЛЭП более высокого напряжения.
4. Снижение транспортных потерь активной мощности.
5. Повышение статической и динамической устойчивости энергосистемы.
6. Удаление льда на воздушных ЛЭП.

На сегодня количество работающих в мире ФПТ превышает 100 экземпляров [3, 4]. Они эксплуатируются в Великобритании, Франции, Бельгии, Нидерландах, США и Канаде. Производят ФПТ такие крупные мировые компании, как ABB, Siemens, General Electric, Alstom и др. Установленные мощности устройств варьируются в диапазоне от сотен до тысяч МВА [4].

Изменение фазового сдвига выходного напряжения эксплуатируемых в настоящее время управляемых ФПТ осуществляется с помощью регуляторов под нагрузкой (РПН), обладающих довольно низким быстродействием (измеряемым секундами) и относительно невысокой надежностью [5]. Идеология активно-адаптивной сети предъявляет повышенные требования к характеристикам элементов, входящих в ее структуру и оказывающих влияние на качество управления транзитом электроэнергии. В такой сети управление должно быть достаточно быстродействующим [1].

Повысить быстродействие фазоповоротных устройств (ФПУ) можно за счет применения коммутаторов, построенных на основе силовых полупроводниковых приборов. Динамические характеристики современных полупроводниковых ключей, их высокая коммутационная способность и надежность значительно превосходят аналогичные характеристики механических переключателей. На сегодня приборами, наиболее подходящими для построения полупроводниковых коммутаторов ФПУ, являются однооперационные тиристоры, широко и успешно применяемые в таких устройствах FACTS, как статические тиристорные компенсаторы (СТК), устройства продольной компенсации (УПК), управляемые шунтирующие реакторы (УШР), вставки постоянного тока и др.

СТРУКТУРА И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ ФПУ С ТИРИСТОРНЫМ КОММУТАТОРОМ

ФПУ с ТК состоят из трех основных частей (рис. 1): шунтовой (параллельный) трансформатор (T1), сериесный (последовательный) трансформатор (T2) и тиристорный коммутатор (UT). Фазовый сдвиг на выходе устройства формируется

ИНФОРМАЦИЯ

АКТИВНО-АДАПТИВНАЯ СЕТЬ

Активно-адаптивная сеть (ААС) – качественно новый вид электрической сети, позволяющей осуществлять в реальном времени мониторинг и управление сетью, а также коммуникации между потребителями и поставщиками.

Цель активно-адаптивной сети – обеспечение эффективного использования всех видов ресурсов для надежного, качественного и эффективного энергоснабжения потребителей энергии за счет гибкого взаимодействия ее субъектов (генерации, электрических сетей и потребителей) на основе современных технологических средств и единой интеллектуальной системы управления.

Одним из важнейших направлений модернизации и инновационного развития электроэнергетики является переход к созданию интеллектуальных энергосистем с активно-адаптивной сетью (ИЭС ААС).

Интеллектуальная энергосистема должна стать новой ступенью развития электроэнергетических систем в XXI столетии.

ФУНКЦИОНАЛЬНАЯ СХЕМА ФПУ С ТИРИСТОРНЫМ КОММУТАТОРОМ

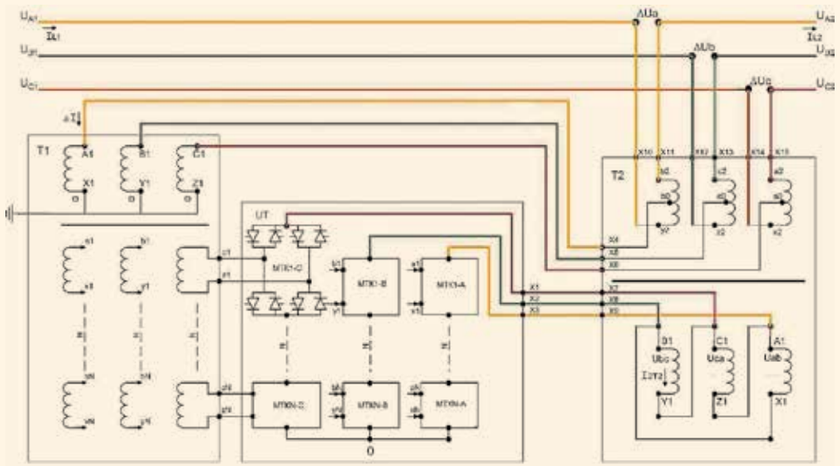

Рис. 1

за счет подключения (комбинации) различного количества секций вторичных обмоток шунтового трансформатора (aN-xN,.., cN-zN), имеющих различные выходные напряжения, к первичным обмоткам сериесного трансформатора (B1-Y1, C1-Z1, A1-X1) посредством тиристорных мостов коммутатора (МТК). Векторная диаграмма напряжений, поясняющая работу данного устройства, представлена на рис. 2.

На рис. 3 показаны возможные состояния тиристорных мостов коммутатора. Изменяя состояния этих мостов, можно осуществлять управление величиной фазового сдвига выходного напряжения ФПУ. Каждое плечо моста содержит два встречно включенных тиристорных ключа, что обеспечивает возможность двухсторонней проводимости тока первичной обмотки сериесного трансформатора. При одновременном включении вертикальных плеч одной стороны тиристорного моста (рис. 3 а) коммутируемая им секция вторичной обмотки шунтового трансформатора исключается из контура протекания тока моста. Диагональная коммутация плеч позволяет включать соответствующую секцию вторичной обмотки шунтового трансформатора в контур первичной обмотки сериесного трансформатора согласно (рис. 3 б) и 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. Кроме того, дискретность изменения углов, формируемых ФПУ с ТК, существенно более высока по сравнению с дискретностью, обеспечиваемой ФПТ с РПН.

Полное изменение угла фазового сдвига на выходе ФПУ по каждой фазе, достигаемое за счет изменения состояний тиристорных мостов, в предельном случае может быть реализовано на одном периоде сетевого напряжения, который составляет менее 20 мс. При этом максимальное число коммутаций тиристорных ключей не лимитируется, что существенно улучшает показатели надежности устройства в целом.

Совокупность рассмотренных особенностей ФПУ с тиристорными коммутаторами (высокие быстродействие и дискретность угла фазового сдвига, повышенная надежность) делает возможным формирование практически любого закона изменения фазового сдвига напряжения на выходе ФПУ. Это позволяет получить качественно новые характеристики ФПУ и значительно расширить спектр решаемых устройством задач, сделав возможным реализацию таких функций, как:

- повышение стабильности энергосистем в переходных процессах;
- повышение динамической устойчивости энергосистем за счет демпфирования колебаний потоков мощности;
- оперативное устранение перегрузок сетевого оборудования в послеаварийных режимах работы, предупреждающее срабатывание систем противоаварийной автоматики.

Практическая реализация обсуждаемых возможностей ФПУ с тиристорным коммутатором требует современных подходов к проектированию как силовой схемы устройства, так и его системы управления. При этом грамотные конструктивные решения могут быть выработаны только с учетом особенностей функционирования конкретных ФПУ на реальном объекте установки. Эти решения должны принимать во внимание особенности режимов работы энергосистемы в районе данного объекта.

АНАЛИЗ ПОТЕНЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ УСТАНОВКИ ФПУ С ТК В ЕНЭС

Начиная с 2011 г. ОАО «ЭНИН» по заказу ОАО «ФСК ЕЭС» ведет разработку ФПУ с тиристорным коммутатором. На сегодня в ЕНЭС насчитывается более десяти объектов, специфика режимов работы которых требует принятия дополнительных мер для обеспечения надежности энергоснабжения потребителей. Для определения пилотного объекта установки опытно-промышленного образца фазоповоротного устройства с тиристорным коммутатором в ОАО «ЭНИН» были рассмотрены три объекта, рекомендованные ОАО «СО ЕЭС»:

1. АТ 500/220 кВ ПС 750 кВ «Новобрянская» (ОЭС Центра)

2. ВЛ 220 кВ «Зеленодольск–Волжская», «Зеленодольск–Помары» (ОЭС Средней Волги)

3. ВЛ 220 кВ «Барабинская–Татарская–Восход» (ОЭС Сибири)

Для всех этих объектов на этапы 2011, 2015, 2020 и 2025 гг. были проведены расчеты электрических режимов; выявлены ограничения пропускной способности электропередач, в которые входят рассматриваемые объекты; исследована возможность устранения возникающих ограничений путем установки ФПУ. Для расчета электрических режимов и анализа статической устойчивости разработана математическая модель фазоповоротного устройства, учитывающая специфику работы ФПУ с ТК и его конструктивные особенности. Модель адаптирована для работы в программном комплексе RASTR Win.

Расчеты, проведенные на основе математической модели, выявили наличие значительных перегрузок сетевого оборудования на каждом рассматриваемом объекте. Перегрузки возникают в ремонтных и послеаварийных режимах работы сети и существенно снижают максимально допустимые перетоки мощности в характерных сечениях энергосистемы. Было установлено, что применение ФПУ на всех объектах устраняет проблему перегрузок и позволяет увеличить перетоки в этих сечениях до значений, ограниченных коэффициентом запаса по статической устойчивости.

Для ряда объектов была выявлена дополнительная функция ФПУ, позволяющая снизить суммарные потери активной мощности в параллельных транзитах 500/220 кВ за счет оптимального перераспределения ее перетоков между цепями транзитов. На рис. 4 приведен пример зависимости транзитных потерь мощности, отнесенных к исходной величине при естественном потокораспределении (P_0), от угла фазового сдвига. Очевидно, что данная техническая возможность позволяет использовать ФПУ не только в ремонтных и послеаварийных, но и в нормальных режимах работы энергосистемы, что существенно улучшает показатели экономической эффективности.

Для выбора конкретного объекта в дополнение к анализу технической

ВЕКТОРНАЯ ДИАГРАММА НАПРЯЖЕНИЙ ФПУ

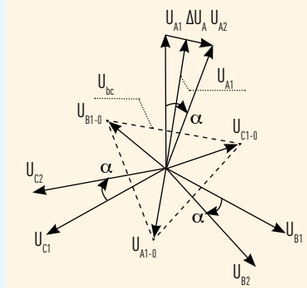

Рис. 2

ИНФОРМАЦИЯ

ТИРИСТОРНЫЙ КОММУТАТОР

Тиристорный коммутатор — устройство для управления электрическими нагрузками. В качестве силовых элементов используются тиристоры или симисторы. Тиристорные коммутаторы позволяют задавать требуемый темп изменения приложенного напряжения в цепи нагрузки, создавать начальные условия при включении нагрузки.

Применяются в устройствах плавного пуска, частотно-регулируемых приводах,тиристорных регуляторах мощности, на транспорте в системах управления тяговыми электродвигателями.

СОСТОЯНИЯ ТИРИСТОРНЫХ МОСТОВ ФПУ

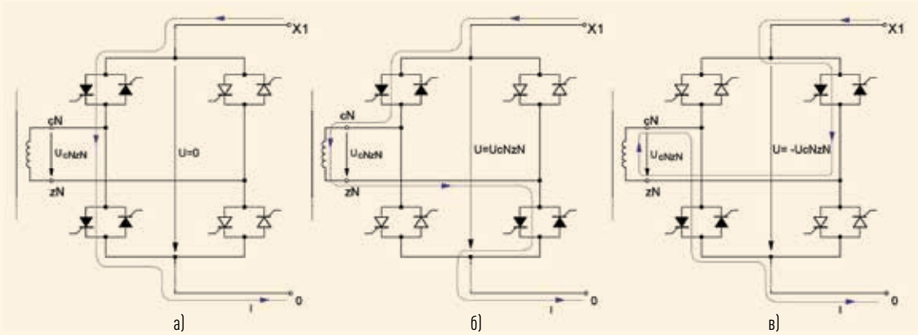

Рис. 3

эффективности применения ФПУ должен быть проведен анализ показателей экономической эффективности, включающих чистый дисконтированный доход, индекс доходности и срок окупаемости. Кроме того, для каждого объекта целесообразно провести сравнение капитальных затрат на установку ФПУ с капитальными затратами на альтернативные сетевые мероприятия, позволяющие добиться аналогичного технического эффекта. Только с учетом всех перечисленных факторов можно оценить технико-экономическую эффективность применения ФПУ на каждом из объектов и выбрать пилотный объект установки опытно-промышленного образца ФПУ. При этом необходимо учитывать, что специфика режимов работы объекта должна допускать возможность опытно-промышленной эксплуатации устройства.

СТРУКТУРА, АЛГОРИТМЫ И ЗАДАЧИ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ФПУ С ТК

Одной из задач, решаемых на этапе проектирования ФПУ с ТК, является необходимость обеспечения высокой надежности работы тиристорного коммутатора в условиях непрерывно меняющегося режима работы сети. При этом ответственность за обеспечение надежности (в отличие от широко применяемых ФПТ с РПН) возлагается как на конструктивные особенности силового электромагнитного оборудования ФПУ, так и на реализацию мер по эффективному управлению тиристорным коммутатором в различных режимах его работы.

По этой причине структура и алгоритмы работы системы управления ФПУ с тиристорным коммутатором существенно 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. Основными функциями системы управления в данной структуре являются:

1. Надежное переключение тиристорных мостов коммутатора в процессе изменения выходного состояния устройства

2. Реализация различных законов управления ФПУ в соответствии с требованиями и текущим состоянием энергосистемы

3. Осуществление диагностики и защиты устройства в различных критических режимах работы

Так как мощности ФПУ в энергетических системах составляют десятки, сотни и даже тысячи МВА, анализ электромагнитных процессов, протекающих в ФПУ, необходимый для конструирования устройства и разработки алгоритмов его управления, непосредственно на объекте установки не представляется возможным. Поэтому разработке конструкторской документации должен предшествовать этап математического моделирования электромагнитных процессов. Для этих целей в ОАО «ЭНИН» были разработаны математические и имитационные модели, а также создана физическая модель ФПУ с тиристорным коммутатором и микропроцессорной системой управления. Эти модели позволили выявить, проверить и отработать основные принципы и особенности управления тиристорным коммутатором для применения в составе ФПУ.

Высокая надежность работы тиристорного коммутатора при работе ФПУ обеспечивается, прежде всего,

ЗАВИСИМОСТЬ ПОТЕРЬ АКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ОТ УГЛА ФАЗОВОГО СДВИГА ФПУ

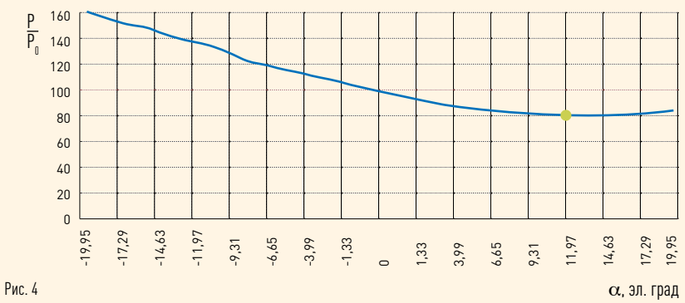

Рис. 4

реализацией надежной коммутации тиристорных ключей в мостах коммутатора. Детальный анализ процессов коммутации тиристоров в тиристорных мостах ФПУ, проведенный на разработанных математических и физической моделях устройства, выявил ряд факторов, существенно влияющих на характеристики процесса коммутации тиристорных ключей [6, 7]. Среди них:

- режим работы линии (фазовый сдвиг между током и напряжением и их абсолютные значения), в которой установлено ФПУ;
- время восстановления запирающих свойств тиристоров 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, система управления должна непрерывно отслеживать режим работы линии и определять условия безопасного переключения тиристорных мостов в соответствии с необходимым изменением угла ФПУ [8].

ФПУ с тиристорным коммутатором обладает широкими функциональными возможностями. В частности, они имеют высокую дискретность изменения фазового угла, причем в процессе переключения появляется возможность выбора наиболее рационального пути (маршрута) движения системы из начального состояния (с текущим значением угла сдвига ФПУ) в конечное (с заданным новым значением угла сдвига ФПУ). Критерии выбора маршрута переключения углов фазового сдвига ФПУ в процессе управления могут быть разными. В общем случае критерий должен удовлетворять следующим требованиям:

- протекающие в устройстве процессы при движении по маршруту должны оказывать минимальное негативное воздействие на силовое оборудование ФПУ;
- выбранный маршрут должен соответствовать

ИНФОРМАЦИЯ

ФАЗОПОВОРОТНЫЕ УСТРОЙСТВА

Фазоповоротные устройства (ФПУ) – специализированная модификация трансформатора, используемая для контроля полезной мощности трехфазных электрических сетей.

Фазоповоротные устройства используются для управления передаваемой по линиям электропередачи мощностью. Они состоят из двух трансформаторов в начале линии (у источника энергии): регулируемого, который включается параллельно линии, и сериесного, вторичная обмотка которого включается последовательно в линию.

При этом за счет схемы соединения обмоток вектор напряжения на сериесной обмотке направлен под углом 90 электрических градусов к фазному напряжению сети.

Меняя напряжение на сериесной обмотке с помощью регулируемого трансформатора, можно осуществлять поворот вектора суммарного напряжения в начале сети и управлять углом между напряжениями в начале и конце линии, изменяя поток мощности, передаваемой по ней.

ИНФОРМАЦИЯ

ОДНООПЕРАЦИОННЫЕ ТИРИСТОРЫ ДЛЯ ФАЗОПОВОРОТНЫХ УСТРОЙСТВ

На сегодня наиболее подходящими для построения полупроводниковых коммутаторов ФПУ являются однооперационные тиристоры.

Обычные однооперационные тиристоры (SCR) являются одним из старейших классов «твердотельных» управляемых статистических ключей, которые, однако, остаются непревзойденными при использовании в преобразовательных устройствах различного назначения.

Несмотря на интенсивное развитие и относительное многообразие современных силовых электронных приборов (SCR), продолжают уверенно занимать свою нишу в силовой электронике, в первую очередь, в технике больших и сверхбольших мощностей.

Однооперационные тиристоры изготавливаются на основе сверхвысоковольтной технологии и имеют мощностные параметры 8000 В и 3600 для линий передачи постоянного тока и 12000 В и 1500 для статических переключателей переменного тока.

заданному функционалу при работе ФПУ в заданном сценарии (например, режимы ограничения тока в линии, оптимизации транзитных потерь в линиях, управления перетоками в сечениях ЕНЭС и т. д.).

В зависимости от выбранных критериев система управления будет реализовывать различные алгоритмы управления тиристорным коммутатором, обеспечивая при этом требуемые функциональные характеристики в условиях конкретного объекта установки.

Диагностическая функция системы управления необходима вследствие наличия в коммутаторе быстродействующих полупроводниковых приборов (тиристоров), включенных группами. Причем из-за относительно высоких напряжений на вторичных обмотках шунтового трансформатора тиристоры включаются последовательно. Для увеличения надежности устройства при разработке коммутатора предполагается, что выход из строя одного или нескольких приборов в группе не должен приводить к фатальным последствиям, но этот факт требует своевременной диагностики, контроля и соответствующего управления коммутатором. Кроме того, необходимо также обеспечивать надежную и устойчивую работу устройства в любых аварийных режимах, возникающих как в линии электропередачи, так и внутри самого ФПУ.

В этом случае система управления должна своевременно диагностировать аварийные ситуации и формировать соответствующие управляющие воздействия. Для реализации этой функции система управления должна обладать широкой сетью обратных связей, сформированной с помощью датчиков тока и напряжения, расположенных в соответствующих цепях преобразователя.

Современные цифровые микропроцессорные системы позволяют успешно реализовать выполнение всех указанных функций системы управления ФПУ в режиме реального времени. Комплексное решение этих задач с аппаратной точки зрения на сегодня не является технически сложным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение в структуре ФПУ полупроводниковых коммутаторов вместо электромеханических переключателей-отпаек позволяет качественно улучшить характеристики таких устройств. При этом существенно увеличиваются их быстродействие, дискретность изменения угла фазового сдвига и надежность. Следует отметить, что во многих случаях высокого быстродействия от ФПУ может и не потребоваться. Однако в аварийных режимах и других экстремальных ситуациях такие ФПУ позволяют осуществлять быстрое управление процессами в линиях электропередачи на любом периоде работы сети.

Такой подход может быть использован, например, для быстрого ограничения тока в ЛЭП в послеаварийных режимах: реакция ФПУ с тиристорным коммутатором на возрастание тока в линии может быть более быстрой, чем реакция систем противоаварийной защиты. Практическая ценность применения быстродействующих ФПУ для повышения стабильности и динамической устойчивости энергосистем также очевидна.

В настоящий момент проект ФПУ с тиристорным коммутатором находится на стадии изготовления оборудования опытно-промышленного образца. Соисполнителями ОАО «ЭНИН» являются крупные отечественные научные и производственные организации: ООО «Институт «Энергосетьпроект», НИУ МЭИ, ООО «Тольяттинский трансформатор», ОАО «Электровыпрямитель», ООО «ИЦ «Бреслер».

Силовая схема устройства реализована на отечественном оборудовании и отечественной элементной базе. ОАО «ЭНИН» является идеологом построения структуры ФПУ с ТК, разработчиком конструкции устройства, алгоритмов его управления и системы управления. В 2014–2015 гг. планируются: 1) установка опытно-промышленного образца ФПУ с ТК на конкретном объекте, 2) сетевые испытания.

Основные технические решения по силовой схеме ФПУ и его системе управления защищены восемью патентами (совместно с ОАО «ФСК ЕЭС») [9–16].

В заключение подчеркнем, что технологии проектирования ФПУ с тиристорными коммутаторами существенно усложняются по сравнению с технологиями проектирования ФПТ с РПН, смещаясь в область силовой полупроводниковой электроники и цифровых систем управления.

Тем не менее именно грамотное применение данных технологий в конечном счете и определяет значительный технико-экономический эффект подобных инновационных высокотехнологичных устройств.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бурман А. П. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем: учебное пособие/А. П. Бурман, Ю. К. Розанов, Ю. Г. Шакарян. – М.: Издательский дом МЭИ, 2012. – 336 с.: ил.
2. www.fsk-ees.ru/upload/docs/ies_aas.pdf.
3. www.abb.com.
4. Добрусин Л. А. Тенденции применения фазоповоротных трансформаторов в электроэнергетике//Энергоэксперт, 2012, № 3.
5. Алексеев Б. А. Контроль состояния устройств регулирования напряжения трансформаторов под нагрузкой// Электро, 2008, № 4.
6. Рашитов П. А., Ремизевич Т. В. Анализ режимов коммутации тиристорного моста переменного тока в среде PSpice//Силовая электроника, 2010, № 3.
7. Ремизевич Т. В., Рашитов П. А. Особенности управления полупроводниковым ФПУ со средней точкой// Силовая электроника, 2011, № 1.
8. 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, № 6.
9. Патент на полезную модель № 106060 «Фазоповоротное устройство» от 31.01.2011.
10. Патент на полезную модель № 107005 «Фазоповоротное устройство» от 25.03.2011.
11. Патент на полезную модель № 107421 «Фазоповоротное устройство» от 08.04.2011.
12. Патент на полезную модель № 2450420 «Полупроводниковое фазоповоротное устройство» от 13.05.2011.
13. Патент на полезную модель № 110558 «Полупроводниковое фазоповоротное устройство» от 08.06.2011.
14. Патент на полезную модель № 122814 «Система управления поэтапным переключением обмоток шунтового трансформатора фазоповоротного устройства и фазоповоротное устройство с такой системой управления» от 09.06.2012.
15. Патент на полезную модель № 2420752 «Устройство контроля состояния тиристоров» от 24.01.2011.
16. Программа управления фазоповоротным устройством «ФАЗАКОН 1» № 2012617751 от 05.07.2012.

ИНФОРМАЦИЯ

ФАЗОПОВОРОТНЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ В БРИТАНИИ, БЕЛЬГИИ И ФРАНЦИИ

Применяются в британской электрической сети с 1969 г. В 1997-м введены в эксплуатацию два ФПТ мощностью 2750 МВА, 400 кВ с регулятором угла сдвига фаз, имеющим 11 ступеней. В настоящее время четыре таких ФПТ успешно работают вместе с существующими пятью мощностью 2000 МВА, 400 кВ и шестью 275 кВ, 750 МВА. По мнению специалистов Великобритании, самый эффективный способ управления потоками мощности – применение фазоповоротных трансформаторов.

В пограничном районе Бельгии и Франции линия 220 кВ между подстанцией RTE Chooz и подстанцией Elia Monceau могла быть перегружена в случае отказов на других межнациональных линиях электропередачи. Было решено установить фазоповоротный трансформатор на подстанции 150 кВ Monceau. Основные характеристики ФПТ: напряжение – 220/150 кВ, мощность – 400 МВА, диапазон регулирования фазы – (-15° +3°).