ГИБРИДНАЯ МОДЕЛЬ ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

АВТОРЫ:

А.С. ГУСЕВ,
Д.Т.Н.,
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.О. СУЛАЙМАНОВ,
К.Т.Н.,
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Р.А. УФА,
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

А.С. ВАСИЛЬЕВ,
К.Т.Н.,
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Н.Г. ЛОЗИНОВА,
К.Т.Н.,
ОАО «НИИПТ»

О.В. СУСЛОВА,
К.Т.Н.,
ОАО «НТЦ ЕЭС»

Моделирование процессов функционирования оборудования высоковольтных линий в составе реальных электроэнергетических систем является мощным инструментом проектирования и разработки современного высокотехнологичного оборудования. Включение в электроэнергетические системы устройств и технологий FACTS, а также вставок постоянного тока существенно осложняет такого рода моделирование.

Ключевые слова: моделирование; электроэнергетические системы; реальное время; FACTS; ПТВН; модель вставки постоянного тока.

Рабочее место оператора Всережимного моделирующего комплекса реального времени электроэнергетических систем

ПОЛОЖИТЕЛЬНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ПРЕОБРАЗОВАНИИ ТРАДИЦИОННОЙ ЭЭС В ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНУЮ

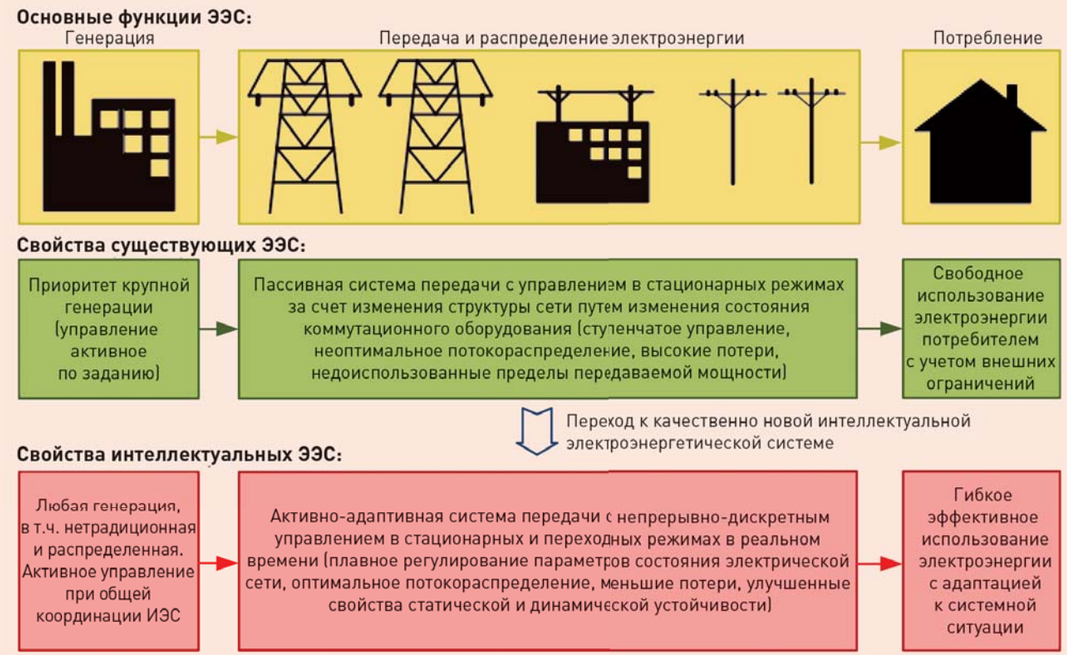


Рис. 1

ВВЕДЕНИЕ

Одной из современных тенденций развития и совершенствования электроэнергетических систем (ЭЭС) является концепция интеллектуальных ЭЭС с активно-адаптивными электрическими сетями [1, 2], которая подразумевает как одну из основ внедрение устройств и технологий FACTS (Flexible Alternative Current Transmission System) и устройств постоянного тока высокого напряжения (ПТВН). Обозначенные устройства позволяют преобразовать в значительной мере пассивные современные электрические сети в активно-адаптивные и радикально повысить управляемость сети с целью увеличения пропускной способности линий электропередачи, повышения качества электрической энергии, устойчивости, обеспечения эффективности и надежности функционирования ЭЭС (рис. 1) [2, 3].

Основным элементом большинства обозначенных устройств является статический преобразователь, который реализуется в двух схемах — преобразователь тока (ПТ) и преобразователь напряжения (ПН). Однако ПН имеет ряд потенциальных преимуществ по сравнению с ПТ [4, 5]:

- высокое быстродействие регулирования активной и реактивной мощности (полное круговое перемещение в четырех квадрантах);
- возможность работы в несимметричной сети, например, во время неисправности сети переменного тока или при наличии существенно несимметричных нагрузок с возможностью ее симметрирования;
- применимость в слабых сетях переменного тока и сетях с пассивными нагрузками;
- ПН обеспечивает лучшую электромагнитную совместимость, что снижает требования к пассивным фильтрам, и возможность активной фильтрации высших гармоник;
- использование быстродействующих силовых полупроводниковых ключей (к сожалению, высокая частота переключений в ПН

ПРЕИМУЩЕСТВА ПОСТОЯННОГО ТОКА В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ЛИНИЯХ

Несмотря на распространение переменного тока при передаче электроэнергии, в ряде применений предпочтительно использовать постоянный ток высокого напряжения. В качестве примеров таких применений можно назвать:

1. Подводные кабели, высокое емкостное сопротивление которых вызывает в случае переменного тока дополнительные потери (например, Балтийский Кабель длиной 250 км между Швецией и Германией).
2. Передача электроэнергии между конечными точками, отстоящими на большие расстояния друг от друга, без использования промежуточного оборудования, например, поставка энергии в отдаленные районы.
3. Увеличение мощности существующих электрических сетей в ситуациях, когда прокладка дополнительных линий затруднена или требует слишком больших затрат.
4. Передача электроэнергии между не синхронизированными системами распределения переменного тока.
5. Уменьшение сечения проводов и высоты вышек при заданной мощности передачи электроэнергии. Высоковольтные линии постоянного тока могут передавать больше энергии при заданном диаметре проводника.
6. Подключение удаленной электростанции к сети распределения.

приводит к увеличению потерь энергии; потери в ПТ составляют около 0,85% на одну преобразовательную подстанцию, ПН — от 0,98 до 2,2% в зависимости от схемы преобразователя);
– преобразователи ПН служат основой для создания мощных сложно замкнутых сетей постоянного тока.

Стоит отметить, что на сегодняшний день ПН имеет меньшую пропускную способность единичной установки по сравнению с ПТ, однако применение модульных многоуровневых технологий и кабелей постоянного тока классов напряжения 320, 520 кВ позволило увеличить пропускную способность объектов постоянного тока с ПН до 1 ГВт (1,4 ГВт — для вновь строящихся объектов).

Благодаря указанным преимуществам FACTS и ПТВН на базе ПН в последнее время нашли широкое применение в электроэнергетике. В настоящее время в мировых энергосистемах функционируют и строятся более 35 объектов постоянного тока на преобразователях напряжения классами напряжения от 50 до 520 кВ.

Однако широкое применение данных устройств не только усложняет структуру и конфигурацию сети, но и кардинально изменяет статические и динамические свойства, усложняя процессы в оборудовании и ЭЭС в целом. Данная трансформация электрических сетей ставит новые задачи по обеспечению надежного функционирования создаваемых на их основе интеллектуальных ЭЭС.

В число наиболее сложных задач входят [1, 2]:

– оценка режимов работы устройств FACTS, ПТВН и ЭЭС в целом, их оптимизация;
– анализ возможных аварий в ЭЭС, содержащих устройства FACTS и ПТВН, и разработка эффективных решений их локализации и ликвидации;
– выявление взаимного влияния функционирования устройств FACTS, ПТВН, традиционного оборудования и ЭЭС в целом;
– выбор оптимальных мест и мощности установок FACTS и ПТВН;
– разработка методик оптимальной настройки быстродействующих систем управления и защиты устройств FACTS и ПТВН с учетом их взаимодействия с системами релейной защиты, управления и автоматики ЭЭС.

Обозначенные задачи приобретают еще большую актуальность в свете планируемых для реализации в России проектов с применением технологий FACTS и ПТВН на базе преобразователей напряжения, в частности, проектов, связанных с применением вставок постоянного тока (ВПТ) на базе ПН.

В силу недостаточной изученности выше обозначенных процессов и условий функционирования ЭЭС, содержащих устройства FACTS и ПТВН, весьма актуальным является их исследование, предполагающее наличие достаточно полной и достоверной информации о процессах в оборудовании и ЭЭС в целом, которую в силу известных обстоятельств можно получить только путем адекватного моделирования [3].

ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМАМ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для обеспечения адекватного моделирования процессов и режимов работы ЭЭС, содержащих устройства FACTS и ПТВН, средства моделирования должны удовлетворять следующим требованиям [7, 8]:

– адекватное моделирование всех процессов и режимов трехфазных ЭЭС в целом без декомпозиции и ограничения на их продолжительность;
– непрерывное методически точное решение в режиме реального времени и на неограниченном временном интервале с гарантированной точностью жестких нелинейных систем дифференциальных уравнений высокого порядка, адекватно и точно описывающих полный спектр всех возможных процессов в энергетическом оборудовании и энергосистеме в целом;
– взаимосвязь с различными внешними программно-техническими средствами: оперативные информационные системы, системы SCADA и т.д.

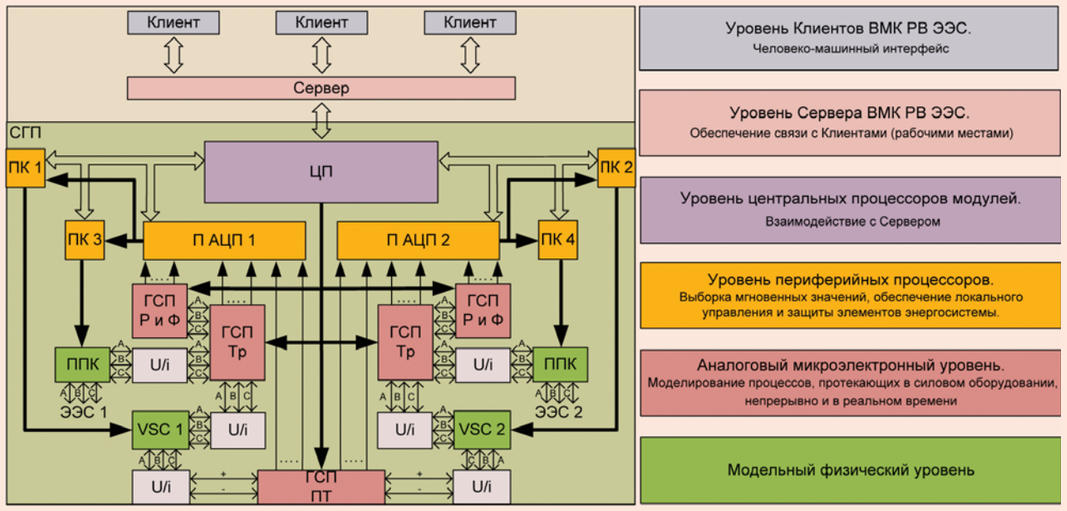
Соответствие указанным требованиям является условием применимости инструментов моделирования для решения выше обозначенной проблемы получения достаточно полной и достоверной информации о процессах в оборудовании и ЭЭС в целом.

Между тем, специфика функционирования устройства FACTS и ПТВН на базе ПН (междуфазный режим работы ПН; использование быстродействующих полностью управляемых силовых полупроводниковых ключей; непрерывная работа во всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы ЭЭС) определяет практически неосуществимые в используемых в настоящее время цифровых моделирующих комплексах требования к математическим моделям энергетического оборудования и ЭЭС в целом, а также условия решения этих моделей:

– моделирование трехфазных ЭЭС;
– отсутствие ограничений на размер модели и периода времени, охватывающего процессы и явления любой возможной продолжительности и частоты;
– использование шага интегрирования соразмерно времени силовых полупроводниковых выключателей переключения.

В результате известные ограничения и упрощения используются в существующих программно-технических и программных средствах моделирования [6, 8]:

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ГИБРИДНЫХ ПРОГРАММНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ МОДЕЛИРОВАНИЯ



ЦП — центральный процессор; ПАЦП 1 и ПАЦП 2 — процессоры аналого-цифровых преобразователей; ПК 1-3 — процессоры коммутации; ГСП — гибридные сопроцессоры (трансформаторов, реакторов, фильтров и цепей постоянного тока); ППК — продольно-поперечные коммутаторы; ПН 1 и ПН 2 — статические преобразователи напряжения, воспроизводимые на модельном физическом уровне посредством интегральных микроэлектронных цифроуправляемых аналоговых ключей; U/i — измерительный преобразователь.

Рис. 2

– однолинейные схемы ЭЭС;
– использование упрощенных моделей энергетического оборудования и ЭЭС в целом, а также систем автоматического управления;
– ограничение интервала моделирования;
– использование шага интегрирования, несоразмерного со временем коммутации силовых полупроводниковых ключей.

Причиной таких упрощений являются ограничительные условия применимости численного интегрирования для решения обыкновенных дифференциальных уравнений, определенных теорией методов дискретизации. В связи с этим адекватное моделирование трехфазных ЭЭС в реальном времени, содержащих ПТВН и FACTS, невозможно.

Единственным решением обозначенной проблемы является комплексный подход, представляющий собой в широком смысле гибридное моделирование и позволяющий для каждого конкретного аспекта решаемой проблемы разработать и применить методы и способы наиболее эффективного решения, объединение и агрегирование которых обеспечивает необходимое решение проблемы достаточно полного и достоверного бездекомпозиционного моделирования в реальном времени на неограниченном интервале времени ЭЭС, в том числе содержащих устройства FACTS и ПТВН.

Актуальность данной проблемы подтверждается наблюдаемой в настоящее время тенденцией по увеличению количества работ в области создания гибридных моделирующих комплексов, основанных на использовании разных подходов моделирования [3, 9].

АЛГОРИТМ ПОСТРОЕНИЯ МОДЕЛИ СГП ВПТ

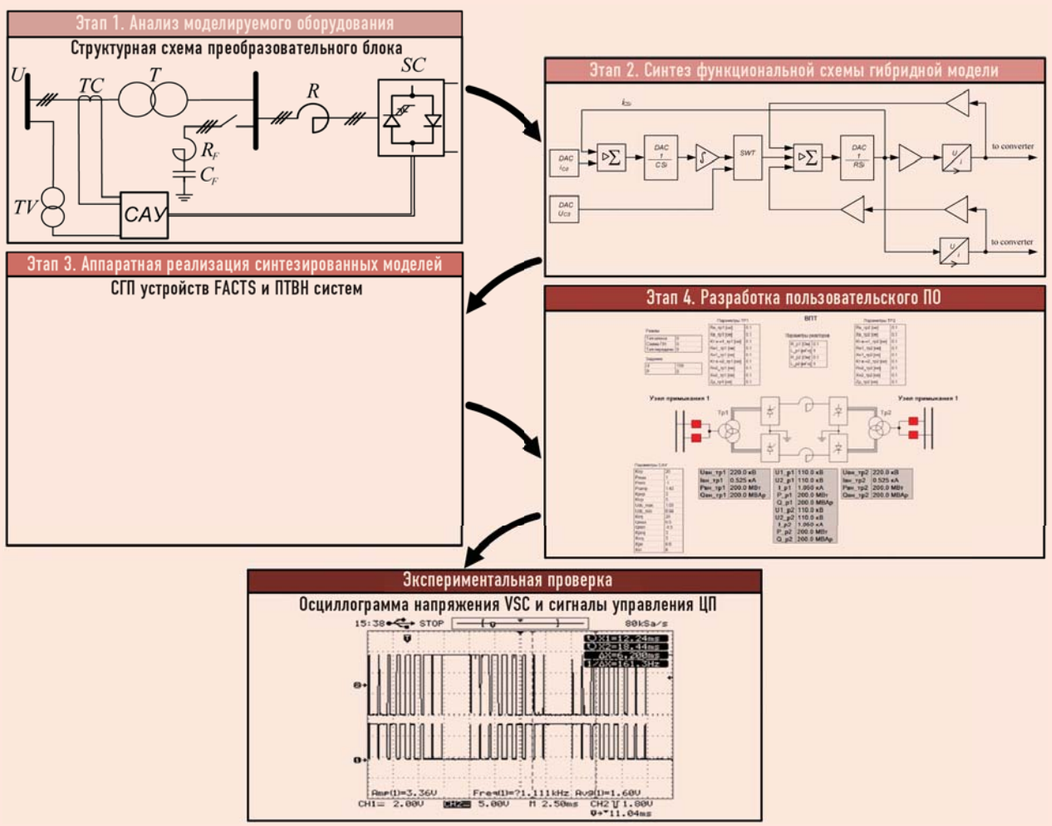


Рис. 3

В рамках данной статьи представлено описание разработки и результаты моделирования модели ВПТ с помощью концепции гибридного моделирования.

КОНЦЕПЦИЯ ГИБРИДНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для достижения указанных требований к системам моделирования и моделям была разработана концепция гибридного моделирования, основанная на использовании сразу трех подходов моделирования: аналоговый, цифровой и физический, каждый из которых обеспечивает достижение максимальных свойств в решении отдельных подзадач. Подробное описание концепции и средств гибридного моделирования приведены в работах [10, 11].

Стоит отметить, что основными элементами всережимного моделирующего комплекса реального времени (ВМК РВ ЭЭС), реализующего данную концепцию, являются специализированные гибридные процессоры (СГП). Структура гибридных программно-технических средств моделирования на примере СГП преобразовательного блока вставки постоянного тока представлена на рис. 2.

Иерархия информационной модели ВМК РВ ЭЭС включает несколько уровней. Верхние уровни — уровни Клиента и Сервера предназначены для реализации функции взаимодействия пользователя с моделью оборудования и моделируемой ЭЭС в целом. Уровень ЦП модуля реализует функции сбора, обработки и передачи данных. В то же время уровень ЦП используется для локального управления СГП, взаимодействия с Сервером и реализации релейной защиты и алгоритмов управления

ОСЦИЛЛОГРАММА НАПРЯЖЕНИЯ ЦУАК ПРИ ПЕРЕХОДЕ ИЗ СОСТОЯНИЯ «1» В СОСТОЯНИЕ «0»

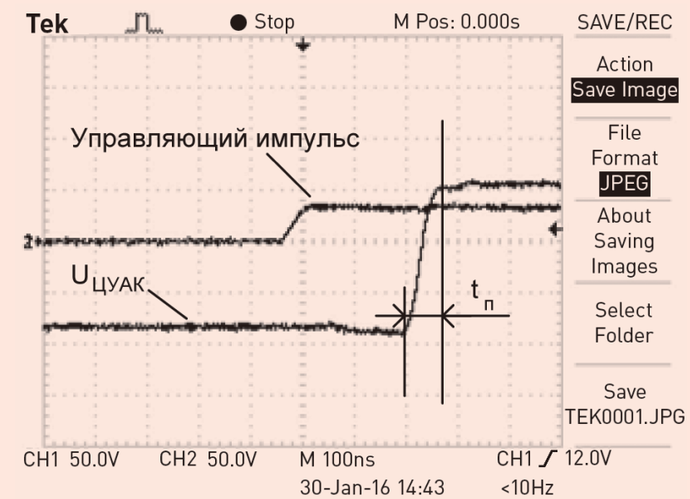


Рис. 4

элементами систем ВПТ. Алгоритмы управления отдельного силового ключа выполняются на уровне периферийных процессоров.

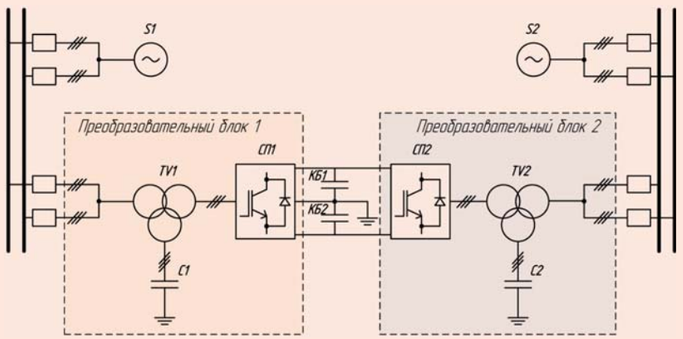
Таким образом, описанная архитектура ВМК РВ ЭЭС определяет следующие свойства:

– Универсальность модели. Один СГП должен воспроизводить различные модификации и типы одного вида силового оборудования. Например, модель электрической машины может быть использована для моделирования турбо-, гидро-, ветрогенераторов, синхронных и асинхронных двигателей.
– Структурность модели. Распределение моделей подсистем силового оборудования по различным уровням ВМК РВ ЭЭС в соответствии со свойствами реального оборудования должно быть оптимальным, а также учитывать соответствие структуры реальных подсистем оборудования архитектуре ВМК РВ ЭЭС. Например, реализация моделей силового оборудования осуществляется на аналоговом микроэлектронном уровне, а систем измерения, защиты и управления — в цифровой форме на уровне процессоров.

Данный подход к моделированию позволяет получить следующие необходимые для решения обозначенных задач возможности:

– моделирование в реальном времени без ограничения длительности воспроизведения процессов;

РАЗРАБОТАННАЯ В ВМК РВ ЭЭС СХЕМА ВПТ



S1, S2 — системы шин бесконечной мощности; TV1, TV2 — трансформаторы присоединения; C1, C2 — конденсаторные батареи фильтров; КБ1, КБ2 — конденсаторные батареи в цепи выпрямленного напряжения.

Рис. 5

- моделирование схем ВПТ систем на базе различных типов преобразователей;
- возможность взаимодействия модели с внешними устройствами и системой, включая тестирование в замкнутом цикле;
- обеспечение адекватного воспроизведения процессов реальных ВПТ и сети переменного тока систем во всем диапазоне рабочих, аварийных и послеаварийных режимов.

Для разработки модели ВПТ систем в соответствии с концепцией гибридного моделирования в реальном времени используется следующая методика (рис. 3):

- 1 этап. Анализ принципиальных схем, режимов и условий работы, а также схем и алгоритмов систем управления моделируемого силового оборудования.
- 2 этап. Синтез универсальных математических моделей силового оборудования, систем защиты и управления. Разработка функциональных и структурных схем моделей с учетом особенностей их реализации на различных уровнях гибридной архитектуры ВМК РВ ЭЭС.
- 3 этап. Аппаратная реализация синтезированных моделей.
- 4 этап. Разработка специализированного программного обеспечения (ПО), включающего комплекс программ на всех уровнях ВМК РВ ЭЭС (периферийные процессоры и центральный процессор аппаратного блока, Сервер и Клиенты). ПО обеспечивает реализацию необходимых алгоритмов преобразования данных, управления и наблюдения процесса моделирования в реальном времени, в том числе систем управления и защиты моделируемого оборудования.

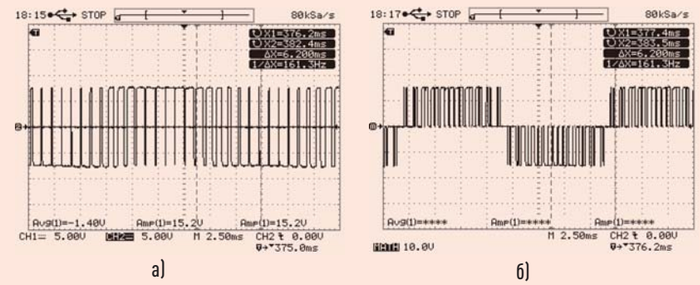
Помимо экспериментальных исследований, проведенных на этапах 3 и 4, для проверки адекватности и технических характеристик аппаратных блоков применяется предпроизводственное компьютерное моделирование работы схем основных функциональных блоков для различных исполнений и режимов работы оборудования, с учетом аппаратной реализации модели (принципиальных схем и элементной базы).

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИРУЕМОЙ СЕТИ

Параметр	Значение
Базисное напряжение, кВ	110
Базисная мощность, МВА	200
Базисная частота, рад/с	50
Частота коммутации, Гц	1050
Напряжение сети, о.е.	1
Активное сопротивление связи с сетью, о.е.	0,02
Индуктивное сопротивление связи с сетью, о.е.	0,155
Напряжение TV	110/28,6/10
Активное сопротивление обмотки ВН TV, о.е.	0,0114
Индуктивное сопротивление обмотки ВН TV, о.е.	0,2625
Активное сопротивление обмотки СН TV, о.е.	0,01
Суммарное индуктивное сопротивление цепи обмотки СН TV, о.е.	0,6597
Активное сопротивление обмотки НН TV, о.е.	0,007
Суммарное индуктивное сопротивление цепи обмотки НН TV, о.е.	0,0734
Сопротивление ветви намагничивания, о.е.	300
Емкостное сопротивление конденсатора фильтра, о.е.	0,03091
Активное сопротивление фильтра, о.е.	11,44
Емкостное сопротивление КБ, о.е.	3,18

Таблица 1

ОСЦИЛЛОГРАММЫ НАПРЯЖЕНИЯ НА ТРЕХФАЗНОЙ СТОРОНЕ ПН



а) Фазное напряжение ПН б) Линейное напряжение ПН

Рис. 6

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПН

ВОСПРОИЗВЕДЕНИЕ КОММУТАЦИИ СИЛОВЫХ КЛЮЧЕЙ

В соответствии с концепцией модели силовых ключей воспроизведены на модельном физическом уровне посредством интегральных микроэлектронных цифроуправляемых аналоговых ключей (ЦУАК), для которых разработаны универсальные алгоритмы управления, реализованные в МПУ СГП.

Согласно характеристикам [12] и полученным осциллограммам при коммутации (рис. 4), время переключения ($t_п$) ЦУАК не превышает 100 нс. Соответственно, ЦУАК можно считать практически идеальными ключами по сравнению с реальными силовыми полупроводниковыми ключами (например, время переключения биполярного транзистора с изолированным затвором составляет 1–3 мкс).

Использование идеализированной коммутации силовых ключей ПН приемлемо в рамках решения задачи моделирования реальных ЭЭС. Однако для исследования процессов в самом преобразователе (отработка законов управления, подбор обратных диодов, учет демпфирующих цепей и т.п.) требуется воспроизведение коммутации адекватной реальным ключам. Для этого параметры ЦУАК на основе анализа схем замещения и параметров силовых ключей необходимо подвергнуть дополнительной адаптации с учетом соответствующего масштабирования, но решение этой задачи требует дополнительных исследований.

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВСТАВКИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА БАЗЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Для исследования экспериментального образца СГП ВПТ на базе всережимного моделирующего комплекса реального времени ЭЭС была реализована схема двухмашинной сети (рис. 5) и протестирована работа модели ВПТ на базе двухуровневого ПН (параметры сети представлены в табл. 1).

ОСЦИЛЛОГРАММЫ СИГНАЛОВ МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА В РЕЖИМЕ ПОТРЕБЛЕНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

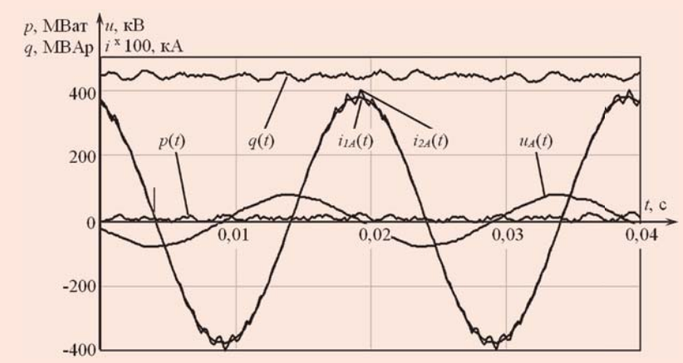


Рис. 7

ОСЦИЛЛОГРАММЫ СИГНАЛОВ МОДЕЛИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА В РЕЖИМЕ ГЕНЕРАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

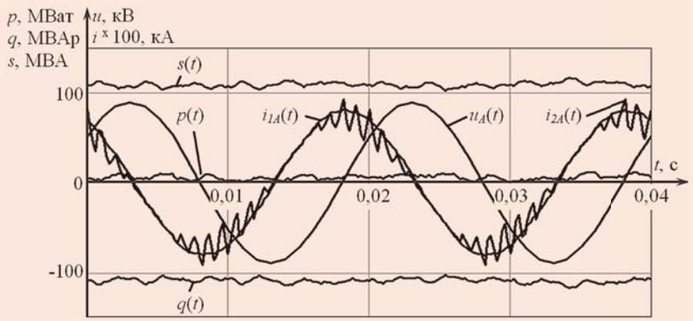


Рис. 8

Полученные на экспериментальном образце СГП обсуждаемой вставки постоянного тока осциллограммы напряжения, токов, полной, реактивной и активной мощностей представлены на рис. 6–8.

На рис. 6–8 приняты обозначения: s(t), p(t), q(t) — сигналы полной, активной и реактивной мощностей СП; $u_A(t)$, $u_B(t)$, $u_C(t)$ — сигналы фазных напряжений в точке присоединения; $i_{1A}(t)$, $i_{2A}(t)$ — сигналы тока трансформатора и ПН.

Диаграмма мощности (рис. 9), полученная в результате анализа, иллюстрирует режимы работы программно-аппаратной модели ПН преобразовательного комплекса и принцип управления режимом. В соответствии с нагрузочной способностью силового оборудования преобразовательного комплекса, определяемой производителем, разработанные средства его моделирования позволяют воспроизводить функционирование в области допустимой непрерывной, кратковременной работы и за их пределами.

При нулевом выпрямленном напряжении ПН в устройстве возникают токи, соответствующие токам трехфазного КЗ, при этом полная потребляемая мощность соответствует точке $S_{СКЗ}$. Увеличение выпрямленного напряжения и управление амплитудой и фазой напряжения ПН позволяет воспроизводить все режимы генерации/потребления активной и реактивной мощности. При трехфазном КЗ на шинах присоединения полная мощность ПН соответствует величине $S_{СПКЗ}$.

Переход из текущего режима осуществляется путем изменения заданного значения напряжения по оси d — для изменения реактивной мощности и по оси q — для изменения активной мощности.

Полученные диаграммы и осциллограммы соответствуют ожидаемым и подтверждают способность программно-аппаратных элементов моделирования преобразовательного комплекса адекватно воспроизводить всевозможные нормальные и анормальные режимы работы.

В дальнейшем планируется доработка системы управления и защиты модели ВПТ, включение модели ВПТ в модель ЭЭС Томской области, реализованной в ВМК РВ ЭЭС,

ДИАГРАММЫ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ПН

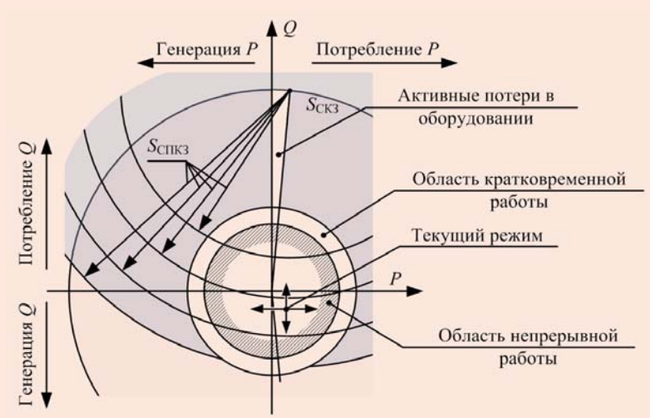


Рис. 9

Рис. 10
Внешний вид ВМК РВ ЭЭС

для анализа ее влияния на режимы работы ЭЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Использование концепции гибридного моделирования и построенного на его основе всережимного моделирующего комплекса реального времени ЭЭС для адекватной оценки влияния функционирования устройств FACTS и ПТВН на статические и динамические характеристики ЭЭС представляется наиболее эффективным, а порой единственно возможным подходом.

Представленный подход к созданию СГП на примере СГП ВПТ показывает возможность использования данного подхода для реализации гибридных моделей элементов ЭЭС с более высокими частотными характеристиками, нежели традиционное силовое оборудование ЭЭС.

Существенные ограничения на моделирование силовых преобразователей в составе ЭЭС, присущие численным методам, легко преодолеваются при обозначенном подходе к моделированию. Единственным недостатком такого подхода является низкая гибкость программных продуктов при переходе от одной схемы ЭЭС к другой, которая требует конструктивных манипуляций.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации, Госзадание «Наука», тема: «Разработка и исследование гибридной модели вставки несинхронной связи электроэнергетических систем».

ЛИТЕРАТУРА

1. Thepparat P., Retzmann D., Ogée E., Wiesinger M. Smart Transmission System by HVDC and FACTS. IEEE Towards carbon free society through smarter grids. Grenoble, France, 16–20 June 2013. P. 1–6.
2. Kaijian O., Hong R., Zexiang C., Haiping G. MMC-HVDC Simulation and Testing Based on Real-Time Digital Simulator and Physical Control System. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics. Vol. 2(4). December 2014. P. 1109–1116.
3. Lin X.U., Tang Y.H., Wei P.U., Han Y. Hybrid electromechanical-electromagnetic simulation to SVC controller based on ADPSS platform // Journal of Energy in South Africa. Vol. 25(4). November 2014. P. 112–122.
4. Setreus J., Bertling L. Introduction to Technology for Reliable Electrical Power Systems. Proceedings of the 10th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, Rincon. USA, 25–29 May 2008. P. 1–8.
5. Sellick R.L., Åkerberg M. Comparison of HVDC Light (VSC) and HVDC Classic (LCC) Site Aspects, for a 500MW 400kV HVDC Transmission Scheme. 10th IET International Conference on AC and DC Power Transmission. Birmingham, United Kingdom, 4–5 December 2012. P. 1–6.
6. Gnanarathna U.N., Gole A.M., Jayasinghe R.P. Efficient Modeling of Modular Multilevel HVDC Converters (MMC) on Electromagnetic Transient Simulation Programs. IEEE Transactions on Power Delivery. Vol. 26(1), January 2011. P. 316–324.
7. Zhang Y., Gole A.M., Wu W., Zhang B., Sun H. Development and Analysis of Applicability of a Hybrid Transient Simulation Platform Combining TSA and EMT Elements. IEEE Transaction on power system. Vol. 5(1), February 2013. P. 357–366.
8. Nayak O., Santoso S., Buchanan P. Power electronics spark new simulation challenges. IEEE Computer Applications in Power. Vol. 15(4), October 2002. P. 37–44.
9. Li W., Xiao X. Electromagnetic and Electromechanical Transient Hybrid Real-time Simulation Technology Based on RTDS Used in Subsynchronous Resonance Research. International Conference on Power System Technology (POWERCON). Hangzhou, China, 24–28 October 2010. P. 1–6.
10. Borovikov Y.S., Gusev A.S., Sulaymanov A.O., Ufa R.A. Multiprocessor system for real-time simulation of electric power systems. Power Engineering. Efficiency, Reliability, Safety Selected Reports of All-Russian Scientific and Technical Conference. London, 2014. P. 8–12.
11. Боровиков Ю.С., Гусев А.С., Андреев М.В., Уфа Р.А. Полигон для отработки решений по построению активно-адаптивных сетей на базе Всережимного моделирующего комплекса реального времени // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2014. № 4. С. 292–296.
12. Maxim Integrated [Online] http://datasheets.maximintegrated.com/en/ds/MAX4661-MAX4663.pdf