

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ СТАТИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ НАПРЯЖЕНИЯ

Уфа Р.А.,

Научный руководитель: Гусев А.С., д.т.н., профессор
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, г.Томск, пр. Ленина, 30, 634050
E-mail: hecn@tpu.ru

In this paper hybrid simulation approach for adequate modeling of Voltage Source Converter (VSC) of High-voltage direct current (HVDC) systems as part of real electric power systems (EPS) is presented. The proposed VSC model allows to carry out the adequate simulation of different switching processes in VSC HVDC and EPS as a whole without any decomposition and limitation on their duration.

Введение.

Достигнутый к настоящему времени прогресс в области силовой полупроводниковой техники позволяет более эффективно применять в электроэнергетических системах (ЭЭС) технологии высоковольтной передачи энергии постоянным током (ВППТ) и гибких линий электропередачи переменного тока (FACTS Flexible Alternative Current Transmission Systems). Основным элементом большинства устройств данных технологий является преобразовательный комплекс на основе статического преобразователя напряжения (ПН) на базе быстродействующих полностью управляемых силовых полупроводниковых ключей.

Однако, внедрение данных устройств значительно усложняет динамические свойства ЭЭС, связанные с их назначением и спецификой функционирования, в частности: междофазный режим работы ПН; использование быстродействующих полностью управляемых силовых полупроводниковых ключей; непрерывная работа во всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы ЭЭС, значительно затрудняет решение важнейших исследовательских, проектных и эксплуатационных задач [1]. Ввиду известных причин единственным инструментом для решения обозначенных задач являются средства моделирования ЭЭС [2].

Для обеспечения адекватного воспроизведения процессов и режимов работы преобразовательного комплекса и ЭЭС в целом средства моделирования должны удовлетворять следующим требованиям: - бездекопозиционное, адекватное моделирование процессов в ПН и трехфазных ЭЭС в целом; - обеспечение непрерывного методически точного решения в реальном времени и на неограниченном интервале с гарантированной точностью жестких нелинейных систем дифференциальных уравнений высокого уровня, достаточно полно и достоверно описывающих единый спектр всевозможных процессов в оборудовании и ЭЭС в целом; - взаимодействие с различного рода внешними программными и программно-техническими средствами: ОИК, SCADA и др.

Соответствие обозначенным требованиям является условием применимости средств расчета процессов и режимов ЭЭС для решения вышеуказанных задач.

Между тем, отмеченная специфика ПН, определяет практически нереализуемые в используемых в настоящее время средствах сугубо численного моделирования ЭЭС требования к математическим моделям силового оборудования и ЭЭС в целом, а также условий решения этих моделей: трехфазного моделирования ЭЭС; отсутствия ограничений на размерность модели и интервал воспроизведения процессов; использования соизмеримого со временем переключения силовых ключей шага

интегрирования. В результате неизбежным становится применение известных по характеристикам данных средств моделирования ограничений и упрощений: применение однолинейных схем расчета; ограничение интервала воспроизведения процессов; использование неприемлемо большого шага моделирования и др. [1, 2].

Причиной обозначенных упрощений и ограничений являются определяемые теорией методов дискретизации для решения обыкновенных дифференциальных уравнений ограничительные условия применимости их численного интегрирования. Вследствие чего адекватное моделирование трехфазных моделей реальных ЭЭС, содержащих технологии ВППТ и FACTS, оказывается не возможным.

Альтернативой сугубо цифровому моделированию является гибридное моделирование, эффективность которого зависит от выбранной концепции. Концепция, максимально удовлетворяющая требованиям ранее обозначенных исследовательских, проектных и эксплуатационных задач ЭЭС, включающих технологии ВППТ и FACTS, реализована во Всережимном моделирующем комплексе реального времени электроэнергетических систем (ВМК РВ ЭЭС) [3, 4].

Основные положения концепции [3, 4]:

- силовое оборудование ЭЭС описывается всережимными математическими моделями, реализованными посредством гибридных сопроцессоров.
- методически точное с гарантированной инструментальной погрешностью решение систем дифференциальных уравнений осуществляется с помощью метода непрерывного неявного интегрирования.
- всевозможные коммутации силового оборудования и обеспечение неограниченной наращиваемости моделируемой ЭЭС осуществляется на модельном физическом уровне.
- взаимосвязь между модельным физическим и математическим уровнями, управление параметрами моделируемого оборудования, коммутационными элементами осуществляется посредством соответствующих преобразователей напряжение-ток.
- модели систем автоматического управления, релейной защиты и автоматики реализуются посредством микропроцессорных узлов, содержащих центральный процессор и функционально-ориентированные периферийные процессоры, а также Сервера в зависимости от требуемого состава входных сигналов и скорости исполнения алгоритмов.

Стоит отметить, что в предлагаемой концепции гарантированная точность решения систем дифференциальных уравнений моделей силового оборудования и ЭЭС в целом достигается с помощью метода неявного непрерывного интегрирования, реализованного на аналоговом уровне. Вместе с тем, все возможные коммутации, присущие моделям оборудования, наиболее адекватно воспроизводятся на модельном физическом уровне. В тоже время, взаимосвязь между математическими моделями и дифференциальными уравнениями обеспечивается соответствующими преобразователями.

Такого рода концепция позволяет кроме методически точного решения систем дифференциальных уравнений высокого порядка

и высокоадекватного воспроизведения коммутации обеспечить практически неограниченную наращиваемость объема модели ЭЭС. Все информационно-управляющие свойства и возможности обеспечиваются с помощью современной микропроцессорной техники и IT-технологии.

Моделирование преобразовательного комплекса.

Учитывая отмеченную особенность преобразовательного комплекса на базе ПН, при разработке его модели особенно важным является физический уровень. Так как, на этом уровне моделируется функционирование силовых ключей, реализуемые посредством интегральных микроэлектронных цифруправляемых аналоговых ключей (ЦУАК), для которых разрабатываются универсальные алгоритмы управления, выполненные на цифровом уровне. Подобная реализация позволяет с помощью ЦУАК представлять любые типы силовых ключей, включая всевозможные их комбинации.

Адекватность данного моделирования подтверждена анализом схем замещения, сопоставлением их параметров с учетом режимных и технических масштабирующих коэффициентов, и результатом компьютерного моделирования в MatLAB Simulink, выполненного согласно приведенной на рис. 1 схеме (в качестве IGBT принят транзистор серии 5SMY).

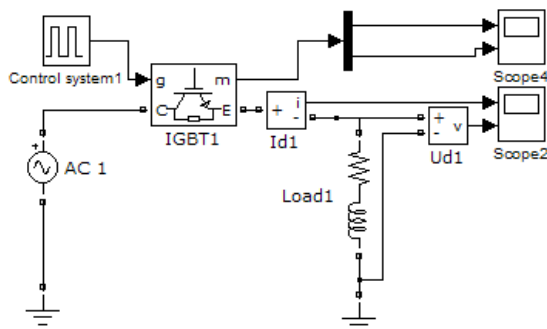


Рис. 1. Схема с IGBT транзистором.

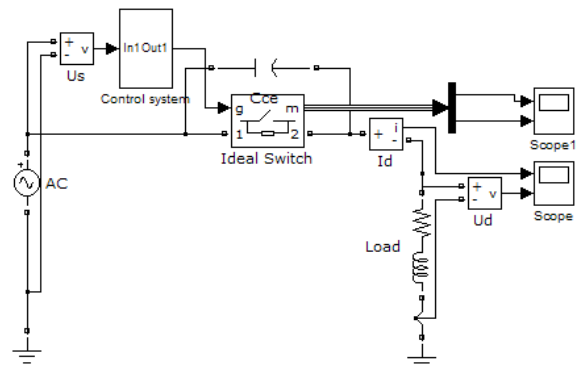


Рис. 2. Схема с Ideal Switch.

Для сравнения выполнено исследование аналогичной схемы, в которой IGBT замещался идеальным ключом Ideal Switch (рис.2).

Кроме этого проведено сопоставление параметров данных ключей согласно схеме замещения (рис.3), была получена передаточная функция для используемой схемы, проведен анализ частотных характеристик, сопоставлены полученные осциллограммы токов и напряжений силовых ключей (рис.4)

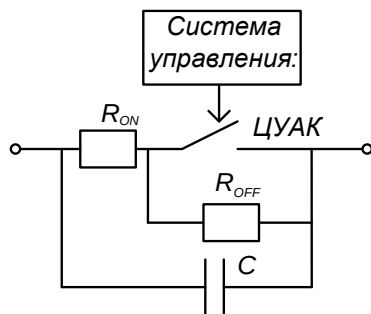


Рис. 3. Схема замещения ключа.

Основными параметрами отличающий идеальный ключ от стандартного IGBT являются сопротивления во включенном и выключенном состояниях (и) и емкость между эмиттером и коллектором (C).

Аналогичным образом были разработана модель GTO тиристора.

Полученные результаты позволяют сделать выводы:

- Рассмотренная концепция и результаты ее экспериментальной реализации подтверждают требуемый уровень адекватности моделирования силовых полупроводниковых ключей и реализуемых на их основе ПН.

- Дополнительная адаптация параметров ЦУАК позволит осуществить адекватное моделирование реальных силовых полупроводниковых ключей и преобразователей напряжения на их основе, и соответственно весь значимый спектр нормальных, аварийных и послеаварийных процессов в ЭЭС в целом, содержащих устройства на базе ПН.

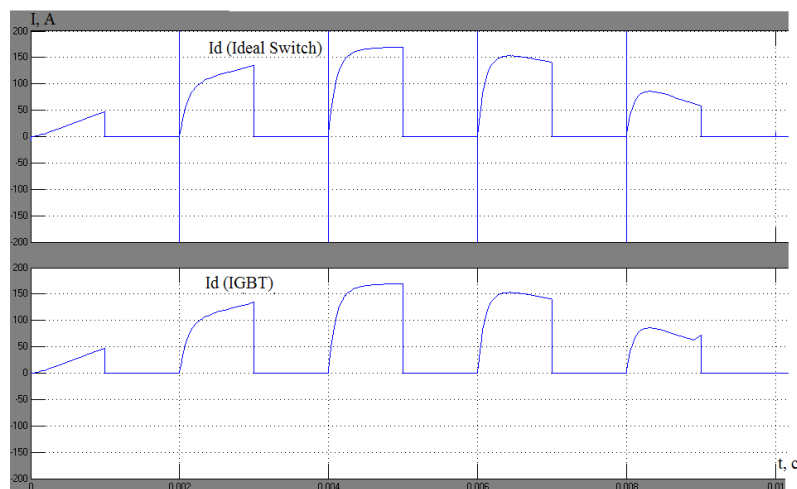


Рис. 4. Осциллограммы токов силовых ключей.

- Разработанные средства позволяют осуществлять всережимное бездекомпозиционное моделирование в реальном времени и на неограниченном интервале процессов, протекающих в устройствах ВППТ, FACTS, ЭЭС в целом и использовать данный инструмент для эффективного решения исследовательских, проектных и эксплуатационных задач в ЭЭС, содержащих такого рода устройства.

Список литературы

- 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. – 2011. – №5(1). – С. 316–324.
- 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. – 2013. – № 5(1). – С. 357–366.
- Гусев А.С., Хрущев Ю.В., Гурин С.В., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Всережимный моделирующий комплекс реального времени электроэнергетических систем // Электричество. - 2009. – №12. – С. 5–8.
- Прохоров А.В., Уфа Р.А., Васильев А.С., Рубан Н.Ю. Разработка гибридных моделей высоковольтных передач постоянного тока для задач всережимного анализа больших энергосистем // Известия Томского политехнического университета. – 2014. – Т. 324. – № 4. С. 121-131