УДК 621.311.001.57

СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЙ ГИБРИДНЫЙ ПРОЦЕССОР ДЛЯ ВСЕРЕЖИМНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ СТАТИЧЕСКИХ СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ

А.С. Васильев, Ю.С. Боровиков, А.С. Гусев, А.О. Сулайманов

Томский политехнический университет E-mail: vasilevas@tpu.ru

Приведены результаты разработки и тестового компьютерного моделирования специализированного гибридного процессора статического синхронного компенсатора, предназначенного для аналогичных средств всережимного моделирования в реальном времени обычных и активно-адаптивных электрических сетей.

Ключевые слова:

Статический синхронный компенсатор, математическая модель, гибридный процессор, всережимное бездекомпозиционное моделирование, непрерывность, реальное время, компьютерное моделирование.

Key words:

Static synchronous compensator, mathematical model, hybrid processor, full regime spectrum indecomposable simulation, infinity, real time, computer simulation.

Статический синхронный компенсатор (СТАТ-КОМ) с трехуровневым преобразователем напряжения (ПН) на базе современной силовой полупроводниковой электроники рассматривается в качестве основного, а также базового элемента других устройств и систем FACTS в планируемых и проектируемых в настоящее время активноадаптивных электрических сетях (ААЭС).

Однако создание ААЭС связано с решением комплекса сложных и нетрадиционных проектных, исследовательских и эксплуатационных задач: определение оптимального состава и мест расположения устройств FACTS; разработка и исследование законов локального и системного управления устройствами FACTS при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах работы ААЭС. Значительная сложность поставленных задач обусловлена, прежде всего, быстродействием, непрерывностью и особенностями работы устройств FACTS, в частности междуфазным функционированием СТАТКОМ. Отмеченные и другие факторы функционирования ААЭС исключают при решении указанных задач: применение декомпозиции режимов и процессов; существенное упрощение математических моделей оборудования и ААЭС, включая релейную защиту, противоаварийную автоматику и особенно устройства FACTS; ограничение интервала воспроизведения процессов. Кроме этого для решения большинства приведенных задач необходим реальный масштаб времени воспроизведения процессов.

Между тем, во всех используемых в настоящее время средствах расчета режимов и процессов в реальных энергосистемах, в силу их общей методической основы, неизбежно применяются указанные упрощения и ограничения. В результате для успешного решения перечисленных задач необходимо создание соответствующих средств моделирования ААЭС, способных обеспечивать необходимую полноту, достоверность и реальный масштаб времени моделирования при всевозможных нормальных, аварийных и послеаварийных режимах их работы.

Рассмотренная в [1] специализированная многопроцессорная программно-техническая система гибридного типа для всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем обладает такими свойствами и возможностями, но в рамках обычных традиционных энергосистем. Поэтому в связи с обозначенной проблемой актуальным является создание на этой основе системы для моделирования ААЭС, содержащей в частности специализированные гибридные процессоры (СГП) для всережимного моделирования в реальном времени устройств FACTS.

В данной статье приведены результаты разработки СГП СТАТКОМ с трехуровневым ПН в соответствии с едиными принципами построения всех СГП [1] системы и тестового компьютерного моделирования основных его фрагментов. Методика создания СГП включает в себя: анализ принципиальных схем моделируемого оборудования; составление адекватных схем замещения и соответствующих им всережимных математических моделей; разработку, исследование и испытание программно-технических средств реализации синтезированных моделей, образующих в совокупности конкретный вид СГП, на базе интегральной микроэлектроники, микропроцессорной техники и IT-технологий. Все аспекты, касающиеся СГП согласующего трансформатора, подробно рассмотрены в ранее опубликованных работах [2, 3].

На рис. 1 приведена схема замещения рассматриваемого СТАТКОМ, где $L_{R\xi}$, $R_{R\xi}$ – индуктивность и активное сопротивление фазы $\xi = A, B, C$ реактора; C_{Si} – емкость *i*-й конденсаторной батареи (КБ); R_{CSi} – сопротивление в цепи *i*-й КБ; $L_{R\xi}$, $R_{LF\xi}$ – индуктивность и активное сопротивление реактора фильтра; $C_{\xi\xi}$, $R_{F\xi}$ – емкость конденсатора и сопротивление резистора фильтра; K_{SAi} – ключи, реализующие ПН; K_{Sdi} – ключи, реализующие линейные выключатели КБ; $K_{F\xii}$ – ключи для переключения



Рис. 1. Трехфазная схема замещения СТАТКОМ с трехуровневым ПН и фильтром

схемы фильтра; K_{SN} , K_{FN} – ключи заземления нулевых цепей КБ и фильтра; $U_{\xi i}$, $i_{T\xi i}$ – фазное напряжение и ток *i*-й обмотки трансформатора; $i_{F\xi}$, $i_{LF\xi}$ – токи конденсатора и реактора фильтра; $i_{R\xi}$ – ток реактора; $i_{R\xi}$ – ток *i*-й КБ; U_{Si} – напряжение *i*-го полюса ПН.

В связи с тем, что при любом способе математического моделирования оборудования в схемах содержатся коммутационные элементы: силовые полупроводниковые ключи ПН, высоковольтные линейные выключатели и короткозамыкатели, образующие продольные и поперечные коммутаторы, возможно осуществление полного спектра различных трехфазных коммутаций. Ключи реализованы в СГП на модельном физическом уровне, обеспечивающем максимальную адекватность воспроизведения процесса коммутации в реальном времени. Для этого соответствующие непрерывные математические переменные токов, представленные напряжениями, преобразуются в разработанном СГП СТАТКОМ (рис. 2) с помощью интегральных преобразователей напряжение-ток (ПНТ) в модельные физические токи и все коммутации адекватно моделируются с помощью интегральных цифроуправляемых аналоговых ключей: ПН, цифроуправляемых продольных коммутаторов – ЦПрК, поперечных коммутаторов – ЦПоК на модельном физическом уровне, на котором естественным образом взаимодействуют между собой и все СГП согласно топологии моделируемой ААЭС.

Непрерывное решение дифференциальных уравнений, образующих математические модели оборудования СТАТКОМ, осуществляют соответствующие сопроцессоры (СП). Результат их решения подвергается оцифровке в аналого-цифровом преобразователе (АЦП) и поступает в блок микропроцессоров (БМ), который, в свою очередь, осуществляет весь спектр преобразований данных, необходимый для наблюдения за процессом моделирования, управления в реальном времени параметрами СП, состояниями ЦПрК, ЦПоК и ПН в соответствии с заданными режимами работы и алгоритмами системы автоматического управления СТАТКОМ.



Рис. 2. Структурная схема СГП СТАТКОМ, соединенного с СГП трансформатора (ТР)

Математическая модель реактора образует систему уравнений вида:

$$\frac{di_{R\xi}}{dt} = \frac{1}{L_{R\xi}} (u_{\xi 2} - u_{S\xi} - i_{R\xi} R_{R\xi})$$

Для проверки адекватности воспроизведения математической модели реактора программно-техническими средствами ее реализации смоделирована принципиальная схема СП реактора в программе *Multisim* 11.0. Выбор программы обусловлен наличием в библиотеке, предоставляемой компанией производителем, необходимых электронных компонентов. Здесь и далее при выборе параметров элементов принципиальных схем СП были использованы масштабные коэффициенты по току k_i =509,12 А/В и по напряжению k_i =3000 В/В. Параметры оборудования приведены в абсолютных и относительных величинах.

Ниже приведены результаты исследования характеристик работы схемы СП реактора, полученные при задании соответствующего входного тестового сигнала напряжения $u_{RA}=u_{A2}-u_{SA}$. На рис. 3 представлены временные диаграммы выходного сигнала тока, при синусоидальном входном напряжении.

Частотные свойства схемы СП реактора иллюстрируют амплитудно-частотные (АЧХ) и фазо-частотные характеристики (ФЧХ) (рис. 4, 5), снятые при различных параметрах модельных индуктивностей L'и сопротивлений R' реактора. Характеристики (рис. 4) сняты для индуктивности 3,123 мГн (5,3 \cdot 10⁻⁴ о.е.) при различных активных сопротивлениях реактора. Частота среза АЧХ совпадает с расчетной, приведенной к модельной величине, и составляет 300 Гц. Подъем ФЧХ на частотах выше 10 кГц (рис. 4, 5) обусловлен частотными свойствами применяемой интегральной микроэлектронной элементной базы (табл. 1).

Таблица 1. Зависимость коэффициента передачи на нулевой частоте от сопротивления

Сопротивление модельное <i>R</i> ', о.е.	0,2	2	20	200
Сопротивление реактора, Ом	1,18	11,8	118	1180
Коэффициент передачи на нулевой частоте, дБ	26,02	6,02	-13,98	-33,98

Характеристики (рис. 5) сняты для сопротивления 11,8 Ом (2 о.е.) при различных индуктивностях реактора. Коэффициент передачи на нулевой частоте равен 6,02 дБ и совпадает с расчетным значением (табл. 2).

Таблица 2. Зависимость частоты среза АЧХ от индуктивности

Индуктивность модельная L', o.e.	5,3.10-3	5,3.10-4	5,3∙10⁻⁵	5,3.10-6	5,3·10 ⁻⁷
Индуктивность реактора, мГн	31,23	3,123	0,3123	0,0312	0,0031
Частота среза, Гц	0,259	2,59	25,9	259	2590



Рис. 3. Диаграмма тока реактора при задании входного напряжения



Рис. 4. а) АЧХ; б) ФЧХ СП реактора при изменении активного сопротивления



Рис. 5. а) АЧХ; б) ФЧХ (СП реактора при изменении индуктивности

Из характеристик (рис. 4, 5) и таблиц 1 и 2 можно определить, что частотный диапазон адекватного воспроизведения процессов в реакторе составляет 10 кГц.

Моделирование работы КБ осуществляет СП КБ решением уравнений вида:

$$\begin{cases} \frac{du_{CSCi}}{dt} = \frac{1}{C_{Si}} i_{CSi};\\ i_{CSi} = \frac{u_{CSi} - u_{CSCi}}{R_{CSi}}, \end{cases}$$

где u_{CSGi} — емкостное напряжение *i*-й KБ.

Результаты моделирования схемы СП КБ приведены на рис. 6.

С помощью СП фильтра производится решение системы уравнений фильтра СТАТКОМ. При этом заданием соответствующих параметров фильтр настраивается на полосу пропускания, равную частоте коммутации вентилей. Всережимная модель фильтра образует систему уравнений вида:

$$\begin{cases} \frac{di_{LF\xi}}{dt} = \frac{1}{L_{F\xi}} \{ R_{F\xi} (i_{T\xi2} - i_{R\xi}) - (R_{F\xi} + R_{LF\xi}) i_{LF\xi} \}; \\ -(R_{F\xi} + R_{LF\xi}) i_{LF\xi} \}; \\ \frac{du_{CF\xi}}{dt} = \frac{1}{C_{F\xi}} (i_{T\xi2} - i_{R\xi}); \\ u_{\xi2} = R_{F\xi} (i_{F\xi} - i_{LF\xi}) + u_{FN} + u_{CF}, \end{cases}$$

где $u_{CF\xi}$ – напряжение на конденсаторе фильтра.

На рис. 7, 8 представлены АЧХ, ФЧХ, диаграммы входного модельного тока $i_{TA2}-i_{RA}$ и выходного фазного напряжения фильтра u_{A2} , настроенного на частоту 1 кГц. При этом параметры фильтра соответствуют: $C_{FA}=24$ мкФ (0,1417·10⁻³ o.e.); $L_{FA}=1,06$ мГн (0,1767·10⁻³ o.e.); $R_{LFA}=10$ мОм (1,667·10⁻³ o.e.); $R_{FA}=59$ Ом (10 o.e.).

Отличие полученных частотных характеристик СП фильтра от теоретических обусловлено свойствами интегральной микроэлектронной элементной базы.

Диаграмма фазного напряжения, полученная при входном сигнале тока $i_{FA}(t)=0,1\sin(314t)+0,1\sin(6283t)$, о.е., подтверждает адекватность моделирования фильтра, так как угол сдвига фазы тока составляет 90° и амплитуда гармоники 1 кГц практически равна нулю.

Результаты совместного моделирования СП реактора, ПН и СП КБ приведены на рис. 9–11.

Полученные характеристики (рис. 9, 10) соответствуют ожидаемым, что подтверждает адекватность предложенной модели СТАТКОМ. Представленные на рис. 11 диаграммы напряжений имеют амплитуду, равную напряжению на КБ, что необходимо учитывать при выборе масштабов по напряжению при подключении физических аналогов оборудования СТАТКОМ.

Выводы

 Разработан специализированный гибридный процессор статического синхронного компен-



Рис. 6. Диаграммы напряжения и тока КБ









Рис. 8. Фазное напряжение и ток фазы фильтра, полученные при моделировании





Рис. 10. Диаграммы напряжений на стороне переменного тока ПН



Рис. 11. Диаграммы напряжений на полюсах ПН

сатора с трехуровневым преобразователем напряжения для непрерывного всережимного моделирования в реальном времени активноадаптивных электрических сетей.

 Структура гибридного процессора позволяет применять в ней не только трехуровневый преобразователь напряжения, но и любую другую его модификацию и подключать к нему аналого-цифровые математические и физические модели конденсаторных батарей, различных нагрузок и источников энергии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Гусев А.С. Концепция и средства всережимного моделирования в реальном времени электроэнергетических систем // Известия вузов. Проблемы энергетики. – 2008. – № 9–10/1. – С. 164–170.
- Гусев А.С., Свечкарев С.В., Плодистый И.Л. Универсальная математическая модель силовых трехфазных трансформаторов и автотрансформаторов // Известия Томского политехнического университета. – 2007. – Т. 311. – № 4. – С. 77–81.

 Результаты моделирования соответствуют с необходимой точностью теоретическим: амплитудно-частотные характеристики в диапазоне до 100 кГц, а фазо-частотные характеристики – до 10 кГц, что обеспечивает с запасом требуемый до 5 кГц диапазон достоверного воспроизведения процессов в моделируемых статических синхронных компенсаторах.

Работа выполнена при поддержке федеральной целевой программы «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технического комплекса России на 2007—2013 годы».

 Боровиков Ю.С., Васильев А.С., Гусев А.С. Программно-технические средства всережимного моделирования в реальном времени статического синхронного компенсатора // Электричество. – 2012. – № 6. – С. 29–33.

Поступила 24.07.2012 г.