

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

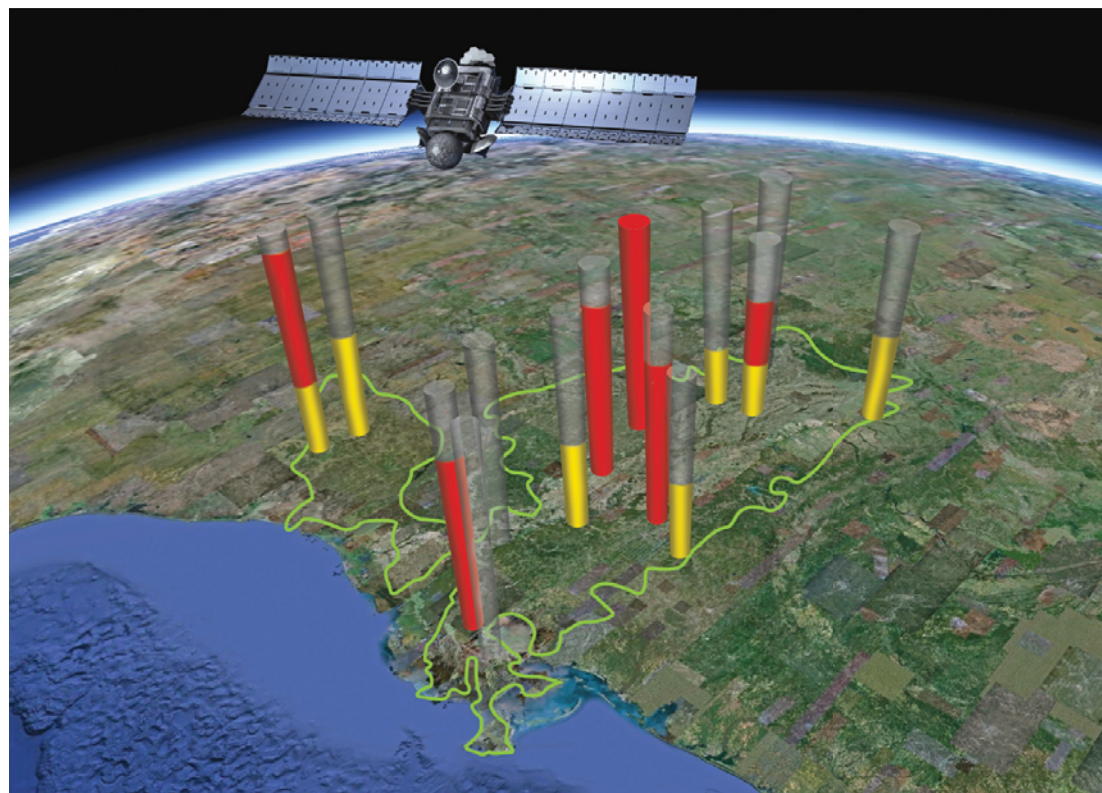
АВТОР:

Я. ЗАКОНЬШЕК,
«РЕЛАРТЕ» (СЛОВЕНИЯ)

Моделирование энергосистем в реальном времени является общепризнанным методом исследования современных электроэнергосистем, оптимизации их функционирования, анализа работоспособности, обучения и т.д.

Аппаратно-цифровые комплексы реального времени с подключением физического оборудования к модели — эффективный и проверенный подход, активно используемый в современной практике мировой энергетики для решения широкого диапазона задач.

Ключевые слова: цифровое электродинамическое моделирование энергосистем в реальном времени; релейная защита и противоаварийная автоматика; системы HVDC и FACTS, WAMPAC; активно-адаптивные электрические сети и малая генерация; PHIL; обучение студентов и персонала; кибербезопасность.



Базовые принципы действия системы WAMPAC

ВВЕДЕНИЕ

Электродинамическое моделирование энергосистем (ЭС) в реальном времени использовалось в том или ином виде практически с начала прошлого века и постоянно совершенствовалось. Внедрение аналоговых электродинамических комплексов, выполненных на физических компонентах, позволило исследовать сложные ЭС. По сути, модель функционировала в реальном времени, но ее возможности ограничивало то, что она строилась на мало варьируемых компонентах, имеющих приближенные характеристики, не учитывающие явления насыщения и имеющие фиксированные или трудноизменяемые параметры. Кроме того, такие модели занимали много места, использовали большое число проводов и требовали много времени для сборки. Россия имеет богатую историю применения аналоговых электродинамических моделей. Еще во времена СССР в научно-исследо-

вательском институте по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения (НИИПТ, ныне НТЦ ЭЭС, г. Санкт-Петербург) в соответствии с предложениями академиков М.П. Костенко и И.А. Глебова, изложенными в 1957 г. в их фундаментальной статье «Электродинамическое моделирование как метод научного исследования проблем энергетики», был создан крупнейший в мире электромеханический аналоговый моделирующий комплекс, который продолжает эксплуатироваться до сих пор (рис. 1).

Временем рождения цифровых тестовых комплексов для моделирования ЭС в реальном времени (ЦТМК) считается 1969 г., когда ученый Германн В. Доммель опубликовал свою работу Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single and Multiphase Networks («Метод компьютеризированных расчетов электромагнитных переходных процессов в одно- и многофазных электрических сетях»). Одним

из первых практических применений упомянутой работы стало создание в Канаде высоковольтных линий электропередачи постоянного тока HVDC в 1989 г. Сегодня практически невозможно представить себе развитие современных ЭС без использования ЦТМК [1].

В России очень хорошо зарекомендовало себя программно-аппаратное тестирование в реальном времени с использованием ЦТМК. Первый такой ЦТМК был приобретен ОАО «ВНИИР», г. Чебоксары, в 2007 г. Сегодня многие электроэнергетические компании, производители оборудования, учебные заведения используют симуляторы ЦТМК для своей повседневной работы. К ним относятся НТЦ ФСК ЭЭС, НТЦ ЭЭС, ВНИИР, «ЭКРА», ГК «ТЕКОН», РКСС, МЭИ, КАИ, ИГЭУ, КГЭУ, ТПУ.

В статье кратко представлены различные возможности применения современных средств цифрового



Рис. 1
Зал управления аналоговым тестовым моделирующим комплексом НТЦ ЭЭС, г. Санкт-Петербург

моделирования в рамках новейших концепций по разработке систем электроснабжения. Наиболее важными из них являются моделирование в реальном времени и исследования функционирования и кибербезопасности ЭС, в том числе «умных» сетей и сетей с распределенной генерацией, программно-аппаратное тестирование и разработка систем РЗА и некоторых видов силового оборудования, а также обучение студентов и повышение квалификации специалистов.

ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ

ЦТМК использовался для испытаний следующих систем регулирования непрерывного действия:

- контроллеры коммутации линии (Line Commutated Converter, LCC) для систем постоянного тока высокого (HVDC) и сверхвысокого напряжения (UHVDC);
- многоуровневые преобразователи для систем постоянного тока HVDC [2];
- статические компенсаторы реактивной мощности (SVC) для промышленных потребителей и для магистральных сетей;
- адаптивные системы передачи переменного тока (FACTS), такие как статические компенсаторы реактивной мощности (STATCOM), регуляторы перетока мощности (UPFC), продольные статические компенсаторы (SSSC), системы динамического восстановления напряжения (DVR) и др. [4, 5];
- регуляторы последовательно включенных конденсаторов с тиристорным управлением (TCSC);
- регуляторы возбуждения и напряжения для синхронных машин;

- регуляторы частоты вращения привода синхронных машин;
- системы стабилизации генератора с сетью (PSS);
- системы управления распределенной генерацией и возобновляемыми источниками: ветровые и солнечные станции, топливные элементы и т.п.;
- системы управления «умными» сетями Smart Grid: протоколы МЭК 61850;
- системы автоматического управления RAS (Remedial Action Scheme).

ЦТМК обеспечивают взаимодействие в режиме реального времени между испытуемыми регуляторами и моделью ЭС с используемыми в ней виртуальными силовыми элементами [6].

Посредством графического интерфейса оператор воспроизводит на модели условия эксплуатации ЭС в установившихся, переходных и аварийных режимах. Требуемые состояния ЭС можно легко воссоздавать повторно для детального исследования и анализа, а также для оптимизации испытуемой системы управления и верификации производимых изменений.

Так как моделирование выполняется в реальном времени, то это позволяет подключать к ЦТМК любое внешнее оборудование, замыкающее контур управления моделью ЭС, эта технология называется HIL (Hardware in the Loop). Возникающее при этом полное взаимодействие между системой управления и моделью ЭС позволяет лучше понять действия схем управления и их влияние на ЭС.

ИСПЫТАНИЯ СИСТЕМ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ

ЦТМК может также использоваться для испытаний различных систем РЗА:

- защиты линий: дистанционные, дифференциальные, а также волновые [7];
- защиты трансформаторов [8];
- защиты генераторов, включая исследования их функционирования при внутренних повреждениях генераторов [9];
- защиты шин (с низким и высоким импедансом) и пр.

При этом испытаниям могут подвергаться:

- традиционные устройства защиты, подключаемые посредством усилителей мощности;
- устройства защиты с цифровыми интерфейсами, такими как МЭК 61850 и аналогичными ему интерфейсами:
 - а) МЭК 61850-8-1 GOOSE (подписка и публикация);
 - б) МЭК 61850-9-2 SV (подписка и публикация);
 - в) МЭК 61869-9 (публикация);
- системы автоматического управления RAS;
- системы глобального мониторинга, защиты и управления на большой территории (WAMPAC).

Поскольку моделирование выполняется в реальном времени, то любое устройство релейной защиты может включаться в замкнутый контур с виртуальной моделью ЭС. Это касается как традиционных устройств защиты, так и современных комплексов для цифровых подстанций. Применяемый подход позволяет исключить проведение натуральных испытаний, которые ранее часто были последним шагом для окончательного одобрения использования нового оборудования (рис. 2).

Удобная и гибко настраиваемая графическая среда управления ЦТМК позволяет подвергать испытуемое оборудование практически всем возможным аварийным и нормальным условиям эксплуатации. Дости-



Рис. 2
Однофазное замыкание на землю ВЛ 110 кВ во время проведения натуральных испытаний, которые могут быть исключены вследствие применения ЦТМК

гаемое при этом полное взаимодействие системы защиты с моделью ЭС дает возможность лучше понять особенности функционирования релейной защиты и ее влияние на ЭС.

СИСТЕМЫ HVDC И FACTS

Системы HVDC и FACTS являются ключевыми для управления современными ЭС и повышения их устойчивости, управляемости и надежности. В основе указанных систем лежит использование силовых электронных преобразователей. ЦТМК могут моделировать работу силовых полупроводниковых ключей с высокой частотой переключения и используются в случаях:

- разработки силовой части систем HVDC и FACTS на базе преобразователей LLC и VSC с двух-, трех- и многоуровневыми модульными конверторами (MMC) [10, 11];
- разработки и испытаний систем управления силовыми ключами;
- проектирования ЭС переменного и постоянного тока;
- проектирования систем управления и их испытания;
- исследования взаимовлияний с ЭС.

Внедрение ЦТМК способствовало революции в развитии технологий HVDC и FACTS. На сегодняшний день ЦТМК стали практически идеальным инструментом для моделирования и проведения испытаний установок HVDC и FACTS. И это направление динамично развива-

ется вслед за появлением новых решений и возможностей.

Производители HVDC и FACTS используют ЦТМК при проведении приемо-сдаточных испытаний, а предприятия, применяющие эти комплексы при решении технических вопросов эксплуатации и модернизации своих сетей, — для обучения операторов [12]. В мире уже накоплен огромный опыт успешной эксплуатации систем постоянного тока HVDC и UHVDC с различными типами преобразовательных подстанций (LCC, VSC и MMC), электрических сетей переменного тока с различными типами компенсирующих установок: SVC, STATCOM, TCSC, DVR, UPFC, SSSC и пр.

Необходимо отметить, что ЦТМК может выполнять симуляцию в гибридном режиме, используя одновременно «номинальный» и «малый» шаги расчета. Для моделирования процессов в основной ЭС устанавливается шаг расчета 30–50 мкс, а для подсистем с силовыми электронными ключами — 2–4 мкс [13]. При этом можно произвольно задавать схему соединения силовых ключей и их параметры, а частота управляющих импульсов для них может превышать 2 кГц.

СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА, ЗАЩИТЫ, ПРОТИВОАВАРИЙНОЙ АВТОМАТИКИ И УПРАВЛЕНИЯ WAMPAC

Разработка и исследования систем релейной защиты и управления на большой территории (WAPS)

и противоаварийной автоматики (WACS) стали возможны с внедрением технологии PMU, которая предназначена для измерений электрических параметров ЭС в разных ее концах (на больших территориях) в строго синхронные моменты времени. За счет данных, получаемых от устройств векторных измерений PMU, стало возможным формирование математически точной картины состояния ЭС в каждый момент времени, а значит, четкая локализация возникающих в ней пред-аварийных и аварийных режимов и, следовательно, централизованное автоматическое принятие решений по выявлению и устранению аварий. Такой подход позволяет реагировать на различные колебания в ЭС гораздо быстрее, как, например, это имело место в Европе 11 сентября 2001 г.,

когда правильное функционирование защиты от потери синхронизма на ВЛ, соединяющими юго-восточную и западную части европейского континента, предотвратило длительный перерыв в электроснабжении всей Европы. Для примера на рис. 3 показан график изменения переходного сопротивления, измеряемого защитой от потери синхронизма.

ЦТМК могут моделировать большие ЭС, включающие множество генерирующих станций и потребителей, объединенных протяженными ЛЭП [14, 15]. Такие большие модели ЭС могут использоваться для выполнения следующих задач:

- исследований динамической устойчивости ЭС и их надежности;

- исследований электромагнитных и электромеханических переходных процессов;
- разработки и исследования систем централизованной защиты, противоаварийной автоматики и управления.

ЦТМК формирует синхронизированные потоки измерений на всех требуемых участках модели ЭС в аналоговом и цифровом виде. В первом случае к симулятору подключают внешние устройства PMU, имеющие аналоговые входы. Все данные от реальных и виртуальных устройств PMU по протоколу IEEE C37.118, принятому для устройств PMU, объединяются на концентраторе PDC и передаются в систему обработки и анализа WAMPAC. Для правильной и согласованной работы цифровых устройств используются высокоточные протоколы синхронизации времени 1PPS, IRIG-B или IEEE 1588.

Таким образом, можно наблюдать за моделируемой на ЦТМК ЭС и возникающими в ней качаниями мощности, колебаниями частоты, напряжения и фазового угла. Кроме того, можно следить за оперативной картиной состояния модели ЭС и автоматически выявлять перегруженные участки и оборудование, задавать соответствующие аварийные и рабочие пороги, выполнять виртуальные переключения и т.п., что символически показаны на рис. на стр. 62.

АКТИВНО-АДАПТИВНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СЕТИ И МАЛАЯ ГЕНЕРАЦИЯ

В последнее время все больший интерес вызывает концепция интеллектуальных распределен-



Рис. 4
Объединение возобновляемых источников энергии в микросети

тельных сетей с активно-адаптивной конфигурацией, которые называются «умные сети». Также становятся актуальными вопросы подключения к единой ЭС объектов малой и возобновляемой генерации. Внедрение этих технологий ставит задачи по выбору оптимальной стратегии, минимизации электрических потерь и негативных воздействий на окружающую среду, увеличению надежности и стабильности ЭС. Над их решением трудятся производители оборудования, энергосетевые компании, научно-исследовательские институты и университеты во всем мире. ЦТМК способствуют им в этой работе и позволяют отлаживать на модели предлагаемые концепции по созданию «умных сетей» и развитию возобновляемых источников энергии (рис. 4).

К «умным сетям» относится новая степень развития электрических сетей, которая подразумевает широкое использование коммуникационных технологий для сбора информации

от каждого элемента ЭС с последующей обработкой и автоматическим принятием решений по изменению конфигурации сетей таким образом, чтобы обеспечить надежное, безопасное и устойчивое энергоснабжение потребителей и своевременное техническое обслуживание оборудования ЭС. «Умные сети» — это не просто новая технология, а комплекс технологических и организационных процедур, которые радикально изменят электрическую сеть [16].

Для моделирования активно-адаптивных сетей в реальном времени необходимы каналы высокоуровневой коммуникации с внешним оборудованием, поэтому от ЦТМК потребовалась поддержка следующих протоколов связи:

- МЭК 61850 для приложений автоматизации подстанций;
- DNP и МЭК 60870-5-104, Modbus, MMS для систем АСУ ТП;
- IEEE C37.118 для измерителей PMU.

Кроме того, ЦТМК должен содержать средства для моделирования малой генерации и возобновляемых источников энергии. Для этого в библиотеках компонентов ЦТМК уже имеются модели ветровых турбин, преобразователей солнечной энергии, топливных элементов, химических источников тока, а также модели электронных преобразователей, которые симулируются с малым шагом расчета.

КОМПЛЕКС PHIL ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СИЛОВОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Моделирование по технологии PHIL подразумевает взаимодействие виртуальной ЭС с реальным силовым оборудованием с передачей активной и реактивной мощностей через мощные 4-квадрантные усилители, мощность которых

ГРАФИК ИЗМЕНЕНИЯ ПЕРЕХОДНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ, ИЗМЕРЯЕМОГО ЗАЩИТОЙ ОТ ПОТЕРИ СИНХРОНИЗМА, УСТАНОВЛЕННОЙ НА ПС «ТАНТАРЕНИ» НА ВЛ 400 КВ МЕЖДУ РУМЫНСКОЙ (RO) И БОЛГАРСКОЙ (BG) ЭС, ВО ВРЕМЯ КОЛЕБАНИЙ 11 СЕНТЯБРЯ 2001 Г.

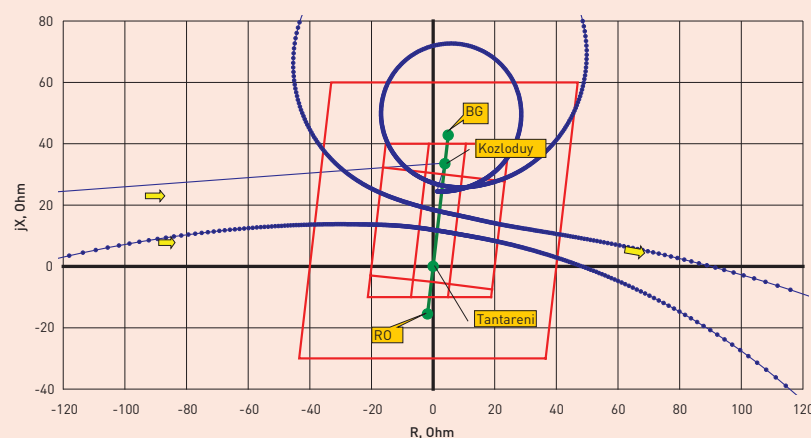


Рис. 3

БАЗОВАЯ СТРУКТУРА ЦТМК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ PHIL

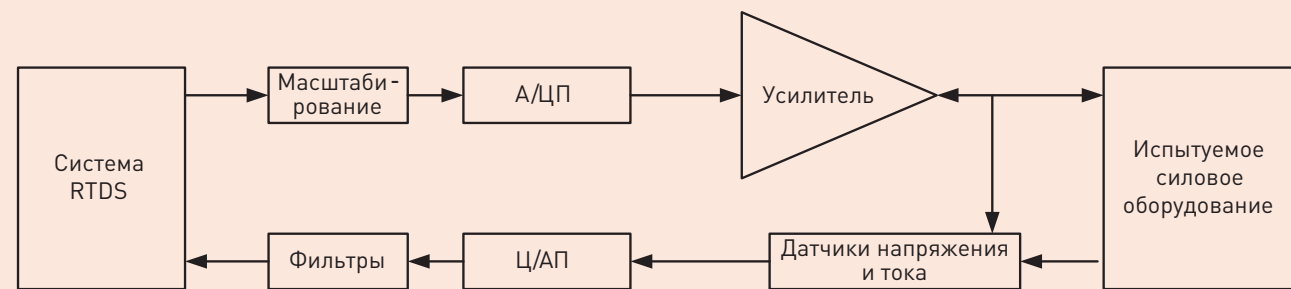


Рис. 5

может превышать 100 кВА. Базовая структура моделирования с PHIL показана на рис. 5.

В большинстве случаев при проведении исследований ЦАП, подключаемые к ЦТМК, формируют смасштабированные до требуемого уровня аналоговые сигналы, как показано на рис. 5. Эти сигналы являются входными сигналами для усилителя, обеспечивающего заданные значения напряжения и тока, получаемые от испытуемого оборудования, которое в свою очередь через АЦП посылает сигнал в ЦТМК, замыкая цепь обратной связи. Фильтры, предусмотренные в программной и аппаратной частях ЦТМК, требуются, чтобы подавить шумы в интерфейсе PHIL. Структура и параметры фильтров выбираются из соображений обеспечения приемлемого компромисса между требованиями улучшения стабильности и обеспечения приемлемой точности PHIL-симуляции.

Как правило, комплексы PHIL подключают к силовому оборудованию с напряжением от 380 В до 10 кВ, к которому относятся: инверторные преобразователи для ветровых и солнечных установок; электро-мобили; аккумуляторы; электродвигатели, генераторы и пр.

ЦТМК успешно используются при проведении исследований

по технологии PHIL в следующих случаях:

- исследования «умных сетей» и малой генерации;
- испытания судовых двигателей и электроприводов мегаваттной мощности;
- исследования «виртуальных синхронных генераторов» (VSG);
- испытания ветряных установок с переменной частотой вращения мегаваттной мощности;
- исследования синхронизации трехфазных силовых преобразователей;
- испытания инверторных преобразователей для солнечных батарей.

Моделирование по технологии PHIL позволяет проводить испытания силовых установок в режиме реального времени в полностью контролируемой среде [17, 18, 19]. В симуляторе ЦТМК создается виртуальная модель ЭС, с которой будет взаимодействовать физическое устройство по сигналам тока и напряжения через интерфейсное устройство. Таким устройством является 4-квadrантный усилитель, который может как выдавать активную и реактивную мощности, так и поглощать ее, т.е. функционировать во всех четырех квадрантах мощности PQ.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЦТМК ДЛЯ ОБУЧЕНИЯ СТУДЕНТОВ И ПОВЫШЕНИЯ КВАЛИФИКАЦИИ ПЕРСОНАЛА

Важные достоинства ЦТМК заключаются в возможности получения учащимися практических навыков работы с вторичной аппаратурой в условиях, максимально схожих с условиями реальной эксплуатации [2]. ЦТМК обеспечивают наглядную демонстрацию учащимся сложных динамических явлений в ЭС, например, качаний, что позволяет закреплять теоретические знания, полученные во время лекционных занятий.

Многие университеты в мире используют ЦТМК в своей образовательной деятельности. Они применяют специально разработанные методики преподавания курсов моделирования ЭС для будущих бакалавров и магистров. Посредством симуляторов студенты получают опыт управления ЭС и наблюдают ее реакции на вводимые ими возмущения. Программы управления моделированием имеют удобные

инструменты, позволяющие студентам получить требуемый иллюстративный материал для своих отчетов и для анализа проделанной работы. Все это помогает максимально эффективно закрепить полученные на лекциях теоретические знания и приобрести необходимый практический опыт работы как с ЭС в целом, так и с конкретными устройствами РЗА.

ОБУЧЕНИЕ ПЕРСОНАЛА

Многие энергосетевые компании используют ЦТМК для моделирования своих электрических сетей и обучения персонала. ЦТМК позволяют специалистам работать с реальными устройствами РЗА в условиях, максимально приближенных к реальным условиям эксплуатации. Любые изменения или модернизация эксплуатируемой ими ЭС могут проверяться на модели, прежде чем получить одобрение для внедрения. По сообщениям энергокомпаний, внедрение ЦТМК для обучения пер-

сонала позволило сократить время вынужденных простоев, снизить ущерб от выхода оборудования из строя и сформировать хорошую репутацию у своих клиентов, что в итоге повысило доходность компаний.

ПРОВЕДЕНИЕ ИСПЫТАНИЙ ПО КИБЕР-БЕЗОПАСНОСТИ ЭС

Тяжесть возможных последствий, которые могут быть вызваны атаками злоумышленников через информационные сети на технологические объекты энергетики, показывает потенциальную опасность киберпреступлений для современного общества. Изучение возможного влияния кибератак на используемое в ЭС вторичное оборудование (устройства РЗА, АСУ ТП, WAMPAC и т.д.) должно проводиться с учетом

влияния на работу ЭС в целом и выявления наиболее опасных направлений атак и последующей выработкой предупредительных мер, устойчивости вторичного оборудования к внешним кибернетическим угрозам. В роли имитатора ЭС в таких моделях выступает ЦТМК. К нему подключается вторичное оборудование и информационные комплексы, функционирование которых анализируется в ходе тестовых кибератак. При этом оцениваются отказы оборудования и степень их влияния на устойчивость ЭС.

СОВРЕМЕННЫЕ ЦТМК

Для того чтобы читатели могли оценить прогресс в развитии технологий моделирования, для сравнения с электромеханическим комплексом, представленным на рис. 1 на с. 63, на рис. 6 показан ЦТМК, реализованный в China Southern Grid Company, Китай. На сегодняшний день это один из крупнейших по вычислительным возможностям ЦТМК.



Рис. 6
ЦТМК China Southern Grid Company

Он может одновременно моделировать процессы в ЭС Южного Китая, включая линии электропередачи сверхвысокого напряжения: 8 ЛЭП переменного тока и 5 ЛЭП постоянного тока.

ВЫВОДЫ

Сейчас уже невозможно разрабатывать и эксплуатировать современные ЭС без широкого применения комплексов для их моделирования [22]. Для решения ряда задач можно использовать программные комплексы, работающие в режиме офлайн, но все же окончательные испытания реального оборудования необходимо проводить с применением ЦТМК. Такие испытания дают следующие важнейшие преимущества:

- значительно сокращается время выхода на рынок новых разработок и внедрения этих разработок в современные ЭС;
- обслуживающий персонал и студенты имеют возможность детально изучить особенности оборудования ЭС, за надежную работу которых они в будущем будут нести ответственность.

ЛИТЕРАТУРА

1. Законьшек Я., Мочалов Д.О., Шамис М.А. Комплексы моделирования в реальном времени для современных энергосистем // Релейная защита и автоматизация. 2013. № 1(10). С. 70–74.
2. Шамис М.А. Использование современных симуляторов энергосистем для изучения электротехники и энергетики // ЭнергоStyle. 2017. № 3 (39). С. 34–35.
3. Yoon Y.-B., Kim T.-K., Cha S.-T., Kuffel R., Wiercks R., Yu M. HVDC Control and Protection Testing Using RTDS Simulator // Library RTDS Technologies. Available at: www.rtds.com.
4. Valiquette R., Mazur G., Dhalival N., Jiang X., Wiercks R. Application of Real Time Simulation for Commissioning Automatic Voltage Regulators for Synchronous Condensers // Library RTDS Technologies. Available at: www.rtds.com.

5. Badelt T., Claus M., Retymann D., Forsyth P., Maguire T. Advanced Hybrid HVDC Testing in Facts Environment Using a Real Time Digital Simulator // Library RTDS Technologies. Available at: www.rtds.com.
6. Brandt D., Wachal R., Valiquette R., Wiercks R. Closed Loop Testing of a Joint VAR Controller Using Digital Real-Time Simulator // Transaction on Power Systems. August 1991. Vol. 6. No. 3. Pp. 1140–1146.
7. Singh Sidhu T., Varma R.K., Gangadharan P.K., Albasri F.A., Ortiz G.R. Performance of Distance Relays on Shunt-FACTS Compensated Transmission Lines // IEEE Transactions on Power Delivery. July 2005. Vol. 20. No. 3. Pp. 1837–1845.
8. Zhang Y., Forsyth P. UMEC Transformer Model for the Real Time Digital Simulator // International Conference on Power Systems Transients (IPST'05), Montreal, Canada. 2005. June 19–23. Paper No. IPST05 — 077. Available at: http://ipstconf.org/papers/Proc_IPST2005/05IPST077.pdf.
9. Dehkordi A.B. A Single-Phase Induction Machine Model for Real-Time Digital Simulation // International Conference on Power Systems Transients (IPST2015), Cavtat, Croatia, 2005, June 15–18. Available at: http://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2015/15IPST013.pdf.
10. Arunprasanth S., Annakkage U.D., Karawita C., Kuffel R. A Generic Point-to-Point MMC-VSC System for Real Time and Off-Line Simulation Studies // International Conference on Power Systems Transients (IPST2015), Cavtat, Croatia, 2005, June 15–18. Available at: http://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2015/15IPST225.pdf.
11. Larsson T., Hasler J.-P., Forsyth P., Maguire T. Voltage Source Converter modeled in RTDS — experiences and comparison with field results // International Conference on Power Systems Transients (IPST'07), Lyon, France, 2007, June 4–7. Available at: http://www.ipstconf.org/papers/Proc_IPST2015/15IPST225.pdf.
12. Duchon H., Lagerkvist M., Kuffel R., Wierckx R.P. HVDC Simulation and Control System Testing Using a Real-Time Digital Simulator (RTDS) // First International Conference on Digital Power System Simulators. Texas, USA, April 5–7, 1995. Pp. 213–219.
13. Sloderbeck M., Meka R., Faraque O., Lagston J., Steurer M. Co-simulation of an FPGA-based Electromagnetic Transient Model in the RTDS Real-Time Digital Simulator // Library RTDS Technologies. Available at: www.rtds.com.
14. Chen H., Bhargava B., Montoya M. R., Castaneda J. Integration of RTDS with EPG Synchrophasor Applications for Visualization and Analysis of Simulation Scenarios at Southern California Edison // North America Power Symposium (NAPS). Champaign, USA, Sept. 9–11, 2012. Pp. 1–5.
15. Peters C., Forsyth P., Ouellette D., Cayres S. Real Time Digital Simulation of Wide Area Protection and Control Schemes Using Phasor Measurement Units // XII SEPOPE. Rio de Janeiro, Brasil, May 20–23, 2012. Pp. 1–9.
16. McLaren P., Nayak O., Langston J., Steurer M., Sloderbeck M., Meeker R., Lin X., Yu M., Forsyth P. Testing the “Smarts” in the Smart T&D Grid // Power Systems Conference and Exposition (PSC). Phoenix, USA, IEEE/PES, March 20–23, 2011. Pp. 1–8.
17. Ren W., Steurer M., Woodruff S. Applying Controller and Power Hardware-in-the-Loop Simulation in Designing and Prototyping Apparatuses for Future All Electric Ship // Electric Ship Technologies Symposium, Arlington, VA, USA. ESTS '07. IEEE May 21–23, 2007. Pp. 443–448.
18. Roscoe A.J., Mackay A., Burt G.M., McDonald J.R. Architecture of a network-in-the-loop environment for characterizing AC power system behavior // IEEE Transactions on Industrial Electronics. Vol. 57. April 2010. I. 4. Pp. 1245–1253.
19. Lefhuss F., Lauss G., Kotsampopoulos P., Hatzigryriou N., Crolla P., Roscoe A. Comparison of multiple Power Amplification types for Power Hardware-in-the-Loop Applications // Complexity in Engineering (COMPENG). Aachen, Germany, June 11–13, 2012. Pp. 95–101.
20. Hahn A., Ashok A., Sridhart S., Govindarasu M. Cyber-Physical Security Testbeds: Architecture, Application, and Evaluation for Smart Grid // IEEE Transactions on Smart Grid. June 2013. No. 2. Vol. 4. Pp. 847–855.
21. Vellaithurai C.B., Biswas S., Liu R., Srivastava A. Real Time Modelling and Simulation of Cyber-Power System // Springer International Publishing Switzerland. 2015. DOI. 10.1007/978-3-662-45928-7_3.
22. Belo Franca V.A., Espírito Santo S., de Almeida H.H., do Prado Damião C. H. B. The FURNAS' Experience on Real Time Simulation // IX SEPOPE. Rio de Janeiro, Brasil, May 23–27, 2004. Available at: https://www.rtds.com/wp-content/uploads/2015/12/The-FURNAS-Experience-on-Real-Time-Simulation.pdf

БМРЗ-БНЗ

Высокочастотная защита линий 110–220 кВ

Интеллектуальное устройство БМРЗ-БНЗ предназначено для выполнения основной высокочастотной защиты и резервных ступенчатых защит линий напряжением 110 – 220 кВ, в том числе в схемах с двумя выключателями на присоединение.

Устройство БМРЗ-БНЗ предназначено для работы с выключателями с трехфазным и пофазными приводами.

- Направленная высокочастотная защита линии.
- Высокочастотная блокировка ступенчатых защит линий.
- Возможность работы на линиях с ответвлениями.
- Дистанционная защита.

Единое для всех устройств НТЦ «Механотроника» программное обеспечение «Конфигуратор-МТ» имеет графический редактор логики, библиотеку функций, пусковых органов и логических элементов и обеспечивает максимальную гибкость при применении устройств.



Единое ПО для устройств НТЦ «Механотроника» с графическим редактором гибкой логики



Сертификат соответствия International Users Group IEC 61850 Edition 2

ООО «НТЦ «Механотроника» более 28 лет разрабатывает и производит интеллектуальные устройства релейной защиты и автоматики. Развиваясь и совершенствуясь, предприятие наращивает выпуск существующих устройств и решений и создает новые, превосходящие по своим параметрам продукцию мирового уровня.



МТ МЕХАНОТРОНИКА
Интеллектуальные устройства релейной защиты

198206, Санкт-Петербург, ул. Пионерстроя, д. 23, лит. А
Единый телефон тех. поддержки: 8 (800) 250-63-60
www.mtrele.ru