Применение цифровых симуляторов реального времени в энергетических компаниях

Цифровые симуляторы реального времени широко применяются в промышленности. В частности, энергетические компании используют эти системы в режиме замкнутого контура для исследований и тестирования устройств защиты, автоматики и управления вставок постоянного тока (HVDC), статических компенсаторов реактивной мощности (SVC), генераторов, линий передачи, трансформаторов и т.д., а также для крупномасштабного имитационного моделирования. Такие симуляторы должны обеспечивать непрерывное моделирование электромагнитных переходных процессов в реальном времени в режиме замкнутого контура. Со временем аппаратное и программное обеспечение указанных симуляторов, которые впервые были представлены в начале 90-х годов прошлого столетия, совершенствовалось. Нововведения способствовали повышению эффективности и расширению сферы применения симуляторов. В данной статье подробно описаны требования к конструкции цифровых симуляторов реального времени и особенности их применения в энергетических компаниях.

Авторы:
Пол Форсайт,
Рик Кюффель,
Сиприан Питерс

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

В настоящее время моделирование играет важную роль в исследовании энергосистем. Прежде чем появилась возможность использовать цифровое моделирование, единственной опцией были аналоговые симуляторы. Аналоговые симуляторы состоят из уменьшенных моделей реальных компонентов энергосистемы (электрические машины, линии передачи, нагрузки и т.д.). Наряду с тем, что аналоговые симуляторы обеспечивают очень точное представление компонентов, которые они моделируют, им присущ и ряд недостатков. Они очень дорогие, как правило, занимают большое пространство, и, кроме того, для сборки модели может потребоваться достаточно много времени.

В конце 60-х годов прошлого столетия Герман Доммель [1] разработал алгоритм моделирования электромагнитных переходных процессов. В этом алгоритме для преобразования интегральных уравнений в алгебраические уравнения используется интегрирование по формуле трапеций, что является результатом анализа цепей методом узловых потенциалов. Применение правила трапеции требует, чтобы решение рассчитывалось только в дискретные моменты времени, в отличие от непрерывного решения. Как правило, для моделирования энергосистем временной шаг Δt выбирается порядка 50 микросекунд (μs).

До начала 90-х годов прошлого столетия технические возможности не позволяли осуществлять цифровое моделирование в реальном времени. Существовали инструменты, позволяющие выполнять моделирование не в реальном времени или «в автономном режиме». Автономное (или независимое) моделирование отклика системы в течение 1 секунды может потребовать несколько минут или даже часов компьютерного времени. При

моделировании в реальном времени моделирование аналогичного отклика занимает точно одну секунду. При полностью цифровом моделировании все расчеты, необходимые для определения состояния энергосистемы, выполняются в течение времени, равного временному шагу моделирования (например, моделирование одного цикла в системе частотой 50 Гц происходит точно 20 раз в каждую мс, то есть 400 раз в течение одного цикла с временным шагом 50 мкс. Этим обеспечивается чрезвычайно высокая точность наблюдаемых переходных процессов).

Цифровые симуляторы реального времени широко используются в энергокомпаниях по всему миру. Чрезвычайно важно иметь инструмент, позволяющий исследовать энергосистемы и различные устройства релейной защиты и противоаварийной автоматики.

В следующем разделе дается описание некоторых вариантов применения цифровых симуляторов реального времени.

ПРИМЕРЫ ПРИМЕНЕНИЯ

Тестирование системы управления в режиме замкнутого контура

Симуляторы реального времени широко применяются для тестирования в режиме замкнутого контура контроллеров для HVDC, SVC, TCSC, а также устройств FACTS. Фактически все производители устройств на базе элементов силовой электроники используют симуляторы для разработки новых устройств, проверки их динамических характеристик, а также эксплуатационной проверки на объекте. Симуляторы дают предприятиям ряд важных преимуществ, ранее им недоступных:

- осуществление независимого тестирования новых контроллеров;
- более тщательное исследование влияния новых установок на примыкающие к ним сети с учетом реального отклика контроллера;
- обучение персонала работе с установками и контроллерами без риска оказания влияния на работу сети;
- тестирование возможных модификаций или обновлений элементов управления прежде, чем они будут полностью готовыми к использованию конечными пользователями в сети.

Для получения точного моделирования вышеупомянутых устройств на базе элементов силовой электроники симулятор должен реагировать оперативнее, чем это предполагается временным шагом 50 мкс. Для линейно коммутируемых устройств (например, тиристоров), используемых в HVDC, SVC и TCSC, может использоваться усовершенствованный алгоритм моделирования для обеспечения непрерывного импульса включения разрешением порядка 1 мкс [2]. До возникновения данной методики импульс включения, поступающий во время расчета временного шага, не воздействовал на включение клапана до следующего временного шага. Кроме того, поскольку симулятор и контроллер работали асинхронно, погрешность смещалась на протяжении всего временного шага. Результатом являлось, имевшее место в течение 50 мкс, «дрожание» импульса включения, вызывавшее нереальные гармоники и ограничение возможности симулятора при проверке функций, для которых требуются небольшие поправки угла включения (например, демпфирование подсинхронного резонанса с HVDC и управлением контуром постоянного тока для SVC). Усовершенствованный алгоритм использует функцию Меток Времени Цифровых Входов (DITS), которая позволяет в ходе временного шага точно определить момент подачи импульса включения. Информация DITS затем используется в усовершенствованном алгоритме для расчета поправки, применяемой к модели во время следующего шага.

Для схем с принудительной коммутацией, часто используемых в FACTS, для обеспечения быстрого реагирования при моделировании применяются другие методы. Первый прием, используемый для преобразователя напряжения (VSC), заключается в использовании двойного временного шага [3]. Стандартный временной шаг, порядка 50 мкс, используется для моделирования крупной энергосистемы, тогда как небольшой временной шаг, порядка 1–3 мкс, используется для представления модели VSC.

Две модели, связанные цифровым способом, аналогично используемому для связи моделей переменной состояния (например, модель синхронной машины d-q) при моделировании во временной области. Подход с использованием небольшого временного шага позволяет тестировать контроллеры импульсов включения для 3-уровневых VSC с частотой широтно-импульсной модуляции (ШИМ) до 2 кГц и 2-уровневых VSC с частотой ШИМ свыше 10 кГц. Такие схемы входят в состав STATCOM, ветровых генераторов с асинхронными машинами двойного питания, HVDC с принудительной коммутацией, схем запуска и т.д.

Были разработаны новые компоненты для изучения и тестирования элементов управления высокого уровня для схем HVDC с многомодульными преобразователями (MMC). Модели MMC в состоянии отображать свыше 600 уровней на плечо (1200 на фазу, 3600 на станцию). В настоящее время такие модели MMC реализуются на базе программируемой пользователем вентильной матрицы (ППВМ – FPGA), что позволяет преодолеть сложности при взаимном подключении физических элементов управления импульсов включения вследствие увеличения количества подмодулей MMC в преобразователе.

Детальные испытания физического оборудования управления MMC успешно осуществлялись многими производителями. В дополнение к тестированию эксплуатационных параметров физических контроллеров конкретного преобразователя проводились многочисленные исследования с использованием моделирования для оценки общего реагирования сети и взаимодействие элементов управления с другими системами LLC и/или MMC, которые находятся в том же окружении вблизи рассматриваемой схемы. Это важный и трудный для рассмотрения аспект при добавлении новых преобразователей HVDC в существующие сети, которые находятся в непосредственной близости к другим вставкам постоянного тока.

Цифровые симуляторы реального времени могут также применяться для тестирования элементов управления генератора, например, систем возбуждения, стабилизаторов энергосистемы, а также регуляторов частоты вращения. Время ввода этих устройств в эксплуатацию можно свести к минимуму вследствие использования симулятора для предварительной настройки контроллеров и ознакомления персонала с работой и наладкой нового оборудования, прежде чем оно будет использоваться в сети. Применение цифровых симуляторов также позволяет сэкономить ресурсы, поскольку при использовании симулятора не требуется энергия генератора.

Пол Форсайт, Рик Кюффель, Сиприан Питерс, RTDS Technologies

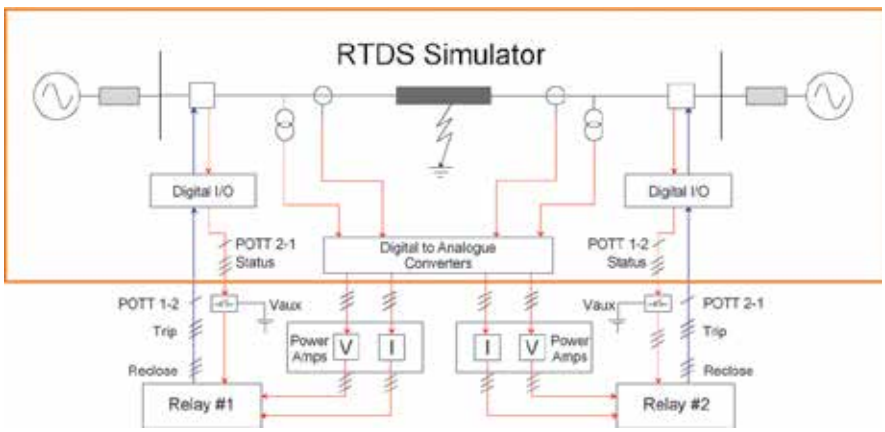

Рис. 1. Тестирование реле защиты в режиме замкнутого контура

Тестирование систем релейной защиты

Цифровые симуляторы реального времени представляют собой наиболее совершенное средство тестирования устройств РЗА. Тестирование может проводиться как в режиме открытого контура (т.е. воспроизведение сигналов с помощью файлов COMTRADE), так и в режиме замкнутого контура, но тестирование в режиме замкнутого контура имеет ряд важных преимуществ. Прежде всего, поскольку тестирование в режиме замкнутого контура должно выполняться и выполняется в реальном времени, на выполнение последовательности тестов требуется меньше времени, в сравнении с использованием COMNTRADE файлов. Во-вторых, работа в реальном масштабе времени позволяет нескольким устройствам защиты одновременно взаимодействовать с моделируемой сетью. Следовательно, это не единственный способ полностью протестировать и пронаблюдать за взаимодействием многочисленных реле (например, защита двухконцевой двухцепной линии включает в себя взаимодействие четырех реле).

При выполнении тестирования устройств РЗА в режиме замкнутого контура или, в сущности, любого тестирования в режиме замкнутого контура, цифровой симулятор реального времени отображает энергосистему. Симулятор обеспечивает подачу аналоговых сигналов низкого уровня либо непосредственно в тестируемое устройство, либо, как обычно при тестировании реле, через усилители. Указанные сигналы пропорциональны мгновенному значению отображаемого сигнала (например, напряжения, тока и т.д.). Усилители напряжения и тока используются для привязки аналоговых выходов низкого уровня симулятора ко вторичным значениям входных сигналов реле в процессе эксплуатации. Симулятор также снабжен выходными контактами. Рассмотренным образом реле получают информацию о состоянии выключателя с таким же оперативным напряжением постоянного тока, как и на станции. Поскольку в реле имеются все предусмотренные входы, их поведение не отличается от того, как если бы они были установлены в реальной сети. Если смоделированное повреждение возникает в защищаемой зоне, реле должно сработать. Для того, чтобы замкнуть контур тестирования, выходные контакты реле соединяются с симулятором для обеспечения сигналов отключения и, если это требуется, повторного включения. Возможно тестирование как схем однофазного, так и трехфазного отключения. На рисунке 1 показана основная схема тестирования защиты линии.

Поскольку в энергосистеме моделируются различные повреждения, включая развивающиеся КЗ и двойные замыкания на землю, можно создавать в контролируемых и воспроизводимых условиях все возможности для оценки эффективности системы защиты. Для того, чтобы автоматически запускать последовательности тестов, симулятор имеет встроенную функцию написания скриптов.

Скрипты для симулятора могут создаваться с использованием сочетания специальных команд симулятора и программирования на языке С. Вложенные циклы позволяют осуществлять полное и адаптивное тестирование с автоматическим проведением и документированием нескольких тысяч примеров.

Важно, чтобы симуляторы обеспечивали связь согласно стандарту IEC 61850 с испытательными устройствами, совместимыми с новым протоколом. Двунаправленные дискретные сигналы (сигналы отключения от реле и сигналы состояния в реле), а также сигналы выборочных значений (т.е. напряжение и ток с меткой времени) являются важными характеристиками симулятора, обеспечивающего полное тестирование устройств, совместимых с IEC 61850.

Разработка и тестирование противоаварийной автоматики

В последние годы специалисты-энергетики занимаются исследованием, разработкой и установкой устройств и систем противоаварийной автоматики. Во многих случаях эти устройства высокоэффективны и могут иметь определяющее воздействие на энергосистему, предотвращающее развитие аварии. Поэтому очень важно тщательно тестировать такие устройства в самых различных режимах энергосистемы прежде, чем они начнут активно использоваться. Симулятор реального времени является идеальным средством разработки и тестирования таких новых устройств.

Многие из предлагаемых устройств противоаварийной автоматики используют данные устройств измерения комплексных величин (PMU – Phasor Measurement Unit). Модели PMU были разработаны для цифровых симуляторов реального времени на базе IEEE C37.118. Таким образом, новые устройства можно всесторонне протестировать в реальных условиях сети. Если есть возможность представить большое количество моделей PMU, создается широкомасштабная модель системы глобального мониторинга (WAMS), и разрабатываются схемы противоаварийной автоматики.

Теоретически тестирование противоаварийной автоматики может осуществляться со всеми аппаратными средствами в контуре (HIL-тестирование), т.е. в этом случае все элементы физически подключаются к симулятору. Но реализация такого решения на практике во многих случаях оказывается весьма сложной. Для управления устройствами потребуется большое количество усилителей, а также входов/выходов, размер лаборатории также должен быть соответствующим и т.д. Поэтому желательно, чтобы некоторые устройства, воздействующие на цен-

тральную часть схемы, были включены в модель.

Поскольку некоторые или все PMU, задействованные в противоаварийной автоматике, подлежат имитационному моделированию, необходимо обеспечить механизм генерации потоков выходных данных согласно C37.118-2005 или C37.118-2-2011, для обмена данными с внешней схемой управления. Такие потоки данных соответствуют конкретному потоку Ethernet, определяемому стандартом. С учетом этого были разработаны специальные аппаратные и программные модули, обеспечивающие ряд потоков данных согласно C37.118-2005 или C37.118-2011 при гибком подходе к скорости передачи каждого потока данных.

В последнее время многие производители устройств РЗА добавили в свои устройства возможности обмена GOOSE-сообщениями согласно стандарту

IEC 61850, тем самым способствуя предоставлению данных от многочисленных устройств в центральную схему противоаварийной автоматики. Обмен GOOSE-сообщениями может применяться для обмена данными с другими устройствами, например, элементами управления генератором. Обмен GOOSE-сообщениями можно использовать для обмена как аналоговыми (с плавающей запятой), так и дискретными данными.

Однако необходимо отметить, что для противоаварийной автоматики может потребоваться информация от устройств разных производителей. Даже несмотря на то, что все устройства будут соответствовать стандарту IEC 61850, структура их GOOSE-сообщений может незначительно отличаться. Если такие устройства будут включены в имитационную модель, симулятор должен иметь возможность конфигурирования/интерпретирования GOOSE-сообщений, используемых разными производителями. По этой причине необходимо, чтобы конфигурация GOOSE-сообщений была опубликована и присвоена симулятору.

Рассматривая возможности реализации устройств противоаварийной автоматики, следует учитывать, что имеется реальная возможность использования информации, менее критичной ко времени, чем информация в системах SCADA в настоящее время. Следовательно, среда тестирования противоаварийной автоматики должна включать в себя возможность обмена данными с использованием типовых протоколов SCADA, например, DNP и IEC 60870-5-104. Оба протокола имеют возможность обмена как аналоговыми, так и дискретными данными. Упомянутые протоколы предназначены для передачи больших объемов данных, но с малыми частотами обновления.

Полномасштабное моделирование в реальном времени

Полномасштабное моделирование в реальном времени дает возможность энергокомпаниям получать более подробное представление о поведении сетей по сравнению со стандартным моделированием динамической устойчивости. Кроме того, моделирование электромагнитных переходных процессов в реальном времени обеспечивает гораздо более точную частотную характеристику сети (до 3 кГц), более точное и подробное представление оборудования (в отличие от аппроксимаций при номинальной частоте), обратную связь в реальном времени, а также возможность взаимосвязи физических устройств. Цифровые симуляторы реального времени часто используются компаниями для обучения операторов [4].

Используя при исследованиях подробные модели противоаварийной автоматики, можно получить более полное представление поведения сети. С помощью симуляторов реального времени, используя более полные и точные модели, можно проводить исследования даже в случае холодного пуска оборудования (из полностью обесточенного состояния).

Масштабные симуляторы реального времени применяются для изучения поведения активно-адаптивных сетей и возобновляемых источников энергии. Применение новых устройств существенно меняет способы защиты и управления энергосистем, что подлежит тщательному изучению. Новые модели для симулятора постоянно разрабатываются и усовершенствуются для того, чтобы отобразить постоянно меняющееся оборудование энергетических компаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За последние десятилетия цифровые симуляторы реального времени были значительно усовершенствованы и нашли широкое применение в промышленности. Все большее число энергетических компаний приобретают симуляторы реального времени для тестирования систем релейной защиты и противоаварийной автоматики в режиме замкнутого контура, а также для масштабного имитационного моделирования в реальном времени. Большой эффект от использования симуляторов реального времени может быть получен при исследовании новых технических решений, например, активно-адаптивных сетей, возобновляемых источников энергии и т. п.

ЛИТЕРАТУРА

1. *H. W. Dommel,* «Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single- and Multiphase Networks», IEEE trans. On power apparatus and systems, vol. Pas-88, no. 4, pp. 388–399, April 1969.

2. *K. Bergmann, K. Braun,* et. al., “Advanced Fully Digital TCSC Real-Time Simulation in Comparison with Computer Studies and On-Site Testing”, in Proc. Icds ’99, Västerås Sweden, May 1999.

3. *T. Maguire, j. Giesbrecht,* “Small Time-step (< 2μSec) VSC Model for the Real Time Digital Simulator”, in Proc. Ipst 2005, Montreal Canada, June 2005, paper no. I pst 05-168-25c.

4. *St Cha, Tk Kim*, et. al., “Development of a Training Simulator for Power System Operation”, in Proc. WMSCI 2006, Orlando USA, July 2006.