Краткая история моделирования в реальном времени энергетических систем

Моделирование энергосистем и их вторичного оборудования в реальном времени – общепризнанный и востребованный метод исследования энергосистем, оптимизации их функционирования, анализа работоспособности, обучения и т.д. Технологии устройств моделирования все время меняются и совершенствуются с развитием технических средств, используемых нами. Цель статьи – наиболее полное представление развития данной специфической ниши электроэнергетических систем.

Автор
Законышек Я.

В результате воздействия различных факторов современные энергосистемы становятся все более сложными, что во многом связано с необходимостью учета экономических и экологических аспектов

С этой точки зрения, внедрение новых технологий – необходимое условие прогресса, начиная, например, с применения управляемых силовых электронных устройств в сетях переменного и постоянного тока, а также использование других элементов FACTS (гибкая система передачи переменного тока). Нельзя забывать и о так называемых технологиях активно-адаптивных сетей.

Все элементы и системы, как правило, способствует повышению устойчивости системы, однако без их надежного функционирования энергосистема может стать неустойчивой.

Экологические требования стали причиной внедрения нетрадиционных источников энергии, например, генерирование энергии с помощью ветра и фотоэлектричества в существующих и новых энергосистемах. Такие элементы оказывают значительное влияние на работу существующих энергосистем на уровне распределения и передачи:

- в распределительных сетях применяется распределенная генерация, которая оказывает сильное воздействие не только на функционирование энергосистем в целом, но и на функционирование их вторичных систем (защиты, автоматики и управления);
- крупные ветряные электростанции (наземные и морские), мощные фотоэлектрические установки требуют значительных изменений существующих систем переменного тока, в некоторых случаях с использованием новых параллельных вставок постоянного тока. Кроме того, в настоящее время идет серьезное обсуждение возможности создания сетей постоянного тока, чего до настоящего времени не наблюдалось нигде в мире.

Все эти изменения в первичных энергосистемах требуют нового, более комплексного подхода к соответствующим вторичным системам. Это касается релейной защиты, автоматики и управления энергосистемами в обычных и аварийных режимах работы. При этом нельзя забывать о том, что должна обеспечиваться возможность быстродействующего управления современными силовыми электронными устройствами, гораздо более оперативного по сравнению с традиционным силовым оборудованием.

В связи с этим, требования, предъявляемые к таким устройствам в отношении надежности несрабатывания и надежности срабатывания, должны быть более высокими, время их срабатывания (быстродействия) должно быть меньше, а обнаружение аварийных режимов должно осуществляться гораздо быстрее, чем когда-либо ранее.

Цели и требования, сформулированные выше, требуют разработки и тестирования новых систем, которые пока не эксплуатируются. Кроме того, контроль над их эксплуатацией и анализ работоспособности во время различных системных событий требуют быстродействующих методов. Одним из наиболее значимых состав-

Рис. 1. Участок Центра управления аналогового симулятора в НИИПТ

Рис. 2. Машинный зал аналогового симулятора в НИИПТ

ляющих во всей этой работе является сокращение времени на изучение новых решений в связи с жесткими экономическими условиями, а также с возрастающей потребностью модернизации энергосистем.

Один из способов обеспечения наиболее оперативной разработки и тестирования с сохранением высокого качества выполняемой работы – использование так называемого моделирования энергосистемы в реальном времени (Real Time Digital Simulation).

Рис. 3. Сертификационные испытания реле защиты разных производителей для будущей защиты линии 750 кВ в CEPRI, Китай, февраль 2005 года

НЕКОТОРЫЕ ФАКТЫ ОБ ИСТОРИИ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ

Одну из первых моделей энергосистемы «в реальном времени» создал Томас Алва Эдиссон (Thomas Alva Edison) в своей лаборатории в Менло-Парк, штат Нью-Йорк. Это была своего рода модель его первой большой энергосистемы, сегодня известная как Станция Перл-Стрит (1882) в Нью-Йорке. Разработка продолжалась, как известно, в направлении энергосистем переменного тока, и по мере их роста модели становились все больше и сложнее. Электромеханические модели использовались в течение продолжительного времени и даже сегодня во многих случаях некоторые из них хорошо справляются со своими задачами.

Электромеханические аналоговые симуляторы

С определенностью можно сказать, что самый крупный (и сохранившийся до сих пор в работоспособном состоянии) электромеханический симулятор энергосистем находится в Санкт-Петербурге, Россия, в «Научно-техническом центре ЕЭС России», ранее известном как «НИИПТ».

Институт был основан в 1945 году как научно-исследовательский центр по передаче электроэнергии постоянным током высокого напряжения. Институт и созданная в нем модель, несомненно, внесли свой вклад в развитие системы электропередачи высокого напряжения на постоянном токе и систем переменного тока (750 кВ и 1150 кВ) ультравысокого напряжения.

Один из интересных подходов к использованию симуляторов энергосистем был разработан в начале девяностых годов прошлого столетия в Китае. Довольно большой аналоговый симулятор был создан в Институте энергетических исследований Китая (CEPRI) в Пекине. Энергетическое управление Китая сформулировало минимальные требования к функционированию (например) реле защиты, с учетом ожиданий и предложений разных производителей, для различных уровней напряжения энергосистемы Китая. Требования были едиными для всех потенциальных предприятий-поставщиков при условии выполнения всех без исключения заранее заданных тестов. Это было первым шагом к возможности участвовать в выставлении проектов на торги. Разработка симулятора последовало за развитием Китайской энергосистемы, таким образом, были созданы модели для линий 750 кВ и 1000 кВ, соответственно.

Статические (электронные) аналоговые симуляторы

Внедрение электронных (статических) технологий и появление первых компьютеров повлияло также на создание

Законьшек Я., ЗАО «ЭнЛАБ»

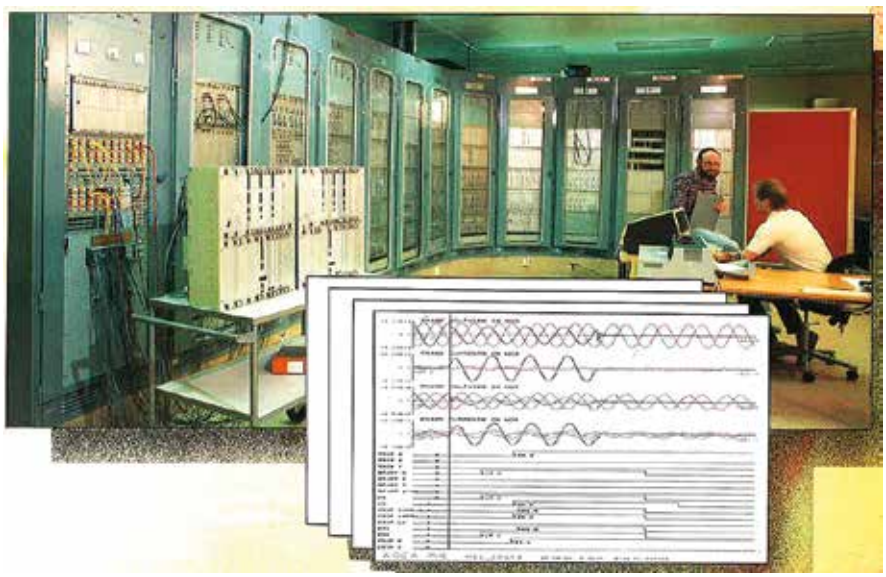
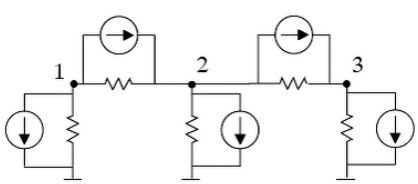


Рис. 4. Выдержка из брошюры с описанием статического (электронного) симулятора производства компании ASEA Relays, Швеция



$$\begin{bmatrix} V1 \\ V2 \\ V3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G11 & G12 & G13 \\ G21 & G22 & G23 \\ G31 & G32 & G33 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} I1 \\ I2 \\ I3 \end{bmatrix}$$

Рис. 5. Эквивалентная сеть, состоящая только из источников тока и резисторов с соответствующей матрицей проводимостей

моделей энергосистем. Интересным примером, в этом смысле, может стать аналоговый электронный симулятор энергосистемы, разработанный в конце семидесятых и начале восьмидесятых годов прошлого столетия компанией ASEA Relays (ныне ABB) в Швеции. Сама модель была создана на основе аналоговых электронных компонентов, а его работа, конфигурация, уставки и сбор данных контролировались при помощи пяти компьютеров и четырех операторов. Ее работа была основана на компонентах Кларке, что определило уникальность модели такого рода во всем мире. Здесь можно было также встретить мощные усилители тока и напряжения, которые обеспечивали подачу на тестируемые реле реальных напряжений и токов системы до 280 А.

Необходимо помнить о том, что данный симулятор использовался для дальнейшего совершенствования наиболее быстродействующей до настоящего времени защиты линии в мире, тип RALDA, быстродействие которой составляет менее 5 мс, включая (статические) выходные реле и передачу данных между двумя концами линии. Интересным представляется тот факт, как разработчики защищали свой выбор технического решения. Цитата из брошюры: «Для получения истинной картины происходящего в сети, моделирование должно выполняться в реальном времени с использованием чрезвычайно быстрых аналоговых цепей. Прямое цифровое моделирование будет слишком медленным для получения достоверных результатов тестирования».

Цифровое решение для моделирования электромагнитных переходных процессов

Уже в 1969 году Герман Доммель опубликовал свою знаменитую работу Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single-and Multiphase Networks [1]. Это был поистине революционный шаг в цифровом (компьютерном) моделировании (в реальном и не в реальном времени) электромагнитных переходных процессов в энергосистемах. Появилась возможность перехода от электромеханических и статических моделей к цифровым, что позволило увеличить частоту различных событий, наблюдаемых в энергосистеме.

Основная идея алгоритма Доммеля является идеальной для компьютерного вычисления:

- преобразовать задаваемую пользователем энергосистему в эквивалентную сеть, состоящую только из источников тока и резисторов (рис. 5);
- сформулировать матрицу проводимостей для эквивалентной сети (рис. 5);
- используя данные предыдущего временного шага (или исходные условия для первого временного шага), рассчитать новые значения для токов [I];
- найти напряжения [V], используя новые значения тока [I];
- рассчитать токи в ответвлении, используя новые значения напряжения [V] и тока [I];
- повторить шаги 3–5.

Важным требованием в этом случае является значение выбранного временного шага, который должен быть намного меньше цикла максимальной частоты, ожидаемой в пределах моделируемого переходного процесса.

ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Время, необходимое для полного цифрового расчета, зависит от различных факторов, например: размера моделируемой энергосистемы, характеристик анализируемых переходных процессов, числа точек наблюдения и, наконец, в большой степени, от производительности используемого компьютера (компьютеров). В общем, существует две возможности:

- время вычисления каждого временного интервала превышает время, необходимое для смоделированного процесса на самом деле, таким образом, моделирование в целом может занимать несколько секунд или даже минут. Такого рода моделирование осуществляется в автономном режиме и называется автономным или независимым моделированием. Результаты обычно сохраняются в файлах (например, в формате Comtrade) и отображаются графически в виде временных диаграмм для последующего анализа или воспроизведения на специальном ис-

пытательном оборудовании и аналоговых усилителях непосредственно в тестируемое оборудование;

- время вычисления равно или меньше каждого временного шага в моделируемом процессе. Таким образом, результат каждого временного шага доступен в оперативном режиме в реальном времени, как если бы процесс запускался в естественной среде в реальной энергосистеме. Результат также можно сохранить в файлах и просмотреть позднее в графическом виде или воспроизвести различными способами, но самым большим преимуществом моделирования в реальном времени является возможность объединения в замкнутый цикл различного аппаратного обеспечения (например, реле защиты или различные контроллеры) и изучения его функционирования, как если бы данное аппаратное обеспечение было установлено непосредственно в реальной энергосистеме. Такой вид моделирования называется цифровым моделированием замкнутого цикла в реальном времени (CLRTDS) и очень часто мы слышим также выражение «Моделирование с аппаратными средствами в контуре» (HIL-моделирование). Одно из важных требований, предъявляемых к данному виду моделирования – строгий контроль временных шагов на протяжении всего времени в заданных пределах, в противном случае полученные результаты рискуют оказаться недостоверными.

Каждый метод имеет свои преимущества и недостатки. Моделирование не в реальном времени не требует высокопроизводительных компьютеров, сохраненные файлы можно позднее воспроизвести на испытательном оборудовании, используя различные промежуточные аппаратные средства (например, усилители тока и напряжения, когда речь идет о проверке защиты). Недостатком является то, что нет возможности проанализировать непосредственный отклик смоделированной системы на определенные воздействия со стороны испытательного оборудования во время конкретного события. С другой стороны, автономное моделирование дает возможность проанализировать чрезвычайно быстрые переходные процессы, которые невозможно смоделировать сегодня (вследствие очень коротких временных интервалов) даже с использованием самых лучших компьютеров.

СОВРЕМЕННОЕ ПРИМЕНЕНИЕ ЦИФРОВОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ЗАМКНУТОГО ЦИКЛА В РЕАЛЬНОМ ВРЕМЕНИ

Цифровое моделирование в реальном времени современных электроэнергетических систем становится неотъемлемой частью нашей повседневной исследовательской деятельности. Невозможно представить разработку современных преобразователей напряжения (VSC) или даже многомодульных преобразователей без использования данного метода. Оптимизация (задание) уставок устройств защиты комплексных линии в современных сетях без цифрового моделирования невозможна или представляет собой, по крайней мере, чрезвычайно трудоемкий процесс.

Ниже перечислены некоторые наиболее важные сферы применения цифрового моделирования энергосистем в реальном времени:

1. Релейная защита (традиционная и на базе стандарта МЭК 61850) и автоматика энергосистем
2. Управление напряжением и частотой источников питания, а именно:
   a. Традиционные силовые генераторы;
   b. Ветряные электростанции, в частности генераторы, а также станции в целом;
   c. Производство электроэнергии фотоэлектрическими установками;
   d. Когенерация и т.д.
3. Противоаварийная автоматика (SIPS)
4. Управление в области силовой электроники, например:
   a. Установки высоковольтной вставки постоянного тока (HVDC) имеют в своей основе классические тиристорные схемы с использованием алгоритмов зажигания (отпирания) или 2-, 3- и многоуровневые схемы на базе преобразователей напряжения с использованием подсетей с небольшими интервалами времени;
   b. Статический компенсатор реактивной мощности (SVC);
   c. Тиристорно-управляемая продольная компенсация (TCSC);
   d. STATCOM с 2-, 3- и многоуровневыми схемами на базе преобразователей напряжения с использованием подсетей с небольшими интервалами времени и т.д.
5. Активно-адаптивные сети и распределенная генерация
6. Крупномасштабное моделирование в реальном времени для создания моделей крупных энергосистем
7. Исследование пуска электростанций из полностью обесточенного состояния
8. Обучение и профессиональная подготовка
9. Проверка силовой аппаратуры в контуре, а также и многое другое.

Можно ожидать, что с развитием цифровых компьютерных технологий будут развиваться и цифровые модели энергосистем в реальном времени, а моделируемые системы будут увеличиваться в объемах.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Dommel H.W.* “Digital Computer Solution of Electromagnetic Transients in Single-and Multiphase Networks”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, April 1969.
2. *Chen H,* et all ”Integration of RTDS with RPG Synchrophasor Applications and Analysis of Simulation Scenarios at Southern California Edison”, North America Power Symposium (NAPS) 2012, 9–11 September 2012.
3. *Cha S.-T.* et all “Development of a Training Simulator for Power System Operation”, WMSCI 2006, July 15–19, Orlando, USA.
4. *Kotsampopoulos P.* et all “Design, development and operation of a PHIL environment for Distributed Energy Resources”, 38 Annual Conference of the IEEE Industrial Electronic Society, October 25-28, Montreal, Canada.
5. *Qi D.* “Defense Schema Against Large Disturbances in China Southern Power Grid”, Large Disturbance Workshop of CIGRE 2010, Paris, 2010.
6. *Rigby B.S.* “Undergraduate Laboratory Examples for the RTDSTM Real-Time Digital Simulator”, RTDS Technologies Inc. documentation.
7. *Lundqvist B.* “100 years of relay protection, the Swedish ABB Relay history”.
8. Old ASEA Relays brochure from 1985. ”The ASEA Relays power system simulator can provide you with many years of operation experience – in just a couple of weeks”.