

ВИЗУАЛИЗАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Э. Хиллиард, Дж. Мартинелли (Компания ABB)

Рассмотрена инновационная система визуализации электрических сетей, базирующаяся на стандартной теории графов с визуальным форматированием, контролируруемыми точками и средствами навигации. Система визуализации предназначена для мониторинга и поддержания в актуальном состоянии модели оценки состояния сети, но может использоваться и для визуализации других приложений в области электроэнергетики.

Ключевые слова: модель, электрические сети, визуализация, мониторинг, диагностика, оценка состояния сети, теория графов.

Введение

Требования к современным электрическим сетям значительно отличаются от тех, что существовали раньше. Традиционные электрические сети формировались вокруг крупных электростанций. Подача электроэнергии осуществлялась вполне предсказуемым образом в одном направлении. Несмотря на колебания потребления в зависимости от времени суток, работа сети поддерживалась за счет тщательного контроля каждого её участка. Современные электрические сети должны обеспечивать торговлю электроэнергией, то есть обмен ею между соседними энергосистемами, а также быть совместимыми с электростанциями, использующими альтернативные источники энергии, производительность которых непостоянна. Системы передачи и распределения электроэнергии должны иметь возможности прогнозирования своего состояния и предоставлять операторам полную информацию, позволяющую осуществлять детальный контроль и быстрое реагирование на отклонения в работе энергосистем. Недостаточная информированность о состоянии сетей привела к тому, что во время произошедших в 2003 г. в Канаде, США и Европе аварийных отключений энергетические компании не смогли быстро ликвидировать их последствия, поскольку не обладали достаточными сведениями о масштабе повреждений. Экономические и социальные последствия массовых отключений электроэнергии ясно продемонстрировали, насколько необходимы системы контроля за состоянием электрических сетей. В связи с этим регулирующие органы теперь требуют, чтобы операторы передающих сетей следили за сетями, с которыми они взаимодействуют, а не только за своими собственными [1].

Разработанное компанией ABB решение Ability™ Network Manager (NM) объединяет системы диспетчерского управления и сбора данных (SCADA) и управления электроснабжением (EMS), чтобы удовлетворить потребности клиентов в области мониторинга и диагностики электросетей.

Ядром EMS является модуль оценки состояния сети State Estimator (SE), который за счет информации от SCADA поддерживает в актуальном состоянии модель полной электрической сети заказчика, включая генераторы, трансформаторы, цепи передачи электроэнергии и т.д. Прогнозирующая модель SE работает в режиме реального времени, позволяя восстанавливать зашумленные или отсутствующие данные, что облегчает распознавание и принятие решений как для операторов, так и для приложений EMS.

Сопровождение модуля SE

Модуль SE должен работать в изменяющихся условиях. Со временем сетевое оборудование модернизируется или заменяется, изменяется сетевая топология, но качество оценки состояния сети должно оставаться неизменным. Это особенно проблематично, если отклонения в модели сочетаются с поврежденными телеметрическими данными или последствиями кибератак. В этих случаях модуль SE может оказаться не в состоянии выдавать требуемую достоверную информацию по всей сети или какой-либо ее части, что приведет к ухудшению автоматического мониторинга и анализа непредвиденных обстоятельств. Подобные сбои лишают инженеров инструментария, информирующего о ситуации и проблемах энергосистемы.

Кроме того, требование регулирующих органов контролировать состояние сопряженных сетей может вносить ошибки в модель данной сети. Например, большинство из 113 отключений модуля SE, которые произошли в восточной части Северной Америки в период 2013...2017 гг., были вызваны проблемами в области моделирования или связи [2].

Ввод в эксплуатацию и мониторинг состояния уже самого модуля SE для обеспечения надежности его функционирования является дорогостоящим и трудоемким. В настоящее время на мониторах SE отображаются входные данные и результаты анализа в цифровом и табличном виде. Информация, отображаемая на дисплее, предназначена для опытных экспертов по настройке сети, которых мало и которые пользуются большим спросом. Такой дизайн сложен для неспециалистов; требует знания предметной области и препятствует повседневному проведению мониторинга и диагностики состояния модели, например, коммунальными предприятиями.

Для исправления данной проблемы ABB разработала инновационные методы визуализации, призванные помочь простым инженерам эффективно контролировать состояние и диагностику модели SE.

В 2018 г. ABB инициировала исследовательский проект, призванный выявить в SE проблемы несоответствия между моделью и данными. Было решено разработать интуитивно понятный интерфейс в помощь и экспертам, и неспециалистам в предметной области. Средства визуализации должны помочь разобраться в возможных проблемах, путем:

- точного определения неисправных средств телеметрии или измерений для блокировки ошибочных данных;
- поиска устаревших аспектов модели;

- оценки качества настройки модели и поиска вариантов ее улучшения.

ABB проверила качество разработанных средств визуализации посредством интервью с экспертами ABB, а также путем проведения внешних тестирований у клиентов (два в Европе и два в Северной Америке).

Графическое представление электрических сетей

Для создания удобных средств визуальной аналитики, наилучшим образом подходящих для диагностики SE, команда разработчиков проанализировала традиционные подходы к отображению электрической сети [3]: географическое и схематическое представление сетей передачи данных [1].

Электрораспределительные компании направляют ремонтные бригады на места и устраняют физические повреждения оборудования. Географическое представление показывает физическое местоположение активов, их легко интерпретировать, и поэтому они хорошо подходят для этих задач (навигация по непрерывному плану с функциями масштабирования). Однако физическое местоположение не имеет отношения к функциональности модели SE.

Схематические представления показывают логические электрические соединения сетевых цепей и оборудования, поэтому являются стандартными для передающих компаний. Стиль схематического представления более абстрактен, чем географический вид: он отображает шину электропередачи в виде прямых линий, вдоль которых дискретными шагами осуществляется навигация. Принципиальное значение для планирования работ передающих компаний состоит в том, что схематический вид позволяет операторам сети легко определить все возможные соединения, которые могут быть использованы для реализации включений/выключений и переключений участков сети. Однако модуль SE владеет только текущей ситуацией: незначительное визуальное изменение на схеме может оказать серьезное влияние на модель SE, например, замыкание выключателя.

Таким образом, методы работы, принятые в распределительных сетях или сетях электропередачи не применимы для подстройки модели SE, следовательно требуется разработать новый подход. Основываясь на традиционных методах визуализации, принятых в электроэнергетике [4], ABB предложила новый абстрактный, интуитивно понятный подход, основанный на стандартной теории графов с визуальным форматированием, контролируруемыми точками и средствами навигации (рисунок) [5].

Сегодня сетевые графы не являются новостью, они успешно используются для аналитики во многих областях, например, в социальных науках, логистике и т. д. Новизна разработки ABB заключается в применении сетевых графов для визуализации в области электроэнергетики.

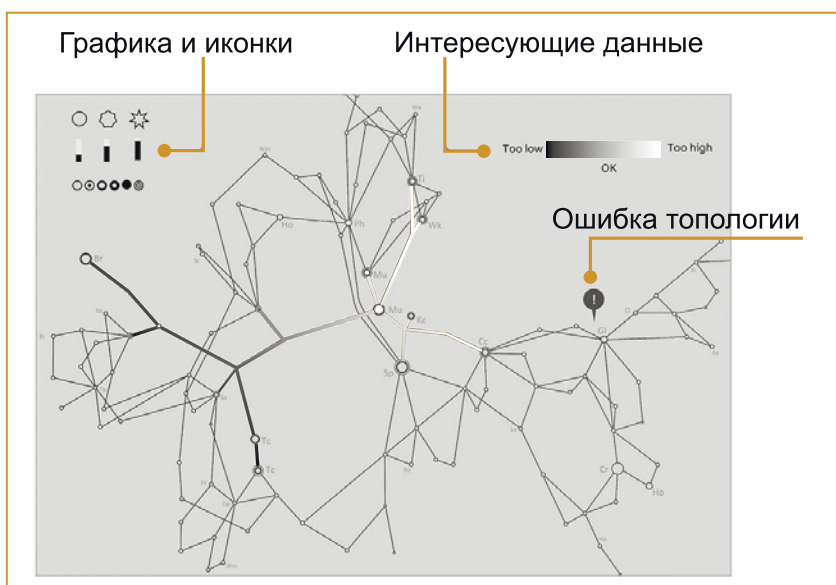
Эволюция дизайна

Поскольку визуальная схема, отражающая работоспособность модели SE, должна масштабироваться, чтобы быть применимой для крупных сетевых моделей, был выбран минималистический графический дизайн, оставляющий больше пространства для данных и «глобального» стиля визуальных эффектов, который отражает общие свойства сети и модели.

ABB использовала особенности базового построения сетевого графа: круги (узлы) в виде станций и линии (ребра), представляющие электрические цепи. Были использованы три основных визуальных фактора: размер узла, ширина и длина линии. Размеры узлов соответствуют объемам электроэнергии, вырабатываемой станцией, или электроэнергии, потребляемой нагрузкой. Таким образом, большие круги обозначают важные объекты: либо большие генераторы, либо большие нагрузки, например, города. Меньшие круги представляют собой самодостаточные города или станции электропередачи. Ширина линии отображает емкость цепи или уровень напряжения; более толстая линия обозначает более высокую номинальную мощность. Этот стиль отличает сильные цепи от слабых и визуально отделяет сети разных уровней напряжения [2, 3].

Как правило, длина линии соответствует расстоянию в км, но, поскольку расстояние не имеет непосредственного отношения к модели SE, длина линии определяется с использованием производного от импеданса масштаба передачи полезной мощности [4]. Следовательно, длина линии поддерживает визуальную метафору "мощность движется по прямым линиям", что приводит к наименьшему искажению сетевой структуры [4]. Кроме того, данное графическое представление помогает визуализировать "путь наименьшего сопротивления" и лежащую в его основе электрическую модель. Более длинные линии представляют собой менее прямые пути потока энергии [3, 4].

Жизненно важные границы в модели SE (например, между сетью клиента и соседними сетями или между



Визуализация электрических сетей на основе теории графов

тем, что является «наблюдаемым» и «ненаблюдаемым») визуализируются путем небольшого увеличения длины линии для создания пустого пространства, таким образом формируя отдельные области.

В результате получается наглядное представление о том, как SE видит текущую конфигурацию сети: как мощность передается от больших генераторов к большим нагрузкам, и какие характеристики этого потока учитываются в модели SE [3, 4].

Преимущества визуализации

На визуальное представление электросети могут повлиять многие проблемы. Непротиворечивость и согласованность обозначений, принятых на схеме, помогает избежать недоразумений, способных привести к опасностям. Поэтому ABB разрабатывает сетевой дизайн для обслуживающего персонала модели EMS SE (ИТ-инженеров или инженеров-электриков) в дополнение к традиционным представлениям сети [2].

Еще одним препятствием для внедрения нового подхода является риск дезориентации пользователя. Для устранения этого в схеме используются обычные конструктивные особенности, например, ориентация на север, на запад, влево. График очищен от переизбытка элементов путем объединения вспомогательных соединений и сегментов внутри основной цепи и постепенного отображения текстовых меток [3]. Для небольших станций это достигается с помощью функции увеличения. Контролируемые объекты, как и группы линий в системном рабочем пределе (SOL), представлены отдельными визуальными изображениями, например, «карман» нагрузки в городе обозначен как граничный круг (SOL описывает предел общего потока мощности на электрических цепях, который пересекает граничный круг).

Сетевые объекты, характеризующиеся одинаковым напряжением, помещаются в соответствующие визуальные слои, которые можно выдвигать на передний план для изучения, в то время как остальная часть сети присутствует в качестве фона. В случае обнаружения ошибки в модели система предлагает пользователю перейти к проблемному слою сети, а не отображает все детали объекта.

Узнаваемые визуальные функции позволяют пользователям применять свои знания и опыт для управления и поиска отклонений в сетевых представлениях. Ориентированный на пользователя дизайн помогает инженерам SE своевременно диагностировать несоответствие модели сети.

Интерпретация цветовой информации

Система визуализации успешно работает в черно-белом режиме, но цвет можно использовать для представления индикаторов состояния модели SE [4]. Это ключ к пониманию качества модели SE.

Непрерывные цветовые шкалы отображают аналоговые данные, например, значения времени сходимости мо-

дели. Увеличение яркости призвано привлечь внимание к области модели, в которой прогнозируется отклонение. Одновременно могут отображаться дискретные индикаторы, например, обнаруженная неверная топология, с помощью всплывающих подсказок [4,5].

По результатам апробации предложенного подхода у клиентов компания ABB расширила возможности системы, например, добавились анимированные трассы потока частиц, которые демонстрируют потоки активной или реактивной мощности [5].

Заключение

Система визуализации электросетей может использоваться не только для целей мониторинга и диагностики модели SE, но и для других приложений. Например, могут быть визуализированы последствия непредвиденных ситуаций с наибольшим риском; или визуальное представление сети после сбоя может отображаться вместе с последующим разбросом перегрузки.

Возможность быстро и легко оценивать запросы визуально поможет операторам эффективно поддерживать надежность и безопасность электросетей. Кроме того, те же функции, которые необходимы для мониторинга SE, помогут специалистам по вводу в эксплуатацию настроить модель, продемонстрировать приемочные испытания и обучить персонал заказчика.

Модуль SE сегодня используется, но его модель требует постоянной настройки с участием экспертов и редко поддерживается в актуальном состоянии. Однако продолжающаяся энергетическая революция, несомненно, актуализирует потребность в большей ситуационной осведомленности о системах электросетей. Следовательно, больше усилий будет уделено развитию и расширению модели SE. Текущий рост использования возобновляемых источников энергии является потенциальным драйвером в этом процессе. Усовершенствования в инфраструктуре и системах управления позволяют применять SE на сбалансированном рынке сетей, то есть на рынке высокого и среднего напряжения, и подготавливают выход на рынок низкого напряжения.

Список литературы

1. Lessons Learned: External Model Data Causing State Estimator to not Converge. NERC. 2018. June 5.
2. Risks and Mitigations for Losing EMS Function. NERC. 2017. December 12.
3. Hilliard A., Tran F., Jamieson G.A. and Greg A. Work Domain Analysis of Power Grid Operations. In Cognitive Work Analysis: Applications, Extensions and Future Directions. 2017, pp. 149-170.
4. Cuffe P. and Keane A. Visualizing the Electrical Structure of Power Systems // IEEE Systems Journal. 2017, 11(3), pp. 1810-1821.
5. Mikkelsen C., Johansson J. and Cooper M. Visualization of Power System Data on Situation Overview Displays. 2012. pp. 119-126.

*Энтони Хиллиард — специалист ABB «Решения для автоматизации»,
Джузеппе Мартинелли — специалист ABB «Управление электросетями», Вестерос, Швеция.
E-mail: antony.hilliard@se.abb.com, giuseppe.martinelli@se.abb.com*