КОМПЛЕКС ОЦЕНКИ ОГРАНИЧЕНИЙ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ С УЧЕТОМ КРАТКОСРОЧНОГО ПРОГНОЗИРОВАНИЯ - SUMO

Г. ЛАКОТА, Я. КОСМАЧ*, Я. КОСТЕВЦ*, А. СОВЕНТ†, Т. ФАТУР
Solvera Lynx d.o.o., ELES d.o.o.*, Elektroinstitut Milan Vidmar†
Словения
gasper.lakota@solvera-lynx.com

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА

Оценка ограничений пропускной способности, динамическая пропускная способность.

1 ВВЕДЕНИЕ

Для того чтобы обеспечить безопасную и устойчивую работу системного оператора по управлению энергосистемой, ему необходимо в любой момент времени владеть информацией о пропускной способности энергосети. Такие пределы (именуемые также номинальными значениями) представляют собой максимально допустимые потоки мощности, протекающие через какой-либо элемент сети электропередачи, например, линии электропередачи, кабели и трансформаторы. Поскольку большинство элементов сети электропередачи расположены на открытом воздухе, самым важным фактором в установлении их пределов является погодные условия в момент наблюдения. Как правило, предельные значения устанавливаются как статические величины и основаны на достаточно консервативных предположениях параметров погодных условий. В ходе исследований [1],[2] было установлено, что в большинстве случаев повседневного управления энергосистемой метеорологическая ситуация позволяет учитывает динамически рассчитанные параметры, которые выше традиционно задаваемых - статических. Теоретически, при этом достигается более эффективное использование существующей сети. При этом необходимо отметить, что в некоторых случаях динамически рассчитанные параметры могут быть ниже статических, а значит при управлении энергосетью, в основе которой лежат динамически рассчитанные параметры, необходимо учитывать такие случаи.

Упомянутые выше причины послужили основанием для разработки комплекса для оценки в режиме реального времени и краткосрочное прогнозирование ограничений пропускной способности энергосистемы – SUMO. Комплекс SUMO выполняет две задачи: с одной стороны, повышение надежности и безопасности эксплуатации сети, особенно в случае резкого повышения потоков мощности, т.е. предотвращение нежелательных сбросов нагрузки или дорогостоящих операций редиспетчеризации; во-вторых, более оптимального использования существующей инфраструктуры системы электропередачи, особенно при возникновении сложностей с пуско-наладкой новых линий электропередачи, в основном по причине роста осведомлённости о состоянии окружающей среды в развитых странах.

Новизна комплекса SUMO заключается в рассмотрении проблемы определения ограничений пропускной способности (номинальных значений) с точки зрения энергосистемы в целом. Для работы в реальном масштабе времени комплекс SUMO включает в себя

оперативные данные энергосистемы (данные об измерениях и топологии сети, полученные из системы SCADA), оперативная информация о погодных условиях и анализ надежности в реальном времени. Для выполнения кратковременного прогноза комплекс SUMO включает возможность расчетов потокораспределения нагрузок на базе прогнозов нагрузок, анализов надежности на базе таких прогнозов и подробных прогнозов погодных условий. Система выполнена таким образом, что за выполнение каждой задачи отвечает отдельная подсистема. Для обеспечения обмена данными между подсистемами реализована платформа интеграции и обмена данными SUMO BUS.

Неопределенность алгоритмов, отвечающих за расчет номинальных значений, непрерывно оценивается при помощи внешнего испытательного стенда, изготовленного по техническим условиям заказчика. Первые результаты показали, что стандартные алгоритмы расчета динамической устойчивости линии, слишком консервативны и требуют пересмотра и доработки.

Комплекс SUMO был установлен для оптимизации эксплуатации и управления сети линий электропередачи в энергосистеме Словении, управляемой национальным системным оператором Словении – компаний ELES. При этом были проведены дополнительные испытания на объекте, способствующие совершенствованию и адаптации комплекса SUMO к повседневной работе системного оператора. Система разработана электротехнический институтом имени Милана Видмара в сотрудничестве с компанией ELES и электротехническим факультетом Университета г. Любляна; для дальней интеграции комплекса SUMO к данному консорциуму подключился провайдер управления электроэнергией Solvera Lynx.

Принимая во внимание положительные результаты применения системы SUMO в настоящее время, системные операторы могут интегрировать ее в работающие системы сети электропередачи, что будет в значительной степени способствовать повышению эффективности в неблагоприятных режимах эксплуатации энергосистем, например, нештатные ситуации, сложные погодные условия и резкие изменения потоков мощности, протекающих через энергосеть. Это приведет к более устойчивой и безопасной эксплуатации энергетической сети.

2 НАГРУЗКА ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Согласно новой методике планирования для линий электропередачи задается предел термической стойкости выбранного проводника. Например, номинал термической стойкости проводника ACSR 240/40 составляет порядка 640 Ампер. Это номинальное значение в дальнейшем используется при работе в качестве максимально допустимого тока, протекающего через проводник. Это значение основано на погодных условиях, так называемом «наиболее неблагоприятный сценарий» и задается при следующих значениях: скорость ветра 0,6 м/с, мощность солнечного излучения 900 Вт/м^2, температура окружающей среды 35°C. Например, в Словении имеется небольшой период времени с наихудшими погодными условиями, (а именно, когда одновременно температура выше 35°C, солнечная радиация превышает 900 Вт/м^2 , а скорость ветра ниже 0,6 м/с). Это позволяет судить о том, что в течение большей части времени метеорологические условия более благоприятны, с точки зрения повышения предела термической стойкости. На рисунке 1 представлены результаты, полученные на воздушной линии электропередачи 110 кВ, выбранной для сравнения различных методов динамического определения предела термической стойкости линий.

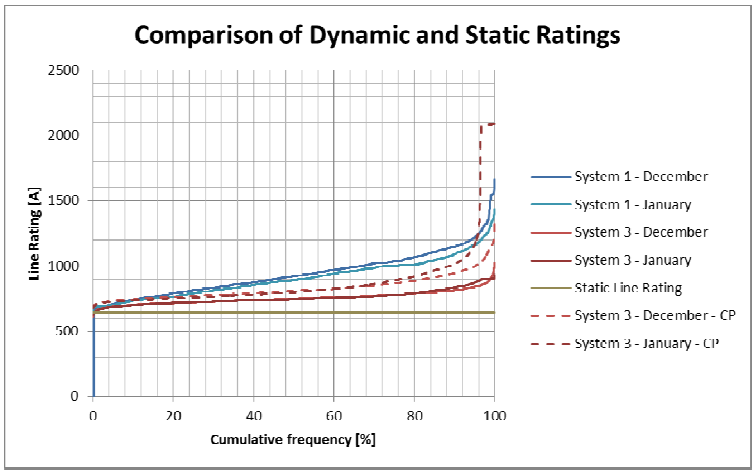

Рисунок 1: Сравнение статических и динамических пределов (метод CIGRE)

3 АРХИТЕКТУРА КОМПЛЕКСА SUMO

Комплекс SUMO является эффективным и полезным инструментом управления энергосистемой, объединяющий несколько подсистем.

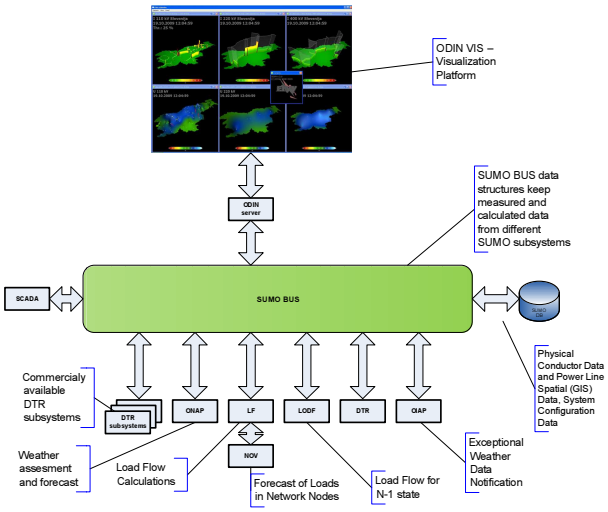

Рисунок 1: Архитектура комплекса SUMO

Комплекс включает в себя следующие функции (Рисунок 1):

- *Измерения (Measurements)*: значения токов от системы SCADA, измеренные данные от метеостанций, данные метеонаблюдений с координатной привязкой, применяемые к микролокациям с использованием модели погодных условий и данных о местности (OIAP),
- *Анализ надежности (Reliability analyses)*: N-1 анализ, Коэффициенты распределения при выходе линии из строя (Line Outage Distribution Factors – LODF) (расчет потокораспределения).
- *Прогнозы (Forecasts)*: кратковременные прогнозы потокораспределения (NOV), кратковременные прогнозы погоды для технических коридоров ЛЭП (OIAP).
- *Динамическое определение пределов термической стойкости линии (Dynamic thermal ratings (DTR))* – расчеты, основанные на текущих и прогнозируемых погодных условиях t_0 ... t_0+3h).

- *Чрезвычайные метеорологические явления (Exceptional weather events).*
- *Визуализация (Visualization):* ODIN.
- *Платформа интеграции и обмена данными (Integration platform and data exchange):* SUMO BUS.

4 ПОДСИСТЕМЫ КОМПЛЕКСА SUMO

Комплекс SUMO разрабатывался с учетом различных подсистем, включающих компоненты разных производителей. Для надлежащего функционирования комплекса необходимо было создать платформу интеграции.

4.1 Платформа интеграции и обмена данными - SUMO BUS

В основе комплекса SUMO лежит платформа интеграции SUMO BUS, корпоративная шина интеграции, предназначенная для управления подсистемами и осуществления обмена данными между ними (Рисунок 1). Технология веб-служб используется для обмена данными между SUMO BUS и подсистемами посредством интерфейсов SOAP/HTTP. Данная технология позволяет быстро и эффективно подключать подсистемы различных производителей с использованием стандартизованных и открытых средств связи и обмена данными.

Например, комплекс SUMO позволяет встраивать в систему различные поставщики DTR, при этом каждый будет обслуживать свою часть энергосети.

В настоящее время реализовано 17 веб-служб, которые предлагают своим клиентам (подсистемам) порядка 115 способов. Внутреннее состояние системы сохраняется в реляционной базе данных SQL.

4.2 Географическая привязка метеоданных и прогноза погоды

Для обеспечения точного ввода метеоданных в расчеты DTR их наносят на координатную сетку 500x500 м (Рисунок 2).

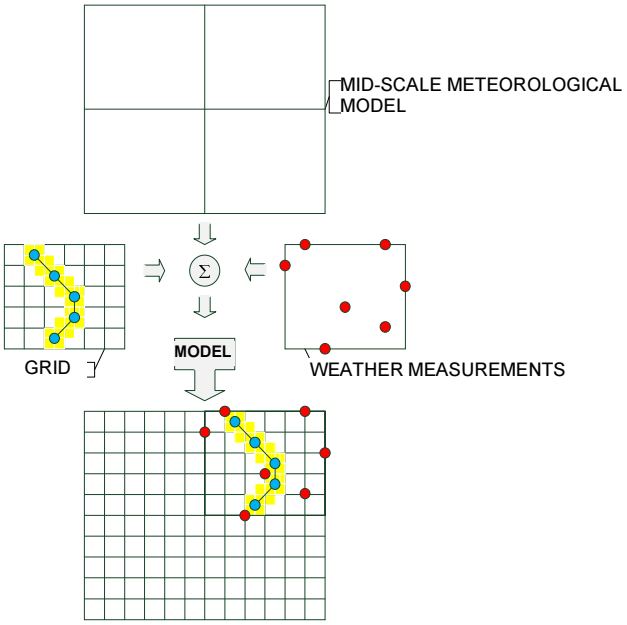

Рисунок 2: Процесс нанесения метеоданных на координатную сетку

Метеоданные привязываются в режиме реального времени с использованием маломасштабной модели погоды и данных рельефа местности наряду со среднемасштабной метеорологической моделью, как показано на рисунке 3.

Это делается с целью эффективной аппроксимации метеоданных на отрезках технических коридоров ЛЭП, лишенных метеорологической информации. В дальнейшем это послужит вводом для DTR.

Прогнозы погоды основываются на результатах, получаемых от коммерчески доступной большой среднемасштабной модели и данных о метеоусловиях в реальном времени, полученных от собственной сети метеостанции компании ELES. Расчеты производятся периодически для 6 следующих промежутков времени (15, 30, 45, 60, 120 и 180 минут). После этого прогнозируемые величины также наносятся на координатную сетку 500x500 м.

4.3 Прогнозы нагрузки и анализ надежности

Прогнозы нагрузки для сценария N и N-1 и анализ надежности N-1 (N-1) рассчитываются периодически. Они основаны на нижеследующем:

- Измерения в реальном режиме времени узловых введений активной и реактивной мощности через энергосеть ELES (SCADA).
- Измерения в реальном времени узловых напряжений через энергосеть ELES (SCADA).
- Топологические данные в реальном времени (SCADA).
- Измерения в реальном времени активной и реактивной мощности от периферийной и внутренней сети компании ELES.
- Прогнозы топологии согласно внутреннему процессу планирования.
- DACF – Прогноз перегрузок на сутки вперед от ENTSO-E.
- Прогнозы почасового производства, величины потребления и транзита от Словенского оператора обмена мощностью.

Прогнозы нагрузки синхронизированы по 6 горизонтам прогноза погоды (+15, +30, +45, +60, +120, +180 минут).

4.4 Динамическое определение предела термической стойкости линии (DTR)

Для конкретного потока мощности задается верхний предел по самой слабой связи на его пути от источника до узла назначения.

При расчете DLR линия электропередачи делится на несколько участков. В целом, каждый участок обладает своей информацией о погоде, своими физическими свойствами проводника и географической ориентацией. Таким образом, для каждого участка необходимо рассчитывать предел термической стойкости. Для линии электропередачи в целом минимально допускаемый предел объявляется пределом термической стойкости линии электропередачи (рисунок 3).

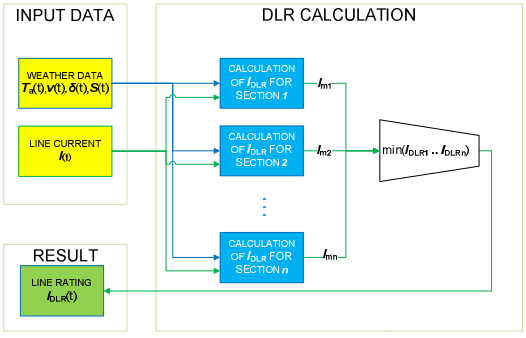

Рисунок 3: Общий принцип динамического определения предела термической стойкости линии

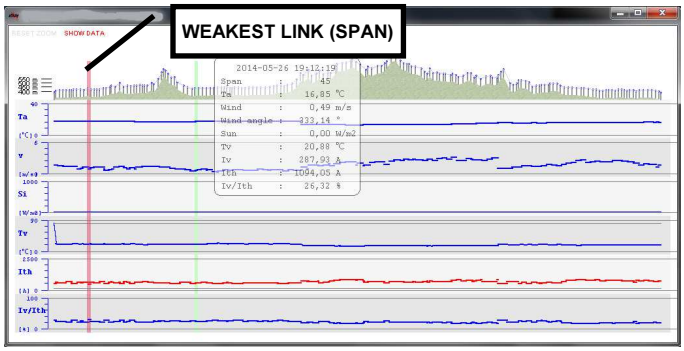

Рисунок 4: Практический пример самой слабой связи при определении предела термической стойкости линии

На рисунке 4 приведен пример из практики технического коридора ЛЭП, разделенного на участки, каждый из которых имеет свои входные метеоданные. Минимальный из пределов объявляется пределом термической стойкости линии электропередачи (участок, обозначенный вертикальной красной линией).

4.5 Измерения

Подсистемы измерений отвечают за данные, используемые в качестве ввода в подсистемы DTR и подсистемы прогнозов. Данные, передаваемые в SUMO BUS, следующие:

- Измерения метеоданных от собственной сети компании ELES (температура воздуха, скорость и направление ветра, суммарное солнечное излучение, атмосферное давление, влажность воздуха, количество осадков),
- Измеренные токи линии электропередачи.

4.6 Опасные метеорологические явления

В случае метеорологических явлений, которые могут привести к непосредственному выходу из строя линий электропередачи (грозы, сильные ветры) или повлиять на это косвенно (высокая температура окружающей среды и, как следствие, низкие значения пределов термической стойкости) ответственный оператор получает предупредительные сообщения (рисунок 5) о метеорологической обстановке в энергосети в режиме реального времени. Благодаря такому оповещению оператор получает достоверную информацию о метеобстановке, которая может привести к аварийному отключению линии или повлиять ее пропускную способность.

В случае местной грозы оператор может сосредоточиться на конкретной линии и подробно пересмотреть аварийное отключение линии, используя также другие инструментальные (программные) средства (например, SCADA, а также инструменты потокораспределения), таким образом, подтверждая влияние аварийного отключения линии на оставшуюся часть системы.

Обозначение	Значение
	Гроза –молния
	Сильные ветры (ураган или шторм)
	Высокая температура воздуха
	Низакая температура воздуха
	Сильные дожди

Таблица 1: Опасные метеорологические явления

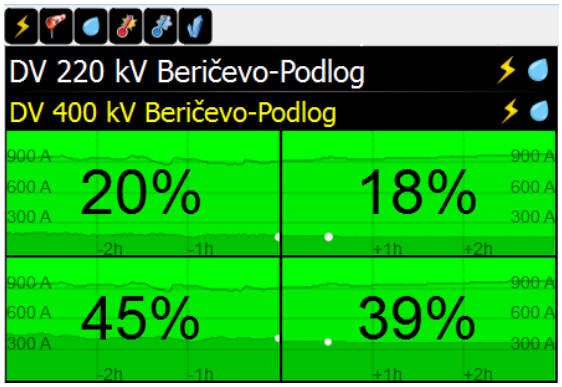

Рисунок 5: Гроза – уведомление о молнии и осадках

4.7 Визуализация – сведение всего воедино

Система визуализации обеспечивает собой средство сбора большого объема информации удобным и понятным способом.

Полученные результаты представляются в реальном масштабе времени диспетчерам ЦУС (центра управления сетью) посредством усовершенствованной платформы визуализации ODIN-VIS (рисунок 6).

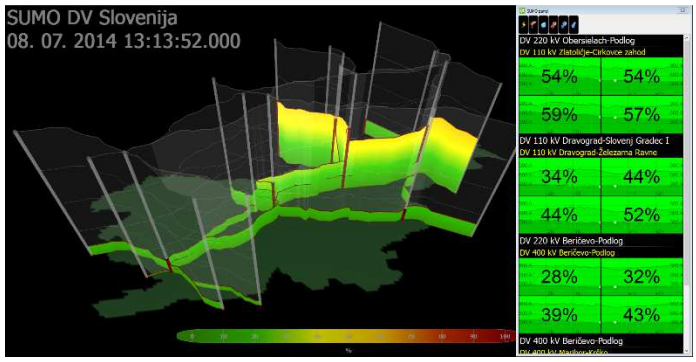

Рисунок 6: Снимок экрана платформы визуализации ODIN-VIS

В центре экрана показана часть линии электропередачи (рисунок 6). Линии электропередачи окрашены в различные цвета в соответствии с отношением фактического тока к фактическому пределу термической стойкости линии. В правой части экрана показана панель SUMO, отображающая для каждой линии электропередачи следующую информацию:

- Представление по четырем квадрантам нагрузки соответствующей линии:
  - Верхний левый: фактический ток линии по отношению к фактическому пределу линии для фактической топологии сети
  - Верхний правый: прогнозируемый ток линии по отношению к прогнозируемому пределу линии для фактической топологии сети
  - Нижний левый: фактический ток линии по отношению к фактическому пределу линии для топологии сети N-1
  - Нижний левый: прогнозируемый ток линии по отношению к прогнозируемому пределу линии для топологии сети N-1
- Опасные метеорологические явления.
- Линия электропередачи N-1 – ЛЭП в сети передачи электроэнергии в обесточенном состоянии, что приводит к максимальному повышению нагрузки в рассматриваемой линии электропередачи.

Квадранты окрашиваются в зеленый цвет, если соотношение тока в линии к номинальному значению предела ниже 90%. Если это значение колеблется между 90 и 100%, квадранты окрашиваются в оранжевый цвет. Если значение составляет 100 % или выше, квадранты окрашиваются в красный цвет и, кроме того, указывается оставшееся время безопасной работы.

5 ОПЫТНАЯ ПЛОЩАДКА ДЛЯ ПРОВЕРКИ АЛГОРИТМОВ DTR

Для оценки точности имеющихся алгоритмов DTR, часто используемых оператором передающей сети, была разработана контрольная опытная площадка для оценки неопределенности различных алгоритмов расчета пределов термической стойкости линии, широко применяемых системным оператором передающей линии. Несмотря на колоссальные усилия, прилагаемые для совершенствования алгоритмов, между ними есть разногласия, а о погрешности результатов практически ничего неизвестно. Для оценки данных на опытной площадке используются стандартные проводники AlFe-240/40 и AlFe-490/65 виде токовых контуров (рисунок 7). Каждый контур снабжен датчиками температуры и приводится в действие для достижения температуры предела по термической стойкости.

Адаптивный регулятор, построенный на принципах нечеткой логики, контролирует и поддерживает постоянной температуру в сердечнике проводника (рисунок 8) при различных погодных условиях. В качестве данных подспутниковых наблюдений и опорного теплового потока для дальнейшего анализа используется необходимое значение тока в заданных погодных условиях.

Полученные регулируемые тепловые потоки сравнивались с помощью DTR алгоритмов IEEE и CIGRE; первичные результаты показывают, что оба алгоритма слишком консервативны и предоставляют дополнительные возможности для более эффективного использования линий электропередачи (рисунок 9). На базе данных и опыта использования на опытной площадке электротехническим институтом имени Милана Видмара был разработан усовершенствованный алгоритм.

Рисунок 7: Контрольная опытная площадка для оценки погрешности DTR. Две различные токовые петли проводника расположены по X типу во избежание межсезонных атмосферных.

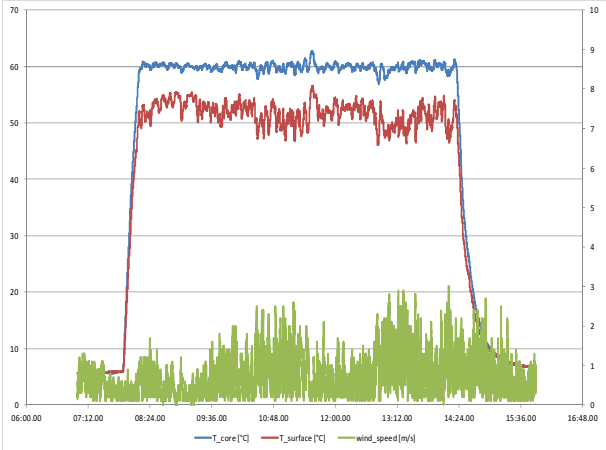

Рисунок 8: Испытательный токовый контур с проводником AlFe-490/65. При изменении погодных условий температура в сердечнике проводника сохраняется на уровне 60°C.

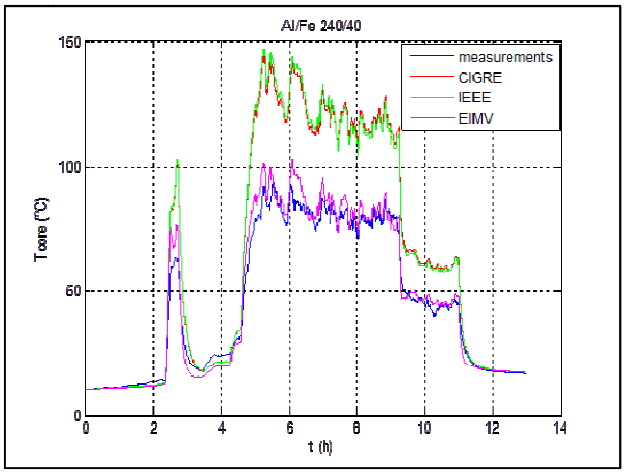

Рисунок 9: Сравнение значений температуры проводника (измеренной, по методу CIGRE, IEEE, по методу EIMV)

6 ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Вплоть до настоящего времени основная задача заключалась в интегрировании различных приложений в однородную информационную систему. Доказательство правильности концепции было получено в конце 2013 года, когда четыре линии электропередачи были интегрированы в систему. Оценку качества выполнил словенский Системный Оператор компания ELES, ввод в эксплуатацию был осуществлен в ЦУС. Система SUMO дополняется новыми линиями электропередачи.

При дальнейших исследованиях основное внимание будет акцентироваться на улучшении системы в целом, адаптации системы для оптимального использования в различном окружении Системного Оператора. Результаты, полученные с использованием комплекса

SUMO, постоянно анализируются с целью совершенствования системы. Кроме того, важной частью анализа комплекса SUMO является непрерывная оценка различных технологий определения DTR.

Для системного оператора чрезвычайно важно иметь в распоряжении инструмент, объединяющий в себе данные линии электропередачи в реальном масштабе времени (измерения и топология от SCADA), метеоданные в реальном времени и анализ надежности в реальном времени, в сочетании с кратковременными прогнозами потокораспределения, анализом надежности и подробными прогнозами погоды. Это было доказано в ходе повседневной эксплуатации с предоставлением он-лайн, практически в режиме реального времени оценку реальных эксплуатационных пределов линий электропередачи с одновременным предоставлением бесценной информации в случае неблагоприятных режимов работы линий электропередачи, например, при расчетных авариях, опасных метеоявлениях и резких изменениях потоков мощности через энергосеть. Это может привести к более устойчивой и безопасной работе энергосистемы.

На сегодняшний день комплекс SUMO доказал, что при наличии открытой платформы интеграции и хорошо продуманной архитектуры решения различных производителей можно встраивать в полезный инструмент для решения задач энергетической сети. Такая многопрофильность позволяет Системным Операторам интегрировать собственные подсистемы, уже реализованные на практике в качество самостоятельных решений, в надежную и безопасную интегрированную систему.

Результаты проверки с использованием опытной площадки DTR показали, что методы IEEE и CIGRE для расчета пределов линии являются слишком консервативными. Учитывая данный факт, по-прежнему имеются дополнительные возможности для более эффективного использования линий электропередачи. Неопределенности, выявляемые на опытной площадке будут внесены в комплекс SUMO для повышения безопасности функционирования.

ССЫЛКИ

[1] Roberts D., Taylor P., & Michiorri A. (2008, June). Dynamic thermal rating for increasing network capacity and delaying network reinforcements. In SmartGrids for Distribution, 2008. IET-CIRED. CIRED Seminar (pp. 1-4). IET.

[2] Douglass, D. A., Lawry, D. C., Edris, A. A., & Bascom, E. C. (2000). Dynamic thermal ratings realize circuit load limits. Computer Applications in Power, IEEE, 13(1), 38-44.

[3] Lakota G., Kosmač J., Marinšek M., Barl B., Kostevc J., Comparison of Overhead Conductor Temperature Measurements and Estimations Acquired from Multiple Systems Installed on a Single Overhead Line, International Symposium on High Voltage Engineering, Seoul, Korea, 2013