

КОНЦЕПЦИЯ НАВИГАЦИИ ОПЕРАТИВНО-ДИСПЕТЧЕРСКОГО ПЕРСОНАЛА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТЕВОЙ КОМПАНИИ ПО ОПЕРАТИВНОМУ УПРАВЛЕНИЮ РЕЖИМОМ И СОСТОЯНИЕМ СЕТИ

РЫКОВАНОВ С.Н., к.т.н., генеральный директор ООО «Систел»

ХОЗЯИНОВ М.А., заместитель генерального директора по развитию ООО «Систел»

Мы открываем цикл статей о реализации навигации диспетчеров в ADMS по оперативному управлению режимом и состоянием распределительной сети [1–5]. В этой работе мы описываем достигнутый уровень навигации в текущей версии Навигатора, а также раздвигаем границы концепции до всей сети распределительной сетевой компании (РСК). Навигация может применяться в большей части технологических процессов подготовки и собственно оперативного управления электрической сетью и предлагаться широкому кругу оперативного персонала, включая дежурных-электромонтеров и мастеров участков районов электрических сетей (РЭС), диспетчеров центров управления сетями.

Ключевые слова: распределенная энергетика, управление режимами, состояние электрической сети, автоматизированная система технологического управления, навигатор диспетчера, цифровая трансформация электроэнергетики



**Сергей Николаевич
РЫКОВАНОВ**



**Михаил Александрович
ХОЗЯИНОВ**

В 2018 году мы предложили концепцию навигации диспетчера по управлению режимом и состоянием сети РЭС [1]. В этом году в соответствии с этой концепцией завершена разработка промышленного программного продукта «Навигатор диспетчера» (далее – Навигатор), который представляет собой ADMS с функцией навигации диспетчера

РЭС по управлению режимом и состоянием сети РЭС.

Навигатор включает ряд подсистем с единым графическим интерфейсом пользователя, имеет апробированный искусственный интеллект (ИИ), который помогает диспетчеру управлять сетью РЭС. Использование Навигатора в составе автоматизированной системы технологического управления

THE CONCEPT OF NAVIGATION OF THE OPERATIONAL AND DISPATCHING PERSONNEL OF A DISTRIBUTION GRID COMPANY FOR THE OPERATIONAL MANAGEMENT OF THE MODE AND STATE OF THE NETWORK

Rykovanov S.N., Ph.D., General Director of Sistel LLC

Khozyainov M.A., Deputy General Director for Development of Systel LLC

We are opening a series of articles on the implementation of dispatcher navigation in ADMS for the operational management of the load flow and state of the distribution network [1–5]. In this work, we describe the achieved level of navigation in the current version of the Navigator, and also push the boundaries of the concept to the entire network of the distribution grid company (DGC). Navigation can be used in most of the technological processes of preparation and actual operational management of the electric network and is offered to a wide range of operational personnel, including electricians on duty and foremen of electric grid areas (RES), dispatchers of grid control centers.

Keywords: distributed energy, mode control, state of the electrical network, automated process control system, dispatcher's navigator, digital transformation of the electric power industry

(АСТУ) переводит ее в разряд автоматизированных систем с обеспечением навигации по управлению сетью.

В состав Навигатора входит следующее программное обеспечение (ПО):

- серверное ПО: SCADA, DMS, OMS, EMS, HIS, DTS, GIS, CIM, NN, GN (GN – Grid Navigator);

- клиентское ПО: АРМ диспетчера, руководителя, профильного специалиста по режимам, РЗА, инжинирингу данных;
- сервисное ПО – графический редактор, обеспечивающий создание CIM модели сети, мнемосхемы сети и подстанций;

- ПО интеграции с внешними системами на основе веб-сервисов.

Среди ПО Навигатора выделим три самых актуальных ПО: навигации, прогнозирования, представления сети на карте.

ПО навигации на сервере в режиме слежения, и на АРМ в режиме моделирования обеспечивает надежное, оптимальное управление сетью в темпе процесса, при оперативном и суточном планировании режима сети, выполняет следующие функции:

- мгновенно определяет состояние сети и потребителей: определяет внезапные отключения потребителей, недопустимое качество напряжения, перегрузки линий, появление колец в нормально разомкнутой сети и информирует об этом диспетчера;

- информирует о текущей категории режима сети светом сетевого (системного) светофора, сигнализирует о потере питания, недопустимых напряжениях светом объектовых светофоров

- автоматически мгновенно находит и предоставляет диспетчеру следующие виды рекомендаций: по восстановлению питания потребителей, по восстановлению нормальной или предаварийной схемы сети, по вводу напряжений в допустимую область, по устранению перегрузок в сети, по симметрированию нагрузок трансформаторов, по изолированию поврежденной части сети, по определению поврежденного оборудования по звонкам потребителей, индикаторам повреждений и токов короткого замыкания. В последнем случае производит моделирование штатной работы автоматики на низком и среднем напряжениях;

- определяет оптимальную и резервные рекомендации по множеству критериев, включая минимальное время выполнения рекомендации;

- для каждого топологического состояния в последовательности переключений рекомендаций обеспечивает:
- надежность питания потребителей в соответствии с категориями ПУЭ,
- допустимость параметров режима сети,
- чувствительность релейной защиты, коммутационную способность коммутационных аппаратов;
- автоматически отображает рекомендации на текстовых панелях, на общей схеме сети, на панораме сети, на схемах объектов, на карте местности;
- информирует о последовательности переключений, оптимальном маршруте и времени переездов бригады между объектами, времени производства переключений на объектах в текстовых полях панелей рекомендаций, миганием переключаемых коммутационных аппаратов на общей схеме сети, на панораме сети, на схемах объектов, на карте местности;
- позволяет поочередно выполнять моделирование рекомендаций переключением коммутационных аппаратов, участвующих в реализации рекомендации;
- позволяет квитирировать мигание сработавших коммутационных аппаратов на схемах, участвующих в реализации рекомендации.

ПО подсистемы прогнозирования включает:

- обучение, валидацию и оптимизацию параметров моделей прогнозирования активной мощности трансформаторных подстанций (ТП), напряжения на секциях шин центров питания;
- выполнение оперативных и суточных прогнозов;
- предоставление результатов обучения моделей и прогнозов.

ПО представления сети на карте включает:

- формирование и поддержку карт для отображения на АРМ;
- формирование графических изображений объектов, текстовых надписей, справочной информации для отображения на картах по координатам;
- отслеживание изменения представлений объектов, текстовых надписей в зависимости от изменения топологии и режима сети;
- синхронизацию цветового представления сети на картах и на диспетчерских схемах;

ПО представления сети на карте включает:

- формирование и поддержку карт для отображения на АРМ;
- формирование графических изображений объектов, текстовых надписей, справочной информации для отображения на картах по координатам;
- отслеживание изменения представлений объектов, текстовых надписей в зависимости от изменения топологии и режима сети;
- синхронизацию цветового представления сети на картах и на диспетчерских схемах;

ПО представления сети на карте включает:

ПО подсистемы прогнозирования включает:

- обучение, валидацию и оптимизацию параметров моделей прогнозирования активной мощности трансформаторных подстанций (ТП), напряжения на секциях шин центров питания;
- выполнение оперативных и суточных прогнозов;
- предоставление результатов обучения моделей и прогнозов.

ПО представления сети на карте включает:

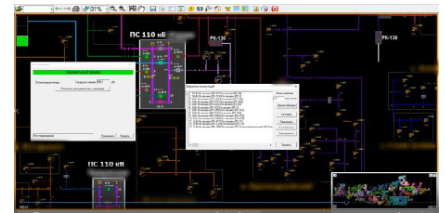
ПО представления сети на карте включает:

- формирование и поддержку карт для отображения на АРМ;
- формирование графических изображений объектов, текстовых надписей, справочной информации для отображения на картах по координатам;
- отслеживание изменения представлений объектов, текстовых надписей в зависимости от изменения топологии и режима сети;
- синхронизацию цветового представления сети на картах и на диспетчерских схемах;

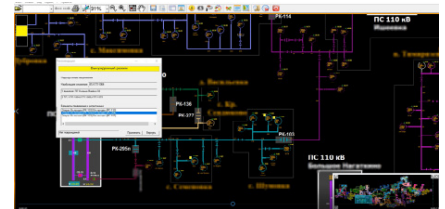
ПО представления сети на карте включает:

- формирование и поддержку карт для отображения на АРМ;
- формирование графических изображений объектов, текстовых надписей, справочной информации для отображения на картах по координатам;
- отслеживание изменения представлений объектов, текстовых надписей в зависимости от изменения топологии и режима сети;
- синхронизацию цветового представления сети на картах и на диспетчерских схемах;

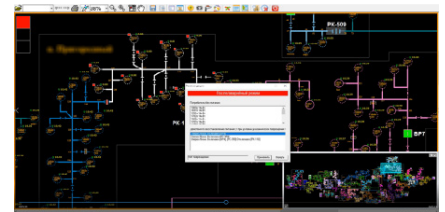
- формирование и поддержку карт для отображения на АРМ;
- формирование графических изображений объектов, текстовых надписей, справочной информации для отображения на картах по координатам;
- отслеживание изменения представлений объектов, текстовых надписей в зависимости от изменения топологии и режима сети;
- синхронизацию цветового представления сети на картах и на диспетчерских схемах;



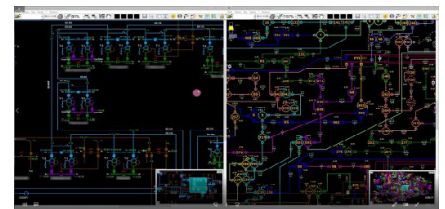
Пример рекомендаций по снижению потерь электроэнергии в нормальном режиме



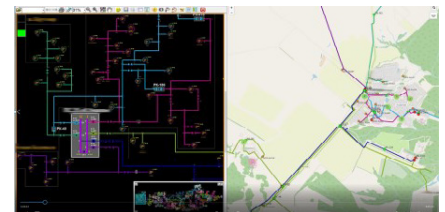
Пример рекомендаций по вводу напряжений в допуск в вынужденном режиме



Пример рекомендаций по восстановлению питания потребителей в послеаварийном режиме



Пример комбинированного (гибридного) расчета режима сети 35–220 кВ (слева) и сети 6–10 кВ (справа)



Пример одинаковой окраски сети на диспетчерской схеме и на схеме на карте

- моделирование управления коммутационными аппаратами с карты;
- отображение движения автомобилей на карте;
- отображение НСИ сетевого оборудования на карте.

Вышеперечисленный функционал ПО Навигатора в разной степени в настоящее время реализован в АСТУ двух РЭС: по одному в ПАО «Россети» и в РЭС МУП «Могилевэнерго» (Республика Беларусь).

НОВЫЕ ТЕНДЕНЦИИ И ВЫЗОВЫ

Новые тенденции развития программного обеспечения АСТУ связаны с цифровой трансформацией мировой и отечественной электроэнергетики, внедрением в управление ИИ и методов машинного обучения (МО). Настоящее изменение рынка АСТУ в РФ продиктовано следующими объективными факторами:

- переходом от распределенного оперативного управления распределительными сетями с диспетчерских пунктов районов электрических сетей (РЭС) к централизованному оперативному управлению теми же сетями РЭС из Центра управления сетями (ЦУС) сетевой компании, что предписывается при проектировании новых АСТУ и модернизации существующих систем управления предыдущих поколений;
- резким смещением финансирования внедрений программных комплексов АСТУ в распределительных сетевых компаниях в пользу внедрений одноуровневых ADMS/AEMS в ЦУС вместо двухуровневых систем (ADMS на ДП РЭС и SCADA/EMS в ЦУС);
- повышением требований к функционалу АСТУ, предусматривающих применение глубоко интегрированных со SCADA программных комплексов DMS, OMS, EMS, использующих общую информационную модель электрической сети (CIM) сетевой компании;
- необходимостью замещения импортного программного обеспечения.

Практика применения ADMS/AEMS показала, что если в составе программного обеспечения АСТУ отсутствует клиент-серверный редактор информационной модели сети, то это приводит к большим издержкам при внедрении и поддержке даже АСТУ уровня РЭС, содержащих примерно 1000 ТП. Во многих РЭС число таких РЭС может достигать 10–15 и более единиц. Поэтому необходимо сервисное программное обеспечение, в том числе для создания и поддержки информационной модели (CIM) распределительной сетевой компании.

Развитие интернета и цифровая трансформация российской энергетики привели к масштабной установке «умных» счетчиков электроэнергии на ТП и кардинальному решению вопроса с передачей данных в информационно-вычислительные комплексы (ИВК) автоматизированных информационно-измерительных систем учета электроэнергии (АИИС УЭ). Тем самым удалось резко повысить наблюдаемость и, как следствие, прогнозируемость режима распределительной сети. Поэтому в современных ADMS/AEMS актуально использование интеллектуальных подсистем прогнозирования.

Развитие ГИС-технологий в последнее десятилетие позволило большинству специалистов РЭС использовать в своей повседневной работе приложения, позволяющие отображать и редактировать технологические данные, представленные на фоне карт местности. В связи с этим современные ADMS/AEMS должны использовать ГИС-технологии.

Применение новых технологий представления информации, в частности, Web UI, позволяет создавать эффективные современные интуитивные интерфейсы пользователей, которые обеспечивают визуальный анализ состояния электрической сети, использовать различные средства отображения (компьютеры, планшеты, мобильные телефоны) и современные браузеры.

ВЛИЯНИЕ НОВЫХ ВЫЗОВОВ И ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ НАВИГАТОРА НА НАШИ РАЗРАБОТКИ

Применение ИИ и МО позволило нашей компании разработать новые, уникальные для большой электроэнергетики модели и методы прогнозирования режима сети, анализа потребления, и, как следствие, достаточно точно прогнозировать потребление в распределительной сети от уровня ТП и выше.

Разработка новых численных методов, их применение совместно с методами ИИ и МО, позволило решать задачи, которые ранее считались практически нерешаемыми. Текущая версия Навигатора в темпе процесса обеспечивает навигацию диспетчера по управлению состоянием и режимом сети 0,4–20 кВ, что существенно

облегчает его работу и способствует повышению качества принимаемых решений по управлению сетью. Нами предусматривается беспрецедентная разработка навигации по управлению состоянием и режимом сети 35–110 кВ, что позволит применять технологию навигации для управления всеми типами сетей РЭС.

Внедрения Навигатора в составе АСТУ РЭС привели к пониманию востребованности применения навигации для автоматизации подготовки действий персонала по выполнению переключений на объектах. Диспетчеры РЭС, получив в свои руки достаточно сложную систему управления, обеспечивающую навигацию по управлению состоянием и режимом распределительной сети, сразу осознали, что навигацию можно распространить и на подготовку и на выполнение дежурными-электромонтерами (ДЭ) переключений на подстанциях. Конкретно для создания, редактирования, использования бланков переключений и тренировок по оперативным переключениям с проверкой на соответствие требованиям ПТБ и ПТЭ. Навигация подготовки и выполнения таких работ ДЭ и диспетчерами резко снизит влияние человеческого фактора, позволит в разы сократить время подготовки тренировок и создания/редактирования бланков переключений.

АКТУАЛЬНОСТЬ НАВИГАТОРА ДЛЯ МЕЖДУНАРОДНОГО РЫНКА

Для рынка стран СНГ тенденции и вызовы аналогичны приведенным для сетей РФ. На западных рынках эти тенденции и вызовы возникли на 8–10 лет раньше, чем у нас. Развитие рынка и технологий ADMS/AEMS в мире в значительной степени связано с появлением в распределительных сетях:

- распределенных ВИЭ, занимающих на западе большую долю в генерации;
- накопителей ЭЭ;
- зарядных станций;
- управления спросом;
- просьюмеров и их объединений в рамках микрорайонов;
- развитием розничных рынков ЭЭ;
- микро и мини сетей.

На новые разработки зарубежных ADMS и AEMS особенно сильно повлияло вовлечение потоков мощности от малой распределенной генерации и

управления спросом в перетоки электрической мощности по распределительным и магистральным сетям, которые стали сопоставимы с потоками мощности, генерируемыми традиционными большими электростанциями.

В результате появились новые концепции, технологии и методы управления распределительными сетями в современных условиях, новые методы и алгоритмы управления напряжением и реактивной мощностью, оценивания состояния, режимной надежности. Например, в 2018 году была разработана концепция Web of Cells (WoC), отличающаяся от известной концепции Microgrid. WoC – это электрическая сеть 0,4–110 кВ, представляемая и моделируемая в виде паутины ячеек. Ячейки такой сети состоят из оборудования среднего и низкого напряжения, к которому подключены традиционные нагрузки и нетрадиционные источники энергии. Для концепции WoC продуманы алгоритмы управления напряжением и реактивной мощностью, алгоритмы управления частотой сети. Концепция достаточно близка к реальным моделям распределительных сетей не только за рубежом, но и в РФ и СНГ, так как ячейка не работает в изолированном режиме и большую часть питания получает за счет импорта мощности. Эта концепция заслуживает внимание специалистов, так как предложенный в ее рамках алгоритм ввода режима в допустимую область и оптимизации потерь электроэнергии может быть адаптирован для отечественных сетей.

Концепцией Навигации диспетчеров РСК по управлению сетью 6–110 кВ предусмотрено применение корректирующих и оптимизирующих переключений, востребованность которых на зарубежных рынках подтверждается многочисленными публикациями в ведущих отраслевых журналах.

ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ НОВОЙ КОНЦЕПЦИИ В НАВИГАТОРЕ

Для реализации новой концепции в Навигаторе мы предлагаем разработку новых для ADMS/AEMS технологий по управлению сетью РСК:

- широкое использование режимно-топологических резервов электрической сети;

- качественное прогнозирование режима сети;

- робастное оценивание состояния сети;

- оперативное оценивание режимной надежности сети;

- концептуально новая навигация при подготовке и проведении операций в сети;

- навигация по управлению режимом и состоянием сетей РСК.

Внедрение этих технологий позволяет обеспечить навигацией по управлению сетью всех специалистов сетевой компании, задействованных в краткосрочном планировании, подготовке и непосредственном оперативном управлении электрической сетью. Далее рассмотрим подробнее каждую из перечисленных технологий.

ШИРОКОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕЖИМНО-ТОПОЛОГИЧЕСКИХ РЕЗЕРВОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ РСК

На западе скрытые резервы распределительной сети определяют как гибкость, у нас – как адаптивность сети. Под этим понимается реакция сети на возмущающие воздействия в течение минут и более. Одна составляющая такой реакции распределительной сети – это вторичное и третичное регулирование, вторая – переключения коммутационных аппаратов. Здесь речь пойдет о второй составляющей.

Электрическая сеть представляет собой совокупность медных и алюминиевых проводников: линий электропередачи, шин, ошиновок, трансформаторов и автотрансформаторов, реакторов и другого оборудования. Далее эту совокупность проводников сети будем называть «металл сети». Физически переключения, выполняемые в сети, представляют собой переподключения «металла сети», выполняемые на шинах объектов сети. Переподключение «металла сети» приводит к изменению топологии сети, к образованию новых и удалению старых колец в сложно-замкнутой сети. Это, в свою очередь, приводит к перераспределению потоков мощностей в «металле сети» и изменению напряжений на шинах сети. Направленное переподключение «металла сети», обеспечивающее перераспределение мощностей и напряжений, может использоваться для ввода ре-

жима в допустимую область, изменения пропускной способности сети, оптимизации потерь электроэнергии и повышения качества напряжения. Тем самым производится высвобождение скрытых для глаз диспетчера и режимщика резервов сети по управлению режимом из «металла сети».

Диспетчеры энергосистем и электрических сетей на практике используют переключения для устранения перегрузок, повышения пропускной способности линий и коридоров, повышения режимной надежности сети, снижения потерь электроэнергии. Реже, в комбинации с изменением положений регулирующего оборудования, переключения используются для ввода напряжения в допустимую область. Ключ к повышению гибкости/адаптивности сети – разработка и доведение до промышленного исполнения программного обеспечения для реализации корректирующих и оптимизирующих переключений.

После каждого возмущения в сети, приводящего к послеаварийному или вынужденному или неоптимальному нормальному режиму, программа «Корректирующие и оптимизирующие переключения» Навигатора будет мгновенно предоставлять диспетчеру рекомендации в виде последовательностей переключений, приводящих режим к нормальному оптимальному режиму. Рекомендации – это комбинации последовательности переключений коммутационных аппаратов (далее переключения) и изменений положений регулирующего оборудования на объектах сети. Диспетчер может моделировать рекомендации, оценивать их, выбирать наиболее подходящую рекомендацию, с его точки зрения, из числа резервных рекомендаций, и выполнить ее.

Для «оптимизации» режима распределительной сети задача комбинаторного поиска оптимальной топологии сети решается целочисленным программированием. Эффективность поиска зависит от степени и вида декомпозиции задачи и применяемого метода целочисленного программирования. Если, например, используется метод ветвей и границ, то эффективность метода зависит от оценки границ. Например, при отсутствии границ поиск сводится к

полному перебору вариантов. Нами разработаны способы декомпозиции задачи и методы оценки границ, специализированные для распределительной электрической сети. Для этого кроме параметров режима используются свойства сети, свойства ее топологии, свойства модели и параметров сети. Используются последние достижения в области прикладного применения разреженных матриц при полном и частичном решении систем уравнений, свойства методов расчета установившегося режима, практика выполнения переключений в распределительной сети. Часть новых методов и алгоритмов операций с разреженными матрицами инспирирована работами выдающихся инженеров-электриков, таких, как Тинней, Брэндвайн, Чен, Бачер, Эйбе, Петерсон, Брии, Брайт, Лаубе и др.

С использованием разработанных нами методов «оптимизация» (оптимизация потерь электроэнергии, устранение перегрузок, ввод напряжений в допустимую область, восстановление питания потребителей, восстановление сети) сети РЭС, включающей 1500 трансформаторных подстанций, выполняется на обычном персональном компьютере в среднем в течение секунды.

Стоит отметить, что даже самые лучшие в мире программные комплексы EMS пока не имеют промышленной программы «Корректирующие и оптимизирующие переключения».

КАЧЕСТВЕННОЕ ПРОГНОЗИРОВАНИЕ РЕЖИМА РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ РСК

Цифровая трансформация электрических сетей способствовала практически повсеместному появлению «умных» счетчиков электроэнергии на присоединениях 0,4 кВ трансформаторных подстанций, которые опрашиваются информационно-вычислительными комплексами (ИВК) АИИС УЭ. В результате появилась возможность выполнять качественный прогноз нагрузки трансформаторов ТП (далее ТТП) на основе временных рядов потребления активной мощности, получаемых из ИВК АИИС УЭ.

Под критерием качества прогнозирования режима сети РСК мы понимаем точность прогноза режима, сопоставимую с точностью измеритель-

ного тракта. Методика качественного оперативного, суточного, недельного прогнозирования режима электрической сети 0,4–20 кВ основана на выборе в сети места расположения источника исходных данных для прогнозирования, на анализе вопроса прогнозирования потребления в этом месте сети, на разработке собственных моделей прогнозирования и на применении известных методов расчета установившегося режима сети для его прогнозирования. Вариантов выбора мест расположения источника исходных данных для прогнозирования режима сети 0,4–20 кВ несколько: головные участки фидеров, ТП, отходящие линии 0,4 кВ на ТП. Вводы в здания не рассматриваем, так как они либо не охвачены АИИС УЭ, либо передают данные в АИИС УЭ, не принадлежащие РСК. Выбор источников исходных данных сделан на основании следующих подтверждаемых практикой заключений:

- нагрузки отходящих линий 0,4 кВ от секции шин ТП слабо агрегированы, не имеют такого сглаживающего эффекта, как нагрузки 0,4 кВ ТТП и нагрузки на головных участках фидеров 6–20 кВ. Поэтому нагрузки отходящих линий 0,4 кВ плохо прогнозируемы. Кроме того, не все такие нагрузки включены в АИИС УЭ РСК;

- нагрузки головных участков фидеров 6–20 кВ сильно агрегированы, и теоретически могли бы быть хорошо прогнозируемы. Но, если проанализировать временные ряды нагрузок головных участков фидеров 6–20 кВ, то можно увидеть множество переходов графиков нагрузки с одного уровня на другой, на третий, обратно, и т.д. Это следствие перевода нагрузок ТТП с одного фидера на другой. Во временном ряду нагрузки головного участка фидера 6–20 кВ в разные моменты времени присутствуют нагрузки разных ТП, то есть с течением времени меняется состав ТП, подключенных к фидеру, меняется структура потребления фидера. Поэтому прогнозирование нагрузки головных участков фидеров 6–20 кВ требует дополнительной информации о переходах нагрузок ТТП между фидерами, учета при этом изменения потерь электроэнергии и другой информации, которую в реальных

условиях сложно найти и поддерживать;

- нагрузки 0,4 кВ ТТП достаточно агрегированы, их графики имеют некоторый эффект сглаживания, они слабо подвержены изменению структуры потребления.

Поэтому для прогнозирования режима распределительной сети в качестве источников исходных данных для прогнозирования режима сети нами выбраны нагрузки 0,4 кВ ТТП.

За последнее десятилетие в мире было проведено много исследований в области прогнозирования потребителей 0,4 кВ: домов, квартир, домовладений и т.п. Исследования выполнялись на гранты различных министерств США, Китая, Южной Кореи, Индии, европейских стран. Проанализировав эти исследования и статьи по краткосрочному прогнозированию потребления в электроэнергетике, представленные в работах прогнозистов мирового уровня, мы получили достаточно полное понимание, какие модели будут эффективны для прогнозирования нагрузки ТТП. На основе этих знаний нами созданы собственные модели прогноза нагрузки ТТП, которые апробированы на нескольких десятках временных рядов, длительностью от года до трех лет, к которым мы получили доступ.

От нескольких крупных промышленных предприятий РФ также нами получены временные ряды промышленной нагрузки на ТТП. Такая нагрузка в распределительных электрических сетях обязательно присутствует. Полученные нагрузки волатильны, поэтому плохо поддаются прогнозу. Но нам удалось создать комбинированные модели глубоких нейронных сетей, которые повышают точность прогноза промышленной нагрузки в разы. Во многом это удалось сделать за счет применения оптимальных комбинаций глубоких нейронных сетей и использования характеристических свойств потребления активной мощности ТТП.

Прогноз установившегося режима сети РСК выполняется на основе прогнозов нагрузки ТТП, нефидерной нагрузки и генерации.

Расчет установившегося режима для разомкнутой сети 0,4–20 кВ выполняется методом «в два этапа», а замкнутых участков этой сети – ме-

тодом Гаусса. При этом нагрузки моделируются с учетом зависимости от напряжения и частоты. Расчет установившегося режима сети 35–220 кВ выполняется методом Гаусса с учетом электромеханических переходных процессов. Учет разреженности матрицы узловых проводимостей выполняется ее разложением на нижнюю и верхнюю треугольные матрицы.

Прогнозирование нагрузок и генерации выполняется каждые полчаса после получения данных о потреблении всех ТТП сети, нефидерной нагрузки и генерации из АИИС УЭ. Горизонт оперативного прогнозирования – два часа.

При поиске вариантов переключений в сети 6–20 кВ прогнозирование установившегося режима для каждого варианта последовательности переключений выполняется по заранее полученным прогнозам потребления всех ТТП сети, нефидерной нагрузки и генерации. В качестве исходных данных для расчета установившегося режима в момент выполнения переключений на конкретном фидере берутся ближайшие к этому моменту времени прогнозные значения нагрузок ТТП, подключенных к этому фидеру. В случае плохой управляемости и наблюдаемости сети моменты выполнения переключений рассчитываются суммированием времени переездов бригад и времени выполнения переключений для каждого посещаемого объекта в искомой последовательности переключений.

РОБАСТНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ СОСТОЯНИЯ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ СЕТИ РСК

Для оперативной оценки текущего состояния сети в программных комплексах ADMS/AEMS применяется программа «Оценивание состояния». Разработка современной версии программы оценивания состояния (ОС) распределительной сети РСК является актуальной и стратегически важной задачей.

В распределительных сетях персоналу нелегко обеспечить эксплуатацию сложных программ, таких как ОС. Поэтому она должна быть достаточно простой для эксплуатации в составе АСТУ силами специалистов по режимам и ИТ специалистов.

Постановка задачи оценивания состояния должна учитывать, что маги-

стральная часть сети РСК не содержит оборудования сверхвысокого напряжения. Поэтому ее математическая модель не должна быть очень сложной. При расчетах в качестве данных реального времени должны использоваться как «несинхронизированные» измерения, приходящие от устройств телемеханики и АСУ ТП подстанций, так и «синхронизированные» измерения, приходящие от устройств векторных измерений. То есть, оценивание состояния должно быть гибридным и учитывать насыщенность распределительных сетей цифровыми датчиками тока, активной и реактивной мощности.

По результатам анализа мировой и отечественной практики оценивания состояния энергосистем для разработки программы «Оценивание состояния» магистральной части сети РСК» в составе EMS мы предлагаем использовать новую технологию – линейное, робастное, гибридное оценивание состояния сети. Методическая часть и алгоритмы технологии выполнены на основе критического переосмысления предыдущих достижений в области методологии и математического аппарата, применяемого для оценивания состояния. Оценивание состояния должно относиться к статической ОС, формулироваться в виде систем линейных уравнений в комплексной форме, решаемых методом линейного программирования, и должно быть робастным.

Технология линейного, робастного, гибридного оценивания состояния имеет ряд существенных преимуществ:

- не опирается на абсолютно точные значения пассивных параметров сети: сопротивления и проводимости линий, трансформаторов, реакторов, статических компенсаторов и другого оборудования. Известно, что в распределительных сетях найти абсолютно точные сведения о параметрах сети не всегда представляется возможным;

- не требует близкого приближения исходного режима к оцениваемому режиму, в отличие, например, от методов взвешенных наименьших квадратов, использующих ньютоновские алгоритмы. Для распределительной сети это важно, так как переключения в ней производятся намного чаще, чем

в объединенных энергосистемах, магистральных сетях высокого и сверхвысокого напряжения, и могут резко изменять режим сети;

- имеет простой математический аппарат, чем выгодно отличается от других технологий оценивания состояния. Это позволяет специалистам службы режимов, не имея большого опыта, быстро освоить программу и правильно трактовать результаты ее работы;

- не требует необходимости специального обнаружения и идентификации плохих данных, которые отбраковываются автоматически;

- не требует больших вычислений, что позволяет чаще проводить оценивание состояния;

- не предполагает использование допущений, приводящих к упрощению или искажению модели и режима;

- устраняет не только проблему сходимости итерационного процесса, но и проблему сходимости к локальному минимуму. Это достигается приведением задачи оценивания состояния к линейному виду.

Описанные выше преимущества предложенной технологии важны для оценивания состояния сети 35–110 кВ РСК. Методы и алгоритмы технологии соответствуют реальному положению дел с точностью и достоверностью информационных моделей в распределительных сетях. Поэтому она наиболее приемлема для практического применения для оценивания состояния сети РСК.

ОПЕРАТИВНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ РЕЖИМНОЙ НАДЕЖНОСТИ СЕТИ РСК

Режимная надежность – это способность энергосистемы противостоять внезапным возмущениям без непредусмотренных воздействий на потребителей электроэнергии. В зарубежных электрических сетях оценивание режимной надежности – это стандарт де факто. В распределительных сетях РФ режимная надежность оценивается по статическому списку возможных аварий, который не учитывает текущих изменений в сети. Поэтому нами предлагается оценивание режимной надежности по актуализированному динамическому списку расчетных аварий.

Определение режимной надежности сети РСК проводится с учетом периода

упреждения, под которым понимается промежуток времени между моментом начала анализа режимной надежности и моментом времени, для которого выполняется формирование динамического списка расчетных аварий. Для каждых 30 минут периода упреждения выполняется прогноз режима. Определение режимной надежности сети выполняется с учетом прогнозов режима, о которых было сказано выше.

Режимная надежность определяется для всей сети РСК. Одновременно рассматриваются расчетные аварии в сети 0,4–20 кВ с учетом штатной работы РЗА и в сети 35–110 кВ с учетом штатной работы релейной защиты и противоаварийной автоматики. Соответственно, формируются два динамических списка расчетных аварий, по которым прямыми математическими методами моделируются расчетные аварии.

Расчет токов короткого замыкания, замыканий на «землю», чувствительности защит выполняется по методике Московской кабельной сети ПАО «Россети Московский регион».

Моделирование работы автоматики в сети 0,4–20 кВ выполняется и на низком, и на среднем напряжении, в одну или обе стороны. Моделирование штатной работы автоматики обязательно в слабо наблюдаемых сетях. Моделирование противоаварийной автоматики в сети 6–220 кВ выполняется для всех типов ПА в соответствии нормативными документами ОАО «СО ЕЭС».

КОНЦЕПТУАЛЬНО НОВАЯ НАВИГАЦИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ И ПРОВЕДЕНИИ ОПЕРАЦИЙ В СЕТИ РСК

Бланки переключений создаются и утверждаются часами, сутками, неделями, а подготовка тренировок по оперативным переключениям затягивается на недели и месяцы. Причина такого положения дел кроется в отсутствии автоматизации подготовительных работ, выполняемых диспетчерами и дежурными-электриками (ДЭ). Поэтому разработанную нами концепцию Навигатора мы дополнили навигацией диспетчера и ДЭ по подготовке работ в сети. Программа навигации персонала диспетчерской и других служб сетевых компаний по ведению бланков переключений, подготовке тренировок по оперативным переключениям, режимным

тренировкам позволяет формировать бланки переключений и составлять тренировки по оперативным переключениям в соответствии с требованиями ПТЭ, ПТБ, другими руководящими указаниями и текущими условиями работы сети.

Заполнение текстом электронной формы бланка переключений обычно выполняется с использованием клавиатуры, а диспетчерские наименования выбираются из списка с помощью мыши. Такое создание бланка переключений нельзя назвать автоматизированным. Технологический процесс подготовки тренировок диспетчеров, мастеров участков и дежурных-электромонтеров по оперативным переключениям требует навигации, включая автоматическое создание и редактирование текстов бланков и тренировок, контроль операций по правилам ПТБ, ПТЭ, по надежности, режиму, на соответствие текущей схеме и т.п.

Навигационные функции охватывают технологические процессы подготовки и бланков переключений, и тренировок по оперативным переключениям, так как по действиям персонала и участвующему в этих действиях оборудованию они совпадают. Основные требования к навигации подготовки работ в сети состоят в следующем:

- исключить или максимально минимизировать ввод информации с помощью клавиатуры;
- перевести диспетчерские схемы из пассивного источника информации в активный источник. Чтобы наборщик бланков и тренировок не смотрел на диспетчерскую схему сети, схемы объектов, как на пассивные статические схемы с пассивными графическими элементами, а активно использовал графические элементы этих схем при составлении планов текущих или планируемых работ в сети, при наборе бланков и тренировок. Тем самым диспетчерская схема и схемы объектов становятся активным инструментом подготовки и использования бланков и тренировок;
- автоматически формировать тексты бланков переключений и тренировок при выполнении манипуляций мышью с наблюдением в тексте бланков и тренировок синтаксиса, семантики, модальности глаголов русского языка;
- автоматически моделировать и проигрывать действия наборщика блан-

ков и тренировок на диспетчерских схемах;

- обеспечить автоматическую реакцию программы на действия наборщика бланков и тренировок с отображением результатов реакции на диспетчерских схемах в виде цветовой окраски сети, сообщений, рекомендаций, представляемых на АРМ. При этом проверяется и оценивается топология сети, выполняется моделирование штатной работы РЗА, рассчитываются режимы, проверяется питание потребителей, проверяется чувствительность защит;
- обеспечить автоматическую проверку соблюдения правил ПТЭ и ПТБ при наборе бланков и тренировок и выполнении действий по ним.

НАВИГАЦИЯ ПО УПРАВЛЕНИЮ РЕЖИМОМ И СОСТОЯНИЕМ СЕТИ РСК

В нашей концепции навигации по управлению сетью сложные расчетно-аналитические программные приложения запускаются автоматически (без участия диспетчера), по событиям, обусловленным нарушением питания потребителей, снижением качества напряжения, нарушением допустимых пределов параметров режима сетевого оборудования, по событиям, формируемым при появлении возможности снижения потерь электроэнергии, по событию смены категории режима сети, категории топологии сети. Навигация предусматривается как в режиме слежения, когда события нарушений/изменений анализируются после оценивания состояния, так и в режиме моделирования, когда события нарушений/изменений анализируются в процессе моделирования работы сети.

После анализа нарушений/изменений автоматически запускаются требуемые программные приложения Навигатора, которые предоставляют пользователю (диспетчеру) рекомендации по управлению сетью в темпе процесса. Если рекомендация не очевидна для диспетчера, он может проверить ее моделированием, чтобы увидеть и оценить режим и состояние, в которое перейдет сеть после ее применения. Если результат применения рекомендации диспетчеру не понравится, он может выбирать по одной резервные рекомендации, предостав-

ляемые Навигатором, и проверять их моделированием.

При управлении сетью диспетчеру не нужно переводить Навигатор из режима слежения в режим моделирования, выбирать из меню ADMS/AEMS и запускать нужное для текущего состояния и режима сети расчетно-аналитическое приложение, и анализировать результаты его работы. Это особенно важно, если требуется выполнить несколько разных расчетно-аналитических приложений и в определенной последовательности.

Если длительность выполнения переключений будет превышать 15 минут, то за это время режим может уйти и для его расчета в качестве исходных данных потребуется использовать прогнозы нагрузки на каждые последующие 30 минут. Для этого придется запускать программы прогнозирования режимов и расчетно-аналитические приложения. А это достаточно сложная работа, которую осилит не каждый диспетчер РЭС или диспетчер магистральной части сети РСК. Навигатор снимает с диспетчера подобную нагрузку, оставляя ему возможность и время для выбора и проверки оптимальной рекомендации.

Технологическим объектом применения методов и алгоритмов является распределительная электрическая сеть, включающая два типа сетей: радиальную сеть напряжением 0,4–20 кВ и сложно-замкнутую сеть напряжением 35–110 кВ. В радиальной сети, как правило, единственный вид управляющих воздействий – переключение коммутационных аппаратов. В магистральной части сети РСК переключение коммутационных аппаратов – наиболее действенный и быстрый способ оптимизации режима.

После выполнения переключений потоки мощности, передаваемые по линиям, по величине могут меняться в разы, могут менять направление на противоположное (реверс перетока), перемещаться (вытесняться) на линии

другого класса напряжения. Поэтому для оптимизации и ввода в допуск режима мы предлагаем решать дискретно-непрерывную задачу, а не наоборот – непрерывно-дискретную. То есть, в первую очередь находить целочисленную функцию, которая физически реализуется изменением топологии сети, положением отпаек трансформаторов, включением/отключением батарей конденсаторов и т.д. Во вторую очередь находить непрерывную функцию, например, изменение мощности инвертора, генератора, статического тиристорного компенсатора и т.д. Влияние на «оптимизацию» режима дискретных переменных в модели распределительной сети, как правило, на порядок и более превышают влияние непрерывных переменных.

Опытные диспетчеры с большим стажем работы пользуются переключениями для перераспределения потоков мощности в сети, а возможность регулировать напряжения они используют, когда потоки мощностей уже перенаправлены и остается «подрегулировать» напряжение на шинах. Поэтому для распределительной сети, в отличие от чисто магистральной сети, мы предлагаем решать комбинаторную задачу поиска оптимальной топологии сети целочисленным программированием. При появлении потребности в «дооптимизации» режима сети узлы дерева вариантов вводятся в допустимую область или доводятся до глобального оптимума непрерывным программированием.

В следующих статьях мы подробно остановимся на кратко описанных в статье новых для ADMS/AEMS технологиях управления режимом и состоянием сети РСК, применяемых в Навигаторе.

Выводы

Граница концепции навигации диспетчера РЭС по оперативному управлению режимом и состоянием электрической сети работает на практике

и может быть раздвинута до размера сети РСК. Предложено применение навигации в большей части технологических процессов подготовки и собственно оперативного управления сетью РСК, для широкого круга оперативно-диспетчерского персонала, включая дежурных-электромонтеров и мастеров участков. Кратко описаны предлагаемые новые технологии для реализации концепции Навигатора диспетчеров РСК.

ЛИТЕРАТУРА

1. Рыкованов С.Н., Хозяинов М.А. «Концепция навигатора диспетчера для адаптивного оптимального управления режимами распределительной электрической сети» // Автоматизация & IT в энергетике. № 12, декабрь 2018 г., с. 30–34.
2. Потапенко С.П., Рыкованов С.Н., Хозяинов М.А. Навигатор диспетчера. Адаптивная динамическая оптимизация потерь электроэнергии в разомкнутой распределительной электрической сети // Электроэнергия. Передача и распределение, 2019, № 5(56), с. 53–59.
3. Арапов Н.Д., Беляков Д.А., Московой И.В., Рыкованов С.Н., Хозяинов М.А. Навигатор диспетчера. Современные модели оперативного прогноза нагрузки распределительных электрических сетей // Автоматизация & IT в энергетике, № 12(137), декабрь 2020 г., с. 2–10.
4. Рыкованов С.Н., Хозяинов М.А. Навигатор диспетчера. Опыт использования в автоматизированной системе технологического управления РЭС // Электроэнергия. Передача и распределение, 2021, № 2(65), с. 60–64.
5. Арапов Н.Д., Беляков Д.С., Рыкованов С.Н., Хозяинов М.А. Навигатор диспетчера. Опыт совместного использования численных математических методов и методов искусственного интеллекта // Электроэнергия. Передача и распределение, 2021, № 4(67), с. 42–48.

ООО «Систел»

Адрес г. Москва, Каширское ш., д. 22, корп. 3

Тел.: (495) 727-39-65

E-mail: info@systel.ru

www.systel.ru, https://navigrd.ru

