

УДК 621.316.1

УПРАВЛЕНИЕ СИСТЕМОЙ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

Третьяков Е.А.¹

¹ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения», Омск, Россия (644046, Омск, пр. К. Маркса, 35), e-mail: eugentr@mail.ru

Предложены и реализованы на модели методы интеллектуального управления режимами в системе электроснабжения стационарных потребителей железных дорог, обеспечивающие повышение надежности электроснабжения, качества электрической энергии и снижения потерь. Представленные методы мультиагентного управления системой электроснабжения железных дорог позволяют на основе измерения информативных параметров электрической сети и нагрузок определять топологию сети и состояние объектов для реализации управляющих воздействий в реальном времени, выполнять автоматическое восстановление нормального режима, координировать выработку (накопления) активной, реактивной мощности, мощности искажений и несимметрии, определять необходимые величины управляющих воздействий на основе их чувствительности к параметрам режима, ранжирования по значениям функции полезности, а также методов поддержки принятия решений, основанные на базе знаний и претензионных правилах в условиях неполной информации. Результаты моделирования подтвердили эффективность координированного управления локальными объектами. Использование принципов координированного управления объектами системы электроснабжения железных дорог позволит осуществить реализацию принципиально новых возможностей: секционирование сети по зонам качества электроэнергии; управление спросом (с накопителями и распределенной генерацией); автоматическую реконфигурацию топологии сети (самовосстановление); распараллеленные оптимизационные вычисления для оптимизации параметров режима в реальном времени.

Ключевые слова: система электроснабжения, нетяговые потребители, регулирование параметров режима, координация управляющих воздействий, интеллектуальные регуляторы

MANAGEMENT OF POWER SUPPLY SYSTEM OF RAILWAYS

Tretyakov E.A.¹

¹Omsk State Transport University, Omsk, Russia (644046, Omsk, Marx avenue, 35), e-mail: eugentr@mail.ru

Proposed and implemented on the model predictive control methods regimes in power system stationary consumer railways, provides increased reliability of power supply, electric power quality and reduce losses. The methods presented multi-agent system control power supply of railways allow based on the measurement of informative parameters of the electrical network and loads to determine the topology of the network and the state of objects to implement control actions in real-time, automatic recovery of the normal mode, coordinate production (accumulation) of active, reactive power, power distortion and asymmetry, determine the necessary amount of control on the basis of their sensitivity mode settings, ranging from the values of the utility function, as well as methods for decision support based on the knowledge base and rules of claim under incomplete information. The simulation results confirmed the effectiveness of the coordinated control of local objects. Using the principles of co-ordinated management of objects of power supply system of railways will allow for the implementation of innovative features: partitioning the network in zones of power quality; demand management (with drives and distributed generation); automatic reconfiguration of the network topology (self-healing); parallelized optimization calculations for the optimization of the parameters in real time mode.

Keywords: management of power supply system, not traction consumers, regulation mode setting, coordination of control actions, intelligent controller.

В настоящее время основой управления параметрами режима системы электроснабжения железных дорог является оперативно-диспетчерское управление переключениями, выполняемое персоналом. Между тем повышение энергоэффективности системы электроснабжения железных дорог может достигаться на основе измерений информативных параметров и реализации согласованных управляющих воздействий на исполнительные

устройства электрической сети, позволяющие обеспечить заданные показатели надежности электроснабжения, качества электроэнергии и уровня потерь в реальном режиме времени.

Режим работы электрической сети характеризуется рядом параметров, которые можно изменять (регулировать). К их числу относятся активные и реактивные нагрузки потребителей (линий), нагрузки и ток линий тяговой и распределительной сети, напряжение, уровень искажений напряжений.

Ряд авторов [2, 5] применительно к управлению режимами системы тягового электроснабжения развивают известный метод ситуационного управления, основанный на введении понятия ситуации, классификации ситуаций и их преобразований. Количество состояний (классов) текущего режима электрической сети зависит от количества конфигураций топологий сети, переменных параметров режима или управляемых объектов системы электроснабжения (с учетом значений критериев разбиения). При невозможности отнести состояние системы к какому-либо классу синтезируется новый класс состояний.

Недостатками такого подхода являются грубое усреднение параметров режима (и управляющих воздействий) внутри кластера из-за конечного числа сценариев управления и централизованный подход к управлению, исключающий регулирование параметров режима в реальном времени.

Зачастую при регулировании параметров режима электрической сети, в частности напряжения, используют устройства с применением fuzzy-логики [4], при этом осуществляется усреднение влияющих на напряжение факторов с использованием математического аппарата нечеткой логики для целей управления. В результате напряжение в конкретной точке распределительной сети может не соответствовать предъявляемым требованиям.

Классическим подходом к регулированию параметров режима электрической сети является работа В. А. Веникова [1], согласно которой регулирование напряжения осуществляется в центре питания в соответствии с условиями, требуемыми для той группы однородных потребителей, которые имеют наибольшую долю в общей нагрузке линий, присоединенных к данному центру питания. Для обеспечения должного качества напряжения у остальных потребителей, получающих питание от этого центра питания, должны использоваться средства местного регулирования напряжения. Нескоординированная работа таких средств не может обеспечить заданные параметры режима. Поэтому для устранения представленных недостатков существующих подходов требуется разработка методов управления системой электроснабжения железных дорог на основе современных технологий представления и обработки знаний (баз знаний) и онтологий, а также мультиагентного подхода [3, 4], основанного на измерениях

информативных параметров и реализации управляющих воздействий в реальном времени во всех режимах, а также алгоритмов взаимодействия и координации элементов управляющей системы для реализации согласованных воздействий на исполнительные устройства объектов системы электроснабжения стационарных потребителей железных дорог, позволяющих обеспечить заданные параметры надежности, качества электроэнергии и уровня потерь в реальном режиме времени.

Предлагаемые решения. Предлагаемый подход к управлению системой электроснабжения включает в себя архитектуру с распределенными центрами принятия решений (управляющие контроллеры-агенты-координаторы) на основе измерений и высокоскоростного анализа с помощью вычислительных средств на базе мультиагентных систем (**рис. 1**); необходимые датчики электрических (напряжения, токи, мощности, коэффициент мощности, показатели качества электроэнергии и т.п.) и неэлектрических величин (положение коммутационных аппаратов, отпаяк РПН, ПБВ, вольтодобавочных трансформаторов, ступеней компенсирующих устройств и т.п.); локальные контроллеры исполнительных устройств. Все датчики, локальные и управляющие контроллеры присоединены через информационные каналы по своим протоколам к виртуальной модели сети в границах энергодиспетчерского пункта ОАО «РЖД» (с возможностью получения и обмена данными с соседними энергодиспетчерскими пунктами). Виртуальная модель сети содержит все зеркальные данные о сети, которые обновляются при получении новых данных. Она позволяет реализовать взаимодействие элементов сети в системе управления с различными протоколами передачи данных.

Математическое обобщенное описание состояния системы управления электроснабжением железных дорог можно представить в виде:

$$f(X_{nAC}, R_{nF}) = 0, \quad (1)$$

где X_{nAC} – вектор переменных состояний параметров режима (узловые напряжения и фазы, токи, мощности и т.п.); R_{nF} – вектор состояний контроллеров исполнительных устройств объектов управления.

Выдача управляющих воздействий на исполнительные устройства объектов электроснабжения осуществляется как в автоматическом режиме, так и в результате действий энергодиспетчера, который осуществляет свои функции в центре управления системой электроснабжения.

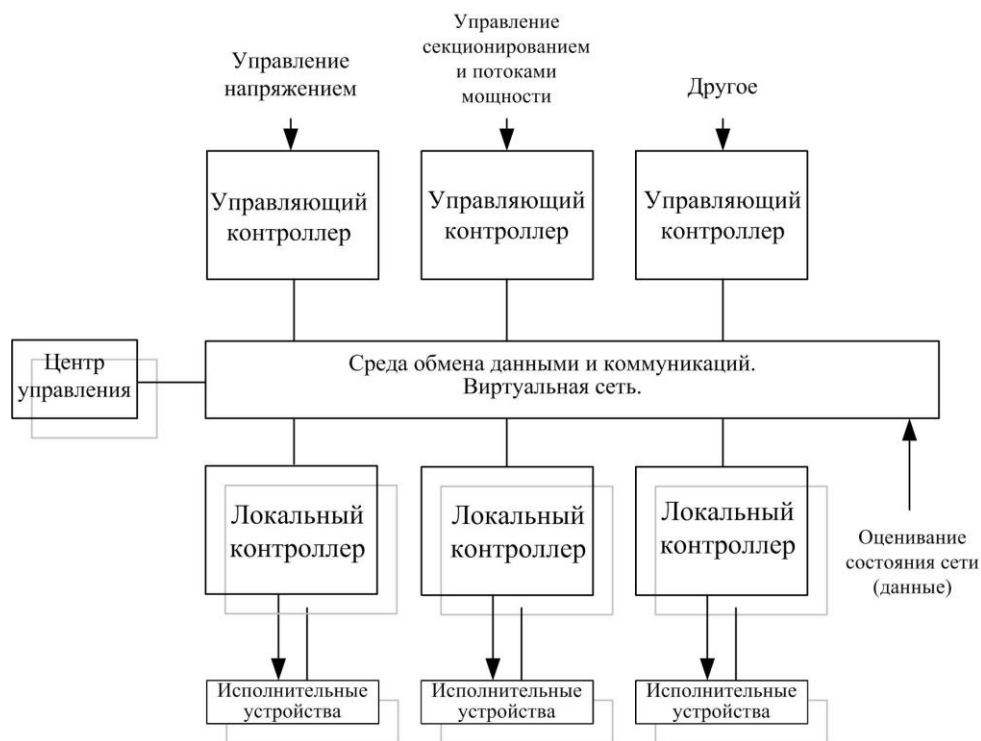


Рис. 1. Архитектура управления системой электроснабжения железных дорог для целей регулирования параметров режима

В качестве локальных контроллеров-агентов исполнительных устройств выступают локальные контроллеры оборудования (локальное управление регулирующими компенсирующими устройствами, РПН трансформаторов, фильтр-устройств, накопителей, коммутационных аппаратов и т.д.). Локальные контроллеры могут работать автономно, получая данные непосредственно в месте подключения и/или из виртуальной модели сети, на основе своих заданных целей и в составе системы управления электроснабжением, получив задание от распределительного контроллера для достижения глобальной цели, т.е. координированно. Управляющие контроллеры выступают в качестве агентов-координаторов, реализованы по функциональному признаку (например, контроллеры управления напряжением, управления секционированием и потоками мощности, управления качеством электроэнергии и др.).

Управляющий контроллер содержит (рис. 2) средства обработки данных от датчиков, локальных контроллеров, центра управления и включает в себя оценку состояния – идентификацию параметров сети (топология: путем анализа измерений на наличие соединения линий, параметры элементов схемы), параметры режима – напряжения узлов, перетоки мощностей и токов в ветвях, мощности генерации, накопления и потребления в узлах, ограничения на параметры режима. Далее с учетом базы знаний, которая содержит модели процессов, критерии и ограничения, как заложенные, так полученные из опыта и

прогнозирования, происходит принятие решений по управлению системой электроснабжения железных дорог, основанное на алгоритмах полезности функционирования объекта (например, алгоритм минимума потерь в сетях) по результатам координации с другими управляющими контроллерами, и определяется величина управляющих воздействий, которая передается локальным контроллерам для реализации исполнительными устройствами.

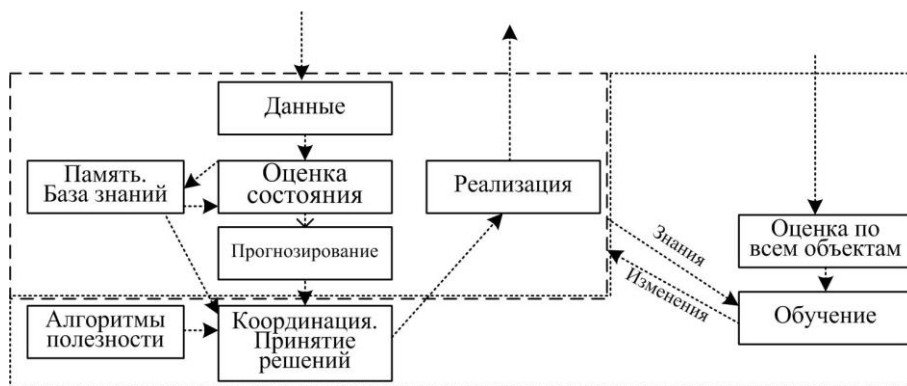


Рис. 2. Структура управляющего контроллера

Для представления онтологии используется семантическая сеть. Онтология регулирования параметров режима содержит концепты, атрибуты и отношения применительно к конкретному объекту. Примеры концептов: подстанция, линия, средство регулирования и иные атрибуты, например линии: сечение, марка кабеля, ток, мощность, напряжение и т.п. [3]. Отношения, например, логики 1-го порядка применительно к линии: если ток линии превысит ток перегрузки, то линия отключается (при невозможности изменения топологии транспорта электроэнергии), или не отключается, но происходит включение дополнительной батареи конденсаторов компенсирующего устройства, и т.д. Онтология отношений описывает все возможные ситуации, в том числе с использованием теории нечетких множеств, и создает новые на основе реализации критериев обучения.

Кроме этого, управляющий контроллер содержит средства координации по принципу сотрудничества или «переговоры-аукцион» [5]. Координация осуществляется для достижения глобальной цели или получения максимальной отдачи от локальных систем управления (контроллеров-агентов). Например, агент начинает переговоры с другими, когда его реактивная нагрузка возрастает, а он не имеет достаточного запаса реактивной мощности, чтобы достичь локальной цели (повышения напряжения). Координация может выполняться на основе выставленных приоритетов и чувствительности к параметрам режима (например, на основе сенсорного анализа), а также ранжирования по значениям функции полезности со стороны агентов с учетом истории и прогнозных значений (например, реконфигурация топологии сети для автоматического восстановления нормального режима).

Под функциями полезности понимаются алгоритмы оптимизации (например, минимум потерь в сетях, минимальное среднеквадратическое отклонение напряжения в узлах сети и т.д.). Координация выполняется между всеми управляющими контроллерами через среду обмена данными (виртуальную сеть). К примеру, регулирование напряжения предлагается выполнять двухступенчатым. Первая ступень – это координированное применение местных средств регулирования, вторая – ввод в работу регулятора РПН при неудовлетворительных результатах регулирования на первой ступени [3].

Управление системой электроснабжения железных дорог осуществляется в реальном режиме времени с высоким быстродействием, порядка 0,1 с. За счет распределенных вычислений и отсутствия централизованного сбора и обработки данных существенно возрастает скорость управления системой электроснабжения железных дорог.

Описание исследования. Для оценки координированного управления параметров режима рассмотрим участок электрической сети. Реальную электрическую схему участка распределительной сети из пяти трансформаторных подстанций, связанных кабельными линиями 10 кВ, представим в виде направленного графа (рис. 3).

Параметры состояния сети соответствуют уравнениям установившегося режима следующего вида:

$$\begin{cases} U_i' - U_i'' \\ G_{ij} + jB_{ij} \end{cases} \quad (1)$$

где U_i', U_i'' – вещественная и мнимая составляющие неизвестных напряжений; G_{ij}, B_{ij} – вещественная и мнимая составляющие матрицы узловой проводимости; P_i, Q_i – вещественная и мнимая составляющие задающей мощности в узле (генерация минус нагрузка).

Матрица инцидентий узлов и ветвей для графа рисунка 3 содержит пять строк и столбцов. Узел 6 – балансирующий.

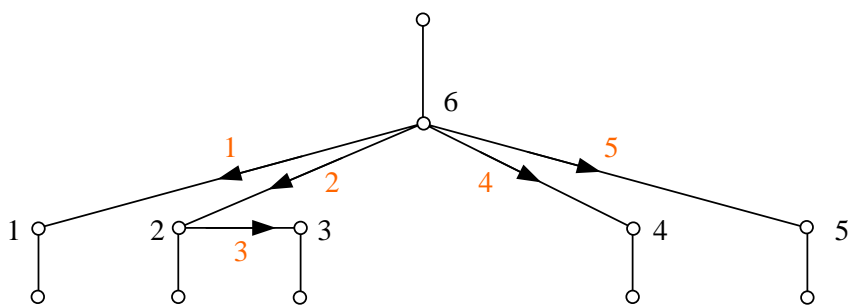


Рис. 3. Направленный граф электрической сети

Чувствительность напряжения на шинах трансформаторных подстанций (узлов схемы) из-за изменения активной и реактивной мощности может быть представлена линейными уравнениями (для небольших приращений непрерывного управления) в виде стандартного Якобиана:

$$\begin{pmatrix} \Delta U \\ \Delta \delta \end{pmatrix} = -Y^{-1} \begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} \quad (2)$$

Алгоритмы мультиагентного управления напряжением исследованы на тестовой сети с помощью в виде отдельных подзадач. Все потребители задавались расчетными суточными графиками нагрузок. К другим допущениям также можно отнести упрощенные онтологии отношений 1-го порядка, отсутствие статистического описания нагрузок, поскольку предполагается управление в реальном времени. Также для упрощения расчет выполнялся дискретно в 24 временных точках. Для каждой точки рассчитывались управляющие воздействия в виде уставок местных средств регулирования (автоматические устройства компенсации реактивной мощности), размещенных в узлах 1, 2, 4, 5, и устройства РПН в узле 6 на основе выражения (2) по условию стабилизации напряжения. На рисунке 3 представлены результаты моделирования при указанных допущениях усредненно по 24 временным точкам.

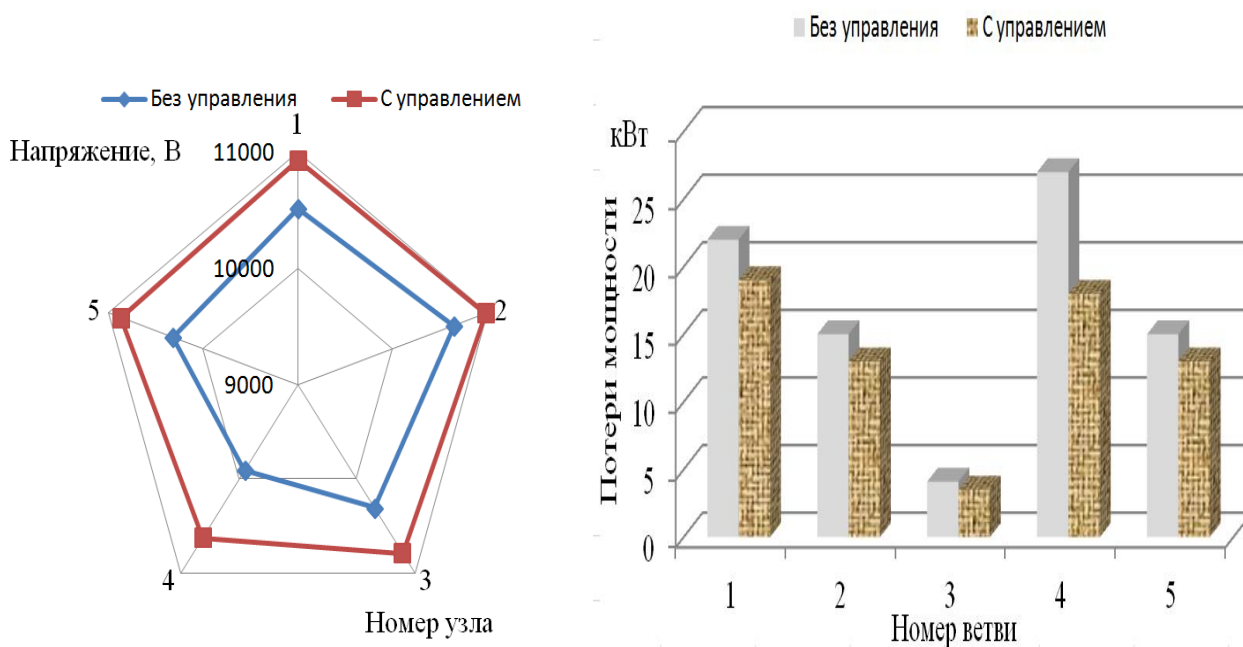


Рис. 4. Результаты моделирования

Выводы. Результаты моделирования (рис. 4) подтвердили эффективность координированного управления локальными средствами регулирования и в центре питания: снижение нагрузочных потерь составило в среднем около 18 %, повышение напряжения – 4,9 %.

Таким образом, использование принципов координированного управления объектами системы электроснабжения железных дорог позволит снизить потери электроэнергии, повысить ее качество, а также осуществить реализацию принципиально новых возможностей: секционирование сети по зонам качества электроэнергии; управление спросом (с накопителями и распределенной генерацией); автоматическую реконфигурацию топологии сети (самовосстановление); распараллеленные оптимизационные вычисления.

Между тем, для реализации представленных результатов в виде аппаратно-программного комплекса необходимо продолжить моделирование на основе современных агентских платформ и специальных программных продуктов моделирования мультиагентных интеллектуальных систем, что является целью дальнейших исследований автора.

Список литературы

1. Электрические системы: В 7 т. Т. 2. Электрические сети: Учебник для электроэнергетических специальностей вузов / Под ред. В.А. Веникова. – М.: Высшая школа, 1971. – 440 с.
2. А.В. Крюков. Оперативное управление в системах электроснабжения железных дорог: моногр. / В.П. Закарюкин [и др.]; // Под ред. А.В. Крюкова. – Иркутск: ИрГУПС, 2012. – 129 с.
3. Третьяков Е.А. Управление качеством электрической энергии в распределительных сетях железных дорог: моногр. – Омск: ОмГУПС, 2013. – 196 с.
4. Рассел С. Искусственный интеллект: современный подход / С. Рассел, П. Норвиг; пер. с англ. – М.: Издательский дом Вильямс, 2006. – 1408 с.
5. Weng B. Optimal signal reconstruction using the empirical mode decomposition // Euroasip Journal on Advances in Signal Processing, 2008, vol. 4, P. 12–18.

Рецензенты:

Черемисин В.Т., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Подвижной состав электрических железных дорог», директор научно-исследовательского института энергосбережения на железнодорожном транспорте, ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения», г. Омск;

Кузнецов А.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Теоретическая электротехника», ФГБОУ ВПО «Омский государственный университет путей сообщения», г. Омск.