

М.С. ГОЛИКОВ, аспирант гр. ЭТа-251 (КузГТУ)
Научный руководитель Р.В. БЕЛЯЕВСКИЙ, к.т.н., доцент (КузГТУ)
г. Кемерово

ТЕОРИТИЧЕСКИЕ И ПРИКЛАДНЫЕ АСПЕКТЫ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ

Современные электрические сети представляют собой критически важный, но и наиболее сложный для управления элемент инфраструктуры. Перед ними сегодня стоят беспрецедентные вызовы: стремительный рост энергопотребления, массовое внедрение нестабильных возобновляемых источников энергии и физическое старение основных фондов. В этих условиях традиционные подходы к управлению оказываются недостаточно эффективными. На первый план выходит комплексная оптимизация, которая становится ключевым инструментом для поиска баланса между надежностью, экономической эффективностью и устойчивостью всей системы. Актуальность данной темы обусловлена острой необходимостью снижения эксплуатационных потерь, минимизации огромных затрат на развитие сетевого хозяйства и гарантирования высокого качества электроснабжения в обстановке растущей неопределенности. Поэтому важно провести обзор современных методов и технологий оптимизации, охватывающих все уровни управления электроэнергетическими системами.

Оптимизационные задачи в электроэнергетике носят иерархический характер и охватывают все временные горизонты управления. На стратегическом уровне решаются задачи долгосрочного планирования развития сетей. Здесь инженеры и аналитики определяют оптимальные места размещения, сроки ввода и мощность новых объектов, таких как линии электропередачи и трансформаторные подстанции. Критерием оптимальности служит минимизация совокупных капитальных и эксплуатационных затрат при безусловном выполнении перспективного спроса и строгих нормативных требований по надежности.

Переходя на тактический уровень, фокус смещается на оптимальное диспетчерское управление, которое включает в себя задачи ежедневного и недельного планирования режимов. На этом этапе решаются классические задачи оптимального распределения реактивной мощности и управления активными перетоками между регионами. Основные цели тактической оптимизации – это минимизация технологических потерь электроэнергии, поддержание стабильного и оптимального профиля напряжения во всех узлах сети и предотвращение опасных перегрузок элементов системы.

Наконец, оперативный уровень управления отвечает за работу в ре-

альном масштабе времени. Здесь системы противоаварийной и режимной автоматики должны в доли секунды реагировать на возмущения, такие как внезапное отключение генератора или короткое замыкание. Задача оперативной оптимизации – быстрое парирование таких событий для сохранения устойчивости системы и поддержания ключевых параметров, напряжения и частоты, в строго заданных пределах. [1]

Решение столь сложного комплекса задач требует применения определенного математического аппарата. Традиционно для задач оптимальных режимов и планирования используются методы нелинейного и линейного программирования. Однако в условиях современной энергетики, где многие задачи имеют комбинаторный характер, например, оптимальная переконфигурация распределительной сети, все более востребованными становятся методы искусственного интеллекта. Генетические алгоритмы и методы роевого интеллекта демонстрируют высокую эффективность в поиске глобального оптимума в подобных сложных условиях. Особую важность приобретает стохастическое программирование, которое позволяет учитывать фундаментальную неопределенность, вносимую солнце- и ветрогенерацией, и находить решения, устойчивые к широкому спектру возможных сценариев.

Эти математические модели находят свое физическое воплощение в конкретных технологических решениях. Ключевую роль играют устройства регулирования напряжения, такие как силовые трансформаторы с регулированием под нагрузкой и синхронные компенсаторы. Настоящий прорыв в управлении сетями связан с применением силовой электроники. Устройства и системы передачи постоянного тока высокого напряжения обеспечивают гибкое и высокоскоростное управление потоками мощности, что было недостижимо при использовании традиционного оборудования. Все эти устройства объединяются в единую систему управления через АСТУ и SCADA, которые собирают телеметрию, решают оптимизационные задачи и либо предоставляют решения диспетчеру, либо осуществляют автоматическое регулирование. [3]

Появление концепции интеллектуальных энергосистем кардинально меняет саму парадигму оптимизации. Одним из ключевых нововведений становится активное управление спросом. В этой модели потребители превращаются из пассивных нагрузок в управляемый ресурс. Система может отправлять сигналы на кратковременное отключение неключевых нагрузок, таких как водонагреватели или системы кондиционирования, в часы пикового потребления. Это позволяет избежать включения крайне дорогих пиковых электростанций и существенно оптимизировать график нагрузки.

Другой критически важный аспект – координация работы распределенной генерации и накопителей энергии. Интеллектуальные системы в реальном времени принимают решения о том, когда наиболее целесооб-

разно отдавать энергию от солнечных панелей или ветряков в сеть, а когда – запастись ее в аккумуляторных батареях большого масштаба. Такой подход позволяет эффективно сглаживать график нагрузки, локализовать потоки мощности и снижать общие потери. [2]

Вершиной развития интеллектуальных сетей является концепция самовосстанавливающихся систем. При возникновении аварии интеллектуальные устройства релейной защиты и автоматики, опираясь на данные с высокоточных синхрофазоров, способны в доли секунды определить поврежденный участок, автоматически переконфигурировать топологию сети и подать питание потребителям по обходным путям. Это является высшей формой оперативной оптимизации, где критерием эффективности служит минимизация времени перерыва в электроснабжении и максимальное повышение надежности. [4]

В заключение можно констатировать, что современная оптимизация электрических сетей эволюционировала от решения локальных технических задач к комплексному управлению сложной, динамической и мультиагентной системой. Среди ключевых тенденций можно выделить всеобъемлющую цифровизацию, основанную на сборе и анализе больших данных с интеллектуальных устройств, и интеллектуализацию, связанную с внедрением алгоритмов машинного обучения и искусственного интеллекта для работы в условиях высокой неопределенности. На смену жесткому детерминированному управлению приходят гибкие и адаптивные системы, способные к самонастройке и самовосстановлению. Дальнейшее развитие лежит в русле создания Единой цифровой платформы энергосистемы, которая органично интегрирует все уровни оптимизации – от стратегического планирования до оперативного управления в реальном времени. Такой подход позволит обеспечить надежное, экономически эффективное и устойчивое электро-снабжение, необходимое для успешного функционирования экономики в эпоху энергетического перехода.

Список литературы:

1. Железко, Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии / Ю.С. Железко. – М.: Энергосервис, 2019. – 456 с.
2. Крючков, И.П. Интеллектуальные электроэнергетические системы (Smart Grid) / И.П. Крючков, В.А. Старшинов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2020. – 398 с.
3. Липкин, И.А. Оптимизация режимов и развитие электрических систем / И.А. Липкин. – Новосибирск: Наука, 2017. – 312 с.
4. Федотов, А.И. Интеллектуальные сети – основа энергетики будущего / А.И. Федотов, Ю.Е. Гуревич. – М.: Энергоатомиздат, 2021. – 288 с.

Информация об авторах:

Голиков Матвей Сергеевич, аспирант гр. ЭТа-251, КузГТУ, 650000,
г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, tharrnai@gmail.com

Беляевский Роман Владимирович, к.т.н., доцент, КузГТУ, 650000,
г. Кемерово, ул. Весенняя, д. 28, brv.egpp@kuzstu.ru