

УДК 621.316

ОБЗОР МЕТОДОВ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА ГОРНОДОБЫВАЮЩИХ ПРЕДПРИЯТИЯХ

Аксенова А.А., студент гр. ЭРб-171, IV курс
Воронин В.А., старший преподаватель
Кузбасский государственный технический университет
имени Т.Ф. Горбачева
г. Кемерово

Значительное влияние на формирование величины потерь электроэнергии в системах электроснабжения (СЭС) горнодобывающих предприятий оказывают перетоки реактивной мощности. Для их уменьшения и снижения потерь электроэнергии должны проводиться мероприятия по компенсации реактивной мощности и улучшению качества электроэнергии, заключающиеся в установке батарей статических конденсаторов (БСК), фильтрокомпенсирующих устройств (ФКУ), статических тиристорных компенсаторов (СТК), а также современных устройств на базе технологии FACTS второго поколения – СТАТКОМ и ДКИН.

Однако несмотря на рост энерговооруженности, при проектировании электроснабжения горнодобывающих предприятий не всегда рассматривается установка устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ) в непосредственной близости к электроприемникам. Это вызвано необходимостью проектирования оборудования особого исполнения, например, взрывозащищенного для использования в условиях угольных шахт опасных по взрыву газа или пыли.

Отсутствие исследований в области интеграции устройств FACTS в систему электроснабжения горнодобывающих предприятий делает весьма проблематичной реализацию потенциала энергосбережения и создает технические проблемы на пути к реализации проекта «Индустрия - 4.0» с последующим переходом к безлюдным угольным шахтам.

В связи с этим становится актуальной оценка целесообразности размещения устройств FACTS в подземной части угольной шахты, что позволит реализовать потенциал энергосбережения и снизить долю затрат на электроэнергию в себестоимости добычи угля.

Необходимо отметить, что преимуществами устройств FACTS является быстроедействие, которое в значительной мере расширяет его область применения: помимо компенсации реактивной мощности это и компенсация высокочастотных нелинейных искажений, и борьба с несимметрией нагрузки, и др.

При разработке и оптимизации мероприятий по компенсации реактивной мощности в СЭС угольных шахт необходимо учитывать следующие особенности:

- ограниченное пространство для размещения оборудования в горных выработках (относительное малое число узлов возможного подключения УКРМ);
- изменение схемы и протяженности распределительной сети выемочного участка по мере разработки угольного пласта (необходим учет изменений конфигурации сети);
- резкопеременный характер электрических нагрузок горно-шахтного оборудования;
- наличие гармонических искажений, вызванных работой частотно-регулируемого электропривода.

При выборе конфигурации и мест размещения УКРМ необходимо использовать современные методы оптимизации. Основными задачами оптимального размещения и компоновки УКРМ в СЭС выемочных участков угольных шахт являются:

- снижение потерь электроэнергии в распределительной сети;
- снижение отклонений и колебаний напряжения в узлах сети;
- ограничение уровней высших гармоник тока и напряжения.

Существующие на сегодняшний день СЭС представляют собой сложные разветвленные структуры с большим количеством узлов нагрузки. Чтобы достичь максимально положительного эффекта от мероприятий КРМ и внедрения устройств СТАТКОМ, необходимо использовать современные оптимизационные алгоритмы и методы, обладающие как большой скоростью расчета, так и сходимостью алгоритма.

Приведем сравнение традиционных методов (аналитический подход, метод численного программирования, эвристический метод) решения данной задачи с методами искусственного интеллекта (табл.1).

В работе [2] приводится классификация методов оптимизации при компенсации реактивной мощности с помощью СТАТКОМ по нескольким категориям:

1. Аналитические методы – это методы, состоящие из простых алгоритмов, которые в свою очередь, не содержат каких-либо вычислений.

Целью аналитических методов является определение оптимальных решений без учета нелинейности задач. Чтобы ускорить поиск решения, вместе с этими алгоритмами применяют аппроксимацию.

2. Нейронные методы – это нейронные сети, которые используют для моделирования онлайн-нелинейных систем, имеющих несколько входов и выходов.

Данные методы способны найти оптимальное место размещения СТАТКОМ в распределительной сети при неисправностях в ней, но с их

помощью нельзя решить задачу оптимального определения размеров СТАТКОМ.

Так как для методов нейронных сетей необходимы входные и выходные целевые функции, их использование при решении задачи оптимального распределения СТАТКОМ ограничивается только ненормальными режимами работы, когда есть данные о коротком замыкании.

Таблица 1

Сравнение классических методов и методов искусственного интеллекта

Параметр	Традиционные методы	Методы искусственного интеллекта
Время	Продолжительное время производства расчетов	Короткое время производства расчетов
Реализация	Простая	Средней сложности
Доступность	Низкая скорость сходимости	Высокая скорость сходимости
Требования	Низкая управляемость ограничениями; требуется много входных исходных данных (переменных); используются только для небольших систем	Высокая управляемость ограничениями; требуется мало входных переменных; используется на нелинейных системах; используется для больших систем

3. Метаэвристические методы – один из частых в применение методов решения задачи распределения СТАТКОМ. Эти методы представляют собой стохастические алгоритмы, использующие случайную исходную информацию в процессе поиска оптимального решения.

К метаэвристическим методам относятся такие методы, как, например, метод мотылька и пламени, метод стаи сальп, метод саранчи, гибридный метод роя частиц и гравитационного поиска [1].

Отличительной чертой этих методов является итерационность, за счет которой расчеты могут проводиться многократно, а далее будет происходить формирование набора подходящих вариантов с различными параметрами и выбор наилучшего решения.

Использование метаэвристических методов оптимизации значительно упрощает решение задачи, но в то же время, это ненадежные методы, так как сами методы довольно сложны по алгоритму и может происходить преждевременное схождение функций. Тем не менее, эти методы легче всего понять, а также в них можно использовать многоцелевую функцию, что позволяет учитывать множество ограничений в исходных данных.

4. Анализ чувствительности и их комбинации с метаэвристическими методами. В этих методах оптимизации главными являются два индекса, на основании которых далее определяется потенциальные места подключения СТАТКОМ, а затем оптимальное местоположение.

Индексы, вычисляемые для решения задачи оптимального распределения СТАТКОМ:

- Индекс чувствительности к напряжению (расчет индекса стабильности напряжения);
- Индекс потерь мощности (расчет индекса чувствительности к потерям мощности).

Анализ чувствительности достаточно прост, а также походит для решения задачи размещения СТАТКОМ. Однако при решении задачи таким методом необходимо рассматривать только одну цель.

В некоторых научных работах подходы, основанные на чувствительности, были соединены с алгоритмами метаэвристической оптимизации с целью более эффективного поиска решения задачи оптимального распределения СТАТКОМ.

Комбинация методов, состоящая из подходов к чувствительности и методов оптимизации, для решения задачи оптимального распределения СТАТКОМ позволяет найти наиболее важные точки для подключения, благодаря подходам к чувствительности, а наилучшие размеры СТАТКОМ – с помощью методов оптимизации.

Используя комбинацию методов можно достичь баланса между точностью расчетов и скоростью их получения, а также можно использовать многоцелевые функции и использовать множество ограничений исходных данных [2].

Целевая функция для решения данной оптимизационной задачи должна включать в себя: потери электроэнергии в СЭС выемочного участка ΔW ; среднее отклонение напряжения в узлах сети δU ; размах колебаний напряжения в узлах сети δU_t ; средняя глубина провалов напряжения $\delta U_{п}$; суммарный коэффициент гармонических искажений тока THD_I и напряжения THD_U :

$$F = f(\Delta W, \delta U, \delta U_t, \delta U_{п}, \text{THD}_I, \text{THD}_U).$$

Целевую функцию для размещения устройств компенсации реактивной мощности можно представить в следующем виде [3]:

$$F = c_3 \cdot \Delta P + k_{\text{КУ}} \sum_j^N Q_{\text{КУ}j},$$

где $Q_{\text{КУ}j}$ – реактивная мощность УКРМ; j – узел размещения УКРМ; N – количество точек подключения УКРМ в СЭС; $k_{\text{КУ}}$ – удельная стоимость УКРМ; c_3 – удельная годовая стоимость потерь активной мощности; ΔP – потери активной мощности в СЭС, с учетом добавочных потерь от высших гармоник.

Важной задачей является рациональный выбор метода оптимизации при разработке мероприятий по КРМ, учитывающий специфику работы СЭС угольных шахт. Для решения данной задачи необходимо провести сравнительный анализ при использовании различных современных методов оптимизации.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских ученых №МК-236.2020.8.

Список литературы:

1. Толба, М.А.Х. Развитие методов оптимизации размещения компенсирующих устройств и возобновляемой распределенной генерации в радиальных электрических сетях / дисс. на соиск. уч. ст. канд. техн. наук, МЭИ, Москва, 2018
2. Sirjani, R Optimal placement and sizing of distribution static compensator (D-STATCOM) in electric distribution networks: A review / R. Sirjani, A. Rezaee Jordehi // Renewable and Sustainable Energy Reviews 77 (2017), pp. 688–694 DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.035>
3. Тульский В.Н., Ванин А.С., Толба М.А. Оптимальное размещение батарей конденсаторов в радиальной распределительной сети. Электричество. 2017. № 6. С. 16-23.
4. Sultana S., Roy P.K. Optimal capacitor placement in radial distribution systems using teaching learning based optimization. Electrical Power & Energy Systems. 2014. vol. 54. pp. 387-398.