

# СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ

Семенова Л.А., канд. техн. наук, доцент, Казаков Д.С.  
Оренбургский государственный университет

Задача компенсации реактивной мощности является неотъемлемой частью решения вопросов повышения эффективности передачи, распределения и потребления электрической энергии. Решение задачи оптимального размещения КУ в электрических сетях – это определение наилучшего варианта относительно выбранного критерия или критериев при соблюдении всех технических условий нормальной работы электрической сети и электроприемников.

Оптимальное размещение компенсирующих устройств (КУ) в распределительных электрических сетях в значительной мере предопределяет экономию денежных и материальных ресурсов, уменьшение потерь мощности, а также повышение качества электроснабжения потребителей.

Математическая модель однокритериальной задачи выбора оптимального размещения КУ состоит из целевой функции:

$$Z(x_1, x_2, \dots, x_n) \rightarrow \text{extr}, \quad (1)$$

ограничений:

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n) \leq b_1, \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n) = b_2, \\ \dots \\ f_m(x_1, x_2, \dots, x_n) > b_m \end{cases} \quad (2)$$

и граничных условий:

$$d_i \leq x_i \leq D_i, \quad i = \overline{1, n} \quad (3)$$

где  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – искомые переменные, общее количество которых равно  $n$ ;

$b_j$  – свободные члены,  $j = \overline{1, m}$ ;

$m$  – общее количество ограничений;

$d_i, D_i$  – нижняя и верхняя границы диапазона изменения переменной  $x_i$ .

В работе приводится сравнительный анализ наиболее распространенных методов решения задачи оптимального размещения КУ.

Одним из методов решения рассматриваемой задачи является метод нелинейного квадратичного программирования [1]. Использование данного метода предполагает рассмотрение режима максимальных реактивных нагрузок энергосистемы, на основе которого определяется мощность КУ. Снижение потерь электрической энергии определяется по методу времени максимальных потерь. Целевая функция (1) представляет собой приведенные затраты и включает вектор мощности существующих источников реактивной мощности,

вектор искомых мощностей дополнительных КУ, а также вектор, элементы которого характеризуют приведенные затраты на единицу мощности КУ. При решении задачи вводятся допущения: 1) все существующие источники реактивной мощности полностью загружены; 2) параметры всех элементов сети приведены к одному номинальному (базисному) напряжению.

В работе [2] предложено решение задачи на основе оптимизации стационарных режимов электрической сети градиентным методом. Отмечено, что при выборе мест размещения КУ необходимо рассматривать ряд представительных режимов. В качестве критерия оптимальности (целевой функции) рассматриваются приведенные затраты. Оптимальное решение находится путем проведения серии расчетов и последующего технико-экономического сравнения вариантов.

В работе [3] для решения рассматриваемой задачи используется метод потенциалов затрат. Потенциал затрат на передачу реактивной мощности по электрической сети – величина, зависящая от параметров сети, реактивных нагрузок узлов и распределения реактивных мощностей между источниками.

В соответствии с алгоритмом метода необходимо составить условную расчетную схему электрической сети, содержащую активные сопротивления элементов и расчетные реактивные нагрузки узлов сети. Метод позволяет по условию минимума приведенных затрат выбрать оптимальное размещение дополнительных КУ с одновременным определением наиболее целесообразной загрузки существующих источников реактивной мощности.

При установке дополнительной мощности КУ значение потенциала затрат снижается, поскольку уменьшаются потери мощности в электрической сети. Потенциал затрат на генерацию реактивной мощности дополнительными компенсирующими устройствами в узле определяется технико-экономическими показателями КУ и степенью их использования. Достоинство метода потенциалов затрат – применение специального экономического критерия, позволяющего упростить процесс решения задачи. Недостаток метода – составление условной расчетной схемы сети только с активными сопротивлениями и реактивными нагрузками. В связи с этим в алгоритме отсутствует учет ограничений по напряжению. Кроме того, не учитываются потери реактивной мощности от протекания активных мощностей в сети, что может повлиять на выбор оптимальных мест установки компенсирующих устройств.

Помимо рассмотренных в данной работе методов, существуют и другие, отличающиеся исходной постановкой задачи и ее последующей реализацией. Их объединяет то, что они относятся к прямым методам решения, основанным на итерационных процессах вычисления и сравнения значений оптимизируемых функций. При этом исходная задача является, как правило, задачей безусловной оптимизации, в которой определяется абсолютный экстремум целевой функции без дополнительных ограничений [4].

Необходимо отметить, что задачу оптимального размещения КУ в электрических сетях следует рассматривать как задачу условной оптимизации

[5], в которой определяется относительный экстремум целевой функции (1), т. е. экстремум при наличии связующих ограничений на ее переменные. Такой подход позволит получить решения, максимально отвечающие условиям реальной задачи.

Очевидно, что решение задач условной оптимизации значительно сложнее решения задач безусловной оптимизации. Поэтому естественным является стремление упростить задачу условной оптимизации (поиск относительного экстремума функции) и свести ее к задаче безусловной оптимизации (поиск абсолютного экстремума) [5]. Одним из наиболее распространенных подходов, в котором реализуется данная процедура, является метод неопределенных множителей Лагранжа [6]. Данный метод относится к непрямым методам решения и широко используется при решении нелинейных оптимизационных задач [7]. Метод неопределенных множителей Лагранжа применяют для решения задач такого же класса сложности, как и при использовании прямых методов решения, но при наличии ограничений на независимые переменные.

В соответствии с методом Лагранжа вместо относительного экстремума функции (1) при ограничениях (2) ищется абсолютный экстремум функции Лагранжа:

$$L(x_1, \dots, x_n, \lambda_1, \dots, \lambda_m) = Z(x_1, \dots, x_n) \pm \lambda_1 f_1(x_1, \dots, x_n) \pm \dots \pm \lambda_m f_m(x_1, \dots, x_n) \quad (4)$$

где  $Z(x_1, \dots, x_n)$  – целевая функция;

$\lambda_1, \dots, \lambda_m$  – неопределенные множители Лагранжа. Знак «+» используется, если решается задача минимизации, знак «-» – если решается задача максимизации;

$f_1(x_1, \dots, x_n), \dots, f_m(x_1, \dots, x_n)$  – ограничения.

На основании проведенного сравнительного анализа методов решения задачи оптимального распределения КУ в электрических сетях в работе выдвинута гипотеза о целесообразности использования метода Лагранжа, позволяющего найти решение задачи при наличии ограничений. Дальнейшее исследование планируется направить на разработку соответствующего алгоритма и его программную реализацию.

#### *Список литературы*

1. Александров, О. И. Уменьшение потерь в сложносамкнутаой электрической сети путем компенсации реактивных мощностей нагрузок / О. И. Александров, Л. П. Падалко, Н. Н. Никольская. – В кн. : Опыт планирования, анализа потерь энергии и разработка мероприятий по их снижению в энергосистеме. – Минск : Высшая школа, 1974. – С. 65-71.

2. Маркман, Г. З. Энергоэффективность преобразования и транспортировки электрической энергии / Г. З. Маркман. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 184 с.

3. Холмский, В. Г. Решение проектной задачи оптимального распределения реактивных мощностей методом потенциалов затрат / В. Г.

Холмский, Ю. В. Щербина, С. В. Колесников. – В кн. : *Электрические сети и системы*. – Львов : Вища школа, 1968. – Вып. 4. – С. 6-9.

4. Беляевский, Р. В. К вопросу об оптимизации размещения компенсирующих устройств в электрических сетях промышленных предприятий / Р. В. Беляевский, В. М. Ефременко // *Федоровские чтения – 2011. ХLI Всероссийская научно-практическая конференция (с международным участием) с элементами научной школы для молодежи*. Москва, 9-11 ноября 2011 г. / Под ред. Б.И. Кудрина, Ю.В. Матюниной. – М. : Издательский дом МЭИ, 2011. – С. 63-65.

5. Костин, В. Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики / В. Н. Костин. – СПб. : СЗТУ, 2003. – 120 с.

6. Семенова, Л. А. К вопросу выбора оптимальной мощности и мест размещения устройств компенсации реактивной мощности / Л. А. Семенова, А. О. Инжеватова, Р. М. Салимов // *Энергетика: состояние, проблемы, перспективы : труды VIII Всероссийской научно-технической конференции*. – Оренбург: ООО Агентство «Пресса», 2016. – С. 15-19.

7. Банди, Б. Методы оптимизации. Вводный курс / Б. Банди. – М. : Радио и связь, 1988. – 128 с.