

УДК 621.316.016.25

В.М. Ефременко, Р.В. Беляевский

РАСЧЕТ ОПТИМАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ КОМПЕНСИРУЮЩИХ УСТРОЙСТВ МЕТОДОМ МНОЖИТЕЛЕЙ ЛАГРАНЖА

Задача выбора компенсирующих устройств является неотъемлемой частью комплекса вопросов проектирования систем электроснабжения. От рационального выбора и размещения компенсирующих устройств зависят режимы напряжений и реактивных мощностей в электрической сети, потери электроэнергии в элементах сети, габариты и пропускная способность сетевого оборудования и др. При этом выбор компенсирующих устройств в системах электроснабжения представляет собой оптимизационную задачу, цель которой заключается в нахождении такого решения, которое обеспечивает максимальный экономический эффект при соблюдении всех технических условий нормальной работы электрических сетей и установленного оборудования.

В общем случае при выборе компенсирующих устройств подлежат решению две взаимосвязанные задачи: определение оптимальной суммарной мощности компенсирующих устройств, удовлетворяющей требованиям баланса реактивных мощностей в сети, и оптимизация их размещения между отдельными узлами нагрузки. Наиболее полный подход к решению данной задачи заключается в совместном рассмотрении электрических сетей с различными номинальными напряжениями от электростанций до электроприемников. Однако, очевидно, подобный подход практически осуществить невозможно. В связи с этим, неизбежно разделение всех электрических сетей на подсистемы и раздельное решение для них задачи оптимизации размещения компенсирующих устройств. Кроме того, следует учитывать, что схема и нагрузки сети не остаются постоянными, а изменяются с течением времени. В этих условиях одни и те же компенсирующие устройства будут использоваться с различной эффективностью.

Таким образом, решение задачи оптимизации размещения компенсирующих устройств, сформулированной в общем виде, представляет собой значительные трудности. Поэтому естественным представляется использование таких подходов к ее решению, которые содержат определенные допущения. При определении оптимального размещения компенсирующих устройств в электрической сети постановка задачи может рассматриваться в различных вариантах. В одном из наиболее распространенных вариантов целевая функция формулируется в виде приведенных затрат и при оптимальном размещении компенсирующих устройств находится их суммарная мощность, соответствующая минимуму целевой функции. При постановке задачи по другому варианту суммар-

ная мощность компенсирующих устройств задается априорно, например, из условия баланса реактивных мощностей в сети. Тогда задача состоит в том, чтобы оптимально распределить имеющуюся мощность по узлам сети.

Как в первом, так и во втором случае возникает необходимость полностью formalизовать процесс решения задачи. Это можно сделать путем применения различных математических методов оптимизации.

Среди методов оптимизации, используемых для выбора компенсирующих устройств, наибольшее распространение получили: метод покоординатного спуска, метод нелинейного квадратичного программирования, матрично-вычислительный метод и др. [1]. Данные методы отличаются исходной постановкой задачи и ее последующей реализацией, однако их объединяет то, что все они относятся к прямым методам решения, основанным на итеративных 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 ограничений и граничных условий.

Вместе с тем, задачу оптимизации размещения компенсирующих устройств следует рассматривать как задачу условной оптимизации [2, 3]. В этих задачах определяется относительный экстремум целевой функции, т. е. экстремум целевой функции при наличии связующих ограничений и граничных условий на ее переменные. Это позволяет получать решения, в наибольшей степени соответствующие реальной задаче.

Очевидно, что решение задач условной оптимизации значительно сложнее решения задач безусловной оптимизации. Поэтому естественно стремление свести задачу условной оптимизации (поиск относительного экстремума) к более простой задаче безусловной оптимизации (поиску абсолютного экстремума).

Одним из общих подходов, в котором реализуется данная процедура, является метод неопределенных множителей Лагранжа. Данный метод относится к непрямым методам решения и широко используется для решения нелинейных оптимизационных задач.

Метод Лагранжа позволяет находить условный экстремум нелинейной функции

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

n переменных при *m* ограничениях:

$$\begin{cases} f_1(x_1, x_2, \dots, x_n, b_1) = 0, \\ f_2(x_1, x_2, \dots, x_n, b_2) = 0, \\ \dots \\ f_m(x_1, x_2, \dots, x_n, b_m) = 0. \end{cases} \quad (2)$$

В соответствии с данным методом вместо относительного экстремума целевой функции (1) при ограничениях (2) определяется абсолютный экстремум функции Лагранжа

$$L = Z(x_1, x_2, \dots, x_n) + \sum_{i=1}^m \lambda_i f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, b_i) \quad (3)$$

где $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ — множители Лагранжа

Один из путей поиска абсолютного экстремума функции (3) требует обращения в нуль ее частных производных:

$$\begin{cases} \partial L / \partial x_k = \partial Z / \partial x_k + \sum_{i=1}^m \lambda_i \partial f_i / \partial x_k = 0, & k = \overline{1, n} \\ \partial L / \partial \lambda_i = f_i(x_1, x_2, \dots, x_n, b_i) = 0, & i = \overline{1, m}. \end{cases} \quad (4)$$

Решение (4) дает координаты абсолютного минимума функции (3) или относительного минимума целевой функции (1) при ограничениях (2).

Использованием такого подхода нами была решена задача оптимизации размещения компенсирующих устройств в цеховой электрической сети 10/0,4 кВ промышленного предприятия (рис. 1).

В рассматриваемой схеме имеется n потребителей (асинхронных двигателей), реактивные нагрузки Q_i которых известны ($\sum Q_i = 180$ кВАр). Искомыми переменными являются мощности компенсирующих устройств Q_{ki} , Q_{k2} , ..., Q_{kn} , которые могут быть установлены в узлах сети. Требуется найти оптимальное распределение суммарной

мощности компенсирующих устройств Q_k между потребителями, т. е. имеет место балансовая постановка задачи. Критерием оптимизации является минимум потерь активной мощности в сети. Ограничение вводится по установленной мощности компенсирующих устройств, которая может варьироваться в зависимости от нормируемой величины коэффициента реактивной мощности $tg\varphi_{норм}$. Данное ограничение является наиболее распространенным, однако для более полного учета влияющих факторов в задачу могут вводиться и другие ограничения: по уровням напряжения в узлах сети, по статической устойчивости нагрузки, по стоимости компенсирующих устройств и т. д. [4].

Для указанных условий поставлена задача:

$$\begin{cases} L = \sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{ki})^2 R_i / U^2 + \lambda \left(\sum_{i=1}^n Q_{ki} - Q_k \right) \rightarrow \min, \\ \partial L / \partial Q_{k1} = 0; \partial L / \partial Q_{k2} = 0; \dots; \partial L / \partial Q_{kn} = 0, \\ \partial L / \partial \lambda = \sum_{i=1}^n Q_{ki} - Q_k = 0. \end{cases} \quad (5)$$

где R_i — активное сопротивление i -й линии, Ом; U — напряжение сети, кВ.

Решение системы (5) позволило определить оптимальные значения мощности компенсирующих устройств, устанавливаемых в узлах сети 0,4 кВ: $Q_{k1} = 38,57$ кВАр, $Q_{k2} = 17,59$ кВАр, $Q_{k3} = 20,84$ кВАр. Остальная часть реактивной мощности, потребляемой электродвигателями, поступает к ним из сети 10 кВ ($Q_c = 103$ кВАр). При этом обеспечивается минимум потерь активной мощности в электрической сети.

Далее для схемы на рис. 1 была построена модель цеховой электрической сети (рис. 2) с использованием программной среды MATLAB

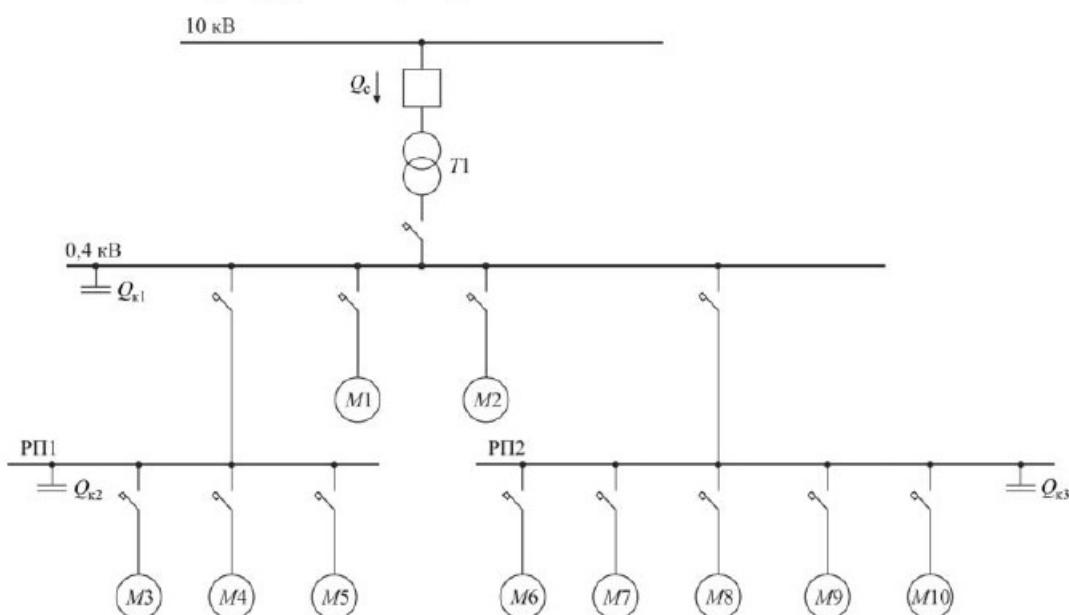


Рис. 1. Схема электроснабжения цеха

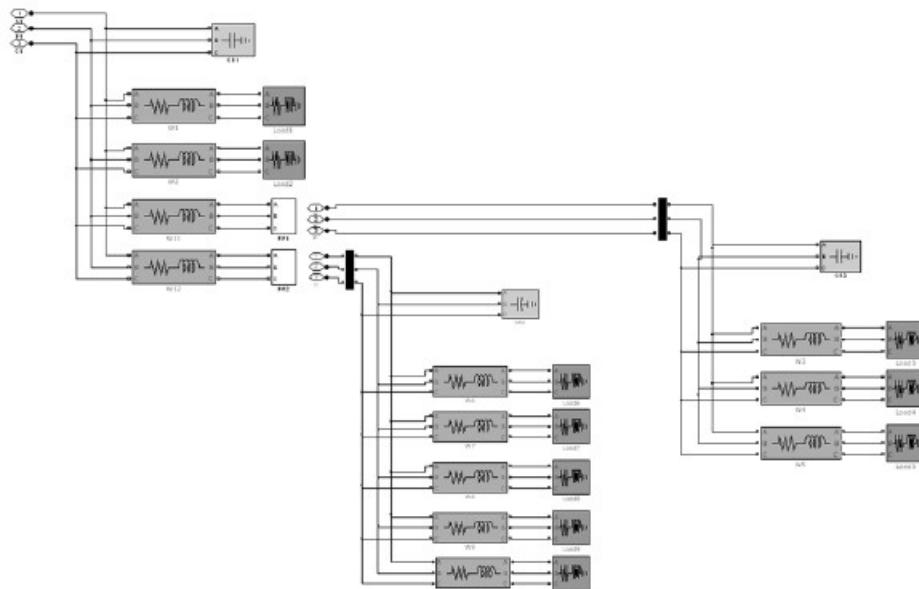
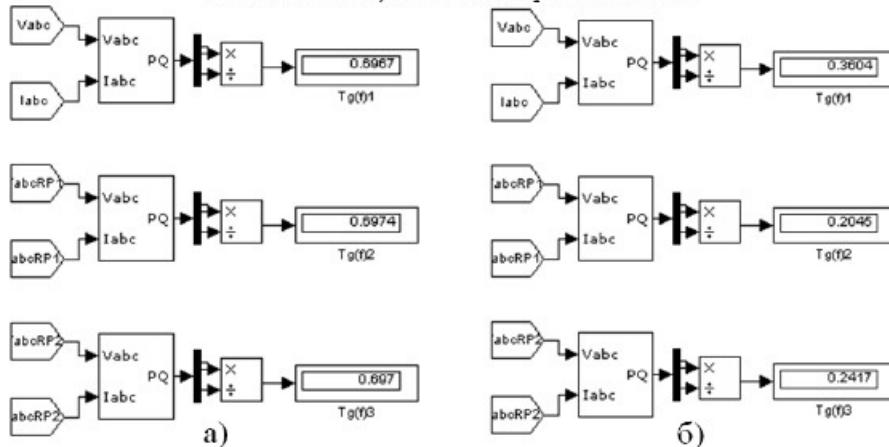


Рис. 2. Модель цеховой электрической сети

Рис. 3. Результаты измерений коэффициента реактивной мощности $\operatorname{tg}\phi$ в сети:
а – до установки компенсирующих устройств; б – при оптимальном
размещении компенсирующих устройств

Simulink, в состав которой входит библиотека блоков для имитационного моделирования электротехнических устройств SimPowerSystems [5].

С помощью полученной модели были измерены коэффициенты реактивной мощности $\operatorname{tg}\phi$ на шинах распределительных пунктов сети до установки компенсирующих устройств и после их установки при оптимальном размещении по методу Лагранжа. Результаты измерений представлены на рис. 3.

Из рис. 3 видно, что до установки компенсирующих устройств средний коэффициент реактивной мощности в сети $\operatorname{tg}\phi_{cp}$ составлял 0,697. После установки компенсирующих устройств и при оптимальном их размещении $\operatorname{tg}\phi_{cp}$ уменьшился до 0,269. Данное значение коэффициента реактивной мощности не превышает нормируемого значения $\operatorname{tg}\phi_{\text{норм}} = 0,4$, установленного Порядком [6] для сетей напряжением 6–20 кВ.

Таким образом, применение метода неопределенных множителей Лагранжа для решения задачи оптимизации размещения компенсирующих устройств показало достаточно высокую эффективность. Полученные результаты могут использоваться на промышленных предприятиях и в сетевых организациях при решении практических вопросов компенсации реактивной мощности, связанных с выбором мощности и мест установки компенсирующих устройств. Рассмотренные алгоритмы могут применяться также при определении оптимальных законов управления в средствах регулирования реактивной мощности. Оптимизация размещения компенсирующих устройств в сочетании с оперативным регулированием реактивной мощности обеспечит высокий энергосберегающий эффект за счет снижения потерь электроэнергии в электрических сетях и будет способствовать повышению их энергоэффективности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поступов, Г. Е. Компенсирующие и регулирующие устройства в электрических системах / Г. Е. Поступов, Н. М. Сыч, В. Т. Федин. – Л. : Энергоатомиздат, 1983. – 112 с.
2. Костин, В. Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики : учеб. пособие. – СПб. : СЗТУ, 2003. – 120 с.
3. Веников, В. А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем / В. А. Веников, В. Г. Журавлев, Т. А. Филиппова. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 352 с.
4. Беляевский, Р. В. Технические ограничения в задачах оптимизации размещения компенсирующих устройств // Актуальные вопросы современной техники и технологии : сб. докл. – Липецк : Издательский центр «Гравис», 2012. – С. 70–72.
5. Черных, И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. – М. : ДМК Пресс ; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.
6. Порядок расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах энергоснабжения) : утв. Приказом М-ва промышленности и энергетики Рос. Федерации № 49 от 22.02.2007 : ввод в действие с 20.04.2007.

□ Авторы статьи:

Ефременко

Владимир Михайлович,
канд. техн. наук, ст. научн. сотр.,
зав. каф. электроснабжения горных
и промышленных предприятий
КузГТУ.

E-mail: evm_kegpp@kuzstu.ru

Беляевский

Роман Владимирович,
ст. преп. каф. электроснабжения
горных и промышленных
предприятий КузГТУ.
E-mail: belaeovsky@mail.ru

УДК 621.3.051.3

В.М. Ефременко, Р.А. Храмцов, Р.Б. Наумкин, М.С. Медведев

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ УЧЕТА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ В БЫТОВОМ СЕКТОРЕ

Количественная оценка потребляемой электроэнергии производится посредством приборов учета (ПУ). Для точного отображения динамики электропотребления по полученным при измерениях данным необходимо наличие современных приборов учета с высоким классом точности. Построение такой системы является одной из основных задач электросетевых компаний.

Значительная часть ныне функционирующих электроизмерительных приборов не соответствует техническим и экономическим требованиям. Это приводит к возникновению сверхнормативных погрешностей измерений и, как следствие, коммерческих потерь [1]. В сложившихся условиях становится очевидной необходимость модернизации и повышения эффективности работы систем учета электрической энергии.

В первую очередь это касается замены парка индукционных счетчиков с большой погрешностью на современные электронные, установки выносных приборов учета и общедомового учета, защиты от хищений, а также минимизации участия людей в регистрации показаний путем организации автоматизированного контроля и учета электроэнергии (АИС КУЭ).

В соответствии с Федеральным законом РФ №261 «Об энергосбережении ...» [2] «расчеты за энергетические ресурсы должны осуществляться на основании данных о количественном значении энергетических ресурсов, произведенных, переданных, потребленных, определенных при помощи приборов учета используемых энергетических ресурсов» и «здания, строения, сооружения и иные объекты, в процессе эксплуатации которых используются энергетические ресурсы, в том числе временные объекты, ... должны быть оснащены приборами учета используемых энергетических ресурсов». В этой связи наличие ПУ, отвечающих современным стандартам, –неотъемлемое условие содержания жилых помещений потребителей.

Несмотря на то, что модернизация системы учета является одним из наиболее активно проводимых мероприятий по снижению потерь, в настоящее время нет общепринятых методик по расчету экономического эффекта от замены счетчиков электроэнергии у потребителей. Оценив отношение уровня затрат и ожидаемой прибыли, а также определившись с территориями, приоритетными для проведения работ, можно более рационально планировать и осуществлять совершенст-