

ОПТИМИЗАЦИЯ РАЗМЕЩЕНИЯ УСТРОЙСТВ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ СПЕЦИАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ

В. В. КАРАГОДИН, Д. В. РЫБАКОВ

Военно-космическая академия им. А. Ф. Можайского, 197198, Санкт-Петербург, Россия

E-mail: vladimirkar@rambler.ru

Сформулирована оптимизационная технико-экономическая задача определения мощности и выбора мест установки устройств компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях специальных объектов. Решение задачи позволит учесть противоречивые требования, предъявляемые к распределительным электрическим сетям при проектировании и эксплуатации. Определены допущения, которые позволяют упростить решение и не вносят при этом существенной погрешности в получаемые результаты. Приведены методы решения поставленной задачи. Дана оценка результатам, полученным в ходе решения оптимизационной задачи определения мощности и выбора мест установки устройств компенсации.

Ключевые слова: математическая модель, распределительная электрическая сеть, компенсация реактивной мощности, оптимизация.

Введение. В условиях ужесточения требований к эффективности, техническому уровню, надежности и безопасности распределительных электрических сетей [1], а также в отсутствие достаточных средств на полную реконструкцию оборудования систем электроснабжения в Российской Федерации актуальной становится задача максимального использования действующих линий электропередачи и трансформаторов. Решить эту задачу позволит переход к энергосберегающим технологиям, обеспечивающим уменьшение электропотребления и снижение потерь электроэнергии, в том числе за счет применения устройств компенсации реактивной мощности (УКРМ).

Следует заметить, что в существующих электрических сетях специальных комплексов оборудование для компенсации реактивной мощности не предусмотрено. В то же время необходимость применения такого оборудования подтверждается результатами мониторинга режимов работы ряда специальных объектов [2]. Дополнительные и значительные преимущества дает оптимальное размещение УКРМ. Выбор оптимального варианта может осуществляться как на стадии проектирования, так и на стадии эксплуатации распределительных электрических сетей (РЭС). При этом должны учитываться как экономические, так и технические требования, которые зачастую носят противоречивый характер.

Учитывая, что границы балансовой принадлежности и эксплуатационной ответственности на специальных объектах устанавливаются, как правило, на уровне напряжения 35 кВ, актуальным является решение задачи размещения УКРМ в разомкнутых распределительных электрических сетях 0,4—6(10) кВ.

Постановка задачи. Для согласования технико-экономических требований оптимизационная задача может быть сведена к нахождению подмножества парето-оптимальных решений, каждое из которых не может быть улучшено ни по одному из критериев без ухудшения по какому-нибудь другому.

Получение математической модели принятия решений заключается в определении вектора $\mathbf{F}(\mathbf{Q}_k) = \{f_1(\mathbf{Q}_k), f_2(\mathbf{Q}_k), \dots, f_r(\mathbf{Q}_k)\}$, включающего совокупность частных критериев, которые определяют ценность (полезность) решения поставленной задачи с точки зрения разных требований, и множества $\mathbf{Q}_k = \left\{ \left[Q_{k1}, Q_{k2}, \dots, Q_{kn} \right]^T : Q_k \subset R^+ \right\}$, представляющего набор устройств компенсации Q_{ki} , который планируется установить в РЭС.

Формирование такой модели — трудный процесс, в ходе которого, с одной стороны, следует учесть все аспекты реальной задачи, с другой стороны, модель не должна быть чрезмерно сложной, чтобы для ее исследования и решения можно было успешно применить разработанный к настоящему времени математический аппарат [6, 7].

Формирование векторного критерия. Для решения задачи оптимизации мощности и выбора мест установки УКРМ в РЭС сформирован следующий состав частных целевых функций, который определяет полезность (ценность) решения с точки зрения разных требований.

1. Стоимость установки УКРМ, которая складывается из затрат на батареи статических конденсаторов и расходов, связанных с их установкой и подключением (рассчитываются в рублях):

$$f_1 = \sum_{i=1}^n (c_i Q_{ki} + p_i) \rightarrow \min,$$

где Q_{ki} — установленная мощность компенсации в i -м узле системы, кВАр; c_i — удельная стоимость 1 кВАр УКРМ, зависящая от класса напряжения в узле подключения, руб./кВАр; p_i — расходы, связанные с установкой и подключением УКРМ.

2. Стоимость потерь электрической энергии на ее транспортировку (в линиях электропередачи, трансформаторных подстанциях) за расчетный период (в рублях):

$$f_2 = \left(\sum_{j=1}^m a_j (P_{nj}^2 + \left(Q_{nj} - \sum_{i=1}^n Q_{ki} \right)^2) \right) c_{\text{ээ}} T_{\text{расч}} + \\ + \left(\Delta P_{\text{хх}} T + \Delta P_{\text{кз}} \left(\sqrt{P_{\text{нтр}}^2 + (Q_{\text{нтр}} - \sum_{i=1}^n Q_{ki})^2 / S_{\text{ном.тр}}} \right)^2 \right) \tau c_{\text{ээ}} \rightarrow \min,$$

где первое слагаемое — затраты, связанные с потерями электрической энергии в линиях электропередачи, руб.; второе — затраты, связанные с потерями электрической энергии в трансформаторах напряжением 6(10)/0,4 кВ, руб. Здесь j — номер линии электропередачи с подключенной к ней нагрузкой, $j = 1, \dots, m$; a_j — коэффициенты, зависящие от параметров линии электропередачи (удельного активного сопротивления $r_{\text{л0}}$ и длины $l_{\text{л}}$) и уровня напряжения $U_{\text{л}}$, $a = r_{\text{л0}} l_{\text{л}} / U_{\text{л}}^2$; P_{nj} , Q_{nj} — активная и реактивная нагрузка j -й линии распределительной электрической сети; $P_{\text{нтр}}$, $Q_{\text{нтр}}$ — активная и реактивная нагрузка трансформатора; $S_{\text{ном.тр}}$ — номинальная мощность трансформатора; $\Delta P_{\text{хх}}$ — активные потери холостого хода на перемагничивание и создание вихревых токов в стали трансформатора (потери в стали); $\Delta P_{\text{кз}}$ — активные потери короткого замыкания на нагрев обмоток трансформатора (потери в меди); $T_{\text{расч}}$ — время, за которое рассчитываются потери активной мощности в линии

электропередачи; T — время работы трансформатора; τ — время максимальных потерь; $c_{\text{ээ}}$ — стоимость 1 кВт·ч электрической энергии.

Кроме выполнения требования наибольшей экономичности при выборе УКРМ необходимо обеспечить соблюдение требований нормативно-правовых документов в области компенсации реактивной мощности, а именно к значению коэффициента реактивной мощности.

3. Значение коэффициента реактивной мощности для потребителей, присоединенных к электрическим сетям [3], в зависимости от уровня напряжения в точке присоединения, определяется из соотношения

$$f_3 = \frac{Q_{\text{н}} - \sum_{i=1}^n Q_{\text{к}i}}{P_{\text{н}}} \rightarrow \min.$$

При необходимости контроля f_3 в нескольких узлах рассматриваемой РЭС целевая функция записывается для каждого узла.

4. Целевая функция, описывающая одну из важнейших характеристик качества электроэнергии — отклонение напряжения в точках присоединения потребителей [4] — может быть представлена в следующем виде:

$$f_4 = \sum_{j=1}^m \frac{P_j R_{\text{л}j} + \left(Q_{\text{н}j} - \sum_{i=1}^n Q_{\text{к}i} \right) X_{\text{л}j}}{U_{\text{л}j}^2} \cdot 100 \rightarrow \min,$$

где $R_{\text{л}j}$ и $X_{\text{л}j}$ — активное и реактивное сопротивление в линии электропередачи.

Таким образом, все рассмотренные частные критерии являются негативными, т.е. необходимо стремиться к их уменьшению $f_r \rightarrow \min, r = \overline{1, 4}$.

Окончательно задача оптимизации мощности и выбора мест установки УКРМ в РЭС напряжением 0,4—6(10) кВ может быть сформулирована следующим образом: необходимо найти множество парето-оптимальных решений задачи векторной оптимизации, где вектор целей $\mathbf{F}(Q_{\text{к}}) = \{f_1(Q_{\text{к}}), f_2(Q_{\text{к}}), f_3(Q_{\text{к}}), f_4(Q_{\text{к}})\} \rightarrow \min$:

$$\mathbf{F}(Q_{\text{к}})^T = \left\{ \begin{array}{l} \sum_{i=1}^n (c_i Q_{\text{к}i} + p_i) \\ \sum_{j=1}^m a_j \left(P_{\text{н}j}^2 + \left(Q_{\text{н}j} - \sum_{i=1}^n Q_{\text{к}i} \right)^2 \right) c_{\text{ээ}} T_{\text{расч}} + \\ + \left(\Delta P_{\text{xx}} T + \Delta P_{\text{кз}} \left(\sqrt{P_{\text{н} \text{тр}}^2 + \left(Q_{\text{н} \text{тр}} - \sum_{i=1}^n Q_{\text{к}i} \right)^2} / S_{\text{ном.тр}} \right)^2 \right) \tau c_{\text{ээ}} \\ \frac{Q_{\text{н}} - \sum_{i=1}^n Q_{\text{к}i}}{P_{\text{н}}} \\ \sum_{j=1}^m \frac{P_j R_{\text{л}j} + \left(Q_{\text{н}j} - \sum_{i=1}^n Q_{\text{к}i} \right) X_{\text{л}j}}{U_{\text{л}j}^2} \cdot 100 \end{array} \right\} \rightarrow \min.$$

Для нахождения парето-оптимальных решений могут быть использованы весовой метод, метод рабочих характеристик, метод главного критерия, метод последовательных уступок, метод идеальной точки. Согласно этим методам, исходная многокритериальная задача оптимизации сводится к некоторому множеству однокритериальных (скалярных) оптимизационных задач при разных типах ограничений. Полученное множество оптимальных решений используется для формирования подмножества парето-оптимальных решений, оптимальных по совокупности показателей качества.

Допущения. Решение задачи, сформулированной в общем виде, представляет значительные трудности. Поэтому желательно найти пути решения, которые позволят его упростить, не внося погрешности в получаемые результаты.

В качестве допущений при решении рассматриваемой задачи примем, что:

- вырабатываемая питающей системой (электрической сетью более высокого уровня напряжения) реактивная мощность является оптимальной для РЭС;
- активные и реактивные нагрузки не зависят от значений напряжения у потребителей;
- распределение активных мощностей не изменяется в результате установки устройств компенсации реактивной мощности;
- потери активной мощности на участке РЭС рассчитываются по номинальному напряжению на этом участке.

Принятие этих допущений позволяет упростить решение задачи и применять в расчетах параметры элементов системы электроснабжения (трансформаторов, кабельных линий электропередачи), а также значения активных и реактивных нагрузок в узлах сети.

Пример. Рассмотрим решение задачи оптимального размещения УКРМ в РЭС. На рис. 1 приведена схема фрагмента РЭС специального объекта с реальными параметрами линий электропередачи, трансформатора и активными и реактивными нагрузками потребителей электрической энергии.

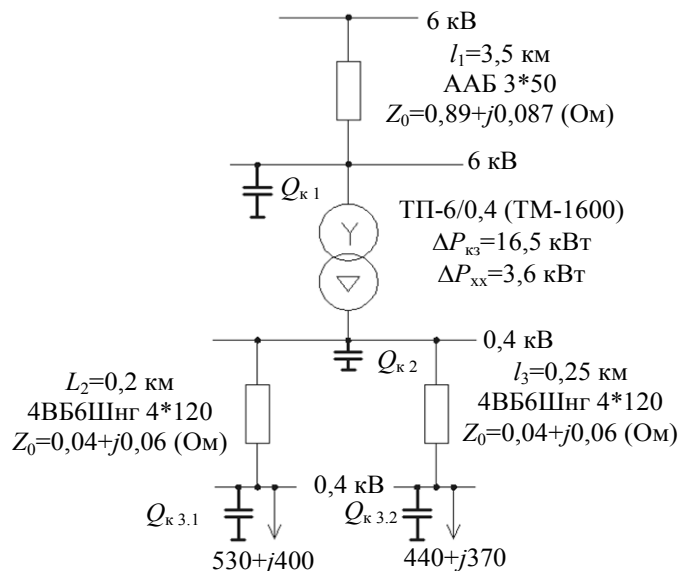


Рис. 1

Требуется определить места установки и мощности УКРМ $Q_{к1}$, $Q_{к2}$, $Q_{к3.1}$ и $Q_{к3.2}$ в РЭС исходя из условий:

- минимума суммарных затрат на установку УКРМ;
- минимума суммарных затрат на потери активной мощности в линиях электропередачи, трансформаторных подстанциях;
- соблюдения требований к значению коэффициента реактивной мощности $\text{tg}\varphi$ для потребителей, присоединенных к электрическим сетям, а именно $\text{tg}\varphi_{\text{норм}}^{6 \text{ кВ}} \leq 0,4$, $\text{tg}\varphi_{\text{норм}}^{0,4 \text{ кВ}} \leq 0,35$

($\text{tg}\varphi_{\text{норм}}^{6 \text{ кВ}}$ и $\text{tg}\varphi_{\text{норм}}^{0,4 \text{ кВ}}$ — нормативные значения коэффициентов реактивной мощности для потребителей, присоединенных к участку сети напряжением 6 и 0,4 кВ).

— значения отклонений напряжения на зажимах электроприемников $\Delta U \leq 10\%$ — для линии электропередачи напряжением 6 кВ, $\Delta U \leq 5\%$ — для линий электропередачи напряжением 0,4 кВ.

При этом будем считать, что удельные затраты на установку УКРМ составляют $c_1 = 500$ руб./кВАр, $c_2 = 600$ руб./кВАр, $c_3 = c_{3,1} = c_{3,2} = 2000$ руб./кВАр, $c_{\text{эз}} = 5$ руб., $T_{\text{расч}} = T = 8760$ ч, $\tau = 4380$ ч.

Для решения задачи целесообразно использовать метод главного критерия [5, 6], согласно которому исходная многокритериальная задача оптимизации сводится к задаче оптимизации одного из показателей (целевой функции), который объявляется главным. В рассматриваемом примере в качестве главного критерия примем обобщенную целевую функцию:

$$f_0 = f_1 + f_2 = c_1 Q_{\text{к}1} + c_2 Q_{\text{к}2} + c_3 (Q_{\text{к}3,1} + Q_{\text{к}3,2}) + a_1 \left(P_{\text{н}1}^2 + \left(Q_{\text{н}1} - Q_{\text{к}1} - Q_{\text{к}2} - \sum_{i=1}^n Q_{\text{к}3,i} \right)^2 \right) c_{\text{эз}} T_{\text{расч}} +$$

$$+ \left(\Delta P_{\text{хх}} T + \Delta P_{\text{кз}} \left(\sqrt{P_{\text{н}2}^2 + (Q_{\text{н}2} - Q_{\text{к}2} - \sum_{i=1}^n Q_{\text{к}3,i})^2 / S_{\text{ном.тр}}} \right)^2 \tau \right) c_{\text{эз}} +$$

$$+ \sum_{i=1}^2 a_{3,i} \left(P_{\text{н}3,i}^2 + (Q_{\text{н}3,i} - Q_{\text{к}3,i})^2 \right) c_{\text{эз}} T_{\text{расч}} \rightarrow \min.$$

Значения частных целевых функций не должны превышать установленных условиями задачи. На целевую функцию f_1 необходимо наложить ограничение в виде неравенства, которое будет описывать финансовые возможности лица, принимающего решение. Оптимизационная задача решается последовательно для всех допустимых комбинаций значений $f_1, f_{3,1}, f_{3,2}, f_{4,1}, f_{4,2}, f_{4,3}$. При этом определяется некоторое подмножество парето-оптимальных вариантов размещения УКРМ (мощности и места установки УКРМ).

Численное решение поставленной задачи получено с помощью программного обеспечения EXCEL методом обобщенного понижающего градиента, который является вариантом метода наискорейшего спуска [7].

Результаты решения оптимизационной задачи в зависимости от величины затрат на приобретение и установку УКРМ представлены в таблице.

Показатели	Места установки и мощности УКРМ							
	$Q_{\text{к}1}/Q_{\text{к}2}/Q_{\text{к}3,1}/Q_{\text{к}3,2}$							
	0/0/ 87/113	123/0/ 87/130	112/0/ 87/183	44/0/ 122/216	0/0/ 184/216	72/0/ 215/216	178/71/ 215/216	141/127/ 215/216
f_1 , тыс. руб.	400	500	600	700	800	900	1000	1100
f_3 , о.е.	0,59	0,44	0,4	0,4	0,38	0,28	0,09	0,07
$f_{3,1}$, о.е.	0,59	0,59	0,59	0,52	0,41	0,35	0,35	0,35
$f_{3,2}$, о.е.	0,58	0,55	0,42	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
$f_{4,1}$, %	8,9	8,8	8,7	8,7	8,7	8,6	8,5	8,5
$f_{4,2}$, %	5	5	5	5	4	4	4	4
$f_{4,3}$, %	5	5	5	5	4	4	4	4
$f_0 = f_1 + f_2$, млн руб.	7,074	6,617	6,518	6,510	6,506	6,328	6,182	6,180

Для оценки результатов, полученных в ходе решения задачи оптимизации размещения УКРМ в РЭС, на рис. 2 приведена диаграмма Парето, построенная в соответствии с данными таблицы. Приведены зависимости показателей вектора цели, а именно $f_0, f_3, f_{3.1}, f_{3.2}$, от мест установки и мощности УКРМ, определенных в соответствии с инвестициями.

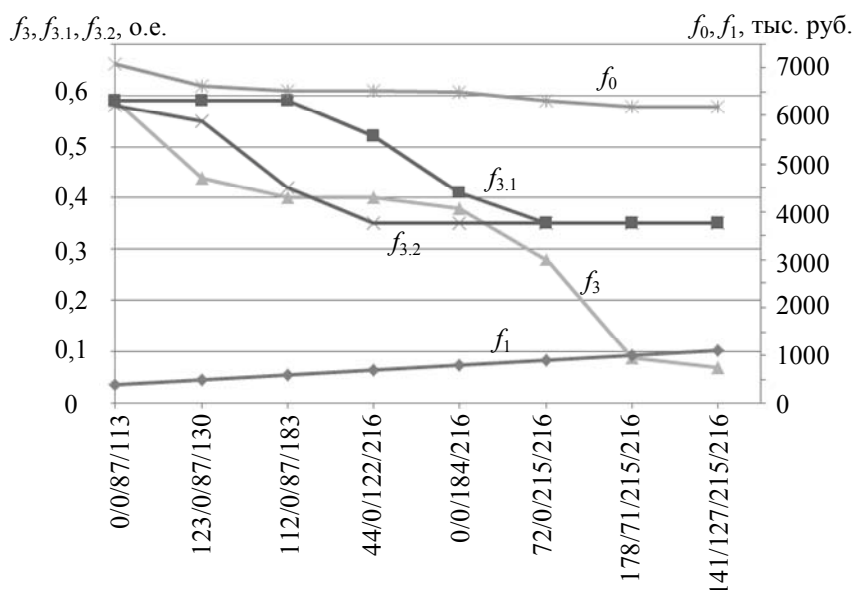


Рис. 2

Из графиков видно, что при увеличении средств на приобретение и установку УКРМ общие приведенные затраты за счет уменьшения потерь в линиях электропередачи и трансформаторе снижаются, коэффициенты реактивной мощности стремятся к нормативным значениям. Диаграмма Парето позволяет лицу, принимающему решение, определить места установки и мощности УКРМ в РЭС.

Закключение. Полученные результаты свидетельствуют о том, что оптимизация размещения УКРМ в существующих РЭС позволит:

- снизить плату за потребленную электроэнергию;
- уменьшить коэффициент реактивной мощности РЭС в целом, тем самым уменьшить токовые нагрузки элементов системы электроснабжения (кабельных и воздушных линий, трансформаторов), обеспечив возможность подключения дополнительных нагрузок без реконструкции сетей;
- повысить качество электроэнергии за счет уменьшения отклонений напряжения от номинального значения, повышения их функциональной надежности и готовности по качественному и бесперебойному обеспечению электроэнергией потребителей специальных комплексов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Положение о технической политике в распределительном электросетевом комплексе. М.: РОСЭП, 2006. 73 с.
2. Рыбаков В. В., Рыбаков Д. В., Вишняков Е. П., Карагодин В. В. Проблема компенсации реактивной мощности в РЭС объектов КВ // Тр. Военно-космической академии им. А.Ф. Можайского. СПб: ВКА, 2010. Вып. 627. С. 37—41.
3. Приказ Минпромэнерго № 49 от 22.02.07. 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 (договоры энергоснабжения). [Электронный ресурс]: <<http://www.matic.ru/index>>.

4. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электроэнергии в системах электроснабжения общего назначения.
5. Подиновский В. В., Ногин Д. Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. М.: Наука, 1982. 256 с.
6. Ногин В. Д. Принятие решений в многокритериальной среде. СПб: Физматлит, 2002. 176 с.
7. Костин В. Н. Оптимизационные задачи электроэнергетики. СПб: СЗТУ, 2003. 120 с.

Сведения об авторах

- Владимир Викторович Карагодин** — д-р техн. наук, профессор; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра энергоснабжения объектов наземной космической инфраструктуры;
E-mail: vladimirkar@rambler.ru
- Дмитрий Вячеславович Рыбаков** — адъюнкт; ВКА им. А. Ф. Можайского, кафедра энергоснабжения объектов наземной космической инфраструктуры;
E-mail: D_i_m_a_1_7@mail.ru

Рекомендована кафедрой
энергоснабжения объектов наземной
космической инфраструктуры

Поступила в редакцию
25.05.15 г.

Ссылка для цитирования: Карагодин В. В., Рыбаков Д. В. Оптимизация размещения устройств компенсации реактивной мощности в распределительных электрических сетях специальных объектов // Изв. вузов. Приборостроение. 2015. Т. 58, № 10. С. 823—829.

**OPTIMIZATION OF ARRANGEMENT OF REACTIVE POWER COMPENSATION DEVICES
IN ELECTRIC DISTRIBUTION NETWORK OF SPECIAL OBJECT****V. V. Karagodin, D. V. Ribakov***A. F. Mozhaysky Military Space Academy, 197198, St. Petersburg, Russia**E-mail: vladimirkar@rambler.ru*

The technical and economic problem of arrangement optimization for reactive power compensation in electric distribution network of special object is formulated. The desired solution to the problem has to account for the controversial requirements to power distribution electric networks design and exploitation. Assumptions simplifying the problem and do not lead to significant errors in the results are defined. An effective method for the problem solution is presented. Characteristics of results on the compensation devices power and location obtained in the process of optimization problem solving are assessed.

Keywords: mathematical model, distributive electric grid, reactive power compensation, optimization.

Data on authors

- Vladimir V. Karagodin** — Dr. Sci., Professor; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Electrical Supply of Ground Systems in Space Infrastructure; E-mail: vladimirkar@rambler.ru
- Dmitriy V. Ribakov** — Adjunct; A. F. Mozhaysky Military Space Academy, Department of Electrical Supply of Ground Systems in Space Infrastructure; E-mail: D_i_m_a_1_7@mail.ru

For citation: Karagodin V. V., Ribakov D. V. Optimization of arrangement of reactive power compensation devices in electric distribution network of special object // Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy. Priborostroenie. 2015. Vol. 58, N 10. P. 823—829 (in Russian).

DOI: 10.17586/0021-3454-2015-58-10-823-829