

## Расчет удельных приростов потерь при оптимизации реактивных мощностей в сложной электросети

*Е.Ю. Микаэльян, М.А. Трубицин*

*Ростовский государственный университет путей сообщения*

**Аннотация:** В статье рассматриваются способы расчета электрических сетей при выборе мест расположения компенсирующих устройств потребителей. Анализируется основной сетевой и расчетный модуль сложной сети, преобразованной в полный многоугольник

**Ключевые слова:** компенсация реактивной мощности, оптимизация, линия электропередачи, компенсирующие устройства потребителей, аналитическая модель, реактивная нагрузка, энергосистема.

При оптимизации распределения реактивных мощностей в электрической сети возникает необходимость в определении удельных приростов потерь [1-2]. В ряде случаев удастся ограничиться сравнительно простой квадратичной моделью оптимизации, не учитывая при этом взаимной зависимости уровней напряжения в узлах и мощностей компенсирующих устройств (КУ) [3-4]. Однако данная модель, обладая целым рядом методических и вычислительных преимуществ, не всегда оказывается достаточно точной. Прежде всего, это относится к питающим сетям 110—330 кВ энергосистем при решении некоторых разновидностей задач компенсации реактивных мощностей (КРМ) [5].

Соответствующая оптимизация включает три последовательных этапа:  
определение исходного режима потокораспределения;  
определение удельных приростов потерь  $\delta_Q$  по узлам сети;  
дооптимизация сети в соответствии с поставленной целью.

Сложность подобного расчета становится особенно ощутимой при широкой оптимизации, когда наряду с определением наивыгоднейших

загрузок по реактивной мощности системных источников (электростанции (ЭС) и синхронных компенсаторов (СК)) рассчитываются и оптимальные входные мощности  $Q_{Bi}$  на шинах 6, 10, 35 кВ районных подстанций. Поэтому построение рабочих моделей оптимизации и соответствующих быстрых алгоритмов, занимающих промежуточное место между квадратичными и эталонными (оценочными), имеет несомненный практический смысл, тем более при проектировании схем развития питающих сетей энергосистем в условиях неопределенности, когда необходимы многовариантные расчеты в рамках различных имитационных экспериментов [1-5].

В настоящей работе решаются два вопроса:

а) выводится достаточно точная формула для величины  $\delta_Q$  в радиальной линии, хорошо приспособленная для численных расчетов и имеющая новую физическую интерпретацию;

б) анализируется основной сетевой и расчетный модуль сложной сети, эквивалентированием в полный многоугольник с диагоналями, оптимизация которого основана на полученной выше формуле.

Цель исследования — обоснование нового подхода к построению оперативного алгоритма проектной КРМ в питающей сети энергосистем, сочетающего декомпозиционные свойства квадратичной модели с уточненным расчетом потерь в сети.

#### Формула для удельного прироста потерь в линии электропередач.

Рассмотрим одиночную линию с активным  $r$  и индуктивным  $x$  сопротивлениями, с активной  $P$  и реактивной  $Q$  нагрузками в ее конце, с заданным и фиксированным значением напряжения  $U_0$  в ее начале. Воспользуемся предложенным в [6] и развитым далее в [7] методом совместного расчета точных значений  $\delta_Q$  и  $\delta_P$ . В нашем частном случае это

---

сводится к решению системы двух уравнений с вещественными коэффициентами:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_p g(U_0 - 2U') + \sigma_Q b(U_0 - 2U') &= -(U_0 - 2U')g \\ -\sigma_p(U_0 b + 2U''g) + \sigma_Q b(U_0 g - 2U''b) &= 2U''g \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где  $U_0$  — направленный по вещественной оси модуль заданного напряжения;

$g$  и  $b$  - активная и индуктивная проводимости линии;

$U'$  и  $U''$  - составляющие напряжения в конце линии.

Решая данную систему уравнений, получим

$$\sigma_Q = \frac{2r[(U_0 - U')b + U''g]}{2U' - U_0} \quad (2)$$

Преобразуем полученное выражение к виду, более обзримому и приспособленному для численного расчета. Достигается это введением в рассмотрение реактивной нагрузки конца линии и соответствующих потерь:

$$Q = U_0(U'b + U''g) - U^2b \quad (3)$$

$$\Delta Q = [(U_0 - U')^2 + (U'')^2]b \quad (4)$$

В результате имеем

$$\sigma_Q = \frac{2r}{U_0(U_0 - 2\Delta U')} (Q + \Delta Q) = \frac{2r}{(U' + \Delta U')(U'_\Delta + \Delta U')} (Q + \Delta Q) \quad (5)$$

И, наконец, данную точную формулу заменим с незначительной погрешностью более простой:

$$\sigma_Q = \frac{2r}{U^2} (Q + \Delta Q) \quad (6)$$

Рассмотрим и иной вариант задачи: варьируя по-прежнему реактивную нагрузку  $Q$ , превратим в зависимую переменную напряжение  $U_0$  в начале линии, зафиксировав некоторое напряжение  $U$  в конце. Не трудно убедиться, что в такой постановке (6) принимает широко известный простейший вид:

$$\sigma'_Q = \frac{2rQ}{U^2} \quad (7)$$

Итерационная процедура расчета по формуле (6) несложна и состоит в последовательном уточнении напряжения в конце линии и в соответствующей корректировке потерь  $\Delta Q$ .

Сетевая и математическая модели алгоритма. Известно, что решение квадратичной оптимизационной модели КРМ на полном эквивалентном многоугольнике сети с диагоналями обладает важной особенностью: многомерная задача при этом подвергается предельной декомпозиции и решается по частям на каждой ветви [8, 9].

Вначале рассмотрим многолучевое эквивалентирование нагрузочной сети с единственным источником реактивной мощности—балансирующим узлом (БУ), в условиях учета изменяющихся уровней напряжения.

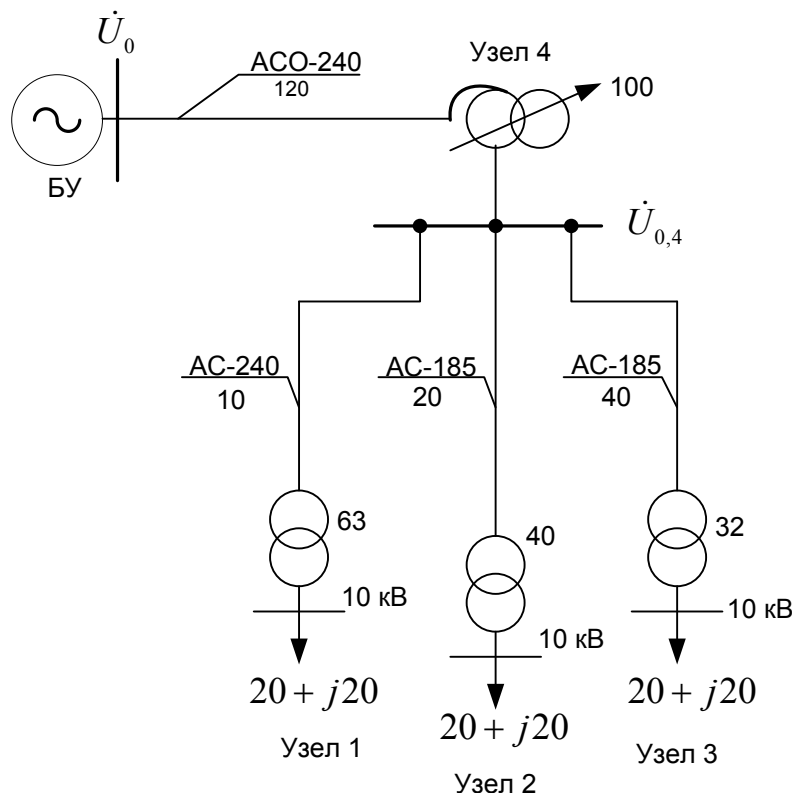


Рис.1

На рис.1 приведена схема сети с нарастающей электрической

удаленностью ее узлов. Попытка решить на этой схеме экономическую задачу компенсации (размещение мощностей КУ подчиняется при этом равенству приростов  $\sigma_{Q_i}$ , в узлах сети некоторой заданной обобщенной константе  $Z_k^* = Z_k / c_0$ ;

Здесь :  $Z_k$  - линейные приведенные затраты на мощность КУ,

$c_0$  - расчетная стоимость потерь активной мощности и электроэнергии)

ведет к искажению результатов из-за неучета как потерь напряжения в сети, ток и промежуточного регулирования напряжения в узле № 4.

Рассмотрим схему сети, эквивалентированную в полный многоугольник с диагоналями. При одинаковых экономических константах  $Z_k^*$  учитывается связь нагрузочного узла только с ЭС и СК, что требует оптимизации как по линии связи с БУ, с помощью формулы (6), так и по линиям связи с ЭС и СК по формуле\*(7). Для произвольного нагрузочного узла найдем входные мощности, поступающие от БУ по линии, условно расположенной на схеме слева и какой-либо ЭС - справа. При заданной константе  $Z_k^*$  сначала решается нелинейное уравнение

$$Z_k^* = \frac{2r_{Л}}{U^2} [Q_{ВЛ} + \Delta Q(Q_{ВЛ})] \quad (8)$$

относительно величины  $Q_{ВЛ}$ , а затем, при уже известном и зафиксированном напряжении  $U$  в нагрузочном узле, определяется величина  $Q_{ВЛ}$  с помощью формулы (7).

Неучет электрических связей между отдельными ЭС не влечет заметных отклонений результатов от оптимума так же, как это имело место в нагрузочной сети (рис.1), при разрыве аналогичных связей между нагрузочными узлами (хотя напряжения здесь оказались в значительной мере различными).

В настоящее время существуют условия для оценки дифференцированных значений мощностей  $Q_{B,i}$  отдельных узлов, питающих сетей энергосистем уже на стадии их текущего проектирования. При этом возникает потребность в распределении наперед заданной мощности  $Q_{k\Sigma}$  конденсаторных батарей (главным образом потребительских), т. е. в решении балансовых задач КРМ. Известно, что отличие последних от только что рассмотренной экономической задачи в том, что эффективность «последней порции» конденсаторов теперь уже равна не константе  $Z_k^*$ , а для всех узлов снижена на одно и то же значение  $\lambda$  (величину неопределенного множителя Лагранжа) [10]. В квадратичной модели аналитическая зависимость  $\lambda = \varphi(Q_{k\Sigma})$  легко устанавливается, и по этой причине решение балансовой задачи практически ничем не отличается от решения экономической. Предлагаемый алгоритм такой прямой возможностью не располагает, и поэтому предусматривается решение серии «экономических» задач при монотонно меняющейся величине  $\Delta\lambda = Z_k^* + \lambda$  до достижения равенства

$$\sum Q_{k,i} = Q_{k\Sigma}$$

### Литература

1. Микаэльян Е.Ю., Трубицин М.А. Методология системного расчета компенсации реактивных мощностей в электросетях промышленных предприятий и энергосистемах // Инженерный вестник Дона, 2017, № 4. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4584](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4584)
  2. Микаэльян Е.Ю., Трубицин М.А. Системный расчёт компенсации реактивных мощностей в электрических системах // Инженерный вестник Дона, 2018, №1. URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/47777](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/47777)
  3. Hopwood, B., Mellor M., O'Brien G. Sustainable development: mapping different approaches // Sustainable development. - 2005. - Vol.13, Is.1. - pp.38-52.
-

4. Kelley, C.T. Iterative methods for optimization // Society for Industrial and Applied Mathematics, 1999 – 196 p.

5. Зайцев А.И., Плехов А.С. Применение компенсационных преобразователей в целях энергосбережения // Электротехнические комплексы и системы управления. Воронеж, 2010. - №4-(20).-с.38-44.

6. Лазебник А. И. Аналитический метод расчета производных от потерь мощности в электрической сети. — В кн.: Применение математических методов и вычислительных машин в энергетике. Кишинев: Изд-во АИ Молд. ССР, 1968. Вып. 2, с. 16—23.

7. Горнштейн В. М., Мирошниченко Б. П., Пономарев А. В. и др. Методы оптимизации режимов энергосистем / Под ред. Горнштейна В. М. — М.: Энергия, 1981. —336 с.

8. Каялов Г.М., Молодцов В.С. Матрично-вычислительный метод анализа компенсации реактивных нагрузок сложной электрической сети. — Электричество, 1976, № 2, с. 16—21.

9. Ковалев И. Н., Сидельников В. И. Эквивалентирование сложных электросетей в расчетах компенсации реактивных нагрузок. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1979, № 3, с. 22—36.

10. Ковалев И.Н. Метод расчета переменных реактивных нагрузок в электрических сетях. — Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт, 1973, № 2, с. 79—90.

### References

1. Mikayel'yan E.YU, Trubitsin M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2017, №4.  
URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4584](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2017/4584)

2. Mikayel'yan E.YU, Trubitsin M.A. Inzhenernyj vestnik Dona, 2018, №1.  
URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/47777](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n1y2018/47777)



3. Hopwood, B., Mellor M., O'Brien G. Sustainable development. 2005. Vol.13, Is.1. pp.38-52.
4. Kelley, C.T. Society for Industrial and Applied Mathematics, pp. 1999 – 196.
5. Zajcev A.I., Plehov A.S. Jelektrotehničeskie komplekсы i sistemy upravlenija. Voronezh, 2010. №4-(20). pp. 38-44.
6. Lazebnik A. I. V kn.: Primeneniye matematičeskikh metodov i vychislitel'nykh mashin v energetike. Kishinev: Izd-vo All Mold. SSR, 1968. Vyp. 2, Pp. 16—23.
7. Gornshtejn V. M., Miroshnichenko B. P., Ponomarev A. V. Metody optimizatsii rezhimov energosistem. [Methods for optimizing power system modes]. Pod red. Gornshteyna V. M. M.: Energiya, 1981. 336 p.
8. Kayalov G.M., Molodtsov B.C. Elektrichestvo, 1976, № 2, pp. 16—21.
9. Kovalev I. N., Sidel'nikov V. I. Izv. AN SSSR. Energetika n transport, 1979, № 3, pp. 22—36.
- 10 Kovalev I.N. Izv. AN SSSR. Energetika i transport, 1973, № 2, pp. 79—90.