

НАУЧНЫЕ ЗАМЕТКИ

А. С. АВАКИМОВ

РАНЖИРОВКА УЗЛОВ СЕТИ ПРИ КОМПЕНСАЦИИ  
 РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НАГРУЗОК

Для обеспечения экономичности работы электрических сетей важным мероприятием является минимизация капитальных затрат как при их проектировании, так и эксплуатации с обеспечением снижения потерь электроэнергии. Одним из решений этих задач является установка компенсирующих устройств (КУ) в узлах системы. Мощность КУ, установленных в электрических системах страны, составляет около 15% от суммарной установленной мощности генераторов. Опыт эксплуатации сетей и многочисленные исследования показывают, что для сетей низкого напряжения экономически оправдывается полная компенсация реактивной мощности [1], однако на сегодняшний день потребность электрических сетей в КУ не удовлетворяется электротехнической промышленностью страны [2]. В связи с этим возникает вопрос при компенсации реактивных мощностей нагрузок  $Q_n$  КУ устанавливать в тех узлах сети, которые сравнительно больше нуждаются в компенсации, т. е. произвести ранжировку нагрузочных узлов сети по установке в них КУ.

Критерием для ранжировки узлов сети при компенсации  $Q_n$  принята величина суммарных затрат на потери электроэнергии в сетях системы, установки и эксплуатации КУ. При этом, с учетом требований [1] питающая и распределительные сети должны рассматриваться совместно. В данной статье питающая сеть рассматривается подробно, а распределительные сети заменяются эквивалентными сопротивлениями  $R_k$ , которые подключаются, соответственно, в узлы питающей сети.

Величина  $R_k$  определяется из условия равенства потерь активной мощности в действительной распределительной сети и эквивалентном сопротивлении [3]:

$$\Delta P_k = \Delta P_s = I^2 R_k,$$

отсюда

$$R_k = \frac{\Delta P_s}{I^2} = \frac{\Delta P_s U^2}{(P^2 + Q^2) 10^3},$$

где  $P$ ,  $Q$ ,  $U$  — активная реактивная мощности и напряжение в узле сети, откуда питается данная распределительная сеть.

Разработана программа, реализующая алгоритм расчета эквивалентного сопротивления сети на языке «Фортран-IV».

Функция затрат состоит из следующих слагаемых:

$$Z_i^t = Z_n + Z_r + Z_{kv}^t \quad (1)$$

где  $Z_n$ ,  $Z_r$  — затраты на потери электроэнергии в питающей и распределительных сетях;  $Z_{kv}^t$  — затраты, связанные с установкой и эксплуатацией КУ;  $i$  — текущий индекс нагрузочного узла питающей сети.

Представим функцию затрат в развернутом виде:

$$Z_i^t = \Delta A_n b_n + \Delta A_r b_r + (p_r K_r + \Delta p_{kv} b_{kv}) \Delta Q_{kv}^t \quad (2)$$

где  $\Delta A_n$ ,  $\Delta A_r$  и  $b_n$ ,  $b_r$  — суммарные потери электроэнергии и их удельная стоимость в питающей и распределительных сетях системы при изменении реактивной мощности нагрузки на  $\Delta Q_{kv}^t$ ;

$p_r$  — коэффициент суммарных ежегодных отчислений;

$K_r$  — удельные затраты на установку КУ в сетях 6—10 кВ (предполагается установка статистических конденсаторов типа КСЛ-0,66-40);

$\Delta p_{kv}$ ,  $b_{kv}$  — удельные потери активной мощности в КУ и их удельная стоимость;

$\Delta Q_{kv}^t$  — величина компенсируемой реактивной мощности нагрузки.

Поочередно изменяя реактивную мощность нагрузки на величину  $\Delta p_{kv}$  по формуле (2) определяются суммарные затраты  $Z_i^t$  для каждого нагрузочного узла. Затем по полученным значениям  $Z_i^t$  в возрастающем порядке определяется очередность нагрузочных узлов по установке в них КУ.

С целью сокращения времени расчета при переходе от одного узла к другому, величина суммарных потерь электроэнергии в питающей сети определяется с помощью матрицы чувствительности, которая отражает связь зависимых параметров с независимыми.

Расчетная формула для матрицы чувствительности получается путем разложения в ряд Тейлора уравнений исходного установившегося режима:

$$W(x_0, y_0) = W_0 = 0 \quad (3)$$

где  $x_0$ ,  $y_0$  — векторы зависимых и независимых параметров.

Отбрасывая все члены второй и более высоких степеней в связи с малостью изменений  $\Delta x$  и  $\Delta y$ , получим:

$$[W_0] + \left[ \frac{\partial W_0}{\partial x} \right] \cdot [\Delta x] + \left[ \frac{\partial W_0}{\partial y} \right] \cdot [\Delta y] = 0.$$

Отсюда с учетом (3) получим:

$$\left[ \frac{\partial W_0}{\partial x} \right] \cdot [\Delta x] + \left[ \frac{\partial W_0}{\partial y} \right] \cdot [\Delta y] = 0.$$

Здесь  $\left[ \frac{\partial W_0}{\partial x} \right]$  представляет собой матрицу частных производных от параметров режима по зависимым переменным. По аналогии  $\left[ \frac{\partial W_0}{\partial y} \right]$  опре-

деляют и матрицу  $\left[ \frac{\partial W_0}{\partial y} \right]$ . Из последнего уравнения легко можно определить приращения зависимых параметров  $[\Delta x]$ :

$$[\Delta x] = - \left[ \frac{\partial W_0}{\partial x} \right]^{-1} \cdot \left[ \frac{\partial W_0}{\partial y} \right] \cdot [\Delta y], \quad (4)$$

где  $[S] = \left[ \frac{\partial W_0}{\partial x} \right]^{-1} \cdot \left[ \frac{\partial W_0}{\partial y} \right]$  представляет собой расчетную формулу матрицы чувствительности. Тогда формула (4) принимает следующий вид:

$$[\Delta x] = - [S] \cdot [\Delta y], \quad (5)$$

где  $[\Delta y]$  — вектор приращений независимых параметров.

В качестве независимых параметров  $[y]$  выбраны напряжения генераторных узлов, кроме балансирующего, и реактивные мощности нагрузочных узлов. Зависимыми параметрами  $[x]$  являются углы напряжений всех узлов, кроме балансирующего, и напряжения нагрузочных узлов. Остальные параметры режима являются заданными-фиксированными.

Значения зависимых параметров нового режима определяются по формуле:

$$[x''] = [x^0] + [\Delta x], \quad (6)$$

где  $[x^0]$  — вектор зависимых параметров исходного установившегося режима.

По полученным параметрам нового режима рассчитываются потери электроэнергии в сетях системы АА. При этом потери активной мощности определяются по формуле [1]:

$$\pi = \sum_{k=1}^n \sum_{m=1}^n U_m U_k g_{mk} \cos(\varphi_m - \varphi_k), \quad (7)$$

где  $U$  и  $\varphi$  — модуль и фаза напряжений  $m, k = 1 \dots n$  узлов системы;  $g_{mk}$  — активная проводимость относительно узлов  $m, k$ .

Если в формуле (5) приращения напряжений генераторных узлов принимать равными нулю, то новые значения зависимых параметров  $[x'']$ , а следовательно, величина затрат  $Z$ , определяется только в результате изменения реактивных мощностей нагрузочных узлов, и формула примет следующий вид:

$$[\Delta x] = - [S] \cdot [\Delta Q_M]. \quad (8)$$

Поочередно, переходя к новым нагрузочным узлам, по формуле (8) находят приращения зависимых параметров  $[\Delta x]$ , а по формуле (6) — новые значения зависимых параметров  $[x'']$ . Затем, по формулам (7) и (2) определяется величина затрат, по которой производится ранжировка узлов при компенсации реактивной мощности.

Принимая в формуле (5) приращения реактивных мощностей нагрузочных узлов равными нулю, получим формулу, по которой непосред-

ственно (без расчета установившегося режима) можно определить напряжения в узлах системы при изменении напряжения любого генераторного узла. Это свойство алгоритма может быть использовано для регулирования режима системы по напряжению.

По разработанному алгоритму составлена экспериментальная программа и для конкретной энергосистемы с  $n=22$  рассмотрена ранжировка нагрузочных узлов системы при компенсации их реактивных мощностей.

Проведены исследования по определению влияния использования матрицы чувствительности на точность расчета. Результаты исследований показали, что погрешность определения зависимых параметров режима  $\varphi$  и  $U$  с использованием матрицы чувствительности при изменении реактивных мощностей нагрузок до  $0,2 Q_{II}$  не превышает  $0,5\%$ . При этом погрешность расчета потерь электроэнергии составляет до  $1,3\%$ .

### Выводы

1. Использование матрицы чувствительности в расчетах критериев для ранжировки нагрузочных узлов сети при компенсации реактивной мощности дает значительное сокращение машинного времени.

2. Погрешность расчета зависимых параметров с помощью матрицы чувствительности, при изменении независимых параметров до  $20\%$  не превышает  $0,5\%$ .

3. На базе матрицы чувствительности получена ранжировка генерирующих узлов системы, используемая для поддержания уравнения напряжения в нагрузочных узлах.

Арм НИИ Э

Поступило 14.II.1977.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Карпов Ф. Ф., Колырь В. Н., Согомонян С. В. Основные положения новых «Указаний по компенсации реактивной мощности в распределительных сетях». «Промышленная энергетика», 1974, № 10.
2. Гайц А. А. Вопросы компенсации реактивной мощности в сетях энергосистем промышленных предприятий. Сб. «Компенсация реактивных нагрузок и снижение потерь электроэнергии в сетях промышленных предприятий», Москва, 1977.
3. Адонц Г., Авакянов А. Управление распределением реактивных мощностей потребителей энергосистемы. Сб. «Материалы международной конференции по промышленной энергетике», Бухарест, 1978.
4. Адонц Г. Т. Многополюсник (теория и методы расчета), Ереван, изд. АН Арм. ССР, 1965.