

УДК 620.315

Ш.Ш ЛАТИПОВ, ассистент (ТашГТУ)  
г. Ташкент

### РЕШЕНИЕ НЕЛИНЕЙНЫХ УРАВНЕНИЙ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМ ОПТИМИЗАЦИОННЫМИ МЕТОДАМИ

При расчете установившегося режима электрических систем могут использоваться методы оптимизации как очень надёжный с точки зрения сходимости при плохих начальных приближениях.

При использовании методов оптимизации для расчета установившихся режимов электрических систем задача сводится к минимизации суммы квадратов функций небалансов токов или мощностей в узлах. Такая функция в общем случае для электрической сети содержащей  $n$  узлов имеет следующий вид:

$$F = \alpha \sum_{i=1}^n (W'_i{}^2 + W''_i{}^2) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $W'_i, W''_i$  - функции небалансов активных и реактивных токов (или мощностей, при использовании узловых уравнений в форме баланса мощностей) в  $i$ - м узле;  $\alpha$  - весовой коэффициент, который определяет, в какой степени быстро растет целевая функция  $F$  при нарушении баланса токов (или мощностей) в узлах.

Функции  $W'_i, W''_i$  имеют следующий вид:

при использовании узловых уравнений в форме баланса токов, представленных в декартовых системах координат

$$W'_i = g_{ii}U'_i - b_{ii}U''_i - \sum_{j \in J_i} (g_{ij}U'_j - b_{ij}U''_j) + I'_i, \quad (2)$$

$$W''_i = g_{ii}U''_i + b_{ii}U'_i - \sum_{j \in J_i} (g_{ij}U''_j + b_{ij}U'_j) + I''_i, \quad (3)$$

при использовании узловых уравнений в форме баланса мощностей, представленных в полярных системах координат

$$W'_i = g_{ii}U_i^2 - U_i \cdot \sum_{j \in J_i} (g_{ij} \cos \delta_{ij} + b_{ij} \sin \delta_{ij}) + P_i, \quad (4)$$

$$W''_i = -b_{ii}U_i^2 - U_i \cdot \sum_{j \in J_i} (g_{ij} \sin \delta_{ij} - b_{ij} \cos \delta_{ij}) + Q_i, \quad (5)$$

где  $J_i$  - множество узлов, имеющих прямые электрические связи с узлом  $i$ ;  $\delta_{ij} = \delta_i - \delta_j$ .

При задании в качестве исходной информации для узлов активной и реактивной мощностей активный и реактивный составляющие

токов выразятся через эти мощности и неизвестные составляющие комплексных напряжений как

$$I'_i = \frac{PU'_i + QU''_i}{U_i'^2 + U_i''^2}, \quad I''_i = \frac{PU''_i - QU'_i}{U_i'^2 + U_i''^2}.$$

При использовании оптимизационных методов для расчета установившихся режимов электрических систем получаемая функция (1) минимизируется подходящим методом оптимизации.

Рассмотрим минимизации функции (1) методом Ньютона.

В методе Ньютона минимизации функции на каждой итерации процесса расчета минимизируется квадратичная целевая функция, получаемая в результате разложения функции (1) в окрестности точки, координатами которой являются параметры установившегося режима, полученные в результате выполнения предыдущей итерации:

$$f = F^{(0)} + \sum_{i=1}^n \left( \frac{\partial F}{\partial x_i} \cdot \Delta x_i \right) + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \left( \frac{\partial^2 F}{\partial x_i \partial x_j} \cdot \Delta x_i \cdot \Delta x_j \right) \rightarrow \min, \quad (6)$$

где неизвестные  $x_i$  представляют собой  $U'_i, U''_i$  (при использовании узловых уравнений в форме (2) и (3) или  $\delta_i, U_i$  (при использовании узловых уравнений в форме (4) и (5)).

Значений неизвестных, при которых квадратичная функция (6) имеет минимальное значение определим из необходимого условия её экстремума. В таком случае при использовании узловых уравнений (2) и (3) с учетом отмеченных выше обозначений получим системы линейных уравнений, которая в матричном виде представляется как

$$\begin{bmatrix} \frac{\partial W'}{\partial U'} & \frac{\partial W'}{\partial U''} \\ \frac{\partial W''}{\partial U'} & \frac{\partial W''}{\partial U''} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta U' \\ \Delta U'' \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} W' \\ W'' \end{bmatrix}. \quad (7)$$

Таким образом, на каждой итерации расчетного процесса значения неизвестных составляющих комплексных напряжений узлов находятся на основе решения системы линейных алгебраических уравнения (7). А это то, что делается при решении системы узловых уравнений (2), (3) методом Ньютона. Это означает, минимизация функции (1) методом Ньютона – это тоже самое, что решение соответствующих узловых уравнений методом Ньютона.

Эффективность решения системы узловых уравнений различной формы методом Ньютона нам известно, поэтому на детали минимизации функции (1) этим методом не будем останавливаться.

Рассмотрим вопросы минимизации функции (1) градиентным методом. В этом методе значений неизвестных на каждой итерации находятся по следующим формулам (например, при использовании узловых уравнений (2) и (3):

$$U_i^{(k)} = U_i^{(k-1)} - h_i^{(k)} \cdot \frac{\partial F^{(k-1)}}{\partial U_i'}, \quad U_i^{''(k)} = U_i^{''(k-1)} - h_i^{''(k)} \cdot \frac{\partial F^{(k-1)}}{\partial U_i''}, \quad (8)$$

где  $h_i^{(k)}$ ,  $h_i^{''(k)}$  - шаги в направлении антиградиента, значения которых на первой итерации выбираются, а в последующих итерациях находятся по следующим условиям:

$$h_i^{(k)} = \begin{cases} \mu_1 h_i^{(k-1)} \cdot \frac{\partial F^{(k)}}{\partial U_i'} \cdot \frac{\partial F^{(k-1)}}{\partial U_i'} > 0, \\ \mu_2 h_i^{(k-1)} \cdot \frac{\partial F^{(k)}}{\partial U_i'} \cdot \frac{\partial F^{(k-1)}}{\partial U_i'} < 0, \end{cases}$$

$$h_i^{''(k)} = \begin{cases} \mu_1 h_i^{''(k-1)} \cdot \frac{\partial F^{(k)}}{\partial U_i''} \cdot \frac{\partial F^{(k-1)}}{\partial U_i''} > 0, \\ \mu_2 h_i^{''(k-1)} \cdot \frac{\partial F^{(k)}}{\partial U_i''} \cdot \frac{\partial F^{(k-1)}}{\partial U_i''} < 0, \end{cases}$$

где  $\mu_1$ ,  $\mu_2$  – масштабные коэффициенты, которые принимаются в пределах  $1 < \mu_1 < 2$ ,  $0 < \mu_2 < 1$

Условиями сходимости итеративного процесса расчета являются те же условия, что и при расчете установившихся режимов электрических систем вышеописанными методами.

#### Список литературы:

1. Фазылов Х.Ф., Насыров Т.Х. Установившиеся режимы электроэнергетических систем и их оптимизация. – Ташкент: Молия, 1999. – 370 с.
2. Фазылов Х.Ф., Юлдашев Х.Ю. Оптимизация режимов электроэнергетических систем. – Ташкент: Фан, 1987. – 152 с.
3. Методы оптимизации режимов энергосистем/ В.М.Горнштейн, Б.П.Мирошниченко, А.В.Пономарев и др.; Под ред. В.М.Горнштейна. – М.: Энергия, 1981. – 336 с.
4. Веников В.А., Журавлев В.Г., Филиппова Г.А. Оптимизация режимов электростанций и энергосистем: Учебник для вузов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 464 с.