ЛИТЕРАТУРА

1. Дроздов А. Д. Электрические цепи с ферромагнитными сердечниками в релейной защите. – М.; Л.: Энергия, 1965. – 240 с.

2. Соколов С. Е. Аппроксимация кривых намагничивания ферромагнитных устройств // Электричество. – 1991. – № 9. – С. 84–86.

3. Оганян Р. В. Аппроксимация кривой намагничивания стали квадратичной функцией // Электричество. – 1998. – № 4. – С. 70–73.

4. Новаш И. В. Математическая модель трехфазного трансформатора на базе второй теории рассеяния // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений). – 1986. – № 5. – С. 36–39.

5. Сопьяник В. Х., Жук Е. М. Расчет и анализ на ПЭВМ процессов в трансформаторах тока с учетом их характеристик намагничивания и вторичных нагрузок // Энергетика… (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 2001. – № 5. – С. 23–29.

6. Новаш В. И., Сопьяник В. Х. Расчет переходных процессов в токовых цепях многоплечевых дифференциальных защит // Электричество. – 1982. – № 7. – С. 74–76.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 1. 07.2002

УДК 621.313

АЛГОРИТМ ДЛЯ РЕЖИМНОЙ ОЦЕНКИ ПРОЕКТИРУЕМОЙ СХЕМЫ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ С КОРРЕКЦИЕЙ УЗЛОВЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Инж. БАРО БАНДИЯ

Белорусский национальный технический университет

В настоящее время получить удовлетворительные результаты расчета режимов сложнозамкнутых электрических сетей электроэнергетических систем (ЭЭС) можно с помощью итерационных методов [1] путем решения системы нелинейных уравнений с использованием прямого и обратного хода исключения неизвестных [2]. Систему нелинейных уравнений состояния электрической сети, записанных в виде узловых уравнений в обращенной форме, можно свести к квадратичной матричной форме, которая позволит получить ускоренное приближенное потокораспределение.

Как известно, узловое уравнение в обращенной форме записывается в следующем виде [1]:

$$\underline{\mathbf{U}}_{\Delta} = \underline{\mathbf{Z}}\underline{\mathbf{I}} + \underline{\mathbf{D}}\underline{\mathbf{E}}, \tag{1}$$

где $\underline{\mathbf{U}}_{\Delta}$ – вектор-столбец напряжений в узлах относительно базисного узла; $\underline{\mathbf{Z}}$ – матрица узловых (собственных и взаимных) сопротивлений; $\underline{\mathbf{I}}$ – вектор-столбец токов в узлах схемы сети; $\underline{\mathbf{E}}$ – то же ЭДС в ветвях сети; $\underline{\mathbf{D}}$ – матрица коэффициентов распределения напряжений.

Учитывая, что

$$\underline{\mathbf{D}} = -\underline{\mathbf{C}}^*,$$

где $\underline{\mathbf{C}}$ – матрица коэффициентов распределения токов, перепишем выражение (1)

$$\underline{\mathbf{U}}_\Delta = \underline{\mathbf{ZI}} + \underline{\mathbf{C}}^* \underline{\mathbf{E}}.$$

Вектор-столбец ЭДС в ветвях [3]

$$\underline{\mathbf{E}} = \mathrm{diag}\,[\mathbf{M}]^* \, \underline{\mathbf{U}}_у \, (\underline{\mathbf{k}} - \mathbf{e}^{(m)}), \tag{2}$$

где **M** – матрица, получаемая из матрицы инциденций **M** заменой положительных единиц нулями, если в соответствующем столбце два значащих элемента, и отрицательными единицами, если в столбце один элемент; $\mathbf{e}^{(m)}$ – вектор-столбец, состоящий из m единиц (m – количество ветвей); $\underline{\mathbf{k}}$ – то же относительных коэффициентов трансформации ветвей; $\underline{\mathbf{U}}_у$ – то же узловых напряжений; diag – символ диагональной матрицы; * – символ транспонирования матрицы.

Переходя от узловых токов к мощностям, с учетом (2) получим

$$\underline{\mathbf{U}}_\Delta = \underline{\mathbf{Z}} \,\mathrm{diag}\, \underline{\hat{\mathbf{U}}}_у^{-1} \,\mathrm{diag}\, \underline{\mathbf{s}}\mathbf{e}^{(n)} - \underline{\mathbf{C}}^* \,\mathrm{diag}\,[\mathbf{M}^-]^* \, \underline{\mathbf{U}}_у \,(\underline{\mathbf{k}} - \mathbf{e}^{(m)})\, \mathbf{e}^{(n)},$$

где $\mathbf{e}^{(n)}$ – вектор-столбец, состоящий из n единиц (n – число независимых узлов сети); $\underline{\mathbf{s}}$ – то же комплексных значений узловых мощностей.

Поскольку

$$\underline{\mathbf{U}}_у = \underline{\mathbf{U}}_0 + \underline{\mathbf{U}},$$

в силу диагональности матрицы $\underline{\hat{\mathbf{U}}}_у^{-1}$

$$\mathrm{diag}\,\underline{\mathbf{U}}_у \,\mathbf{e}^{(n)} - \mathrm{diag}\,\underline{\mathbf{U}}_0\, \mathbf{e}^{(n)} =$$

$$= \underline{\mathbf{Z}} \,\mathrm{diag}\, \underline{\hat{\mathbf{U}}}_у^{-1} \,\mathrm{diag}\, \underline{\mathbf{s}}\, \mathbf{e}^{(n)} - \mathrm{diag}\, \underline{\mathbf{U}}_у \underline{\mathbf{C}}^* (\mathbf{e}^{(m)} - \underline{\mathbf{k}}). \tag{3}$$

Последнее выражение является нелинейным относительно напряжений в узлах. Обычно в электроэнергетике при расчетах режимов подобные уравнения традиционно решаются итерационными методами. Преобразуем (3), умножив обе его части на диагональную матрицу $\underline{\hat{\mathbf{U}}}_у$ слева:

$$\mathrm{diag}\, \underline{\hat{\mathbf{U}}}_у \,\mathrm{diag}\, \underline{\mathbf{U}}_у \,\mathbf{e}^{(n)} - \mathrm{diag}\, \underline{\hat{\mathbf{U}}}_у \,\mathrm{diag}\, \underline{\mathbf{U}}_0 \,\mathbf{e}^{(n)} =$$

$$= \underline{\mathbf{Zs}} - \mathrm{diag}\, \underline{\hat{\mathbf{U}}}_у \,\mathrm{diag}\, \underline{\mathbf{U}}_у \, \underline{\mathbf{C}}^* (\mathbf{e}^{(m)} - \underline{\mathbf{k}}).$$

После алгебраических преобразований получим

$$\mathrm{diag}\,\underline{\mathbf{U}}_y\,\mathrm{diag}\,\underline{\hat{\mathbf{U}}}_y\,[\mathbf{e}^{(n)} + \underline{\mathbf{C}}^*(\mathbf{e}^{(m)} - \underline{\mathbf{k}})] - \mathrm{diag}\,\underline{\mathbf{U}}_y\,\mathrm{diag}\,\underline{\mathbf{U}}_0\,\mathbf{e}^{(n)} - \underline{\underline{\mathbf{Z}}}\underline{\mathbf{s}} = 0.$$

Обозначим вектор-столбец в квадратных скобках

$$\underline{\mathbf{A}} = \mathbf{e}^{(n)}\,\underline{\mathbf{C}}^*(\mathbf{e}^{(m)} - \underline{\mathbf{k}}),$$

а вектор-столбец

$$\underline{\underline{\mathbf{Z}}}\underline{\mathbf{s}} = \underline{\mathbf{B}}. \tag{4}$$

Запишем далее

$$\mathrm{diag}\,\underline{\mathbf{U}}_y\,\mathrm{diag}\,\underline{\hat{\mathbf{U}}}_y\,\underline{\mathbf{A}} - \mathrm{diag}\,\underline{\mathbf{U}}_0\,\mathrm{diag}\,\underline{\hat{\mathbf{U}}}_y\,\mathbf{e}^{(n)} - \underline{\mathbf{B}} = 0. \tag{5}$$

Переходя от матричных обозначений к обычным, получим выражение, справедливое для любого узла i:

$$\underline{\alpha}_i\,\underline{U}_{iy}\,\underline{\hat{U}}_{iy} - \underline{U}_0\,\underline{\hat{U}}_{iy} - \underline{b}_i = 0. \tag{6}$$

Последнее выражение представляет собой квадратное уравнение относительно модуля напряжения в узле, записанное в комплексной форме.

Проведем дальнейшие преобразования

$$(U_{iy}')^2 + (U_{iy}'')^2 - \frac{\underline{U}_0}{\underline{\alpha}}\,\underline{\hat{U}}_{iy} - \frac{\underline{b}_i}{\underline{\alpha}_i} = 0. \tag{7}$$

Обозначим

$$\frac{\underline{U}_0}{\underline{\alpha}} = l; \qquad \frac{\underline{b}_i}{\underline{\alpha}_i} = \underline{f}. \tag{8}$$

Подставив (8) в (7), получим

$$(U_{iy}')^2 + (U_{iy}'')^2 - (l' + jl'')\,(U_{iy}' - jU_y'') - (f' + jf'') = 0.$$

Разделим действительные и мнимые части:

$$\begin{cases} (U'_{iy})^2 + (U''_{iy})^2 - l'U'_y - l''\,U_{iy}'' - f' = 0; \\ j\,(l'\,U_{iy}'' - l''\,U'_{iy} - f') = 0. \end{cases} \tag{9}$$

Из второго уравнения выразим U''_{iy}

$$U''_{iy} = \frac{l''U'_{iy} + f''}{l'}. \tag{10}$$

Подставив (10) в первое уравнение системы (9), получим

$$(U'_{iy})^2 + \left(\frac{l''U'_{iy} + f''}{l'}\right)^2 - l'U_{iy}' - l''\frac{l'U'_{iy} + f''}{l'} - f' = 0;$$

$$(U'_{iy})^2 + \frac{(l''U'_{iy})^2 + 2l''f''U'_{iy} + (f'')^2}{(l')^2} - l'U'_y -$$

$$-\frac{(l'')^2}{l'}U'_{iy} - \frac{l''f''}{l'} - f' = 0;$$

$$(U'_{iy})^2\left[1 + \left(\frac{l''}{l'}\right)^2\right] + \left[2\frac{l''f''}{(l')^2} - l' - \frac{(l'')^2}{l'}\right]U'_{iy} +$$

$$+\frac{(f'')^2}{(f')^2} - \frac{l''f''}{l'} - f' = 0. \qquad (11)$$

Обозначив

$$\begin{cases} 1 + \dfrac{(l'')^2}{(l')^2} = p; \\ 2\dfrac{l''f''}{(l')^2} - l' - \dfrac{(l'')^2}{l'} = q; \\ \dfrac{(f'')^2}{(l')^2} - \dfrac{l''f''}{l'} - f' = t, \end{cases}$$

получим из (11)

$$p\,(U'_{iy})^2 + q\,U'_{iy} + t = 0. \qquad (12)$$

Решаем относительно действительной составляющей напряжения в узле i

$$U'_{iy} = \frac{-q \pm \sqrt{q^2 - 4pt}}{2p}. \qquad (13)$$

Подставив затем U'_{iy} во второе уравнение системы (9), получим значение U''_{iy}.

Данный подход отличается от описанного в [2] тем, что здесь нет необходимости проводить прямой и обратный ход исключения неизвестных напряжений в узлах, поскольку решение находится сразу для всех узлов сети в соответствии с матричным выражением (9).

Можно учесть в полученных ранее формулах зарядные мощности линий напряжением 220 кВ и выше.

Зарядная мощность линии $(i - j)$ учитывается при расчетах режимов электрических сетей следующим образом:

$$Q_{ij} = 0{,}5\, y_{c\,ij} U_i^2 + 0{,}5\, y_{c\,ij} U_j^2 = (U_i^2 + U_j^2)\, 0{,}5\, y_{c\,ij},$$

где U_i, U_j – модули напряжений соответственно в узлах i и j; $y_{c\,ij}$ – емкостная проводимость ветви $(i - j)$.

С учетом того, что мощности надо разносить по концам ветвей, получим в матричной форме

$$\mathbf{Q} = \operatorname{diag} \underline{\hat{\mathbf{U}}}_y \ \operatorname{diag} \underline{\mathbf{U}}_y \ 0{,}5\, [\mathbf{M}^{++}] \ \underline{\mathbf{Y}}_c,$$

где $[\mathbf{M}^{++}]$ – матрица, получаемая из матрицы инциденций $\mathbf{M}$ заменой отрицательных единиц положительными; $\mathbf{Q}$ – вектор-столбец поправок реактивных узловых мощностей; $\underline{\mathbf{Y}}_c$ – то же емкостных проводимостей ветвей.

Тогда с учетом того, что положительными считаются мощности, вытекающие из узлов схемы, формулу (3) можно переписать следующим образом:

$$\operatorname{diag} \underline{\mathbf{U}}_y \mathbf{e}^{(n)} - \operatorname{diag} \underline{\mathbf{U}}_0 \mathbf{e}^{(n)} =$$

$$= \operatorname{diag} \underline{\hat{\mathbf{U}}}_y^{-1} \underline{\mathbf{Z}} (\underline{\mathbf{s}} - \operatorname{diag} \underline{\hat{\mathbf{U}}}_y \operatorname{diag} \underline{\mathbf{U}}_y\, 0{,}5\, [\mathbf{M}^{++}] \underline{\mathbf{Y}}_c),$$

откуда

$$\operatorname{diag} \underline{\hat{\mathbf{U}}}_y \operatorname{diag} \underline{\mathbf{U}}_y \mathbf{e}^{(n)} - \operatorname{diag} \hat{\mathbf{U}}_y \operatorname{diag} \underline{\mathbf{U}}_0 \mathbf{e}^{(n)} =$$

$$= \underline{\mathbf{Z}}\, \underline{\mathbf{s}} - \operatorname{diag} \underline{\hat{\mathbf{U}}}_y \operatorname{diag} \underline{\mathbf{U}}_y \underline{\mathbf{Z}}\ 0{,}5\, [\mathbf{M}^{++}]\ \underline{\mathbf{Y}}_c.$$

Окончательно получим

$$\operatorname{diag} \underline{\hat{\mathbf{U}}}_y \operatorname{diag} \underline{\mathbf{U}}_y (\mathbf{e}^{(n)} + \underline{\mathbf{Z}}\, 0{,}5\, [\mathbf{M}^{++}] \underline{\mathbf{Y}}_c) - \operatorname{diag} \underline{\hat{\mathbf{U}}}_y \operatorname{diag} \underline{\mathbf{U}}_0 \mathbf{e}^{(n)} - \underline{\mathbf{Z}}\, \underline{\mathbf{s}} = 0.$$

Затем приводим последнее выражение к виду

$$\operatorname{diag} \underline{\hat{\mathbf{U}}}_y \operatorname{diag} \underline{\mathbf{U}}_y \underline{\mathbf{A}} - \operatorname{diag} \underline{\mathbf{U}}_0 \operatorname{diag} \underline{\hat{\mathbf{U}}}_y \mathbf{e}^{(n)} - \underline{\mathbf{B}} = 0,$$

где $\underline{\mathbf{A}} = \mathbf{e}^{(n)} - \underline{\mathbf{Z}}\, 0{,}5\, [\mathbf{M}^{++}] \underline{\mathbf{Y}}_c$; $\underline{\mathbf{B}} = \underline{\mathbf{Z}}\, \underline{\mathbf{s}}$, после чего, выполнив аналогичные подстановки, приходим к выражению (13).

Рассмотрим задачу оперативной коррекции напряжений в узлах электрической сети ЭЭС варьированием мощностей узлов, обладающих средствами регулирования мощности, таким образом, чтобы суммарное регулирующее воздействие оказалось минимальным. В качестве исходного примем уравнение (6). Как показано выше, можно рассчитать по этой формуле продольную и поперечную составляющие напряжения в любом узле системы U_y' и U_y'', а также угол δ относительно базисного

$$\delta = \operatorname{arctg} \frac{U_y''}{U_y'}.$$

Пусть в результате расчета напряжений в узлах энергосистемы по формуле (6) выяснилось, что в узле v оказалось нарушенным режимное ограничение по напряжению:

$$\begin{cases} U_v^{\min} > U_v; \\ U_v > U_v^{\max}, \end{cases}$$

где $U_v^{\min}$ – минимально допустимое значение напряжения в узле v; U_v – расчетное значение напряжения в узле v; $U_v^{\max}$ – максимально допустимое значение напряжения в узле v.

Надо провести коррекцию режима для ввода напряжения в узел v в допустимые границы, изменив мощность в узлах, имеющих средства регулирования мощности, таким образом, чтобы регулирующее воздействие оказалось минимальным. Другими словами, среди множества узлов со средствами регулирования мощности необходимо отыскать наилучший в смысле чувствительности изменения напряжения в узле v с нарушенными ограничениями к изменению мощности регулирующих узлов.

После коррекции напряжение в узле v должно стать равным граничному:

$$\begin{cases} U_v^r = U_v^{\max}, \text{ если } U_v > U_v^{\max}; \\ U_v^r = U_v^{\min}, \text{ если } U_v < U_v^{\min}. \end{cases}$$

Если допустить, что угол δ_v после коррекции напряжения не изменится, то можно определить продольную и поперечную составляющие граничного напряжения в узле v $(U_v^r)'$ и $(U_v^r)''$:

$$\begin{cases} (U_v^r)' = U_v^r \cos \delta_v; \\ (U_v^r)'' = U_v^r \sin \delta_v. \end{cases} \tag{14}$$

Подставив (14) в (13), получим

$$(\alpha_v' + j\,\alpha_v'')\,(U_v^r)^2 - U_0\,[(U_v^r)' - j\,(U_v^r)''] = b_v' + j\,b_v''.$$

Отсюда:

$$\begin{cases} b_v' = \alpha_v'(U_v^r)^2 - U_0\,(U_v^r)'; \\ b_v'' = \alpha_v''\,(U_v^r)^2 + U_0\,(U_v^r)''. \end{cases} \tag{15}$$

Также коэффициенты b_v' и b_v'' можно рассчитать по формуле (4), взяв для этого строку $\underline{\mathbf{Z}}_{(v)}$ матрицы $\underline{\mathbf{Z}}$. В исходном режиме все компоненты вектор-столбца определены. Поэтому коэффициент $\underline{b}_{\nu}^{(\text{и})}$ для исходного режима

$$\underline{b}_{\nu}^{(\text{и})} = \sum_{j=1}^{n} \underline{Z}_{(\nu)j} \underline{s}_j .$$

Для корректируемого режима известно из (15), какими должны быть коэффициенты b_{ν}' и b_{ν}'', чтобы напряжение в узле ν оказалось равным граничному.

Неизвестно пока, в каком узле и насколько изменить узловую мощность. Определить это можно следующим образом. Проведем уплотнение строки $\underline{\mathbf{Z}}_{(\nu)}$ матрицы $\underline{\mathbf{Z}}$, оставив в ней только элементы, соответствующие узлам, имеющим средства регулирования мощности. Обозначим такую строку через $\underline{\tilde{\mathbf{Z}}}_{(\nu)}$. Выберем среди оставшихся элементов наибольший по модулю

$$\max |\underline{Z}_{(\nu)w}|, \; w \in W$$

(W – множество узлов со средствами регулирования мощности), который однозначно определит узел, наилучший в смысле чувствительности изменения напряжения в ν-м узле. Рассчитаем величину коррекции коэффициентов b

$$\Delta \underline{b}_{\nu} = \underline{b}_{\nu} - \underline{b}_{\nu}^{(\text{и})}.$$

Поскольку

$$\Delta \underline{b} = \underline{Z}_{(\nu)w} \Delta \underline{s},$$

имеем необходимую коррекцию мощности в узле w

$$\Delta \underline{s}_w = \Delta \underline{b} / \underline{Z}_{(\nu)w} .$$

Обобщим изложенное выше на случай нарушения ограничений в нескольких узлах энергосистемы одновременно. Алгоритм коррекции напряжений в узлах будет следующим:

1. Проводится расчет напряжений в узлах системы по формулам (10) и (13).

2. Проверяется допустимость исходного режима по напряжению в узлах. Формируется вектор нарушенных ограничений

$$\Delta \underline{\mathbf{U}} = \text{colon}\,[\Delta \underline{U}_1, \Delta \underline{U}_2, \ldots, \Delta \underline{U}_{\nu}, \ldots, \Delta \underline{U}_n],$$

компоненты которого равны:

$$\Delta U_{\nu} = U_{\nu} - U_{\nu}^{\max}, \; \text{если } U_{\nu} > U_{\nu}^{\max};$$

$$\Delta U_v = U_v^{\min} - U_v, \text{ если } U_v < U_v^{\min},$$

где $v \in N$ – множество узлов с нарушенными режимными ограничениями.

3. Среди элементов вектора ΔU отыскивается наибольший

$$\max |U_v|, \; v \in N.$$

4. Производится описанная выше процедура коррекции напряжения в узле v, в результате чего определятся узел w и величина коррекции мощности в узле w: $\Delta \underline{s}_w$.

5. Узел v исключается из дальнейшего рассмотрения; компоненты $\underline{s}_w$ вектора узловых мощностей $\underline{s}_n$ становятся равными

$$\underline{s}_w = \underline{s}_w^{(и)} + \underline{s}_w,$$

где $\underline{s}_w^{(и)}$ – значение мощности в узле w в исходном режиме.

6. Производится пересчет напряжений в остальных узлах с нарушенными режимными ограничениями по напряжению.

7. Проверяется наличие узлов с нарушенными режимными ограничениями.

8. Если да, то переход к п. 2.

9. Если нет, – переход к п. 10.

10. Конец работы.

В практике расчетов режимов персоналом диспетчерских служб энергосистем часто используется прием фиксации модулей напряжений в узлах с источниками реактивной мощности. В этом случае соответствующий реактивный компонент вектор-столбца комплексных узловых мощностей $\underline{\mathbf{s}}$, используемого в качестве исходного для расчета режима, становится неопределенным, поскольку информация об узле задается активной мощностью узла и модулем напряжения с указанием диапазона располагаемой реактивной мощности в узле.

Задачу определения реактивного компонента мощностей в узлах с фиксированными модулями напряжений можно интерпретировать как задачу оперативной коррекции напряжений в узлах с ИРМ с использованием в качестве регулятора реактивных мощностей этих узлов.

В качестве исходного примем полученное ранее уравнение:

$$\operatorname{diag} \underline{\mathbf{U}}_y \operatorname{diag} \underline{\hat{\mathbf{U}}}_y \, \underline{\mathbf{A}} - \operatorname{diag} \underline{\mathbf{U}}_0 \operatorname{diag} \underline{\mathbf{U}}_y \mathbf{e}^{(m)} - \mathbf{B} = 0;$$

$$\underline{\mathbf{A}} = \mathbf{e}^{(n)} + \underline{\mathbf{C}}^* \operatorname{diag} [\mathbf{M}^-] (\underline{\mathbf{k}} - \mathbf{e}^{(m)}) \, \mathbf{e}^{(n)},$$

где $\mathbf{M}^-$ – матрица, получаемая из матрицы инциденций $\mathbf{M}$ заменой положительных единиц нулями, если в соответствующем столбце два значащих элемента, и отрицательными единицами, если в столбце один элемент.

Переходя от матричных обозначений к обычным, получим соответствующее выражение, справедливое для любого узла схемы:

$$\underline{\alpha}_i \underline{U}_{yi} \underline{\hat{U}}_{yi} - \underline{U}_0 \underline{\hat{U}}_{yi} - \underline{b}_i = 0. \qquad (16)$$

Коэффициент $\underline{\alpha}_i$ не зависит от напряжений в узлах схемы, а определяется только пассивными параметрами и конфигурацией схемы замещения сети. Коэффициент $\underline{b}_i$ в соответствии с правилами матричной алгебры определяется как

$$\underline{b}_i = \sum_{j=1}^{n} \underline{Z}_{ij} \underline{s}_j,$$

где $\underline{Z}_{ij}$ – компоненты строки, соответствующей i-му узлу матрицы $\underline{\mathbf{Z}}$; $\underline{s}_j$ – компонент вектор-столбца узловых мощностей $\underline{\mathbf{s}}$.

Допустим, что все компоненты вектора $\underline{\mathbf{s}}$ определены, за исключением узла, в котором зафиксирован модуль напряжения. Для этого узла в первом приближении возьмем среднее значение из диапазона регулирования

$$q_i = \frac{Q_i^{\min} + Q_i^{\max}}{2}, \qquad (17)$$

где $Q_i^{\min}$, $Q_i^{\max}$ – соответственно нижний и верхний пределы располагаемой в узле реактивной мощности.

Тогда, согласно (17), можно найти для этого узла продольную и поперечную составляющие напряжения в узле U_y' и U_y'', а также определить угол δ между данным узлом и базисным

$$\delta_i = \operatorname{arctg} U''_{yi} / U'_{yi}. \qquad (18)$$

Если допустить, что угол δ не меняется после изменения реактивной мощности в этом узле, то необходимое значение коррекций реактивной мощности в узле можно рассчитать следующим образом. Пусть модуль напряжения в i-м узле зафиксирован

$$|U_{yi}| = U_{\phi i}. \qquad (19)$$

Тогда продольная и поперечная составляющие напряжения в узле:

$$\begin{cases} U''_{yi} = U_{\phi i} \sin \delta_i; \\ U'_{yi} = U_{\phi i} \cos \delta_i. \end{cases} \qquad (20)$$

Подставив (19) и (20) в (16), получим

$$(\alpha_i' + j\,\alpha_i'')\, U_{\phi i}^2 - U_0(U_{\phi i} \cos \delta_i - j\, U_{\phi i} \sin \delta_i) = 0,$$

откуда:

$$\begin{cases} \underline{b}_i' = \alpha_i' U_{\text{ф}i}^2 - U_0 U_{\text{ф}i} \cos \delta_i; \\ \underline{b}_i'' = \alpha_i'' U_{\text{ф}i}^2 - U_0 U_{\text{ф}i} \sin \delta_i. \end{cases} \tag{21}$$

Тогда справедлив следующий алгоритм коррекции режима электрической сети путем фиксации модуля напряжений в узлах:

1. Фиксируем модуль напряжения в базисном узле.
2. Рассчитываем напряжение в i-м узле при принятом значении узловой реактивной мощности.
3. Определяем угол δ_i между напряжениями i-го и базисного узлов по (18).
4. Находим продольную и поперечную составляющие зафиксированного модуля напряжения по (20).
5. Проводим расчет по (21) продольной и поперечной составляющих коэффициента $\underline{b}$, соответствующих зафиксированному модулю напряжения.
6. Определяем величину добавки коэффициента $\underline{b}$, которую надо произвести, чтобы напряжение в узле было равным фиксированному.
7. Рассчитываем необходимую величину реактивной мощности в i-м узле.
8. Подставив полученное значение q_i в формулу (16), уточним значение напряжения U_{yi} в i-м узле, сравним его с $U_{\text{ф}i}$ и, в случае несовпадения, повторим описанные выше действия до тех пор, пока напряжение не окажется равным $U_{\text{ф}i}$.

Использование описанного выше алгоритма для сложнозамкнутой сети вызывает определенные сложности из-за того, что фиксация модуля напряжения возможна не в одном, а в нескольких узлах энергосистемы сразу. В этих случаях расчет целесообразно производить следующим образом:

1. Установим реактивные компоненты вектора узловых мощностей во всех узлах с фиксацией модуля напряжения равными средним в соответствии с (17).
2. Рассчитаем напряжения во всех узлах с фиксированными модулями напряжений при принятых значениях узловых мощностей.
3. Выберем из всех узлов с фиксированным модулем напряжения такой узел, в котором отклонение рассчитанного модуля напряжения от зафиксированного окажется максимальным.
4. Скорректируем значения узловой реактивной мощности в этом узле по описанному выше алгоритму.
5. Данный узел исключим из числа рассматриваемых.
6. Проверим, есть ли еще узлы с фиксированными модулями напряжения.
7. Если да, – переход к п. 2.
8. Конец работы.

Данный алгоритм может быть использован для осуществления оперативной коррекции напряжений в узлах энергосистемы при вариации значений реактивной мощности в этих же узлах. Это является частным случаем более общей задачи коррекции режима по напряжению, когда в качестве варьируемых параметров используются значения реактивной мощности в любом из узлов, располагающих средствами регулирования реактивной мощности [4].

Оптимизацию режима электрической сети можно выполнить также путем коррекции напряжений узлов. Как известно [2], потери кажущейся мощности в электрической сети в матричной форме выражаются следующим образом:

$$\Delta \underline{S} = \left(\hat{\underline{\mathbf{U}}}_b'' \right)^* \operatorname{diag} \underline{\mathbf{Z}}_b^{-1} \left(\underline{\mathbf{U}}_b \right), \tag{22}$$

где $\underline{\mathbf{U}}_b, \hat{\underline{\mathbf{U}}}_b''$ – столбцовые матрицы прямых и сопряженных комплексов падений напряжений в ветвях; $\operatorname{diag} \underline{\mathbf{Z}}_b^{-1} = \operatorname{diag} \underline{\mathbf{Y}}_b$ – диагональная матрица проводимостей ветвей.

Напряжения ветвей, в свою очередь, можно определить как

$$\underline{\mathbf{U}}_b = \mathbf{M}\, \underline{\mathbf{U}}_\Delta . \tag{23}$$

Подставляя (23) в (22), получим

$$\Delta \underline{S} = \left(\mathbf{M}^* \hat{\underline{\mathbf{U}}}_\Delta \right)^* \operatorname{diag} \underline{\mathbf{Y}}_b\, \mathbf{M}^* \underline{\mathbf{U}}_\Delta . \tag{24}$$

Далее преобразуем (24) в соответствии с правилами матричной алгебры

$$\Delta \underline{S} = \left(\hat{\underline{\mathbf{U}}}_\Delta \right)^* \mathbf{M} \operatorname{diag} \underline{\mathbf{Y}}_b\, \mathbf{M}^* \underline{\mathbf{U}}_\Delta ,$$

или, имея в виду, что

$$\mathbf{M}^* \operatorname{diag} \underline{\mathbf{Y}}_b\, \mathbf{M}^* = \underline{\mathbf{Y}},$$

где $\underline{\mathbf{Y}}$ – матрица узловых проводимостей схемы, получим

$$\Delta \underline{S} = \left(\hat{\underline{\mathbf{U}}}_\Delta \right)^* \underline{\mathbf{Y}}\ \underline{\mathbf{U}}_\Delta .$$

Поскольку потери активной мощности в сети определяются как

$$\pi = \operatorname{Re}\, [\Delta \underline{S}],$$

то

$$\pi = \left(\mathbf{U}_\Delta' - j\mathbf{U}_\Delta'' \right) \mathbf{Y}' \left(\mathbf{U}_\Delta' + j\mathbf{U}_\Delta'' \right) = \left(\mathbf{U}_\Delta' \right)^* \mathbf{Y}' \left(\mathbf{U}_\Delta' \right) + \left(\mathbf{U}_\Delta'' \right)^* \mathbf{Y}' \left(\mathbf{U}_\Delta'' \right),$$

или

$$\pi = \begin{bmatrix} \mathbf{U}'_\Delta \\ \mathbf{U}''_\Delta \end{bmatrix}^* [\mathbf{Y}'] \begin{bmatrix} \mathbf{U}'_\Delta \\ \mathbf{U}''_\Delta \end{bmatrix}, \qquad (25)$$

где $\mathbf{Y}'$ – действительная часть матрицы $\underline{\mathbf{Y}}$.

Задачу оперативного повышения экономичности текущего режима сети можно разбить на два этапа. На первом этапе определяются оптимальные значения напряжений в узлах, соответствующие минимальным потерям активной мощности. На втором этапе исходный режим корректируется таким образом, чтобы напряжения узлов оказались равными рассчитанным оптимальным значениям.

Таким образом, задачу оптимизации на первом этапе можно сформулировать следующим образом. Найти

$$\min_{x \in (U'_\Delta, U''_\Delta)} \pi(x);$$

при ограничениях:

$$\underline{\mathbf{U}}_\Delta^{\min} \le \underline{\mathbf{U}}_\Delta \le \underline{\mathbf{U}}_\Delta^{\max};$$

$$\mathbf{P}^{\min} \le \mathbf{P} \le \mathbf{P}^{\max};$$

$$\mathbf{Q}^{\min} \le \mathbf{Q} \le \mathbf{Q}^{\max},$$

где $\underline{\mathbf{U}}_\Delta^{\min}, \mathbf{P}^{\min}, \mathbf{Q}^{\min}, \underline{\mathbf{U}}_\Delta^{\max}, \mathbf{P}^{\max}, \mathbf{Q}^{\max}$ – столбцовые матрицы наименьших и наибольших допустимых значений напряжений в узлах и потоков мощностей в ветвях схемы.

Вид выражения (25) показывает, что целевая функция в сформулированной задаче представляет собой квадратичную форму, изменяющуюся в области существования, определяемой системой линейных ограничений.

Поскольку матрица коэффициентов $\underline{\mathbf{Y}}$ является слабозаполненной, симметричной [5] и формируется достаточно просто исходя из топологических соображений, можно предложить простой и эффективный алгоритм отыскания оптимальных значений $\underline{\mathbf{U}}'_\Delta$ и $\underline{\mathbf{U}}''_\Delta$. Для упрощения изложения рассмотрим только процесс отыскания оптимальных $\underline{\mathbf{U}}'_\Delta$. В этом случае выражение (25) запишется

$$\pi' = [\mathbf{U}'_\Delta]^* [\mathbf{Y}'] \, [\mathbf{U}'_\Delta].$$

Столбцовая матрица частных производных теперь определится следующим образом:

$$\left[\frac{\partial \pi}{\partial \mathbf{U}'_\Delta}\right] = 2[\mathbf{Y}'_\Delta] \, [\mathbf{U}'_\Delta]\cdot$$

Тогда алгоритм оптимизации можно представить следующим образом:

1. Определяется максимальный компонент столбцовой матрицы $\left[\dfrac{\partial \pi}{\partial \mathbf{U}'_\Delta}\right]$

$$\max\left(\frac{\partial \pi}{\partial U'_{\Delta\nu}}\right),\ \nu \in V .$$

В результате чего определяется узел, регулирование напряжения в котором дает наилучший результат в смысле изменения потерь активной мощности в сети.

2. Определяется значение $U'^{(0)}_{\Delta\nu}$, при котором найденный компонент обращается в нуль: $\dfrac{\partial \pi}{\partial U'_{\Delta\nu}}$. Очевидно, что напряжение в ν-м узле необходимо изменить на величину

$$\Delta\left(\mathrm{U}'_{\Delta\nu}\right) = \mathrm{U}'^{(0)}_{\Delta\nu} - \mathrm{U}'_{\Delta\nu} .$$

3. Проверяется, находится ли новое значение напряжения в ν-м узле в допустимых пределах

$$\mathrm{U}'_{\Delta\nu} \le \mathrm{U}'^{(0)}_{\Delta\nu} \le \mathrm{U}'^{\max}_{\Delta\nu} .$$

4. Если да, – переход к п. 6.

5. Если нет, то напряжение в ν-м узле принимается равным граничному

$$\mathrm{U}'^{(0)}_{\Delta\nu} = \mathrm{U}'^{\min(\max)}_{\Delta} .$$

6. Проверяется, все ли узлы рассмотрены. Если да, – переход к п. 10.

7. Производится пересчет всех оставшихся компонентов столбцовой матрицы $\dfrac{\partial \pi}{\partial \mathbf{U}'_\Delta}$ с учетом нового значения $U'_{\Delta\nu}$.

8. Узел ν исключается из дальнейшего рассмотрения.

9. Переходим к п. 1.

10. Конец работы.

Аналогично производится определение компонентов вектор-столбца $\mathrm{U}''^{(0)}_{\Delta}$.

После того как найдены оптимальные значения напряжений в узлах электрической сети, переходим ко второму этапу — коррекции режима по алгоритму, описанному в [6].

Вектор-столбец отклонений напряжений в узлах

$$\Delta \underline{\mathrm{U}}_\Delta = \underline{\mathrm{U}}^{(0)}_\Delta - \underline{\mathrm{U}}_{\Delta\text{факт}} ,$$

где $\underline{\mathrm{U}}^{(0)}_\Delta$ – оптимальные значения напряжений в узлах, определенные на первом этапе; $\underline{\mathrm{U}}_{\Delta\text{факт}}$ – вектор-столбец фактических значений напряжений в узлах в исходном режиме. В качестве регулирующих величин могут быть использованы узловые мощности (тогда матрицей чувствительности является матрица узловых сопротивлений $\underline{\mathbf{Z}}$) или коэффициенты трансформации регулируемых трансформаторов (в этом случае матрицей чувствительности является матрица собственных и взаимных проводимостей ветвей $\underline{\mathbf{Y}}_{\text{с.в}}$), или та и другая вместе.

Таким образом, оптимальный допустимый режим электрической сети можно получить как результат совместного решения задачи оптимизации режима и его оперативной коррекции.

ВЫВОДЫ

1. Приведенные в статье алгоритмы позволяют получить гарантированное решение установившегося режима энергосистемы. Применение приближенных формул снимает вопрос о сходимости режима.

2. Корректирующий алгоритм по напряжениям узлов можно использовать для оптимизации режима электрической сети при выполнении проектных и эксплутационных расчетов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ж у к о в Л. А., С т р а т а н И. П. Установившиеся режимы сложных электрических сетей и систем: Методы расчетов. – М.: Энергия, 1979. – 416 с.

2. Г у р с к и й С. К. Алгоритмизация задач управления режимами сложных систем в электроэнергетике. – Мн.: Навука и тэхнiка, 1977. – 367 с.

3. И д е л ь ч и к В. И. Расчеты установившихся режимов электрических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1977. – 189 с.

4. Б а б к е в и ч Г. Г. Алгоритм расчета генерируемой реактивной мощности в узлах с источниками реактивной мощности // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений). – 1990. – № 8. – С. 56–57.

5. Б р а м е л л е р А., А л л а н Р., Х э м э м Я. Слабозаполненные матрицы: Анализ электроэнергетических систем. – М.: Энергия, 1979.

6. А л е к с а н д р о в О. И., Б а б к е в и ч Г. Г., З г а е в с к а я Г. В. Эффективный алгоритм потокораспределения в сложнозамкнутой электрической сети // Энергетика... (Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ). – 1996. – № 11–12. – С. 10–16.

Представлена кафедрой
электротехники и электроники

Поступила 12.12.2002