ISSN 0002-306X. Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. 2007. Т. LX, № 2.

УДК 621.311 ЭНЕРГЕТИКА

В.С. ХАЧАТРЯН, М.Г. ТАМРАЗЯН, К.В. ХАЧАТРЯН, С.Э. ГРИГОРЯН, А.С. КАРИМЯН

ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ПО P-U РЕЖИМНЫМ ПАРАМЕТРАМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЙ

Предлагается метод оптимизации режима электроэнергетической системы, когда в качестве управляемых переменных выбираются P-U режимные параметры станционных узлов. При решении поставленной задачи учитываются ограничения типа неравенств, налагаемые на режимные параметры. В качестве уравнений связи выбирается система нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима в Y-Z форме.

Ключевые слова: электроэнергетическая система, матрица, режим, модель, нагрузка, функция, станция, узел, параметр, уравнение.

Как известно, при оптимизации режима электроэнергетической системы (ЭЭС) состояние электрической сети учитывается либо с помощью уравнения установившегося режима [1, 2], либо с помощью баланса активных и реактивных мощностей [3-5]. При этом в качестве уравнения установившегося режима применяется Y форма, при которой, как отмечается в [6, 7], не всегда гарантируется решение поставленной задачи. Во втором случае, т.е. в случае баланса активных и реактивных мощностей, из-за упрощенности математической модел, не всегда обеспечивается правильный учет состояния сети.

Целью настоящей работы является разработка метода определения оптимального режима ЭЭС, исключающего вышеотмеченные недостатки.

Следует отметить, что существующие методы оптимизации ЭЭС отличаются друг от друга способом учета состояния сети. В силу этого расчет установившегося режима ЭЭС является решающим при ее оптимизации. Фактически, задача оптимизации режима ЭЭС сводится к коррекции ее параметров таким образом, чтобы они удовлетворяли условиям оптимальности.

Таким образом, успешное решение задачи оптимизации связано с решением задачи установившегося режима ЭЭС. Поэтому, в отличие от существующих методов оптимизации режима ЭЭС, в настоящей работе состояние сети учитывается уравнением установившегося режима в Y-Z форме, которые всегда характеризуются схождением решения [8-14].

Следует отметить, что Y форма уравнения установившегося режима становится непригодной для решения режимных задач современных сложных и больших ЭЭС кибернетического типа. В связи с появлением современных сложных вычислительных машин необходимо построить математические модели, которые гарантируют решение поставленной задачи. В силу этого единственно приемлемыми математическими моделями являются модели, в основу которых положены либо Z, либо Y-Z формы уравнения состояния сети с сочетанием методов диакоптики или декомпозиции.

Анализ литературы в данной области привел к весьма важным выводам относительно гибридной Y-Z формы уравнения установившегося режима ЭЭС: сходимость решения соответствующих систем нелинейных алгебраических уравнений не зависит от выбора начальных значений зависимых режимных параметров; обеспечивается решение задачи для существующих возможных утяжеленных режимов; гарантируется решение задачи, когда в структуре ЭЭС имеются ветви с соотношением пассивных параметров R>X. Необходимо отметить также, что Y-Z форма уравнений установившегося режима ЭЭС обеспечивает уменьшение объема вычислительных работ при реализации соответствующих численных математических моделей.

Для математической формализации задачи оптимизации режима ЭЭС выбирается следующая система индексов:

- для станционных узлов:

$m(n)=0\ ,\ 1\ ,\ 2\ ,\ \ldots\ ,\ \Gamma$, где Γ - число независимых узлов а индексом “0” обозначен базисный станционный узел; $k(\ell)=\Gamma+1\ ,\ \Gamma+2\ ,\ \ldots\ ,\Gamma+H$, где H - число нагрузочных узлов.

С математической точки зрения, рассматривается следующая модель оптимизации режима ЭЭС:

$$\min F(P)=\min F(P_0, P_1, P_2, \ldots, P_\Gamma) \tag{1}$$

при

$$\begin{cases} \Phi_{p0}=P_0-\varphi_{p0}(U, \Psi_u)=0, \\ \Phi_{pm}=P_m-\left[P_{Бm}+\varphi_{pm}(U_n, \Psi_{un})\right]=0, \\ \Phi_{qm}=Q_m-\left[Q_{Бm}+\varphi_{qm}(U_n, \Psi_{un})\right]=0; \end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases} \Phi_{q0}=Q_0-\varphi_{q0}(U, \Psi_u)=0, \\ \Phi_{pk}=P_k-\left[P_{Бk}+\varphi_{pk}(I'_\ell, I''_\ell)\right]=0, \\ \Phi_{qk}=Q_k-\left[Q_{Бk}+\varphi_{qk}(I'_\ell, I''_\ell)\right]=0; \end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{gathered} U_{m,min}\le U_m\le U_{m,max}\,, \\ Q_{m,min}\le Q_m\le Q_{m,max}\,. \end{gathered} \tag{4}$$

В системах уравнений (2), (3):

$$\begin{cases} \varphi_{pm}(U,\Psi_u)=\sum\limits_{n=0}^{\Gamma}U_m\left[g_{m,n}\cos(\Psi_{um}-\Psi_{un})+b_{m,n}\sin(\Psi_{um}-\Psi_{un})\right]U_n\,, \\ \varphi_{qm}(U,\Psi_u)=\sum\limits_{n=0}^{\Gamma}U_m\left[g_{m,n}\sin(\Psi_{um}-\Psi_{un})-b_{m,n}\cos(\Psi_{um}-\Psi_{un})\right]U_n\,; \end{cases} \tag{5}$$

$$\begin{cases} \varphi_{pk}\left(I'_\ell, I''_\ell\right) = \sum\limits_{\ell=\Gamma+1}^{\Gamma+H}\left[R_{k,\ell}\left(I'_k I'_\ell + I''_k I''_\ell\right) - X_{k,\ell}\left(I'_k I''_\ell - I''_k I'_\ell\right)\right], \\ \varphi_{qk}\left(I'_\ell, I''_\ell\right) = \sum\limits_{\ell=\Gamma+1}^{\Gamma+H}\left[R_{k,\ell}\left(I'_k I''_\ell - I''_k I'_\ell\right) + X_{k,\ell}\left(I'_k I'_\ell + I''_k I''_\ell\right)\right]. \end{cases} \tag{6}$$

Величины $P_{Бm}$, $Q_{Бm}$, входящие в (2), определяются в виде

$$\begin{cases} P_{Бm} = \sum\limits_{\ell=\Gamma+1}^{\Gamma+H}\left(H_{m\ell}\cos\Psi_{um} + K_{m\ell}\sin\Psi_{um}\right)U_m, \\ Q_{Бm} = \sum\limits_{\ell=\Gamma+1}^{\Gamma+H}\left(H_{m\ell}\sin\Psi_{um} - K_{m\ell}\cos\Psi_{um}\right)U_m, \end{cases} \tag{7}$$

где

$$\begin{aligned} H_{m\ell} &= a'_{m,\ell}I'_\ell - a''_{m,\ell}I''_\ell, \\ K_{m\ell} &= a'_{m,\ell}I''_\ell + a''_{m,\ell}I'_\ell. \end{aligned} \tag{8}$$

В системе уравнений (3) величины $P_{Бк}$ и $Q_{Бк}$ определяются соответственно в виде

$$\begin{cases} P_{Бк} = \sum\limits_{n=1}^{\Gamma}\left(M_{kn}\cos\Psi_{un} + N_{kn}\sin\Psi_{un}\right)U_n, \\ Q_{Бк} = \sum\limits_{n=1}^{\Gamma}\left(M_{kn}\sin\Psi_{un} - N_{kn}\cos\Psi_{un}\right)U_n, \end{cases} \tag{9}$$

где

$$\begin{aligned} M_{kn} &= c'_{k,n}I'_k + c''_{k,n}I''_k, \\ N_{kn} &= c'_{k,n}I''_k + c''_{k,n}I'_k. \end{aligned} \tag{10}$$

В выражениях (8) и (10) величины a и c являются элементами матрицы Y-Z формы [8]. Можно заметить, что неявные функции Φ_{pm} и Φ_{qm} непосредственно зависят от модулей и аргументов комплексных напряжений станционных узлов, а функции Φ_{pk} и Φ_{qk} - от составляющих комплексных токов нагрузочных узлов.

В математической модели оптимизации режимов ЭЭС (1)-(4) функция (1) изображает целевую функцию, представляющую собой сумму расходных характеристик всех тепловых электрических станций; функции (2) и (3) – уравнения установившегося режима в виде баланса мощностей соответственно станционных и нагрузочных узлов; фунцкия (4) - условия типа неравенств, налагаемые на модули комплексных напряжений и реактивные мощности электрических станций. В (1)-(3) все функции являются нелинейными. Поэтому данная модель является типичной моделью нелинейного программирования, и ее необходимо реализовать методом нелинейного программирования. Однако, если не учитывать условия (4), то ее можно реализовать также методом классического программирования Лагранжа.

Если задачу оптимизации, как было отмечено выше, рассмотреть как задачу коррекции установившегося режима и на каждой итерации найти допустимый режим и оптимизировать его, то это значит, что естественным образом учитываются ограничения типа неравенств (4).

Таким образом, перед каждой итерацией, имея допустимый установившийся режим, его можно осуществить классическим методом программирования Лагранжа.

При этом вспомогательную функцию Лагранжа в матричной форме можно представить в виде

$$L = \sum_{m=0}^{\Gamma} F_m(P_m) + \lambda_{p0}\Phi_{p0} + \lambda^t_{pm}\Phi_{pm} + \lambda_{q0}\Phi_{q0} + \lambda^t_{qm}\Phi_{qm} + \lambda^t_{pk}\Phi_{pk} + \lambda^t_{qk}\Phi_{qk}, \qquad (11)$$

где $\lambda_{p0}, \lambda_{pm}; \lambda_{q0}, \lambda_{qm}$ - неопределенные множители Лагранжа, связанные с системой уравнений (2); $\lambda_{pk}, \lambda_{qk}$ - неопределенные множители Лагранжа, связанные с системой уравнений (3); t – знак транспонирования.

Из необходимого условия минимума функции (11) получим

$$\begin{cases} \dfrac{\partial F_0(P_0)}{\partial P_0} + \lambda_{p0}\dfrac{\partial \Phi_{p0}}{\partial P_0} + \lambda^t_{pm}\dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial P_0} + \lambda_{q0}\dfrac{\partial \Phi_{q0}}{\partial P_0} + \lambda^t_{qm}\dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial P_0} + \lambda^t_{pk}\dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial P_0} + \lambda^t_{qk}\dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial P_0} = 0, \\ \dfrac{\partial F_m(P_m)}{\partial P_m} + \lambda_{p0}\dfrac{\partial \Phi_{p0}}{\partial P_m} + \lambda^t_{pm}\dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial P_m} + \lambda_{q0}\dfrac{\partial \Phi_{q0}}{\partial P_m} + \lambda^t_{qm}\dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial P_m} + \lambda^t_{pk}\dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial P_m} + \lambda^t_{qk}\dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial P_m} = 0; \end{cases} \qquad (12)$$

$$\begin{cases} \dfrac{\partial F_m(P_m)}{\partial Q_0} + \lambda_{p0}\dfrac{\partial \Phi_{p0}}{\partial Q_0} + \lambda^t_{pm}\dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial Q_0} + \lambda_{q0}\dfrac{\partial \Phi_{q0}}{\partial Q_0} + \lambda^t_{qm}\dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial Q_0} + \lambda^t_{pk}\dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial Q_0} + \lambda^t_{qk}\dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial Q_0} = 0, \\ \dfrac{\partial F_m(P_m)}{\partial Q_m} + \lambda_{p0}\dfrac{\partial \Phi_{p0}}{\partial Q_m} + \lambda^t_{pm}\dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial Q_m} + \lambda_{q0}\dfrac{\partial \Phi_{q0}}{\partial Q_m} + \lambda^t_{qm}\dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial Q_m} + \lambda^t_{pk}\dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial Q_m} + \lambda^t_{qk}\dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial Q_m} = 0; \end{cases} \qquad (13)$$

$$\begin{cases} \lambda_{p0}\dfrac{\partial \Phi_{p0}}{\partial U_n} + \lambda^t_{pm}\dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} + \lambda_{q0}\dfrac{\partial \Phi_{q0}}{\partial U_n} + \lambda^t_{qm}\dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial U_n} + \lambda^t_{pk}\dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial U_n} + \lambda^t_{qk}\dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial U_n} = 0, \\ \lambda_{p0}\dfrac{\partial \Phi_{p0}}{\partial \Psi_{un}} + \lambda^t_{pm}\dfrac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{un}} + \lambda_{q0}\dfrac{\partial \Phi_{q0}}{\partial \Psi_{un}} + \lambda^t_{qm}\dfrac{\partial \Phi_{qm}}{\partial \Psi_{un}} + \lambda^t_{pk}\dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial \Psi_{un}} + \lambda^t_{qk}\dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial \Psi_{un}} = 0; \end{cases} \qquad (14)$$

$$\begin{cases} \lambda_{p0}\dfrac{\partial\Phi_{p0}}{\partial I'_\ell}+\lambda^t_{pm}\dfrac{\partial\Phi_{pm}}{\partial I'_\ell}+\lambda_{q0}\dfrac{\partial\Phi_{q0}}{\partial I'_\ell}+\lambda^t_{qm}\dfrac{\partial\Phi_{qm}}{\partial I'_\ell}+\lambda^t_{pk}\dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I'_\ell}+\lambda^t_{qk}\dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I'_\ell}=0, \\ \lambda_{p0}\dfrac{\partial\Phi_{p0}}{\partial I''_\ell}+\lambda^t_{pm}\dfrac{\partial\Phi_{pm}}{\partial I''_\ell}+\lambda_{q0}\dfrac{\partial\Phi_{q0}}{\partial I''_\ell}+\lambda^t_{qm}\dfrac{\partial\Phi_{qm}}{\partial I''_\ell}+\lambda^t_{pk}\dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I''_\ell}+\lambda^t_{qk}\dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I''_\ell}=0. \end{cases} \tag{15}$$

С учетом структуры функций, входящих в (12) и (13), получим

$$\frac{\partial F_0(P_0)}{\partial P_0}+\lambda_{p0}=0, \tag{16}$$

$$\frac{\partial F_m(P_m)}{\partial P_m}+\lambda_{pm}=0, \tag{17}$$

$$\lambda_{q0}=0, \tag{18}$$

$$\lambda_{qм}=0. \tag{19}$$

С учетом (18) и (19), входящих в (14) и (15), получим

$$\begin{cases} \lambda_{p0}\dfrac{\partial\Phi_{p0}}{\partial U_n}+\lambda^t_{pm}\dfrac{\partial\Phi_{pm}}{\partial U_n}+\lambda^t_{pk}\dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial U_n}+\lambda^t_{qk}\dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial U_n}=0, \\ \lambda_{p0}\dfrac{\partial\Phi_{p0}}{\partial \Psi_{un}}+\lambda^t_{pm}\dfrac{\partial\Phi_{pm}}{\partial \Psi_{un}}+\lambda^t_{pk}\dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial \Psi_{un}}+\lambda^t_{qk}\dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial \Psi_{un}}=0; \end{cases} \tag{20}$$

$$\begin{cases} \lambda_{p0}\dfrac{\partial\Phi_{p0}}{\partial I'_\ell}+\lambda^t_{pm}\dfrac{\partial\Phi_{pm}}{\partial I'_\ell}+\lambda^t_{pk}\dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I'_\ell}+\lambda^t_{qk}\dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I'_\ell}=0, \\ \lambda_{p0}\dfrac{\partial\Phi_{p0}}{\partial I''_\ell}+\lambda^t_{pm}\dfrac{\partial\Phi_{pm}}{\partial I''_\ell}+\lambda^t_{pk}\dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I''_\ell}+\lambda^t_{qk}\dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I''_\ell}=0. \end{cases} \tag{21}$$

Если к полученным системам уравнений (16)-(21) добавить также системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима ЭЭС, то их совместное рассмотрение позволит решить поставленную задачу.

Учитывая структуры функций, входящих в (20) и (21), и представляя их в матричной форме, получим

$$\left[\begin{array}{cc|cc} \dfrac{\partial\Phi_{p0}}{\partial U_n} & \dfrac{\partial\Phi_{pm}}{\partial U_n} & 0 & 0 \\ \dfrac{\partial\Phi_{p0}}{\partial \Psi_{un}} & \dfrac{\partial\Phi_{pm}}{\partial \Psi_{un}} & & \\ \hline 0 & 0 & \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I'_\ell} & \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I'_\ell} \\ 0 & 0 & \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I''_\ell} & \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I''_\ell} \end{array}\right]\cdot\left[\begin{array}{c} \lambda_{p0} \\ \lambda_{pm} \\ \hline \lambda_{pk} \\ \lambda_{qk} \end{array}\right]=0. \tag{22}$$

Представим матричное уравнение (22) в виде двух подматричных уравнений

$$\left[\begin{array}{c:c}\dfrac{\partial\Phi_{p0}}{\partial U_n} & \dfrac{\partial\Phi_{pm}}{\partial U_n}\end{array}\right]\cdot\left[\begin{array}{c}\lambda_{p0}\\ \hdashline \lambda_{pm}\end{array}\right]=0, \tag{23}$$

$$\left[\begin{array}{c:c|c:c}\dfrac{\partial\Phi_{p0}}{\partial\Psi_{un}} & \dfrac{\partial\Phi_{pm}}{\partial\Psi_{un}} & & \\ \hdashline & & \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I'_\ell} & \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I'_\ell} \\ \hdashline & & \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I''_\ell} & \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I''_\ell}\end{array}\right]\cdot\left[\begin{array}{c}\lambda_{p0}\\ \hdashline \lambda_{pm}\\ \hline \lambda_{pk}\\ \hdashline \lambda_{qk}\end{array}\right]=0. \tag{24}$$

Матричные уравнения (23) и (24) представим в следующем виде:

$$\left[\frac{\partial\Phi_{pm}}{\partial U_n}\right]\cdot\left[\lambda_{pm}\right]=-\left[\frac{\partial\Phi_{p0}}{\partial U_n}\right]\cdot\left[\lambda_{p0}\right], \tag{25}$$

$$\left[\begin{array}{c:c:c}\dfrac{\partial\Phi_{pm}}{\partial\Psi_{un}} & & \\ \hdashline & \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I'_\ell} & \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I'_\ell} \\ \hdashline & \dfrac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I''_\ell} & \dfrac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I''_\ell}\end{array}\right]\cdot\left[\begin{array}{c}\lambda_{pm}\\ \hdashline \lambda_{pk}\\ \hdashline \lambda_{qk}\end{array}\right]=-\left[\frac{\partial\Phi_{p0}}{\partial\Psi_{un}}\right]\cdot\lambda_{p0}. \tag{26}$$

Разумеется, что как (25), так и (26) получены из условия оптимальности.

Частные производные, входящие в матричные уравнения (25) и (26), определяются в виде:

- для матричного уравнения (26) при одинаковых индексах:

$$\frac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I'_k}=-\left[U'_{Бп}+2R_{k,k}I'_k+\sum_{\substack{\ell=\Gamma+1\\ \ell\neq k}}^{M}\left(R_{k,\ell}I'_\ell-X_{k,\ell}I''_\ell\right)\right], \tag{27}$$

$$\frac{\partial\Phi_{pk}}{\partial I''_k}=-\left[U''_{Бп}+2R_{k,k}I''_k+\sum_{\substack{\ell=\Gamma+1\\ \ell\neq k}}^{M}\left(R_{k,\ell}I''_\ell+X_{k,\ell}I'_\ell\right)\right], \tag{28}$$

$$\frac{\partial\Phi_{qk}}{\partial I'_k}=-\left[U''_{Бп}+2X_{k,k}I'_k+\sum_{\substack{\ell=\Gamma+1\\ \ell\neq k}}^{M}\left(R_{k,\ell}I''_\ell+X_{k,\ell}I'_\ell\right)\right], \tag{29}$$

$$\frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I''_k} = -\left[-U'_{Бп} + 2X_{k,k} I''_k - \sum_{\substack{\ell=\Gamma+1 \\ \ell \neq k}}^{M} \left(R_{k,\ell} I'_\ell - X_{k,\ell} I''_\ell \right) \right]; \qquad (30)$$

- при разных индексах:

$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_\ell} = -\left(R_{k,\ell} I'_k + X_{k,\ell} I''_k \right), \qquad (31)$$

$$\frac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I''_\ell} = -\left(R_{k,\ell} I''_k - X_{k,\ell} I'_k \right), \qquad (32)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I'_\ell} = -\left(- R_{k,\ell} I''_k + X_{k,\ell} I'_k \right), \qquad (33)$$

$$\frac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I''_\ell} = -\left(R_{k,\ell} I'_k + X_{k,\ell} I''_k \right). \qquad (34)$$

С другой стороны, имеем

$$U'_{Бп} = \sum_{n=1}^{\Gamma} \left(c'_{k,n} \cos \Psi_{un} - c''_{k,n} \sin \Psi_{un} \right) U_n , \qquad (35)$$

$$U''_{Бп} = \sum_{n=1}^{\Gamma} \left(c'_{k,n} \sin \Psi_{un} + c''_{k,n} \cos \Psi_{un} \right) U_n . \qquad (36)$$

Частные производные $\partial \Phi_{p0} / \partial \Psi_{un}$, входящие в (26), определяются в виде

$$\frac{\partial \Phi_{p0}}{\partial \Psi_{un}} = -U_0 \left[g_{0n} \sin\left(\Psi_{u0} - \Psi_{un} \right) - b_{0n} \cos\left(\Psi_{u0} - \Psi_{un} \right) \right] U_n . \qquad (37)$$

В результате установлены все типы частных производных, входящих в матричное уравнение (24), которое позволяет определить численные значения множителей Лагранжа λ_{pm}, λ_{pk}, λ_{qk} при известности λ_0. В данном случае:

$$\left[\lambda_{pm} \right] = -\left[\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{un}} \right]^{-1} \cdot \left[\frac{\partial \Phi_{p0}}{\partial \Psi_{un}} \right] \cdot \lambda_{p0} , \qquad (38)$$

$$\left[\begin{array}{c} \lambda_{pk} \\ \hline \lambda_{qk} \end{array} \right] = \left[\begin{array}{c:c} \dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I'_k} & \dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I'_k} \\ \hdashline \dfrac{\partial \Phi_{pk}}{\partial I''_k} & \dfrac{\partial \Phi_{qk}}{\partial I''_k} \end{array} \right]^{-1} \cdot \left[\frac{\partial \Phi_{p0}}{\partial \Psi_{un}} \right] \cdot \lambda_{p0} . \qquad (39)$$

Матричное выражение (25) получено из необходимого условия минимизации целевой функции и позволяет определить оптимальные значения модулей комплексных напряжений независимых станционных узлов.

Частные производные, входящие в (25), определяются в виде

$$\frac{\partial \Phi_{p0}}{\partial U_n} = -U_0\left[g_{0n}\cos\left(\Psi_{u0} - \Psi_{un}\right) + b_{0n}\sin\left(\Psi_{u0} - \Psi_{un}\right)\right], \tag{40}$$

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_n} = -U_m\left[g_{m,n}\cos\left(\Psi_{um} - \Psi_{un}\right) + b_{m,n}\sin\left(\Psi_{um} - \Psi_{un}\right)\right]. \tag{41}$$

Частные производные $\partial\Phi_{pm}/\partial U_m$ определяются в виде

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial U_m} = -\left\{I'_{Бm} - 2g_{m,m}U_m + \sum_{\substack{n=0\\ n\neq m}}\left[g_{m,n}\cos\left(\Psi_{um} - \Psi_{un}\right) + b_{m,n}\sin\left(\Psi_{um} - \Psi_{un}\right)\right]U_n\right\}. \tag{42}$$

Величина $I'_{Бm}$ определяется на основании выражения

$$I'_{Бm} = \sum_{\ell=\Gamma+1}^{M}\left(H_{m\ell}\cos\Psi_{um} + K_{m\ell}\sin\Psi_{um}\right). \tag{43}$$

После некоторых преобразований (25) можно установить следующие выражения для определения модулей напряжений независимых станционных узлов:

$$\left[U_m\right] = -\left[A_{m,n}\right]^{-1}\cdot\left[H_{m,m+1}\right], \tag{44}$$

где $A_{m,n}$ - неособенная квадратная матрица, порядок которой характеризуется числом независимых станционных узлов; $H_{m,m+1}$ - столбцевая матрица порядка $\Gamma\times 1$.

Элементы матрицы $A_{m,n}$ определяются в виде

$$A_{m,m} = 2g_{m,m}\lambda_{pm}, \tag{45}$$

$$A_{m,n} = G_{m,n}\lambda_{pm} + G_{n,m}\lambda_{pn}, \tag{46}$$

$$A_{m,n} = G_{m,n}\lambda_{pm} + G_{n,m}\lambda_{pn}. \tag{47}$$

Элементы столбцевой матрицы выражения (44) определяются в виде

$$H_{m,m+1} = E_{0m}\lambda_{p0} + \left(E_{m,n} + I'_{Б,m}\right)\lambda_{pm}, \tag{48}$$

где

$$E_{0m} = G_{0m}U_0, \tag{49}$$

$$E_{m,n} = G_{m,n}U_m. \tag{50}$$

С другой стороны,

$$G_{0m} = g_{0m}\cos\left(\Psi_{u0} - \Psi_{um}\right) + b_{0m}\sin\left(\Psi_{u0} - \Psi_{um}\right), \tag{51}$$

$$G_{m,n} = g_{m,n}\cos\left(\Psi_{um} - \Psi_{un}\right) + b_{m,n}\sin\left(\Psi_{um} - \Psi_{un}\right). \tag{52}$$

Имея численные значения множителей Лагранжа, на основании (17) можно установить численные значения активных мощностей, а на основании

(44) - численные значения модулей независимых станционных узлов, которые являются их квазиоптимальными значениями.

Таким образом, перед каждой итерацией устанавливаются квазиоптимальные значения режимных P-U параметров, и после завершения решения поставленной задачи устанавливаются их оптимальные значения.

Необходимо отметить, что перед каждой итерацией рассчитывается допустимый установившийся режим, а следовательно, и допустимые якобианы, которые входят в выражения (38), (39). Расчет допустимого установившегося при Y-Z форме задания состояния сети осуществляется методом, предложенным в [12-14] при P-U типе станционных узлов.

Для реализации численной математической модели оптимизации режима ЭЭС по управляющим режимным P-U параметрам станционных узлов предлагается следующий вычислительный алгоритм.

1. Строится численная математическая модель допустимого оптимального режима ЭЭС в виде (1)-(4).
2. Из математической модели оптимизации режима выделяется математическая модель допустимого установившегося режима, которая реализуется соответствующими рекуррентными выражениями, вытекающими из метода Ньютона-Рафсона.
3. Определяя допустимый установившийся режим, при котором обеспечиваются условия (4), устанавливаются численные значения активных мощностей P_0 балансирующего узла.
4. Имея численные значения P_0, на основе выражения (16), при наличии аналитического выражения функции $F_0(P_0)$, определяем множитель Лагранжа λ_{p0}.
5. Определяя допустимый установившийся режим, устанавливаются допустимые численные якобианы, входящие в (38) и (39), и численные значения соответствующих множителей Лагранжа.
6. Устанавливая численные значения множителей Лагранжа λ_{pm}, на основе выражения (17), при задании аналитических выражений функции $F_m(P_m)$, определяем численные квазиоптимальные значения активных мощностей P_m независимых станционных узлов.
7. Имея численные значения множителей Лагранжа, на основе выражения (44) определяем численные квазиоптимальные значения модулей комплексных напряжений независимых станционных узлов U_m.
8. В результате реализации вышеприведенных пунктов осуществляем первую итерацию, определяем квазиоптимальные значения управляющих режимных $P_m - U_m$ параметров станционных узлов и проверяем условия сходимости:

$$\left|P_m - \left[P_{Бm} + \varphi_{pm}(U_n,\ \Psi_{un})\right]\right| \le \Delta P_m, \tag{53}$$

$$\left|P_k - \left[P_{Бk} + \varphi_{pk}(I',\ I'')\right]\right| \le \Delta P_k, \tag{54}$$

$$\left| Q_k - \left[Q_{Бk} + \varphi_{qk}\left(I', I'' \right) \right] \right| \le \Delta Q_k , \qquad (55)$$

где ΔP_m, ΔP_k, ΔQ_k - положительные величины, характеризующие точность определения управляющих переменных.

9. Если условия (53)-(55) не обеспечиваются то организуется новая вторая итерация с расчетом допустимого установившегося режима. Выбор новых значений управляющих переменных осуществляется вышеотмеченным способом.
10. Поиск оптимального установившегося режима считаем завершенным, если обеспечиваются условия сходимости (53)-(55).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Хачатрян В.С.** Расчет режима энергосистем с тепловыми станциями // Электричество.-1971.-N 2.- С. 10-15.
2. **Хачатрян В.С.** Метод расчета оптимального режима энергосистем с тепловыми станциями // Известия вузов СССР. Энергетика.-1971.-N 5.- С. 92-96.
3. **Хачатрян В.С.** К теории оптимизации установившихся режимов больших электроэнергетических систем // Известия АН АрмССР. Сер. ТН.-1975.- N 3.-С. 67-72.
4. **Хачатрян В.С.** Метод и алгоритм оптимизации режима больших энергосистем // Изв. АН СССР. Энергетика и Транспорт.-1976.-N 5.- С. 24.-34.
5. **Хачатрян В.С., Балабекян М.А.** К теории оптимизации режимов больших электроэнергетических систем // Электричество.-1980.-N 10.-С. 55-57.
6. **Brown H.E., Carter G.H., Happ H.N., Person C.E.** Power flow solution by impedance matrix iteractive method //IEEE Transactions.- 1963.- PAS-82 .- N 65.- P. 1-10.
7. **Brown H.E., Carter G.H., Happ H.H.** Z-matrix algorithms in load flow programs // IEEE Transactions.- 1968.- V. PAS-87, N 3.- P. 807-814.
8. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А.** Развитие гибридного метода расчета установившегося режима электрической системы // Электричество.-1991.- N 1.- С. 6-13.
9. **Хачатрян В.С., Бадалян Н.П.** Решение (Z-Y)-уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом декомпозиции // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-1997.-Т 50, N 2.-С. 96-103.
10. **Negendra Rao. P.S., Prakase Rao K.S., Nandra J.** A novel hybrid load flow method // IEEE Transaction.-1998.-Vol. PAS-100, N 1.-P. 303-308.
11. **Хачатрян В.С., Тамразян М.Г., Каримян А.С.** Оптимизация режима электроэнергетической системы по P-U параметрам электрических станций // Сборник докладов Первой Международной конференции в Армении.- Ереван, 1998.- С. 255-257.
12. **Аракелян В.П., Каримян А.С.** Расчет допустимого установившегося режима электроэнергетической системы при задании состоянии сети в Y-Z форме // Сборник материалов годичной научной конференции ГИУА.- Ереван, 1998.-С. 85-86.
13. **Сафарян В.С., Григорян С.Э.** Расчет допустимого установившегося режима электроэнергетической системы при Y-Z форме задания состояния сети // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2003.-Т. 56, N 3.-С. 417 -425.
14. **Хачатрян В.С., Григорян С.Э.** Расчет допустимого установившегося режима электроэнергетической системы при задании состояния сети в Y-Z форме // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.-2007.-Т. 59, N 3.-С. 530–548.

Материал поступил в редакцию 18.03.2006.

Վ.Ս. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ, Մ.Գ. ԹԱՄՐԱԶՅԱՆ, Կ.Վ. ԽԱՉԱՏՐՅԱՆ,
Ս.Է. ԳՐԻԳՈՐՅԱՆ, Ա.Ս. ԿԱՐԻՄՅԱՆ

ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ ՀԱՄԱԿԱՐԳԻ ՌԵԺԻՄԻ ԼԱՎԱՐԿՈՒՄՆ ԸՍՏ ԷԼԵԿՏՐԱԿԱՆ ԿԱՅԱՆՆԵՐԻ P-U ՌԵԺԻՄԱՅԻՆ ՊԱՐԱՄԵՏՐԵՐԻ

Առաջարկվում է էլեկտրաէներգետիկական համակարգի ռեժիմի լավարկում, երբ որպես կառավարող փոփոխականներ ընտրվում են էլեկտրական կայանների P-U ռեժիմային պարամետրերը: Խնդրի լուծման ժամանակ հաշվի են առնվում ռեժիմային պարամետրերին ներկայացվող անհավասարության տեսքի սահմանափակումները: Որպես կապի պայմաններ ընտրվում են կայունացված ռեժիմի Y-Z տեսքի ոչ գծային հանրահաշվական հավասարումներ:

Առանցքային բառեր. էլեկտրաէներգետիկական համակարգ, մատրից, ռեժիմ, մոդել, բեռ, ֆունկցիա, կայան, հանգույց, պարամետր, հավասարում:

**V.S. KHACHATRYAN, M.G. TAMRAZYAN, K.V. KHACHATRYAN,
S.E. GRIGORYAN, A.S. KARIMYAN**

POWER SYSTEM REGIME OPTIMIZATION ON P-U REGIME PARAMETERS OF POWER PLANTS

A method of power engeneering system regime optimization is proposed and as controlling variables the regime parameters of station units are chosen. For solving the set problems the constraints of the unequality types imposed on regime parameters are taken into account.A system of nonlinear algebraic equations of steady-state regimes in the Y-Z form is selected as equations of communication.

Keywords: power system, matrix, regime, model, load, function, station, unit, parameter, equation.