В результате определяются реактивные мощности и аргументы напряжений для станционных узлов, составляющие комплексных токов и, при необходимости, комплексных напряжений нагрузочных узлов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хачатрян В.С. Метод и алгоритм установившихся режимов больших энергосистем // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1973. - № 4. - С. 45-57.
2. Хачатрян В.С. Определение установившихся режимов больших электроэнергетических систем с применением метода Ньютона-Рафсона // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. - 1974. - № 4. - С. 36-43.
3. Хачатрян В.С. Определение установившихся режимов больших энергосистем методом подсистем // Электричество. - 1974. - № 5. - С. 75-78.
4. Хачатрян В.С., Бадалян Н.П. Решение (Y-Z) -уравнений установившегося режима электроэнергетической системы методом декомпозиции // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 1997. - Т.50, № 2. - С. 96-103.

ГИУА

03.06.1998

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. LI, № 3, 1998, с. 295 - 300.

УДК 621.311.001

ЭНЕРГЕТИКА

В.С. ХАЧАТРЯН, АЛЬ-ИССА ИБРАХИМ, К.В. ХАЧАТРЯН

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОПУСТИМОГО УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Մանրագրվում է բաղադրված ռեժիմի որոշման էլեկտրաէներգետիկական համակարգի կայունացման սեփական ու զմային կանոնադրված կապաարանների համակարգի լուծման վրա կիրառված մեթոդ, երբ անհավասարության տեսքով անհատականություններ դրված են անկախ կայանների լարումների և անհարված կորոպորանների:

Предлагается метод определения допустимого режима, основанный на решении системы нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима ЭЭС при наличии ограничений типа неравенств, налагаемых на модули напряжений и реактивных мощностей независимых станционных узлов.

Библиогр.: 8 назв.

A method of the admissible mode definition based on the solution of nonlinear algebraic steady-state equations for electric power system mode having inequality type restrictions is proposed. The restrictions are imposed on voltage and reactive power of independent station unit modules.

Ref. 8.

При решении задачи оптимизации режима электроэнергетической системы (ЭЭС) важным является расчет ее допустимого установившегося режима.

Основой модели допустимого режима является математическая модель установившегося режима ЭЭС [1-8].

Под допустимым режимом ЭЭС понимается такое состояние режимных параметров, при котором они удовлетворяют условиям типа неравенств, налагаемых на них. Как обычно, ограничения налагаются на модули напряжений и реактивных мощностей станционных узлов.

Математическую модель допустимого установившегося режима ЭЭС можно получить на основании следующей системы уравнений при Z-форме задания состояния сети [1]:

$$\begin{cases} \Phi_{i_1} = P_i - \left[\frac{U_i}{U_j} (P_j \cos \Psi_{ij} + Q_j \sin \Psi_{ij}) + \sum_{j=1}^M (R_{ij} A_{ij} + x_{ij} B_{ij}) \right] = 0, \\ \Phi_{i_2} = Q_i - \left[-\frac{U_i}{U_j} (P_j \sin \Psi_{ij} - Q_j \cos \Psi_{ij}) + \sum_{j=1}^M (x_{ij} A_{ij} - R_{ij} B_{ij}) \right] = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$\begin{aligned} A_{ij} &= \frac{1}{U_i U_j} \left[(P_i P_j + Q_i Q_j) \cos(\Psi_{ij} - \Psi_{ji}) + (Q_i P_j - P_i Q_j) \sin(\Psi_{ij} - \Psi_{ji}) \right], \\ B_{ij} &= \frac{1}{U_i U_j} \left[(P_i P_j + Q_i Q_j) \sin(\Psi_{ij} - \Psi_{ji}) - (Q_i P_j - P_i Q_j) \cos(\Psi_{ij} - \Psi_{ji}) \right]. \end{aligned} \quad (2)$$

Представим систему нелинейных алгебраических уравнений (1) в виде

$$\Phi_{i_1}(P, Q, U, \Psi_{ij}) = 0, \quad \Phi_{i_2}(P, Q, U, \Psi_{ij}) = 0, \quad (3)$$

где индекс i относится как к станционным, так и к нагрузочным узлам.

Для дальнейшего изложения материала выберем дополнительную систему индексов: для независимых станционных узлов - $m(n) = 1, 2, 3, \dots, \Gamma$, где Γ - число независимых станционных узлов; для нагрузочных узлов - $K(l) = \Gamma + 1, \Gamma + 2, \Gamma + 3, \dots, \Gamma + N$, где N - число нагрузочных узлов. При этом неявную систему нелинейных алгебраических уравнений (3) можно представить в следующем виде

$$\Phi_{i_{mn}}(P, Q, U, \Psi_{ij}) = 0, \quad \Phi_{i_{qn}}(P, Q, U, \Psi_{ij}) = 0, \quad (4)$$

$$\Phi_{i_{pk}}(P, Q, U, \Psi_{ij}) = 0, \quad \Phi_{i_{qk}}(P, Q, U, \Psi_{ij}) = 0. \quad (5)$$

Система неявных нелинейных алгебраических уравнений (4) относится к станционным узлам, а (5) - к нагрузочным узлам.

Введем следующие обозначения:

$$\Phi_m \{ \Phi_{i_{mn}}, \Phi_{i_{qn}} \} = 0, \quad (6)$$

$$\Phi_k \{ \Phi_{i_{pk}}, \Phi_{i_{qk}} \} = 0. \quad (7)$$

При этом математическую модель допустимого установившегося режима ЭЭС можно представить в виде

$$\Phi_m(P, Q, U, \Psi_m) = 0, \quad (8)$$

$$\Phi_k(P, Q, U, \Psi_m) = 0, \quad (9)$$

$$U_{\text{min}} \leq U_m \leq U_{\text{max}}, \quad (10)$$

$$Q_{\text{min}} \leq Q_m \leq Q_{\text{max}}, \quad (11)$$

где U_{min} , Q_{min} и U_{max} , Q_{max} - предельные минимальные и максимальные значения модулей напряжений и реактивных мощностей независимых станционных узлов.

Принимая, что все узлы являются узлами типа P-Q, выражения (8) и (9) изображают полную систему нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима ЭЭС. Необходимо отметить, что при станционных узлах типа P-U структура системы нелинейных алгебраических уравнений (8) и (9) не изменяется.

Если узлы типа P-Q, то это означает, что для каждого узла заданы активные и реактивные мощности. Поэтому уравнения (8) и (9) являются функцией от модулей и аргументов комплексных напряжений. Учитывая, что (8) и (9) получены из системы уравнений (1), на основе (6) и (7) можем написать следующее рекуррентное выражение на основании метода Ньютона-Рафсона:

$$\begin{bmatrix} \Psi_{m1} \\ \vdots \\ \Psi_{uk} \\ \vdots \\ U_k \\ \vdots \\ U_m \end{bmatrix}^{I+1} = \begin{bmatrix} \Psi_{m1} \\ \vdots \\ \Psi_{uk} \\ \vdots \\ U_k \\ \vdots \\ U_m \end{bmatrix}^I - \begin{bmatrix} \Delta \Psi_{m1} \\ \vdots \\ \Delta \Psi_{uk} \\ \vdots \\ \Delta U_k \\ \vdots \\ \Delta U_m \end{bmatrix}^I, \quad (12)$$

где I - номер итерации.

Вторая столбцовая матрица правой части определяется на основании следующего матричного уравнения:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \vdots \\ \Delta P_k \\ \vdots \\ \Delta Q_k \\ \vdots \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial \Phi_{m1}}{\partial \Psi_{m1}} & \frac{\partial \Phi_{m1}}{\partial \Psi_{ur}} & \frac{\partial \Phi_{m1}}{\partial U_k} & \frac{\partial \Phi_{m1}}{\partial U_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Phi_{rk}}{\partial \Psi_{m1}} & \frac{\partial \Phi_{rk}}{\partial \Psi_{ur}} & \frac{\partial \Phi_{rk}}{\partial U_k} & \frac{\partial \Phi_{rk}}{\partial U_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Phi_{uk}}{\partial \Psi_{m1}} & \frac{\partial \Phi_{uk}}{\partial \Psi_{ur}} & \frac{\partial \Phi_{uk}}{\partial U_k} & \frac{\partial \Phi_{uk}}{\partial U_m} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\partial \Phi_{qm1}}{\partial \Psi_{m1}} & \frac{\partial \Phi_{qm1}}{\partial \Psi_{ur}} & \frac{\partial \Phi_{qm1}}{\partial U_k} & \frac{\partial \Phi_{qm1}}{\partial U_m} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta \Psi_{m1} \\ \vdots \\ \Delta \Psi_{uk} \\ \vdots \\ \Delta \Psi_{ur} \\ \vdots \\ \Delta U_k \\ \vdots \\ \Delta U_m \end{bmatrix}, \quad (13)$$

где ΔP_m , ΔQ_m и ΔP_k , ΔQ_k - приращения активных и реактивных мощностей независимых станционных и нагрузочных узлов;

$\Delta\Psi_{mn}$, ΔU_m и $\Delta\Psi_{uk}$, ΔU_k - приращения аргументов и модулей комплексных напряжений независимых станционных и нагрузочных узлов.

После соответствующих обозначений частных производных матричное выражение (13) представим в виде

$$\begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \text{---} \\ \Delta P_k \\ \text{---} \\ \Delta Q_k \\ \text{---} \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{m1} & | & a_{m2} & | & c_{m1} & | & c_{m2} \\ - & | & - & | & - & | & - \\ a_{k1} & | & a_{k2} & | & c_{k1} & | & c_{k2} \\ - & | & - & | & - & | & - \\ b_{k1} & | & b_{k2} & | & d_{k1} & | & d_{k2} \\ - & | & - & | & - & | & - \\ b_{m1} & | & b_{m2} & | & d_{m1} & | & d_{m2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta\Psi_{mn} \\ \text{---} \\ \Delta\Psi_{uk} \\ \text{---} \\ \Delta U_k \\ \text{---} \\ \Delta U_m \end{bmatrix} \quad (14)$$

Обращая матрицу Якоби выражения (14), получим

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{mn} \\ \text{---} \\ \Delta\Psi_{uk} \\ \text{---} \\ \Delta U_k \\ \text{---} \\ \Delta U_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{m1} & | & \alpha_{m2} & | & \beta_{m1} & | & \beta_{m2} \\ - & | & - & | & - & | & - \\ \alpha_{k1} & | & \alpha_{k2} & | & \beta_{k1} & | & \beta_{k2} \\ - & | & - & | & - & | & - \\ \gamma_{k1} & | & \gamma_{k2} & | & \delta_{k1} & | & \delta_{k2} \\ - & | & - & | & - & | & - \\ \gamma_{m1} & | & \gamma_{m2} & | & \delta_{m1} & | & \delta_{m2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \text{---} \\ \Delta P_k \\ \text{---} \\ \Delta Q_k \\ \text{---} \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} \quad (15)$$

Частные производные, входящие в вышеприведенные матрицы Якоби, определяются на основании аналитических выражений (4) и (5).

Предположим, что станционные узлы являются узлами типа P-U, т.е. относительно этих узлов зафиксированы активные мощности и модули комплексных напряжений. Тогда имеет место следующее соотношение

$$\Delta U_1 = \Delta U_2 = \dots = \Delta U_r = 0 \text{ или } [\Delta U_m] = 0. \quad (16)$$

При этом матричное выражение (15) можно представить в виде двух подматричных выражений:

$$\begin{bmatrix} \Delta\Psi_{mn} \\ \text{---} \\ \Delta\Psi_{uk} \\ \text{---} \\ \Delta U_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_{m1} & | & \alpha_{m2} & | & \beta_{m1} & | & \beta_{m2} \\ - & | & - & | & - & | & - \\ \alpha_{k1} & | & \alpha_{k2} & | & \beta_{k1} & | & \beta_{k2} \\ - & | & - & | & - & | & - \\ \gamma_{k1} & | & \gamma_{k2} & | & \delta_{k1} & | & \delta_{k2} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \text{---} \\ \Delta P_k \\ \text{---} \\ \Delta Q_k \\ \text{---} \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} \quad (17)$$

$$[0] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ \gamma_{mn} & \gamma_{mv} & \delta_{mv} & \delta_{mn} \\ 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \Delta P_m \\ \Delta P_k \\ \Delta Q_k \\ \Delta Q_m \end{bmatrix} \quad (18)$$

Из матричного выражения (18) можно определить вектор реактивных мощностей независимых стационарных узлов:

$$[\Delta Q_m] = -[\delta_{mn}]^{-1} \times [\Delta_{mn}]. \quad (19)$$

где $[\Delta_{mn}] = [\gamma_{mn}] \times [\Delta P_m] + [\gamma_{mv}] \times [\Delta P_k] + [\delta_{mv}] \times [\Delta Q_k]$.

На основании (19) можно установить численные значения приращений реактивных мощностей независимых стационарных узлов:

$$[\Delta Q_m] = [\Delta Q_1 \quad \Delta Q_2 \quad \dots \quad \Delta Q_r]^T. \quad (20)$$

где 1 - знак транспонирования.

На основе численных значений приращений реактивных мощностей независимых стационарных узлов можно определить также их действительные значения, пользуясь вторым векторным уравнением (4).

При проверке условия допустимости реактивных мощностей согласно (11) возникают следующие случаи:

1. Условие (11) полностью обеспечивается. При этом непосредственно необходимо перейти к расчету установившегося режима. На основании (17) вычисляются численные значения приращений $\Delta \Psi_{mn}$, $\Delta \Psi_{nk}$ и ΔU_k , затем, пользуясь рекуррентным выражением

$$\begin{bmatrix} \Psi_{mn} \\ \Psi_{nk} \\ U_k \end{bmatrix}^{i+1} = \begin{bmatrix} \Psi_{mn} \\ \Psi_{nk} \\ U_k \end{bmatrix}^i - \begin{bmatrix} \Delta \Psi_{mn} \\ \Delta \Psi_{nk} \\ \Delta U_k \end{bmatrix}^i. \quad (21)$$

вычисляются их действительные значения. Перед каждой итерацией проверяется условие (11). Итерационный процесс считается завершенным, если искомые режимные параметры принимают желаемые численные значения с точки зрения их точности.

2. Условие (11) обеспечивается неполностью. Нарушение может быть двояким, если реактивная мощность данного независимого стационарного узла с индексом i окажется больше верхнего предела или меньше нижнего предела. В обоих случаях

данный стационарный узел типа P_1-U_1 заменяется узлом типа P_1-Q_1 . Причем в первом случае принимается $Q_1=Q_{\text{зад}}$, во втором случае - $Q_1=Q_{\text{зад}}$.

Для таких стационарных узлов искомыми переменными являются модули и аргументы комплексных напряжений. При этом перед каждой итерацией проверяется условие допустимости модулей комплексных напряжений согласно (10). Если нарушается условие допустимости модулей напряжений, то аналогичным образом из стационарного узла типа $P-Q$ переходим к $P-U$.

Таким образом, путем перехода от стационарных узлов типа $P-U$ к узлам типа $P-Q$ и наоборот можно добиться получения допустимого установившегося режима ЭЭС, при котором модули напряжений и реактивные мощности находятся в пределах допустимости.

ЛИТЕРАТУРА

1. Хачатрян В.С., Ибрахим Аль-Исса. Оптимизация режима электроэнергетической системы по реактивным мощностям прямым методом классического программирования при Z-форме задания состояния сети // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 1997. - Т. 50, №2 - С. 89-95.
2. Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А. Метод установившегося режима электрической системы // Изв. вузов СССР. Энергетика. - 1989. - №5. - С. 12-18.
3. Хачатрян В.С., Хачатрян С.Ц., Сафарян В.С. Расчет установившегося режима электрических систем с применением матрицы Гессе при Z-форме задания состояния сети // Изв. вузов СССР. Энергетика. - 1990. - №1. - С. 20-23.
4. Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А. Развитие гибридного метода расчета установившегося режима электрической системы // Электричество. - 1991. - №1. - С. 6-13.
5. Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А., Аракелян В.П. Упрощенный метод расчета установившегося режима электроэнергетической системы // Электричество. - 1992. - №2. - С. 9-14.
6. Аракелян В.П., Хачатрян К.В., Аль-Дарвиш М.Б. Об одном методе расчета установившегося режима электроэнергетической системы // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 1996. - Т.49, № 1. - С. 17-22.
7. Бадалян Г.А. Об одном методе определения Z-матрицы обобщенных параметров электрических систем // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 1996. - Т. 49, №1 - С. 11-16.
8. Тамразян М.Г. Об одном (Y-Z) - методе расчета установившегося режима электроэнергетической системы // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 1996. - Т. 49, № 3 - С. 138-142.

ГИУА

08.04.1998