2. **Хачатрян В.С., Этмекчян Э.А.** Развитие гибридного метода расчета установившихся режимов электрических систем // Электричество. - 1991. - № 1. - С. 6-13.
3. **Хачатрян В.С., Хачатрян С.Ц., Сафарян В.С.** Расчет установившихся электрических систем с применением матрицы Гессе при Z-форме задания режимов состояния сети // Изв. вузов СССР. Энергетика. - 1990. - № 1. - С. 20-23.
4. **Хачатрян В.С., Аль-Дарвиш М.Б.** Решение Y-Z-формы уравнения установившегося режима электроэнергетической системы с помощью матрицы Гессе // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН. - 1997.-Т. 50, №3. - С.13 -26.

ГИУА 08.04.1998

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. LI, № 2, 1998, с. 178-184.

УДК 621.311.001.24:002.6 **ЭНЕРГЕТИКА**

К.В. ХАЧАТРЯН, Х. ИСЛАМ

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ НЕНАБЛЮДАЕМОЙ ЧАСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Կառուցված է էլեկտրաէներգետիկական համակարգի կայունացված ռեժիմի մաթեմատիկական մոդել, որը հնարավորություն է տալիս գնահատել չդիտարկվող մասի ռեժիմային պարամետրերը, երբ տրված է դիտարկվող մասի նկատմամբ անհրաժեշտ ինֆորմացիա:

Построена математическая модель установившегося режима ЭЭС, позволяющая определить режимные параметры ненаблюдаемой части при наличии исходной информации относительно наблюдаемой.

Библиогр.: 8 назв.

A mathematical model with steady-state conditions enabling to determine mode parameters of the nonobservable part is constructed when the initial information relative to observable one is available.

Ref. 8.

Как известно [1-2], для решения задачи расчета установившегося режима требуется обеспечить в качестве исходной информации два режимных параметра для каждого узла.

Сущность задачи оценивания заключается в том, что наряду с установлением состояния режимных параметров необходимо заняться также обработкой телеизмерений или информации и их качеством с точки зрения точности. В случае, если заданная исходная информация позволяет установить состояние искомых режимных параметров, исследуемая ЭЭС называется наблюдаемой, в противном случае - ненаблюдаемой. Как в теоретическом, так и практическом аспекте, всегда можно получить необходимую исходную информацию для решения полной задачи оценивания состояния режимных параметров ЭЭС. Однако это связано с большими затруднениями и затратами. Отметим, что в общем случае исследуемая ЭЭС может быть полунаблюдаемой.

Если ЭЭС состоит из небольшого количества станционных и нагрузочных узлов, то она является полностью наблюдаемой. Если же ЭЭС состоит из большого количества станционных и нагрузочных узлов, то она не может быть полностью наблюдаемой. Однако следует отметить, что за станционными узлами всегда производится контроль и обеспечивается информация о состоянии двух режимных параметров типа P-U или P-Q. Что касается базисного (балансирующего) станционного узла, то относительно него всегда можно иметь модуль комплексного напряжения при нулевом фазовом сдвиге.

С точки зрения получения исходной информации, основные затруднения связаны с нагрузочными узлами, в особенности с удаленными нагрузочными узлами.

В настоящей статье рассматривается случай, когда задана исходная информация относительно станционных узлов. Необходимо определить значения искомых режимных параметров при полной наблюдаемости топологии электрической схемы.

Перспективным направлением для решения поставленной задачи является построение такой математической модели установившегося режима, которая срабатывала бы при данной исходной информации относительно станционных узлов ЭЭС [6]. При этом математическая модель установившегося режима ЭЭС строится с определенным допущением.

Предполагается, что независимыми станционными узлами являются узлы типа P-U, т.е. заданы активные мощности, модули комплексных напряжений и необходимо определить реактивные мощности и аргументы напряжений. Базисным (балансирующим) станционным узлом является узел типа $U-\psi_u$, причем $\psi_u=0$.

Принимая систему индексов относительно станционных и нагрузочных узлов как в [8], матричное уравнение состояния в развернутой форме можно представить в виде

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_m \\ --- \\ \dot{I}_\ell \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{mk} & | & Y_{mk} \\ - & - & - \\ Y_{\ell n} & | & Y_{\ell k} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_{no} \\ --- \\ \dot{U}_{ko} \end{bmatrix}. \qquad (1)$$

Здесь $\dot{I}_m$, $\dot{I}_\ell$ - многомерные векторы комплексных токов наблюдаемых независимых станционных и ненаблюдаемых нагрузочных узлов соответственно; $\dot{U}_{no}$, $\dot{U}_{ko}$ - многомерные векторы комплексных напряжений тех же узлов относительно напряжения наблюдаемого базисного станционного узла; Y_{mk}; $Y_{\ell k}$ - квадратные подматрицы собственных и взаимных комплексных проводимостей между независимыми наблюдаемыми станционными и ненаблюдаемыми нагрузочными узлами соответственно; Y_{mk}, $Y_{\ell n}$ - прямоугольные подматрицы взаимных комплексных проводимостей между наблюдаемыми и ненаблюдаемыми узлами.

Узел называется наблюдаемым, если относительно него в качестве исходной информации из четырех узловых режимных параметров (активная и реактивная мощности, модуль и аргумент комплексного напряжения) задаются два. Узел называется ненаблюдаемым, если относительно него не задается исходная информация.

Таким образом, станционные узлы называются наблюдаемыми, а нагрузочные узлы - ненаблюдаемыми.

Поскольку нагрузочные узлы являются ненаблюдаемыми, то для построения математической модели установившегося режима ЭЭС из матричного уравнения состояния (1) необходимо исключить активные параметры нагрузочных узлов: $\dot{I}_l$ и $\dot{U}_{k\delta}$.

Предположим, на нагрузочных узлах действуют напряжения $\dot{U}_k$ и через них проходит ток $\dot{I}_k$. Тогда можем написать

$$\dot{I}_k = Y_{нk}\dot{U}_k, \tag{2}$$

где $Y_{нk}$ - комплексная проводимость нагрузки с индексом k.

С другой стороны,

$$\dot{I}_k = (P_k - jQ_k)/\hat{U}_k, \tag{3}$$

где P_k, Q_k - заданные активная и реактивная мощности нагрузочного узла.

Приравнивая (2) и (3), получим

$$(P_k - jQ_k)/\hat{U}_k = Y_{нk}\dot{U}_k. \tag{4}$$

Откуда находим

$$Y_{нk} = (P_k - jQ_k)/U_k^2. \tag{5}$$

Полученное выражение показывает, что величина $Y_{нk}$ зависит только от переменного напряжения того же узла.

Так как на шинах нагрузок функционируют неизвестные комплексные напряжения, то выражение (5) изображает предварительное значение комплексной проводимости нагрузки узла k, которое необходимо уточнить на каждой итерации с целью установления действительных значений режимных параметров. При этом важным является правильный выбор выражения для определения комплексных токов нагрузочных узлов.

Выражение комплексной проводимости нагрузки $Y_{нk}$ узла k получено при предположении, что на узле действует произвольное напряжение $\dot{U}_k$.

Полученная комплексная проводимость вводится в подматрицу матричного уравнения (1) в качестве диагонального элемента.

При этом матричное уравнение (1) принимает следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_m \\ --- \\ j_k \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{mn} & | & Y_{mk} \\ - & - & - \\ Y_{\ell n} & | & Y^{н}_{\ell k} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_{nз} \\ --- \\ \dot{U}_{k\delta} \end{bmatrix}, \tag{6}$$

где

$$Y^{н}_{\ell k} = Y_{\ell k} + \mathrm{diag}\, Y_{нk}. \tag{7}$$

Представим матричное уравнение (6) в гибридной Y-Z- форме:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_m \\ --- \\ \dot{U}_{k0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{m,n} & | & \dot{A}_{m,\ell} \\ - & - & - \\ \dot{B}_{k,n} & | & Z^{H}_{\ell,k} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{U}_{n0} \\ --- \\ \dot{J}_k \end{bmatrix}. \tag{8}$$

В матричном уравнении (8) приняты следующие обозначения:

$$Y_{m,n} = Y_{mn} - Y_{mk} Z^{H}_{\ell,k} Y_{\ell n}, \tag{9}$$

$$\dot{A}_{m,\ell} = Y_{mk} Z^{H}_{\ell,k}, \tag{10}$$

$$\dot{B}_{k,n} = -Z^{H}_{\ell,k} Y_{\ell n}, \quad Z^{H}_{\ell,k} = Z^{H}_{\ell k}. \tag{11}$$

С другой стороны, имеем

$$Z^{H}_{\ell,k} = (Y^{H}_{\ell k})^{-1} = (Y_{\ell k} + \operatorname{diag} Y_{nk})^{-1}. \tag{12}$$

Комплексный ток $\dot{J}_k$ матричного уравнения (8) определяется с помощью выражения

$$\dot{J}_k = (\hat{U}_k Y_{nk} - (P_k + jQ_k)/\hat{U}_k)^{*}. \tag{13}$$

Как видно, после установления комплексной величины в скобках правой части (13) необходимо установить ее комплексно-сопряженное значение.

Представим матричное уравнение (8) в алгебраической форме

$$\dot{I}_m = \sum_{n=1}^{\Gamma} Y_{m,n} \dot{U}_{n0} + \sum_{\ell=\Gamma+1}^{M} \dot{A}_{m,\ell} \dot{J}_k, \tag{14}$$

$$\dot{U}_{k0} = \sum_{n=1}^{\Gamma} \dot{B}_{k,n} \dot{U}_{n0} + \sum_{\ell=\Gamma+1}^{M} Z^{H}_{\ell,k} \dot{J}_k. \tag{15}$$

Уравнение (14) в виде узловых мощностей имеет вид

$$\begin{gathered} P_m = P_{Бm} + U_m \sum_{n=1}^{\Gamma} [g_{m,n} \cos(\psi_{um} - \psi_{un}) + b_{m,n} \sin(\psi_{um} - \psi_{un})] U_n, \\ Q_m = Q_{Бm} + U_m \sum_{n=1}^{\Gamma} [g_{m,n} \sin(\psi_{um} - \psi_{un}) - b_{m,n} \cos(\psi_{um} - \psi_{un})] U_n. \end{gathered} \tag{16}$$

Величины $P_{Бm}$ и $Q_{Бm}$ определяются в виде

$$\begin{gathered} P_{Бm} = p_{Бm} + \sum_{\ell=\Gamma+1}^{M} (H_{m\ell} \cos\psi_{um} + K_{m\ell} \sin\psi_{um}) U_m, \\ Q_{Бm} = q_{Бm} + \sum_{\ell=\Gamma+1}^{M} (H_{m\ell} \sin\psi_{um} - K_{m\ell} \cos\psi_{um}) U_m, \end{gathered} \tag{17}$$

где

$$\begin{gathered} p_{Бm} = -\sum_{n=1}^{\Gamma} (g_{m,n} \cos\psi_{um} + b_{m,n} \sin\psi_{um}) U_0 U_m, \\ q_{Бm} = -\sum_{n=1}^{\Gamma} (g_{m,n} \sin\psi_{um} - b_{m,n} \cos\psi_{um}) U_0 U_m. \end{gathered} \tag{18}$$

С другой стороны,

$$H_{m\ell} = a'_{m,\ell} J'_{\ell} - a''_{m,\ell} J''_{\ell}, \quad K_{m\ell} = a'_{m,\ell} J''_{\ell} + a''_{m,\ell} J'_{\ell}. \tag{19}$$

Представим (15) в виде

$$\dot{U}_k = \dot{C}_{k,n} + \sum_{n=1}^{\Gamma} B_{k,n}\dot{U}_n + \sum_{\ell=\Gamma+1}^{\Gamma+H} Z^{H}_{\ell,k} J_k, \tag{20}$$

где

$$\dot{C}_{k,n} = U_0(1 - \sum_{n=1}^{\Gamma} \dot{B}_{k,n}). \tag{21}$$

Таким образом, рассматривается случай решения задачи, когда станционные узлы являются узлами типа $P-U$, при котором из системы (16) необходимо рассмотреть только первое уравнение.

Представим первое уравнение системы (16) в следующем виде:

$$\Phi_{pm}(U_n,\ \psi_{un}) = P_m - [P_{Бm} + \varphi_{pm}(U_n,\ \psi_{un})] = 0, \tag{22}$$

где

$$\varphi_{pm}(U_n,\ \psi_{un}) = \\ = U_m \sum_{n=1}^{\Gamma} [g_{m,n}\cos(\psi_{um} - \psi_{un}) + b_{m,n}\sin(\psi_{um} - \psi_{un})]U_n. \tag{23}$$

В результате получим два совместных нелинейных взаимосвязанных уравнения (20) и (22). Поскольку модули напряжений станционных узлов заданы, то уравнение (22) можно представить в виде

$$\Phi_{pm}(\psi_{un}) = P_m - [P_{Бm} + \varphi_{pm}(\psi_{un})] = 0. \tag{24}$$

Уравнение (24) решается методом Ньютона-Рафсона, тогда как уравнение (20) - методом простой итерации.

Относительно искомого вектора ψ_{un} (24), рекуррентное выражение, вытекающее из метода Ньютона-Рафсона, имеет вид

$$[\psi_{um}]^{И+1} = [\psi_{um}]^{И} - \left[\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \Psi_{un}}\right]^{-1} \times [\Phi_{pm}], \tag{25}$$

где И - номер итерации.

Частные производные, входящие в матрицу Якоби рекуррентного выражения (25), определяются в виде

$$\frac{\partial \Phi_{pm}}{\partial \psi_{un}} = \begin{cases} -P_{Бm(k)} - U_m \sum\limits_{\substack{n=1 \\ n\neq m}}^{\Gamma} [g_{m,n}\sin(\psi_{um} - \psi_{un}) - \\ -b_{m,n}\cos(\psi_{um} - \psi_{un})]U_n \quad \text{при } n = m, \\ \\ -U_m[g_{m,n}\sin(\psi_{um} - \psi_{un}) - \\ -b_{m,n}\cos(\psi_{um} - \psi_{un})]U_n \quad \text{при } n \neq m. \end{cases} \tag{26}$$

где

$$P_{Бm(k)} = \sum_{n=1}^{Г}(g_{m,n}\sin\psi_{um} - b_{m,n}\cos\psi_{um})U_Б U_m -$$

$$-\sum_{\ell=Г+1}^{M}(H_{m,\ell}\sin\psi_{um} - K_{m,\ell}\cos\psi_{um})U_\ell. \qquad (27)$$

Устанавливая аналитические выражения необходимых функций, можно перейти к организации итерационного процесса, сущность которого заключается в следующем. Перед началом итерационного процесса принимаем аргументы комплексных напряжений станционных узлов равными нулю: $\psi_{u1} = \psi_{u2} = \ldots = \psi_{uГ}$. Комплексные напряжения нагрузочных узлов принимаем равными заданному напряжению базисного узла, т.е. $U'_{Г+1} = U'_{Г+2} = \ldots = U'_M = U_Б$; $U''_{Г+1} = U''_{Г+2} = \ldots = U''_M = 0$.

Определяя Y_{nk} по формуле (5), с учетом заданных активных и реактивных мощностей устанавливаем численные значения элементов гибридной матрицы уравнения (8). Затем вычисляем численные значения токов $\dot{J}_k$ на основании (13), т.е. $\dot{J}_k = 0$, в результате получаем $H_{m\ell} = K_{m\ell} = 0$. Следовательно, $P_{Бm} = p_{Бm}$. Далее вычисляем $P_{Бm(k)}$ и устанавливаем численные значения частных производных, входящих в рекуррентное выражение (25). Осуществляя первую итерацию, получаем новые численные значения для ψ_{um} и, следовательно, для $\dot{U}_m$. Используя начальные значения $\dot{J}_k$ и вновь полученные значения $\dot{U}_m$, с помощью (20) определяем новые численные значения для $\dot{U}_k$.

Имея новые численные значения $\dot{U}_k$, устанавливаем значения $\dot{J}_k$ и т.д. Далее поступаем аналогичным образом, как описано выше.

Итерационный процесс считаем завершенным, если обеспечиваются условия:

$$\left|P_m - [P_{Бm} + \varphi_{pm}(\psi_{um})]\right| \le \Delta P, \qquad (28)$$

$$\left|U_k^{n+1} - U_k^n\right| \le \Delta U, \qquad (29)$$

где ΔP и ΔU - заданные положительные величины, характеризующие точность определения численных значений Ψ_{um} и U_k соответственно.

На основе численных значений компонентов Ψ_{um} с помощью второго уравнения системы (16) устанавливаем также численные значения искомых реактивных мощностей независимых станционных узлов. При этом можно определить также активную и реактивную мощности базисного станционного узла.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Мельников Н.А., Молохия И.М.** Возможности сокращения объема информации для определения рабочего режима электрической сети // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт.- 1969.- № 1.- С. 143-147.
2. **Багданов В.А.** Информационная модель электрической сети автоматизированной системы диспетчерского управления // Электричество. - 1973. - № 5. - С. 1-7.
3. **Гамм А.З.** Статические методы оценивания состояния электроэнергетической системы.- М.: Наука, 1976.- 219 с.
4. **Clements K.A., Krumpholr G.R., Dewis P.W.** Power system network topology // IEEE Trans. PAS.- 1980.- № 4.- P. 1534-1542.
5. **Гамм А.З.** Наблюдаемость электроэнергетических систем.- М.: Наука, 1990.- 220 с.
6. **Шепилов О.М., Павлюк В.А.** Применение модели установившегося режима для решения задачи оценивания состояния // Изв. вузов. Энергетика.- 1992.-№ 9, 10.- С. 34-36.
7. **Гамм А.З., Колосон Н.Н.** Применение модели установившегося режима для решения задачи состояния // Изв.вузов. Энергетика.- 1994.-№ 11,12.- С.49-50.
8. **Аракелян В.П., Хачатрян К.В., Ислам Х.** Определение режимных параметров наблюдаемой части электроэнергетической системы // Изв. НАН РА и ГИУА. Сер. ТН.- 1997.- Т.50, № 1.- С.24-29.

ГИУА 06.08.1998

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. LI, № 2, 1998, с. 184-189.

УДК 621.316.933

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

М.М. КАРАПЕТЯН, Г.А. АЙВАЗЯН, В.Г. ВАРТАЗАРЯН, Л.С. АКОПЯН, И.Г. АКОПЯН

АППАРАТЫ СВЕРХГЛУБОКОГО ОГРАНИЧЕНИЯ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Բերված են գերլարումների գերխոր սահմանափակող ապարատների ստեղծման հիմնական սկզբունքները: Դիտարկված են ոչ գծային ռեզիստորներով և գծային օհմ-ունակային էլեմենտների կոմբինացիայով զուգակցված սխեմաները:

Приведены принципы исполнения аппаратов сверхглубокого ограничения перенапряжений. Рассмотрены схемы, предусматривающие сочетание нелинейных резисторов с комбинацией линейных емкостно-омических элементов, шунтированных искровым промежутком.

Ил. 2. Библиогр.: 3 назв.

Design principles of equipments for thorough limitation of overvoltages and diagrams with nonlinear resistors where linear capacitance-ohmic elements shunted by a spark gap are considered.

Il. 2. Ref. 3.