

В.С. ХАЧАТРЯН, Э.А. ЭТМЕКЧЯН, Г.А. БАДАЛЯН

НОВЫЙ МЕТОД КОРРЕКЦИИ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ПАССИВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Աշխատանքը նվիրված է էլեկտրաէներգետիկական համակարգի կայունացված ռեժիմի ճշտմանը, երբ փոխվում է սխեմայի երկայնական համալիր դիմադրության մեծությունը: Խնդրի լուծումը հանգեցվում է երկու հատուկ կառուցվածք ունեցող մատրիցների շրջմանը: Առաջարկվում է ճշված մատրիցների շրջման նոր մեթոդ, որն ապահովում է հաշվարկային աշխատանքի ծավալի խիստ նվազեցում:

Предлагается метод коррекции установившегося режима электроэнергетической системы при изменении величины комплексного сопротивления продольной ветви. Решение задачи сводится к обращению двух матриц специальных структур. Предлагается новый метод обращения указанных матриц, который обеспечивает уменьшение объема вычислительных работ.

Библиогр.: 3 назв.

A method of correction for a steady-state condition when the combination resistance of the longitudinal branch is changed in the electric power system is proposed. The problem solving is taken to the inversion of two matrices with a special structure. A new method of the mentioned matrix inversion is proposed and it provides volume reduction of computational work.

Ref. 3.

При классической постановке задачи вариация пассивных параметров электрических систем требует определения соответствующего установившегося режима. Как известно, последнее требует решения системы нелинейных алгебраических уравнений, что связано с расходом большого машинного времени. Требование обеспечения высокой маневренности и решения указанной задачи в реальном масштабе времени заставляет прибегнуть к разработке более усовершенствованных методов решения данной задачи. Разумеется, что при таком требовании классический метод перерасчета установившегося режима далеко не будет этому удовлетворять. Поэтому необходимо ставить вопрос о коррекции известного установившегося режима при вариации пассивных параметров электрических систем. При этом необходимо определить приращения комплексных напряжений и токов как результат вариации продольных комплексных сопротивлений электрических систем. Алгебраическая сумма известных комплексных токов, полученных из базисного установившегося режима, и приращения токов как результат вариации пассивных параметров позволяют определить скорректированный искомый установившийся режим.

Для решения задачи в такой постановке предлагается воспользоваться возможностями теоремы Телледжена [1-3] при Z -форме задания состояния пассивной части сети. Если электрическую систему представить в виде многополюсника с $(M-1)$ внешними зажимами и с N внутренними

ветвями, то выражение, вытекающее из теоремы Телледжена, можно представить в следующем виде [3]:

$$\sum_{i=0}^M \dot{U}_i \dot{I}_i + \sum_{n=1}^N \dot{U}_n \dot{I}_n = 0, \quad (1)$$

где $\dot{U}_i$, $\dot{I}_i$, $\dot{U}_n$, $\dot{I}_n$ — комплексные напряжения и токи соответственно внешних зажимов и внутренних ветвей. Величины, входящие в (1), относятся к исследуемой электрической системе и известны на основании рассчитанного базисного (или исходного) установившегося режима. Заметим, что на основании теоремы Телледжена можно написать аналогичное выражение для соответствующих комплексно-сопряженных величин. Однако весьма важным свойством теоремы Телледжена является то, что если имеются топологически идентичные электрические системы (α и β) относительно исходной, характеризуемые соответствующими комплексными напряжениями и токами ($\dot{U}^\alpha$, $\dot{I}^\alpha$, $\dot{U}^\beta$, $\dot{I}^\beta$), то справедливы следующие выражения:

$$\sum_{i=0}^M \dot{U}_i \dot{I}_i^\alpha + \sum_{n=1}^N \dot{U}_n \dot{I}_n^\alpha = 0, \quad \sum_{i=0}^M \dot{U}_i^\alpha \dot{I}_i + \sum_{n=1}^N \dot{U}_n^\alpha \dot{I}_n = 0. \quad (2)$$

Можно написать аналогичные выражения для соответствующих комплексно-сопряженных напряжений и токов. Следует отметить, что для решения поставленной задачи используются выражения, составленные также для β -системы. Заметим, что в (2) входят напряжения и токи как исходной, так и α -идентичной электрической системы. После вариации пассивных параметров исходной электрической системы выражение (2) принимает следующий вид:

$$\sum_{i=0}^M \Delta \dot{U}_i \dot{I}_i^\alpha + \sum_{n=1}^N \Delta \dot{U}_n \dot{I}_n^\alpha = 0, \quad \sum_{i=0}^M \dot{U}_i^\alpha \Delta \dot{I}_i + \sum_{n=1}^N \dot{U}_n^\alpha \Delta \dot{I}_n = 0. \quad (3)$$

Нетрудно заметить, что приращения получили только те комплексные напряжения и токи исходной электрической системы, параметры которых варировались. При этом необходимо добавить, что аналогичные выражения можно получить как для β -идентичной системы, так и для ее соответствующих комплексно-сопряженных величин.

Между приращениями комплексных напряжений и токов внешних зажимов и внутренних ветвей функционируют следующие связи:

$$\Delta \dot{U}_i = -\dot{U}_i \Delta \dot{I}_i / \dot{I}_i, \quad \Delta \dot{U}_n = Z_n \Delta \dot{I}_n + \Delta Z_n \dot{I}_n. \quad (4)$$

Составим для α - и β -идентичных электрических систем следующие обобщенные выражения:

$$\sum_{i=1}^M (\Delta W_i^1 f_i^\alpha) + \sum_{n=1}^N (\Delta W_n^1 f_n^\alpha) = 0, \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^M (\Delta \omega_i^1 f_i^\beta) + \sum_{n=1}^N (\Delta \omega_n^1 f_n^\beta) = 0, \quad (6)$$

где

$$W_i \triangleq [\dot{U}_i - \dot{I}_i, \dot{U}_i - \dot{I}_i]^T, \quad W_n \triangleq [\dot{U}_n - \dot{I}_n, \dot{U}_n - \dot{I}_n]^T, \quad (7)$$

$$f_i^\alpha \triangleq [\dot{I}_i^\alpha \dot{U}_i^\alpha, \dot{I}_i^\alpha \dot{U}_i^\alpha]^T, \quad f_n^\alpha \triangleq [\dot{I}_n^\alpha \dot{U}_n^\alpha, \dot{I}_n^\alpha \dot{U}_n^\alpha]^T. \quad (8)$$

$$\omega_i = [\dot{U}_i \dot{I}_i - \dot{U}_i - \dot{I}_i]^*, \quad \omega_n = [\dot{U}_n \dot{I}_n - \dot{U}_n - \dot{I}_n]^*, \quad (9)$$

$$f^{\alpha} = [\dot{I}_1^{\alpha} \dot{U}_1^{\alpha} - \dot{I}_1^{\alpha} \dot{U}_1^{\alpha}]^*, \quad f^{\beta} = [\dot{I}_n^{\beta} \dot{U}_n^{\beta} - \dot{I}_n^{\beta} \dot{U}_n^{\beta}]^*. \quad (10)$$

В выражениях (5) и (6) первые суммы относятся к внешним зажимам, а вторые - к внутренним ветвям многополюсника. Если совместно решить (4), (5), (6), принимая, что $Z_n^{\alpha} = Z_n$, $Z_n^{\beta} = -Z_n$, получим упрощенные выражения:

$$\sum_{i=1}^M (\Delta \dot{I}_i \dot{U}_i^{\gamma} + \Delta \dot{I}_i \dot{U}_i^{\gamma}) = \sum_{n=1}^N (\Delta Z_n \dot{I}_n^{\alpha} + \Delta Z_n \dot{I}_n^{\beta}), \quad (11)$$

$$\sum_{i=1}^M (\Delta \dot{I}_i \dot{U}_i^{\delta} - \Delta \dot{I}_i \dot{U}_i^{\delta}) = - \sum_{n=1}^N (\Delta Z_n \dot{I}_n^{\beta} + \Delta Z_n \dot{I}_n^{\alpha}), \quad (12)$$

где

$$\dot{U}_i^{\gamma} = \dot{U}_i^{\alpha} + \dot{U}_i \dot{I}_i^{\alpha} / \dot{I}_i, \quad \dot{U}_i^{\delta} = \dot{U}_i^{\alpha} + \dot{U}_i \dot{I}_i^{\alpha} / \dot{I}_i, \quad (13)$$

$$\dot{U}_i^{\delta} = \dot{U}_i^{\beta} + \dot{U}_i \dot{I}_i^{\beta} / \dot{I}_i, \quad \dot{U}_i^{\gamma} = \dot{U}_i^{\beta} + \dot{U}_i \dot{I}_i^{\beta} / \dot{I}_i. \quad (14)$$

Пусть требуется определить приращение комплексного тока внешнего зажима с индексом $\ell - \Delta \dot{I}_{\ell}$, при вариации комплексного сопротивления внутренней ветви многополюсника с индексом λ . Если предположить, что активные параметры внешних зажимов α - и β -идентичных многополюсников выбраны таким образом, что обеспечиваются условия

$$\dot{U}_i^{\gamma} = \dot{U}_i^{\delta} = 1, \quad \dot{U}_i^{\gamma} = \dot{U}_i^{\delta} = 0, \quad \text{где } i \neq \ell, \quad (15)$$

$$\dot{U}_i^{\delta} = \dot{U}_i^{\gamma} = 1, \quad \dot{U}_i^{\gamma} = \dot{U}_i^{\delta} = 0, \quad \text{где } i = \ell, \quad (16)$$

то выражения (11) и (12) принимают следующий вид:

$$\Delta \dot{I}_{\ell} + \Delta \dot{I}_{\ell} = \Delta Z_{\lambda} \dot{I}_{\lambda}^{\alpha} + \Delta Z_{\lambda} \dot{I}_{\lambda}^{\beta}, \quad (17)$$

$$\Delta \dot{I}_{\ell} - \Delta \dot{I}_{\ell} = -\Delta Z_{\lambda} \dot{I}_{\lambda}^{\beta} + \Delta Z_{\lambda} \dot{I}_{\lambda}^{\alpha}. \quad (18)$$

Полученное выражение (17) позволяет определить действительную часть, а (18) - мнимую часть искомого комплексного тока зажима $\ell - \Delta \dot{I}_{\ell}$. Действительно, из (17) и (18) можно установить, что

$$\Delta \dot{I}_{\ell} = \alpha_{\lambda} \dot{I}_{\lambda}^{\alpha} - \beta_{\lambda} \dot{I}_{\lambda}^{\beta}, \quad \dot{I}_{\ell} = \alpha_{\lambda} \dot{I}_{\lambda}^{\beta} + \beta_{\lambda} \dot{I}_{\lambda}^{\alpha}, \quad (19)$$

где

$$\alpha_{\lambda} = (\Delta R_{\lambda} \dot{I}_{\lambda} - \Delta x_{\lambda} \dot{I}_{\lambda}), \quad \beta_{\lambda} = \Delta R_{\lambda} \dot{I}_{\lambda} + \Delta x_{\lambda} \dot{I}_{\lambda}. \quad (20)$$

Здесь индексы "а" обозначают действительные, а "р" - мнимые составляющие соответствующих комплексных величин.

Выражения (19) и (20) являются расчетными и позволяют определить величину приращения комплексного тока зажима $\ell - \Delta \dot{I}_{\ell}$ при вариации внутреннего элемента λ . Из выражений (19) и (20) нетрудно заметить, что в них входят не только токи ($\dot{I}_{\lambda}^{\alpha}$, $\dot{I}_{\lambda}^{\beta}$) исходной электрической системы, но и токи ($\dot{I}_{\lambda}^{\alpha}$, $\dot{I}_{\lambda}^{\beta}$, $\dot{I}_{\lambda}^{\alpha}$, $\dot{I}_{\lambda}^{\beta}$) идентичных электрических систем.

Если токи в ветвях исходной электрической системы известны из базового установившегося режима, то требуется определить токи в ветвях α - и β -идентичных схем, что и является важным этапом предложенного

метода. Разумеется, что величины ΔR_x , ΔX_x также являются известными.

Для определения токов в ветвях α - и β -идентичных электрических систем необходимо знать величины комплексных напряжений во внешних зажимах соответствующих многополюсников. Это требует расчета установившихся режимов идентичных систем.

В отличие от [3], в настоящей работе предлагается более усовершенствованный метод расчета установившихся режимов α - и β -идентичных систем:

$$\dot{U}^\alpha = Z \dot{I}^\alpha, \quad \dot{U}^\beta = -Z \dot{I}^\beta, \quad (21)$$

где $\dot{U}^\alpha$, $\dot{I}^\alpha$ для α -системы, а $\dot{U}^\beta$, $\dot{I}^\beta$ для β -системы являются соответственно неизвестными комплексными напряжениями и токами; Z - известная матрица узловых комплексных сопротивлений.

Нетрудно заметить, что в каждом матричном уравнении имеются два неизвестных вектора, поэтому требуется иметь дополнительные уравнения. В данном случае эти уравнения приводятся в следующем виде:

$$\dot{U}^\alpha = \text{diag} Z_1 \dot{I}^\alpha + C^\alpha, \quad \dot{U}^\beta = \text{diag} Z_1 \dot{I}^\beta + C^\beta. \quad (22)$$

Объединив соответствующие уравнения, получим

$$[Z_0 - \text{diag} Z_1] \dot{I}^\alpha = C^\alpha, \quad [Z_0 + \text{diag} Z_1] \dot{I}^\beta = C^\beta. \quad (23)$$

откуда можем записать, что

$$\dot{I}^\alpha = [Z_0 - \text{diag} Z_1]^{-1} \times [C^\alpha], \quad \dot{I}^\beta = [Z_0 + \text{diag} Z_1]^{-1} \times [C^\beta]. \quad (24)$$

Для обращения матриц, входящих в (24), воспользуемся методом пополнения матриц, для этого необходимо из комплексных величин перейти к действительным величинам

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha^\alpha \\ \dot{I}_\beta^\alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 & -X_0 \\ X_0 & R_0 \end{bmatrix} - \text{diag} \begin{bmatrix} -R_1 & X_1 \\ X_1 & R_1 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} C^\alpha \\ C^\beta \end{bmatrix}, \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_\alpha^\beta \\ \dot{I}_\beta^\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_0 & -X_0 \\ X_0 & R_0 \end{bmatrix} - \text{diag} \begin{bmatrix} -R_1 & X_1 \\ X_1 & R_1 \end{bmatrix}^{-1} \times \begin{bmatrix} C^\beta \\ C^\alpha \end{bmatrix}. \quad (26)$$

Здесь

$$I_\alpha^\alpha = \text{Re}(\dot{I}^\alpha), \quad I_\beta^\alpha = \text{Im}(\dot{I}^\alpha), \quad I_\alpha^\beta = \text{Re}(\dot{I}^\beta), \quad I_\beta^\beta = \text{Im}(\dot{I}^\beta), \quad (27)$$

$$R_0 = \text{Re}(Z_0), \quad X_0 = \text{Im}(Z_0), \quad R_1 = \text{Re}(Z_1), \quad X_1 = \text{Im}(Z_1). \quad (28)$$

Если ввести обозначения

$$I^\alpha \triangleq [I_\alpha^\alpha I_\beta^\alpha], \quad I^\beta \triangleq [I_\alpha^\beta I_\beta^\beta], \quad (29)$$

а также

$$A = \begin{bmatrix} R_0 & -X_0 \\ X_0 & R_0 \end{bmatrix}, \quad A^1 = \begin{bmatrix} -R_1 & X_1 \\ X_1 & R_1 \end{bmatrix}, \quad (30)$$

то (25) и (26) примут следующий вид:

$$I^\alpha = [A - \text{diag} A^1]^{-1} \times [C^\alpha], \quad I^\beta = [A + \text{diag} A^1]^{-1} \times [C^\beta]. \quad (31)$$

Здесь индексы "α" и "β" относятся к узлу, относительно которого определяются приращения токов.

Теперь перейдем к сущности метода обращения матрицы по дополнению. Предположим, известна матрица $A^{-1} = (a_{ij})$ и необходимо обратить матрицу $B^{-1} = (b_{ij})$, которая отличается от матрицы [A] лишь одним столбцом. При этом элементы b_{ij} квадратной матрицы [B] определяются с помощью элементов a_{ij} квадратной матрицы A следующими выражениями:

$$b_{ij} = a_{ij} - a_{is} d_i / d_s, \quad (i \neq s), \quad b_{sj} = a_{sj} / d_s, \quad (32)$$

где

$$d_i = \sum_{v=1}^{2M} a_{iv} b_{vs}, \quad d_s = \sum_{v=1}^{2M} a_{sv} b_{vs}, \quad (33)$$

s — номер столбца матрицы [B], отличающийся от соответствующего столбца матрицы [A]

Замена процесса обращения матриц на вычисления ее элементов выражениями (32) приведет к резкому уменьшению объема вычислительных работ. Устанавливая численные значения I^0 и I^1 согласно (25) и (26), определяем U^0 и U^1 согласно (22) и токи в соответствующих ветвях, что необходимо для решения поставленной задачи. Затем на основании (19) можно определять приращение комплексного тока ΔI , в любом узле и скорректировать установившийся режим.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tellegen B.A. A General network theorem with application // Philips Res. - 1952. - P. 259-269.
2. Sullivan R.L. Power system planning // New-York: Mc. Graw Hill Ins. - 1977. - P.319-350.
3. Хачатрян В.С., Этьекчян Э.А. Метод коррекции установившихся режимов электрических систем // Электричество. - 1987. - № 3. - С. 6-14.

ГИУА

8.01.1996