

К ЕДИНОМУ АЛГОРИТМУ РАСЧЕТА СТАТИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ И ИЗМЕНЕНИЙ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Р. И. БОРИСОВ, В. И. ГОТМАН, Ю. В. ХРУЩЕВ

(Представлена кафедрой электрических систем и сетей)

При наличии в системе стационарного возмущения возникает необходимость в решении ряда задач.

1. Нахождение параметров нового установившегося режима (расчет изменения режима).

2. Расчет статической устойчивости:

а) проверка устойчивого перехода из одного установившегося режима в другой,

б) нахождение значений параметров предельного режима для оценки запаса статической устойчивости нового режима.

Обычно указанные задачи рассматриваются как самостоятельные, независимые и описываются различными уравнениями.

Режим электрической системы описывают уравнениями узловых напряжений или контурных токов, в которых нагрузки представляются постоянными сопротивлениями [1]. Такой способ учета нагрузки является только некоторым приближением ее режимных свойств. Изменение величины нагрузки приводит к необходимости пересчета элементов матрицы собственных и взаимных проводимостей или их корректировке, что представляет определенные неудобства [2]. При расчетах статической устойчивости пользуются уравнениями узловых мощностей с теми же допущениями по отношению учета нагрузки [3].

Однако задачи расчета изменения режима электрической системы и определения предельных значений перетоков мощности по участкам по условиям статической устойчивости можно описать единым алгоритмом; при этом нагрузки и генераторы учитываются их статическими характеристиками.

Приведенные ниже уравнения позволяют решать следующие задачи:

1. Находить параметры режима электрической системы при наличии управляющих и возмущающих воздействий, заданных в виде: изменения коэффициентов трансформации, активной и реактивной мощности нагрузок и генераторов, напряжения или эдс, а также при симметричных (трехфазных) схемных возмущениях и проверять статическую устойчивость нового режима по практическим критериям.

2. Рассчитывать коэффициенты передаточных функций по любым режимным параметрам при постоянной частоте.

3. Эквивалентировать участки сложной электрической системы обобщенными статическими характеристиками и находить коэффициенты

крутизны эквивалентруемой части при представлении ее двухполюсником.

4. Рассчитывать предельные режимы системы, соответствующие практическим критериям устойчивости.

Для электрической системы составляются две группы уравнений: первая группа описывает режим электрической сети, представленной пассивным многополюсником с линейными величинами собственных и взаимных проводимостей, вторая — статические характеристики генерирующих источников и нагрузок, примыкающих к соответствующим узлам (вершинам) многополюсника (рис. 1).

Искомые уравнения приращений получаются путем разложения исходных уравнений в ряд Тейлора (с сохранением только линейных членов разложения) и их последующего совместного решения. Уравне-

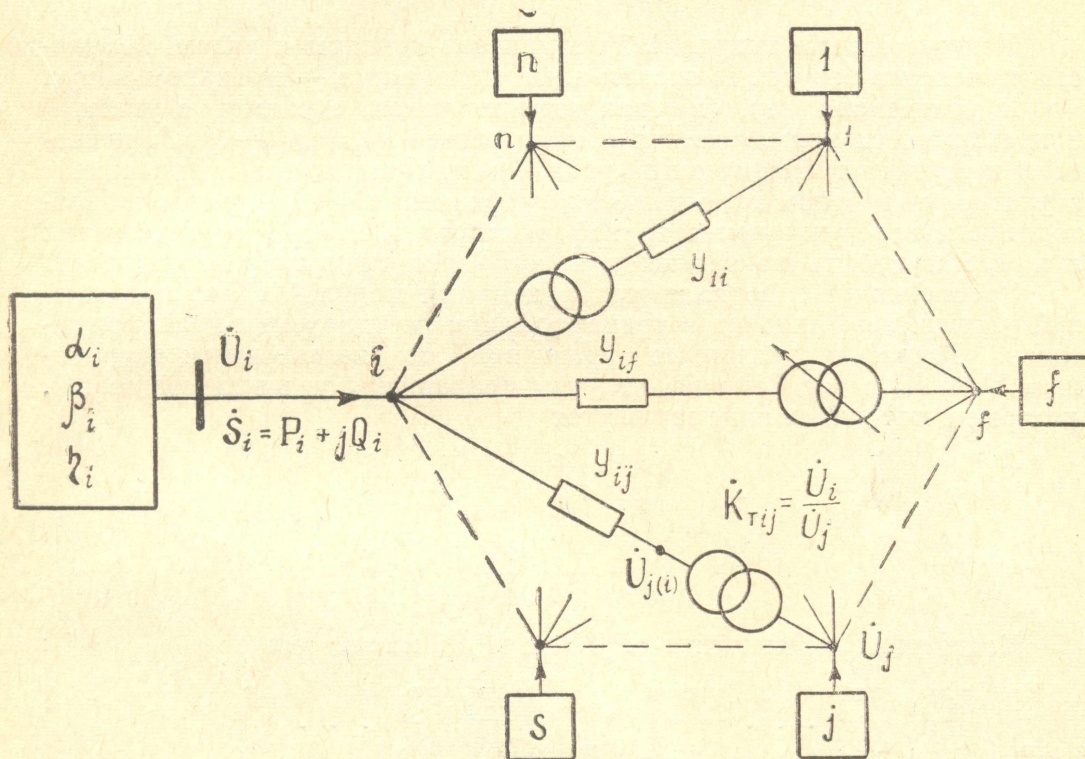


Рис. 1. Схема электрической системы

ния решаются относительно заданных неизвестных при произвольной комбинации вышеперечисленных возмущений; при этом могут учитываться любые ограничения по режимным параметрам.

Расчет изменений установившегося режима системы

Вершинами пассивного многополюсника считаются все узлы электрической сети, к которым подключены генераторы, синхронные компенсаторы, нагрузки и ветви поперечной проводимости. Регулируемый трансформатор вводится в схему замещения в виде самостоятельной ветви, концы которой также считаются отдельными узлами. Если к какому-либо узлу не подключены вышеупомянутые элементы, то соответствующая вершина многополюсника рассматривается как точка приложения фиктивной (нулевой) нагрузки.

Для расчета приращений режимных параметров должны быть заданы: схема и параметры системы, исходный режим (векторы напряжения в узлах) и уравнения статических характеристик нагрузок или их коэффициенты крутизны по напряжению.

Режим полного многополюсника, содержащего n узлов и m ветвей, может быть описан $2n$ уравнениями узловых мощностей. Эти уравнения для каждого узла i имеют вид

$$P_i = U_i^2 g_{ii} + U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}). \quad (1)$$

$$Q_i = U_i^2 b_{ii} - U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}). \quad (2)$$

Положительные направления мощности приняты к узлам. Мощности источников берутся со знаком плюс, приемников — со знаком минус.

В уравнениях (1), (2) напряжения узлов, смежных с узлом i , и проводимости примыкающих к нему ветвей $y_{ij} = q_{ij} - jb_{ij}$ приведены к ступени трансформации узла i (см. Приложение). Тем самым в уравнения в явном виде входят коэффициенты трансформации. Проводимости нерегулируемых трансформаторов и ветвей, примыкающих к ним, могут быть приведены к какому-либо базисному напряжению.

Уравнения (1), (2) являются функциями модулей и фаз напряжений узлов и коэффициентов трансформации регулируемых трансформаторов. Разлагая указанные уравнения по независимым переменным U, δ, K_T в ряд Тейлора, получим приращения узловых мощностей, которые в матричном виде запишутся

$$\begin{pmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial U} & \frac{\partial P}{\partial \delta} & \frac{\partial P}{\partial K_T} \\ \frac{\partial Q}{\partial U} & \frac{\partial Q}{\partial \delta} & \frac{\partial Q}{\partial K_T} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta U \\ \Delta \delta \\ \Delta K_T \end{pmatrix} \quad (3)$$

Квадратные подматрицы $\partial P/\partial U$ и $\partial P/\partial \delta$ имеют вид

$$\frac{\partial P}{\partial U} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial U_1} & \frac{\partial P_1}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial U_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_n}{\partial U_1} & \frac{\partial P_n}{\partial U_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial U_n} \end{pmatrix} \quad \frac{\partial P}{\partial \delta} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial \delta_n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_n}{\partial \delta_1} & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_2} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial \delta_n} \end{pmatrix} \quad (4)$$

Аналогичный вид имеют подматрицы $\partial Q/\partial U, \partial Q/\partial \delta$.

Прямоугольная подматрица $\partial P/\partial K_T$ аналогична $\partial Q/\partial K_T$ и записывается как

$$\frac{\partial P}{\partial K_T} = \begin{pmatrix} \frac{\partial P_1}{\partial K_{T1}} & \frac{\partial P_1}{\partial K_{T2}} & \dots & \frac{\partial P_1}{\partial K_{Tm}} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \frac{\partial P_n}{\partial K_{T1}} & \frac{\partial P_n}{\partial K_{T2}} & \dots & \frac{\partial P_n}{\partial K_{Tm}} \end{pmatrix} \quad (5)$$

В каждой строке указанных подматриц элементами, отличными от нуля, являются производные по коэффициентам трансформации трансформаторов с РПН, включенных в ветви, примыкающих к узлу i . Частные производные, найденные из (1) и (2), приведены в Приложении

Столбцевые подматрицы ΔU , $\Delta \delta$, ΔP , ΔQ порядка n содержат приращение модуля, фазы и мощности во всех узлах схемы. Столбцевая подматрица ΔK_T порядка m содержит приращения коэффициентов трансформации по всем ветвям, причем для ветвей, в которых отсутствует трансформатор или $K_T = \text{const}$, $\Delta K_T = 0$.

Для общности выкладок полагаем, что трансформаторы обеспечивают продольно-поперечное регулирование напряжения и, следовательно, коэффициенты трансформации являются комплексными величинами [1, 4]. Приращение модуля коэффициента трансформации в (3) можно выразить через приращения составляющих вектора (K'_T и K''_T) из уравнения

$$K_{Ti} = \sqrt{K_{Ti}'^2 + K_{Ti}''^2}, \quad (6)$$

откуда

$$\Delta K_{Ti} = K_{Ti}'^0 \Delta K_{Ti}' + K_{Ti}''^0 \Delta K_{Ti}'', \quad (7)$$

где

$$K_{Ti}'^0 = K_{Ti}' / K_{Ti}, \quad K_{Ti}''^0 = K_{Ti}'' / K_{Ti}. \quad (8)$$

Матрица ΔK_T равна

$$\Delta K_T = \begin{vmatrix} K_{T1}'^0 & K_{T1}''^0 \\ \vdots & \vdots \\ K_{Tm}'^0 & K_{Tm}''^0 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta K_T' \\ \Delta K_T'' \end{vmatrix}, \quad (9)$$

причем подматрицы $K_T'^0$, $K_T''^0$ являются диагональными.

Подключенные к узлам многополюсника элементы (нагрузки, генераторы, синхронные компенсаторы) могут быть описаны своими статическими характеристиками.

Уравнение статической характеристики нагрузки по напряжению имеет вид [7]

$$S_i(U_i) = P_i(U_i) + jQ_i(U_i) \quad (10)$$

и соответственно коэффициенты крутизны

$$\alpha_{in} = dP_{in}/dU_i, \quad \beta_{in} = dQ_{in}/dU_i. \quad (11)$$

Статические характеристики генераторов можно представить в виде [5]

$$Q_{ir} = Q(U_i, P_{ir}). \quad (12)$$

Коэффициенты крутизны определяются с учетом автоматических регуляторов возбуждения при фиксированных уставках усилительных органов

$$\beta_{ir} = \partial Q_{ir} / \partial U_i (P_{ir} = \text{const}), \quad \eta_{ir} = \partial Q_{ir} / \partial P_{ir} (U_i = \text{const}). \quad (13)$$

Статические характеристики синхронных компенсаторов

$$Q_{ik} = Q(U_i) \quad (14)$$

и коэффициент наклона при тех же условиях, что и для генераторов

$$\beta_{ik} = dQ_{ik}/dU_i. \quad (15)$$

Далее полагаем значения всех коэффициентов α , β , η вблизи исходного режима известными.

Приращения мощности в узлах сети уравнения (3) можно выразить через приращения мощности генераторов, нагрузок и синхронных компенсаторов. Полные приращения мощности каждого двухполюсника i можно представить в виде заданных величин приращения (ΔP_{i3} , ΔQ_{i3}), которые вместе с ΔK_T представляют независимые переменные — управляющие и возмущающие воздействия и приращений, кото-

рые носят вынужденный характер и являются функцией вышеуказанных воздействий, изменяясь в соответствии со своими статическими характеристиками. Эти вынужденные составляющие можно выразить через ΔU , ΔP_T и коэффициенты крутизны статических характеристик, α , β , η .

Исходя из вышесказанного матрицу полных приращений мощностей двухполюсников с учетом (10—(15) можно записать как

$$\begin{vmatrix} \Delta P \\ \Delta Q \end{vmatrix}_{\text{г}} = \begin{vmatrix} \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \Delta P_b \\ \Delta Q_b \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \Delta P_3 \\ \Delta Q_3 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \alpha & 0 \\ \beta & \eta \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta U \\ \Delta P_3 \end{vmatrix}. \quad (16)$$

Здесь ΔP_3 , ΔQ_3 — столбцевые подматрицы заданных возмущений; α , β , η — диагональные подматрицы коэффициентов крутизны статических характеристик порядка n .

Заменив приращения мощности в узлах сети в (3) равными им приращениями мощности двухполюсников из (16) после преобразований с учетом (9) получим искомое матричное уравнение относительно $2n$ приращений (n приращений ΔU , $n-1$ приращений $\Delta \delta$ и ΔP_n при заданных $2n+m-1$ возмущениях ΔP_3 , ΔQ_3 , ΔK_T (включая возмущения, равные нулю) *

$$\begin{vmatrix} W_{pU} & W_{p\delta} \\ W_{qU} & W_{q\delta} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} \Delta U \\ \Delta \delta_{(n)} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} G_p \\ G_q \end{vmatrix}. \quad (17)$$

Столбцевые подматрицы возмущений G_p , G_q имеют вид

$$G_p = \Delta P_3 - \frac{\partial P}{\partial K_T'} \Delta K_T' - \frac{\partial P}{\partial K_T''} \Delta K_T'', \quad (18)$$

$$G_q = \Delta Q_3 + \eta \Delta P_3 - \frac{\partial Q}{\partial K_T'} \Delta K_T' - \frac{\partial Q}{\partial K_T''} \Delta K_T'', \quad (19)$$

где $\partial P / \partial K_T'$, $\partial P / \partial K_T''$, $\partial Q / \partial K_T'$, $\partial Q / \partial K_T''$ — прямоугольные подматрицы, по своей структуре совершенно аналогичные подматрицам $\partial P / \partial K_T$, $\partial Q / \partial K_T$, которые соответственно равны

$$\frac{\partial P}{\partial K_T'} = \frac{\partial P}{\partial K_T} K_T', \quad \frac{\partial P}{\partial K_T''} = \frac{\partial P}{\partial K_T} K_T'', \quad \frac{\partial Q}{\partial K_T'} = \frac{\partial Q}{\partial K_T} K_T', \quad \frac{\partial Q}{\partial K_T''} = \frac{\partial Q}{\partial K_T} K_T''. \quad (20)$$

Квадратные подматрицы W_{pU} , W_{qU} отличаются от подматриц $\partial P / \partial U$, $\partial Q / \partial U$ диагональными элементами, которые равны соответственно

$$W_{pUii} = \frac{\partial P_i}{\partial U_i} - \alpha_i, \quad W_{qUii} = \frac{\partial Q_i}{\partial U_i} - \beta_i. \quad (21)$$

Фазу вектора напряжения одного из узлов (n) системы необходимо выбрать в качестве базисной, полагая для этого $\delta_n = \text{const}$. Один из узлов системы (n) необходимо принять за узел баланса активной мощности, приращение мощности которого $\Delta P_{n3} = \Delta P_{\text{баланс}}$ носит вынужденный характер и наряду с ΔU и $\Delta \delta$ подлежит определению. Заменив нулевой столбец n (при базисном векторе напряжения) в подматрицах $dP/d\delta$ и $dQ/d\delta$ коэффициентами с обратными знаками при ΔP_{n3} подматриц возмущений, получаем подматрицы $W_{p\delta}$ и $W_{q\delta}$. Соответственно этому в подматрице $\Delta \delta_{(n)}$ элементом n является ΔP_n . Посколь-

* Уравнения (17) позволяют рассчитать также любой исходный режим при задании мощностей узлов аналогично расчету изменения режима.

ку уравнение (17) составлено с учетом статических характеристик элементов, режим по реактивной мощности балансируется автоматически.

Система линеаризованных уравнений (17) может быть решена любым известным методом.

При регулировании напряжения только по фазе необходимо учитывать дополнительное соотношение

$$\Delta K_{Ti}'' = -\frac{K_{Ti}'}{K_{Ti}''} \Delta K_{Ti}' \quad (22)$$

и

$$\Delta K_{Ti}'' = \frac{K_{Ti}''}{K_{Ti}'} \Delta K_{Ti}' \quad (23)$$

— при изменении коэффициента трансформации только по модулю.

Для трансформаторов с продольным регулированием напряжения, принимая во внимание, что $K_{Ti}'/K_{Ti} \approx 1$ и $\Delta K_{Ti}' \approx \Delta K_{Ti}$, получаем общепринятые упрощенные выражения:

$$\frac{\partial P}{\partial K_{Ti}'} \Delta K_{Ti}' \approx \frac{\partial P}{\partial K_{Ti}} \Delta K_{Ti}, \quad \frac{\partial Q}{\partial K_{Ti}'} \Delta K_{Ti}' \approx \frac{\partial Q}{\partial K_{Ti}} \Delta K_{Ti}. \quad (24)$$

В тех случаях, когда задается изменение (отключение) всей активной мощности нагрузки, сосредоточенной в двухполюснике i , т. е. $\Delta P_{i3} = -P_i$, в подматрице W_{pU} следует положить $\alpha_i = 0$. Аналогично при отклонении всей реактивной мощности двухполюсника i приравнивается к нулю коэффициент β_i в подматрице W_{qU} .

В некоторых случаях в качестве независимой переменной может быть задано изменение модуля напряжения в узле $\Delta U_i = \Delta U_{i3}$. В частности, при астатическом регулировании напряжения $\Delta U_{i3} = 0$ неизвестной является величина вынужденной слагающей реактивной мощности ΔQ_{ib} , которая обеспечивает постоянство напряжения. Для этого необходимо в исходном уравнении (17) произвести замену

$$\Delta U_i = \frac{1}{\beta_i} \Delta Q_{ib} = \gamma_i \Delta Q_{ib}. \quad (25)$$

Подобным же образом можно определить необходимую величину изменения коэффициента трансформации по заданному значению ΔU_i или ΔQ_i .

При разрыве связи между узлами* i и j необходимо по (1) и (2) подсчитать значение мощности, протекающей по указанной связи в нормальном режиме относительно узлов i и j . Полученные значения с обратными знаками поставить на соответствующие места подматриц возмущений, при этом в производных

$$\frac{\partial P_{i,j}}{\partial U_{i,j}}, \quad \frac{\partial Q_{i,j}}{\partial U_{i,j}}, \quad \frac{\partial P_{i,j}}{\partial \delta_{i,j}}, \quad \frac{\partial Q_{i,j}}{\partial \delta_{i,j}}, \quad \frac{\partial P_{i,j}}{\partial K_{Tij}}, \quad \frac{\partial Q_{i,j}}{\partial K_{Tij}}$$

u_{ij} следует положить равной нулю. Поскольку в данном случае источником возмущения являются не двухполюсники i и j , а сам многополюсник, то $\eta_i \Delta P_i = 0$, $\eta_j \Delta P_j = 0$.

Уравнение (17) остается справедливым, если в рассматриваемой системе генераторы имеют АРТ по внешним параметрам. В частности, если АРТ генератора i ведется по взаимному углу δ_{in} , то неизвестной будет величина приращения активной мощности ΔP_{ib} , которая может быть найдена аналогично мощности балансирующего узла.

* При этом предполагается, что система не распадается на независимые части.

При возникновении ограничения по какому-либо параметру Π полное приращение последнего должно быть приравнено нулю. Полученное таким образом дополнительное уравнение

$$\Delta \Pi_i = \Delta \Pi_{i3} + \Delta \Pi_{ib} = 0$$

совместно с (17) позволяет отыскать необходимую величину воздействия ($\Delta \Pi_{i3}$), с помощью которого можно поддерживать заданное ограничение режима.

После расчета величин ΔU и $\Delta \delta$ можно определить изменение всех остальных параметров режима и их новые значения. При небольших изменениях нормального режима коэффициенты крутизны α , β , η изменяются незначительно и могут быть приняты в расчете постоянными. В противном случае значения коэффициентов по мере изменения режима должны корректироваться.

Эквивалентирование частей электрической системы по режимным параметрам

Порядок уравнения (17) может быть в значительной степени понижен, если представлять отдельные части электрической системы режимным эквивалентом — обобщенными статическими характеристиками реакции [5, 9]. Такое эквивалентирование особенно удобно при описании режима системы уравнениями (17) и расчете предельных режимов по условиям статической устойчивости цепочных схем (например,

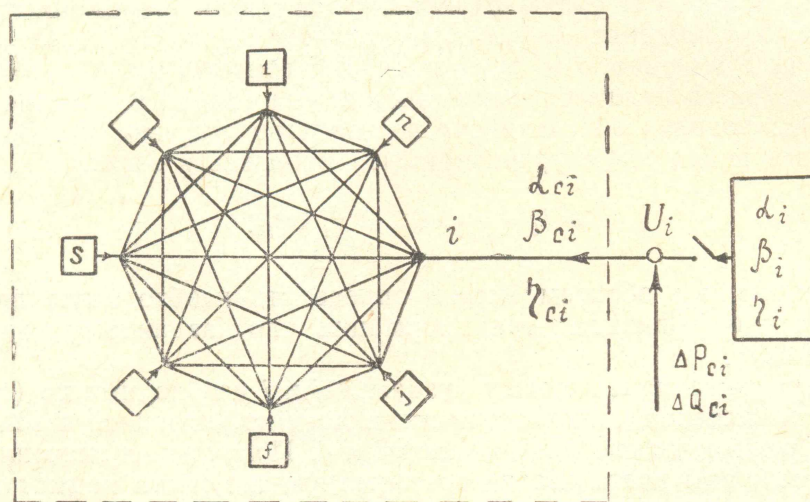


Рис. 2. Эквивалентирование участка системы двухполюсником

дальние электропередачи с промежуточными системами), так как позволяет в обобщенной форме учесть реакцию отдельных частей системы и непосредственно выделить объект возмущения или управления.

Для эквивалентруемых частей системы, представленных двухполюсником, целесообразно воспользоваться такой же формой записи статических характеристик по активной мощности, как и для нагрузки (10), а по реактивной — как для генератора (12), т. е.

$$Q_{ic} = Q(U_i, P_{ic}), \quad P_{ic} = P(U_i). \quad (26)$$

Возможность такого замещения энергосистемы (или ее части) вытекает из того, что эквивалентруемая часть в общем случае представ-

ляет сочетание генераторных и нагрузочных узлов и пассивной части — электрической сети, которая является передаточным звеном между указанными элементами и узлом эквивалентирования.

Коэффициенты крутизны обобщенных статических характеристик эквивалентированной части системы (26) определяются при фиксированной схеме сети, уставках АРВ, заданных коэффициентах крутизны статических характеристик генераторов, синхронных компенсаторов, нагрузок и известном исходном режиме. Кроме того, должен быть указан балансирующий узел.

Рассмотрим расчет величин α_{ic} , β_{ic} , η_{ic} .

Коэффициенты α_{ic} и β_{ic} характеризуют реакцию системы соответственно по активной и реактивной мощности на изменение напряжений в узле i внешним источником (рис. 2).

Матрицу коэффициентов α_{ic} для всех узловых точек энергосистемы можно получить из уравнения (17), полагая, что к узлам поочередно прикладывается возмущение ΔP_{ic} , при этом фазу вектора напряжений надо закреплять в узле эквивалентирования, который является одновременно балансирующим по реактивной мощности, т. е.

$$\alpha_{ic} = \frac{dP_{ic}}{dU_i} = \frac{D_\alpha}{A_{i,i}}, \quad (27)$$

где D_α — определитель, а A — алгебраическое дополнение матрицы W_α

$$W = \begin{vmatrix} W_{pu} & W_{pv} \\ W_{qu} & W_{qv} \end{vmatrix}. \quad (28)$$

Поскольку источником возмущения является приложенный к узлу i «небаланс» при отключенном двухполюснике i , то матрица W_α отличается от W тем, что в ней α_i , β_i равны 0. В матрице W_α все элементы столбца $n+i$ (коэффициенты при балансирующей мощности ΔQ_{ic}) равны нулю за исключением $a_{n+i, n+i} = -1$.

Аналогично, считая, что к узлам системы поочередно прикладывается возмущение ΔQ_{ic} , можно рассчитать матрицу коэффициентов

$$\beta_{ic} = \frac{\partial Q_{ic}}{\partial U_i} = \frac{D_\beta}{A_{i, n+i}}. \quad (29)$$

Коэффициент η_{ic} показывает, на сколько единиц нужно изменить реактивную мощность, передаваемую в узел i системой, чтобы при изменении ее активной мощности на единицу напряжение U_i осталось постоянным. Величина коэффициента η_{ic} зависит от распределения приращения ΔP_i между генераторами и нагрузками эквивалентированной энергосистемы. Поэтому при определении η_{ic} должен быть задан закон (пропорции) распределения приращения мощности ΔP_i между узлами энергосистемы. Это приращение может быть распределено между несколькими узлами генерации и нагрузки или же целиком отнесено к узлу баланса (n). В последнем случае величина η_{ic} может быть найдена по (17), полагая $\Delta U_i = 0$ и $\Delta \delta_i = 0$:

$$\eta_{ic} = \frac{\partial Q_{ic}}{\partial P_{ic} (U_i = \text{const})} = \frac{A_{i,i}}{D_\eta} = - \frac{A_{i,i}}{A_{n+i,n} + \eta_n A_{n+i,2n}}. \quad (30)$$

Отметим, что в общем коэффициенте крутизны β_{ic} (29) можно в «чистом» виде выделить составляющие, обусловленные влиянием регулирующих свойств активной и реактивной мощности нагрузок (или узла в отдельности) и оценить их величину.

Расчет статической устойчивости системы

При изменении режима электрической системы возникает необходимость в проверке устойчивости нового установившегося режима, а также определении параметров предельного режима и соответствующих коэффициентов запаса устойчивости [8].

Судить об устойчивости стационарного режима электрической системы без учета самораскачивания можно по критерию положительности свободного члена характеристического уравнения [9] или по практическим критериям [6].

Исходное матричное уравнение (17) позволяет по известным параметрам установившегося режима подсчитать значение любого практического критерия.

Считая, что источником возмущения реактивной мощности является двухполюсник i , аналогично (29) имеем

$$\frac{dQ_i}{dU_j} = \frac{D}{A_{j,n+i}} \quad (31)$$

Закрепляя фазу вектора напряжения балансирующего узла (n), аналогичным образом получаем производную мощности узла P_i по взаимному углу δ_{in}

$$\frac{dP_i}{d\delta_{in}} = \frac{D}{A_{n+i,i} + \eta_i A_{n+i,n+i}} \quad (32)$$

В выражениях (31), (32) D — определитель, а A — алгебраическое дополнение матрицы W (28).

Предельному режиму системы соответствует равенство нулю практических критериев [6] или, что то же, $D = 0$.

Определитель D матрицы W меняет свой знак только при переходе границы из устойчивого состояния системы в неустойчивое, или наоборот. Поэтому, если известен знак определителя D уравнения (17) заведомо устойчивого режима, то отпадает необходимость в проверке нового установившегося режима по выражениям (31) или (32), поскольку судить о наличии или отсутствии статической устойчивости можно непосредственно в процессе нахождения режима по знаку определителя D .

Сложной электрической системе по условиям аperiodической устойчивости соответствует множество предельных режимов, которые определяются: 1) соответствующими значениями параметров принятого исходного режима; 2) выбором станции, подлежащей проверке на устойчивость, или участка системы для определения предельных перетоков мощности; 3) выбором балансирующего узла (станции) в системе.

Предельный режим системы находится последовательным утяжелением нормального исходного режима путем перераспределения активных мощностей генераторных станций; при этом активные мощности ($S - 2$) станций остаются неизменными, одна нагружается, а другая является балансирующей [9]. Утяжелять режим в соответствии с изложенными выше условиями можно путем изменения (возмущения) различных параметров системы.

1. Дискретным приращением активной мощности нагружаемой станции ΔP_{f3} .

При решении уравнения (17) невязка узла i по активной и реактивной мощности k -й итерации в пределах каждого шага утяжеления определяется:

$$\text{при } i = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (i \neq f)$$

$$\left. \begin{aligned} F_{pi} &= P_i + \sum_{\kappa=1}^{\kappa-1} \alpha_i \Delta U_i - U_i^2 g_{ii} - U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \\ F_{qi} &= Q_i + \sum_{\kappa=1}^{\kappa-1} \beta_i \Delta U_i - U_i^2 b_{ii} + U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}), \end{aligned} \right\} (33)$$

при $i = f$, n (f — номер нагружаемой станции, n — балансирующей)

$$\left. \begin{aligned} F_{pi} &= P_i + \Delta P_i - U_i^2 g_{ii} - U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) \\ F_{qi} &= Q_i + \tau_i F_{pi} + \sum_{\kappa=1}^{\kappa-1} \beta_i \Delta U_i - U_i^2 b_{ii} + U_i \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}). \end{aligned} \right\} (34)$$

Как отмечалось выше, параметрам предельного режима системы по условиям апериодической устойчивости согласно практическим критериям соответствует $\det W = 0$. Одновременно это же условие является критерием неустойчивости сходимости итерационного процесса Ньютона [10]*. Следовательно, с одной стороны, при принятом способе утяжеления режима методом Ньютона нельзя рассчитать параметры предельного режима исследуемой системы (хотя режим, достаточно близкий к предельному, удастся рассчитать), с другой стороны, нарушение сходимости итерационного расчета уравнения (17) соответствует в данном случае пределу статической устойчивости системы**.

Указанные затруднения, связанные с нахождением предельных режимов системы, могут быть устранены без изменения метода решения уравнений, принятого за основу в предыдущих рассуждениях. Для этого необходимо перейти к иному способу утяжеления режима (поменять возмущающий параметр).

2. Примем в качестве независимой переменной заданное увеличение угла рассогласования между нагружаемой и балансирующей станциями δ_{fn} ($\delta_n = \text{const}$); при этом приращение активной мощности узла f носит вынужденный характер (ΔP_{fb}). Соответственно этому матрицу W в (17) необходимо заменить матрицей W_δ , отличающейся от первой тем, что элементами столбца $n+f$ являются коэффициенты при ΔP_f (все элементы указанного столбца равны нулю за исключением $a_{n+f,f} = -1$, $a_{n+f,n+f} = -\nu_f$).

Поскольку $\det W \neq \det W_\delta$, то для параметров предельного режима системы метод Ньютона обеспечивает вполне устойчивые решения уравнений для всего многообразия установившихся режимов системы, которые являются как статически устойчивыми, так и неустойчивыми.

В пределах каждого шага утяжеления режима первая итерация рассчитывается при вектор-функции возмущения, равной

$$\begin{pmatrix} G_p \\ G_q \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial P}{\partial \delta_f} \\ \frac{\partial Q}{\partial \delta_f} \end{pmatrix} \Delta \delta_{fz}, \quad (35)$$

* Строго говоря $\det W \neq 0$, поскольку параметры предельного режима не найдены, однако близость матрицы W к особенной является причиной того, что нарушается другое условие сходимости процесса: на некотором этапе расчета абсолютная величина разности значений искомого и приближенного корня $k+1$ приближения больше соответствующей величины k -го приближения, т. е. процесс расходится.

** Отметим, что метод скорейшего спуска в данном случае имеет устойчивую сходимость.

для последующих итераций невязка для каждого из узлов определяется по соответствующим выражениям (33), (34).

Отметим, что утяжелять режим можно заданным изменением (снижением) напряжения в одном из узлов системы аналогично вышерассмотренному случаю.

Выводы

1. Полученные уравнения позволяют найти величину управляющего воздействия, обеспечивающего желаемое изменение режима, и оценить реакцию системы с помощью передаточных функций на возмущение любого режимного параметра.

2. О статической устойчивости системы при отсутствии самораскачивания можно судить в процессе расчета режима.

3. Нарушение сходимости итерационного процесса расчета в общем случае не является критерием статической неустойчивости системы. Взаимосвязь между статической неустойчивостью (устойчивостью) системы и нарушением процесса сходимости решения уравнений следует проводить только через взаимосвязь их критериальностей, которая зависит от способа задания информации в электрической системе, применяемого метода решения уравнений и выбора независимых параметров (аргументов) режима. Поэтому варьируя «способом», «методом» и «выбором», всегда можно получить устойчивое решение для всего многообразия режимов системы.

Приложение

Формулы частных производных

1. Производные мощности узла i по модулю и фазе напряжения этого узла

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = 2U_i g_{ii} + A_i, \quad \frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = 2U_i b_{ii} - B_i, \quad (\text{п-1})$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} = U_i B_i, \quad \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_i} = U_i A_i, \quad (\text{п-2})$$

где

$$g_{ii} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n y_{ij} \sin \alpha_{ij} K_{Tij}^2, \quad b_{ii} = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n y_{ij} \cos \alpha_{ij} K_{Tij}^2, \quad (\text{п-3})$$

$$A_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j y_{ij} \sin (\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) K_{Tij},$$

$$B_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n U_j y_{ij} \cos (\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) K_{Tij}. \quad (\text{п-4})$$

Если проводимость ветви примыкает к узлу непосредственно (а не через трансформатор), то соответствующее значение K_T в (п-3) равно единице.

2. Производные мощности узла i по модулю и фазе напряжения смежных с ним узлов $j = 1, 2, \dots, n (j \neq i)$

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_j} = c_i, \quad \frac{\partial Q_i}{\partial U_j} = D_i, \quad \frac{\partial P_i}{\partial \delta_i} U_j D_i, \quad \frac{\partial Q_i}{\partial \delta_j} = -U_j C_i, \quad (\text{п-5})$$

где

$$C_i = U_i y_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) K_{Tij}, \quad D_i = -U_i y_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j - \alpha_{ij}) K_{Tij}. \quad (\text{п-6})$$

3. Производные мощности по коэффициенту трансформации K_{Tif} ветви if ; к узлу i в схеме замещения приведена проводимость ветви, к узлу f непосредственно примыкает трансформатор (рис 1):

а) для узла i

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_i}{\partial K_{Tif}} &= U_i U_f y_{if} \sin(\delta_i - \delta_f - \alpha_{if}), \\ \frac{\partial Q_i}{\partial K_{Tif}} &= -U_i U_f y_{if} \cos(\delta_i - \delta_f - \alpha_{if}); \end{aligned} \quad (\text{п-7})$$

б) для узла f

$$\frac{\partial P_f}{\partial K_{Tif}} = 2U_f^2 g_{if} K_{Tif} + U_f U_i y_{if} \sin(\delta_f - \delta_i - \alpha_{fi}), \quad (\text{п-8})$$

$$\frac{\partial Q_f}{\partial K_{Tif}} = 2U_f^2 b_{if} K_{Tif} - U_f U_i y_{if} \cos(\delta_f - \delta_i - \alpha_{fi}). \quad (\text{п-9})$$

Коэффициенты трансформации везде определяются в направлении от узла примыкания проводимости ветви к узлу примыкания трансформатора (рис. 1)

$$K_{Tif} = U_i / U_f.$$

Соответственно этому приведенные значения напряжений и проводимостей узлов в (1), (2) равны

$$U_{f(i)} = U_f K_{Tif}, \quad U_{i(f)} = U_i / K_{Tif}, \quad y_{fi} = y_{if} K_{Tif}^2 \text{ и т. д.}$$

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. А. Мельников, Л. А. Солдаткина. Матричные методы расчета рабочих режимов замкнутых электрических сетей. ГЭИ, М., 1965.
2. В. А. Веников, Н. Д. Анисимова, Н. К. Круг. К вопросу об определении собственных и взаимных проводимостей при вариации параметров части схемы замещения системы или объединения двух систем в одну. «Электричество», № 1, 1970.
3. В. А. Веников, Н. Д. Анисимова, Р. Мичке, Т. И. Шелухина. Исследование с помощью ЦВМ статической устойчивости сложных автоматически регулируемых электрических систем. «Электричество», № 11, 1967.
4. Н. А. Мельников. Методы расчета рабочих режимов для схем, содержащих элементы трансформации с комплексными параметрами. Изв. АН СССР. «Энергетика и транспорт», № 4, 1964.
5. Л. М. Зисман. Некоторые вопросы управления стационарными режимами тепловых электростанций по напряжению и реактивной мощности. Автореферат кандидатской диссертации. М., 1967.
6. И. М. Маркович. Режимы энергетических систем. ГЭИ, М., 1963.
7. Н. А. Мельников. Матричный метод анализа электрических цепей. «Энергия», М., 1966.
8. Д. И. Азарьев, В. А. Веников и др. Основные положения по определению устойчивости энергетических систем. «Электричество», № 11, 1963.
9. П. С. Жданов. Устойчивость электрических систем. Госэнергоиздат, М., 1948.
10. Б. П. Демидович, И. М. Марон. Основы вычислительной математики. Физматгиз, М., 1963.