

ЭНЕРГЕТИКА

Р. А. АМИРИКЯН, И. И. ШАРАБХАНЫ

КОРРЕКЦИЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА
ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ
С УПРАВЛЯЕМЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

В сложных электроэнергетических системах (ЭЭС) возникает задача управления режимами отдельных элементов и оперативного расчета установившегося режима (УР) при соответствующем управляющем воздействии.

Известны два метода определения УР ЭЭС — решением уравнений узловых напряжений в прямой форме, с непосредственным использованием матрицы узловых проводимостей Y , и в обращенной форме, с использованием матрицы узловых сопротивлений Z , полученной обращением Y . О преимуществах первого метода широко известно. Применение второго метода ограничивается необходимостью обращения матрицы высокого порядка при определении УР сложных систем. Однако, в последнее время разработаны ряд алгоритмов, основанных на делении системы на подсистемы, позволяющие значительно сократить время, необходимое для получения Z .

Постановка задачи. Заданы управляемые ветви УВ, активные и реактивные сопротивления ветвей R и X (без присоединения к одной ступени напряжения) схемы замещения сети, коэффициенты трансформации трансформаторов K , активные и реактивные узловые мощности P и Q , базисный узел с напряжением U_0 . Требуется определить УР ЭЭС решением уравнений узловых напряжений в обращенной форме.

Составляются уравнения, выражающие связь между узловыми параметрами для схемы замещения ЭЭС с отключенными УВ. Дополнительно составляется система уравнений, где переменными являются токи УВ I_y [1]. По одному из известных методов [2] определяется УР для ЭЭС с отключенными УВ. По его результатам определяются токи I_y , воздействием которых на ЭЭС в узлах связей УВ определяются дополнительные составляющие вычисляемых параметров.

Алгоритм расчета 1. Рассекаются УВ по их узлам связей и удаляются.

2. Составляется матрица узловых проводимостей Y и определяется матрица узловых сопротивлений $Z_{\text{мат}}$ [3, 4] системы без УВ. При на-

личии в системе УВ, удалением которых система делится на изолированные части, можно пользоваться алгоритмами, описанными в [1, 4]. Если в ЭЭС имеются элементы трансформации с комплексными коэффициентами, то матрица узловых проводимостей определяется следующим образом (рис. 1):

$$\sum_p \hat{I}_{ip} + (\hat{U}_i - \hat{U}_j) Y_T = \hat{J}_i; \quad \left(\hat{U}_i - \frac{\hat{U}_j}{K_{ji}} \right) Y_T = \hat{I}_i;$$

$$\hat{I}_i = -\hat{K}_{ji} \hat{I}_j; \quad \sum_q \hat{I}_{jq} - \frac{1}{\hat{K}_{ji}} \left(\hat{U}_i - \frac{\hat{U}_j}{K_{ji}} \right) Y_T = \hat{J}_j;$$

$$\begin{bmatrix} Y_T & -\frac{Y_T}{\hat{K}_{ji}} \\ -\frac{Y_T}{\hat{K}_{ji}} & \frac{Y_T}{|\hat{K}_{ji}|^2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{U}_i \\ \hat{U}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{I}_i \\ \hat{I}_j \end{bmatrix};$$

$$Y_{ii} = \sum_p Y_{ip} + Y_T; \quad Y_{ij} = -\frac{Y_T}{\hat{K}_{ji}};$$

$$Y_{jj} = \sum_q Y_{jq} + \frac{Y_T}{|\hat{K}_{ji}|^2}; \quad Y_{ji} = -\frac{Y_T}{\hat{K}_{ji}}.$$

где Y_{ii} , Y_{jj} — собственная проводимость, соответственно, узлов i и j ; Y_{iq} , Y_{jq} — взаимная проводимость узлов i и q , q и i ; Y_T — проводимость трансформатора.

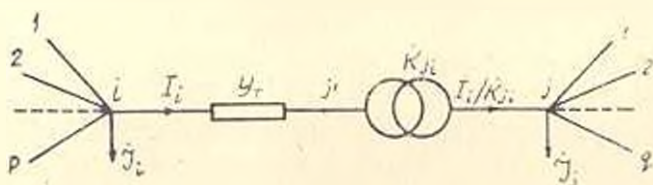


Рис. 1.

Сопротивление (проводимость) трансформатора приводится к ступени высокого напряжения, а коэффициент трансформации трансформатора определяется как отношение напряжения низкой ступени к напряжению высокой ступени $\left(K_{ji} = \frac{\hat{U}_i}{\hat{U}_j} \right)$.

3. Задавшись приближенными значениями напряжений в узлах $\hat{U}_m$, решаются уравнения

$$\hat{U}_m = Z_{mm} \left(\frac{S_m}{\hat{U}_m} + Y_{m\delta} \hat{U}_\delta \right) \quad (1)$$

и определяются узловые напряжения от узловых токов для системы без УВ. Здесь S_m , U_m — комплексно-сопряженная узловая мощность

и напряжение: Y_{ms} — проводимость ветви, соединяющей узел системы m с базисным b , с учетом коэффициента трансформации трансформатора ветви mb .

4. Определяются падения напряжений в УВ, соответствующих напряжениям, вычисленных в п. 3:

$$\Delta \dot{U}_y = -\dot{U}_{yc} \dot{I}'_{c(n)}, \quad (2)$$

где $\dot{C}_{yc}$ — матрица соединений напряжений в узлах УВ. Строки y соответствуют УВ, столбцы c — номерам их узлов связей. Для УВ без элемента трансформации на пересечении соответствующих строки и столбца ставится $+1$, если ток задается входящим в узел связи, и -1 , если — выходящим. Для УВ с элементом трансформации (рис. 1) на пересечении строки и столбца, соответствующего номеру узла типа i , ставится ± 1 и $\mp \frac{1}{K_{ji}}$ на пересечении строки и столбца, соответствующего номеру узла типа j ; $\dot{U}_{c(n)}$ — напряжения в узлах связей УВ, вычисленных по (1); K_{ji} — комплексный коэффициент трансформации трансформатора УВ.

5. Токи $\dot{I}_y$ определяются решением уравнений, описывающих УВ (структура и решение этих уравнений дается ниже).

6. Дополнительные токи в узлах связей $\dot{I}_c$ УВ, вызванных токами $\dot{I}_y$, равны:

$$\dot{I}_c = \dot{C}_{cy} \dot{I}_y, \quad (3)$$

где $\dot{C}_{cy}$ — матрица соединений токов УВ в узлах их связей, которая составляется по тому же принципу и имеет аналогичную структуру в транспортированном виде, что и $\dot{C}_{yc}$, только вместо элементов $\frac{1}{K_{ji}}$ записываются соответствующие $\frac{1}{K_{ji}}$: K_{ji} — комплексно-сопряженный коэффициент трансформации трансформатора УВ.

7. Дополнительные узловые напряжения от токов $\dot{I}_c$:

$$\dot{U}_{m(y)} = Z_{mc} \dot{I}_c, \quad (4)$$

Z_{mc} получается из Z_{mb} , если оставить в ней столбцы, относящиеся к узлам связей УВ.

8. Результирующие узловые напряжения ЭЭС:

$$\dot{U}_m = \dot{U}_{m(n)} + \dot{U}_{m(y)}. \quad (5)$$

Так как расчет носит итерационный характер, то описанный цикл расчета (п. п. 3 ÷ 8) повторяется до достижения желаемой точности.

Уравнения УВ. Пусть через УВ ij (рис. 1) в общем случае с элементом трансформации K_{ji} проходит ток I_{ij} . Тогда уравнение ветви ij согласно изложенному алгоритму будет:

$$U_{i(n)} + U_{i(y)} - \frac{1}{K_{ji}} (U_{j(n)} + U_{j(y)}) = Z_{ij} I_{ij}, \quad (6)$$

где Z_{ij} — сопротивление ветви ij .

Уравнения УВ в обобщенном виде, согласно изложенному алгоритму можно записать:

$$-C_{ye} (U_{e(n)} + U_{e(y)}) = Z_{yy} I_y, \quad (7)$$

где Z_{yy} — диагональная матрица сопротивлений УВ.

В (6) напряжения в узлах связей (с) $U_{e(n)}$ определяются по (1).

Напряжения от токов I_e :

$$U_{e(y)} = Z_{ee} I_e = Z_{ee} C_{ey} I_y, \quad (8)$$

где Z_{ee} — подматрица узловых сопротивлений относительно узлов связей УВ, которая получается из Z_{nn} , после удаления из нее строк и столбцов, соответствующих номерам узлов, не являющихся узлами связей УВ. Подставив (8) в (7) с учетом (2), получим систему уравнений, где переменными являются I_y :

$$I_y = Y_{yy} \Delta U_y; \quad (9)$$

$$Y_{yy} = Z_{yy}^{-1} = (C_{ye} Z_{ee} C_{ey} + Z_{y(y)})^{-1}. \quad (10)$$

Если Z_{yy} симметричная, что бывает при учете коэффициентов трансформаций их модулями или при отсутствии элементов трансформаций, то ее целесообразно обрабатывать с учетом симметричности.

Заметим, что Z_{yy} остается неизменной за весь итеративный расчет для данного изменения, а $Z_{ee} = C_{ye} Z_{ee} C_{ey}$ — для всех изменений УВ в системе.

Проиллюстрируем описанный алгоритм на схеме сети (рис. 2), сопротивления всех ветвей которой равны 1 Ом. Величины токов I указаны на рис. 2, напряжение базисного узла $U_0 = 0$. Управляемыми являются ветви 1—2 и 1—4.

1. Рассекаются и удаляются ветви 1—2 и 1—4.

2. Для схемы, полученной после процедуры пункта 1, составляется матрица узловых проводимостей, обращая которую, получаем матрицу узловых сопротивлений.

$$Y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 2 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 3 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 2 \end{bmatrix}; \quad Z = Y^{-1} = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 2 & 1 \\ 0 & 2 & 4 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 5 \end{bmatrix}.$$

3. Узловые напряжения от узловых токов:

$$U_{n(n)} = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 8 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 2 & 1 \\ 0 & 2 & 4 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 3 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix}.$$

4. Падения напряжений в ветвях 1—2 и 1—4, соответствующих напряжениям п. 3:

$$\Delta U_y = - \begin{vmatrix} -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \begin{bmatrix} 3 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 4 \\ 4 \end{bmatrix};$$

$$Z_{yy} = \begin{vmatrix} -1 & 1 & 0 \\ -1 & 0 & 1 \end{vmatrix} \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 8 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 1 \\ 0 & 1 & 5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} + \begin{vmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{vmatrix} = \frac{1}{8} \begin{vmatrix} 21 & 9 \\ 9 & 21 \end{vmatrix}.$$

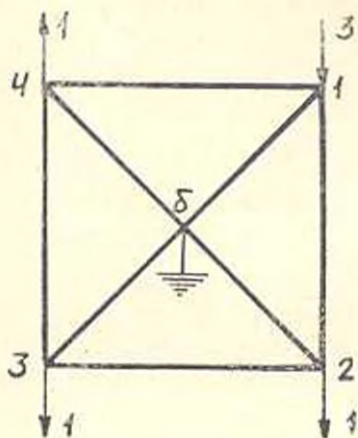


Рис. 2

5. Токи в ветвях 1—2 и 1—4:

$$I_y = \frac{1}{8} \begin{vmatrix} 21 & 9 \\ 9 & 21 \end{vmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 4 \\ 4 \end{bmatrix} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 16 \\ 16 \end{bmatrix}.$$

6. Дополнительные токи в узлах 1, 2 и 4 от токов I_y :

$$I_k = \begin{bmatrix} -1 & -1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 16 \\ 16 \end{bmatrix} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} -32 \\ 16 \\ 16 \end{bmatrix}.$$

7. Дополнительные узловые напряжения от токов I_k :

$$U_{n(y)} = \frac{1}{8} \begin{bmatrix} 8 & 0 & 0 \\ 0 & 5 & 1 \\ 0 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 5 \end{bmatrix} \frac{1}{15} \begin{bmatrix} -32 \\ 16 \\ 16 \end{bmatrix} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} -32 \\ 12 \\ 8 \\ 12 \end{bmatrix}.$$

8. Результирующие узловые напряжения:

$$U_n = \begin{bmatrix} 3 \\ -1 \\ -1 \\ -1 \end{bmatrix} + \frac{1}{15} \begin{bmatrix} -32 \\ 12 \\ 8 \\ 12 \end{bmatrix} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 13 \\ -3 \\ -7 \\ -3 \end{bmatrix}$$

В ы в о д ы

Для определения установившегося режима системы с УВ решением уравнений узловых напряжений в обращенной форме существующими методами необходимо для каждого изменения пассивных параметров УВ определить матрицу узловых сопротивлений системы Z обращением измененной матрицы узловых проводимостей, либо скорректировать Z [5], что для сложных систем при частых изменениях пассивных параметров УВ связано с большими затратами машинного времени. По предлагаемому методу Z для схемы сети после удаления УВ определяется один раз. Дополнительные вычисления связаны определением

$U_{n(1)}$.

АрмНИИЭ

Поступило 24. 11. 1980

О. С. ԱՄԻՐԻՅԱՆ, Ի. Ի. ՇԱՐԱԽՅԱՆՅԱՆ

ԿԱՌԱՎԱՐՎՈՂ ԷԼԵՄԵՆՏՆԵՐՈՎ ԷԼԵԿՏՐԱԷՆԵՐԳԵՏԻԿԱԿԱՆ
ՀԱՄԱԿԱՐԿԵՐԻ ՀԱՍՏԱՏՎԱԿ ԹԵԺԻՄԻ ՈՒՂՂՈՒՄԸ

Ա Վ Փ Ո Փ Ո Ւ Մ

Հաշվարկային օպերացիաների քանակը կրճատելու նպատակով առաջարկվում է զեկավարվող էլեմենտներով (Ղէ) էլեկտրաէներգետիկական համակարգի (էէՀ) հաստատված ռեժիմի հաշվարկը կատարել երկու փուլով: Սկզբում որոշվում է համակարգի ռեժիմը, առանց հաշվի առնելու հոսքերը Ղէ-ով, այնուհետև դրա արդյունքներով որոշվում են հոսքերը Ղէ-ներում, որոնց ազդեցությամբ էէՀ-ի վրա Ղէ-ի կապերի հանգույցներում որոշվում են համակարգի ռեժիմային պարամետրների լրացուցիչ բաղադրիչները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Амримян Р. А., Шарбахян И. И. Об одном алгоритме установившегося режима энергосистем, входящих в энергообъединение. «Известия АН АрмССР (серия Т. Н.)», т. XXXII, № 1, 1979.
2. Идельчик В. И. Расчеты установившихся режимов электрических систем. М., «Энергия», 1977.
3. Гурский С. К. Алгоритмизация задач управления режимами сложных систем в электроэнергетике. Минск, «Наука и техника», 1977.
4. Шарбахян И. И., Бабаян А. И. К вопросу определения матрицы узловых сопротивлений сложных электроэнергетических систем. «Докл. XX юб. науч.-техн. конф. молод. уч. и спец. ЭНИН им. Г. М. Крижижановского, посвящ. 110-й год. со дня рожд. В. И. Ленина», Деп. в ЭНИН, № Д/647.
5. Гурский С. К., Новицкий Б. Б., Уласевич А. Ф. Формирование обобщенных параметров и уравнений режима электроэнергетических систем с учетом комплексных коэффициентов трансформации. «Известия вузов. Энергетика», 1979, № 2.