

ЭНЕРГЕТИКА

Р. А. АМИРКЯН, И. П. ШАРАБХАՅԱՆ

ОБ ОДНОМ АЛГОРИТМЕ РАСЧЕТА
УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ЭНЕРГОСИСТЕМ,
ВХОДЯЩИХ В ЭНЕРГООБЪЕДИНЕНИЕ

В связи с развитием энергосистем (ЭС) и их объединением усложняются требования, предъявляемые к вычислительным машинам (ВМ) при расчете установившихся режимов энергообъединений (ЭО). Ограниченность оперативной памяти ВМ и большое время решения вынуждают инженеров использовать диакоптические методы при решении сложных систем [1—6].

В предлагаемой работе описан алгоритм расчета установившегося режима сложных электроэнергетических систем (ЭЭС), основанный на методе деления сложной ЭЭС на несвязанные подсистемы (ПС) [1]. Предполагается, что ПС сложной ЭЭС являются ЭС, входящие в ЭО.

Постановка задачи. Заданы схема замещения ЭО, активные (g) и реактивные (b) узловые проводимости, базисный узел с напряжением U_0 .

ЭО расчленяется на несвязанные ЭС. Выводятся и решаются уравнения состояния для каждой ЭС. При этом в узлах ЭС, характеризующихся четырьмя режимными параметрами: активной и реактивной мощностью, модулем и аргументом комплексного напряжения, задаются два режимных параметра, два других определяются решением нелинейных алгебраических уравнений установившегося режима.

Дополнительно составляется и решается система $M + N - 1$ уравнений (M —число межсистемных связей (МС), N —число ЭС в ЭО, где в качестве переменных рассматриваются токи в МС и падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО).

Напряжения в узлах ЭС определяются как алгебраическая сумма напряжений от токов в узлах ЭС и токов в МС.

Алгоритм решения

1. Рассекаем ЭО по МС на несвязанные ЭС. Удаляем рассеченные МС. Задаемся в каждой ЭС опорным узлом, который замыкаем на базисный узел ЭО.

2. Составляем матрицу Y узловых проводимостей ЭС относительно опорного узла.

3. Решаем уравнения

$$I_m - Y_{m0} U_0 = Y U_{1m} \quad (1)$$

и определяем напряжения в узлах ЭС от их узловых токов, где I_m — токи в узлах ЭС; Y_{m0} — взаимная проводимость между данным и опорным узлами ЭС; U_{1m} — напряжения от узловых токов.

4. Составляем систему $M + N - 1$ уравнений (алгоритм будет дан ниже), откуда определяем неизвестные токи в МС и падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО.

5. Решаем уравнения

$$I_m = Y U_{2m} \quad (2)$$

и определяем напряжения в узлах ЭС от токов в МС, где I_m — дополнительные токи в узлах связи ЭС, вызванные токами в МС; U_{2m} — напряжения в узлах ЭС от токов в МС.

6. Определяем опорные напряжения ЭС:

$$U_p = U_0 + \Delta U_p, \quad (3)$$

где ΔU_p — падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО.

7. Результирующие напряжения в узлах ЭС:

$$U_m = U_{1m} + U_{2m} + \Delta U_p \quad (4)$$

Алгоритм составления уравнений МС

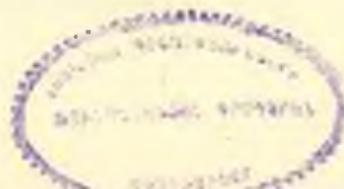
Разделение ЭО на ЭС удалением МС приводит к прекращению протекания токов между ЭС, поэтому в одних ЭС будет наблюдаться излишек тока, в других — нехватка. Если компенсировать излишек и нехватку токов в узлах связи ЭС и решать уравнения узловых напряжений каждой ЭС, то получим такое решение, как если бы ЭО не расчленилось на ЭС, а решалось целиком.

Таким образом, задача становится определенной, если будут известны токи в МС и падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО.

Допустим, что через МС mk, cd, ef, \dots протекают токи $I_{mk}, I_{cd}, I_{ef}, \dots$, где первые индексы принадлежат одним ЭС, а вторые — другим. Если $U_m, \Delta U_k, \Delta U_c, \dots$ — падения напряжений между опорными узлами ЭС (к которым принадлежат узлы МС m, k, c, \dots) и базисным узлом ЭО, то уравнения МС с учетом пункта 7 алгоритма решения можно записать:

$$\begin{aligned} U_{1m} + U_{2m} + \Delta U_m - U_{1k} - U_{2k} - \Delta U_k &= Z_{mk} I_{mk}; \\ U_{1c} + U_{2c} + \Delta U_c - U_{1d} - U_{2d} - \Delta U_d &= Z_{cd} I_{cd}; \\ U_{1f} + U_{2f} + \Delta U_f - U_{1e} - U_{2e} - \Delta U_e &= Z_{fe} I_{fe}, \end{aligned} \quad (5)$$

где $Z_{mk}, Z_{cd}, Z_{fe}, \dots$ — сопротивления МС.



В этой системе M уравнений напряжения в узлах ЭС: $\dot{U}_{1a}, \dot{U}_{1c}, \dot{U}_{1d}, \dot{U}_{1f}, \dot{U}_{1g}, \dots$ от узловых токов определяются из (1). А напряжения: $\dot{U}_{2a}, \dot{U}_{2c}, \dot{U}_{2d}, \dot{U}_{2f}, \dot{U}_{2g}, \dots$ от токов МС определяются из (2) через токи МС. Подставив их значения в (5), получим M уравнений с M неизвестными токами (\dot{I}_i) в МС и $N-1$ неизвестными падениями напряжений ($\Delta \dot{U}_p$) между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО. Дополнительные $N-1$ уравнений для определения неизвестных \dot{I}_i и $\Delta \dot{U}_p$, составляемые по балансу токов в ЭС, будут:

$$\sum \dot{I}_i = -\dot{I}_p, \quad (6)$$

где $\sum \dot{I}_i$ — сумма токов МС, примыкающих к данной ЭС; \dot{I}_p — суммарные токи ЭС, которые определяются следующим образом. Задавая начальными приближениями напряжений в узлах для каждой ЭС, кроме ЭС с базисным узлом, определяют суммарные токи

$$\dot{I}_p = \sum_{m=1}^n \left(\frac{\bar{S}_m}{\dot{U}_m} + y_{m_0} \dot{U}_m \right),$$

где n — число узлов данной ЭС; \bar{S}_m — комплексно-сопряженная мощность узла m ; \dot{U}_m — комплексно-сопряженное напряжение узла m ; y_{m_0} — поперечная проводимость узла m .

По мере уточнения напряжений узлов уточняются также токи \dot{I}_p .

Объединив систему уравнений (5) и (6) в матричное уравнение, неизвестные \dot{I}_i и $\Delta \dot{U}_p$ определим:

$$\begin{bmatrix} \dot{I}_i \\ \Delta \dot{U}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_i & K_i \\ (K_i)_t & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Delta \dot{U}_i \\ -\dot{I}_p \end{bmatrix}, \quad (7)$$

Здесь $\Delta \dot{U}_i$ — падения напряжений в МС от узловых токов; Z_i — подматрица коэффициентов неизвестных \dot{I}_i , которая является подматрицей сопротивлений узлов МС относительно опорных узлов ЭС, составление которой описано в [1]; K_i — подматрица соединений токов МС с ЭС. Столбцы ее соответствуют номерам ЭС, а строки — номерам узлов в сечениях МС. На пересечении соответствующих строки и столбца ставится $+1$, если ток входит в ЭС и -1 , если ток выходит из ЭС. Строки этой подматрицы показывают, какие две ЭС связывает МС, по которой проходит ток предварительного заданного нами направления;

$(K_i)_t$ — подматрица, полученная транспонированием K_i : $\begin{bmatrix} Z_i & K_i \\ (K_i)_t & 0 \end{bmatrix} = K$ — квадратная, неособенная, симметричная матрица порядка $M + N - 1$. Первые M строк (i) ее соответствуют неизвестным токам МС (номерам узлов в сечениях), остальные $N - 1$ (p) — неизвестным

падениям напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО (номера ЭС):

$$K^{-1} = \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{s\rho} \\ K_{\rho s} & K_{\rho\rho} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

Последовательность расчета

1. Напряжения в узлах ЭС от их узловых токов:

$$U_{1m} = Z I_m + U_0,$$

где Z — матрица узловых сопротивлений ЭС относительно опорного узла, $Z = Y^{-1}$.

2. Падения напряжений в МС от узловых токов ЭС:

$$U_s = \sum_1^l C_{sm} U_{1m},$$

C_{sm} — матрица соединений токов МС с узлами ЭС [1].

3. Токи в МС:

$$I_k = K_{ks} \Delta U_s - K_{kp} I_p.$$

4. Дополнительные токи в узлах связи ЭС, вызванные токами, протекающими в МС:

$$I_u = C_{m'} I_k; \quad C_{m'} = (C_{sm})_t.$$

5. Дополнительные напряжения в узлах ЭС от токов в МС:

$$U_{2m} = Z I_u.$$

6. Падения напряжений между опорными узлами ЭС и базисным узлом ЭО:

$$\Delta U_p = K_{ps} \Delta U_s - K_{pp} I_p.$$

7. Напряжения опорных узлов:

$$U_p = \Delta U_p + U_0.$$

8. Результирующие узловые напряжения:

$$U_m = U_{1m} + U_{2m} + \Delta U_p.$$

Так как по постановке задачи в узлах ЭС заданы не токи, а мощности, то определяя токи в узлах ЭС $I = \frac{P - jQ}{U}$, узловые на-

пряжения вычисляем по одному из итерационных методов.

3. Матрица сопротивлений узлов связей ПС относительно их опорных узлов:

$$Z_{\lambda} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 44 & 6 & 2 & 2 & 0 \\ 6 & 44 & 3 & 3 & 0 \\ 2 & 3 & 44 & 0 & -3 \\ 2 & 3 & 0 & 44 & -3 \\ 0 & 0 & -3 & -3 & 44 \end{bmatrix}.$$

4. Составляем подматрицу соединений токов в линиях связи с ПС.

$$K_{\lambda} = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 1 \\ -1 & 0 & 1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}.$$

5. Определяем подматрицу:

$$(K_{\lambda})_t = \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}.$$

6. Падения напряжений в линиях связи ПС от их узловых токов:

$$\Delta U_{\lambda} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 112 \\ 48 \\ 32 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}.$$

7. Суммарные токи ПС:

$$I_p = \begin{bmatrix} 12 \\ -4 \\ -4 \end{bmatrix}.$$

8. Объединив все полученные подматрицы, вычислим токи в линиях связи и падения напряжений между опорными узлами ПС и базисным узлом:

$$\begin{bmatrix} I_{17} \\ I_{18} \\ I_{19} \\ I_{20} \\ I_{21} \\ \Delta U^I \\ \Delta U^{II} \\ \Delta U^{III} \end{bmatrix} = \frac{1}{15} \begin{bmatrix} 44 & 6 & 2 & 2 & 0 & -15 & 0 & 15 \\ 6 & 44 & 3 & 3 & 0 & -15 & 0 & 15 \\ 2 & 3 & 44 & 0 & -3 & -15 & 15 & 0 \\ 2 & 3 & 0 & 44 & -3 & 0 & 0 & 15 \\ 0 & 0 & -3 & -3 & 44 & 0 & -15 & 0 \\ -15 & -15 & -15 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 15 & 0 & -15 & 0 & 0 & 0 \\ 15 & 15 & 0 & 15 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 112 \\ 48 \\ 32 \\ 0 \\ 0 \\ -180 \\ 60 \\ 60 \end{bmatrix}.$$

$$\begin{bmatrix} I_{27} \\ I_{18} \\ I_{19} \\ I_{20} \\ I_{21} \end{bmatrix} = \frac{1}{641} \begin{bmatrix} 2848 \\ 1740 \\ 3104 \\ -2024 \\ 540 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} \Delta U^I \\ \Delta U^{II} \\ \Delta U^{III} \end{bmatrix} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 145880 \\ 20520 \\ 79760 \end{bmatrix}.$$

9. Напряжения в узлах ПС от токов в линиях связи:

$$U_{2m}^I = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} -21336 \\ -32644 \\ -30036 \\ 31364 \end{bmatrix}; \quad U_{2m}^{II} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 4588 \\ 8232 \\ 20108 \\ 5532 \end{bmatrix};$$

$$U_{2m}^{III} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 7152 \\ 5668 \\ 9852 \\ 15788 \end{bmatrix}; \quad U_{2m}^{IV} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 5952 \\ -3252 \\ 14652 \\ 21108 \end{bmatrix}.$$

10. Опорные напряжения ПС:

$$\begin{bmatrix} U_{o_1} \\ U_{o_2} \\ U_{o_3} \end{bmatrix} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 145880 \\ 20520 \\ 79760 \end{bmatrix}.$$

11. Результирующие узловые напряжения ПС:

$$U_m^I = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 145697 \\ 124133 \\ 136997 \\ 176693 \end{bmatrix}; \quad U_m^{II} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 15493 \\ 19137 \\ 31013 \\ 16437 \end{bmatrix};$$

$$U_m^{III} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} -2463 \\ -3947 \\ 237 \\ 6173 \end{bmatrix}; \quad U_m^{IV} = \frac{1}{15 \cdot 641} \begin{bmatrix} 76097 \\ 66893 \\ 84794 \\ 91253 \end{bmatrix}.$$

Выводы

1. Предложен алгоритм расчета установившегося режима ЭО методом деления его на изолированные ЭС.

2. Предложенный алгоритм в отличие от [1] не требует построения искусственной цепи, матрицы соединения токов в ней и вычислений, связанных с этой матрицей.

3. Для определения токов в МС по [1] требуется обращение матрицы на $2(N-1)$ меньшего порядка, чем порядок матрицы K . Однако, для реальных ЭО число ЭС и МС ($M + N - 1$), определяющих порядок матрицы K , не могут быть такими большими, что вызвало бы затруднение с обращением этой матрицы. Кроме того, в процессе итерационного расчета установившегося режима эта матрица обращается один раз.

АрмНИИЭ

Поступило 10.VII 1978

Բ. Ա. ԱՄԻՐԻՅԱՆ, Ի. Ի. ՆԱՐԵԿԱՆԱՆ

ԷՆԵՐԳԻԱՄԵԿԱՎՈՐՈՒՄՆԵՐԻ ՄԵՋ ՍՏՆՈՂ ԷՆԵՐԴԱՀԱՄԱԿԱՐԳԵՐԻ
ՀԱՍՏԱՏՎԱԾ ԹԵԺՎԻԳԻ ՀԱՇՎՄԱՆ ՄԻ ԱԿՏԻՐԹՎԻ ՄԱՍԻՆ

Ա մ փ ո փ ու մ

Առաջարկվում է էներգամիավորումների մեջ (էՄ) մտնող էներգամամկարգերի (էՀ) հաստատված ուժիմի հաշվարկի ալգորիթմ՝ հիմնված էՄ-ները շկապակցված էՀ-երի տրոհման մեթոդի վրա:

Հաշվարկը կատարվում է երկու փուլով: Սկզբում նայտնի մեթոդներով որոշվում են առանձին էՀ-երի ուժիմները՝ առանց հաշվի առնելու հոսքերը միջհամակարգային կապերում (ՄԿ): Այնուհետև ըստ նրանց արդյունքների որոշվում են հոսքերը ՄԿ-երում, որոնց ազդեցությամբ էՀ-երում ՄԿ-երի նանդուլցներում որոշվում են հաշվարկելի պարամետրների լրացուցիչ բաղադրիչներ և վերջնականապես ճշտվում էՀ-երի ուժիմները:

Ալգորիթմը կարելի է կիրառել բարդ համակարգերի օպտիմալացման, ղեկավարման և կայունության պրոբլեմների լուծման խնդիրներում:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Крон Г. Исследование сложных систем по частям-диакоптике. М., «Наука», 1972.
2. Хэйл Х. Диакоптика и электрические цепи. М., «Мир», 1974.
3. Хачатрян В. С. Метод и алгоритм расчета установившегося режима больших электроэнергетических систем. «Известия АН СССР, Энергетика и транспорт», 1973, № 4.
4. Под ред. Веникова В. А. Применение вычислительных машин и энергетике. М., «Энергия», 1968.
5. Курьяни А. Ф., Махнитко А. Е. Расчет электрических сетей при заданных мощностях в узлах методом разбиения на подсистемы. «Электричество», 1972, № 5.
6. Амрикан Р. А., Шарабханян И. И. Алгоритм расчета установившегося режима энергосистем, входящих в энергообъединение, с учетом ограничений на потоки межсистемных связей. Тез. докл. науч.-техн. совещ. «Научно-технические проблемы развития и совершенствования автоматизации управления в энергосистемах», Минск, 1977.