Исследование тонкой структуры мартенсита электронно-микроскопическим методом на "просвет", а также результаты рентгеноструктурного анализа показывают, что термомеханическая обработка порошковых сталей приводит к получению развитой субструктуры с высокой плотностью дислокации, в результате чего изменяется строение мартенсита: снижается тетрагональность c/a, увеличивается объем малоуглеродистого кубического мартенсита V, уменьшается содержание углерода в тетрагональном мартенсите $C_т$.

Таким образом, ТМО приводит к существенному изменению субструктуры и морфологии мартенсита, а следовательно, и распределению углерода и водорода, чем и объясняется значительное повышение механических свойств по сравнению с ОТО даже без обезводораживающего отжига. Однако для достижения максимального эффекта упрочнения необходимо в схему ТМО порошковых сталей включить обезводораживающий отжиг.

Таблица 2

Влияние режимов обработки порошковой стали с содержанием 0,8 % С на состояние мартенсита

Режм обработки	c/a	V	$C_т$, % вес	Физическое уширение (211), рад
1	1,032±0,001	0.16±0.03	0.70±0.02	0.046±0.001
2	1,025±0,002	0,48±0,02	0.55±0,03	0.045±0.001
3	1,031±0,001	0,23±0,02	0.68±0.02	0.045±0,001
4	1,028±0.001	0,25±0.02	0.61±0,02	0.047±0.001

ЛИТЕРАТУРА

1. Применение термомеханической обработки в порошковой металлургии /*М.Л. Бернштейн, С.Г. Мамян, С.Б. Фельдина и др.* //Технология автомобилестроения. - М., 1970. - N 1. - С. 14-18.
2. *Бернштейн М.Л., Мамян С.Г., Саклинский В.В.* Высокотемпературное термомеханическое упрочнение спеченных конструкционных сталей //Повышение конструкционной прочности сталей и сплавов: Сб. ст. - М., 1970. - С. 126-133.

ГИУА 20.V.1993

Изв. НАН и ГИУ Армении (сер. ТН), т. XLVIII, №1, 1995, с. 15-21.

УДК 621.3.01 ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

Г.Д. АКОПДЖАНЯН

О МАШИННОМ РАСЧЕТЕ ШЕСТИПОЛЮСНЫХ СХЕМ

Բարդ էլեկտրական շղթաներում, որոնք դիտարկվում են որպես $2n$-բևեռներ, հաճախ հանդիպում են խնդիրներ, երբ անհրաժեշտ է լինում որոշել սեղմակներում գործող

բարումները և նրանց սկզբնական փուլերը հաստոնի մոտարային հզորությունների միջոցով, կամ սեակտիվ հզորությունները՝ հաստոնի բարումների և ակտիվ հզորությունների միջոցով: Այդպիսի խնդիրները, սկսած $n = 3$ (վեցբևեռ) հաշվարկվում են հաջորդական մոտեցումների մեթոդով: Հաղվածում մշակված են վեցբևեռի համար նշված խնդիրների հաշվարկային լուծման ալգորիթմներ, որոնց օգնությամբ կազմվում են ծրագրեր խնդիրների լուծումը ԷՀՄ-ի վրա իրագործելու համար: Մշակված ալգորիթմները հնարավորություն են ընձեռում կատարել այդպիսի հաշվարկներ ավելի բարդ շղթաների համար ($n > 3$), որոնց կարելի է դիտարկել որպես վեցբևեռների միացություններ:

При исследовании сложных электрических цепей, рассматриваемых в виде $2n$-полюсников, часто ставятся задачи определения напряжений на зажимах и их фаз по известным значениям входных активных и реактивных мощностей, или задачи определения реактивных мощностей по заданным напряжениям и активным мощностям. Эти задачи, начиная с $n = 3$ (шестиполюсник), решаются итерационными методами. В настоящей статье применительно к шестиполюснику разработаны алгоритмы аналитических решений указанных задач, реализуемых на ЭВМ. Указанные алгоритмы позволяют производить аналогичные расчеты для более сложных схем ($n > 3$), состоящих из соединений шестиполюсников.

Библиогр.: 3. назв.

Studing complex electric circuits considered as $2n$ impoles problems are stated in determining terminal voltages and their phases by well-known values of input active and reactive power or problems in determining reactive power for given voltages and active power. These problems beginning with ($n = 3$) (six-terminals) are solved by iteration methods. In this paper analytical solving algorithms to mentioned problems realized on an electronic computer are developed for a six-terminal. The indicated algorithms allow to make similar calculations for more complex circuits ($n > 3$) consisting of six-terminal connections.

Reg. 3.

При исследовании сложных электрических цепей их обычно рассматривают как многополюсники с определенным числом n пар зажимов, служащих для присоединения к ним внешних ветвей (источников, нагрузок и т.д.). Рассматривая такие $2n$-полюсники при известных значениях параметров Y и напряжений U на зажимах, легко определяются активные P и реактивные Q мощности на любых k-ых парах их зажимов при помощи соотношений [1-3]:

$$P_k = \sum_{m=1}^{n} U_k U_m y_{km} \mathrm{Cos}(\psi_k - \psi_m + \varphi_{km}),$$

$$Q_k = \sum_{m=1}^{n} U_k U_m y_{km} \mathrm{Sin}(\psi_k - \psi_m + \varphi_{km}), \ (k = 1, 2, \ldots, n) \tag{1}$$

где U_k, U_m - действующие значения напряжений на k-й и m-й парах зажимов; ψ_k, ψ_m - фазы этих напряжений ; y_{km}, φ_{km} - модули и аргументы Y - параметров $2n$-полюсника.

При расчетах и исследованиях электроэнергетических систем, а также иных сложных электрических цепей часто сталкиваются с задачами определения напряжений и сдвигов фаз между ними при известных значениях активных, реактивных мощностей и параметров

многополюсника, а также с задачами, требующими определения реактивных мощностей по заданным активным мощностям и величинам напряжений на зажимах и параметрам многополюсника. В частности, к ним можно отнести задачи, когда при заданных активных мощностях в узловых точках цепи требуется определить значения генерируемых реактивных мощностей, обеспечивающих заданные уровни напряжений в них.

Аналитическое решение перечисленных задач вызывает затруднение, т.к. требует решения систем трансцендентных уравнений. Такие задачи обычно решают, применяя приближенные методы расчета. Если аналитическое решение отмеченных задач в случае четырехполюсника ($n=2$) не представляет трудностей, то уже при шестиполюснике достаточно осложняется, а получаемые при этом алгоритмы расчетов требуют их реализации на ЭВМ.

В настоящей статье рассматривается шестиполюсник и приводятся аналитические решения поставленных выше задач: 1) определение реактивных мощностей и фаз напряжений при заданных активных мощностях и величинах напряжений; 2) определение напряжений и их фаз при заданных значениях активных и реактивных мощностей. В обеих задачах параметры шестиполюсника принимаются известными. Излагаются алгоритмы расчетов для реализации решений указанных задач на ЭВМ.

Запишем уравнения (1) для определения активной и реактивной мощностей на k-ых парах зажимов шестиполюсника:

$$P_k = S_{kk}\mathrm{Cos}\varphi_{kk} + S_{kk-1}\mathrm{Cos}(\psi_{kk-1} + \varphi_{kk-1}) + S_{kk-2}\mathrm{Cos}(\psi_{kk-2} + \varphi_{kk-2}).$$

$$Q_k = S_{kk}\mathrm{Sin}\varphi_{kk} + S_{kk-1}\mathrm{Sin}(\psi_{kk-1} + \varphi_{kk-1}) + S_{kk-2}\mathrm{Sin}(\psi_{kk-2} + \varphi_{kk-2}). \qquad (2)$$

$(k=1,2,3).$

Здесь введены обозначения: $S_{km} = U_k U_m y_{km}$, $\psi_{km} = \psi_k - \psi_m$, причем m может равняться k, $k+1$ или $k-2$, если при этом m становится больше трех, то $m = m-3$. Это относится ко всем математическим соотношениям, приводимым в статье.

Пользуясь равенствами (2), произведя математические преобразования, приходим к заключению, что выражение $S_{kk} = 2S_{k+1,k+2}\mathrm{Cos}\psi'_{k-1,k-2}$ может быть определено двумя разными соотношениями:

$$S_{kk} = (1+a_{kk})U_{kk} + S_k / U_{kk} - 2a_{kk}S_k\mathrm{Cos}(\varphi_k - \varphi_{kk}) - \sum_{i=1}^{3} U_{ii} =$$

$$= 2S_{kk}\mathrm{Cos}(\varphi_{kk} - \varphi'_k) - 2S_k\mathrm{Cos}(\varphi_k - \varphi'_k) + \sum_{i=1}^{3}[S_i\mathrm{Cos}(\varphi_i - \varphi'_i) - \qquad (3)$$

$$-S_{ii}\mathrm{Cos}(\varphi_{ii} - \varphi'_i)]. \quad (k=1,2,3).$$

Из (2) получим также следующее выражение:

$$S_{kk}\mathrm{Sin}(\varphi_{kk} - \varphi'_k) - S_k\mathrm{Sin}(\varphi_k - \varphi'_k) = -S_{kk-1}\mathrm{Sin}\psi'_{k-1} + S_{k+2k}\mathrm{Sin}\psi'_{k+2k}. \qquad (4)$$

$(k=1, 2, 3).$

В этих соотношениях $S_k = \sqrt{P_k^2 + Q_k^2}$ - полная мощность, $\varphi_k = \mathrm{arctg}Q_k / P_k$ - сдвиг фаз между напряжением и током на k-ых зажимах шестиполюсника.

$$U_{kk} = S_{kk} / a_{kk},\ a_{kk} = \frac{y_{kk} y_{k+k+2}}{y_{kk+1} y_{k+2k}},\ \varphi'_k = \varphi_{kk+1} - \varphi_{k-1k-1} + \varphi_{k+2k},$$

$$\psi'_{kk+1} = \psi_{kk+1} - \varphi_{k-2k} + \varphi_{k+1k+2}. \qquad (5)$$

Преобразуя равенство (3) и введя новые обозначения, получим

$$P_k^2 + 2a_k U_{kk} P_k - wU_{kk} + Q_k^2 + 2b_k U_{kk} Q_k - VU_{kk} + c_k U_{kk}^2 - tU_{kk} = 0. \qquad (6)$$

где

$$a_k = \mathrm{Cos}\varphi'_k - a_{kk}\mathrm{Cos}\varphi_{kk},\ \ b_k = \mathrm{Sin}\varphi'_k - a_{kk}\mathrm{Sin}\varphi_{kk},$$

$$c_k = 1 - 2a_{kk}\mathrm{Cos}(\varphi'_k - \varphi_{kk}) + a_{kk}^2,\ \ d_k = -1 + a_{kk}\mathrm{Cos}(\varphi'_k - \varphi_{kk}),$$

$$\text{а)}\ w = \sum_{i=1}^{3} P_i \mathrm{Cos}\varphi'_i,\ \ \text{б)}\ v = \sum_{i=1}^{3} Q_i \mathrm{Sin}\varphi'_i,\ \ \text{в)}\ t = \sum_{i=1}^{3} d_i U_{ii}. \qquad (7)$$

Таким образом, получаем три равенства типа (6) при $k = 1, 2, 3$. Каждое из них связывает активную, реактивную мощности и напряжения на всех трех парах зажимов шестиполюсника. Равенства (6) с учетом (7) можно рассматривать как систему из трех квадратных параметрических уравнений относительно неизвестных P_k, Q_k или U_{kk} в зависимости от решаемой задачи. Выпишем эти уравнения для всех трех случаев:

а) при известных реактивных мощностях и напряжениях (6) может быть рассмотрено как квадратное уравнение относительно активных мощностей P_k с параметром w, зависящим от активных мощностей на всех трех парах зажимов:

$$P_k^2 + 2a_k U_{kk} P_k - U_{kk} w + E_k = 0. \quad (k = 1, 2, 3),$$

где $E_k = Q_k^2 + 2b_k U_{kk} Q_k + c_k U_{kk}^2 - (v + t)U_{kk}$;

б) при известных активных мощностях и напряжениях (6) может быть рассмотрено как квадратное уравнение относительно реактивных мощностей Q_k с параметром V, зависящим от реактивных мощностей на всех трех парах зажимов:

$$Q_k^2 + 2b_k U_{kk} Q_k - U_{kk} v + F_k = 0,\ \ (k = 1, 2, 3),$$

где $F_k = P_k^2 + 2a_k U_{kk} P_k + c_k U_{kk}^2 - (w - t)U_{kk}$;

в) при известных активных и реактивных мощностях (6) может быть рассмотрено как квадратное уравнение относительно U_{kk} с параметром t, зависящим от напряжений на всех трех парах зажимов:

$$c_k U_{kk}^2 + (H_k + t)U_{kk} + S_k^2 = 0,\ (k = 1, 2, 3),$$

где $H_k = 2(a_k P_k + b_k Q_k) - w - v$.

В зависимости от поставленной задачи решением соответствующих квадратных уравнений получим искомые величины в функции от параметров: $P_k(w)$, $Q_k(v)$ или $U_{kk}(t)$.

Учитывая, что эти уравнения для случаев "а" и "б" идентичны, идентичными будут и их решения. Рассмотрим только случаи "б" и "в", которые соответствуют поставленным в статье практическим задачам.

Для искомых величин из квадратных уравнений получим

б) $Q'_k = -b'_k \pm \sqrt{b'^2_k + U''_{kk} v - F'_k}$. (k=1.2.3). (8)

где $Q'_k = Q_k \mathrm{Sin}\varphi'_k$. $b'_k = b_k U_{kk} \mathrm{Sin}\varphi'_k$. $U''_{kk} = U_{kk} \sin^2 \varphi'_k$. $F'_k = F_k \mathrm{Sin}^2 \varphi'_k$:

в) $U'_{kk} = -e_k - f_k t \pm \sqrt{f_k^2 t^2 + 2e_k f_k t + e'^2_k}$. (9)

где

$$U'_{kk} = U_{kk} d_k,\ e_k = H_k d_k / 2c_k,\ f_k = d_k / 2c_k.$$

$$S'_k = d_k^2 S_k^2 / c_k,\ e'^2_k = e_k^2 - S'_k.$$

При определении реактивных мощностей Q_k ("б") полученные из квадратных уравнений Q'_k (8) подставляем в (7 б), а при определении напряжений U_k ("в") определенные из квадратных уравнений U'_{kk} (9) подставляем в (7в). В обоих случаях преобразования указанных уравнений приводят к уравнению восьмой степени:

$$\alpha_0 x^8 + \alpha_8 x^7 + \alpha_7 x^6 + \alpha_6 x^5 + \alpha_5 x^4 + \alpha_4 x^3 + \alpha_3 x^2 + \alpha_2 x + \alpha_1 = 0$$

В первом случае ("б") x есть неизвестная v, во втором ("в") - t.

Алгоритм расчета коэффициентов α приведен в приложении.

Решив уравнение восьмой степени, определив действительные его корни и подставив поочередно их значения в (8) или соответственно в (9), определим в первом случае ("б") $Q'_k = Q_k \mathrm{Sin}\varphi'_k$, во втором ("в") - $U'_{kk} = U_{kk} d_k$ (при k=1. 2. 3). Для каждой из определяемых величин получим по два различных значения. Истинные их значения выбирают из условий выполнения соответствующих равенств (7).

Имея значения Q'_k ("б") и соответственно U'_{kk} ("в"), определяем в первом случае искомые реактивные мощности:

$$Q_k = Q'_k / \mathrm{Sin}\varphi'_k .$$

а также

$$S_k = \sqrt{P_k^2 + Q_k^2},\ \varphi_k = \mathrm{arctg} Q_k / P_k .\quad (k=1.2.3).$$

во втором случае - искомые напряжения:

$$U_{kk} = U'_{kk} / d_k,\ S_{kk} = a_{kk} U_{kk},\ U_k = \sqrt{S_{kk} / y_{kk}} .\quad (k=1,2,3)$$

Поскольку в уравнениях восьмой степени могут иметь место и посторонние корни, то выясняется правильность решения обеих задач из условий выполнения равенств (3) для всех значений k=1. 2. 3. Неудовлетворение хотя бы одного из этих условий свидетельствует о несоответствии полученных для Q_k и U_k значений по отношению к решаемой задаче. В этом случае отбрасываются полученные для Q_k или соответственно U_k значения и определяются их новые значения, соответствующие следующему действительному корню уравнения восьмой степени. При выполнении же указанных равенств решения соответствуют действительности.

Пользуясь равенством (4) и произведя математические преобразования, получим

$$S_{kk-1} \mathrm{Sin}\psi'_{kk-1} = \{[S_{kk} \mathrm{Sin}(\varphi'_k - \varphi_{kk}) - S_k \mathrm{Sin}(\varphi'_k - \varphi_k)] S_{kk+1} \mathrm{Cos}\psi'_{kk+1} -$$

$$-[S_{k+1k+1} \mathrm{Sin}(\varphi'_{k+1} - \varphi_{k+1k+1}) - S_{k+1} \mathrm{Sin}(\varphi'_{k+1} - \varphi_{k+1})] U_{kk}\} / \quad (10)$$

$$/ (U_{kk} + S_{kk-1} \mathrm{Cos}\psi'_{kk-1} + S_{k+2k} \mathrm{Cos}\psi'_{k+2k}.\quad (k=1.2.3).$$

Пользуясь выражениями (3) и (10), определим углы ψ'_{kk+1}, а из (5) – сдвиги фаз напряжений на зажимах шестиполюсника ψ_{kk+1}. Достоверность полученных результатов проверяется выражением

$$\psi_{12}+\psi_{23}+\psi_{31}=0.$$

Невыполнение этого равенства свидетельствует о несоответствии полученных для ψ_{kk+1} результатов реальным условиям задачи. При этом, как и в случае невыполнения равенств выражений (3), следует заново решить задачу для следующего действительного корня уравнения восьмой степени. При выполнении же этого равенства следует считать задачу решенной.

По описанным выше алгоритмам составлены программы. Задачи решены для схем энергосистем, представленных тремя эквивалентными генераторными станциями, питающими электрическую сеть, с нагрузками и линиями электропередач.

Отметим также, что разработанные методы расчета дают возможность рассчитывать более сложные схемы, которые приводятся к различным способам соединений шестиполюсников.

Приложения

Расчет коэффициентов уравнения восьмой степени:

1. К задаче определения реактивных мощностей Q_k ("а"):

$$h_k=b'^2_k-F'_k,\ b=\sum_{k=1}^{3}b'_k,\ b_h=b^2-\sum_{k=1}^{3}h_k,\ h_{hh}=h_1h_2h_3,$$

$$h_{bh}=b_b^2-4(h_1h_2+h_2h_3+h_3h_1),\ b_u=2b-\sum_{k=1}^{3}U'_{kk},$$

$$b_{uh}=b_ub_h-2[h_1(U'_{22}+U'_{33})+h_2(U'_{33}+U'_{11})+h_3(U'_{11}+U'_{22})].$$

$$U_{hh}=h_3h_1U'_{22}+h_2h_3U'_{11}+h_1h_2U'_{33},\ U_{uu}=U'_{11}U'_{22}U'_{33},$$

$$b_{uu}=b_u^2+2b_h-4(U'_{11}U'_{22}+U'_{22}U'_{33}+U'_{33}U'_{11}),$$

$$h_{uu}=U'_{11}U'_{22}h_3+U'_{22}U'_{33}h_1+U'_{33}U'_{11}h_2,$$

$$\alpha_1=b_{bh}^2-64b^2h_{hh},\ \alpha_2=4[b_{uh}b_{bh}-16b(2h_{hh}+bU_{hh})],$$

$$\alpha_3=2[b_{uh}+b_{uu}b_{uh}-32(h_{hh}+2bU_{hh}+b^2h_{uu})],$$

$$\alpha_4=4[b_ub_{hh}+b_{uu}b_{uh}-16(U_{hh}+2bh_{uu}+b^2U_{uu})],$$

$$\alpha_5=b_{uu}^2+8b_ub_{uh}+2b_{hh}-64(2bU_{uu}+h_{uu}),$$

$$\alpha_6=4(b_{uh}+b_ub_{uu}-16U_{uu}),$$

$$\alpha_7=2(2b_u^2+b_{uu}),\ \alpha_8=4b_u,\ \alpha_9=1.$$

2. К задаче определения напряжений U_k:

$$e=\sum_{k=1}^{3}e_k,\ f=1+\sum_{k=1}^{3}f_k,\ l_1=f^2-\sum_{k=1}^{3}f_k^2,\ l_2=2\left[ef-\sum_{k=1}^{3}e_kf_k\right],$$

$$l_3 = e^2 - \sum_{k=1}^{3} e'_k, \quad g_1 = l_1^2 - 4\sum_{k=1}^{3} f_k^2 f_{k+1}^2,$$

$$g_2 = 2[l_2 l_2 - 4\sum_{k=1}^{3} e_k f_k (f_{k+1}^2 + f_{k+2}^2)],$$

$$g_3 = l_2^2 + 2l_1 l_3 - 4\sum_{k=1}^{3} [f_k^2 (e'_{k+1} + e'_{k+2}) + 4e_k e_{k+1} f_k f_{k+1}],$$

$$g_4 = 2[l_2 l_3 - 4\sum_{k=1}^{3} e_k f_k (e'_{k+1} + e'_{k+2})], \quad g_5 = l_3^2 - 4\sum_{k=1}^{3} e'_k e'_{k+1},$$

$$r_1 = f_1^2 f_2^2 f_3^2, \quad r_2 = 2f_1 f_2 f_3 \sum_{k=1}^{3} f_k f_{k+1} e'_{k+2},$$

$$r_3 = \sum_{k=1}^{3} f_k^2 f_{k+1}^2 e'_{k+2} + 4f_1 f_2 f_3 \sum_{k=1}^{3} e_k e_{k+1} f_{k+2},$$

$$r_4 = 2\sum_{k=1}^{3} f_k f_{k+1} e'_{k+2} (e_k f_{k+1} + e_{k+1} f_k) + 8e_1 e_2 e_3 f_1 f_2 f_3,$$

$$r_5 = \sum_{k=1}^{3} [f_k^2 e'_{k+1} e'_{k+2} + 4e_k e_{k+1} f_k f_{k+1} e'_{k+2}],$$

$$r_6 = 2\sum_{k=1}^{3} e'_k e'_{k+1} e_{k+2} f_{k+2}, \quad r_7 = e'_1 e'_2 e'_3,$$

$$\alpha_1 = g_5^2 - 64e^2 r_7, \quad \alpha_2 = 2[g_4 g_5 - 32(er_6 + 2fr_7),$$

$$\alpha_3 = g_4^2 + 2g_3 g_5 - 64(e^2 r_5 + 2efr_6 + f^2 r_7),$$

$$\alpha_4 = 2[g_2 g_5 + g_3 g_4 - 32(e^2 r_4 + 2efr_5 + f^2 r_6)],$$

$$\alpha_5 = g_3^2 + 2(g_2 g_4 + g_1 g_5) - 64(e^2 r_3 + 2efr_4 + f^2 r_5),$$

$$\alpha_6 = 2[g_1 g_4 + g_2 g_3 - 32(e^2 r_2 + 2efr_3 + f^2 r_4)],$$

$$\alpha_7 = g_2^2 + 2g_1 g_3 - 64(e^2 r_1 + 2efr_2 + f^2 r_3),$$

$$\alpha_8 = 2[g_1 g_2 - 32(2efr_1 + f^2 r_2)], \quad \alpha_9 = g_1^2 - 64f^2 r_1.$$

ЛИТЕРАТУРА

1. *Алони Г.Т.* Многополюсник.- Ереван: Изд-во АН АрмССР, 1965. - 468 с.
2. *Акопджанян Г.Д.* Определение величин и фаз э.д.с. генераторных станций //Сб. научн. трудов /ЕрПИ. - 1968. -Т. 24. -Вып. 1. - С. 201-207.
3. *Каранетян М.А., Акопджанян Г.Д.* Теоретические основы электротехники. Ереван: Луйс, 1986. - 567 с. (на арм. яз.)

ГИУА 10.X.1992