

ЭНЕРГЕТИКА

Л. Г. АГЕЖЯН

ОЦЕНКА ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ ТРЕХМАШИННОЙ  
 СХЕМЫ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ ПЕРЕДАЧУ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Одной из важнейших задач при исследовании режимов электроэнергетических систем (ЭЭС) является определение поведения ее элементов при авариях в системе и дальнейшей ее работе в послеаварийном режиме. Анализ динамической устойчивости ЭЭС без передачи постоянного тока (ПТТ) уже представляет собой сложную нелинейную задачу. С учетом ПТТ задача еще больше усложняется вследствие появления новых нелинейностей, связанных с режимом работы самой ПТТ.

В данной работе предлагается методика расчета и оценки динамической устойчивости ЭЭС с учетом ПТТ и разработанная на основе предлагаемого алгоритма программа, годная для использования на современных ЦВМ.

Для исследования динамической устойчивости ЭЭС, включающей ПТТ используется трехмашинная схема (рис. 1), которая состоит из трех станций (ЭС1, ЭС2, и ЭС3), двухцепной высоковольтной передачи переменного тока (ЛЭП), ПТТ и нагрузок  $H2$  и  $H3$ .

Схема замещения (рис. 2) составлена с учетом следующих допущений: а) электрические машины представляются э.д.с. за переходными реактансами; б) влияние регуляторов возбуждения и первичных двигателей не учитывается; в) активные сопротивления генераторов не учитываются.

Элементы схемы замещения (рис. 2) характеризуют:  $E_1, E_2, E_3$  — э. д. с. генераторов за переходными сопротивлениями;  $X_1, X_2, X_3$  — переходные реактансы соответствующих генераторов;  $Z_{12} = Z_{21} + jX_{12}$ ,  $Z_{23}, Z_{32}$  — комплексные сопротивления ЛЭП,  $H2$  и  $H3$ , соответственно;  $Y_{c1}$  — половина емкостей проводимости ЛЭП;  $Y_{c2}$  — проводимость компенсирующих устройств инвертора;  $Y_{c3}$  — сумма половины емкостной проводимости ЛЭП и компенсирующих устройств выпрямителя. Выпрямительная и инверторная подстанции, как и сама ПТТ, замещаются источниками тока  $I_B$  и  $I_H$ .

В качестве возмущения рассматривается трехфазное КЗ в начале ЛЭП переменного тока вблизи от шин генератора ЭС1. При этом ПТТ автоматически отключается от работы, т. к. напряжение на шинах

выпрямителя снижается до нуля. Через  $t = T_{\text{отс}}$  происходит отключение КЗ.

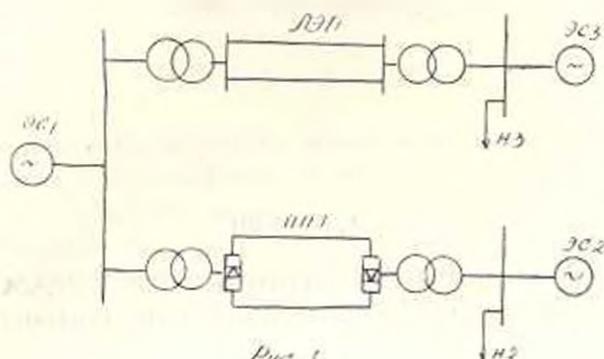


Рис. 1.

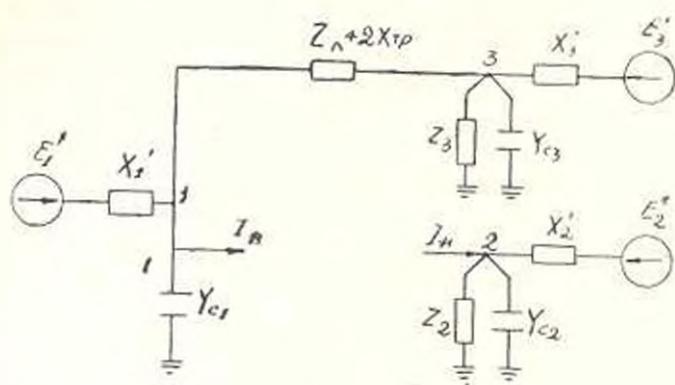


Рис. 2.

Для исследования переходных процессов требуется решить систему дифференциальных уравнений движения роторов генераторов:

$$\begin{cases} \frac{dS_m}{dt} = \frac{P_{\text{ом}} - P_{\text{эм}}}{T_{Jm}}; \\ S_m = \frac{d\theta_m}{dt}, \end{cases} \quad (1)$$

где  $S_m$ ,  $\theta_m$ ,  $P_{\text{ом}}$ ,  $P_{\text{эм}}$  — скольжение, абсолютный угол, механическая и электрическая мощности  $m$ -го генератора;  $T_{Jm}$  — соответствующая постоянная инерции.

Электрические мощности, входящие в (1), определяются как:

$$P_{21} = \frac{E_1 U_1}{X_1} \sin(\theta_1 - \varphi_1); \quad P_{22} = \frac{E_2 U_2}{X_2} \sin(\theta_2 - \varphi_2);$$

$$P_{33} = E_3^2 y_{33} \sin \alpha_{33} - U_1 E_3 y_{13} \sin(\varphi_1 - \theta_3 + \alpha_{13}),$$

где  $y_{13}$  — взаимная проводимость между узлами 1 и 3;  $y_{11}$  — собственная проводимость узла 3;  $\alpha_{13}$ ,  $\alpha_{33}$  — соответствующие дополнительные углы проводимостей.

Таким образом, для расчета новых электрических мощностей на каждом интервале времени необходимо знать значения напряжений и углов, которые можно определить из системы нелинейных алгебраических уравнений, составленных на основе баланса токов в узлах 1, 2 и 3:

$$\begin{cases} (\dot{E}_1 - U_1) Y_1 - U_1 Y_{c1} - (\dot{U}_1 - U_2) Y_2 - I_n = 0; \\ -U_2 (Y_{c2} + Y_2) + (\dot{E}_2 - U_2) Y_2 + I_n = 0; \\ (\dot{U}_1 - \dot{U}_2) Y_2 - U_2 (Y_{c3} + Y_3) + (\dot{E}_3 - U_2) Y_3 = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где

$$E_m = E_m \angle \theta_m; \quad U_m = U_m \angle \varphi_m; \quad m = 1, 2, 3;$$

$$I_n = K_1 I_d \angle \alpha_1; \quad I_n = K_1 I_d \angle \alpha_2; \quad Y = g - jb.$$

Исключив из первого и третьего уравнений  $\dot{U}_2$ , после выделения действительных и мнимых частей получим:

$$U_1 \cos \varphi_1 + K_1 C I_d \cos (\alpha_1 + \varphi_1) + d E_1 \cos (\theta_1 + \varphi_1) - b E_3 \cos (\theta_3 + \varphi_3) = 0; \quad (3)$$

$$U_1 \sin \varphi_1 + K_1 C I_d \sin (\alpha_1 + \varphi_1) - a E_1 \sin (\theta_1 + \varphi_1) - b E_3 \sin (\theta_3 + \varphi_3) = 0; \quad (4)$$

$$U_1 \cos \varphi_2 - K_1 g I_d \cos (\alpha_2 + \varphi_2) - d E_2 \cos (\theta_2 + \varphi_2) = 0; \quad (5)$$

$$K_1 \sin \varphi_2 - K_1 g I_d \sin (\alpha_2 + \varphi_2) - d E_2 \sin (\theta_2 + \varphi_2) = 0. \quad (6)$$

где  $d = d \angle \varphi_d$ ,  $b = b \angle \varphi_b$ ,  $C = C \angle \varphi_c$ ,  $a = a \angle \varphi_a$ ,  $g = g \angle \varphi_g$  — комплексные коэффициенты матрицы проводимостей, которые определяются следующим образом:

$$d = \frac{Y_1 (Y_3 + Y_2 + Y_{c3})}{(Y_1 + Y_2 + Y_{c1})(Y_3 + Y_2 + Y_{c3}) - Y_1^2};$$

$$b = \frac{Y_3 Y_1}{(Y_1 + Y_2 + Y_{c1})(Y_3 + Y_2 + Y_{c3}) - Y_1^2};$$

$$C = \frac{Y_3 + Y_2 + Y_{c3}}{(Y_1 + Y_2 + Y_{c1})(Y_3 + Y_2 + Y_{c3}) - Y_1^2};$$

$$a = \frac{Y_2}{Y_2 + Y_{c2}}; \quad g = \frac{1}{Y_2 + Y_{c2}};$$

$$Y_{c1} = Y_{c1} + Y_2; \quad Y_{c3} = Y_{c3} + Y_2.$$



Для собственно ППТ можно записать следующие уравнения:

$$Ud_B = K_1 U_1 \cos \alpha - K_2 X_B Id; \quad (7)$$

$$Ud_{II} = K_1 U_2 \cos \delta - K_2 X_{II} Id; \quad (8)$$

$$Ud_B - Ud_{II} = Rd Id; \quad (9)$$

$$Ud_B = K_1 U_1 \cos (\varphi_1 - \omega_1); \quad (10)$$

$$Ud_{II} = K_1 U_2 \cos (\varphi_2 - \omega_2); \quad (11)$$

$$K_1 = \frac{3 \sqrt{2}}{\pi}; \quad K_2 = \frac{3}{\pi}.$$

где  $\alpha$  — угол задержки выпрямителя;  $\delta$  — угол запаса инвертора;  $Rd$  — активное сопротивление ППТ;  $X_B$ ,  $X_{II}$  — сопротивления коммутации выпрямителя и инвертора.

Коэффициенты трансформации преобразовательных трансформаторов приняты равными единице и неизменными, т. к. переключение отпоек трансформаторов происходит за время порядка  $3\tau$  (на одно положение), что превышает длительность рассматриваемого переходного процесса. Исключив из (7)–(11) выпрямленные напряжения, получим:

$$K_1 U_1 \cos \alpha - K_2 X_B Id - K_1 U_1 \cos (\varphi_1 - \omega_1) = 0; \quad (12)$$

$$K_1 U_2 \cos \delta - K_2 X_{II} Id - K_1 U_2 \cos (\varphi_2 - \omega_2) = 0; \quad (13)$$

$$K_1 U_1 \cos \alpha - K_1 U_2 \cos \delta - (K_2 X_B - K_2 X_{II} + Rd) Id = 0. \quad (14)$$

Если КЗ вблизи шин выпрямителя, то  $\alpha = \alpha_{min} = \text{const}$ , и переменной является  $\delta$ , и наоборот, если КЗ вблизи шин инвертора, то  $\delta = \delta_{min} = \text{const}$  и переменной является  $\alpha$ . Следовательно, имеем 7 уравнений: (3)–(6), (12)–(14) и 7 неизвестных:  $U_1$ ,  $\varphi_1$ ,  $U_2$ ,  $\varphi_2$ ,  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\alpha$  или  $\delta$ , т. к. на каждом шаге расчетов углы  $\theta_1$ ,  $\theta_2$  и  $\theta_3$  считаются заданными и получаются из решения системы (1).

Решение системы дифференциальных уравнений (1) производится методом Кутты-Мерсона пятого порядка, в результате которого находятся значения углов роторов, а система уравнений (3)–(6), (12)–(14) — методом Ньютона—Рафсона, основным выражением которого является:

$$F(X^{(i)}) = -J(X^{(i)}) \Delta X^{(i+1)}, \quad (15)$$

где  $J$  — матрица Якоби,  $(i, j)$ -я элемент которой  $\partial f_i / \partial x_j$ .

Вектор поправок находится из (15):

$$\Delta X^{(i+1)} = -J(X^{(i)})^{-1} \cdot F(X^{(i)}).$$

Трехфазное КЗ моделировалось следующим образом:

$$P_{a1} = 0; \quad P_{a2} = 0; \quad P_{a3} = E_a^2 y_{a3} \sin \alpha_{a3}.$$

На основе вышеизложенной методики создана «Фортран» программа.

Оценку динамической устойчивости, проведенную согласно вышеизложенной методике, важно дополнить учетом фактора демпфирования, проявляющегося во время относительного движения роторов электрических машин, т. к. он может оказать значительное влияние на характер переходного процесса.

При малых изменениях скорости демпфирование приближенно можно учесть как [1]:

$$\Delta P_{d_i} = p d_i S_i$$

где  $P_{d_i}$  — демпферный коэффициент;  $S_i$  — скольжение.

С учетом демпфирования выражения для электрических мощностей будут:

$$P_{s1} = \frac{E_1 U_1}{X_1} \sin(\theta_1 - \varphi_1) + P_{d1} S_1;$$

$$P_{s2} = \frac{E_2 U_2}{X_2} \sin(\theta_2 - \varphi_2) + P_{d2} S_2;$$

$$P_{s3} = E_1^* y_{13} \sin \alpha_{23} - U_1 E_2^* y_{13} \sin(\varphi_1 - \theta_2 + \alpha_{13}) + P_{d3} S_3.$$

В остальном расчете производится согласно вышеприведенным выражениям.

Рассмотрим в качестве аварии несимметричные виды КЗ.

Из [2] известно, что ток несимметричного КЗ определяется как ток трехфазного КЗ, удаленного от точки замыкания на шунт КЗ  $Z_3^{(n)}$ :

$$\tilde{I}_{k_1}^{(n)} = \frac{\tilde{E}_2}{Z_{12} + Z_3^{(n)}}$$

где  $\tilde{I}_{k_1}^{(n)}$  — ток прямой последовательности несимметричного КЗ;  $Z_{12}$  — суммарное сопротивление прямой последовательности;  $Z_3^{(n)}$  — дополнительное сопротивление или, так называемый, шунт КЗ, определяемый в зависимости от его вида ( $n$ ).

Для разных видов КЗ шунт равен:  $Z_3^{(3)} = 0$  — трехфазное КЗ;

$Z_3^{(1,1)} = \frac{Z_{22} Z_{02}}{Z_{22} + Z_{02}}$  — двухфазное на землю;  $Z_3^{(2)} = Z_{22}$ ,  $Z_3^{(1)} = Z_{22} + Z_{02}$  —

двухфазное и однофазное КЗ, где  $Z_{02}$ ,  $Z_{22}$  — суммарные сопротивления нулевой и обратной последовательности системы относительно точки КЗ.

ППТ подсоединена к генераторным шинам I через преобразовательный трансформатор с соединением обмоток  $Y/\Delta$ , следовательно, точки нулевой последовательности замыкаются в треугольнике и  $Z_{0 \text{ ППТ}} = \infty$ .

Из [3] видно, что в пределах погрешности, допускаемой в инженерных расчетах, можно пренебречь токами и обратной последовательностью, т. е. принять, что  $Z_{2\text{ шунт}} = \infty$ . Таким образом, исключив ППТ из схемы в аварийном режиме, можно легко составить схему замещения для нулевой и обратной последовательностей и найти шунт КЗ.

Известно, что любой вид КЗ сопровождается снижением напряжения в его точке. При снижении напряжения на шинах выпрямителя до  $U=0,75-0,8$  отн. ед. ППТ автоматически выключается из работы. При этом система нелинейных алгебраических уравнений будет выглядеть следующим образом:

$$\begin{cases} U_1 \cos \varphi_1 - dE_1 \cos(\theta_1 + \psi_d) - bE_2 \cos(\theta_2 + \psi_d) = 0; \\ U_1 \sin \varphi_1 - dE_1 \sin(\theta_1 + \psi_d) - bE_2 \sin(\theta_2 + \psi_d) = 0; \\ U_2 \cos \varphi_2 - dE_1 \cos(\theta_2 + \psi_d) = 0; \\ U_2 \sin \varphi_2 - dE_2 \sin(\theta_2 + \psi_d) = 0. \end{cases}$$

Коэффициенты  $d$  и  $b$  должны рассчитываться с учетом шунта КЗ, включенного в точку КЗ параллельно с емкостью С.1.

В качестве примера проведен расчет динамической устойчивости при трехфазном КЗ для ЭЭС, представленной на рис. 1. По результатам расчета сделаны следующие выводы.

Форсировка тока ППТ является эффективным средством улучшения динамической устойчивости ЭЭС с учетом ППТ. Кратность форсировки и время ее должны выбираться в каждом конкретном случае. Однако, расчеты показывают, что значения порядка  $K_f = 1,5 - 2$  и  $t_d = 0,2 - 0,25$  с приводят к сохранению динамической устойчивости ЭЭС.

Լ Պ ԱՂՅՈՒՆ

ՆՌԱՄԵՔԵՆԱՅԱԿԱՆ ՍԽԵՄԱՅԻ ԳԻՆԱՄԻԿԱԿԱՆ ԿԱՅՈՒՆՈՒՓՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ՀԱՍՏԱՏՈՒՄ, ՀՈՍԱՆՔԻ ԱՌԿԱՅՈՒՓՅԱՆ ԳԵՊՔՈՒՄ

Ա մ փ ո փ ո ս ը մ

Էլեկտրաէներգետիկ համակարգերի ուժիմների ուսումնասիրության կարևորագույն խնդիրներից մեկն է հանդիսանում դինամիկ կայունության հետազոտությունը: Հաստատուն հոսանքի հաղորդման (ՀՀՀ) առկայությունը խնդիրն ավելի է բարդացնում:

Գիֆիրենցիալ հավասարումների համակարգը լուծվում է կուտու-Մերսոնի հինգերորդ կարգի եղանակով, իսկ ոչ դժային հանրահաշվական հավասարումների համակարգը՝ նյուտոն-Ռաֆսոնի եղանակով:

Մշակված է էլեկտրաէներգետիկ համակարգերի դինամիկ կայունության հաշվարկման եղանակ ՀՀՀ անկայունության դեպքում, ինչպես հոաֆագ, այնպես էլ անհամաչափ կարճ միացումների դեպքերում:

Առաջարկված ալգորիթմի հիման վրա կազմված է «Ֆորարան» ծրագիր:

#### Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Ծеников Б. А. Переходные электромеханические процессы в электрических системах. — М.: Высшая школа, 1978. — 115 с.
2. Ульянов С. А. Электromагнитные переходные процессы в электрических системах. — М. Энергия, 1970. — 511 с.
3. Кузнецов Ю. П. К вопросу о размещении мощных преобразователей электропередачи постоянного тока при упрощенных расчетах несимметричных коротких замыканий. — В сб. Труды МЭИ, вып. 307, 1976, с. 104—108.