

ЭНЕРГЕТИКА

Г. Т. АДОНИ, П. А. МАТЕВОСЯН, С. Г. АКОПЯН

ИССЛЕДОВАНИЕ ФОРМУЛЫ РОТОРНОГО УГЛА СИНХРОННОЙ
МАШИНЫ В РЕЖИМЕ ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО
ЗАМЫКАНИЯ С ПОМОЩЬЮ ЦИФРОВОЙ МАШИНЫ

В работах [1, 2, 3, 4, 5 и др.] приводится ряд формул угла θ между продольной осью ротора и синхронно вращающейся осью синхронной машины для ряда режимов ее работы. Эти формулы были получены с различными допущениями, которые как показывают исследования, оказывается обоснованными не для всех типов синхронных машин. В данной статье приводятся результаты исследований точности, с иллюстрацией на конкретных примерах, формулы роторного угла θ синхронной машины для режима ее трехфазного короткого замыкания. В качестве критерия точности расчетов принимается решение, полученное на цифровой машине (ЦМ), электромеханического уравнения синхронной машины с учетом уравнений ее пяти контуров [6]. В основу исследования положены следующие дифференциальные уравнения синхронной машины.

$$\frac{d\psi_d}{dt} + \psi_d - r_d u_d = 0, \quad \psi_d = u_d + u_r + u_D,$$

$$\frac{d\psi_q}{dt} - \psi_q + r_q u_q = 0, \quad \psi_q = u_q + u_Q,$$

$$\psi_r = r_d u_d + u_r + g_d u_D, \quad (1)$$

$$\frac{d\psi_r}{dt} + r_r u_r = r_r e_r, \quad \psi_D = r_d u_d + g_d u_r + u_D,$$

$$\frac{d\psi_D}{dt} + r_D u_D = 0, \quad \psi_Q = r_q u_q + u_Q,$$

$$\frac{d\psi_Q}{dt} + r_Q u_Q = 0,$$

$$M_1 C \frac{d^2 \psi_d}{dt^2} = M_m - M_e,$$

$$M_e = \frac{1}{x_d} (u_d + u_r + u_D) u_q - \frac{1}{x_q} (u_q + u_Q) u_d. \quad (1)$$

В уравнениях (1) вместо индексов rd и rq , принимаемых в [6], введены соответственно индексы D и Q .

Уравнение M_e с учетом u_k ($k = d, q, r, D, Q$), приведенных в [6], после ряда преобразований имеет следующий вид:

$$\begin{aligned} M_e = M_{em} + (A_s + B_s \varepsilon^{-pD^2} + C_s \varepsilon^{-pQ^2} + D_s \varepsilon^{-p_r^2}) \varepsilon^{\beta z} \sin \tau + \\ + (A_r + B_r \varepsilon^{-pD^2} + C_r \varepsilon^{-pQ^2} + D_r \varepsilon^{-p_r^2}) \varepsilon^{\beta z} \cos \tau + \\ + G_s \varepsilon^{2\beta z} \sin 2\tau + G_r \varepsilon^{-pQ^2} \cos 2\tau + h \varepsilon^{2\beta z}. \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$M_{em} = \frac{e_s}{x_d} \left[\frac{e_r}{x_d} + \frac{(u_{em} + e_s)}{x_d \omega_d} \varepsilon^{-p_r^2} + \frac{u_{em} + e_s - \varphi_d(u_{q0} - \varphi_d e_r)}{x_d} S_d \varepsilon^{-pD^2} \right] r.$$

Выражения коэффициентов A_s, B_s и других, а так же принятые обозначения в (1) и (2) приведены в приложении. После двукратного интегрирования по синхронному времени уравнения

$$\frac{d^2 \theta}{dt^2} = \frac{1}{\omega_s C} (M_m - M_e), \quad (3)$$

с учетом выражения момента M_e (2), пренебрегая слагаемыми второго порядка малости и ряда преобразований получим следующую формулу угла θ

$$\begin{aligned} \theta_s = \frac{M_m - a}{2\omega_s C} z - \frac{1}{\omega_s C} \left\{ \frac{b}{2pD^2} (\varepsilon^{-pD^2} + pD^2 - 1) + \frac{d}{2p_r^2} (\varepsilon^{-p_r^2} + \right. \\ \left. + p_r^2 - 1) + \frac{h}{4\beta^2} (\varepsilon^{2\beta z} - 2\beta z - 1) + A_s (\tau - \varepsilon^{\beta z} \sin \tau) - \right. \\ \left. - A_r (\beta z + 1 - \varepsilon^{\beta z} \cos \tau) + \frac{B_s - B_r (\beta - \varphi_d)}{1 - (\beta - \varphi_d)^2} + \right. \\ \left. + D_s (\tau - \varepsilon^{\beta z}) \sin \tau + D_r (1 - \varepsilon^{(\beta - \varphi_d)\tau} \cos \tau) - \right. \\ \left. - \frac{G_s}{4} (1 - \varepsilon^{2\beta z}) \cos 2\tau + \frac{1}{2} (G_s - G_r \beta) z \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Следует отметить, что выражения u_k соответствуют крупным машинам, для которых обычно величины $\varphi_d, \varphi_q, \varphi_r$ принимают пренебрежимо малыми.

В работе [2] аперриодическая составляющая момента M_e выведена исходя из предположения, что искомая составляющая момента пропорциональна потерям в меди статора синхронной машины от основной гармоники продольной составляющей тока, т. е. формула аперриодического момента M_{em} была получена исходя из условия

$$M_{em} = i_{ad} \cdot r \quad i_{ad} = (). \quad (5)$$

Для получения выражения аперриодической составляющей продольной составляющей тока статора, выделим в формуле u_d [1] аперриодиче-

ское слагаемое u_{da} и полученное выражение разделим на x_d . В результате получим:

$$i_a = - \left| \frac{e_r}{x_d} + \frac{(u_{d0} + e_r) \dot{\gamma}_d}{x_d \dot{\gamma}_d} \varepsilon^{-\dot{\gamma}_r} + \frac{e_r + u_{d0} + \dot{\gamma}_D (u_{d0} - \dot{\gamma}_d e_r)}{x_d} S_d \varepsilon^{-\dot{\gamma}_D} \right| \quad (6)$$

Тогда согласно формуле (5) имеем:

$$M_{ca} = \left| \frac{e_r}{x_d} + \frac{(u_{d0} + e_r) \dot{\gamma}_d}{x_d \dot{\gamma}_d} \varepsilon^{-\dot{\gamma}_r} + \frac{e_r + u_{d0} + \dot{\gamma}_D (u_{d0} - \dot{\gamma}_d e_r)}{x_d} S_d \varepsilon^{-\dot{\gamma}_D} \right|^2 r. \quad (7)$$

С учетом выражения (7) формулу угла θ синхронной машины представим так:

$$\begin{aligned} \theta_s = & \frac{M_m - a}{2\omega_s C} \varepsilon^{-\dot{\gamma}_r} - \frac{1}{\omega_s C} \left| \frac{\dot{\gamma}_D}{\dot{\gamma}_D} (\varepsilon^{-\dot{\gamma}_D} + \dot{\gamma}_D \varepsilon^{-1}) + \right. \\ & + \frac{c}{4\dot{\gamma}_D^2} (\varepsilon^{-\dot{\gamma}_D} + 2\dot{\gamma}_D \varepsilon^{-1}) + \frac{d}{\dot{\gamma}_r^2} (\varepsilon^{-\dot{\gamma}_r} + \dot{\gamma}_r \varepsilon^{-1}) + \\ & + \frac{f}{4\dot{\gamma}_r^2} (\varepsilon^{-2\dot{\gamma}_r} + 2\dot{\gamma}_r \varepsilon^{-1}) + \frac{g}{(\dot{\gamma}_r + \dot{\gamma}_D)^2} [\varepsilon^{-(\dot{\gamma}_r + \dot{\gamma}_D)} + \\ & + (\dot{\gamma}_r + \dot{\gamma}_D) \varepsilon^{-1}] + \frac{h}{4\dot{\gamma}_D^2} (\varepsilon^{-2\dot{\gamma}_D} - 2\dot{\gamma}_D \varepsilon^{-1}) + A_1 (\varepsilon^{-\dot{\gamma}_D} \sin \tau) - \\ & - A_1 (\dot{\gamma}_D + 1 - \varepsilon^{\dot{\gamma}_D} \cos \tau) + \frac{B_s - B_c (\dot{\gamma}_D - \dot{\gamma}_D)}{1 + (\dot{\gamma}_D - \dot{\gamma}_D)^2} \tau + D_1 (\tau - \\ & - \varepsilon^{(\dot{\gamma}_D - \dot{\gamma}_D)} \sin \tau) + D_2 (1 - \varepsilon^{(\dot{\gamma}_D - \dot{\gamma}_D)} \cos \tau) + \\ & + \frac{G_c}{4} (1 - \varepsilon^{\dot{\gamma}_D} \cos 2\tau) + \frac{1}{2} (G_1 - G_c \dot{\gamma}_D) \tau \Big| \end{aligned} \quad (8)$$

Обоснование и вывод формулы (8) приведены в [5]. Ниже рассматриваются примеры аналитического расчета угла θ , по приведенным формулам (4) и (8), которые сопоставляются с расчетом этого угла при решении уравнений (1) на ЦМ для случая двух синхронных машин различной мощности, параметры которых и начальные значения переменных приводятся в таблицах 1 и 2 работы авторов [5].

Расчеты выполнены при двух различных режимах $P=1$ и $P=\frac{2}{3}$ для обеих исследуемых машин. На рис. 1 приведены кривые изменения углов θ_1 , θ_2 , полученные для режима $P=1$, а на рис. 2 для режима $P=\frac{2}{3}$. Пунктирные кривые соответствуют „большой“

синхронной машине (мощность 40 *т.квт*), а сплошные кривые — „малой“ синхронной машине мощностью 0,3 *т.квт*. На этих же рисун-

* Под понятием „большая“ синхронная машина, условно, имеется в виду синхронный генератор, у которого $r < 0,008$, а под понятием „малая“ синхронная машина, имеется в виду синхронный генератор, у которого $r > 0,02$.

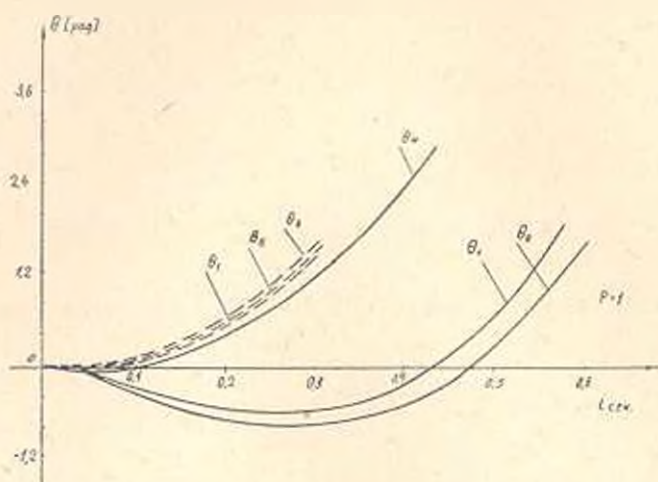


Рис. 1. Изменение роторного угла θ в режиме $P=1$ (отн. ед.) для большой (пунктирные кривые) и для малой (сплошные кривые) синхронных машин.

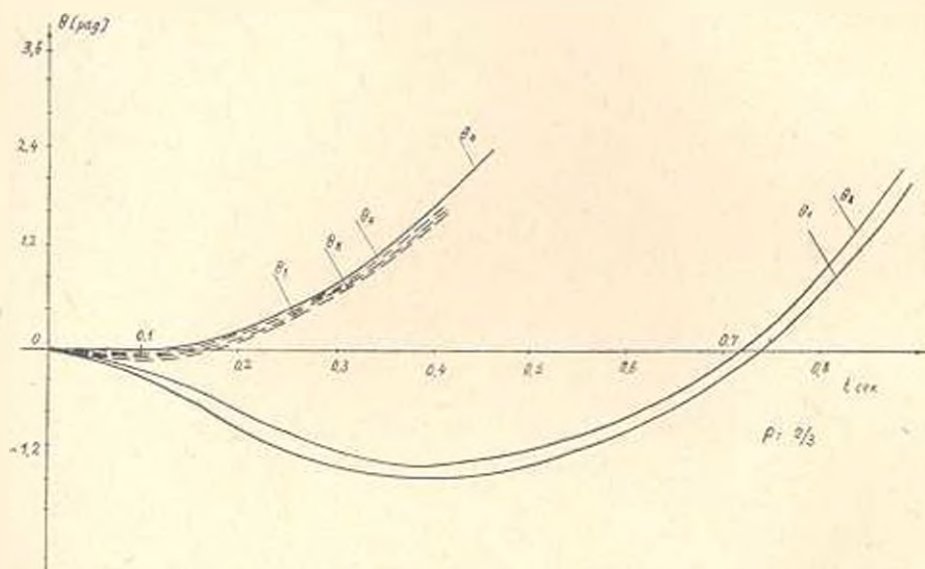


Рис. 2. Изменение роторного угла θ в режиме $P=\frac{2}{3}$ (отн. ед.) для большой (пунктирные кривые) и для малой (сплошные кривые) синхронных машин.

ках приводятся кривые изменения угла θ , построенные по результатам решения уравнений (1) на ЦМ типа „Раздан-2“.

Из анализа полученных результатов можно сделать следующее заключение. Для больших синхронных машин результаты расчета по (4) и (8) находятся в пределах точности решения исходных уравнений (1) на ЦМ. Для малых синхронных машин результаты расчета по (4) несколько отличаются от решения θ_1 , полученного из решения

уравнений (1) на ЦМ, в то время, как результаты расчета по формуле (8) находятся в пределах точности решения уравнений (1).

АрхивИЭ

Поступило 16.II 1966

П Р И Л О Ж Е Н И Е

u_d, u_q — переменные, пропорциональные продольному и поперечному току статора;

u_r, u_D, u_Q — э. д. с., индуцируемые в фазах статора токами обмотки возбуждения, продольной и поперечной демпферной обмоток;

e_r — приложенная э. д. с. в контуре возбуждения;

ρ_d, ρ_q — коэффициенты рассеяния энергии контуров статора;

ρ_{d1}, ρ_{q1} — коэффициенты магнитной связи контуров статора с контуром возбуждения, продольным демпферным и поперечным демпферным контурами;

β_d, β_q — продольная и поперечная составляющие потокосцепления статора;

$\beta_r, \beta_D, \beta_Q$ — потокосцепление контура возбуждения, продольного и поперечного демпферных контуров;

$\beta_{d1} = \sqrt{\frac{\rho_{d1}\rho_q}{\rho_d}}$; $\beta_{q1} = \sqrt{\frac{\rho_{q1}\rho_d}{\rho_q}}$ — магнитные характеристики продольных контуров машины;

ρ_{d1} — коэффициент магнитной связи контура возбуждения и продольного демпферного контура;

$\tau = \omega_s t$ — синхронное время;

ω_s — синхронная угловая частота машины;

M_m — момент внешних сил, приложенных к ротору;

C — инерционная постоянная;

P — активная мощность генератора;

e_s — фазовое напряжение на шинах генератора;

ρ_r, ρ_d, ρ_q — коэффициент рассеяния энергии контуров статора и ротора;

ρ_r, ρ_D, ρ_Q — приведенные коэффициенты рассеяния энергии контуров ротора;

β — действительная часть комплексного корня характеристического уравнения;

x_d, x_q — синхронные реактивности машины в продольной и поперечной осях;

r — активное сопротивление фаз статора;

i_{d0}, i_{q0} — апериодические слагающие продольного и поперечного тока статора.

$$\begin{aligned}
 A &= \frac{e_r}{x_d} (u_{q0} + e_r) - \frac{\gamma_d e_r}{x_d} (u_{q0} - \gamma_d e_r) + \\
 &+ \frac{\gamma_d e_r}{x_d} \left[\left(\frac{1}{x_d} + S_d \right) (u_{q0} - \gamma_d e_r) + \gamma_D S_d (u_{q0} + e_r) \right]; \\
 B_s &= \frac{S_d}{x_d} (u_{d0} + e_r) [u_{d0} + e_r - \gamma_D (u_{q0} - \gamma_d e_r)]; \\
 C_s &= \frac{S_d}{x_d} [(u_{q0} - \gamma_d e_r)^2 + \gamma_D (u_{d0} + e_r)(u_{q0} - \gamma_d e_r)]; \\
 G_s &= \frac{1}{2} \left\{ (u_{q0} + e_r)^2 - (u_{q0} - \gamma_d e_r)^2 \left(\frac{1 + S_d}{x_d} - \frac{1}{x_d} - S_d \right) - \right. \\
 &- 2 (u_{q0} + e_r)(u_{q0} - \gamma_d e_r) \left(\frac{S_d \gamma_D}{x_d} - \frac{\gamma_D S_d}{x_d} \right) \Big\}; \\
 A_c &= -\frac{e_r}{x_d} (u_{q0} - \gamma_d e_r) + \frac{\gamma_d e_r}{x_d} (u_{d0} + e_r) + \\
 &+ \frac{\gamma_d e_r}{x_d} \left[\gamma_D S_d (u_{q0} - \gamma_d e_r) - \left(\frac{1}{x_d} + S_d \right) (u_{d0} + e_r) \right]; \\
 B_c &= \frac{S_d}{x_d} (u_{q0} - \gamma_d e_r) [u_{d0} + e_r - \gamma_D (u_{q0} - \gamma_d e_r)]; \\
 C_c &= -\frac{S_d}{x_q} (u_{d0} + e_r) [(u_{d0} + e_r) \gamma_D + u_{q0} - \gamma_d e_r]; \\
 D_c &= \frac{\gamma_d}{x_d \gamma_d} (u_{d0} + e_r)(u_{q0} - \gamma_d e_r); \\
 h &= \frac{1}{2} e_r^2 \left(\frac{S_d \gamma_D}{x_q} + \frac{S_d \gamma_D}{x_d} \right); \\
 e_s^2 &= (u_{d0} + e_r)^2 - (u_{q0} - \gamma_d e_r)^2; \\
 a &= \frac{\gamma_d}{x_d} e_r^2; \\
 b &= \frac{2\gamma_d S_d}{x_d} e_r [u_{d0} + e_r - \gamma_D (u_{q0} - \gamma_d e_r)]; \\
 c &= \frac{\gamma_d S_d^2}{x_d} [u_{d0} + e_r - \gamma_D (u_{q0} - \gamma_d e_r)]; \\
 d &= \frac{2\gamma_d \gamma_d}{x_d \gamma_d} (u_{d0} + e_r) e_r;
 \end{aligned}$$

$$f = \frac{2e_d x_d}{x_d x_d} (u_{d0} + e_r)^2;$$

$$g = \frac{2e_d S_d u_d}{x_d x_d} e_r |u_{d0} + e_r - \dot{\varphi}_D(u_{d0} - e_d e_r)|.$$

Ն. Տ. ԱԳՈՆՅ, Պ. Ա. ԿԱՐԵՎՈՅԱՆ, Խ. Հ. ՀԱՊՈՔՅԱՆ

ՍԻՆԽՐՈՆ ՄԵՔԵՆԱՅԻ ԹՈՏՈՐԻ ԱՆԿՅԱՆ ՀԱՐՄՈՒՎԱՅԻ
ՌԵՍՈՆԱՆՍԱՆՏԻՐՈՒԹՅՈՒՆԸ ԵՌԱՅԱԶ ԿԱՐՃ ԿՐԱՏՄԱՆ ՈՆԺԻՄՈՒՄ
ԷԼԵՄԵՆՏԱՅԻՆ ՀԱՇՎԻԶ ՄԵՔԵՆԱՅԻ ՕՒՆԱԹՅԱՄԲ

Ա Մ Փ Ա Փ Ո Ւ Մ

Հաղվածում կոնկրետ օրինակների վրա բերված է սինխրոն մեքենայի ոտտորի անկյան ֆորմուլայի ճշգրտության ուսումնասիրությունը:

Բերված երկու ֆորմուլաների անսխառիկ հաշվման արդյունքները համեմատվում են էլեկտրոնային հաշվիչ մեքենայի վրա այդ նույն անկյան հաշվման արդյունքների հետ: Ընդ որում սինխրոն մեքենայի էլեկտրամեխանիկական հավասարումը էլեկտրոնային հաշվիչ մեքենայի վրա լուծելիս հաշվի է առնված նրա հինգ կոնտուրների ադրեցությունը:

Ուսումնասիրության արդյունքներից ելնելով առաջարկված են սինխրոն մեքենայի ոտտորի անկյան ֆորմուլայի բնութման պայմանները:

Л И Т Е Р А Т У Р А

1. Вазнов А. И. Основы теории переходных процессов синхронных машин, М., 1960.
2. Вазнов А. И. Движение ротора синхронного генератора при внезапном коротком замыкании. Тр. ЛПИ, 1958, № 195.
3. Кизовский Я. И. Энергетические соотношения при внезапном коротком замыкании синхронной машины, журн. "Электричество", № 7, 1954.
4. Мамиконянц Л. Г. Электромагнитный момент вращения синхронных машин при включении их в сеть с помощью самосинхронизации, журн. "Электричество" № 8, 1954.
5. Адоиц Г. Т., Матвеевич П. А., Акопин С. Г. Влияние активного сопротивления и переходных процессов в обмотке статора на изменение роторного угла синхронной машины, журн. "Электричество", № 1, 1965.
6. Горев А. А. Переходные процессы синхронной машины, М., 1950.