

Маргарита Владимировна АРУЮЯН

Сергей Сумбагович БЕКРУЛЯН

Ереванский политехнический институт

АРМЕНИЯ

#### ФОРМУЛА ВНЕЗАПНОГО ТРЕХФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Резюме. Величина тока внезапного трехфазного короткого замыкания асинхронизированного синхронного генератора зависит от начальной фазы ЭДС и от скольжения. Выведенные формулы тока (6) позволяют рассчитать фазы ЭДС и скольжение при которых получается наибольший ток короткого замыкания.

#### EQUATION OF TRANSIENT SHORT-CIRCUIT CURRENT OF THREE-PHASE SYNCHRONOUS GENERATOR WORKING IN ASYNCHRONOUS STATE

Summary. The paper presents the mathematical model of a synchronous generator working in asynchronous state. Based on this model equation (6) describing the transient run of three-phase short-circuit current was derived. The equation shows that the current surge depends on both the voltage phase at the time of short-circuiting and on the slip. We can determine the voltage phase and the slip which yield the greatest value of the current surge. If the slip is equal to zero, equation (6) is simplified into formula (7) describing the transient short-circuit current of three-phase synchronous generator.

#### РÓВНЯНИЕ НЕУСТАЛОНЕГО ПРÁДУ ЗВАРЦА ТРÓИФАЗОВЕГО ГЕНЕРАТОРА СИНХРОНИЧНЕГО АСИНХРОНИЗОВАНЕГО

Streszczenie. W artykule przedstawiono model matematyczny generatora synchronicznego asynchronizowanego. na podstawie którego wyprowadzono równanie (6) opisujące przebieg nieustalony prądu zwarcia 3-fazowego. Z równania tego wynika, że wartość udarowa prądu zależy nie tylko od fazy napięcia w chwili zwarcia, lecz także od poślizgu. Opierając się na równaniu (6) można określić zarówno fazę napięcia, jak i poślizg, przy których uzyskuje się największą wartość udarową prądu zwarcia. Przy poślizgu równym zero równanie upraszcza się do zależności (7) opisującej nieustalony prąd zwarcia 3-fazowego generatora synchronicznego.

В течение ряда лет на кафедре "Электромеханика" Ереванского политехнического института проводятся исследовательские и конструкторские работы в области асинхронизированных синхронных генераторов (АСГ), работающих в автономных системах электроснабжения.

Проведенные исследования позволили разработать конструкцию АСГ мощностью в 50 кВт, который в настоящее время находится на стадии изготовления.

Для оценки технического уровня спроектированного генератора и уточнения характеристик и методики проектирования предполагается провести обширные экспериментальные исследования по специально составленной программе.

Разработанные до настоящего времени асинхронизированные генераторы предназначались для параллельной работы в мощных энергосистемах и поэтому проведенные применительно к ним теоретические исследования зачастую исключали вопросы актуальные для генераторов маломощных автономных систем.

Рассмотрение показало, что к таким вопросам относятся режимы короткого замыкания КЗ в АСГ.

В данной статье приводится вывод формулы тока якоря внезапного трехфазного КЗ асинхронизированного генератора.

Проведенный анализ показал, что для решения данной задачи целесообразно использовать векторные уравнения АСГ (записанные в виде приращений) для синхронной системы координат и в относительных единицах.

Такая исходная система уравнений имеет вид:

$$\begin{cases} -\dot{U}_1 = R_1 \dot{I}_1 + d\dot{\Psi}_1/dt + j(\omega_p - S)\dot{\Psi} \\ \dot{U}_f = R_f \dot{I}_f + d\dot{\Psi}_f/dt - jS\dot{\Psi}_f \\ \dot{\Psi}_1 = X_{11} \dot{I}_1 + X_{1f} \dot{I}_f \\ \dot{\Psi}_f = X_{f1} \dot{I}_1 + X_{ff} \dot{I}_f \end{cases} \quad (1)$$

Здесь:  $\dot{U}_1, \dot{I}_1, \dot{\Psi}_1$  — приращения напряжения, тока и потокоцепления обмотки якоря;  $\dot{U}_f, \dot{I}_f, \dot{\Psi}_f$  — то же для обмотки возбуждения;  $R_1, R_f$  — активные сопротивления фаз обмоток якоря и возбуждения;  $X_{11}, X_{f1}$  — индуктивные сопротивления якоря и индуктора (статора и ротора);  $X_{1f}$  — сопротивление взаимной индукции;  $\omega_p$  — угловая частота вращения индуктора;  $S = (\omega_p - \omega_1)/\omega_1$  — скольжение, причем  $\omega_1$  — частота напряжения якоря (в относительных единицах  $\omega_1 = 1$ ).

Вывод формулы для тока КЗ производится при следующих условиях:

1. Короткое замыкание наступает в след за режимом холостого хода;
2. Во время переходного процесса величины цепи возбуждения (индуктора) не регулируются;
3. В течение переходного процесса частота вращения индуктора остается неизменной ( $\omega_p = \text{const}$ ).

Очевидно, при этих условиях система уравнений (1)-линейна и её решение возможно операторным методом.

Уравнения КЗ в операторной форме записи для АСТ имеют вид:

$$\begin{aligned} U^{xx} &= R_1 I_1(p) + p\Psi_1(p) + j(\omega_p - S)\Psi_1(p) \\ 0 &= R_f I_f(p) + p\Psi_f(p) - jS\Psi_f(p) \\ \Psi_1(p) &= X_{11} I_1(p) + X_{1f} I_f(p) \\ \Psi_f(p) &= X_{f1} I_1(p) + X_{ff} I_f(p) \end{aligned} \quad (2)$$

Совместным решением (2) получаем:

$$I_1(p) = \frac{U^{xx}}{R_1 + (p+j)X_{11} \frac{\alpha'_f + (p-jS)}{\alpha_f + (p-jS)}} \quad (3)$$

Здесь:  $U^{xx}$  -напряжение предшествующего холостого хода;

$\delta = 1 - X_{1f}^2 / X_{11} X_{ff}$  -коэффициент рассеяния контуров;

$\alpha_f = 1/T_f = R_f / X_{ff}$  -декремент затухания обмотки возбуждения;

$\alpha'_f = 1/\delta T_f = R_f / \delta X_{ff}$  - переходный декремент затухания обмотки возбуждения.

Для определения оригинала тока  $I_1(p)$  необходимо определение корней знаменателя (3). Последний можно упростить, приняв  $R_1 = 0$ . Тогда корни знаменателя (3) составят:

$$p_{1ч} = -j \quad ; \quad p_2 = -\alpha'_f + jS.$$

Итак, ток якоря содержит три составляющие: установившуюся, получаемую подстановкой в (3) корня  $p = 0$  и две свободные, соответствующие корням  $p_1$  и  $p_2$ . Частота установившегося тока равна нулю в синхронной системе координат и единице - в неподвижных координатах  $a, b, c$ .

Корню  $p_1 = -j$  соответствует аperiodический ток якоря. Вследствие принятого допущения об  $R_1 = 0$  в этом корне отсутствует вещественная часть, из-за чего аperiodический ток представляется незатухающим. Для учета затухания полученное выражение аperiodического тока следует умножить на величину  $e^{-t/T_a}$ , где  $T_a$  — постоянная времени аperiodического тока якоря. Частота аperiodического тока равна  $\omega_1 = 1$  в синхронных координатах и нулю — в неподвижной системе координат  $a, b, c$ .

Корню  $p_2$  соответствует свободный ток индуктора. Этот ток вызывает в обмотке якоря ЭДС и ток частоты скольжения (в синхронных координатах). В неподвижной системе координат  $a, b, c$  частота тока якоря равна частоте вращения индуктора.

Как видно, все три составляющие тока КЗ имеют разные частоты. В конечном счете, выражение для оригинала тока КЗ в синхронных осях (в комплексной форме записи) имеет вид:

$$\begin{aligned}
 i_K(t) = & \frac{U_1}{X_1 \sigma} \frac{S(\alpha_f' - \alpha_f) + j(\alpha_f' \alpha_f + S^2)}{S^2 + \alpha_f'^2} + \\
 & + \frac{U_1}{X_1 \sigma} \frac{(1+S)(\alpha_f - \alpha_f') + j[B(1+S)^2 + \alpha_f' \alpha_f]}{(1+S)^2 + \alpha_f'^2} e^{-(j + \frac{1}{T_a})t} \\
 & + \frac{U_1}{X_1 \sigma} \frac{(\alpha_f' - \alpha_f)[(1+S)S - j\alpha_f'(1+2S)]}{\alpha_f'^2(1+2S)^2 + S^2(1+S)^2} e^{(-\alpha_f' + jS)t}
 \end{aligned} \quad (4)$$

В системе координат  $a, b, c$  это же выражение имеет вид:

$$\begin{aligned}
 i_K(t) = & \frac{U_1}{X_1 \sigma} (A_1 + jB_1) \cos(t + \alpha_0) + \\
 & + (A_2 + jB_2) \cos \alpha_0 \cdot e^{-t/T_a} + \\
 & + (A_3 + jB_3) \cos[(1+S)t + \alpha_0] e^{-t/T_f \sigma}
 \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\alpha_0$  — начальная фаза ЭДС;  $A_1, A_2, A_3, B_1, B_2, B_3$  — действительная и мнимая части выражений в (4):

$$\begin{aligned}
 A_1 &= S(\alpha_f' - \alpha_f) / (S^2 + \alpha_f'^2); & A_2 &= (1+S)(\alpha_f' - \alpha_f) / [(1+S)^2 + \alpha_f'^2]; \\
 B_1 &= (\alpha_f' \alpha_f + S^2) / (S^2 + \alpha_f'^2); & B_2 &= [(1+S)^2 + \alpha_f' \alpha_f] / [(1+S)^2 + \alpha_f'^2];
 \end{aligned}$$

$$A_3 = (\alpha'_f - \alpha_f)S(1+S)/[\alpha_f'^2(1+2S)^2 + S^2(1+S)^2];$$

$$B_3 = -\alpha'_f(\alpha'_f - \alpha_f)(1+2S)/[\alpha_f'^2(1+2S)^2 + S^2(1+S)^2].$$

Для определения мгновенных значений токов выражение (5) целесообразно представить в виде:

$$I_K(t) = \frac{U_1}{X_1 \sigma} \left\{ I_{sm} \cos(t + \alpha_o + \alpha_s + T) + \right. \\ \left. + I_{am} \cos(\alpha_o + \alpha_a) e^{-t/T_a} + \right. \\ \left. + I_{Rm} \cos[(1+S)\alpha_o + \alpha_R] e^{-t/T_f \sigma} \right\} = \\ = I_{in}(t) + I_{ian}(t) + I_{Ran}(t), \quad (6)$$

где:

$$I_{sm} = \sqrt{A_1^2 + B_1^2} \quad \alpha_s = \arctg(B_1/A_1);$$

$$I_{am} = \sqrt{A_2^2 + B_2^2} \quad \alpha_a = \arctg(B_2/A_2);$$

$$I_{Rm} = \sqrt{A_3^2 + B_3^2} \quad \alpha_R = \arctg(B_3/A_3)$$

$I_{in}(t)$ ,  $I_{ian}(t)$  - периодическая и аperiodическая составляющие тока КЗ якоря;

$I_{Ran}(t)$  - аperiodическая составляющая тока индуктора.

Представляет интерес рассмотрение вышеприведенных выражений для синхронного режима ( $S = 0$ ). Так, применительно к форме (4), соответствующая запись (после некоторых преобразований и пренебрежения малыми членами) имеет вид:

$$I_K(t)|_{S=0} = -j \frac{U_1}{X_1} + j \frac{U_1}{X_1 \sigma} e^{-(j + \frac{1}{T_a})t} - \\ - j \left( \frac{U_1}{X_1 \sigma} - \frac{U_1}{X_1} \right) e^{-\alpha_f t} \quad (7)$$

Как видно, выражение (7) совпадает с известной формулой тока внезапного КЗ синхронного генератора [2].

### Заключение

1. Показано, что величина тока внезапного КЗ в АСТ зависит не только от начальной фазы ЭДС  $\alpha_0$ , как это имеет место в синхронном генераторе, но и от величины скольжения;
2. Качественный анализ полученных выражений показал их применимость для всего диапазона скольжений, в том числе и для синхронного режима, когда формула вырождается в известное выражение КЗ синхронного генератора (без демпферных обмоток);
3. Формулы позволяют рассчитывать значения тока КЗ в АСТ для разных уровней начальной фазы ЭДС  $\alpha_0$  и скольжения, найти при этом наибольший (ударный) ток КЗ и тем самым - уточнить условия проведения опыта внезапного КЗ.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Шакарян Ю. Г.: Асинхронизированные синхронные машины. Энергоатомиздат, 1984 г., 192 с.
2. Сипайлов Г. А., Кононенко Е. В., Хорьков К. А.: Электрические машины. Спец. курс. Высшая школа, 1987 г., 287 с.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Tadeusz Glinka

Wpłynęło do Redakcji dnia 23 marca 1992 r.