

## ПАРАМЕТРЫ ЭКВИВАЛЕНТНЫХ РОТОРНЫХ ОБМОТОК СИНХРОННЫХ РЕАКТИВНЫХ МАШИН

Е. В. КОНОНЕНКО

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин и общей электротехники)

Для упрощения аналитических исследований пусковых и переходных процессов реальные роторные обмотки по продольной и поперечной осям синхронных реактивных машин заменяются двумя эквивалентными обмотками [1]. Для того, чтобы такая замена была возможной, необходимо найти способ определения параметров эквивалентных обмоток через параметры реальных обмоток ротора.

При проектировании и расчете различных режимов работы синхронных машин, для определения параметров эквивалентных демпферных обмоток обычно пользуются полуэмпирическими формулами [2 и др]. В последнее время получены более строго обоснованные выражения для этих сопротивлений [3, 4, 5]. Так как в конструктивном отношении ротор синхронных реактивных машин существенно отличается от обычных синхронных, то вопрос о параметрах эквивалентных обмоток ротора должен быть рассмотрен особо.

Учитывая равенство сопротивлений взаимной индукции между эквивалентными роторными обмотками и обмотками статора [1], при определении параметров эквивалентных обмоток ротора достаточно найти формулы, позволяющие рассчитать активные сопротивления и индуктивные сопротивления рассеяния этих обмоток. При замене реальных обмоток ротора эквивалентными необходимо исходить из того, что энергетические процессы в машине при этом остаются без изменений. В первом приближении принимаем распределение составляющих токов в стержнях роторной обмотки по осям  $d$  и  $q$  синусоидальным [1, 3, 4].

### А. Активные сопротивления

При определении активных сопротивлений исходим из равенства потерь в эквивалентной и реальной обмотках ротора. Если обозначим активные сопротивления эквивалентных обмоток ротора по продольной и поперечной осям ротора соответственно через  $R_{rd}$  и  $R_{rq}$ , то потери в этих обмотках определяются равенствами

$$P_{\text{эд}} = \frac{1}{2} I_{rd}^2 R_{rd}, \quad (1)$$

$$P_{\text{эq}} = \frac{1}{2} I_{rq}^2 R_{rq}, \quad (2)$$

где  $I_{rd}$ ,  $I_{rq}$  — максимальные значения токов в эквивалентных обмотках.



где  $I_{kq} = I_{rq} \cos \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_k}{2}$  — максимальное значение поперечной составляющей тока в  $k$ -ом стержне.

Потери в реальной обмотке ротора от поперечных составляющих токов в стержнях определяются как сумма потерь в отдельных стержнях (рис. 1):

$$P_{rq} = 2p(R_{1ск} \cos^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_1}{2} + R_{2ск} \cos^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_2}{2} + \dots + R_{кск} \cos^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_k}{2} + \dots + \frac{1}{2} R_{оск}) I_{rq}^2. \quad (7)$$

Приравнивая левые части уравнений (2) и (7), найдем выражение для активного сопротивления эквивалентной обмотки по поперечной оси

$$R_{rq} = 4p(R_{1ск} \cos^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_1}{2} + R_{2ск} \cos^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_2}{2} + \dots + R_{кск} \cos^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_k}{2} + \dots + \frac{1}{2} R_{оск}). \quad (8)$$

При четном числе стержней на полюс член  $\frac{1}{2} R_{оск}$  в уравнении (8) отсутствует. Уравнение (5) и (8) позволяют вычислить активные сопротивления эквивалентных обмоток ротора в том случае, когда на полюсах имеются стержни различной конфигурации (как, например, в усовершенствованном роторе). В обычных синхронных реактивных машинах на полюсах, как правило, помещаются одинаковые стержни. В этом случае можно принять, что

$$R_{оск} = R_{1ск} = R_{2ск} = \dots = R_{кск} = R_{ск}. \quad (9)$$

Тогда уравнения (5) и (8) можно значительно упростить. Уравнение (5) можно записать в виде

$$R_{rd} = 4p (R_{ск} A_d + \frac{1}{2} R_{оск}), \quad (10)$$

где

$$A_d = \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_1}{2} + \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_2}{2} + \dots + \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_k}{2} + \dots \quad (11)$$

Если число короткозамкнутых контуров и стержней на полюсном наконечнике равно соответственно  $n_c$  и  $n_c$ , угол между двумя соседними стержнями  $\alpha_c$ , то при четном и нечетном  $n_c$  уравнение (11) можно представить в виде

$$A_d = \frac{n_c}{4} - \frac{\sin n_c \alpha_c}{4 \sin \alpha_c}. \quad (12)$$

Тогда уравнение (10) будет иметь вид

$$R_{rq} = p R_{ск} \left( n_c - \frac{\sin n_c \alpha_c}{\sin \alpha_c} \right) + 2p R_{оск}. \quad (13)$$

Уравнение (8) можно записать в виде

$$R_{rd} = 4p R_{оск} A_q, \quad (14)$$

$$A_q = \frac{1}{2} + \cos^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_1}{2} + \cos^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_2}{2} + \dots + \cos^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_n}{2}. \quad (15)$$

При нечетном числе стержней на полюсном наконечнике  $n_c = 2n + 1$ ;  $\frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_n}{2} = 2n\alpha_c$ ) уравнение (15) будет равно:

$$A_q = \frac{n_c}{4} + \frac{\sin n_c \alpha_c}{4 \sin \alpha_c} \quad (16)$$

Тогда уравнение (14) будет иметь вид:

$$R_{rq} = p R_{ck} \left( n_c + \frac{\sin n_c \alpha_c}{\sin \alpha_c} \right). \quad (17)$$

Нетрудно доказать, что при четном числе стержней на полюс уравнение (17) не изменяется.

Уравнения (13), (17) позволяют рассчитать активные сопротивления эквивалентных обмоток обычного ротора с равномерным распределением одинаковых стержней на полюсном наконечнике. Для усовершенствованного ротора или при неравномерном распределении стержней на полюсном наконечнике необходимо пользоваться уравнениями (5) и (8).

Для того, чтобы найти значения активных сопротивлений эквивалентных обмоток ротора, приведенных к обмотке статора, необходимо  $R_{rd}$  и  $R_{rq}$  умножить на коэффициенты приведения сопротивлений, равные  $m_z = m_l m_u$  [1].

$$\begin{aligned} r_{rd} &= R_{rd} \cdot m_{ld} \cdot m_{ud}, \\ r_{rq} &= R_{rq} \cdot m_{lq} \cdot m_{uq}. \end{aligned} \quad (18)$$

### Б. Индуктивные сопротивления рассеяния

При определении индуктивных сопротивлений рассеяния необходимо исходить из условия равенства магнитной энергии полей рассеяния в эквивалентной и реальной обмотках ротора. Если обозначить индуктивность рассеяния эквивалентных обмоток ротора по осям  $d$  и  $q$  соответственно  $L_{srd}$  и  $L_{srq}$ , то магнитные энергии потоков рассеяния в этих обмотках определяются равенствами

$$\begin{aligned} A_{\varepsilon d} &= \frac{1}{2} I_{rd}^2 L_{srd}, \\ A_{\varepsilon q} &= \frac{1}{2} I_{rq}^2 L_{srq}. \end{aligned} \quad (19)$$

Магнитные энергии от полей рассеяния в реальной обмотке ротора от продольной и поперечной составляющих токов определяются как суммы энергий в отдельных стержнях. При синусоидальном распределении токов вдоль поверхности ротора по аналогии с уравнениями (4) и (7) можно записать

$$\begin{aligned} A_{rd} &= 2p \left( L_{1ck} \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_1}{2} + L_{2ck} \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_2}{2} + \dots + \right. \\ &\quad \left. + L_{kck} \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_k}{2} + \dots + \frac{1}{2} L_{Qck} \right) I_{rd}^2, \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} A_{rq} &= 2p \left( L_{1ck} \cos^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_1}{2} + L_{2ck} \cos^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_2}{2} + \dots + \right. \\ &\quad \left. + L_{kck} \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_k}{2} + \dots + \frac{1}{2} L_{Qck} \right) I_{rq}^2, \end{aligned}$$

где  $L_{кск}$  — индуктивность  $k$ -го стержня с учетом влияния короткозамкнутых стержней.

Приравнивая левые части уравнений (19) и (20), находим выражения для индуктивностей рассеяния эквивалентных обмоток

$$L_{srд} = 4p \left( L_{1ск} \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_1}{2} + L_{2ск} \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_2}{2} + \dots + L_{кск} \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_k}{2} + \dots + \frac{1}{2} L_{Qск} \right), \quad (21)$$

$$L_{srq} = 4p \left( L_{1ск} \cos^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_1}{2} + L_{2ск} \cos^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_2}{2} + \dots + L_{кск} \sin^2 \frac{\pi}{\tau} \frac{\tau_2}{2} + \dots + \frac{1}{2} L_{Qск} \right).$$

В случае, когда на полюсном наконечнике располагаются одинаковые стержни, можно принять, что

$$L_{0ск} = L_{1ск} = L_{2ск} = \dots = L_{кск} = L_{ск}. \quad (22)$$

Тогда уравнения (21), учитывая преобразования (10) — (17), можно записать в виде

$$L_{srд} = p L_{ск} \left( n_c - \frac{\sin n_c \alpha_c}{\sin \alpha_c} \right) + 2p L_{Qск}. \quad (23)$$

$$L_{srq} = p L_{ск} \left( n_c + \frac{\sin n_c \alpha_c}{\sin \alpha_c} \right).$$

Для того, чтобы найти значения индуктивных сопротивлений рассеяния эквивалентных обмоток ротора, приведенных к обмотке статора, необходимо  $L_{srд}$  и  $L_{srq}$  умножить на угловую частоту тока статора и коэффициенты приведения сопротивлений.

$$\begin{aligned} x_{srд} &= 2\pi f_1 \cdot L_{srд} \cdot m_{Id} \cdot m_{ud}, \\ x_{srq} &= 2\pi f_1 \cdot L_{srq} \cdot m_{Iq} \cdot m_{uq}. \end{aligned} \quad (24)$$

Полученные в настоящей работе формулы позволяют учесть также изменение параметров эквивалентных обмоток ротора, обусловленных влиянием явления вытеснения тока в стержнях ротора. Для этого в расчетные формулы необходимо подставлять значения  $R_{кск}$  и  $L_{кск}$ , определенные с учетом вытеснения тока, как это обычно делается при расчете асинхронных двигателей [2].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Е. В. Кононенко. Приведение роторных обмоток синхронных реактивных машин. — В настоящем сборнике.
2. И. М. Постников. Проектирование электрических машин, Гостехиздат, СССР, 1960.
3. М. Е. Телаат. Новый подход к определению индуктивных сопротивлений синхронной машины, ГЭИ, 1959.
4. Я. Б. Данилевич, В. В. Домбровский, Е. Я. Казовский. Параметры электрических машин переменного тока, Наука, 1965.
5. Я. Б. Данилевич, Ю. А. Кулик. Теория и расчет демпферных обмоток синхронных машин, Изд-во АН СССР, 1962.