

## К РАСЧЕТУ ИНДУКТИВНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТКИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА ТОКУ ТРОЙНОЙ ЧАСТОТЫ

Использование энергии тройной частоты для целей возбуждения вызывает необходимость расчета индуктивного сопротивления обмотки переменного тока току тройной частоты. Рассмотрим расчет этого индуктивного сопротивления, используя общеизвестные положения [1].

Кривая намагничивающей силы (н.с.), созданная током  $I$  основной частоты  $f_1$ , кроме основной волны обычно содержит высшие пространственные гармоники. При равномерном зазоре каждая гармоника н.с. обмотки создает синусоидально распределенную волну магнитного поля, причем все гармоники поля индуктируют в создавшей их обмотке э.д.с. основной частоты. Рассматриваемые гармоники магнитного поля в воздушном зазоре, а также индуктированные ими э.д.с.  $E_v$  при отсутствии насыщения пропорциональны току обмотки  $I$ . Учет этих э.д.с. в обмотке может быть произведен в виде падения напряжения от тока  $I$  в индуктивных сопротивлениях, которые могут быть найдены с помощью соотношения:

$$x_v = \frac{E_v}{I},$$

где  $v$  — номер гармоники.

Эти гармоники вращаются со скоростями, отличными от скорости ротора, и для целей возбуждения обычно не используются. Для этих целей могут быть использованы дополнительные пространственные гармоники магнитного поля, созданного основной волной н.с., которые в явнополюсной синхронной машине вызваны главным образом неравномерностью воздушного зазора. Эти гармоники неподвижны относительно ротора и, вращаясь вместе с ним, наводят э.д.с. повышенной частоты. На практике для целей возбуждения используется только третья гармоника, которая, как показано в [2, 3], обеспечивает саморегулирование тока возбуждения при изменениях тока нагрузки.

Кривая н.с., созданная током  $I_3$  тройной частоты, кроме основной волны содержит также и высшие гармоники. Каждая

из них создает соответствующие волны магнитного поля, которые, в свою очередь, индуцируют в создавшей их обмотке э. д. с.  $E_{3\nu}$  тройной частоты. Учет этих э. д. с. так же, как и э. д. с.  $E_\nu$  основной частоты, может быть произведен в виде падения напряжения от тока тройной частоты в соответствующих индуктивных сопротивлениях.

Пусть по однофазной обмотке протекает переменный ток тройной частоты

$$i_3 = \sqrt{2} I_3 \cos \omega_3 t,$$

где  $I_3$  — действующее значение тока тройной частоты;  
 $\omega_3 = 2\pi f_3$  — угловая частота.

Результирующая н. с. фазы обмотки будет представлять собой сумму основной и высших пространственных гармоник н. с. с неизменным расположением в пространстве, амплитуды которых пульсируют во времени по тому же закону, что и питающий обмотку ток, т. е.

$$f_{3\phi t} = \sum_{\nu=1, 3, 5, \dots}^{\infty} F_{3\phi\nu} \cos \omega_3 t \cos \nu a_3, \quad (1)$$

где  $F_{3\phi\nu}$  — амплитуда  $\nu$ -ой гармоники н. с. фазы;

$a_3$  — пространственная координата, выраженная в угловых единицах.

Если энергия тройной частоты для возбуждения выявляется основной трехфазной обмоткой синхронной машины (см. рисунок, а), то протекающие токи тройной частоты во всех трех фазах ее будут равны и совпадать по фазе, т. е.:

$$i_{3A} = i_{3B} = i_{3C} = \sqrt{2} I_3 \cos \omega_3 t. \quad (2)$$

При такой системе токов, с учетом того, что фазные обмотки в пространстве сдвинуты на угол  $\pm \frac{2\pi}{3}$  относительно основной волны, первая, пятая, седьмая и другие, кроме третьей пространственной гармоники, в результирующей н. с. отсутствуют. Результирующая н. с., обусловленная системой токов нулевой последовательности тройной частоты, содержит только третью гармонику и гармоники, кратные трем. Последними будем пренебрегать. Тогда результирующая н. с.

$$f_3 = 3F_{3\phi} \cos \omega_3 t \cos 3a. \quad (3)$$

Из (3) следует, что н. с., обусловленная током тройной частоты, протекающим по основной обмотке статора, является пуль-

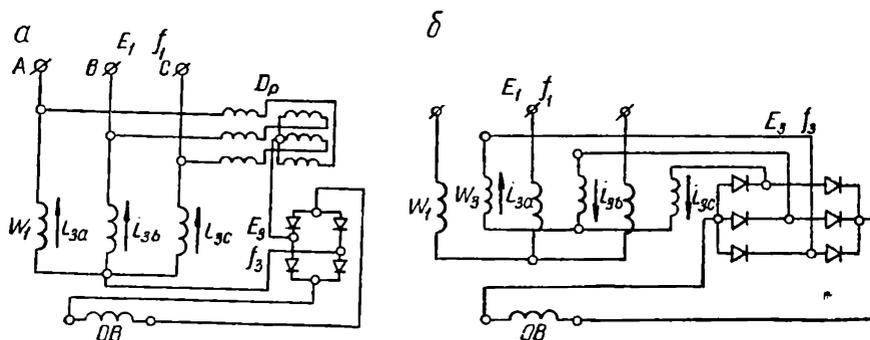
сирующей неподвижной волной. Неподвижную волну заменим двумя вращающимися:

$$f_3 = \frac{3}{2} F_{3\Phi} \cos(\omega_3 t - 3a) + \frac{3}{2} F_{3\Phi} \cos(\omega_3 t + 3a).$$

Прямая волна (первое слагаемое в последнем соотношении) обуславливает главное индуктивное сопротивление статора току тройной частоты. Эффект действия обратной волны будем учитывать с помощью так называемого дифференциального рассеяния.

Амплитуда синхронно-вращающейся волны н. с. статора, обусловленная током тройной частоты, равна:

$$F_3 = \frac{3}{2} F_{3\Phi} = \frac{\sqrt{2} k_{03} W_1 I_3}{\pi p}, \quad (4)$$



Принципиальная схема питания обмотки возбуждения (ОВ) от источника энергии тройной частоты с основной обмоткой  $W_1$  (а) и дополнительной  $W_3$  (б).

где  $p$ ,  $W_1$  — число пар полюсов и число витков основной трехфазной обмотки,

$I_3$  — фазный ток тройной частоты.

В ненасыщенной неявнополюсной машине амплитуда магнитной индукции, обусловленная прямой волной н. с. тройной частоты, равна

$$B_{3m} = \lambda_{\delta} F_3 = \frac{\mu_0}{k_{\delta} \delta} F_3, \quad (5)$$

магнитный поток:

$$\Phi_3 = \frac{2}{\pi} B_{3m} \tau_3 l_{\delta} = \frac{2}{\pi} \frac{\mu_0}{k_{\delta} \delta} \tau_3 l_{\delta} F_3. \quad (6)$$

Э. д. с. самоиндукции, обусловленная прямой волной третьей гармоники поля,

$$E_3 = \pi \sqrt{2} f_3 W_1 k_{03} \Phi_3. \quad (7)$$

Главное индуктивное сопротивление самоиндукции основной обмотки току тройной частоты, с учетом (4), (6) и (7) и замены  $\tau_3 = \frac{1}{3} \tau$ , получит следующий вид:

$$x_3 = \frac{E_3}{3I_3} = \frac{4}{9\pi} \frac{\mu_0}{k_\delta \delta} f_3 \tau l_\delta \frac{(k_{03} W_1)^2}{\rho}.$$

Полученное выражение для индуктивного сопротивления  $x_3$  справедливо для случая неявнополюсной машины. Для явнополюсной машины индуктивное сопротивление основной обмотки току тройной частоты в схеме рисунка (а) запишется в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} x_{ad3} &= k_{d3} x_3 = \frac{4}{9\pi} \frac{\mu_0}{k_\delta \delta} f_3 \tau l_\delta \frac{(k_{03} W_1)^2}{\rho} k_{d3}; \\ x_{aq3} &= k_{q3} x_3 = \frac{4}{9\pi} \frac{\mu_0}{k_\delta \delta} f_3 \tau l_\delta \frac{(k_{03} W_1)^2}{\rho} k_{q3}, \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

где  $k_{d3}$  и  $k_{q3}$  — коэффициенты, с помощью которых учитывается изменение основной гармоники поля, созданного током тройной частоты соответственно по продольной и поперечной осям.

Если значения  $x_{ad3}$  и  $x_{aq3}$  выразить через соответствующие реактивные сопротивления взаимной индукции  $x_{ad1}$  и  $x_{aq1}$  основной обмотки для тока основной частоты  $f_1 = \frac{1}{3} f_3$ , то получатся следующие соотношения:

$$\left. \begin{aligned} x_{ad3} &= \frac{1}{9} x_{ad1} \left( \frac{k_{03}}{k_{01}} \right)^2 \frac{k_{d3}}{k_{d1}}; \\ x_{aq3} &= \frac{1}{9} x_{aq1} \left( \frac{k_{03}}{k_{01}} \right)^2 \frac{k_{q3}}{k_{q1}}. \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Индуктивность рассеяния, обусловленная проводимостью в пазовой зоне и вокруг лобовых частей обмотки статора, не зависит от частоты. Если пренебречь различием в картине дифференциального рассеяния, то можно полагать, что индуктивность рассеяния, эквивалентная на фазу, при протекании по обмотке статора системы токов нулевой последовательности остается такой же, что и в обычном симметричном режиме.

Реактивное сопротивление рассеяния фазной обмотки для тока тройной частоты возрастет в 3 раза, однако параллельное включение фаз уменьшает в 3 раза сопротивление «источника». Поэтому можно полагать

$$x_{\sigma 3} = x_{\sigma 1}. \quad (10)$$

Полное (синхронное) реактивное сопротивление, обусловленное самой машиной, однофазного источника тройной частоты по схеме рисунка, *a* по продольной оси равно:

$$x_{d3} = x_{\sigma 3} + x_{ad3} = x_{\sigma 1} + \frac{1}{9} \left( \frac{k_{03}}{k_{01}} \right)^2 \frac{k_{d3}}{k_{d1}} x_{ad1}. \quad (11)$$

Аналогичное соотношение получим и по поперечной оси.

Обычно  $x_{ad1}$  на порядок больше величины  $x_{\sigma 1}$ . Соотношение же между  $x_{\sigma 3}$  и  $x_{ad3}$ , как видно из (11), может получиться обратным:  $x_{ad3}$  может оказаться существенно меньше величины реактивного сопротивления рассеяния  $x_{\sigma 3}$ .

Для выявления энергии тройной частоты для возбуждения часто выполняют дополнительную специальную трехфазную симметричную обмотку (см. рисунок, *б*) с соответствующим шагом  $u = y_3$  и полюсностью  $p_3 = 3p$ .

Расчет реактивных сопротивлений такой симметричной трехфазной обмотки особых затруднений не встречает.

На основе известных соотношений, например, приведенных в [1], получатся следующие соотношения для сопротивлений взаимоиндукций по продольной и поперечной осям:

$$\left. \begin{aligned} x_{ad3} &= \frac{12}{\pi} \frac{\mu_0}{k_\delta \delta} f_3 \tau_3 l_0 \frac{(W_3 k_{301})^2}{p_3} k_{d3}; \\ x_{aq3} &= \frac{12}{\pi} \frac{\mu_0}{k_\delta \delta} f_3 \tau_3 l_0 \frac{(W_3 k_{301})^2}{p_3} k_{q3}. \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

Реактивные сопротивления дополнительной обмотки  $x_{ad3}$  и  $x_{aq3}$ , выраженные через соответствующие реактивные сопротивления  $x_{ad1}$  и  $x_{aq1}$  основной обмотки, запишутся в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} x_{ad3} &= \frac{1}{3} x_{ad1} \left( \frac{W_3 k_{301}}{W_1 k_{01}} \right)^2 \frac{k_{d3}}{k_{d1}}; \\ x_{aq3} &= \frac{1}{3} x_{aq1} \left( \frac{W_3 k_{301}}{W_1 k_{01}} \right)^2 \frac{k_{q3}}{k_{q1}}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Полученные соотношения справедливы для ненасыщенного состояния машины.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. П. Костенко, Л. М. Пиотровский. Электрические машины, Ч. II. М., «Энергия», 1965.
2. Н. С. Бендебери. Использование третьей гармоники поля для возбуждения синхронных генераторов. Тезисы докладов к научно-технической конференции «Опыт проектирования, исследования и производства синхронных генераторов с полупроводниковыми системами возбуждения». Свердловск — Н. Баранча, НТОЭ и ЭП, 1968.
3. В. Н. Бреев, Н. С. Бендебери. Возбуждение синхронных машин от третьей гармоники. Тр. ППИ, сб. 78. «Специальные системы электропривода», Пермь, 1970.