

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО СИНХРОННО-РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ, РАБОТАЮЩЕГО В РЕЖИМЕ ОДНОФАЗНОГО КОНДЕНСАТОРНОГО

Ю. М. АЧКАСОВ, Б. А. ЗАХАРОВ

(Представлена научно-техническим семинаром НИИ АЭМ при ТПИ)

Из всего многообразия схем включения двигателей переменного тока с симметричными трехфазными обмотками статора на однофазную сеть заслуживает внимания схема с соединенными в звезду обмотками статора и последовательной емкостью (рис. 1). Применительно к асинхронному двигателю эта схема позволяет в однофазном включении получить полную мощность трехфазного режима при использовании в качестве фазосдвигающего элемента одной емкости при коэффициенте мощности исходного трехфазного двигателя, равном 0,5 [1].

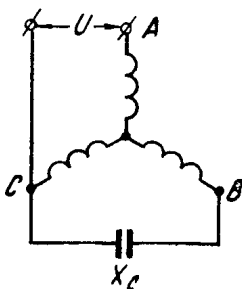


Рис. 1. Схема
соединения обмо-
ток

В неуравновешенном режиме по обмоткам двигателя протекают несимметричные токи, т. е. имеет место несимметричный режим питания симметричного трехфазного двигателя. Это позволяет произвести исследование данной схемы методом симметричных составляющих.

При синусоидальном питающем напряжении в установившемся режиме работы для схемы рис. 1 действительны уравнения [3].

Для токов прямой (I_1) и обратной (I_2) последовательностей:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= \frac{(a - a^2) Z_2 + a Z_c}{3Z_1 Z_2 + Z_c (Z_1 + Z_2)} \cdot \frac{U}{a - a^2} \\ I_2 &= \frac{(a - a^2) Z_1 + a^2 Z_c}{3Z_1 Z_2 + Z_c (Z_1 + Z_2)} \cdot \frac{U}{a - a^2} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Для фазных токов:

$$I_A = \frac{U (Z_1 + Z_2 + Z_c)}{3Z_1 Z_2 + Z_c (Z_1 + Z_2)}$$

$$I_B = \frac{U(a^2 Z_c + a Z_1)}{3Z_1 Z_2 + Z_c(Z_1 + Z_2)} \quad (2)$$

$$I = \frac{U(a Z_2 + a^2 Z_1 - Z_c)}{3Z_1 Z_2 + Z_c(a Z_1 + Z_2)}$$

Для фазных напряжений:

$$\begin{aligned} \dot{U}_A &= \frac{(a - a^2) Z Z_2 + Z_c(a Z_1 - a^2 Z)}{3Z_1 Z_2 + Z_c(Z_1 + Z_2)} \cdot \frac{U}{a - a^2} \\ \dot{U}_B &= \frac{(a - a) Z_1 Z_2 + Z_c(Z_1 - Z_2)}{3Z_1 Z_1 + Z_c(Z_1 + Z_2)} \cdot \frac{U}{a - a^2} \\ \dot{U}_C &= \frac{(a^2 - a) Z_1 Z_2 + Z_c(a^2 Z_1 - a Z_2)}{3Z_1 Z_2 + Z_c(Z_1 + Z_2)} \cdot \frac{U}{a - a^2} \end{aligned} \quad (3)$$

в уравнениях (1—3):

U — напряжение сети;

$a = e^{-j \frac{4\pi}{3}}$ — фазные множители;

$a = e^{-j \frac{2\pi}{3}}$

$Z_c = -j x_c$ — емкостное сопротивление.

Величиной активного сопротивления емкости пренебрегаем.

$Z_1; Z_2$ — полные сопротивления токам прямой и обратной последовательностей.

Полные сопротивления Z_1 и Z_2 определяем по эквивалентным схемам замещения однофазного синхронного реактивного двигателя для прямой и обратной последовательностей синхронного режима работы (рис. 3), где

$r_s; x_s$ — активное и реактивное сопротивление фазы обмотки статора;

x_{ad} — реактивное сопротивление реакции якоря по продольной оси;

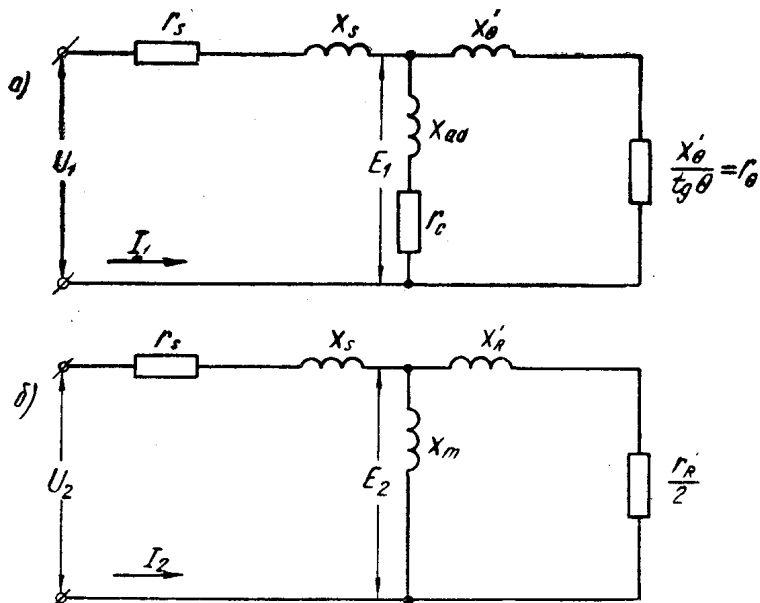


Рис. 3. а) схема замещения двигателя для прямой последовательности; б) схема замещения двигателя для обратной последовательности.

r_c — активное сопротивление, учитывающее потери в стали;

Θ — угол смещения оси полюсов ротора относительно волны прямого поля;

$x'_{\Theta}; r'_{\Theta} = \frac{x'_{\Theta}}{tg\Theta}$ — реактивное и активное сопротивления, зависящие от угла Θ , приведенные к статору;

$$x'_{\Theta} = \frac{x_{ad} \cdot x_{ac}}{x_{ad} + x_{aq}};$$

$x_R; \frac{r'_R}{2}$ — усредненные индуктивное и активное сопротивления рассеяния короткозамкнутой клетки ротора, приведенные к статору;

$$x'_R = \frac{x_{Rd} + x_{Rq}}{2} \quad (4) \quad r'_R = \frac{r_{Rd} + r_{Rq}}{2}, \quad (5)$$

где

$r'_d, r'_{Rg}, x_{Rd}, x_{Rg}$ — активное и реактивное сопротивления рассеяния короткозамкнутой клетки ротора по продольной и поперечной осям;

x_m — индуктивное сопротивление намагничивающего контура;

$$x_m = \frac{x_{ad} \cdot x_{aq}}{x_{ad} + x_{aq}}, \quad (6)$$

x_{ad} — реактивное сопротивление реакции якоря по поперечной оси.

Эти схемы замещения представляют разновидность универсальной схемы [2], позволяют применить методы расчета конденсаторных асинхронных двигателей для конденсаторных синхронно-реактивных.

Из схем замещения ясно, что величина Z_1 зависит от Θ , а Z_2 — постоянная величина для ненасыщенной машины. Задаваясь значением угла смещения Θ от 0 до 45 градусов, получим зависимость $Z_1 = f(\Theta)$, а затем по формулам 1, 2, 3 определим токи и напряжения при каждом значении Θ .

Величину Z_c определяем из условия получения в схеме рис. 1 кругового вращающего поля, что возможно при симметрии напряжений и токов в фазах двигателя.

Векторная диаграмма для симметричного режима приведена на рис. 2. Из диаграммы видно, что напряжение на емкости $U_K = U$ и образует с вектором тока конденсаторной фазы I_B угол 90° . Коэффициент

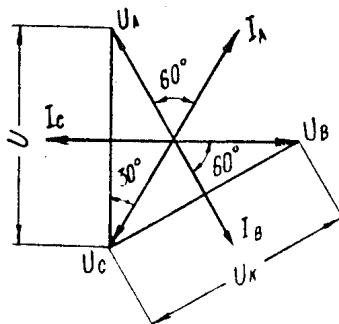


Рис. 2. Векторная диаграмма для уравновешенного режима

мощности каждой фазы равен 0,5 и соответствует углу 60° между фазным напряжением и током; линейный коэффициент мощности равен 0,866 и соответствует углу 30° между линейным током I_A и напряжением сети U . Мощность конденсаторной батареи при номинальной нагрузке

$$P_k = U_k \cdot I_B = UI_H, \quad (7)$$

где

I_H — номинальный линейный ток в однофазном включении найдем из формулы потребляемой активной мощности в симметричном режиме:

$$P_1 = U \cdot I_H \cos \varphi_L, \quad (8)$$

$\cos \varphi_L$ — линейный коэффициент мощности.

$$I_H = \frac{P_1}{U \cos \varphi_L}. \quad (9)$$

Подставив (9) в (7), получим

$$P_k = \frac{P_1}{\cos \varphi_L} = \frac{2}{\sqrt{3}} P_1, \quad (10)$$

тогда необходимая величина рабочей емкости равна

$$c = \frac{2 \cdot P_1}{\sqrt{3} \cdot U^2 \cdot 2\pi f}. \quad (11)$$

Имея значение величины токов и напряжений в комплексной форме, нетрудно определить коэффициенты мощности каждой фазы и линейный при данных параметрах Z_1, Z_2, Z_c .

Определив по (1) токи обеих последовательностей, можно вычислить для каждого значения угла Θ вращающиеся моменты, определяемые алгебраической разностью моментов прямой (M_1) и обратной (M_2) составляющих

$$M = M_1 - M_2.$$

$$M = k \frac{\text{мр}}{f} \left[\frac{E^2_1 \frac{x'_{\Theta}}{\text{tg} \Theta}}{\left(\frac{x'_{\Theta}}{\text{tg} \Theta}\right)^2 + x'^2_{\Theta}} - \frac{E^2_2 \cdot \frac{r'_2}{2}}{\left(\frac{r'_R}{2}\right)^2 + x'^2_R} \right], \quad (12)$$

где

k — коэффициент, зависящий от схемы соединения обмоток статора и конденсатора;

m — число фаз;

p — число пар полюсов;

f — частота сети;

$$\begin{aligned} E_1 &= |Z_1 - Z_s| \cdot I_1 \\ E_2 &= |Z_2 - Z_s| \cdot I_2 \end{aligned} \quad (13)$$

E_1, E_2 — абсолютные значения э. д. с. прямой (E_1) и обратной (E_2) последовательностей.

Из схемы замещения находим:

$$Z_s = r_s + jx_s \quad (14)$$

— полное сопротивление рассеяния фазы статора.

$$Z_1 - Z_s = \frac{\left(-\frac{x'_e}{\operatorname{tg}\Theta} + jx'_e \right) (r_c + jx_{ad})}{\left(\frac{x'_e}{\operatorname{tg}\Theta} + r_e \right) + j(x'_e + x_{ad})} \quad (15)$$

$$Z_2 - Z_s = \frac{\left(\frac{r'_R}{2} + jx'_R \right) \cdot jxm}{\frac{r'_R}{2} + j(x_m + x'_R)} \quad (16)$$

Зная зависимость $M=f(\Theta)$, определяем степень использования двигателя при угле смещения, соответствующем номинальной нагрузке

$$\mu = \frac{M}{M_H} \cdot 100 (\%) , \quad (17)$$

где

M_H — номинальный момент двигателя в трехфазном режиме.

Определив момент на валу двигателя

$$M_B = M - M_0, \quad (18)$$

где M_0 — момент потерь, легко найти отдаваемую двигателем мощность

$$P_2 = 9,81 \cdot 10^{-2} M_B \cdot \omega , \quad (19)$$

где

ω — синхронная угловая скорость; коэффициент полезного действия при любом значении угла Θ ;

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100 (\%) \quad (20)$$

P_1 — определяется по выражению (8)

Таким образом возможно рассчитать аналитически рабочие характеристики трехфазного синхронно-реактивного двигателя, работающего в однофазном включении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Академия наук Украинской ССР. Институт электродинамики. А. И. Адамченко. Методы исследования несимметричных асинхронных машин. Изд. «Наукова думка». Киев, 1969.

2. О. Б. Певзнер. Метод исследования однофазных и конденсаторных синхронных реактивных электродвигателей при помощи универсальной схемы замещения. Бесконтактные электрические машины, ч. I. Синхронные машины. М., 1966.

3. Г. Б. Меркин. Конденсаторные электродвигатели для промышленности и транспорта. «Энергия», М., 1966.