

ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПЕРЕМЕННОЙ ЧАСТОТЕ ПИТАЮЩЕЙ СЕТИ

Е. В. КОНОНЕНКО, Г. И. ЛУКИЯНОВ

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

При разработке систем частотно-регулируемого электропривода наряду с асинхронными двигателями, все более широкое применение находят также синхронные реактивные двигатели (СРД). СРД обычно пускаются в ход как асинхронные. Поэтому исследование влияния изменения частоты и напряжения на пусковые характеристики является необходимым, что позволяет выявить рациональные законы регулирования частоты при пуске.

Для исследования пусковых характеристик СРД при переменной частоте питающей сети за исходные примем следующие уравнения, записанные в относительных единицах [1]:

$$\left. \begin{aligned} U_d &= p\Psi_d + r i_d - \Psi_q(\alpha - p\Theta) \\ U_q &= p\Psi_q + r i_q + \Psi_d(\alpha - p\Theta) \\ \Psi_d &= x_d(p) i_d \\ \Psi_q &= x_q(p) i_q, \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где

$p = \frac{d}{d\tau}$ — относительная частота сети;

$\alpha = \frac{f_1}{f_H}$ — оператор дифференцирования по синхронному времени;

Θ — угол между приложенным напряжением и поперечной осью ротора.

Уравнение электромагнитного момента

$$M = \Psi_d \cdot i_q - \Psi_q i_d \quad (2)$$

Учитывая, что при пуске СРД работают в асинхронном режиме и согласно [1]

$$\frac{d\Theta}{d\tau} = \alpha \cdot s,$$

уравнения (1) можно записать в следующем виде:

$$\left. \begin{aligned} U_d &= p\Psi_d + r i_d - \Psi_q \cdot \alpha(1 - s) \\ U_q &= p\Psi_q + r i_q + \Psi_d \cdot \alpha(1 - s) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Обычно при исследовании асинхронных режимов работы СРД рассматривают статические пусковые характеристики. Для вывода расчет-

ных формул пользуются комплексным методом [2]. Так как в системе относительных единиц частота токов и напряжений в преобразованных обмотках статора по осям d и q равна $\alpha \cdot s$, то для перехода от операторных уравнений к комплексным p заменяется на $j\alpha \cdot s$. Решая уравнения (3) относительно комплексов токов, получим

$$\begin{aligned}\bar{i}_d &= \frac{\bar{U}_d [j\alpha s x_q (j\alpha s) + r] + \bar{U}_q \cdot x_q \cdot (j\alpha s) \cdot \alpha (1 - s)}{\bar{A}} \\ \bar{i}_q &= \frac{\bar{U}_q [j\alpha s x_d (j\alpha s) + r] - \bar{U}_d \cdot x_d \cdot (j\alpha s) \cdot \alpha (1 - s)}{\bar{A}},\end{aligned}\quad (4)$$

где $\bar{A} = r^2 + j\alpha s \cdot r [x_d(j\alpha s) + x_q(j\alpha s)] + x_d(j\alpha s) \cdot x_q(j\alpha s) [\alpha^2 (1 - 2s)]$.

$$x_d(j\alpha s) = \frac{x_d + j\alpha s T_d x_d''}{1 + j\alpha s T_d}; \quad x_q(j\alpha s) = \frac{x_q + j\alpha s T_q x_q''}{1 + j\alpha s T_q}.$$

Скорость вращения ротора при переменной частоте сети равна

$$\omega = \omega_H \cdot \alpha (1 - s). \quad (5)$$

Тогда комплексы составляющих напряжения

$$\begin{aligned}\bar{U}_d &= \gamma_u U_H e^{j(\alpha s \tau + \delta_0)} \\ U_q &= -j\gamma_u U_H e^{j(\alpha s \tau + \delta_0)},\end{aligned}\quad (6)$$

где

$$\gamma_u = \frac{U}{U_H},$$

δ_0 — угол, образованный результирующим вектором напряжения с осью ротора d в начальный момент времени.

Подставляя (6) в (4), выражения для комплексов токов можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned}\bar{i}_d &= \frac{\gamma_u U_H}{\bar{A}} \frac{e^{j(\alpha s \tau + \delta_0)}}{\alpha} \{r - j\alpha s x_q(j\alpha s) [\alpha (1 - 2s)]\}, \\ \bar{i}_q &= \frac{\gamma_u U_H}{\bar{A}} \frac{e^{j(\alpha s \tau + \delta_0)}}{\alpha} \{-jr - x_d(j\alpha s) [\alpha (1 - 2s)]\}.\end{aligned}\quad (7)$$

При исследовании установившихся асинхронных режимов удобно оперировать с векторами пространственных волн. Для пространственного вектора тока справедливо выражение

$$\bar{i}_s = i_d + j i_q. \quad (8)$$

Мгновенные значения токов i_d и i_q определяются через соответствующие векторы

$$i_d = -\frac{1}{2} (\bar{i}_d + i_d^*), \quad i_q = -\frac{1}{2} (\bar{i}_q + i_q^*). \quad (9)$$

Тогда с учетом (9) имеем

$$\bar{i}_s = \frac{1}{2} (\bar{i}_d + j \bar{i}_q) + \frac{1}{2} (i_d^* + j i_q^*) = \bar{i}_{s1} + \bar{i}_{s2}, \quad (10)$$

где

i_{s1} и i_{s2} — пространственные векторы токов прямой и обратной последовательности соответственно,

* — обозначает сопряженный вектор.

Пространственные векторы тока после преобразований с учетом (7) равны

$$\begin{aligned}\overline{i_{s1}} &= \frac{\gamma_u U_H e^{j(\alpha s \tau + \delta_0)}}{A} \cdot \left\{ r - \frac{1}{2} j [\alpha (1 - 2s)] \cdot [x_d(j\alpha s) + x_q(j\alpha s)] \right\}, \\ \overline{i_{s2}} &= \frac{\gamma_u U_H e^{-j(\alpha s \tau + \delta_0)}}{A^*} \cdot \left\{ -\frac{1}{2} j [\alpha (1 - 2s)] [x_d(-j\alpha s) - x_q(-j\alpha s)] \right\}.\end{aligned}\quad (11)$$

Если в (11) подставить выражения для операторных сопротивлений, то уравнения (11) после преобразований имеют вид

$$\begin{aligned}\overline{i_{s1}} &= \frac{a + jb}{c + jd} \cdot \gamma_u U_H e^{j(\alpha s \tau + \delta_0)}, \\ \overline{i_{s2}} &= \frac{a' - jb'}{c - jd} \cdot \gamma_u U_H e^{-j(\alpha s \tau + \delta_0)},\end{aligned}\quad (12)$$

где

$$\begin{aligned}a &= r(1 - \alpha^2 s^2 T_d T_q) + \frac{1}{2} \alpha s [\alpha (1 - 2s)] \cdot [(x_d'' + x_q) T_d + (x_q'' + x_d) T_q]; \\ b &= r \cdot \alpha s (T_d + T_q) - \frac{1}{2} [\alpha (1 - 2s)] \cdot [(x_d + x_q) - \alpha^2 s^2 (x_d'' + x_q'') T_d T_q]; \\ c &= r^2 (1 - \alpha^2 s^2 T_d T_q) - r \alpha^2 s^2 [(x_d + x_q'') T_q + (x_q + x_d'') T_d] + \\ &\quad + [\alpha^2 (1 - 2s)] \cdot (x_d x_q - \alpha^2 s^2 T_d T_q \cdot x_d'' x_q''); \\ d &= r^2 \alpha \cdot s (T_d + T_q) + r \alpha \cdot s [x_d + x_q - \alpha^2 s^2 (x_d'' + x_q'') T_d \cdot T_q] + \\ &\quad + [\alpha^2 (1 - 2s)] \cdot \alpha \cdot s (x_d'' \cdot x_q'' T_d + x_q'' \cdot x_d \cdot T_q); \\ a' &= \frac{\alpha \cdot s}{2} [\alpha (1 - 2s)] \cdot [(x_q - x_d'') T_d + (x_q'' - x_d) T_q]; \\ b' &= \frac{\alpha (1 - 2s)}{2} \cdot [x_d - x_q - \alpha^2 s^2 (x_d'' - x_q'') T_d \cdot T_q].\end{aligned}$$

Из выражений (12) можно определить действующие значения токов прямой и обратной последовательностей:

$$\begin{aligned}I_1 &= \gamma_u \cdot U_H \left| \frac{a + jb}{c + jd} \right| = \gamma_u \cdot U_H \cdot \sqrt{\frac{a^2 + b^2}{c^2 + d^2}}, \\ I_2 &= \gamma_u \cdot U_H \left| \frac{a' - jb'}{c - jd} \right| = \gamma_u \cdot U_H \cdot \sqrt{\frac{(a')^2 + (b')^2}{c^2 + d^2}}.\end{aligned}\quad (13)$$

Действующее значение тока статора равно

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2}.\quad (14)$$

Тогда векторы тока прямой и обратной последовательностей можно записать так:

$$\begin{aligned}\overline{i_{s1}} &= I_1 \cdot e^{-j(\alpha s \tau + \delta_0 - \varphi_1)} \\ \overline{i_{s2}} &= I_2 \cdot e^{-j(\alpha s \tau + \delta_0 - \varphi_2)},\end{aligned}\quad (15)$$

где

$$\varphi_1 = \arctg \frac{ad - bc}{ac + bd}; \quad \varphi_2 = \arctg \frac{a'd - b'c}{a'c + b'd}.\quad (16)$$

Электромагнитный момент по (2) после преобразований можно представить как сумму двух составляющих

$$M = \Psi_d \cdot i_q - \Psi_q \cdot i_d = \operatorname{Re} (j \bar{\Psi}_s \cdot i_s^*) = M_c + M_{\text{пуль}}, \quad (17)$$

где

M_c — средний (постоянный во времени) момент,

$M_{\text{пуль}}$ — пульсирующий, переменный во времени момент.

Средний момент можно представить как сумму моментов прямой и обратной последовательностей

$$M_c = M_1 + M_2, \quad (18)$$

где

$$M_1 = \operatorname{Re} (j \bar{\Psi}_{s1} \cdot i_{s1}^*) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [(j \bar{\Psi}_d - \bar{\Psi}_q) \cdot i_{s1}^*]. \quad (19)$$

$$M_2 = \operatorname{Re} (j \bar{\Psi}_{s2} \cdot i_{s2}^*) = \frac{1}{2} \operatorname{Re} [j \bar{\Psi}_d^* - \bar{\Psi}_q^* \cdot i_{s2}^*].$$

Для того, чтобы получить удобные для расчетов формулы моментов, необходимо из последних выражений исключить потокосцепления. Для этого, решая уравнения (3) в комплексном виде, находим комплексы потокосцеплений

$$\begin{aligned} \bar{\Psi}_d &= \frac{-j \bar{U}_d}{\alpha_q} - \frac{r [j \cdot s \bar{i}_d + (1-s) \bar{i}_q]}{\alpha (1-2s)} \\ \bar{\Psi}_q &= -\frac{\bar{U}_d}{\alpha_q} + \frac{r [\bar{i}_d (1-s) - j s \bar{i}_q]}{\alpha (1-2s)}. \end{aligned} \quad (20)$$

С учетом (20) находим выражения для составляющих электромагнитного момента:

1) прямой последовательности

$$M_1 = \frac{\gamma_u U_H I_1 \cdot \cos \varphi_1 - r I_1^2}{\alpha}; \quad (21)$$

2) обратной последовательности

$$M_2 = -\frac{r I_2^2}{\alpha (1-2s)}; \quad (22)$$

3) пульсирующего момента

$$\begin{aligned} M_{\text{пуль}} &= \frac{1}{2} \operatorname{Re} (\bar{\Psi}_d \cdot \bar{i}_q - \bar{\Psi}_q \cdot \bar{i}_d) = \\ &= \frac{\gamma_u U_H I_2}{\alpha} \cdot \cos (2\alpha s \tau + 2\delta_0 - \varphi_2) - I_1 I_2 \frac{2r (1-s)}{\alpha (1-2s)} \times \\ &\quad \times \cos (2\alpha s \tau + 2\delta_0 - \varphi_1 - \varphi_2). \end{aligned} \quad (23)$$

Амплитуда пульсирующего момента

$$M_{\text{пуль}} = \frac{I_2}{\alpha} \cdot \sqrt{\gamma_u^2 U_H^2 + 4 I_1^2 \left[\frac{r (1-s)}{1-2s} \right]^2 - 4 \gamma_u U_H \cdot \frac{r (1-s)}{1-2s} \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1} \quad (24)$$

Полученные выражения (13), (14), (21), (22) и (24) позволяют рассчитать характеристики СРД в пусковом режиме, работающего от сети с переменной частотой и амплитудой напряжения. На рис. 1 и 2 представлены расчетные механические характеристики и токи СРД

при различных значениях частоты для двигателя мощностью 3 кВт и скоростью вращения 1000 об/мин, характеризующегося следующими значениями параметров: $x_d=2,57$; $x_q=0,49$; $r=0,066$; $x_d''=0,228$; $x_q''=0,205$; $T_d=43$ эл. сек; $T_q=11,8$ эл. сек; $H=161$ эл. сек. (все параметры в относительных единицах). Расчеты параметров производились по методике [2]. Момент инерции нагрузки принимался равным пятикратному значению момента инерции ротора. Закон изменения частоты принимался прямо пропорциональным напряжению. $M_H=0,42$ Мд. Как следует из этих рисунков, изменение частоты оказывает существенное влияние на пусковые характеристики СРД и приводит к изменению пускового момента и тока, максимального момента в асинхронном режиме, а также к искажению формы пусковых характеристик.

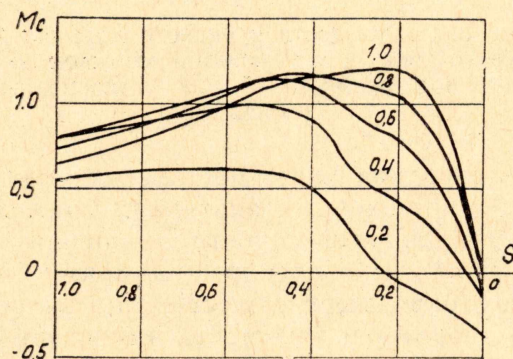


Рис. 1. Механические характеристики СРД при различных значениях относительной частоты α

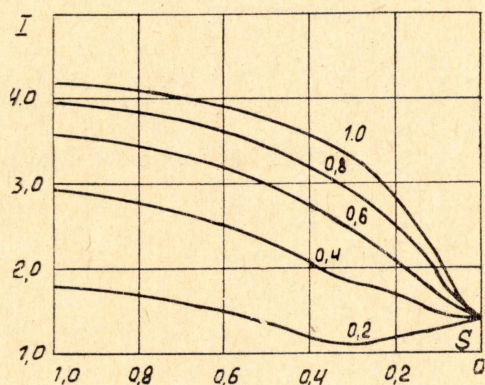


Рис. 2. Зависимость тока статора СРД от скольжения при различных значениях относительной частоты α

На рис. 3 приведены зависимости пускового тока, момента и максимального момента в асинхронном режиме от частоты. Пусковой момент в диапазоне частот $\alpha=0,4-1,0$ изменяется незначительно и имеет максимум при $\alpha=0,5$; при $\alpha=0,2$ пусковой момент остается еще выше номинального. Максимальный момент в асинхронном режиме в указанном диапазоне частот изменяется также очень незначительно. В то же время пусковой ток при уменьшении частоты от 1 до 0,2 уменьшается почти в два раза. Таким образом, анализ пусковых характеристик СРД при переменной частоте питающей сети говорит о том, что пуск

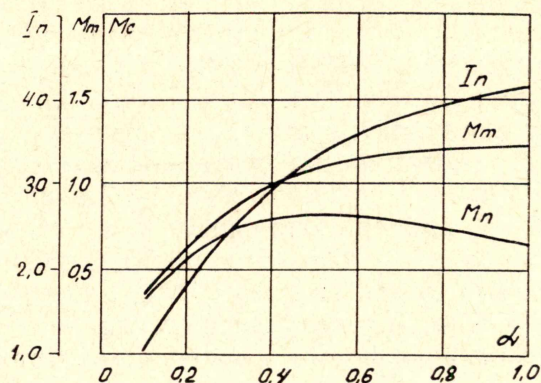


Рис. 3. Зависимости пускового момента M_n , пускового тока I_n и максимального момента в асинхронном режиме M_m от относительной частоты α

СРД, работающих в системах частотного регулирования скорости вращения, возможен при пониженных значениях кратности пускового тока. В системах регулирования скорости вращения двигателей переменного тока с тиристорными преобразователями частоты снижение кратности пускового тока имеет существенное значение, так как это позволяет снизить габариты и стоимость тиристорных преобразователей частоты за счет уменьшения тока полупроводниковых элементов.

Таким образом, пуск СРД, работающих в системах с частотным регулированием, можно осуществить при пониженных кратностях пускового тока, для чего пуск следует начинать при пониженных частотах, а затем увеличивать напряжение и частоту с таким темпом, чтобы пусковой ток оставался в заданных пределах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Е. В. Кононенко, Г. И. Лукьянов. Уравнения синхронного реактивного двигателя при переменной частоте питающей сети. «Изв. ТПИ», т. 229, 1972.
2. Е. В. Кононенко. Синхронные реактивные машины. «Энергия», М., 1970.