

**ОБ АНОМАЛИИ ВРАЩАЮЩЕГО МОМЕНТА ПРИ ПРЯМОМ АСИНХРОННОМ И КВАЗИЧАСТОТНОМ ПУСКАХ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ**

По объемам установленных электрических мощностей, синхронные двигатели (СД) занимают доминирующее положение среди других электрических машин в промышленных электроприводах.

Синхронные машины не имеют естественного пускового момента, поэтому для разгона их уподобляют асинхронным короткозамкнутым двигателям при помощи специальных пусковых устройств и осуществляют так называемый «асинхронный пуск».

В качестве специальных устройств используют:

- демпферную (пусковую) обмотку, размещенную в их полюсной системе, подобную беличьей клетке короткозамкнутого асинхронного двигателя, которая в синхронном режиме служит для успокоения колебаний;
- тиристоры, подключающие к обмотке возбуждения разрядный резистор, поскольку в начале пуска при большом скольжении в обмотке возбуждения индуцируется ЭДС, величина которой при разомкнутой обмотке возбуждения опасна для сохранения целостности изоляции.

Прямой пуск: обмотки статора подключают к главной питающей сети переменного тока непосредственно. Достоинство – простота схемного решения и управления, минимум аппаратуры. Недостаток – большой пик пускового тока, - на уровне тока короткого замыкания (до 10 номинального), вследствие чего возможна недопустимая просадка напряжения сети (сбой работы других потребителей) и значительные электродинамические усилия в обмотках статора, а также необходимость применения мощного пускателя.

Реакторный пуск: обмотки статора подключаются к сети через реакторы, которые по окончании пуска закорачиваются контактором. Достоинство – более плавный разгон, меньше пик пускового тока (около трех номинального). Недостаток – усложнение схемы и управления, увеличение габаритов и стоимости аппаратуры.

Автотрансформаторный пуск: наиболее аппаратно сложный и дорогой.

Частотный пуск: обмотки статора подключают к сети через преобразователь частоты, из которых наиболее простой непосредственный, однако он содержит 18 тиристорных групп, что дорого, тем более, что по окончании пуска преобразователь закорачивается и в нормальной работе не используется. По этой причине практического применения нет, несмотря на то, что пусковой ток не превышает номинальный и обеспечивается практически идеальная плавность пуска.

Квазичастотный пуск: в качестве преобразователя используется тиристорный фазорегулятор из тиристорных групп. По динамике несколько уступает частотному пуску, по стоимости и сложности конкурентно способен с реакторным. В настоящее время квазичастотный пуск находит широкое применение в электроприводах с асинхронными короткозамкнутыми двигателями.

При исследовании режима пуска синхронной машины принимается:

- ротор имеет демпферную обмотку с параметрами  $X_{Dl}, R_D$  (составляющие  $X_{Dl}, R_D$  – в продольной оси,  $X_{ql}, R_q$  – в поперечной оси);
- в продольной оси ротора размещена обмотка возбуждения, к которой подключен внешний резистор  $RR$ .

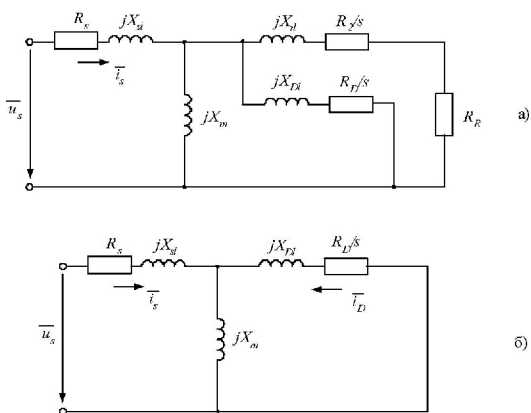


Рис. 1 Схемы замещения синхронной машины полная (а) и упрощенная (б) для статорной системы координат

На рис. 1 приведена полная (а) и упрощенная (б) схемы замещения СМ для статорной системы координат.

Учитывая, что внешнее сопротивление  $R_R$  на порядок больше активного сопротивления обмотки возбуждения  $R_f$  СМ и, тем более, активного сопротивления демпферной обмотки  $R_D$ , а также то, что индуктивное сопротивление рассеяния обмотки возбуждения  $X_{fl}$  превосходит индуктивное сопротивление демпферной обмотки  $X_{Dl}$ , из полной схемы замещения СМ по рис. 1, а можно исключить цепь  $(jX_{fl} + \frac{R_f}{s} + R_R)$ . Упрощенная схема замещения СМ приведена на рис. 1, б.

Из рис. 1, б видно, что схема замещения синхронной машины при пуске идентична схеме замещения асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором. Соответствующим образом математический аппарат исследования синхронной машины при пуске повторяет выкладки, полу-

ченые при аналитическом исследовании асинхронного двигателя.

На рис. 2 приведены схемы замещения синхронной машины для продольной d и поперечной q осей.

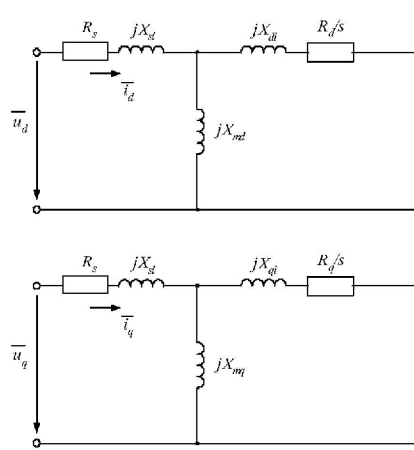


Рис. 2 Схемы замещения синхронной машины для продольной (а) и поперечной (б) осей

$$\begin{aligned} \bar{i}_{SL} &= \frac{\bar{i}_d + \hat{i}_d}{2} + j \frac{\bar{i}_q + \hat{i}_q}{2} = \\ &= \bar{u}_{SL} \left[ \frac{\bar{Y}_d + \bar{Y}_q}{2} + \frac{\hat{Y}_d + \hat{Y}_q}{2} \cdot \exp(-2jS\theta_S) \right]. \end{aligned} \quad (1)$$

Здесь  $\bar{Y} = \frac{1}{Z}$  - проводимость схем замещения;

$\hat{i}, \hat{Y}$  - сопряженные векторы, например, если  $\bar{i} = I \cdot \exp j\theta$ , то  $\hat{i} = I \cdot \exp(-j\theta)$ .

Обратное преобразование в систему координат статора дает:

$$\bar{i}_S = U_S \left[ \frac{\bar{Y}_d + \bar{Y}_q}{2} \cdot \exp j\theta_S + \frac{\hat{Y}_d - \hat{Y}_q}{2} \cdot \exp(1-2S)j\theta_S \right]. \quad (2)$$

Как видно из выражения (2) ток  $\bar{i}_S$  состоит из двух со-

ставляющих. Первая  $\left[ U_S \cdot \frac{\bar{Y}_d + \bar{Y}_q}{2} \cdot \exp j\theta_S \right]$  - это переменный ток с частотой  $\omega_s$ , вторая

$U_S \left[ \frac{\hat{Y}_d - \hat{Y}_q}{2} \cdot \exp(1-2S)j\theta_S \right]$  - тоже переменный ток, но с частотой  $(1-2S)\omega_s = (-\omega_s + 2\omega_R)$  и его вектор

вращается в обратном направлении.

Для определения асинхронного момента синхронной машины в процессе разгона воспользуемся следующим рассуждением.

В общем виде момент определяется выражением:

$$\bar{M} = \frac{3}{2} \bar{\psi}_s \times \bar{i}_s = \frac{3}{2} \text{Im}[\hat{\psi}_s \cdot \bar{i}_s], \quad (3)$$

где

$$\bar{\psi}_s = \frac{\bar{u}_s}{j\omega_s} = \frac{U_s}{j\omega_s} \cdot \exp j\theta_s, \quad (4)$$

а вектор тока  $\bar{i}_S$  определяется выражением (2).

Подставляя в (3) значения  $\bar{\psi}_s$  и  $\bar{i}_S$  согласно (4) и (2), находим:

$$M = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_s^2}{\omega_s} \text{Im} \left[ \frac{\exp(-j\theta_s)}{-j} \left( \frac{\bar{Y}_d + \bar{Y}_q}{2} \cdot \exp j\theta_s + \frac{\hat{Y}_d - \hat{Y}_q}{2} \cdot \exp j(1-2S)\theta_s \right) \right]$$

откуда мгновенная величина момента:

$$M = \frac{3}{2} \cdot \frac{U_s^2}{\omega_s} \text{Re} \left[ \frac{\bar{Y}_d + \bar{Y}_q}{2} + \frac{\hat{Y}_d - \hat{Y}_q}{2} \cdot \exp(-j2S\theta_s) \right]. \quad (5)$$

Таким образом, момент складывается из двух составляющих. Первая составляющая - это вращающий асинхронный момент  $M_A$ , вторая составляющая - момент  $M_p$ , пульсирующей частотой  $2s\omega_s$  относительно значения вращающего момента.

Рассмотрим одну характерную особенность асинхронного пуска синхронной машины с явно выраженными полюсами. Вследствие несимметрии ротора явнополюсной синхронной машины ее момент в процессе разгона при скорости чуть менее половины синхронной ( $s \geq 0.5$ ), несколько увеличивается, а далее, при скорости вращения ротора чуть более половины синхронной ( $s \leq 0.5$ ) резко уменьшается, рис. 3. Объяснение этому факту следующее.

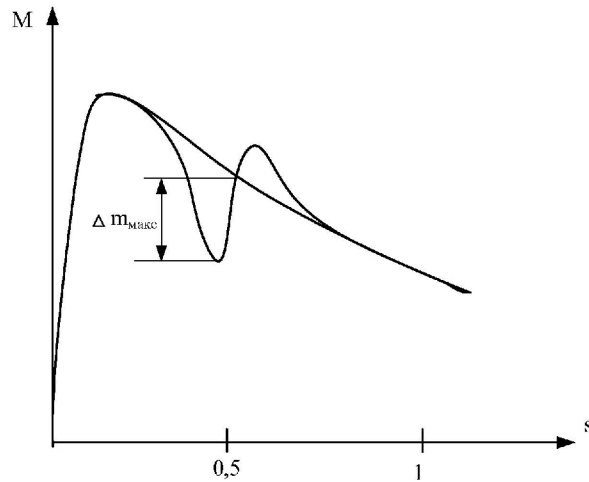


Рис. 3 Изменение вращающего момента синхронной машины при разгоне

Составляющие тока  $\bar{i}_s$ , согласно (2), создают соответственные намагничивающие силы, первая из которых (прямая) вращается относительно статора с частотой  $w_s$ , как и поле статора, и создает положительный вращающий момент ротора, а вторая составляющая (обратная), вращается с частотой  $(1-2S)w_s = (-w_s + 2w_R)$ . Обратная составляющая намагничивающей силы действует двояко. При  $s \geq 0.5$  частота ее вращения отрицательная  $(1-2S)w_s < 0$ , момент от нее действует на статор в обратном направлении, следовательно, на ротор в прямом направлении, т.е. суммируется с положительным вращающим моментом ротора. При  $s \leq 0.5$  наоборот, момент, создаваемый обратной намагничивающей силой, вычитается из положительного вращающего момента. Для успешного пуска синхронной машины важно, чтобы отрицательный момент, создаваемый обратной намагничивающей силой, не привел к нарушению процесса пуска.

Отрицательный момент, создаваемый обратной составляющей тока в роторе:

$$\Delta m_{\max} \leq (1.3 \dots 2.7) \frac{3U_s^2 \left| \bar{Y}_d - \bar{Y}_q \right|^2}{w_s \left| \bar{Y}_d + \bar{Y}_q \right|^2}. \quad (6)$$

В заключении аналитических исследований системы квазичастотного регулирования отметим важную особенность, присущую ей. Как ранее было отмечено, при прямом асинхронном пуске асинхронного двигателя в зоне скольжения  $s \ll 0.5$  ( $w_R \gg 0.5w_{\text{шном}}$ ) при  $s \leq 0.05$  в величине вращающегося момента появляется провал. Величина снижения вращающегося момента двигателя согласно (6) пропорциональна квадрату действующего значения приложенного напряжения

$$\Delta m_{\max} = U^2 G.$$

При квазичастотном регулировании фазорегулятор жестко задает напряжение  $U_{0.25} = 0.25U_G$  на предпоследней ступени частоты  $w_{0.25} = 0.25w_{\text{шном}}$ . Скольжение при этом устанавливается  $s \approx 0.05$ . Переход на последнюю ступень частоты  $1.0w_{1.0} = w_{\text{шном}}$  с напряжением  $U_{1.0} = U_G$  равносильен «набросу» на двигатель напряжения  $0.75 \cdot U_G$ . При этом провал вращающегося момента ориентировочно будет:

$$\Delta m_{D0} \approx (0.75U_G)^2 = 0.56 \cdot U^2 G,$$

т.е. почти вдвое меньше, чем при прямом пуске.