

ВЛИЯНИЕ НЕСИММЕТРИИ РОТОРА НА ПУСКОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СИНХРОННОГО РЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ

Е. В. Кононенко, Т. В. Чешева

(Представлена научным семинаром кафедр электрических машин
и общей электротехники)

Синхронный реактивный двигатель без пусковой обмотки на роторе и шихтованным сердечником при работе в асинхронном режиме является примером наличия в машине только магнитной несимметрии ротора. Изучение этого случая представляет в основном теоретический интерес не только для исследования асинхронного режима работы синхронного реактивного двигателя, но и других электрических машин, в конструкции ротора которых имеются явно выраженные полюса без пусковых обмоток (редукторные, шаговые и другие синхронные машины). В литературе этот вопрос уже рассматривался [1 и др.], но освещен и разработан крайне недостаточно.

При расчете и исследовании асинхронного режима синхронного реактивного двигателя без пусковой обмотки на роторе может быть использована система дифференциальных уравнений Парка—Горева. При этом необходимо иметь в виду, что установившиеся значения операторных сопротивлений машины будут равны

$$X_d(js) = x_d, \quad X_q(js) = x_q. \quad (1)$$

Систему дифференциальных уравнений равновесия напряжений для данного случая можно представить так:

$$\begin{aligned} u_d &= [px_d + r]i_d - x_q(1 - s)i_q, \\ u_q &= x_d(1 - s)i_d + [px_q + r]i_q. \end{aligned} \quad (2)$$

Решая эти уравнения, найдем значения комплексов тока:

$$\begin{aligned} \bar{i}_d &= \frac{[r - j(1 - 2s)x_q]\bar{U}_d}{r^2 + jrs(x_d + x_q) + (1 - 2s)x_dx_q}, \\ \bar{i}_q &= \frac{[r - j(1 - 2s)x_d]\bar{U}_q}{r^2 + jrs(x_d + x_q) + (1 - 2s)x_dx_q}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\bar{u}_d = Ue^{j(st + \delta_0)}$ $\bar{u}_q = -j\bar{U}_d$,

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

При исследовании установившегося асинхронного режима удобно оперировать с векторами пространственных волн. Пространственный вектор тока статора $\bar{I}$ можно представить как сумму пространственных векторов тока прямой $\bar{I}_1$ и обратной $\bar{I}_2$ последовательностей:

$$\bar{I} = \bar{I}_1 + \bar{I}_2,$$

где

$$\bar{I}_1 = \frac{\left[r - j \frac{1}{2} (1 - 2s)(x_d + x_q) \right] U e^{j(st + \delta_0)}}{r^2 + jrs(x_d + x_q) + (1 - 2s)x_d x_q}, \quad (5)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{-j \frac{1}{2} (1 - 2s)(x_d - x_q) U e^{-j(st + \delta_0)}}{r^2 - jrs(x_d + x_q) + (1 - 2s)x_d x_q}. \quad (6)$$

Проанализируем закон изменения каждой из этих составляющих. Если за независимый переменный параметр принять $k=2s-1$, то выражения для токов $\bar{I}_1$ и $\bar{I}_2$ можно записать в следующем виде:

$$\begin{aligned} \bar{I}_1 &= \frac{\left[r + j \frac{1}{2} (x_d + x_q)k \right] U e^{j(st + \delta_0)}}{\left[r^2 + j \frac{1}{2} r(x_d + x_q) \right] + \left[j \frac{1}{2} r(x_d + x_q) - x_d x_q \right] k} = \\ &= \frac{\bar{A} + Bk}{\bar{C} + Dk} U e^{j(st + \delta_0)} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \bar{I}_2 &= \frac{\left[j \frac{1}{2} (x_d - x_q)k \right] U e^{-j(st + \delta_0)}}{\left[r^2 - j \frac{1}{2} r(x_d + x_q) \right] + \left[-j \frac{1}{2} r(x_d + x_q) - x_d x_q \right] k} = \\ &= \frac{\bar{E}k}{\bar{C}^* + D^*k} \cdot U e^{-j(st + \delta_0)}. \end{aligned} \quad (8)$$

Уравнение (7) — есть уравнение окружности, не проходящей через начало координат. Следовательно, конец вектора тока прямой последовательности $\bar{I}_1$ при изменении скольжения в пределах $\pm \infty$ описывает окружность. Уравнение (7) дает возможность найти вектор центра окружности и радиус-вектор. Вектор центра окружности, описываемой концом вектора тока $\bar{I}_1$, есть

$$\bar{N}_1 = \left[\frac{r}{r^2 + x_d x_q} - j \frac{x_d x_q + \frac{1}{4}(x_d + x_q)^2}{(x_d + x_q)(x_d x_q + r^2)} \right] U e^{j(st + \delta_0)}. \quad (9)$$

Радиус-вектор этой окружности

$$\bar{R}_1 = \left[-j \frac{\frac{1}{4} (x_d - x_q)}{r^2 + x_d x_q} \right] U e^{j(st + \delta_0)}. \quad (10)$$

Модуль диаметра окружности равен

$$d_{01} = \frac{\frac{1}{2} (x_d - x_q)U}{r^2 + x_d x_q}. \quad (11)$$

Уравнение (8) есть уравнение окружности, проходящей через начало координат. Радиус-вектор этой окружности равен

$$\bar{R}_2 = \frac{\frac{1}{2}(x_d - x_q) \left[r - j \frac{1}{2} (x_d + x_q) \right] U e^{-j(st + \delta_0)}}{(x_d + x_q)(r^2 + x_d x_q)}. \quad (12)$$

Модуль диаметра этой окружности, описываемой концом вектора тока $\bar{I}_2$ обратной последовательности, равен

$$d_{02} = \frac{(x_d - x_q) \sqrt{r^2 + \frac{1}{4}(x_d + x_q)^2}}{(x_d + x_q)(r^2 + x_d x_q)} \cdot U. \quad (13)$$

Если пренебречь величиной активного сопротивления обмотки статора, то есть считать, что $r=0$, то уравнения (7) и (8) примут вид

$$\bar{I}_1 = \frac{1}{2} \frac{j(x_d + x_q) U e^{j(st + \delta_0)}}{x_d x_q}, \quad (14)$$

$$\bar{I}_2 = \frac{1}{2} \frac{j(x_d - x_q) U e^{-j(st + \delta_0)}}{x_d x_q}. \quad (15)$$

Амплитуда тока статора при $r=0$ будет

$$I = \frac{\sqrt{x_d^2 + x_q^2}}{x_d x_q} \cdot U. \quad (16)$$

Из уравнений (14) и (16) видно, что при $r=0$ ток статора не зависит от величины скольжения. С физической точки зрения пренебрежение активным сопротивлением обмотки статора приводит к следующему. При $r=0$ обмотка статора становится сверхпроводником, поэтому несимметрия ротора не оказывает влияние на работу машины, так как поток обратной последовательности, обусловленный несимметрией ротора, не может проникнуть в статор. Следовательно, чтобы учитывать несимметрию ротора, необходимо при исследованиях и расчетах оперировать с реальными значениями активных сопротивлений в обмотке статора.

Анализ полученных выражений для токов $\bar{I}_1$ и $\bar{I}_2$ позволяет заключить, что токи прямой и обратной последовательностей синхронной реактивной машины без пусковых обмоток на роторе определяются в основном параметрами синхронного режима x_d и x_q . На рис. 1, а приведены кривые модулей токов $\bar{I}_1$ и $\bar{I}_2$ и амплитуды вектора тока статора $\bar{I}$ в зависимости от скольжения для двух значений активного сопротивления обмотки статора: $r=0,06$ и $r=0,2$. В этих кривых имеет место провал при полусинхронной скорости. Этот провал не обнаруживается, если пренебречь активным сопротивлением обмотки статора. Основное влияние на форму кривой $I=f(s)$ оказывает обратное поле, обусловленное явнополностью машины. Это поле вращается относительно статора с переменной по величине и направлению скоростью $(1-2s)$ и демпфируется возникающими в нем токами соответствующей частоты. При скольжениях, близких к 0,5, демпфирующее действие обмотки статора ослабевает, поскольку с уменьшением частоты возрастает влияние активного сопротивления. При полусинхронной скорости обратное поле становится неподвижным по отношению к обмотке статора и ее демпфирующее влияние по этой причине ослаблено. Отсюда ясно, что границы области скольжения, в которой действие обратного поля проявляется наиболее сильно, определяются величиной активного сопротивления обмотки статора, расширяясь при его увеличении (рис. 1). Амплитуда результирующего обратного поля при $s=0,5$ зависит от степени магнитной несимметрии, определяемой разностью синхронных индуктивных сопротивлений по осям d и q . Кривая $I=f(s)$ симметрична относительно $s=0,5$ из-за отсутствия электрической несимметрии ротора.

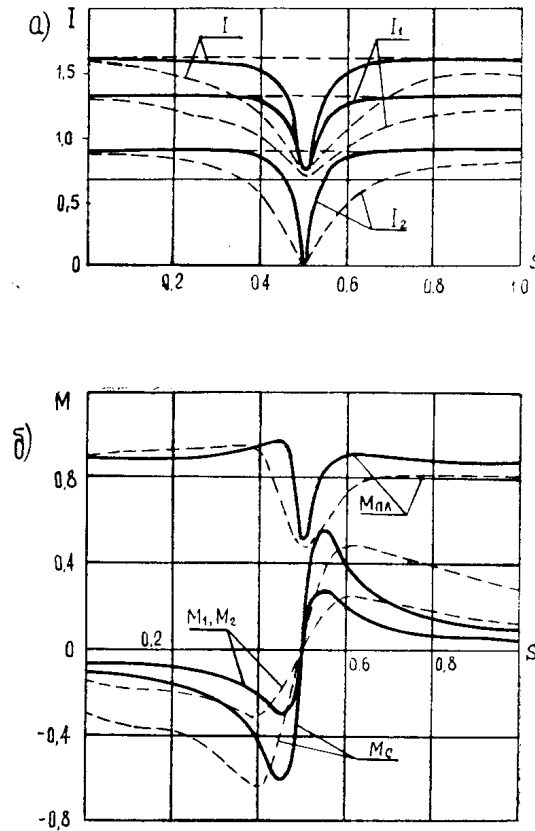


Рис. 1. Пусковые характеристики синхронного реактивного двигателя без пусковых обмоток на роторе, имеющего следующие параметры: $x_d=2,3$; $x_q=0,45$; $x''_d=x''_q=0,2$; $T_d=T_q=0$. Сплошные линии — расчет при $r=0,06$, пунктирные линии — расчет при $r=0,2$: а) токовые пусковые характеристики; б) моментные пусковые характеристики.

Электромагнитный момент вращения синхронного реактивного двигателя без пусковых обмоток не остается постоянным во времени, и его можно представить как сумму среднего момента M_c и переменного $M_{пл}$, пульсирующего во времени с частотой удвоенного скольжения. Так как ток в сердечнике ротора отсутствует, то возникновение момента M_c , равного сумме моментов прямой M_1 и обратной M_2 последовательностей, объясняется лишь деформацией магнитного потока из-за явнополюсности ротора.

Проведенный анализ позволяет установить, что в данном случае моменты прямой и обратной последовательностей равны по величине и направлению и могут быть записаны в следующем виде:

$$M_1 = M_2 = - \frac{\frac{1}{4} r (1 - 2s) (x_d - x_q)^2 U^2}{[r^2 + (1 - 2s) x_d x_q]^2 + r^2 s^2 (x_d + x_q)^2} \quad (17)$$

Тогда средний момент будет равен

$$M_c = M_1 + M_2 = 2M_1.$$

Из анализа этого уравнения следует, что в синхронном реактивном двигателе без пусковой обмотки на роторе при работе в асинхронном режиме ($s = \text{const}$) возникает постоянный во времени момент. Необходимо

подчеркнуть, что речь идет о среднем значении асинхронного момента, величина которого не зависит от положения ротора в пространстве.

Из уравнения (18) видно, что при изменении скольжения в пределах от 1,0 до 0,5 момент M_c положителен, а при $s < 0,5$ изменяет знак на противоположный. Следовательно, синхронный реактивный двигатель без пусковой обмотки на роторе при изменении скорости вращения от нуля до полусинхронной может работать двигателем, при дальнейшем увеличении скорости — переходит в генераторный режим. Следовательно, назависимый пуск синхронного реактивного двигателя и его синхронизация возможны только при наличии на роторе пусковой обмотки. Кривые $M_c = f(s)$ при двух значениях активного сопротивления обмотки статора представлены на рис. 1, б.

Увеличение активного сопротивления обмотки статора сводится в основном к увеличению пускового момента. При этом на величину провала это обстоятельство не оказывает значительного влияния. При $r=0$ средний момент равен нулю. То есть влияние магнитной несимметрии при $r=0$ обнаружить невозможно. Это важное обстоятельство следует учитывать, если исследуется вообще пусковой процесс явнополюсной машины.

Представляет интерес анализ выражения для амплитуды пульсирующего момента и его зависимости от скольжения. Амплитуду пульсирующего момента можно представить следующим образом:

$$M_{пл} = \sqrt{\frac{b^{12}}{c^2 + d^2} \left[U^2 + 4 \frac{r^2 + b^2}{c^2 + d^2} r^2 \left(\frac{1-s}{1-2s} \right)^2 - 4U \frac{rc + bd}{c^2 + d^2} \left(\frac{1-s}{1-2s} \right) \right]}, \quad (19)$$

где

$$b^1 = 1/2 (1 - 2s) (x_d - x_q),$$

$$b = 1/2 (1 - 2s) (x_d + x_q),$$

$$c = r^2 + (1 - 2s) x_d x_q,$$

$$d = rs (x_d + x_q).$$

По этой формуле $M_{пл}$ можно рассчитывать для всех значений скольжения, кроме $s=0,5$. На рис. 1, б представлены зависимости $M_{пл} = f(s)$ для двух значений r . Из этих кривых видно, что пульсирующий момент мало зависит от скольжения за исключением области около полусинхронной скорости вращения. Провал в этой области зависит в основном от соотношения синхронных индуктивных сопротивлений x_d и x_q , а увеличение активного сопротивления обмотки статора сказывается в основном на расширении зоны провала и незначительном уменьшении $M_{пл}$ при пуске.

При исследовании асинхронного режима синхронного реактивного двигателя важно проследить влияние не только магнитной несимметрии ротора на пусковые характеристики, но и как изменятся характеристики, если на роторе будет пусковая обмотка либо по продольной оси, либо по поперечной. На рис. 2 и 3 представлены пусковые характеристики синхронного реактивного двигателя со следующими параметрами $x_d = 2,3$; $x_q = 0,45$; $x''_d = 0,2$; $x''_q = 0,2$; $r = 0,06$. Но в одном случае

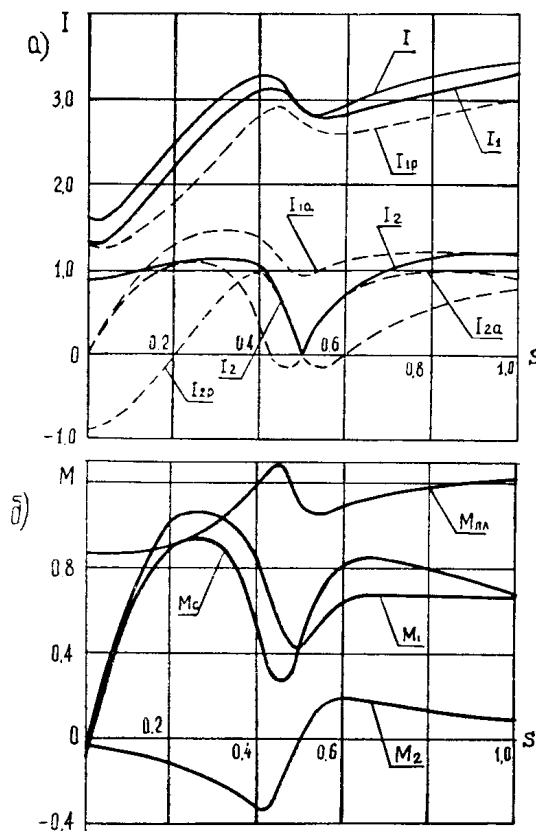


Рис. 2. Пусковые характеристики синхронного реактивного двигателя с одной обмоткой на роторе, имеющего следующие параметры: $x_d=2,3$; $x_q=0,45$; $x''_d=0,2$; $x''_q=0,2$; $T_d=40$; $T_q=0$. а) токовые пусковые характеристики; б) моментные пусковые характеристики

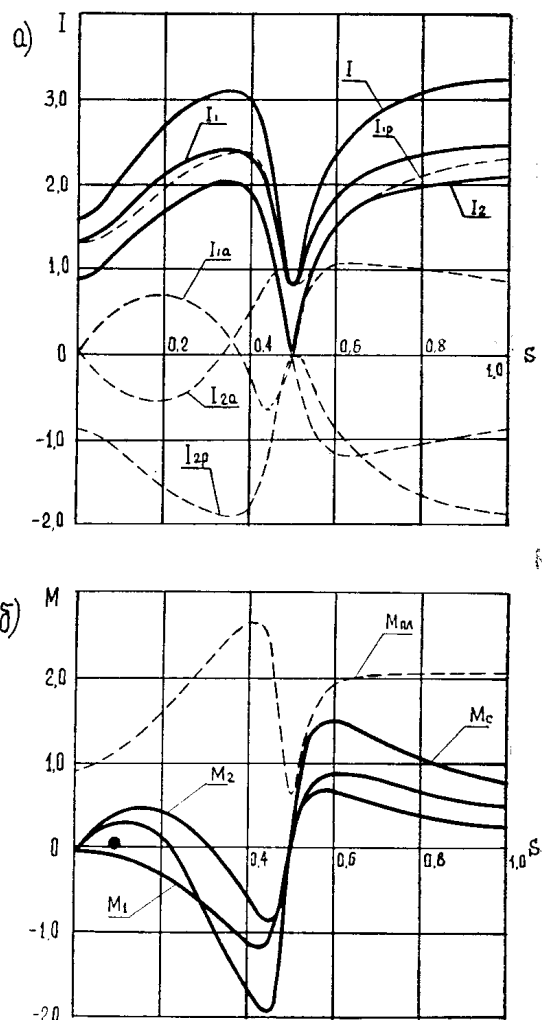


Рис. 3. Пусковые характеристики синхронного реактивного двигателя с одной обмоткой на роторе, имеющего следующие параметры: $x_d=2,3$; $x_q=0,45$; $x''_d=x''_q=0,2$; $T_d=0$; $T_q=10$. а) токовые пусковые характеристики; б) моментные пусковые характеристики

(рис. 2) отсутствует обмотка по продольной оси, а в другом (рис. 3) — по поперечной. Расчеты этих характеристик были проведены точным методом на цифровой вычислительной машине «Проминь». Из приведенных данных видно, что при отсутствии на роторе пусковой обмотки по продольной оси [$T_d=0$], синхронный реактивный двигатель не может развить скорости более полусинхронной (рис. 3, б). Сравнивая кривые $M_c=f(s)$, представленные на рис. 2, б и рис. 3, б, можно обнаружить значительную разницу в степени влияния параметров обмотки ротора на пусковые характеристики. Различие пусковых характеристик (рис. 2, б и рис. 3, б) объясняется прежде всего величиной разности операторных сопротивлений по осям d и q, которая зависит от параметров обмоток ротора (рис. 4).

Влияние соотношения установившихся значений операторных сопротивлений по осям d и q на пусковые характеристики синхронного

реактивного двигателя можно проследить, сравнив рассмотренные выше характеристики для трех случаев:

- 1) машина имеет пусковую обмотку только по продольной оси;
- 2) машина имеет пусковую обмотку только по поперечной оси;
- 3) машина не имеет пусковых обмоток на роторе.

Пусковые характеристики для этих машин представлены на рис. 1÷3, а на рис. 4 представлены зависимости модулей операторных сопротивлений от скольжения для всех трех случаев. Наибольший про-

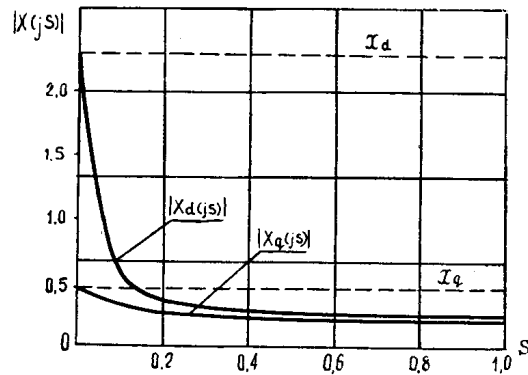


Рис. 4. Зависимости модулей установившихся значений операторных сопротивлений по осям d и q от скольжения для синхронного реактивного двигателя, имеющего следующие параметры: $x_d=2,3$; $x_q=0,45$; $x''_d=x''_q=0,2$; $T_d=40$; $T_q=10$

вал в пусковых характеристиках наблюдается у синхронного реактивного двигателя, у которого отсутствует обмотка по продольной оси (рис. 3). Величина разности операторных сопротивлений по осям d и q, соответствующая этому варианту, — наибольшая (рис. 4):

$$\begin{aligned} x_d(jS) &= x_d, \\ X_q(jS) &= \frac{x_q + jSx''_q T_q}{1 + jST_q}. \end{aligned} \quad (20)$$

Наименьший провал в пусковых характеристиках наблюдается в том случае, когда на роторе отсутствует обмотка по поперечной оси, этому случаю соответствует наименьшая разность операторных сопротивлений по осям d и q (рис. 2).

$$\begin{aligned} X_d(jS) &= \frac{x_d + jSx''_d T_d}{1 + jST_d}, \\ x_q(jS) &= x_q \end{aligned} \quad (21)$$

Синхронный реактивный двигатель без обмоток на роторе является промежуточным случаем среди первых двух. Разность операторных сопротивлений по осям d и q для данного случая (рис. 1), которая является разностью синхронных индуктивных сопротивлений, определяет величину провала в пусковых характеристиках, который больше, чем у машины с пусковой обмоткой только по продольной оси, и меньше, чем у машины с пусковой обмоткой только по поперечной оси.

Таким образом, вид пусковых характеристик асинхронного режима синхронного реактивного двигателя в основном определяется соотношением установившихся значений операторных сопротивлений по осям d и q . Следовательно, это — основной фактор, который определяет возможность работы синхронного реактивного двигателя в асинхронном режиме и условия для нормального вхождения в синхронизм. Это важное обстоятельство необходимо иметь в виду при проектировании таких двигателей.

ЛИТЕРАТУРА

1. Г. Г. Барщевский. Электромагнитный момент реактивной машины. «Электричество», 1965, № 3.
 2. К. Р. Kovách, Über Asynchronmotoren mit asymmetrischem Laufer, Archiv für Elektrotechnik, 1964, 49 Band, Heft 3.
-