

ОБ ИНДИВИДУАЛЬНОМ УЧЕТЕ ВЫТЕСНЕНИЯ ТОКОВ РОТОРА ПРИ РАСЧЕТАХ ГРУППОВОГО САМОЗАПУСКА АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ СОБСТВЕННЫХ НУЖД ТЭС

Докт. техн. наук, проф. НОВАШ В. И., МИНАЧЕВ Р. Ф.

Белорусский национальный технический университет

Для привода механизмов собственных нужд тепловых электрических станций (ТЭС) применяются короткозамкнутые асинхронные двигатели с улучшенными пусковыми характеристиками (с глубокими пазами ротора, двойной беличьей клеткой и т. п.). В пусковых режимах таких двигателей резко проявляется эффект вытеснения тока в стержнях обмотки ротора в элементы, удаленные от дна паза. В начальный момент пуска при еще неподвижном роторе частота тока в обмотке ротора равна синхронной частоте, обмотка ротора обладает максимальным активным сопротивлением. С увеличением частоты вращения ротора частота тока в обмотке уменьшается, эффект вытеснения тока слабеет, активное сопротивление обмотки уменьшается. Увеличение активного сопротивления короткозамкнутой обмотки ротора в начальной стадии пуска обуславливает возрастание электромагнитного момента двигателя и способствует успешности самозапуска. Элементы стержня обмотки ротора, расположенные ближе к дну паза, обладают большей индуктивностью рассеяния, в связи с чем индуктивность рассеяния обмотки ротора при увеличении скольжения уменьшается.

Компьютерные расчеты самозапуска выполняются на базе математических моделей, содержащих математическое описание всех электродвигателей, источника резервного питания и других элементов расчетной схемы, заметно влияющих на поведение электродвигателей (механизмы собственных нужд, стационарные нагрузки).

В вычислительных системах для оперативных расчетов самозапуска непосредственно на ТЭС [1] предусматривается индивидуальный учет вытеснения токов ротора путем задания для каждого двигателя зависимостей активного сопротивления и индуктивного сопротивления рассеяния контуров ротора от скольжения функциями $K_r(s)$, $K_x(s)$ [2]. В настоящей статье рассматривается возможность выполнения расчетов группового самозапуска с использованием для учета вытеснения токов ротора обобщенных (усредненных) зависимостей $K_r(s)$, $K_x(s)$, одинаковых для всех электродвигателей, участвующих в самозапуске.

Для обоснования высказанного предположения выполнено большое количество расчетов группового самозапуска по компьютерным программам [1] с использованием индивидуальных и обобщенных характеристик вытеснения токов ротора. Программы разработаны на базе достаточно полных математических моделей электродвигателей.

Исходными математическими зависимостями для построения математической модели асинхронного электродвигателя являются уравнения синхронной машины с двумя эквивалентными демпферными контурами на роторе [3]. В отличие от синхронного генератора такого типа у асинхронного электродвигателя отсутствует обмотка возбуждения, параметры контуров ротора в продольной и поперечной осях одинаковы.

После исключения из математического описания синхронного генератора уравнения обмотки возбуждения и упрощений, связанных с симметрией ротора, уравнения электрических контуров статора и ротора асинхронного короткозамкнутого электродвигателя представляются в следующем виде:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_A}{dt} = u_A - R_a i_A; \\ \frac{d\psi_B}{dt} = u_B - R_a i_B; \\ \frac{d\psi_{\Delta d}}{dt} = -R_r i_{\Delta d}; \\ \frac{d\psi_{\Delta q}}{dt} = -R_r i_{\Delta q}; \\ u_A + u_B + u_C = 0; \\ i_A + i_B + i_C = 0. \end{cases}$$

Уравнения движения ротора:

$$\begin{cases} J \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{эл}} - M_{\text{мех}}; \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega. \end{cases}$$

В уравнениях приняты следующие обозначения параметров двигателя: u_A, u_B, u_C – напряжения, приложенные к обмоткам статора, соединенным в звезду; i_A, i_B, i_C – токи в обмотках статора; $i_{\Delta d}, i_{\Delta q}$ – токи в эквивалентных демпферных контурах; R_a – активное сопротивление обмотки статора; R_r – активное сопротивление эквивалентного демпферного контура ротора; J – момент инерции агрегата «механизм–двигатель»; ω – угловая частота вращения ротора; γ – угол положения продольной оси ротора относительно оси обмотки фазы A статора; $M_{\text{эл}} = \sqrt{3}(\psi_A i_B - \psi_B i_A)p$ – вращающий электромагнитный момент; p – число пар полюсов; $M_{\text{мех}} = M_0 + (k_{\text{загр}} M_{\text{ном}} - M_0) \left(\frac{\omega}{\omega_{\text{ном}}} \right)^n$ – момент сопротивления механизма.

Потокосцепления контуров статора и ротора:

$$\begin{cases} \psi_A = L_a i_A + m_{ar} (i_{\Delta d} \cos \gamma - i_{\Delta q} \sin \gamma); \\ \psi_B = L_a i_B + m_{ar} \left[i_{\Delta d} \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) - i_{\Delta q} \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \right]; \\ \psi_{\Delta d} = L_r i_{\Delta d} + m_{ar} \left[i_A \cos \gamma + \frac{1}{\sqrt{3}} (i_B - i_C) \sin \gamma \right]; \\ \psi_{\Delta q} = L_r i_{\Delta q} + m_{ar} \left[-i_A \sin \gamma + \frac{1}{\sqrt{3}} (i_B - i_C) \cos \gamma \right], \end{cases}$$

где $L_a = L_{\sigma a} + m_{ar}$ – полная индуктивность статора; $L_r = L_{\sigma r} + m_{ar}$ – полная индуктивность контура ротора; $L_{\sigma a}$, $L_{\sigma r}$ – индуктивности рассеяния контуров статора и ротора; m_{ar} – амплитуда коэффициента взаимоиндукции между контурами ротора и статора.

В этих выражениях все величины выражены в именованных единицах СИ. Однако конструктивные параметры и параметры режима контуров ротора (токи, потокосцепления) удобнее задавать и оценивать в относительных единицах. С учетом этого в уравнениях электродвигателя целесообразно использовать безразмерные параметры контуров ротора. Уравнения движения также удобно использовать в безразмерной форме.

Дифференциальные уравнения:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_A}{dt} = u_A - R_a i_A; \\ \frac{d\psi_B}{dt} = u_B - R_a i_B; \\ \frac{d\psi_{\Delta d^*}}{dt} = -\omega_0 R_r i_{\Delta d^*}; \\ \frac{d\psi_{\Delta q^*}}{dt} = -\omega_0 R_r i_{\Delta q^*}; \\ \frac{d\gamma}{dt} = \omega_0 (1 - s); \\ \frac{ds}{dt} = \frac{1}{T_J} (M_{\text{мех}^*} - M_{\text{эл}^*}), \end{cases} \quad (1)$$

где $s = 1 - \frac{\omega}{\omega_0}$ – скольжение; ω – угловая частота вращения ротора; ω_0 –

номинальная угловая частота; $T_J = J \frac{\omega_0}{M_{\text{ном}}}$ – постоянная инерции меха-

низма «агрегат–двигатель».

Алгебраические уравнения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \Psi_A = L_a i_A + x_{ad*} \Psi_B (i_{\Delta d*} \cos \gamma - i_{\Delta q*} \sin \gamma); \\ \Psi_B = L_a i_B + x_{ad*} \Psi_B \left[i_{\Delta d*} \cos \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) - i_{\Delta q*} \sin \left(\gamma - \frac{2\pi}{3} \right) \right]; \\ \Psi_{\Delta d*} = x_{r*} i_{\Delta d*} + \frac{x_{ad*}}{I_B} \left[i_A \cos \gamma + \frac{1}{\sqrt{3}} (i_B - i_C) \sin \gamma \right]; \\ \Psi_{\Delta q*} = x_{r*} i_{\Delta q*} + \frac{x_{ad*}}{I_B} \left[-i_A \sin \gamma + \frac{1}{\sqrt{3}} (i_B - i_C) \cos \gamma \right], \end{array} \right. \quad (2)$$

где $L_a = (x_{\sigma a*} + x_{ad*})L_B$ – полная индуктивность статора; $x_{r*} = x_{\sigma r*} + x_{ad*}$ – полное индуктивное сопротивление ротора, о. е.; x_{ad*} – индуктивное сопротивление ветви намагничивания, о. е.; I_B, Ψ_B, L_B – базисный ток, потокосцепление, индуктивность.

Математические модели короткозамкнутых АД с улучшенными пусковыми характеристиками некоторые авторы представляют уравнениями, описывающими до трех–четырёх демпферных контуров в каждой оси с различными соотношениями активных и реактивных сопротивлений. Согласно методике ОРГРЭС, на роторе такого двигателя имеется по одному эквивалентному контуру в продольной и поперечной оси, у которых активные сопротивления и реактивности рассеяния $R_{r*}, x_{\sigma r*}$ являются заданными функциями скольжения $R_{r*}(s), x_{\sigma r*}(s)$:

$$R_{r*} = R_{r0*} (a_R + b_R k_R); \quad (3)$$

$$x_{\sigma r*} = x_{\sigma r0*} (a_x + b_x k_x), \quad (4)$$

где $R_{r0*}, x_{\sigma r0*}$ – активное сопротивление и индуктивное сопротивление рассеяния контуров ротора при $s = 0$; a_R, b_R, a_x, b_x – коэффициенты, определяющие части сопротивлений $R_{r*}, x_{\sigma r*}$, зависящие и не зависящие от частоты; $k_R = f_R(s), k_x = f_x(s)$ – функции, учитывающие изменение сопротивлений контуров ротора из-за вытеснения тока при различных скольжениях s .

На рис. 1, 2 представлены зависимости $K_r(s), K_x(s)$, аппроксимированные полиномами шестой степени, рекомендуемые в [2] для нескольких десятков двигателей, использующихся для привода механизмов собственных нужд.

Было рассмотрено три варианта усреднения характеристик:

- усреднение индивидуальных характеристик методом наименьших квадратов без учета параметров двигателя;
- усреднение индивидуальных характеристик методом наименьших квадратов с учетом частоты использования индивидуальных характеристик для различных типов двигателей;
- использование двух усредненных характеристик для двух групп электродвигателей с резко различающимися моментами инерции.

Приемлемым с точки зрения выполнения условий самозапуска оказался второй вариант. Усредненные характеристики представлены на рис. 1, 2 жирными линиями.

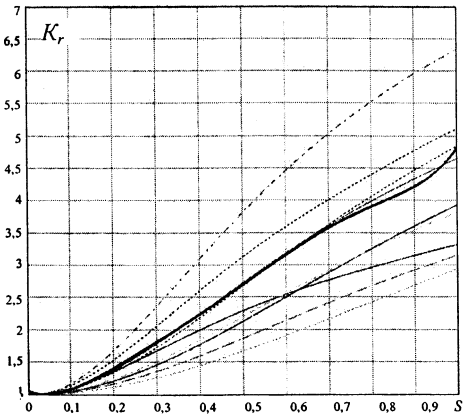


Рис. 1

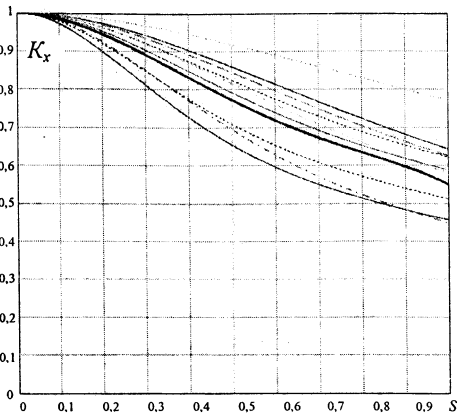


Рис. 2

На рис. 3 приведены результаты расчетов для группы двигателей при КЗ на секции с учетом индивидуальных характеристик, на рис. 4 – с учетом усредненной характеристики.

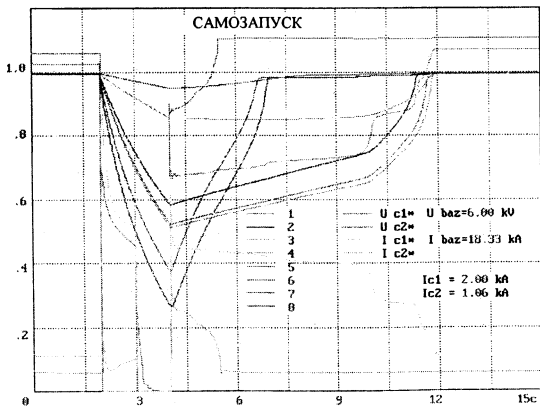


Рис. 3

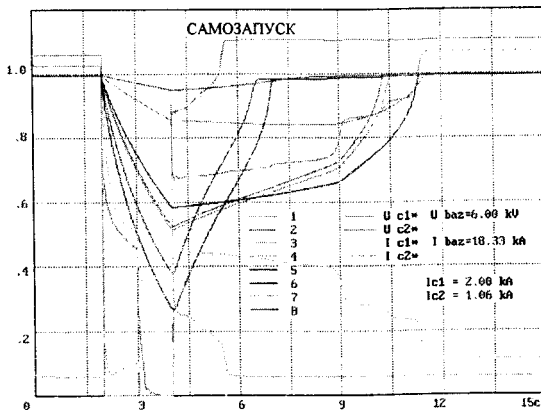


Рис. 4

В процессе расчетов самозапуска различных по количеству групп двигателей установлено:

- двигатель, время самозапуска которого теоретически должно быть больше, может запуститься раньше, если достаточно быстро запустится мощный двигатель на секции;
- даже при значительном отличии усредненной характеристики от реальных процесс самозапуска не будет сильно отличаться, если двигатель не успел сильно затормозиться;
- расхождение результатов расчетов составляет 5...6 % для расчетной группы двигателей при времени паузы 1 с, КЗ – 1 с.

ВЫВОДЫ

1. Рассчитывать процесс самозапуска по усредненным характеристикам возможно.

2. Погрешность в расчете длительности самозапуска при приемлемых длительностях КЗ и бестоковой паузы не превышает 10...20 %.

ЛИТЕРАТУРА

1. Новаш В. И., Глинский Е. В. Вычислительные системы для расчетов самозапуска электродвигателей собственных нужд персоналом электрических станций: Материалы междунар. 52-й НТК БГПА «Технические вузы – республике»: В 7-ми ч. – Мн.; 1997. – Ч. 1. – С. 4.
2. Методические указания по испытаниям электродвигателей собственных нужд электростанций и расчетам режимов их работы при перерывах питания. МУ 34-70-026-82. Союзтехэнерго. – М., 1983. – 96 с.
3. В а ж н о в А. И. Переходные процессы в машинах переменного тока. – Л.: Энергия, Ленингр. отд-ние, 1980. – 256 с.

Представлена кафедрой
электрических станций

Поступила 26.06.2003