

Исследование переходного процесса синхронного двигателя турбокомпрессора при отключении обмотки статора от сети

Вдовин Илья Николаевич, магистрант

кафедры «Электротехники и энергообеспечения предприятий»;

Тумаева Елена Викторовна, доцент, кандидат технических наук

кафедры «Электротехники и энергообеспечения предприятий»

Шемелова Ольга Васильевна, доцент, кандидат физико-математических наук

кафедры «Математики»

Нижнекамский химико-технологический институт (филиал) федерального государственного

бюджетного образовательного учреждения высшего образования

«Казанский национальный исследовательский технологический университет (г. Нижнекамск)

В настоящее время мощные синхронные двигатели на нефтехимическом производстве применяются в системах электропривода насосных, компрессорных и вентиляторных установок.

Основное функциональное назначение синхронных двигателей (СД), работающих в условиях нефтехимического производства, реализуется в установившемся режиме работы: быть приводом с синхронной частотой вращения для турбомеханизмов и служить управляемым источником реактивной мощности в результате регулирования тока в обмотке возбуждения СД. Система возбуждения СД содержит обмотку возбуждения двигателя (ОВД) и возбудительное устройство (ВУ). Применяемые в настоящее время на производстве ВУ СД подразделяются на электромашинные, статические и бесщеточные, однако электромашинные ВУ в настоящее время заменяются на статические.

В случае отключения от сети возбужденный СД достаточно длительное время сохраняет значительную остаточную ЭДС. Учитывая непрерывный режим работы технологического оборудования, с целью исключения коротких замыканий на выводах СД при последующем его включении, следует применять автоматическое гашение поля. Оно при перерыве питания СД позволяет быстро снизить остаточную ЭДС и тем самым предотвратить появление недопустимых значений токов статора в момент подачи напряжения. При гашении поля решающую роль играет результирующее активное сопротивление цепи возбуждения. В БВУ гашение поля производится коротким замыканием ОВД через диоды выпрямителя, а в ТВУ - замыканием ОВД на пусковое сопротивление.

Вышеперечисленные обстоятельства приводят к необходимости комплексного подхода к мероприятиям, направленным на сохранение рабочего состояния СД с учетом установленной системы возбуждения.

Цель исследовательской работы - заключается в исследовании переходных процессов остаточной ЭДС по продольной и поперечной оси и способов ее гашения, с целью исключения коротких замыканий на выводах синхронного двигателя при последующем его включении.

Возбужденный СД после отключения от сети достаточно долго сохраняет значительную остаточную ЭДС.

Большое значение остаточной ЭДС E_q'' отключенного двигателя является фактором, увеличивающим допустимое время повторного подключения СД к электрической сети, т.к. в момент включения двигателя векторы U и внутренней ЭДС двигателя E_q'' находятся в противофазе. Такое подключение может сопровождаться недопустимым для двигателя током статорной обмотки или электромагнитным моментом на валу. Автоматическое гашение поля при перерыве питания СД позволяет быстро снизить остаточную ЭДС и тем самым предотвратить появление недопустимых значений токов статора в момент восстановления питания.

Рассматривается синхронный двигатель СТД 2000-23-УХЛ4, имеющий следующие номинальные параметры:

$$P_{ном} = 2000 \text{ кВт}; S_{ном} = 2300 \text{ кВА}; n_n = 3000 \text{ об/мин}; U_{ном} = 6 \text{ кВ}; \text{КПД} = 96,9\%, \\ I_n / I_{ном} = 6,91; M_{max} / M_{ном} = 2,45; M_n / M_{ном} = 1,62; J = 0,123; \cos \varphi_n = 0,9; \\ x_d = 1,86; x_d' = 0,220; x_d'' = 0,143; x_q'' = 0,160.$$

После отключения СД от электрической сети ток статорной обмотки становится равным $I = 0$, тогда из эквивалентных схем замещения двигателя можно получить следующие соотношения [1]:

$$\left. \begin{aligned} U_q &= 0,734 = E_q'' = E_q' = E_q; \\ U_d &= -0,679 = E_d'' = E_d; \\ U &= \sqrt{(0,734)^2 + (-0,679)^2} = 0,999. \end{aligned} \right\}$$

Система уравнений переходных процессов для режима отключения примет вид:

$$T_j \frac{ds}{dt} = M_{\text{мех}} = 5733;$$

$$T'_{d0} T''_{d0} \frac{d^2 E_q''}{dt^2} + (T'_{d0} + T''_{d0}) \frac{dE_q''}{dt} + E_q'' = \omega E_{qn} (U_f + T_{\sigma 1d} \frac{dU_f}{dt});$$

$$3,32 \cdot 0,018 \cdot \frac{d^2 E_q''}{dt^2} + (3,32 + 0,018) \cdot \frac{dE_q''}{dt} + 0,87 = 1 \cdot 2,47 \cdot (U_f + 1,44 \cdot \frac{dU_f}{dt});$$

$$0,0598 \cdot \frac{d^2 E_q''}{dt^2} + (3,32 + 0,018) \cdot \frac{dE_q''}{dt} + 0,87 = 2,47 \cdot (U_f + 1,44 \cdot \frac{dU_f}{dt});$$

$$T_{1q0} \frac{dE_d''}{dt} + E_d'' = 0;$$

$$0,197 \cdot \frac{dE_d''}{dt} - 0,62 = 0.$$

где $M_{\text{мех}}$ – момент сопротивления механизма; U_f – напряжение на разомкнутой обмотке возбуждения СД, T_j – электромеханическая постоянная времени системы “двигатель-механизм”.

Начальные условия, соответствующие режиму отключения СД от электрической сети:

$$s(0) = s(-0) = 0;$$

$$E_q''(0) = E_q''(-0) = 0,87;$$

$$\frac{dE_q''(0)}{dt} = \frac{T'_{d0} + T''_{d0}}{T'_{d0} \cdot T''_{d0}} \cdot \frac{x'_d - x''_d}{x''_d} \cdot [U_q(-0) - E_{qn}(0)] + \omega E_{qn} \frac{T_{\sigma 1d}}{T'_{d0} \cdot T''_{d0}} \cdot \Delta U_f = 0;$$

$$E_d''(0) = E_d''(-0) = -0,62.$$

где $T_{\sigma 1d}$ – постоянная времени, определяемая индуктивным сопротивлением рассеяния демпферной обмотки по продольной оси.

Электромеханические переходные процессы в двигателе в режиме отключения от электрической сети протекают только под воздействием тормозного механизма $M_{\text{мех}}$ независимо от электромагнитных процессов. Электромагнитные переходные процессы по продольной и поперечной осям протекают независимо друг от друга, а относительно приведенных значений ЭДС при условии $U_f = \text{const}$ – независимо и от электромеханических переходных процессов.

Решение уравнения электромагнитных переходных процессов по продольной оси:

$$E_d'' = E_d''(0) \omega e^{-t/T_{1q0}};$$

$$\text{При } t=0, E_d'' = -0,62 \cdot 1 \cdot e^{-0/0,197} = -0,62;$$

$$\text{При } t=0,4\text{с}, E_d'' = -0,62 \cdot 1 \cdot e^{-0,4/0,197} = -0,0148;$$

$$\text{При } t=0,9\text{с}, E_d'' = -0,62 \cdot 1 \cdot e^{-0,9/0,197} = -0,00001.$$

График полученного выражения приведен на рисунке 1:

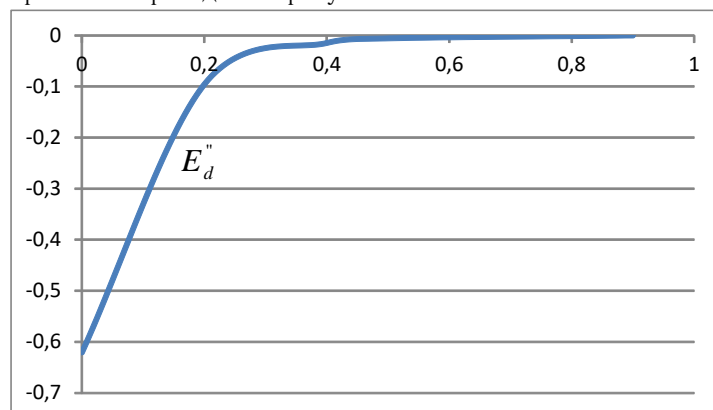


Рис. 1. График $E_d'' = f(t)$

Вывод: Сверхпереходная ЭДС E_d'' по продольной оси достигает 0 при $t \approx 0,9$.

На ЭДС E_q'' отключенного двигателя существенное влияние оказывает напряжение на обмотке возбуждения U_f , следовательно, управлением режима возбуждательного устройства двигателя можно добиться быстрого затухания этой ЭДС. Режим ускоренного затухания внутренней ЭДС СД называется гашением поля двигателя, и его обеспечение является одной из важнейших функций возбуждательного устройства.

Поскольку гашение поля СД может осуществляться различными способами, целесообразно определить эффективность каждого из них. Эффективность гашения поля оценивается по скорости затухания остаточной ЭДС двигателя либо по скорости спада тока в обмотке возбуждения.

Дальнейший расчет проводился в программе Maple.

Maple — программный пакет, система компьютерной алгебры, ориентированная на сложные математические вычисления, визуализацию данных и моделирование.

Решим 3 вида уравнений :

$$\begin{cases} U_f = const, n_{pu} U_{fN} = 61 \text{ о.е.}; \\ U_f = 0; \\ U_f = f(t), n_{pu} U_f = -306,9 \cdot e^{-0,0064t}. \end{cases}$$

Случай изменения напряжения на обмотке возбуждения:

1. Гашение поля не производится, а ВУ получает питание от независимого источника $U_f = const = 61 \text{ о.е.}$

Для первого случая, при $U_f = const = 61 \text{ о.е.}$, решение для остаточной ЭДС по поперечной оси получено в виде:

$$E_q''(t) = 0,875 \cdot e^{(-0,3t)} - 0,0047 \cdot e^{(-55,56t)}.$$

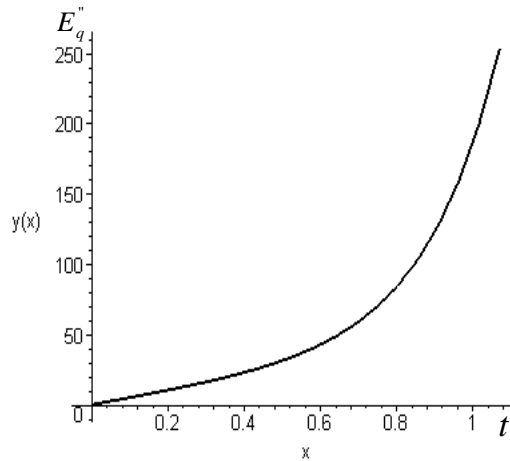


Рис. 2. График зависимости $E_q'' = f(t)$ при $U_f = const$.

Вывод: На графике видно, что, не управляя напряжением возбуждения U_f невозможно добиться быстрого гашения поля, т.к. E_q'' непрерывно нарастает.

2. Гашение поля производится закорачиванием обмотки возбуждения двигателя с бесщеточным ВУ $U_f = 0$.

Для второго случая при $U_f = 0$, решение для остаточной ЭДС по поперечной оси получено в виде:

$$E_q''(t) = -150.617 \cdot e^{(-0,3012t)} + 0.8166 \cdot e^{(-55,56t)} + 150.67.$$

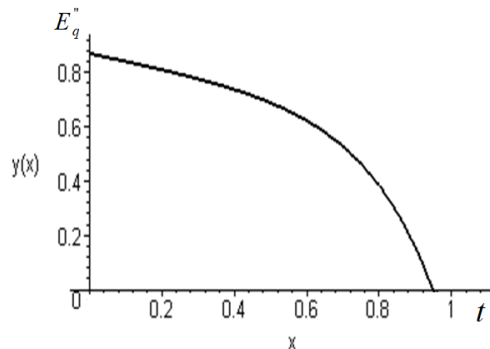


Рис. 3. График зависимости $E_q'' = f(t)$.

Вывод: На графике видно, что гашение поля закорачиванием обмотки возбуждения двигателя с БВУ при $U_f = 0$ происходит за время $t \approx 1c$.

3. Гашение поля производится замыканием обмотки возбуждения на пусковой резистор R_{II} .

Решение задачи о переходном процессе при замыкании обмотки возбуждения на пусковой резистор примет вид:

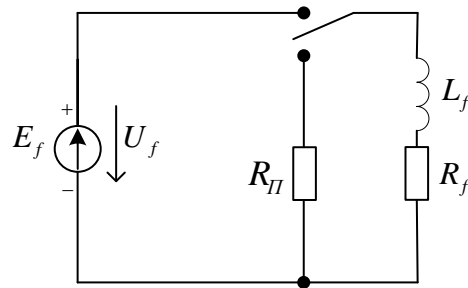


Рис. 4. Схема замещения ВУ.

Согласно каталожным данным СД: $U_{fN} = 61, R_f = 0,002, x_f = 1,885$.

Так как пусковое сопротивление $R_{II} = (4 \div 5)R_f$, то:

$$R_{II} = 5 \cdot R_f = 5 \cdot 0,002 = 0,01;$$

$$L_f = \frac{x_f}{\omega} = \frac{1,885}{1} = 1,885.$$

Определим начальные условия. Схема до коммутации имеет вид:

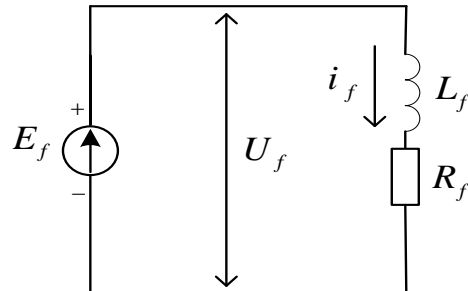


Рис. 5. Схема замещения ВУ до коммутации.

Ток в обмотке возбуждения до коммутации равен:

$$i_f(-0) = \frac{U_{fN}}{R_f} = \frac{61}{0,002} = 30500;$$

$$U_{fN}(-0) = U_{fN} = 61 \text{ o.e.}$$

Схема после коммутации примет вид:

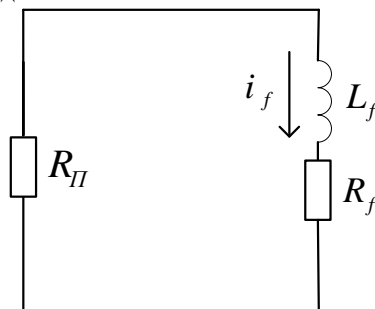


Рис. 6. Схема замещения ВУ после коммутации.

Дифференциальное уравнение цепи после коммутации:

$$R_{II} i_f + R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} = 0.$$

Уравнение для свободной составляющей тока $i_{f\text{св}}$ примет вид:

$$i_{f\text{св}}(R_{II} + R_f) + L_f \frac{di_{f\text{св}}}{dt} = 0.$$

Осуществим алгебраизацию дифференциального уравнения:

$$i_{f\text{св}}(R_{II} + R_f) + L_f p i_{f\text{св}} = 0;$$

$$i_{f\text{св}}(R_{II} + R_f + L_f p) = 0;$$

$$p = -\frac{R_{II} + R_f}{L_f} = -\frac{0,01 + 0,002}{1,885} = -\frac{0,012}{1,885} = -0,0064;$$

$$i_{f\text{св}} = A \cdot e^{pt} = A \cdot e^{-\frac{R_{II} + R_f}{L_f} t} = A \cdot e^{-0,0064t}.$$

Полный ток в общем виде равен:

$$i_f(t) = i_{f\text{нп}} + i_{f\text{св}} = i_{f\text{нп}} + A \cdot e^{-\frac{R_{II} + R_f}{L_f} t},$$

где $i_{f\text{нп}} = 0$, т.к. после коммутации нет вынуждающего источника питания.

Согласно первому закону коммутации:

$$A = i_{f\text{св}}(+0) = \frac{U_{fN}}{R_f} = \frac{61}{0,002} = 30500;$$

$$i_{f\text{св}}(+0) = i_f(+0) - i_{f\text{нп}} = i_{f\text{нп}}(+0) = \frac{U_{fN}}{R_f} = 30500;$$

$$i_f(t) = \frac{U_{fN}}{R_f} \cdot e^{-\frac{R_{II} + R_f}{L_f} t} = 30500 \cdot e^{-0,0064t};$$

$$U_f(t) = R_f i_f + L_f \frac{d}{dt} \left(\frac{U_{fN}}{R_f} \cdot e^{-\frac{R_{II} + R_f}{L_f} t} \right);$$

$$U_f(t) = 0,002 \cdot 30500 \cdot e^{-0,0064t} + 1,885 \frac{d \cdot 30500 \cdot e^{-0,0064t}}{dt};$$

$$U_f(t) = 61 \cdot e^{-0,0064t} + 1,885 \cdot 30500 \cdot (-0,0064) \cdot e^{-0,0064t} \rightarrow$$

$$= 61 \cdot e^{-0,0064t} - 367,9 \cdot e^{-0,0064t} = -306,9 \cdot e^{-0,0064t}.$$

Для третьего случая $U_f = f(t)$, при $U_f = -306,9 \cdot e^{-0,0064t}$, решение для остаточной ЭДС по поперечной оси получено в виде:

$$E_q''(t) = 772,4196 \cdot e^{(-0,3012t)} - 4,0994 \cdot e^{(-55,56t)} - 767,45 \cdot e^{(-0,0064t)}.$$

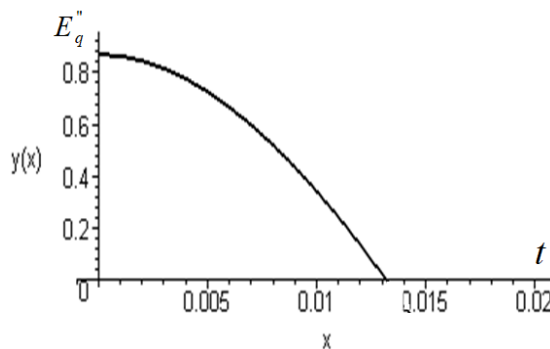


Рис. 7. График зависимости $E_q'' = f(t)$.

Вывод: На графике видно, что наиболее эффективное гашение поля происходит у СД, при замыкании обмотки возбуждения на пусковой резистор R_{II} , за время $t \approx 0,013$ с, т.е. практически мгновенно.

Литература:

1. Гамазин С.И. Переходные процессы в системах промышленного электроснабжения, обусловленные электродвигательной нагрузкой / С.И. Гамазин, В.А. Ставцев, С.А. Цырук. – М.: Издательство МЭИ, 1997. – 424 с.
2. Тумаева, Е.В. Выбор возбудительного устройства синхронных двигателей для работы в условиях нефтехимического производства / Е.В. Тумаева, А.В. Попов // Вестник Казанского технологического университета. – 2012. – №15. – С. 200-201.