

ЭФФЕКТ НЕОДНОВРЕМЕННОГО ВКЛЮЧЕНИЯ ФАЗ ПРИ ПРЯМОМ ПУСКЕ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Введение. При резких изменениях режимов работы, связанных с коммутацией силовой цепи, в токах статорной обмотки асинхронных двигателей возникают аperiodические составляющие, в определенные моменты времени увеличивающие их мгновенные значения. При повторных коммутациях, обусловленных, например, неодновременным включением фаз, суммарная роль свободных токов может заметно возрасти.

Даже для полностью исправного оборудования временной интервал T_B между моментом подключения третьей фазы «а» к двум другим «в» и «с» может составлять несколько миллисекунд, что необходимо учитывать при проектировании и выборе элементов энергетических установок.

Рассматриваемые явления особенно значимы при прямом пуске двигателей номинальной мощностью в несколько сотен или тысяч кВт, когда из-за относительно малых активных сопротивлений обмоток наблюдается медленное затухание свободных токов.

Постановка задач исследования. Целью данной работы является выявление причин и условий возникновения сверхтоков в статорной цепи асинхронных двигателей, а также разработка способов оценки их максимальных значений.

На первом этапе рассмотрен приближенный аналитический метод определения токов при поочередном включении фаз статорной обмотки на шины бесконечной мощности. При этом установлены наиболее существенные факторы, влияющие на ход процесса, и поставлены рамки дальнейших исследований.

На втором этапе с применением математической модели достаточно высокого уровня уточнены основные показатели процесса, сформулированы выводы и рекомендации.

Аналитическое решение. Используются обычные уравнения асинхронной машины при частоте вращения ротора $\omega=0$. Все параметры и переменные представлены в относительных единицах (о.е.). Фазные напряжения источника питания: $U_a=U_m \cos(\tau-\gamma_0)$; $U_b=U_m \cos(\tau-\gamma_0-2\pi/3)$; $U_c=U_m \cos(\tau-\gamma_0+2\pi/3)$. Полагая, что в момент $\tau=0$ включаются фазы «в» и «с», получим:

$$i_b = -i_c = -\frac{\sqrt{3}}{2} \frac{U_m}{z_k} [\cos(\tau - \gamma_0^1) - \cos \gamma_0^1 \cdot \exp(-\frac{\tau}{T_a})]; i_a = 0,$$

$$\text{где: } z_k = \sqrt{x_k^2 + r_k^2}; T_a = \frac{x_k}{r_k}; \gamma_0^1 = \gamma_0 - \varphi_k; \varphi_k = \arctg T_a^{-1};$$

x_k, r_k – индуктивное и активное сопротивления короткого замыкания.

В момент времени $\tau = T_B$ подключается фаза «а». Тогда при $\tau \geq T_B$:

$$i_a = \frac{U_m}{z_k} [\sin(\tau - \gamma_0^1) - \sin(T_B - \gamma_0^1) \cdot \exp(-\frac{\tau - T_B}{T_a})];$$

$$i_b = \frac{U_m}{z_k} [\sin(\tau - \gamma_0^1 - 2\pi/3) + \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \gamma_0^1 \cdot \exp(-\frac{\tau}{T_a}) + \frac{1}{2} \sin(T_B - \gamma_0^1) \cdot \exp(-\frac{\tau - T_B}{T_a})];$$

$$i_c = \frac{U_m}{z_k} [\sin(\tau - \gamma_0^1 + 2\pi/3) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cos \gamma_0^1 \cdot \exp(-\frac{\tau}{T_a}) + \frac{1}{2} \sin(T_B - \gamma_0^1) \cdot \exp(-\frac{\tau - T_B}{T_a})].$$

Согласно последним выражениям, справедливым при $\omega=0$, величина потребляемого из сети тока зависит от момента подключения фаз (γ_0, T_B). Его максимальное значение при принятых условиях имеет место в фазе «в». Для предельного случая отсутствия затухания аperiodических составляющих по сравнению с режимом короткого замыкания фазный ток может быть больше в $K_{д2}=2,36$ раза, достигая максимума при $T_B=\pi/2$ рад. При реальных параметрах $K_{д2}=1,1 \div 2,3$ и имеет меньшее значение для двигателей небольшой мощности.

Благодаря наличию в формулах угла γ_0 , фазные токи имеют стохастические свойства. При их оценке следует принимать во внимание, что в каталогах коэффициентам $k_i=I_k/I_n$ дается относительное действующее значение периодической составляющей тока короткого замыкания. Поэтому при определении его возможного максимума следует воспользоваться выражением вида $k_{im}=k_i K_{д2}$. Таким образом, в начальный период прямого пуска величина потребляемого из сети тока может быть в 12-18 раз больше номинального. Поэтому требуется более детальный анализ явлений с учетом насыщения магнитопровода, изменения частоты вращения ротора и параметров машины.

Расчетная модель. Проверочные расчеты прямого пуска были выполнены численным решением дифференциальных уравнений асинхронной машины, преобразованных к синхронным координатам. Для учета нелинейных свойств магнитопровода использован апробированный на многих задачах метод [1], согласно

которому предполагается независимыми условия насыщения по путям потоков основного и рассеяния. Первый из них определяется суммарной намагничивающей силой всех обмоток, а потоки рассеяния статорных и роторных контуров функционально зависят только от собственных токов.

Результаты анализа. В качестве основного варианта при расчетах выбран асинхронный двигатель номинальной мощностью $P_n=30$ кВт, для которого были известны экспериментальные зависимости и параметры.

Некоторые результаты исследований показаны на рис.1-2.

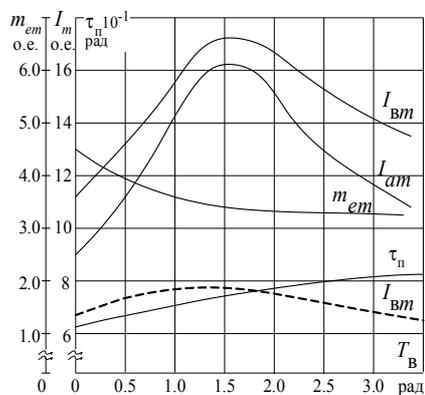


Рис.1. Пусковые характеристики двигателя

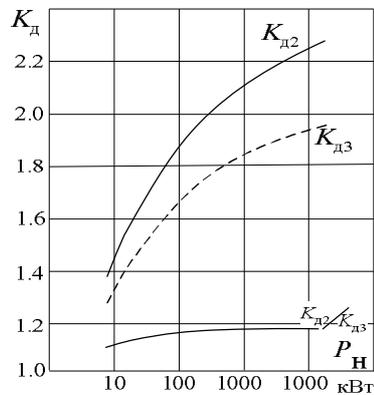


Рис.2. Влияние номинальной мощности на ударные токи при пуске

Первый из них иллюстрирует влияние задержки (T_B) при включении фазы «а» на максимальные значения токов ($I_{ам}$, $I_{вм}$), электромагнитного момента ($m_{эм}$) и времени достижения установившейся скорости (τ_p). Пунктирной линией нанесены данные для указанного выше двигателя. Здесь незначительное превышение максимального тока при $T_B=1,2$ рад над случаем одновременного включения фаз ($T_B=0$) объясняется весьма малой постоянной времени T_a , характерной для машин небольшой мощности. Интересно отметить, что при неодновременном включении фаз и $T_B>2,5$ рад величины максимальных токов даже меньше, чем при трехфазном пуске.

С ростом номинальной мощности согласно статистическим данным [2] уменьшаются относительные активные сопротивления обмоток при малом изменении индуктивностей. Это положение приводит к заметному возрастанию токов и перемещению функции $I_m(T_B)$ в зону $T_B=1,5-1,57$ рад (рис.1). Максимальное значение электромагнитного момента несколько снижается с ростом T_B вследствие уменьшения основного потока, хотя электродинамические силы, действующие на элементы крепления обмоток и пропорциональные квадрату тока, увеличиваются. Сказанное подтверждается рис.1, где сплошными линиями нанесены кривые, соответствующие статистическим параметрам двигателя мощностью $P_n=150-200$ кВт.

Используя данные [2], на рис.2 показано изменение коэффициента K_d в зависимости от номинальной мощности двигателя. Здесь пунктирная линия соответствует трехфазному пуску ($K_{д3}$), а сплошная – неодновременному подключению фаз с временной задержкой, обеспечивающей максимальный всплеск токов ($K_{д2}$).

Выводы.

1. При прямом пуске асинхронных двигателей из-за неидеальной работы коммутирующих аппаратов возможно значительное увеличение ударных токов.
2. Их величины имеют вероятностные свойства, достигают максимума при задержке включения третьей фазы на время $T_B=1,3-1,5$ рад и наиболее опасны в машинах большой мощности.
3. При исследовании процессов, связанных с неодновременной коммутацией фаз, можно ориентироваться на линейные модели, используя насыщенные значения индуктивностей рассеяния и ненасыщенный параметр намагничивающего контура.

Литература.

1. Сидельников Б.В. Анализ переходных процессов синхронных машин с помощью ЭВМ. Л.: Наука. Сб. «Теоретические и экспериментальные исследования турбо-и гидрогенераторов большой мощности», 1968, с.269-277.
2. Grochowalski J. Use of regression analysis for the determining of electrical machine equivalent circuit. Proc.2nd International scientific and technical conference. Szczecin, 1996, p.209-214.