

УДК 621.31

DOI: 10.30987/conferencearticle_5c19e61fe95cd4.50745333

Р.М. Мударисов, А.И. Федотов

(г. Казань, Казанский государственный энергетический университет)

ОСОБЕННОСТИ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ СИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЯХ

Приведены особенности оценки устойчивости синхронных двигателей при кратковременных нарушениях питания, обусловленных однофазными короткими замыканиями в системах внешнего электроснабжения.

This thesis shows features that must be taken into account during synchronous motor's stability estimation under single-phase short circuit faults.

Ключевые слова: синхронный двигатель, однофазное короткое замыкание, устойчивость.

Keywords: synchronous motor, single-phase short circuit, stability.

Одной из причин нарушения устойчивости синхронных двигателей (СД) является кратковременное нарушение электроснабжения (КНЭ), выраженное в виде провала напряжения, обусловленного короткими замыканиями (КЗ) в системах внешнего электроснабжения (СВЭ), 60-70% которых приходится на однофазные короткие замыкания (ОКЗ).

Задача обеспечения устойчивости СД при КНЭ, как правило, решается внедрением устройств быстродействующего автоматического включения резерва (БАВР) или локализацией аварии защитами линий электропередачи (ЛЭП). В обоих случаях требуется обоснование методик оценки допустимой длительности КНЭ двигателя по условию сохранения его устойчивости.

Исследования, которые проводятся в данной области, необоснованно осуществляются без учета переходного процесса (ПП), возникающего в системе внешнего электроснабжения; зависимости напряжения на шинах СД от распределения токов симметричной последовательности по элементам СВЭ; влияния КНЭ на двигатель через систему возбуждения (СВ).

Достоверная оценка устойчивости СД возможна при устранении указанных недостатков, что обеспечивается использованием численного моделирования аварийных режимов двигателей на основе программного пакета Simulink (MatLab) и обоснованием методик проведения данной оценки.

На рис. 1 приведена схема замещения системы электроснабжения СД при ОКЗ в питающей линии, где E_1 , Z_{1i} – эквивалентная ЭДС и сопротивления отдельных последовательностей энергосистемы; E_5 , Z_{5i} – ЭДС и сопротивления отдельных последовательностей СД; $Z_{2i}(n)$ – сопротивления отдельных последовательностей ЛЭП на участке от шин системы до места замыкания; $Z_{3i}(n)$ – сопротивления отдельных последовательностей ЛЭП на участке от места замыкания до понижающего трансформатора; Z_{4i} –

сопротивление отдельных последовательностей понижающего трансформатора; n – относительная удаленность замыкания от шин системы.

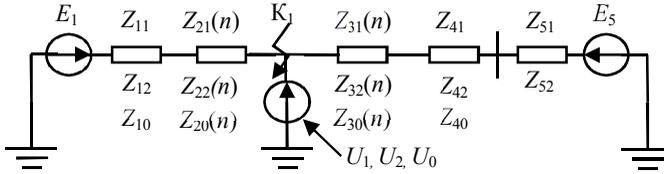


Рис. 1. Схема замещения СВЭ

Из-за схемы соединения обмоток понижающих трансформаторов на СД подаются только прямая и обратная последовательности напряжения:

$$U_1 = \frac{E_5(Z_{31}(n)+Z_{41})e^{j30^\circ} + (E_1Z_{71}(n)+E_5Z_{61}(n))(Z_{\Sigma 2}(n)+Z_{\Sigma 0}(n))Z_{51}}{Z_{71}(n)} e^{j30^\circ} + \frac{(E_1Z_{71}(n)+E_5Z_{61}(n))Z_{\Sigma 2}(n)+Z_{\Sigma 0}(n)Z_{51}}{Z_{81}(n) \cdot Z_{\Sigma}(n) \cdot Z_{71}(n)} e^{j30^\circ}, \quad (1)$$

$$U_2 = -\frac{E_1 \cdot Z_{71}(n) + E_5 \cdot Z_{61}(n)}{Z_{81}(n) \cdot Z_{\Sigma}(n)} \cdot \frac{Z_{\Sigma 2}(n) \cdot Z_{52}}{Z_{72}(n)} e^{-j30^\circ}. \quad (2)$$

Прямая последовательность напряжения (U_1) создает вращающий момент, а обратная последовательность (U_2) – тормозной, поэтому для определения условий возникновения наиболее тяжелого с позиции устойчивости двигателя ОКЗ введем относительный коэффициент несимметрии напряжения (ОКН), под которым будем понимать отношение напряжения обратной последовательностям к напряжению прямой последовательности (U_2/U_1).

На рис. 2 приведены зависимости ОКН от удаленности замыкания (n): линия L_1 соответствует режиму с питающей линией длиной 1 км при $Z_{10}=0$ Ом и $Z_{11}=0,253+j1,588$ Ом, $Eg=1,578$ о.е.; L_2 – длиной 20 км при $Z_{10}=0$ Ом и $Z_{11}=0,253+j1,588$ Ом,

$Eg=1,594$ о.е.; L_3 – длиной 130 км при $Z_{10}=0$ Ом и $Z_{11}=0,253+j1,588$ Ом,

$Eg=1,636$ о.е.; L_4 – длиной 130 км при $Z_{10}=1,0Z_{11}$ и $Z_{11}=0,253+j1,588$ Ом,

$Eg=1,636$ о.е.; L_5 – длиной 130 км при $Z_{10}=0$ Ом и $Z_{11}=2,53+j15,88$ Ом,

$Eg=1,643$ о.е.

Прочие

параметры схемы: напряжение системы 110 кВ, одноцепная ЛЭП выполнена

проводом АС-70, трансформатор ТДН-16000/110 с заземленной нейтралью, двигатель СТД-8000 работает в режиме недовозбуждения с коэффициентом загрузки $m_c=0,7$ о.е. ($J_{МЭХ}=250 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$) при $\delta=64,47$.

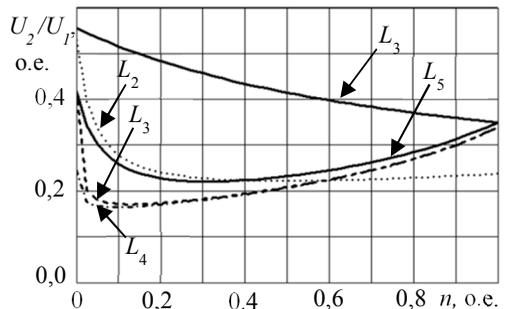


Рис. 2. Зависимость ОКН на шинах СД

Проведенные расчеты показывают, что наиболее тяжелый режим ОКЗ, при котором ОКН достигает максимума, возникает при замыкании в одном из двух случаев: в начале питающей линии при малом сопротивлении нулевой последовательности системы (линия L_3 на рис. 2) или в конце линии при значительном сопротивлении нулевой последовательности (линия L_4 рис. 2). Однако значение относительного коэффициента несимметрии на шинах СД в первом случае больше, чем во втором. Такой же вывод был получен для систем электроснабжения напряжением 220 кВ.

Оценим влияние места возникновения ОКЗ на максимальное отклонение угла нагрузки двигателя в условиях длительного ($\Delta t=2$ с) замыкания в питающей ЛЭП, результаты которого получены на полной модели СД и приведены на рис. 3. В числовом примере использован двигатель СТД-8000 со следующими параметрами рабочего режима: $J_{\text{МЭХ}}=250 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $m_c=0,7$ о.е., $U_{\text{СД}}=1,032$ о.е., $Eg=1,651$ о.е., $\delta=64,58^\circ$. Двигатель получает питание от системы 110 кВ ($Z_{11}=2,53+j15,88$) через ЛЭП длиной 130 км, выполненной проводом АС-70, и трансформатор ТДН-16000/110. Линии L_1 и L_2 на рис. 3 относятся к режимам с $Z_{10}=0$ Ом и $Z_{10}=Z_{11}$ соответственно. Результаты показывают, что двигатель выпадает из синхронизма, если замыкание возникает в начале ЛЭП, подсоединенной к энергосистеме с $Z_{10}=0$ (L_1 на рис. 3), и сохраняет устойчивость при длительных замыканиях, если они возникают далее 5 км от шин системы, так же как и при нарушениях, возникающих в любой точке ЛЭП,

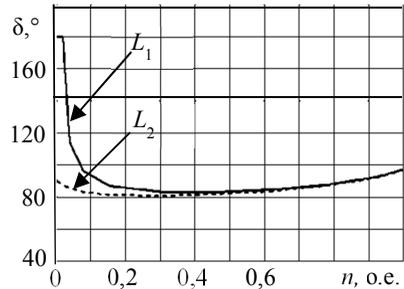


Рис. 3. Угол нагрузки при ОКЗ

подсоединенной к энергосистеме с $Z_{10}=Z_{11}$. Эти результаты соответствуют выводам, полученным по зависимостям, приведенным на рис. 2. Отметим, что определение допустимой длительности КНЭ в условиях замыкания, возникающем в начале ЛЭП и при $Z_{10}=0$, гарантирует дополнительный запас и является достаточным условием устойчивости СД при всех возможных ОКЗ, возникающих в пределах питающей линии.

Оценим возможность применения упрощенных моделей СД для определения допустимой длительности КНЭ, обусловленного ОКЗ, на основе результатов, полученных на численных моделях двигателя СТД-8000 и приведенных в табл. 1. Характеристики рабочего режима следующие: $J_{\text{МЭХ}}=250 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $m_c=0,7$ о.е., $U_{\text{СД}}=1,069$ о.е., $Eg=1,574$ о.е., $\delta=66,04^\circ$. СД получает питание от системы 110 кВ ($Z_{11}=2,53+j15,88$ и $Z_{10}=0$ Ом) через ЛЭП длиной 20 км, выполненной проводом марки АС-70, и трансформатор ТДН-16000/110. ОКЗ возникает в начале ЛЭП и приводит к снижению напряжения в месте возникновения замыкания до $U_{\text{ОСТ,А}*}=0$, $U_{\text{ОСТ,В}*}=0,856$ о.е. и $U_{\text{ОСТ,С}*}=0,856$ о.е. (где $U_{\text{ОСТ,А}*}$, $U_{\text{ОСТ,В}*}$ и $U_{\text{ОСТ,С}*}$ - значения действующего напряжения в начальный момент ОКЗ). В таблице: полная модель СД

учитывает энергосистему, систему электроснабжения и СВ; модель 1 не учитывает воздействия КНЭ на СВ; модель 2 - не учитывается воздействие КНЭ на СВ и зависимость напряжения на шинах СД от распределение токов в элементах СВЭ.

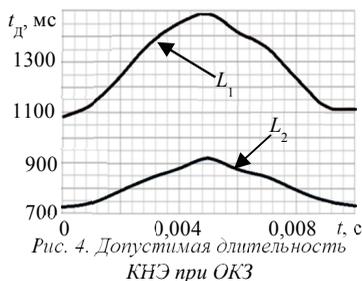
Полученные результаты показывают, что оценивать устойчивость СД при ОКЗ в питающих ЛЭП необходимо только в полной модели СД, учитывающей зависимость напряжения на шинах СД от распределения токов в элементах СВЭ и воздействия КНЭ на двигатель через СВ. Такая модель содержит: эквивалентный источник с параметрами энергосистемы (ЭДС и сопротивления), системы электроснабжения и возбуждения, а также блок, реализующий ОКЗ на землю.

На рис. 4 представлены результаты исследования влияния на допустимую длительность КНЭ момента возникновения замыкания. Допустимая длительность КНЭ без учета прочей нагрузки подстанции приведена линией L_1 , а с учетом нее - линией L_2 . Исследования проведены при замыканиях в фазе А с учетом достаточных условий устойчивости. В числовом примере рассмотрен двигатель СТД-8000 со следующими характеристиками: $J_{МЭХ}=250 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$, $m_c=0,7 \text{ о.е.}$, $U_{СД}=0,9964 \text{ о.е.}$, $Eg=1,702 \text{ о.е.}$, $\delta=65,05^\circ$. При проведении численного исследования двигатель получает питание от системы 110 кВ ($Z_{11}=2,53+j15,88$) через питающую линию длиной 25 км (АС-300), и трансформатор ТРДН-25000/110. Прочая нагрузка промышленной подстанции представлена нагрузкой постоянного сопротивления ($P_{НОМ}=12 \text{ МВт}$, $\cos\varphi=0,9$).

Результаты показывают, что определение устойчивости СД без учета момента возникновения однофазного КЗ может приводить к погрешности в определении критической длительности КНЭ до 37,4 % (1084 и 1489 мс на линии L_1 рис. 4). Поэтому оценка устойчивости СД должна производиться на основе возможно минимальных значений критической длительности, которые выявляются при проведении численного опыта на модели СД с изменением момента возникновения замыкания с шагом в 1 мс.

Все результаты, полученные в проведенных исследованиях, использованы для составления методики, применение которой обеспечивает достоверную оценку устойчивости двигателей в условиях КНЭ, обусловленных однофазными короткими замыканиями в СВЭ 110 - 220 кВ, на основе выявленных достаточных условий устойчивости двигателей.

№	Вид числ. модели	$t_d, \text{ с}$	$\Delta, \%$
1	Полная модель	1694	0
2	Модель 1	1224	27,7
3	Модель 2	2058	21,5



Материал поступил в редколлегию 22.10.18.