

УДК 621.313.333

Г.И. Бабокин, О.В. Селин, А.В. Ляхомский

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ В СИСТЕМЕ ПЧ - КАБЕЛЬНАЯ СЕТЬ - АД

Семинар № 18

Целью исследования переходных процессов при двухфазном и трехфазном коротком замыкании (к. з.) в кабельной сети (КС) между преобразователем частоты (ПЧ) и асинхронным двигателем (АД) является установление закономерностей и количественных характеристик этих процессов, что необходимо для разработки защиты от к. з. в кабельной сети.

При возникновении к. з. в кабельной сети нарушается установившийся режим работы системы ПЧ-КС-АД. В месте возникновения к. з. появляется несимметрия напряжений и возникает переходный процесс. Уравнения, описывающие режим к. з. системы ПЧ-КС-АД получены на основе схемы замещения этой системы для режима к. з., которая включает трехфазный генератор (ПЧ), участок КС с параметрами $R_{кл}$, $L_{кл}$ и известную схему замещения АД (1). Особенностью модели является рассмотрение двух двигательного привода. Положение точки к. з. в КС между ПЧ и АД характеризуется отношением длины кабеля от АД до точки несимметрии к полной длине кабеля - k . Уравнения для переходных процессов при к. з. в системе ПЧ-КС-АД имеют вид:

$$\begin{aligned} DI_B &= \Theta(I_B) \cdot (E_B - U_d - R_\phi \cdot I_B) / L_\phi; \\ DU_d &= (I_B - I_d) / C_\phi; \\ U_{n\neq\alpha} &= (1-k) \cdot R_{кл} \cdot I'_{л\alpha} + (1-k) \cdot L_{кл} \cdot DI'_{л\alpha} + U'_{л\alpha}; \\ U_{n\neq\beta} &= (1-k) \cdot R_{кл} \cdot I'_{л\beta} + (1-k) \cdot L_{кл} \cdot DI'_{л\beta} + U'_{л\beta}, \end{aligned} \quad (1)$$

где $R_{кл}$, $L_{кл}$ - активное сопротивление и индуктивность кабеля от ПЧ до зажимов двигателя; $I'_л$ - ток в кабеле от ПЧ до точки не симметрии; $U'_л$ - напряжение в точке несимметрии; после точки не симметрии:

$$\begin{aligned} U''_{л\alpha} &= k \cdot R_{кл} \cdot I''_{л\alpha} + k \cdot L_{кл} \cdot DI''_{л\alpha} + U_{ад\alpha}; \\ U''_{л\beta} &= k \cdot R_{кл} \cdot I''_{л\beta} + k \cdot L_{кл} \cdot DI''_{л\beta} + U_{ад\beta}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $U''_л$ - напряжение после точки не симметрии; $I''_л$ - ток в кабеле, протекающий от точки не симметрии до зажимов АД; $U_{АД}$ - напряжение на зажимах двигателя.

Уравнения для переходного процесса в обмотках статора АД(1):

для первого АД:

$$\begin{aligned} U_{ад\alpha 1} &= D\Psi_{s\alpha 1} + I_{s\alpha 1} \cdot R_{s1}; \\ U_{ад\beta 1} &= D\Psi_{s\beta 1} + I_{s\beta 1} \cdot R_{s1}; \end{aligned} \quad (3)$$

для второго АД:

$$\begin{aligned} U_{ад\alpha 2} &= D\Psi_{s\alpha 2} + I_{s\alpha 2} \cdot R_{s2}; \\ U_{ад\beta 2} &= D\Psi_{s\beta 2} + I_{s\beta 2} \cdot R_{s2}. \end{aligned} \quad (4)$$

Потокоцепления ротора, токи статора, ротора и частота вращения электродвигателя находятся из уравнений:

для первого АД:

$$\begin{aligned} D\Psi_{s\alpha 1} &= U_{s\alpha 1} - I_{s\alpha 1} \cdot R_{s1}; \\ D\Psi_{s\beta 1} &= U_{s\beta 1} - I_{s\beta 1} \cdot R_{s1}; \\ D\Psi_{p\alpha 1} &= -I_{p\alpha 1} \cdot R_{p1} - p_n \cdot \omega_p \cdot \Psi_{p\beta 1}; \\ D\Psi_{p\beta 1} &= -I_{p\beta 1} \cdot R_{p1} + p_n \cdot \omega_p \cdot \Psi_{p\alpha 1}, \end{aligned} \quad (5)$$

и соответственно для второго АД:

$$\begin{aligned} D\Psi_{s\alpha 2} &= U_{s\alpha 2} - I_{s\alpha 2} \cdot R_{s2}; \\ D\Psi_{s\beta 2} &= U_{s\beta 2} - I_{s\beta 2} \cdot R_{s2}; \\ D\Psi_{p\alpha 2} &= -I_{p\alpha 2} \cdot R_{p2} - p_n \cdot \omega_p \cdot \Psi_{p\beta 2}; \\ D\Psi_{p\beta 2} &= -I_{p\beta 2} \cdot R_{p2} + p_n \cdot \omega_p \cdot \Psi_{p\alpha 2}. \end{aligned} \quad (6)$$

Моменты АД записываются в виде:

$$M_1 = 3p_n \cdot (\Psi_{s\alpha 1} \cdot I_{s\beta 1} - \Psi_{s\beta 1} \cdot I_{s\alpha 1}) / 2, \quad (7)$$

$$M_2 = 3p_n \cdot (\Psi_{s\alpha 2} \cdot I_{s\beta 2} - \Psi_{s\beta 2} \cdot I_{s\alpha 2}) / 2, \quad (8)$$

где p_n - число пар полюсов АД.

Индексы α и β соответствуют проекциям соответствующих величин на этой оси.

Так как на валу АД имеется рабочий механизм, то необходимо к уравнениям (1)-(8) добавить уравнение механического движения:

$$D\omega_p = [M_1 + M_2 - M_c(\omega_p)] / J, \quad (9)$$

где J - суммарный момент инерции ротора двигателя и механизма, приведенный к ротору.

Проекции токов АД на оси α и β в переходном режиме находятся по составляющим, определяемым через потокосцепления:

для первого АД:

$$\begin{aligned} I_{s\alpha 1} &= L_{p1} \cdot (\Psi_{s\alpha 1} - L_m \cdot \Psi_{p\alpha 1}) / L_{\sigma 1}; \\ I_{s\beta 1} &= L_{p1} \cdot (\Psi_{s\beta 1} - L_m \cdot \Psi_{p\beta 1}) / L_{\sigma 1}; \\ I_{p\alpha 1} &= L_{s1} \cdot (\Psi_{p\alpha 1} - L_m \cdot \Psi_{s\alpha 1}) / L_{\sigma 1}; \\ I_{p\beta 1} &= L_{s1} \cdot (\Psi_{p\beta 1} - L_m \cdot \Psi_{s\beta 1}) / L_{\sigma 1}, \end{aligned} \quad (10)$$

и соответственно для второго АД:

$$\begin{aligned} I_{s\alpha 2} &= L_{p2} \cdot (\Psi_{s\alpha 2} - L_m \cdot \Psi_{p\alpha 2}) / L_{\sigma 2}; \\ I_{s\beta 2} &= L_{p2} \cdot (\Psi_{s\beta 2} - L_m \cdot \Psi_{p\beta 2}) / L_{\sigma 2}; \\ I_{p\alpha 2} &= L_{s2} \cdot (\Psi_{p\alpha 2} - L_m \cdot \Psi_{s\alpha 2}) / L_{\sigma 2}; \\ I_{p\beta 2} &= L_{s2} \cdot (\Psi_{p\beta 2} - L_m \cdot \Psi_{s\beta 2}) / L_{\sigma 2}, \end{aligned} \quad (11)$$

где $L_{\sigma} = L_s \cdot L_p \cdot L_m^2$.

Мгновенные значения фазных токов найдены по уравнениям:

$$\begin{aligned} i_a &= I_{\alpha} \\ i_b &= (-I_{\alpha}/2) + (\sqrt{3}I_{\beta})/2 \\ i_c &= (-I_{\alpha}/2) - (\sqrt{3}I_{\beta})/2 \end{aligned} \quad (12)$$

Решение системы уравнений (1)-(12) осуществлялось на ЭВМ при изменении параметров: частоты ПЧ; длины кабеля от ПЧ до места к. з.; уровня нагрузки АД.

В результате исследования к. з. в КС установлено, что при возникновении к. з. АД переходят в генераторный режим и начинают отдавать энергию в место повреждения. Для оценки режима работы АД (двигательный

или генераторный) подходит мгновенное значение фазного тока.

Кроме того из анализа полученных результатов установлены следующие закономерности переходных процессов.

Трехфазное короткое замыкание:

в момент короткого замыкания происходит резкий скачок тока во всех фазах, связанный с тем, что происходит разряд емкости фильтра. Величина скачка зависит от длины кабеля, места к.з. и частоты выходного напряжения ПЧ. При длине кабеля 100м и частоте 50Гц наблюдается самый большой скачок тока к. з. равный 5000А, минимальное значение тока к. з. наблюдается на частоте 2Гц и равно 101А. Минимальное значение тока к. з. при длине кабеля 500м: на частоте 2Гц - 45А, а на частоте 70Гц - 490А. При длине кабеля равной 300м наблюдаются значения тока равные промежуточным значениям между значениями при длине 100 и 500м. Характер изменения тока при трехфазном коротком замыкании следующий: в момент замыкания происходит резкое возрастание тока затем он со стороны ПЧ принимает периодический характер т.к. ПЧ работает по прежнему, а со стороны АД затухает, т.к. АД останавливается. Величина скачка также зависит сильно от места к.з. Так чем ближе к ПЧ произошло к.з. тем больше ток, чем дальше от него тем меньше.

Двухфазное короткое замыкание:

в момент короткого замыкания в поврежденных фазах происходит скачок тока к. з., связанный с тем, что происходит разряд емкости фильтра. Величина скачка зависит от длины кабеля, места к.з. и частоты выходного напряжения ПЧ. При длине кабеля 100м и частоте 50Гц наблюдается самый большой скачок тока к. з. равный 3000А, минимальное значение тока наблюдается на частоте 2Гц и равно 90А. Минимальное значение тока к. з. при длине кабеля 500м: на частоте 2Гц - 40А, а на частоте 70Гц - 250А. При длине кабеля равной 300м наблюдаются значения тока к. з. равные промежуточным значениям между значениями при длине 100 и 500м. Характер изменения тока к. з. при двухфазном коротком замыкании следующий: в момент замыкания происходит резкое возрастание тока затем он со стороны ПЧ принимает периодический характер т.к. ПЧ работает по прежнему, а со стороны АД затухает, т.к. АД оста-

навливается. В целой фазе периодичность тока не нарушается лишь только увеличивается его значение. Увеличение составляет около 20%. Величина скачка также зависит сильно от места к.з. Так чем ближе к ПЧ произошло к.з. тем больше ток, чем дальше от него тем меньше.

На основании вышеизложенного мы можем сделать следующие выводы: в момент к.з. фазный ток растет; после к.з. фазный ток со стороны ПЧ становится периодическим, а со стороны АД затухает; по сравнению с од-

новдвигательным ЧРЭП значения и характер фазных токов не существенно меняются, только момент двигателя увеличивается в два раза.

Анализ результатов исследования позволяет сделать следующий вывод: в качестве параметров дифференциальной защиты от аварийных режимов в ЧРЭП необходимо использовать мгновенные значения фазных токов в трех точках линии ПЧ - кабельная сеть - АД: на выходе ПЧ и входах АД1 и АД2.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ковач К.П., Рац И. Переходные процессы в машинах переменного тока. - Л.: ГЭИ, 1963.

Коротко об авторах

Бабочкин Геннадий Иванович – доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе, зав. кафедрой “Электротехника” Новомосковского института РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Селин Олег Вячеславович – старший преподаватель кафедры “Электротехника” Новомосковского института РХТУ им. Д.И. Менделеева.

Ляхомский Александр Валентинович – доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой “Электрификация горных предприятий” Московского государственного горного университета.

НОВИНКИ

ИЗДАТЕЛЬСТВА МОСКОВСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГОРНОГО УНИВЕРСИТЕТА

Шахтное и подземное строительство: Учебник для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп.: В 2 т. / Б.А. Картозия, Б.И. Федунец, М.Н. Шуплик и др. — Т. 1. — 732 с.: ил.

ISBN 5-7418-0266-4 (в пер.)

Изложены основные понятия и определения, приведены характеристика и классификация подземных объектов и условий строительства, а также различных способов воздействия на породный массив. Рассмотрены методология проектирования, технико-экономическое обоснование строительства, проектирование технологии и организации горно-строительных работ. Описаны буровзрывной и комбайновый способы разрушения пород, приведены технологические схемы строительства протяженных и камерных выработок. Особое внимание уделено технологии строительства вертикальных, горизонтальных и наклонных выработок в обычных и сложных гидрогеологических, геомеханических и газодинамических условиях.

Для студентов высших учебных заведений, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Горное дело» и по специальности «Шахтное и подземное строительство» направления подготовки дипломированных специалистов «Горное дело».

УДК 622.25/26+ 624.19