

ности будет достаточно резистора номинальным сопротивлением 2500 Ом.

Централизованные защиты от ОЗЗ позволяют селективно выделять повреждённое присоединение по активному току или мощности, не отстраивая уставки от мощности активных потерь и искажений. При этом такие защиты не ограничены по чувствительности и требуют только введения уставки по минимальному значению активной мощности. Централизованные устройства удобнее применять при организации системы защиты от ОЗЗ без модернизации всей релейной защиты подстанции (например, устройства МКЗЗП-В4 производства ЗАО НОЦ «ЭСТРА» НГТУ и Бреслер-0117.080 производства НПП «БРЕСЛЕР»).

Защита разветвлённой сети от замыканий на землю при низкоомном заземлении нейтрали обеспечивается посредством токовых защит НП (50/51N), требующих возможности ликвидации аварийного режима, а значит, и наличия автоматического включения резерва. Замыкания в сетях с высокоомным резистивным заземлением нейтрали допускается не отключать до устранения повреждения, но при этом необходимо размещение защит, реагирующих на активную мощность НП.

Современные устройства защиты могут собирать и передавать данные в сис-

тему диспетчерского управления, выполнять мониторинг, поэтому время определения повреждённого присоединения можно свести к минимуму даже без его отключения средствами релейной защиты при отсутствии автоматического включения резерва, что особенно важно в таких обширных разветвлённых электрических сетях, как городские кабельные сети.

Организация системы защиты с отключением замыканий на землю положительно влияет на срок службы оборудования вследствие снижения продолжительности воздействия перенапряжений на изоляцию.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шуин В. А., Гусенков А. В. Защиты от замыканий на землю в электрических сетях 6 – 10 кВ (Библиотечка электротехника). — М.: НТФ «Энергопрогресс», 2001. Вып. 11 (35). — 104 с.
2. Гусенков А. В. Микропроцессорная система сигнализации и регистрации однофазных замыканий на землю в электрических сетях среднего напряжения // Релейщик. 2009. № 3.
3. Дмитриев С. Н., Нестеров С. В., Целебровский Ю. В. Городские электрические сети: обеспечение надёжности и безопасности электроснабжения // Новости электротехники. 2010. № 5 (65).

Перенапряжения при дуговых замыканиях в сети 6 кВ, питающей частотно-регулируемый электропривод

ЕФРЕМОВ И. А., доктор техн. наук, НГТУ
КУЗЬМИН А. А., БАЗАВЛУК А. А., МИХАЙЛОВСКИЙ Г. Г., инженеры
ООО «Болид»; nio_bolid@ngs.ru

Приведены результаты исследований процессов в сетях с частотно-регулируемой двигательной нагрузкой при однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ). Кроме того, рассмотрено влияние резистивного заземления нейтрали в сетях с указанной нагрузкой в условиях однофазного дугового замыкания (ОДЗ) на землю.

Ключевые слова: частотно-регулируемый электропривод, перенапряжения, резистор, высшие гармоники, однофазное дуговое замыкание.

Одним из основных видов нагрузки большинства современных предприятий являются высоковольтные электроприводы. В процессе эксплуатации мощных электроприводов появляются проблемы пуска и регулирования частоты вращения двигателей, которые решаются посредством частотно-регулируемого привода (ЧРП). На крупных промышленных предприятиях схема электроснабжения представляет собой, как правило, разветвлённую кабельную сеть с изолированной нейтралью. В таких сетях основной вид аварий — устойчивые и дуговые ОЗЗ. Многократные зажигания дуги часто приводят к возникновению перенапряжений, опасных для изоляции оборудования.

В 2010 г. в сети предприятия добычи угля Тугуйского разреза ОАО «Суэк»

была проведена серия экспериментов по исследованию процессов в местах замыкания при «металлических» и дуговых ОЗЗ в целях измерения тока ОЗЗ, выяснения его гармонического состава и уровней перенапряжений. Определение ёмкостного тока ОЗЗ посредством искусственного «металлического» замыкания фазы сети на землю — прямой метод, позволяющий наиболее точно измерить значение тока ОЗЗ для текущей конфигурации схемы. Предлагаемый комплексный подход в части применения методики измерения ёмкостного тока ОЗЗ «напряжён», т. е. созданием искусственного ОЗЗ, включает в себя следующие этапы:

- осциллографирование сигналов фазных напряжений и тока ОЗЗ, что по-

зволяет после конвертации проводить их дальнейшую математическую обработку во внешних программных пакетах;

- определение ёмкостного тока основной частоты и его гармонических составляющих для известной конфигурации сети;

- анализ характера изменения фазных напряжений в нормальном режиме и переходных процессах возникновения и отключения замыкания на землю. Фактически это позволяет оценить «реакцию» сети на ОЗЗ [1].

Для создания ОДЗ используется искровой промежуток с шаровыми медными электродами определённого диаметра. Расстояние между электродами устанавливается таким образом, чтобы обеспечить пробой воздушного промежутка при прохождении подвижного электрода под неподвижным. За счёт определённой скорости вращения подвижного электрода обеспечивается горение перемежающейся (прерывистой) дуги при схождении — расхождении электродов, а также некоторое число циклов возникновения дуги [2].

Нагрузка Тугуйского разреза — мощные ЧРП шагающих экскаваторов с электродвигателями мощностью до 3,3 МВт. Устройство преобразования частоты электропривода построено на базе силовой полупроводниковой электроники: тиристоров или транзисторов. Особенность его работы — многократные коммутации схемы под нагрузкой, что обуславливает появление нелинейных искажений в сети.

На рис. 1, а представлена осциллограмма (в двух масштабах) тока ОЗЗ в сети с изолированной нейтралью, где видны затухающие высокочастотные составляющие, вносимые работой ключей частотного преобразователя привода шагающего экскаватора. Для улучшения качества напряжения в сети, питающей электроприводы, на входе каждого из них стоит мощный силовой фильтр со значительной ёмкостью.

В ходе натуральных экспериментов при перемежающихся дуговых ОЗЗ была зафиксирована значительная эскалация перенапряжений. На рис. 1, б показана осциллограмма (в двух масштабах) фазных напряжений при ОДЗ, где наблюдаются значительные гармонические составляющие, обусловленные той же причиной, что и в предыдущем случае (см. рис. 1, а). Кратность перенапряжений в данном опыте составляет $(2,59 - 2,61)U_{\phi}$.

Возможности натуральных экспериментов с замыканиями на землю в сетях ответственных предприятий весьма ограничены. Поэтому была поставлена задача разработать расчётные модели переходных процессов в указанных сетях. Для изучения перенапряжений в сети, питающей шагающий экскаватор, создана модель в среде Matlab/Simulink [2]. На рис. 2 приведена расчётная схема сети электрооборудования ЧРП.

Модель включает в себя эквивалентный трёхфазный генератор; эквивалент-

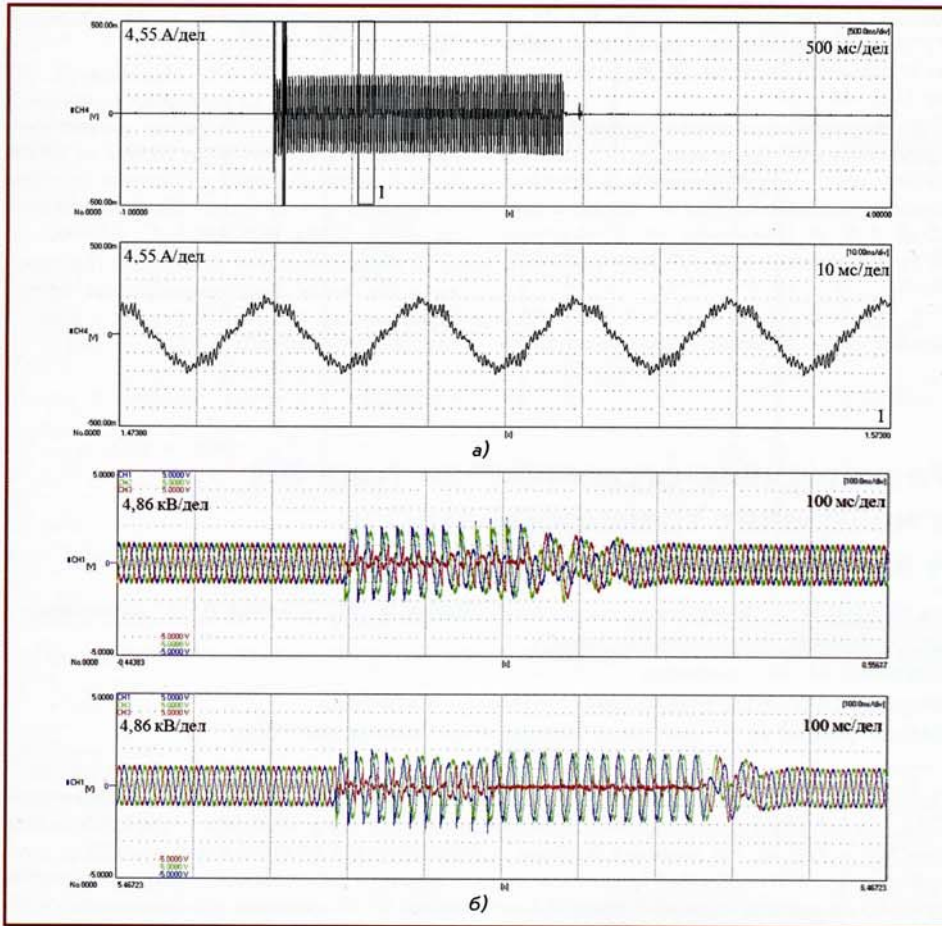


Рис. 1. Осциллограммы тока ОЗЗ (а) и фазных напряжений при ОДЗ (б) в сети питания ЧРП

ные трёхфазные ёмкости и сопротивле- ние кабеля; неуправляемый трёхфазный диодный мост; фильтр (состоящий из двух RL -цепей и ёмкости); тиристорный мост (инвертор); фильтр, сглаживающий выходную кривую тока; модель ЧРП (трёхфазная RC -цепь). Таймер и выключатель позволяют моделировать ОДЗ по теории Петерсена [3]. Эквивалентный генератор выдаёт трёхфазное напряжение, которое через эквивалентное сопротивление подаётся на вход диодного моста. Далее фильтр за счёт перезарядки конденсатора уменьшает пульсации выпрямленного напряжения, которое поступает на вход тиристорного моста, преобразующего слабо пульсирующее напряжение в напряжение нужной частоты и амплитуды. Инвертор управляет шести- пульсным генератором.

На рис. 3 изображена расчётная осциллограмма напряжения на неповреждённой фазе в сети с изолированной нейтралью при перемежающемся дуговым замыкании в точке К расчётной схемы [1]. Расчёты проводились при наиболее тяжёлых начальных условиях переходного процесса — максимальной нагрузке шагающего экскаватора. Форма кривой указывает на возможную эскалацию напряжения, которая приводит к перенапряжениям кратностью до $4,5U_{ф}$.

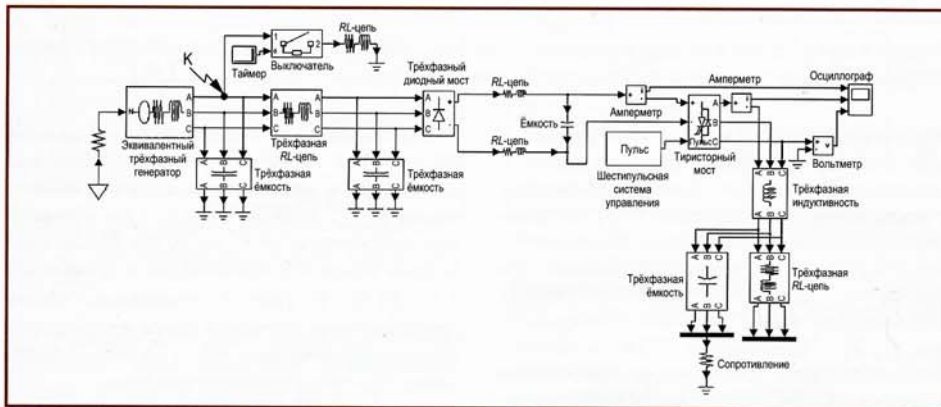


Рис. 2. Расчётная схема сети электроснабжения ЧРП

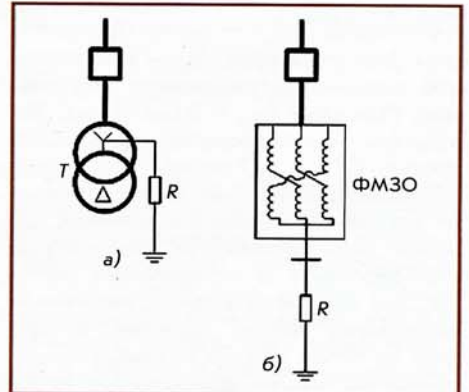


Рис. 4. Варианты подключения резисторов к нейтралю специальных трансформаторов малой мощности со схемой соединения обмоток Y/Δ (а) или фильтров нулевой последовательности (б)

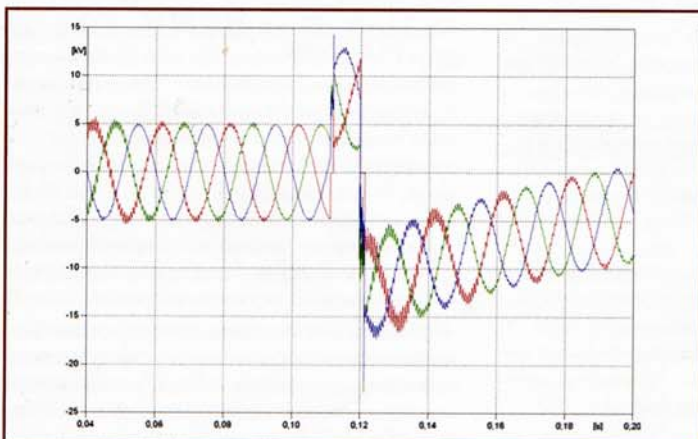


Рис. 3. Расчётная осциллограмма напряжения на неповреждённой фазе при ОДЗ в сети с изолированной нейтралью

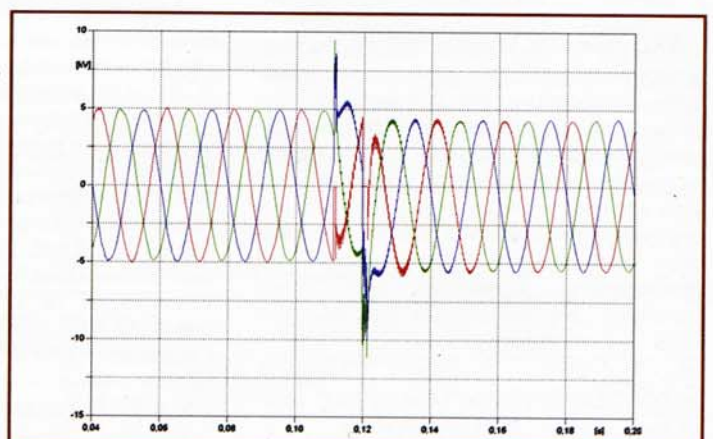


Рис. 5. Расчётная осциллограмма напряжения на неповреждённой фазе при ОДЗ в сети с резистивно-заземлённой нейтралью

Результаты моделирования позволяют предположить, что особенности переходного процесса обусловлены высокой ёмкостью силового фильтра. Для подавления эскалации перенапряжений целесообразно использовать резистивное заземление нейтрали сети. Однако в сетях 6 – 10 кВ распределительных подстанций явно выведенная нейтраль зачастую отсутствует. В этом случае рекомендуется подключение резисторов к нейтралю специальных трансформаторов малой мощности со схемой соединения обмоток Y/Δ , рис. 4, а) или фильтров нулевой последовательности, например типа ФМЗО (рис. 4, б), обмотки которого соединены в зигзаг [4].

На рис. 5 представлена осциллограмма напряжения на неповреждённой фазе с резистивным (через сопротивление 500 Ом) заземлением нейтрали. Форма кривой свидетельствует о незначительной эскалации напряжения, при которой максимальная кратность перенапряжений не превышает $2,2U_{\phi}$. Результаты моделирования и натурных экспериментов весьма близки, а характер процессов в целом одинаков.

При аналитическом расчёте гармонического состава выявлено частичное совпадение результатов. Так, расчётное значение 27-й гармоники [5] соответствует выражению $I'_{vm} = \frac{1}{v} \cos \alpha \cdot \cos [v \times \arccos(U_d)]$ (где v — номер гармоники, α — угол управления, U_d — относительное значение выпрямленного напряжения). При этом $I'_{27m} = 0,044$ отн.ед. Результаты моделирования показывают уровень $I'_{27m} = 0,05$ отн.ед.

Однако ряд гармоник имеет отличные от аналитического расчёта значения, что может быть связано с их усилением за счёт резонанса на определённых частотах. Это явление приводит к увеличению содержания высших гармоник в токе ОЗЗ на более чем 20 % тока промышленной частоты, что обуславливает необходимость выбора номинального сопротивления заземляющего резистора с учётом гармонического состава питающего напряжения.

Вывод

Исследование влияния ЧРП на перенапряжения при дуговых замыканиях позволило установить, что причина высоких кратностей перенапряжений состоит в самой схеме фильтрации ЧРП. Резистивное заземление нейтрали сети позволяет снизить кратность перенапряжений до допустимого безопасного уровня. При выборе номинального сопротивления заземляющего резистора необходимо учитывать гармонический состав тока ОЗЗ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ширковец А. И. Методические подходы к осциллографированию процессов при однофазных замыканиях на

землю в электрических сетях 6 – 35 кВ // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2008. Спец. вып. № 1. С. 44 – 51.

2. Экспериментальное исследование эффективности дугогасящего реактора РУОМ при «металлических» и дуговых однофазных замыканиях на землю в сети 10 кВ / А. И. Ширковец, М. В. Ильиных, И. Н. Дмитриев и др. // Электро. 2009. № 3. С. 17 – 26.

3. Дьяконов В. П. Matlab 6. 5 SP1/7 + Simulink 5/6. Основы применения (Библио-
тека профессионала). — М.: СОЛОН-Пресс, 2005. — 800 с.

лиотека профессионала). — М.: СОЛОН-Пресс, 2005. — 800 с.

4. Емельянов Н. И., Ильиных М. В., Кудряшов Д. С. О способах подключения высокоомных защитных резисторов для заземления нейтрали сети и их безопасной эксплуатации // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. 2008. Спец. вып. № 1. С. 62 – 65.

5. Жежеленко И. В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1984. — 160 с.

Резисторные ограничители тока КЗ в нейтралях трансформаторов и автотрансформаторов

НАУМКИН И. Е., канд. техн. наук, ВАСИЛЬЕВА А. Ю., САРИН Л. И., инженеры ООО «Болид»; ienau@yandex.ru
ПОЛЯЧЕК М. М., инженер
Филиал ОАО «НТЦ электроэнергетики» — СибНИИЭ
ЗАЦАРИННЫЙ Н. Г., инженер, Набережно-Челнинская ТЭЦ

Представлена информация о разработке и внедрении на Набережно-Челнинской ТЭЦ (далее ТЭЦ) резисторных ограничителей тока КЗ в нейтралях трансформаторов 110 – 220 кВ. На данной ТЭЦ токи однофазных КЗ $I^{(1)} = 46$ кА превышают токи трёхфазных $I^{(3)} = 36$ кА. Проблема необходимости замены масляных выключателей 110 кВ на элегазовые с токами отключения 40 кА решена применением ограничителей тока. Для снижения токов однофазных КЗ используются резисторные токоограничивающие устройства (ТОУ) типа ТОУ-Н-110, подключаемые к нейтрали трансформаторов.

Ключевые слова: ограничение тока КЗ, нейтрали трансформаторов, резисторные токоограничивающие устройства, Набережно-Челнинская ТЭЦ.

Значительное число повреждений и отказов силового оборудования в электрических сетях 110 – 220 кВ связано с короткими замыканиями (КЗ) на землю. Эффективное средство ограничения несимметричных токов замыкания на землю — заземление нейтрали трансформаторов через активные сопротивления [1, 2]. Применение ТОУ позволяет оптимизировать технические требования к отключающей способности выключателей и повысить надёжность работы основного силового оборудования сети.

Эффективность ТОУ связана с использованием мощных резисторов из композиционного материала. Устройство ТОУ-Н-110 позволяет решить проблему ограничения переходных и установившихся токов КЗ в комплексе с вопросами повышения ресурса работы трансформаторов. Результаты расчётов установившихся токов однофазного КЗ на шинах ОРУ 110 кВ ТЭЦ (рис. 1) при различных условиях заземления нейтрали трансформаторов ТЗ, Т4, Т6, Т7 и автотрансформаторов (АТ) АТ5, АТ8 приведены в табл. 1. Снижение токов КЗ в зависимости от сопротивления в нейтрали трансформаторов и АТ R_n показано на рис. 2.

Из табл. 1 следует, что включение резисторов $R_n \geq 10$ Ом в нейтраль трансформаторов и АТ приводит к необходи-

мому снижению токов КЗ — менее 40 кА, что позволяет использовать выключатели с номинальным током отключения $I_{o,ном}$, равном 40 кА. При изменении сопротивления R_n от 10 до 40 Ом снижение токов КЗ происходит в диапазоне $14 \div 23$ %. В табл. 1 приведены также действующие значения токов в нейтралях трансформаторов и АТ, а на рис. 3 показаны соответствующие графики.

Заземление нейтралей через активные сопротивления приводит к снижению токов через нейтрали трансформаторов ТЗ, Т4, Т6, Т7 на $45 \div 83$ %, АТ5 — на $25 \div 75$ %, АТ8 — на $53 \div 86$ % при соответствующем изменении сопротивления R_n в диапазоне 10 – 40 Ом. Вместе с тем токи через трансформаторы с короткозамкнутой нейтралью возрастают от 2,65 до 4,44 кА (для Т1, Т2, Т9) и от 2,18 до 3,37 кА (для блочных Т10, Т11). Данное увеличение не опасно для перечисленных трансформаторов, но должно быть учтено при расчёте уставок защит.

В табл. 2 приведены действующие значения токов, протекающих в обмотках трансформаторов и АТ при рассмотренных изменениях сопротивлений в нейтралях. Тенденции к этим изменениям — уменьшение токов в обмотках трансформаторов ТЗ, Т4, Т6, Т7 при увеличении со-