

Выводы

1. RC-цепь — защитный аппарат, обеспечивающий при соответствующем выборе его параметров и места установки в сети глубокое ограничение перенапряжений при коммутациях присоединений вакуумными выключателями.

2. Выбор параметров RC-цепей определяется различными факторами, в том числе типом защищаемого оборудования. Применение RC-цепей позволяет реализовать защиту от перенапряжений корпусной и витковой изоляции электродвигателей, силовых трансформаторов и токоограничивающих реакторов.

3. На основе композиционного материала, изготавливаемого компанией ООО «Болдид», возможно создание частотно-зависимых маломощных резисторов для комплектации RC-цепей (в целях снижения токов в нормальном режиме и режиме ОЗЗ через резистор и конденсаторы самого ограничителя).

4. Резисторы для RC-цепей ООО «Болдид» выпускает на различные номинальные значения (на базе конденсаторов сторонних производителей) для установки в сетях напряжением 6 – 110 кВ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

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

2. ГОСТ 13109–97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М.: ИПК изд-во стандартов, 1999.

3. РД 153-34.3-35.125–99. Руководство по защите электрических сетей 6 – 1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. 2-е изд. / Под научн. ред. Н. Н. Тиходеева. — Изд-во ПИЭПК, 1999.

4. Дегтярев И. Л. Теоретическое и экспериментальное исследование процессов, сопровождающих коммутации вакуумными выключателями: Дисс. ... канд. техн. наук. — Новосибирск: НГТУ, 2006.

5. Кадомская К. П., Лавров Ю. А., Рейхердт А. А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: Учебник для вузов. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2006. — 368 с.

6. Кадомская К. П., Лавров Ю. А., Лаптев О. И. Электрооборудование высокого напряжения нового поколения. Основные характеристики и электромагнитные процессы: Монография. — Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2008. — 343 с.

7. Защита сетей 6 – 35 кВ от перенапряжений / Ф. Х. Халилов, Г. А. Евдокунин, В. С. Поляков и др. // Под ред. Ф. Х. Халилова, Г. А. Евдокунина, А. И. Таджибаева. — СПб.: Энергоатомиздат, 2002. — 272 с.

8. Качесов В. Е. Эскалация перенапряжений в вакуумных выключателях при отключении электродвигателей и их предотвращение с помощью RC-цепей // Электричество. 2008. № 6. С. 24 – 35.

Ограничение перенапряжений в электрической сети 10 кВ

ДМИТРИЕВ И. Н., канд. техн. наук, начальник департамента эксплуатации и мониторинга основных средств ОАО «МРСК Урала»
620026, г. Екатеринбург, ул. Мамина-Сибиряка, д. 140
IDmitriev@MRSK-URAL.RU

Изложены проблемы аварийности оборудования напряжением 10 кВ на подстанции Ферросплав ОАО «Свердловэнерго». Показано, что внедрение резистивного заземления нейтрали позволило ограничить перенапряжения при замыканиях на землю. Опыт эксплуатации подтверждает результаты экспериментальных исследований, проведённых в системе электроснабжения ОАО «Серовский завод ферросплавов» (далее ОАО СЗФ).

Ключевые слова: перенапряжения, резонансные явления, резистивное заземление нейтрали.

Повышение надёжности работы подстанции 110/10 кВ Ферросплав, введённой в эксплуатацию в 1956 г. в ОАО «Свердловэнерго», всегда было актуальной проблемой. Подстанция сложная: две системы шин с обходной по 110 кВ, шесть силовых трансформаторов установленной мощностью 429 МВ · А, одиннадцать секций 10 кВ. Она обеспечивает питанием крупного потребителя — ОАО СЗФ с разрешённой мощностью потребления 196 МВ · А. Несмотря на эксплуатацию оборудования с выполнением высоких современных требований, повреждение силовых трансформаторов и токоограничивающих реакторов, установленных на отходящих фидерах 10 кВ, было довольно привычным событием.

В 2006 г. проблемы начались с повреждения одного из трансформаторов — Т4 мощностью 63 МВ · А. В то время на подстанции было установлено пять трансформаторов суммарной мощностью 346 МВ · А, и выход любого из них существенно влиял на работу предприятия-потребителя, хотя загрузка трансформаторов не превышала 70 %, была ограничена характером нагрузки (резко меняющаяся ударная), обусловленным работой дуговых печей. Руднотермические печи цеха № 1 предприятия работают в непрерывном режиме с закрытой дугой при периодических загрузках шихты, а также выпуске сплава и шлака. Аналогичные печи цеха № 2 работают с открытой электрической дугой при периодическом возобновлении технологического процесса.

Следующее повреждение с возгоранием случилось через месяц на другом трансформаторе Т1 мощностью 80 МВ · А. Для выяснения причины ООО «Болдид» провело экспериментальное обследование и анализ режимов работы электрооборудования электрической сети 10 кВ подстанции Ферросплав, а также разработало мероприятия по обеспечению его надёжного и безаварийного функционирования. При этом в сети 10 кВ подстанции Ферросплав были выполнены: измерение ёмкостных токов однофазного замыкания на землю

(ОЗЗ), измерение гармонического состава напряжения, мониторинг перенапряжений и токов.

Сеть 10 кВ подстанции Ферросплав работает в режиме изолированной нейтрали. Ёмкостные токи секций 10 кВ изменяются в пределах 2,2 – 12,5 А и зависят от схемы соединения подстанций ОАО СЗФ. Из-за малых ёмкостных токов на секциях шин 10 кВ подстанции дугогасящие реакторы (ДГР) не используются. Известно, что работа электрической сети в режиме изолированной нейтрали позволяет при длительных ОЗЗ не отключать присоединения, определять повреждённый фидер и локализовать место повреждения. Однако такой режим сопровождается возникновением специфических перенапряжений, основные из которых — дуговые. Их доля относительно всех видов аварий значительна (до 80 %).

Такие перенапряжения часто существуют в виде переходных процессов при переключении дуге и опасны для электроустановок высокими кратностями $U_{пер} = (3 \div 3,5)U_{ф}$, продолжительностью и широким распространением в сети, электрически связанной с местом повреждения. Они приводят к перекрытию либо пробоем дефектной или ослабленной (загрязненной и увлажненной) изоляции оборудования, а также способствуют накоплению и развитию дефектов. Последние снижают уровень изоляции и повышают вероятность её повреждения при последующих воздействиях перенапряжений.

Перенапряжения при ОЗЗ приводят к пробоем изоляции неповреждённых фаз и переходу ОЗЗ в «двухместное» или двойное замыкание на землю, близкое по своим характеристикам к двухфазным КЗ. Риск возникновения таких двойных замыканий заметно вырос в последнее время в связи со старением изоляции трансформаторов и аппаратов подстанции. Длительное присутствие в сети ОЗЗ снижает ресурс изоляции установленного оборудования, способствует старению изоляции и росту аварийности трансформаторов, токоограничивающих

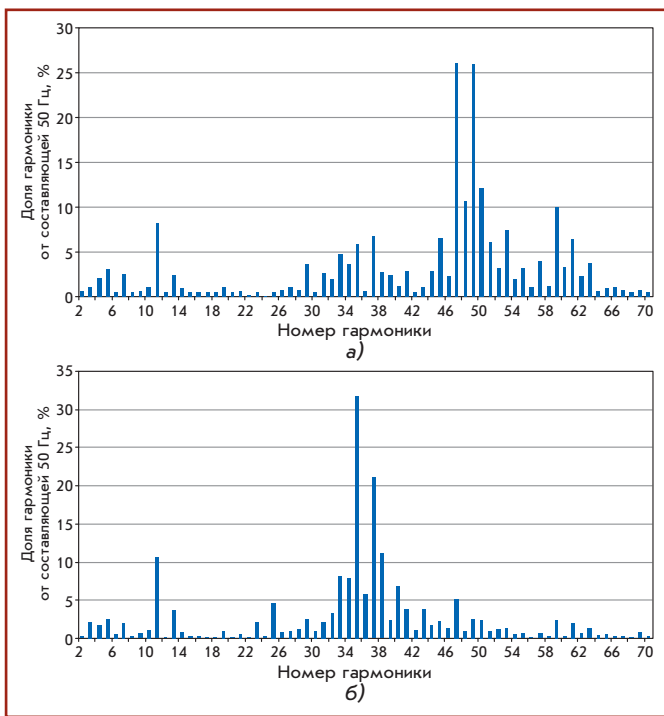


Рис. 1. Гармонические составляющие тока «металлического» ОЗЗ на секциях № 3 (а) и № 4 (б)

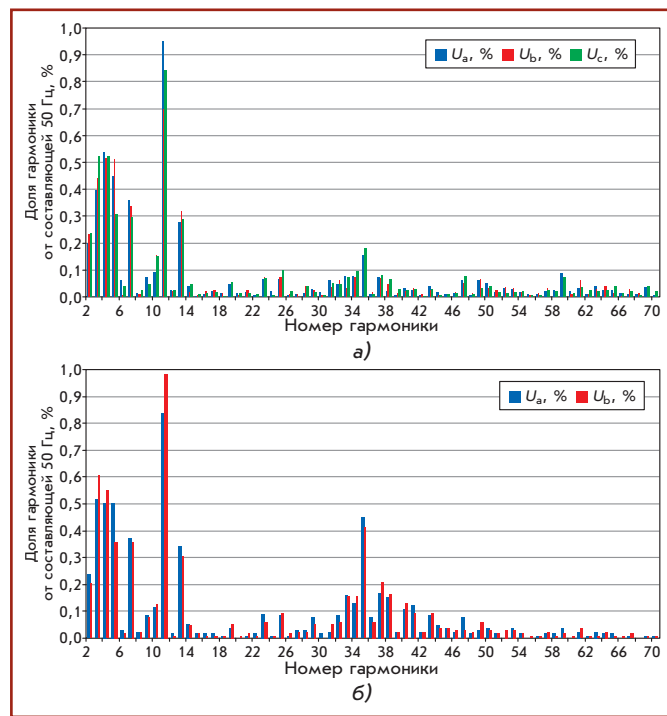


Рис. 2. Гармонические составляющие фазных напряжений на секции № 3 (печь 14 включена, нагрузка 0 А; печь 3 включена, нагрузка 1000 А) в двух режимах: а — нормальном; б — «металлического» ОЗЗ фазы С

реакторов и другого оборудования со слоистой изоляцией.

При наличии высших гармоник в напряжении и токах (что и наблюдается в сети 10 кВ подстанции Ферросплав), в том числе из-за резко меняющейся нагрузки дуговых печей, увеличивается риск ускоренного старения изоляции, а также появляется опасность значительного роста перенапряжений, связанного с резонансом на высших гармониках [1]. Полученный при исследованиях гармонический состав токов «металлического» ОЗЗ на секции № 3 (печь 3 отключена, печь 14 включена) и на секции № 4 (в различных режимах работы оборудования) показан в виде гистограмм на рис. 1 соответственно а, б.

При более подробном исследовании осциллограмм токов ОЗЗ было выявлено во время замыкания наличие резонансного увеличения и роста амплитуд некоторых гармонических составляющих, преобладающих в токе замыкания. В программной среде Matlab проведён спектральный анализ полученных при осциллографировании кривых фазных напряжений в двух режимах — нормальном и ОЗЗ. Гармонический состав фазных напряжений U_a , U_b , U_c в указанных режимах на секции 3 в виде гистограмм приведён для примера на рис. 2.

Анализ гармонического состава фазных напряжений и токов замыкания показал наличие резонансных процессов при «металлическом» ОЗЗ. Эти процессы были замечены при каждом опыте «металлического» замыкания на землю, в каждом из рассмотренных режимов и проявлялись в увеличении процентного содержания гармонических составля-

ющих (до 20 раз) при возникновении ОЗЗ и в его изменении или росте в течение времени замыкания. Это позволяет предположить возможность дальнейшего увеличения амплитуд гармонических составляющих фазных напряжений с течением времени замыкания, которое превышает продолжительность опыта, приводящего к возникновению кратностей перенапряжений, достаточных для развития аварии.

Гармонический состав тока влияет также на условия работы трансформаторов. Известно, что при несинусоидальных токах в обмотках трансформаторов резко возрастают тепловые потери вследствие поверхностного эффекта и эффекта близости, а также возникают потери, связанные с магнитными потоками рассеяния [2]. Это приводит к значительному повышению температуры элементов трансформатора даже при токах, значения которых существенно ниже номинальных для трансформатора данного типа.

Чтобы оценить влияние резонанса на условия работы трансформаторов, следует определить эквивалентную токовую нагрузку (по тепловому режиму) с учётом высших гармоник тока. При резонансном увеличении токов эквивалент-

ная токовая нагрузка трансформатора (с учётом гармонического состава тока) продолжительные интервалы времени может превышать 100 %, т. е. трансформатор оказывается перегруженным по тепловому режиму.

Заземление нейтрали через высокоомный резистор снижает резонансный рост гармонической составляющей напряжения, обеспечивает быстрое установление процесса, ограничивает перенапряжения на электрооборудовании в режиме однофазного дугового замыкания (ОДЗ), предотвращает развитие резонансных и феррорезонансных явлений, тем самым значительно снижает степень повреждения изоляции оборудования.

По результатам проведённых исследований ООО «Болид» подготовил ряд рекомендаций. Вместе с тем обсуждались возможности решения проблем, отсутствующих ОЗЗ, традиционным способом — применением в нейтрали ДГР. Однако этот вариант был отвергнут как малоэффективный, не позволяющий решить проблему комплексно. Комбинированная нейтраль была признана экономически не обоснованной. В качестве первого этапа модернизации защиты от ОЗЗ на всех секциях подстанции Ферросплав (до монтажа на подстанции зазем-

Таблица 1

Состояние защитных резисторов в нейтрали	Действительное значение I_{O33} (50 Гц), А	Составляющие тока ОЗЗ, А		Характер тока ОЗЗ
		активная	реактивная (ёмкостная)	
ЗР1 и ЗР2 включены	26,87	25,14	9,48	Активно-ёмкостный
ЗР1 отключён, ЗР2 включён	15,86	12,58	9,65	
Нейтраль изолирована, ЗР1 и ЗР2 отключены	9,91	0,219	9,90	

Номер опыта (файла)	Значения перенапряжений, зарегистрированные в указанных местах сети 10 кВ с различными режимами работы нейтрали								
	два резистора в нейтрали			один резистор в нейтрали			изолированная нейтраль		
	секция № 11	секция № 10	шинный мост	секция № 11	секция № 10	шинный мост	секция № 11	секция № 10	шинный мост
Включена печь 9 цеха № 1 ОАО СЗФ									
7, 9, 11 (файлы 101,55; 104,58; 105,59)	2,15	2,35	4,93	2,48	2,42	5,06	2,5	2,8	5,09
8, 10, 12 (файлы 102,56; 103,57; 106,60)	2,43	2,45	3,92	2,46	2,50	4,85	2,45	2,63	4,82
Включена печь 9 цеха № 1 и печь 17 цеха № 2 ОАО СЗФ									
13, 15, 17 (файлы 110,64; 113,66; 118,69)	2,21	2,32	3,81	2,24	2,36	3,38	2,27	2,83	6,23
14, 16, 18 (файлы 112,65; 114,67; 117,68)	2,29	2,28	5,07	2,40	2,48	4,97	2,64	2,64	5,42

ляющих резисторов) было изменено действие защиты по напряжению нулевой последовательности от включения вводного выключателя «поврежденной» секции с выдержкой времени 0,5 с.

В целях определения необходимого номинального значения резистора проведён комплексный расчёт перенапряжений при ОДЗ в зависимости от значения резистора, включённого в нейтраль сети. Для эффективного ограничения дуговых перенапряжений рекомендовано заземление нейтрали сети 10 кВ подстанции Феррослав с помощью резисторов 500 Ом, а для вывода нейтральной точки сети 10 кВ секции — устройство ФМЗО-200/11. Номинальный ток последнего — 25,2 А, ток двухчасовой нагрузки — 31,5 А. Активный ток от резистора РЗ-500-67-10 составляет 11,55 А.

Резистивное заземление нейтрали в сети 10 кВ трансформатора Т6 мощностью 63 МВ·А на новых секциях № 10 и 11 реализовано в 2008 г. с помощью защитных резисторов РЗ-500-68-10, разработанных и производимых ООО «Болид» на основе уникального, не имеющего мировых аналогов композиционного электропроводного материала. Сеть 10 кВ трансформатора Т6 является резервной, и все печи цехов № 1 и 2 ОАО СЗФ «нормально» запитаны от секций 10 кВ трансформаторов Т1–Т5 подстанции Феррослав. Отходящие кабели этих ячеек выполнены из сшитого полиэтилена, поэтому проблема ограничения перенапряжений весьма актуальна.

После ввода в эксплуатацию трансформатора Т6 (2009 г.) были проведены совместные с ООО «Болид» исследования перенапряжений в резистивном режиме работы нейтрали (с включённым резистором) и в изолированном (с отключённым). Исследование эффективности внедрения резистивного заземления нейтрали для ограничения перенапряжений в распределительной сети 10 кВ подстанции Феррослав включало в себя несколько этапов:

рассмотрения процессов изменения фазных напряжений и тока в месте замыкания при «металлическом» и дуговом ОЗЗ в условиях резистивно-заземленной и изолированной нейтрали при работе дуговых печей;

выполнения частотного анализа сигналов фазных напряжений и тока ОЗЗ при на-

личии (отсутствии) резисторов в нейтрали и различных режимах загрузки печей;

осуществления оценки эффективности резистивного заземления нейтрали, реализованного в сети 10 кВ подстанции.

В табл. 1 приведены экспериментально полученные токи ОЗЗ (50 Гц) в сети 10 кВ трансформатора Т6. В табл. 2 представлены уровни перенапряжений в сети 10 кВ трансформатора Т6, зарегистрированные в трёх точках сети при ОДЗ в различных режимах загрузки печей на секциях № 10 и 11. Для расчёта перенапряжений в абсолютных единицах следует приведённую в табл. 2 кратность умножить на значение амплитудного фазного напряжения сети (секции № 10, 11) в нормальном режиме 9,4 кВ.

Данные табл. 2 свидетельствуют о действительном ограничении перенапряжений путём резистивного заземления нейтрали. При заземлении нейтрали сети 10 кВ трансформатора Т6 с помощью двух резисторов РЗ-500-68-10 на каждой секции № 10 и 11 кратности перенапряжений не превышают $2,45U_{ф, \max}$, если включён даже один резистор — $2,5U_{ф, \max}$. При изолированной нейтрали (оба резистора отключены) перенапряжения в сети 10 кВ трансформатора Т6 достигают $2,83U_{ф, \max}$. Фактически же в сети с изолированной нейтралью перенапряжения могут быть и выше, вплоть до $(3,2 - 3,5)U_{ф, \max}$ в зависимости от электрического угла пробоя повреждаемой фазы.

Проведённые исследования подтвердили эффективность использования резистивного заземления нейтрали в сети 10 кВ трансформатора Т6 подстанции 110/10 кВ Феррослав, показали действительное ограничение перенапряжений при ОЗЗ в сети с включёнными резисторами. Опыт эксплуатации защитных резисторов типа РЗ в целях снижения перенапряжений при ОЗЗ, ликвидации резонансных явлений (обусловленных в том числе нелинейной нагрузкой — дугowymi печами) и обеспечения селективности релейных защит от ОЗЗ оказалась положительным. За время эксплуатации трансформатора Т6 повреждений элементов сети не наблюдалось.

При этом целесообразность организации в сети 10 кВ с резистивно-заземленной нейтралью направленной защиты от ОЗЗ (используя сигналы $3U_0$ с шинных трансформаторов напряжения и $3I_0$ с

трансформаторов тока нулевой последовательности) не вызывает сомнений. Уставку по току нужно выбирать с учётом тока резистора в нейтрали секции (либо суммарного тока резисторов двух секций, если секции объединены).

В целом резистивное заземление нейтрали сети обеспечивает устранение дуговых перенапряжений высокой амплитуды (и, как следствие, множественных повреждений в сети), исключение феррорезонансных и резонансных процессов (повреждений трансформаторов напряжения и прочего основного оборудования), простое выполнение чувствительной и селективной релейной защиты от ОЗЗ, основанное на токовом или фазовом принципе.

В результате исследований принято комплексное решение: «С целью снижения перенапряжений при ОЗЗ и ликвидации резонансных явлений, а также для обеспечения селективности релейных защит от ОЗЗ установить резисторы типа РЗ на секциях 10 кВ трансформаторов Т1–Т5 подстанции Феррослав, работающих с изолированной нейтралью». В настоящее время подготовлена долгосрочная (на несколько лет) инвестиционная программа повышения надёжности работы указанной подстанции с учётом принятого решения.

Следует отметить и другие объекты, проблемы которых решались при тесном сотрудничестве с ООО «Болид»: подстанции 110/10 кВ Фарфоровая и 110/35/6 кВ Карпинск, а также большое число работ по технологиям снижения перенапряжений и аварийности сетей 6–35 кВ. Эффект от совместной работы всегда превосходит самые смелые ожидания при неизменно успешном решении технических проблем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Замыкания на землю в электрической сети 10 кВ с источниками высших гармоник / А. М. Иванов, О. Г. Шишкина, М. В. Ильных и др. // Материалы III всероссийской науч.-техн. конф. «Ограничение перенапряжений и режимы заземления нейтрали сетей 6–35 кВ». — Новосибирск, 2004.

2. Аррилага Дж., Брэдли Д., Боджер Л. Гармоники в электрических системах / Пер. с англ. — М.: Энергоатомиздат, 1990.