

Также следует отметить, что в результате искровых разрядов внутри конденсатора значительно ухудшается электрическая прочность масла, снижается температура его вспышки, растёт количество осадка. Накопление этого осадка в масле происходит главным образом за счёт термического разложения масла в зоне горения дуги. Накопление проводящих частиц осадка на изоляционных деталях даже при нормальных условиях работы могут послужить причиной возникновения скользящих разрядов, а при перенапряжениях привести к сплошному перекрытию.

В данном случае наблюдаются характерные следы искровых (дуговых) разрядов, особенно в центре верхнего фланца, металлической крышки и на токопроводящем поводе (в двух местах оплавление металла).

Вывод. В данной работе представлена проведённая комплексная диагностика четырёх конденсаторов связи 110 кВ. В рассмотренных случаях первичной причиной для вывода данного оборудования из работы явился результат тепловизионного обследования. С целью определения технического состояния проведены высоковольтные испытания, измерения конденсаторов, физико-химический и хроматографический анализ конденсаторного масла. В целях подтверждения обнаруженных дефектов выполнено вскрытие конденсаторов и осмотр их составных частей. Проанализировав все случаи, можно увидеть, что время развития дефекта в представленных конденсаторах связи составило от пяти до восьми месяцев, т. е. не превысило и одного года. Исходя из этого, в качестве эксперимента, для более эффективного контроля в эксплуатации за конденсаторами связи, будет целесообразным выполнение тепловизионной диагностики с периодичностью один раз в год, для возможного выявления дефектов на ранней стадии развития.

Литература

1. Алексеев Б. А., Коган Ф. Л., Мамиконянец Л. Г. Объём и нормы испытаний электрооборудования. М. : ЭНАС, 2008. 256 с.
2. Бажанов С. А., Кузьмин А. В., Вихров М. А. Основные положения методики инфракрасной диагностики электрооборудования и ВЛ. М. : РАО «ЕЭС России», 2000. 136 с.
3. ГОСТ 15581-80. Конденсаторы связи и обора мощности для линий электропередач». М. : Гос. комитет СССР по стандартам, 1981. 44 с.
4. ГОСТ 5775-85. Масло конденсаторное. М. : Гос. комитет СССР по стандартам, 1985. 4 с.
5. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворённых в масле / Департамент науч.-техн. политики и развития. М. : РАО «ЕЭС России», 2001. 41 с.

УДК 621.316.1:621.316.771

Ширковец А. И.
Shirkovets A. I.

ПОВЫШЕНИЕ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ СЕТЕЙ 6-35 КВ НА ЭЛЕКТРОСТАНЦИЯХ ПОСРЕДСТВОМ ВКЛЮЧЕНИЯ РЕЗИСТОРОВ В НЕЙТРАЛЬ

NETWORKS OPERATING RELIABILITY GROWTH AT 6-35 KV AT POWER STATIONS BY CONNECTION RESISTORS TO NEUTRAL POINT

Представлены технические решения, направленные на предупреждение аварийных ситуаций в сетях выдачи мощности и собственных нужд электростанций. Выполнены расчеты по ограничению перенапряжений при замыканиях на землю, приведены преимущества и

способ включения резисторов в нейтраль сети. Нормативно обоснована целесообразность применения резисторов на основе композиционного материала, проанализирован опыт их эксплуатации на электростанциях, в том числе в условиях Севера.

Ключевые слова: сеть выдачи мощности, сеть собственных нужд, замыкание на землю, режим заземления нейтрали, компенсация емкостного тока, высокоомный резистор.

Постановка задачи. В настоящее время актуальной является задача снижения повреждаемости силового электрооборудования напряжением 6-35 кВ в сетях выдачи мощности и собственных нужд (СН) электрических станций. Высокий уровень повреждаемости обусловлен как физическим износом электрооборудования, так и воздействием на его изоляцию перенапряжений. Первичной причиной повреждения изоляции оборудования, как правило, являются пробой из-за однофазных замыканий на землю (ОЗЗ), переходящих в многоместные и междуфазные короткие замыкания (КЗ) [2].

Вероятность развития аварийной ситуации в значительной мере определяется режимом заземления нейтрали сети. В схемах выдачи мощности 6-10 кВ в главном распределительном устройстве (ГРУ), с кабельной сетью большой протяженности, для компенсации емкостного тока (КЕТ) и ограничения перенапряжений традиционно используются дугогасящие реакторы (ДГР). Это решение не является оптимальным, поскольку на электростанциях остается большое число ступенчатых ДГР, в одной и той же сети могут быть включены реакторы с разными принципами регулирования, наблюдаются отказы автоматики управления. Еще одна проблема связана с отсутствием селективных релейных защит от ОЗЗ: поиск фидера с однофазным повреждением выполняется методом поочередных отключений. Компенсация высших гармоник тока однофазного замыкания с помощью ДГР, как правило, не предусмотрена.

Сети 6-35 кВ на электростанциях питают крупные промышленные предприятия и также заземляются через ДГР, сети СН эксплуатируются с изолированной нейтралью. Это обуславливает возможность длительного воздействия на изоляцию сети перенапряжений и ведет к выходу из строя электродвигателей (ЭД), кабельных линий (КЛ) и другого оборудования. На рис. 1 показаны последствия возгорания в кабельном коллекторе, возникшего из-за не отключенного ОЗЗ в сети 10 кВ со ступенчатыми ДГР. В результате произошло повреждение 64 силовых кабелей. Аварийно-восстановительные работы проводились непрерывно в течение нескольких суток, с заменой участков по 20–30 м кабеля и монтажом соединительных муфт. Общая длина таких кабельных вставок составила 1,5 км.



Рис. 1. Пожар в кабельном сооружении из-за возгорания силовых кабелей 10 кВ

Возможность возникновения аварийных, в том числе пожароопасных, ситуаций определяет актуальность перехода сетей 6–35 кВ электростанций на новый режим нейтрали, который обеспечит надежную защиту от перенапряжений при ОЗЗ и позволит выявлять отходящее присоединение с однофазным повреждением до его перехода в междуфазное КЗ.

Техническое обоснование и схема подключения. Для ограничения перенапряжений предлагается оптимизация режима заземления нейтрали сетей 6-35 кВ на электростанции с применением высокоомных резисторов, что нормативно закреплено в ПУЭ [4, п. 1.2.16, п. 1.4.166]. Резистор может быть установлен на станции как самостоятельно, так и параллельно силовой обмотке ДГР. Первый вариант является характерным для сетей выдачи мощности, второй – для сетей СН.

Анализ натуральных осциллограмм подтверждает, что эффективность КЕТ существенно снижается при раскомпенсации $\nu \geq 10\%$: уровень перенапряжений при этом $K_{II} = U_{\text{ПЕР}}/U_{\text{ФМАХ}} \geq 3,0$. На рис. 2 приведены расчетные осциллограммы дугового ОЗЗ, полученные на модели сети ГРУ-6 кВ Саратовской ТЭЦ-2 при заземлении нейтрали через реактор типа РЗДСОМ-230/6 ($I_{\text{ДГР}} = 50 \text{ А}$, $I_C = 40 \text{ А}$, $\nu = -25\%$). Особенностью схемы является совместная работа секций ГРУ и СН. Включение резистора сопротивлением 800 Ом параллельно ДГР на каждой секции позволяет в наиболее тяжелом расчетном режиме на 17 % снизить уровень перенапряжений, а также снизить вероятность повторных пробоев из-за уменьшения переходных восстанавливающихся напряжений на неповрежденных фазах.

На основании результатов расчетов и экспериментов в действующих сетях 6-35 кВ с КЕТ была выполнена оценка снижения перенапряжений за счет включения резистора в нейтраль сети (рис. 3).

Типовая схема и пример подключения ДГР и резисторов в нейтраль сети приведены на рисунке 4 (ФНП – фильтр нулевой последовательности со схемой «зигзаг», ОПФ – определение поврежденного фидера; на фотографии – ФНП слева, резистор посередине, ДГР справа). При отсутствии КЕТ схема (рис. 4) сохраняется: высокоомный резистор подключается в нейтраль фильтра типа ФЗМ, ФМЗО, ФЗГ, но уже без ДГР и шкафа автоматики.

Включение резистора в нейтраль сети позволяет устранить недостатки работы сети с КЕТ и изолированной нейтралью, а именно:

- ограничить перенапряжения при дуговых ОЗЗ на 15–30 %, что ведет к уменьшению числа перекрытий изоляции;
- исключить переходы ОЗЗ в двойные замыкания и многоместные повреждения;
- повысить чувствительность токовых релейных защит для надежного ОПФ;
- исключить опасные резонансные явления с увеличением амплитуды фазных напряжений до $(1,8-2,0) U_{\text{Фmax}}$.

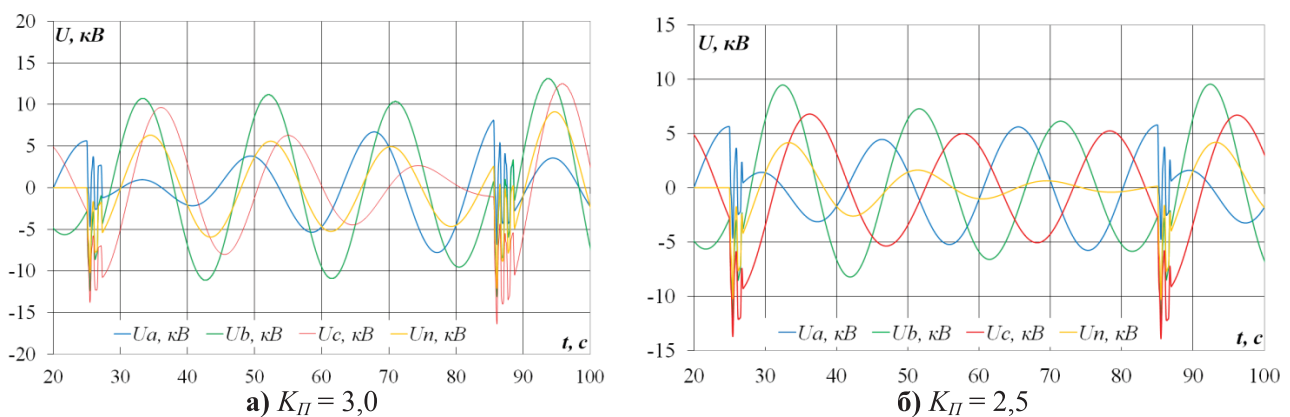


Рис. 2. Компьютерные осциллограммы напряжений на фазах и нейтрали:

- а) при дуговом ОЗЗ в сети 6 кВ с ДГР в нейтрали;
- б) при установке параллельно ДГР резистора

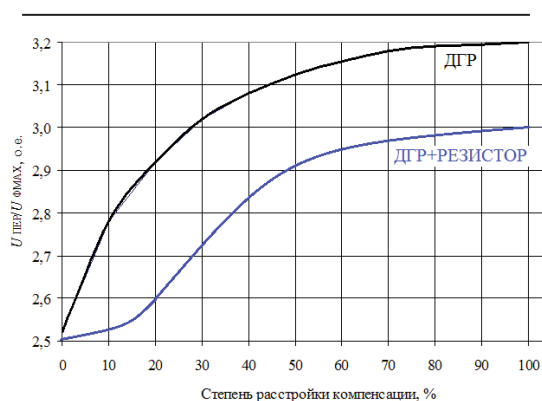


Рис. 3. Инженерная оценка зависимости перенапряжений от степени расстройки КЕТ

Для сетей электростанций с КЕТ благодаря резистору, обеспечивающему стекание избыточных зарядов с нейтрали, появляется возможность ввести напряжение смещения нейтрали в допустимые пределы согласно требованиям ПТЭ электроустановок потребителей [3, п. 2.8.16].

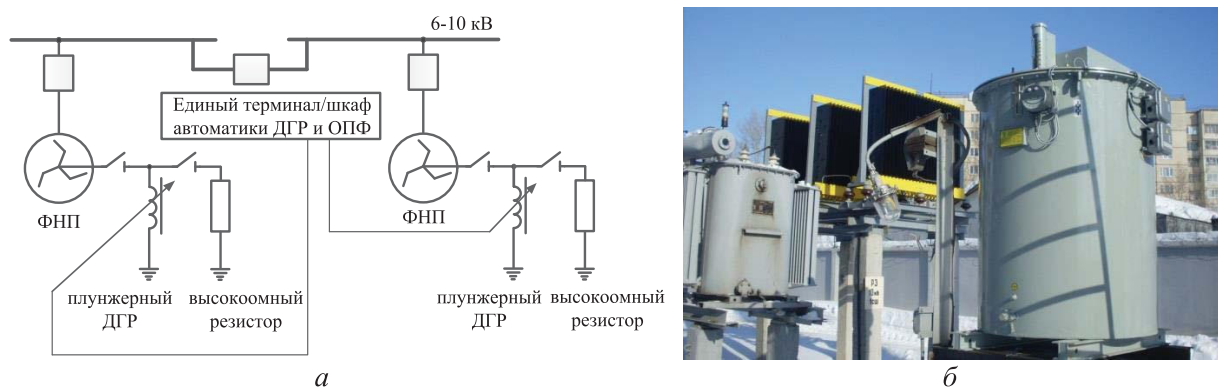


Рис. 4. Схема (а) и внешний вид (б) подключения резистора параллельно ДГР

В схеме рисунка 4 задача выбора и настройки релейных защит от ОЗЗ может быть решена за счет использования систем ОПФ – централизованных устройств, работающих на разных принципах, например, сравнения полярностей первых полуволн тока $3I_0$ и напряжения $3U_0$, сравнительного замера тока $3I_0$ промышленной частоты и высших гармоник в этом токе на разных фидерах, определения направления мощности нулевой последовательности.

Особенности резистивного материала. В задаче повышения эксплуатационной надежности оборудования 6–35 кВ на электростанциях важную роль играют технические характеристики материала, из которого изготавливаются резисторы для заземления нейтрали. В конструкции металлических резисторов в качестве активной части используются разные виды нержавеющей стали с положительным температурным коэффициентом сопротивления (ТКС). При нагревании таких резисторов до 640–790 °С, что допускается стандартом IEEE 32 [6] происходит рост сопротивления до 2 раз относительно номинального. При этом активный ток резистора пропорционально уменьшается, что приводит к снижению чувствительности релейных защит от ОЗЗ.

Предельная допустимая температура нагрева стальных проводников согласно ПУЭ [4, п. 1.4.16] составляет 300–400 °С. Поэтому применение в отечественных условиях резисторов со стальными токоведущими частями, которые нагреваются до температур более 600 °С неправомерно.

У резисторов из композиционного материала [5] температура в рабочем режиме в 5–10 раз меньше, чем у металлических, что удовлетворяет требованиям отечественных нор-

мативных документов. Применение композиционных резисторов с предельной температурой не более 200 °С позволяет обеспечить их высокую надежность, а повышение активного тока при нагревании резистора (за счет отрицательного ТКС) гарантирует требуемую чувствительность релейных защит. Резисторы серии РЗ на основе композиционного материала эксплуатируются в сетях 6–35 кВ России, Белоруссии, Украины, Казахстана, Кыргызстана, Вьетнама, Ирана с начала 2000-х гг., нареканий не отмечено.

Опыт эксплуатации резисторов на электростанциях

Резисторы серии РЗ установлены в сетях выдачи мощности на Уфимской ТЭЦ-3 (2011), Кемеровской и Новокемеровской ТЭЦ (2001–2003), Саратовской ГРЭС (2003–2005), Новосибирских ТЭЦ-2 и ТЭЦ-3 (2008), Тобольской ТЭЦ (2011), Нижневартовской ГРЭС (2006), Иркутской ТЭЦ-11 (2010) и ряда других электростанций. Применяемый резистивный материал обеспечивает работоспособность резисторов в сложных климатических условиях и при низких температурах, что характерно для северных регионов России.

Положительный эффект от внедрения резисторов подтверждается опытом эксплуатации. Так, в августе 2010 года на мощной ТЭЦ в Башкирии при возникновении ОЗЗ на потребительском фидере произошел пробой изоляции кабеля 6 кВ с последующим его возгоранием, а также повреждение двух ЭД. Величина емкостного тока сети 6 кВ от шин ГРУ составляла ≈ 128 А. Для исключения подобных аварий в дальнейшем было выполнено обследование сети, разработан рабочий проект и в 2011 г. реализовано заземление нейтрали сети 6 кВ на ТЭЦ с использованием резисторов. На рис. 5а приведена сравнительная оценка повреждаемости за период 01.10.2007 ÷ 01.12.2011 г. и 01.12.2011 ÷ 01.06.2015 г. – до и после установки защитных резисторов (ЗР) соответственно. Резисторы РЗ-300-40-6 (рис. 5б) были установлены на двух секциях ГРУ-6 кВ параллельно реакторам типа РДМР-480/6, управляемых автоматикой, совмещенной с терминалами ОПФ в шкафу серии «Бреслер 0117.168».

Основной задачей установки резисторов в сетях СН электростанций является предупреждение выхода из строя приводных высоковольтных ЭД технологических установок: циркуляционных и питательных насосов, шаровых мельниц, вентиляторов, механизмов подачи топлива. Причиной повреждения ЭД является воздействие дуговых перенапряжений высокой кратности на ослабленную статорную изоляцию, из-за термического воздействия наблюдается перегорание витковой изоляция (рис. 6) [1].



а



б

Рис. 5. Повреждаемость в сети 6 кВ мощной ТЭЦ (а) и фотографии установленных на ОРУ двух резисторов 300 Ом (б)

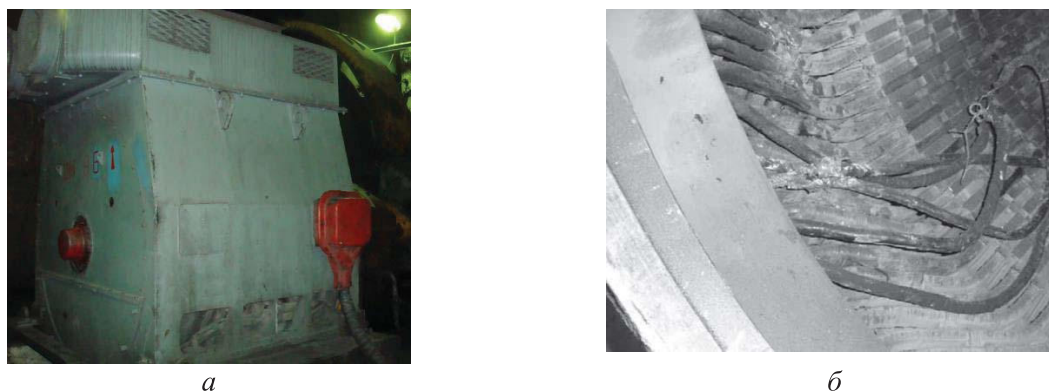


Рис. 6. Внешний вид приводного электродвигателя 6 кВ/630 кВт (закрытого исполнения) шаровой мельницы (а) и его поврежденный при ОЗЗ статор (б)

В таблице приведены нормированные уровни испытательного напряжения ЭД, определенные согласно [4, п. 1.8.15, табл. 1.8.9]. Приведены действующие значения испытательного напряжения частотой 50 Гц при времени испытания 1 мин. Неограниченные высокочастотные перенапряжения, воздействующие на изношенную изоляцию ЭД при дуговых ОЗЗ, могут достигать в амплитуде примерно $3U_{\text{фmax}}$, т. е. 15,5 кВ при номинальном напряжении 6,3 кВ и 25,8 кВ – при напряжении 10,5 кВ. Сопоставление их с данными в табл. 1 позволяет заключить, что такие перенапряжения представляют опасность с точки зрения надежности эксплуатации ЭД в режимах ОЗЗ, если сеть не защищена резисторами.

Таблица 1

Уровень испытательного напряжения электродвигателей, кВ

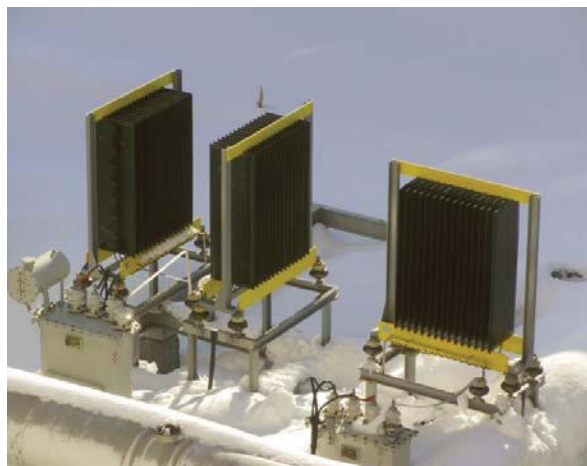
$U_{\text{ном}}$ \ $S_{\text{ном}}$	до 1 МВт	свыше 1 МВт
6,0 – 6,6 кВ	10,4 – 11,4	12,0 – 13,2
10 – 10,5 кВ	16,8 – 17,6	10,4 – 10,8

Выявлено, что из-за перенапряжений при однофазных пробоях в сетях СН 6 кВ Энгельсской ТЭЦ-3 (эксплуатируется 65 ЭД) и Саратовской ТЭЦ-2 (эксплуатируется 110 ЭД) до установки резисторов ежегодно повреждалось до 6 машин. После установки резисторов, в 2000 г. и 2004 г. соответственно, повреждения прекратились. Таким же образом была решена проблема останова технологических ЭД в схемах СН на Камчатской ТЭЦ-2, где резисторы 1000 и 700 Ом были введены в 2012 г. (рис. 7), а также на Сахалинской ГРЭС в 2008 – 2011 гг.

В 2008 г. произошел ряд технологических нарушений и аварий с многократным каскадным повреждением трансформаторов напряжения электромагнитного типа из-за феррорезонанса, возникавшего при ОЗЗ в сети 35 кВ объектов нефтедобычи, питаемой от газотурбинных электростанций (ГТЭС). Это приводило к потере сигналов напряжения в цепях учета и телемеханики, погасанию секций 35 кВ на станции, потере питания приводных технологических механизмов, таких как буровые установки скважин. Перерыв в добыче нефти из-за простоя оборудования приводил к существенному экономическому ущербу. Для исключения и предупреждения таких ситуаций высокоомными резисторами были оснащены сети выдачи мощности 35 кВ Ватьеганской ГТЭС-72 (2008), Тевлинско-Русскинской ГТЭС-48 (2009), Каменной ГТЭС-48 (2011) и других станций.



а



б

Рис. 7. Линейная ячейка в помещении РУСН-6 кВ (а) для подключения оборудования резистивного заземления нейтрали (б)

Техническое решение по резистивному заземлению нейтрали сетей 10 и 35 кВ в настоящее время используется как типовое при проектировании и строительстве систем генерации и электроснабжения на крупных месторождениях Северного региона – Покачевском, Повховском, Бованенковском, Заполярном и других.

Заключение. Установка резисторов позволяет повысить надежность и безопасность функционирования, эксплуатационного обслуживания основного и вспомогательного технологического оборудования сетей 6–35 кВ на электростанциях в режимах, связанных с однофазными повреждениями изоляции. Это достигается за счет ограничения перенапряжений и исключения множественных повреждений и каскадных отключений.

Литература

1. Иванов А. В. Аварийные ситуации, возникающие при эксплуатации электрооборудования 6–10 кВ в сетях газоперерабатывающих заводов // *Электротех.* 2008. № 5. С. 66–69.
2. Лихачев Ф. А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. М. : Энергия, 1971. 152 с.
3. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей : утв. приказом Минэнерго РФ от 13.01.2003 № 6.
4. Правила устройства электроустановок. 7 изд. : утв. приказом Минэнерго РФ от 08.07.2002 № 204.
5. Состав для композиционного электропроводного материала: пат. 2289172 Рос. Федерация, МПК Н01В 1/18. / Л. И. Сарин, Н. Г. Царегородцев, В. М. Копылов ; заявл. 12.05.04; опубл. 10.12.06. Бюл. № 34.
6. IEEE Standard 32-1972 (Reaffirmed 1997) Standard Requirements, Terminology, and Test Procedure for Neutral Grounding Devices. URL: <http://standards.ieee.org/findstds/standard/32-1972.html> (дата обращения: 14.01.2016).