

КОМПЕНСИРОВАННАЯ И КОМБИНИРОВАННО ЗАЗЕМЛЕННАЯ НЕЙТРАЛЬ

<http://www.news.elteh.ru/arh/2007/44/08.php>

Михаил Ильиных, Леонид Сарин, Андрей Ширковец, ООО «ПНП БОЛИД», г. Новосибирск Эдуард Буянов, ОАО «Евраз-холдинг», г. Новокузнецк

Опыт эксплуатации сети 6 кВ металлургического комбината

Разговор об особенностях заземления нейтрали продолжают сибирские специалисты, проводившие исследования в сетях металлургического комбината.

Главной целью исследования являлось сравнение особенностей процессов, происходящих при ОЗЗ в сети с компенсированной нейтралью (наличие только ДГР в нейтрали) и после установки резисторов параллельно катушке. С применением методов статистической обработки результатов по выборке, включающей 239 осциллограмм, показано, как меняется динамика процессов, вызывающих опасные воздействия на изоляцию сети, в зависимости от способа заземления нейтрали. Это позволит в дальнейшем более корректно и обоснованно подходить к выбору способа заземления нейтрали в сетях 6–35 кВ, режим эксплуатации которых близок к описываемому.

В статье рассматривается опыт эксплуатации сети 6 кВ ТЭЦ Новокузнецкого металлургического комбината (здесь и далее будем использовать также диспетчерское название станции – ТЭЦ КМК) в период с 23.12.2004 по 22.12.2005 г. Указанная сеть в течение многих лет работала в режиме компенсированной нейтрали. Такой режим позволяет сохранять работоспособность присоединений при длительных однофазных замыканиях на землю (ОЗЗ).

Принципиальная схема сети 6 кВ ГРУ ТЭЦ приведена на рис. 1. В нормальной схеме все секции объединены через шины Скотта. Суммарный емкостный ток однофазного замыкания на землю данной сети составляет 136 А. Согласно п. 1.2.16 ПУЭ, п. 5.11.8 ПТЭ компенсация емкостного тока ОЗЗ должна применяться при значениях этого тока более 30 А 6 кВ. Компенсация обеспечивается подключением к нейтрали обмоток 6 кВ трансформаторов Т1, Т3 и Т4 дугогасящих реакторов (ДГР) №№ 1, 2, 3 типа ЗРОМ-350/6. Из них постоянно подключены только два ДГР. ЗРОМ №1 работает в первом положении (ток компенсации 53,6 А), ЗРОМ № 3 или 4 – на третьей отпайке (88 А и 87 А соответственно).

Тем не менее наличие компенсации в сети 6 кВ ТЭЦ КМК не позволило в полной мере решить проблему частых повреждений изоляции оборудования (кабелей, двигателей), в том числе и многоместных, при однофазных замыканиях на землю. Поэтому с целью снижения повреждаемости оборудования (в основном присоединений мощных двигателей) было принято решение об установке в нейтраль параллельно каждому ДГР резистора. Такое комбинированное заземление нейтрали позволяет эффективно ограничивать перенапряжения при ОЗЗ (в том числе и ОДЗЗ – однофазных дуговых замыканиях на землю), не ухудшает условия гашения дуги. Активный ток, создаваемый резистором, как правило, оказывается достаточным для селективной работы токовой защиты, которая может действовать как на сигнал, так и на отключение в зависимости от условий обеспечения надежности и безопасности электроснабжения.

Резисторы типа РЗ-300-40-6 были введены в эксплуатацию в конце сентября 2005 г. Два резистора РЗ-300 были постоянно подключены к сети, третий – через разъединитель.

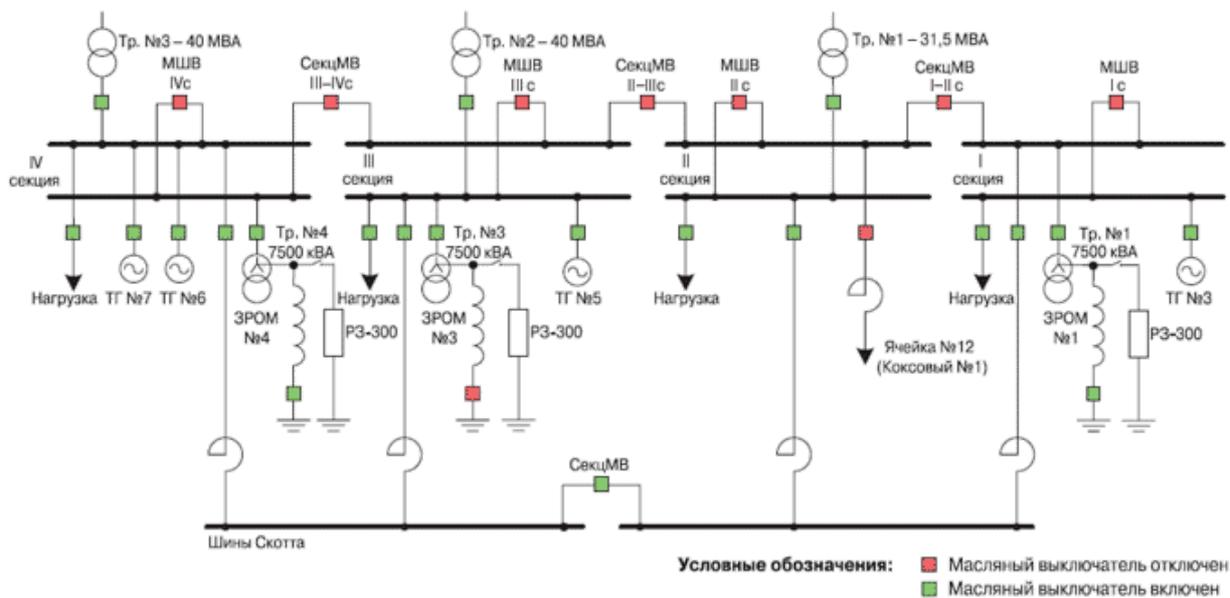


Рис. 1. Принципиальная однолинейная схема ГРУ 6 кВ ТЭЦ КМК с комбинированно заземленной нейтралью

Резистор для заземления нейтрали сети 6 кВ номинальной мощностью 40 кВт сопротивлением 300 Ом выполнен из трех блоков по 900 Ом, соединенных параллельно, по 20 резистивных элементов ЭРЗ. Он рассчитан на время воздействия наибольшего фазного напряжения не менее 6 часов, что позволяет обходиться без устройств автоматики и защиты для его отключения.

В конце 2004 года в одной из ячеек на сборные шины был установлен комплект емкостно-активных делителей напряжений (ДН), которые использовались в качестве датчиков изменения напряжения совместно со стандартными регистрирующими приборами (здесь – осциллографами). Делитель изготовлен в климатическом исполнении УХЛ категории 3 по ГОСТ151 15150-69 и рассчитан на преобразование сигналов в полосе частот (0,025 – 200) кГц.

Для осциллографирования фазных напряжений использовались цифровые запоминающие осциллографы типа АСК-3117, сопряженные с ПЭВМ. АСК-3117 позволяет наблюдать форму сигнала, используя 4 независимых канала с разрешением 8 бит и чувствительностью от 2 мВ/дел до 10 В/дел в полосе частот от 0 до 100 МГц с аппаратным буфером на 131071 выборки для каждого канала. Такие характеристики, в частности, позволяют записывать процессы длительностью 6,55 секунд с частотой дискретизации 20 кГц. В процессе работы данной системы был получен достаточно большой объем фактических осциллограмм переходных процессов при ОЗЗ. Полученные в результате мониторинга осциллограммы напряжений при ОЗЗ, зарегистрированные в течение года, требуют комплексного анализа в части оценки возникающих перенапряжений, времени их существования и характера сопровождающих физических процессов.

Следует отметить, что в публикуемых в настоящее время статьях (например, [1]) рассматривается возможность исключения режима эксплуатации сетей 3–35 кВ с изолированной нейтралью. Дело в том, что одной из основных проблем в сетях с таким режимом нейтрали является выход из строя электродвигателей, кабелей и трансформаторов напряжения из-за пробоев изоляции, связанный с перенапряжениями. В сети с компенсированной нейтралью, в частности, при дискретном регулировании ДГР, также велика вероятность возникновения значительных дуговых и феррорезонансных перенапряжений при перемежающемся характере дуги с малым током в месте ОЗЗ.

В настоящее время в России нормативно разрешен режим заземления нейтрали через резистор. Так, в ПУЭ 7-го изд. указано, что «...работа электрических сетей 3–35 кВ может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор». В связи с этим весьма актуальным становится обобщение и анализ опыта эксплуатации сетей средних классов напряжения с резонансным, резистивным либо комбинированным способом заземления нейтрали.

ОЦЕНКА ПОВРЕЖДАЕМОСТИ СЕТИ

Перенапряжения, инициированные в кабельной сети дуговыми замыканиями, оказываются наиболее опасными вследствие не только их высоких уровней, но и того, что они многократно воздействуют сразу на ряд ослабленных мест и вызывают многоместные повреждения изоляции со значительным эксплуатационным ущербом.

Значительная доля ОЗЗ в рассматриваемой сети до включения резистора – 69,4% от общего числа – самоустранилась после первого пробоя, 20,4% – после второго пробоя. В то же время около 10% замыканий привели к отключению оборудования, что свидетельствует о нарушении бесперебойного электроснабжения потребителей и соответствующем недоотпуске электроэнергии.

Совместное применение ДГР и резистора не только снижает число однофазных замыканий с повторным заиганием дуги (после первого пробоя самоликвидируется 90,1% замыканий, после второго – 9,9%, более двух –

не было вообще), но и повышает надежность работы сети. После установки резистора в нейтраль сети не были зафиксированы многоместные повреждения оборудования и связанные с этим перерывы в электроснабжении потребителей. Подчеркнем, что наличие высокоомного резистора в нейтрали обеспечивает наличие активной составляющей тока ОЗЗ, что позволяет выполнить селективную защиту, достаточно оперативно реагирующую на появление в сети замыкания на землю, поэтому время отключения поврежденного фидера снижается.

АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ НА ИЗОЛЯЦИЮ КАБЕЛЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ

Развитие режима ОЗЗ в сети с компенсированной нейтралью зачастую связано с изменением схемы сети – как в результате действия релейной защиты, так и при оперативных переключениях. Следовательно, изменяется настройка ДГР, что в случае возникновения перемежающегося режима горения дуги может привести к возникновению опасных перенапряжений. Перенапряжениям подвергается прежде всего бумажно-масляная изоляция (БМИ) кабелей секций ГРУ.

В данной сети, как и в большинстве сетей классов 6–35 кВ, где используются ДГР с дискретным регулированием, возможны заметные расстройки компенсации за счет изменения схемы.

Помимо этого, по крайней мере два ДГР из трех являются постоянно включенными (в режиме перекомпенсации), поэтому ликвидация дугового замыкания часто сопровождается процессом биения фазных напряжений – наложением на установившееся напряжение промышленной частоты свободной составляющей близкой частоты. Этот случай характеризуется увеличением напряжения на поврежденной фазе до значений 1,8–2,0 U_{ϕ} . Данный факт был зафиксирован и при анализе результатов регистрации.

Максимальный зарегистрированный уровень перенапряжений в сети до установки резистора составляет 2,7 U_{ϕ} , однако вероятность появления перенапряжений с уровнем свыше 2,4 U_{ϕ} при этом составляет всего 0,05 (5%). Можно показать, что интегральная кривая распределения уровней перенапряжений на участке вероятностей 0,95–1,0 достаточно пологая, поэтому констатируем: возникновение максимальных перенапряжений в схеме, в частности, при наличии резистора в нейтрали – весьма редкое явление.

В некоторых источниках утверждается, что комбинированное заземление нейтрали при постоянно включенном резисторе имеет один существенный недостаток: при возникновении дугового замыкания напряжение на поврежденной фазе после погасания дуги восстанавливается значительно быстрее, чем при заземлении нейтрали только через реактор. Это уменьшает интервал времени между пробоями изоляции и увеличивает число воздействий перенапряжений на неповрежденные фидеры. Согласно полученным данным, для ряда осциллограмм время восстановления напряжения поврежденной фазы после погасания дуги в рассматриваемой сети без резистора составляет при одном зажигании дуги, как правило, около 15–20 периодов промышленной частоты (рис. 2а).

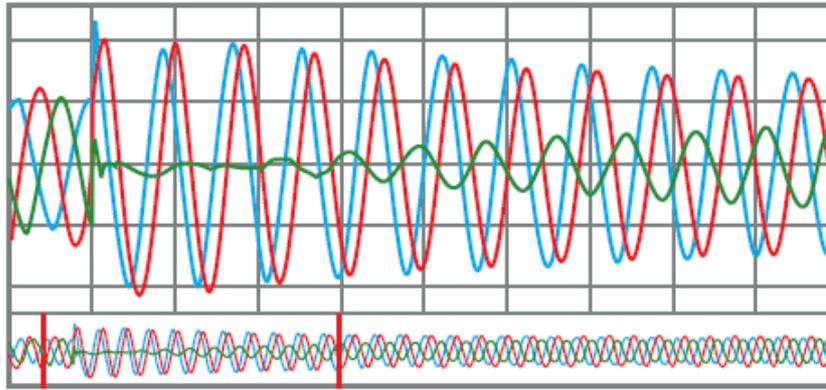
В то же время было снято большое количество осциллограмм, на которых наблюдались повторные многократные пробои (начальная часть рис. 2б) примерно через 2–4 периода. Таким образом, происходят они значительно чаще, в отличие от классических представлений о процессе восстановления напряжения на поврежденной фазе, изложенных, в частности, в [2].

Проведенный анализ уровней перенапряжений, длительности горения дуги позволяет заключить: во-первых, при наличии в нейтрали резистора и реактора уровни перенапряжений, как и время их воздействия на изоляцию, оказываются более низкими, чем при наличии только ДГР; во-вторых, вероятность повторных пробоев в случае комбинированного заземления нейтрали также снижается. Поэтому число воздействий перенапряжений на неповрежденные фидеры, наоборот, может быть уменьшено.

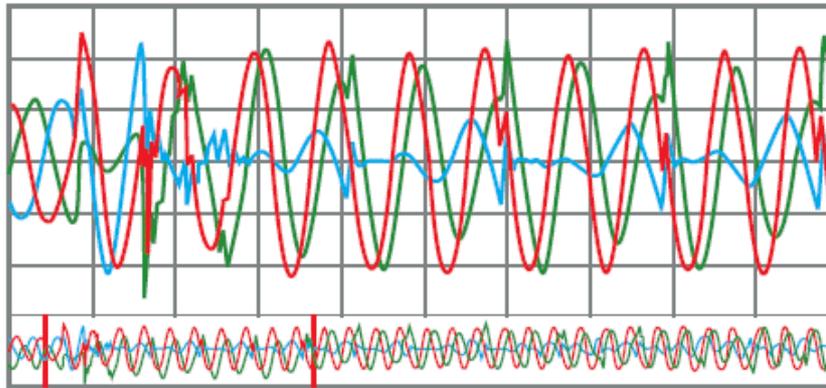
Осциллограмма рис. 2б показывает, что в сети с компенсированной нейтралью могут возникать двойные (и многоместные) повреждения: первой пробивается фаза с наиболее ослабленной изоляцией, далее происходит самоустранение этого ОЗЗ, и в то же время инициируется длительное неустойчивое дуговое замыкание в другой фазе, характеризующееся частыми (каждые 1–2 периода частоты 50 Гц) неуспешными попытками выхода на восстановление и повторными пробоями с малым временем горения дуги – не более 0,01 с.

■ **Рис. 2.** Осциллограммы фазных напряжений при ОДЗЗ, нейтраль сети 6 кВ компенсирована

а) фидер «ЦРП-3» 25.09. 2005; 12.25 (резистора нет), $K_n = 2,2$

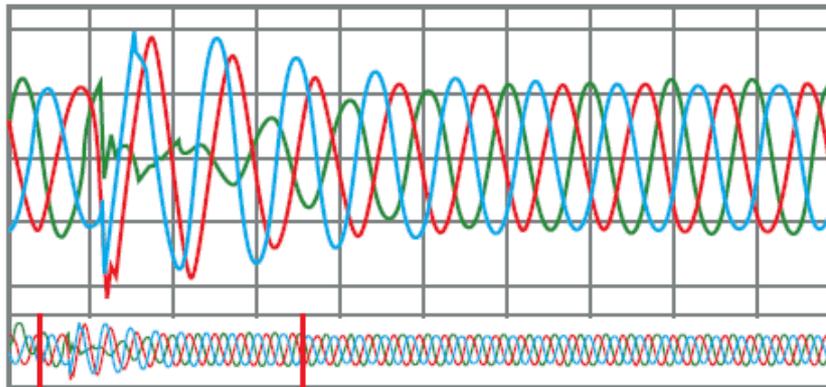


б) фидер «Прокатный-2» 10.04.2005; 8:15 (резистора нет), $K_n = 2,35$

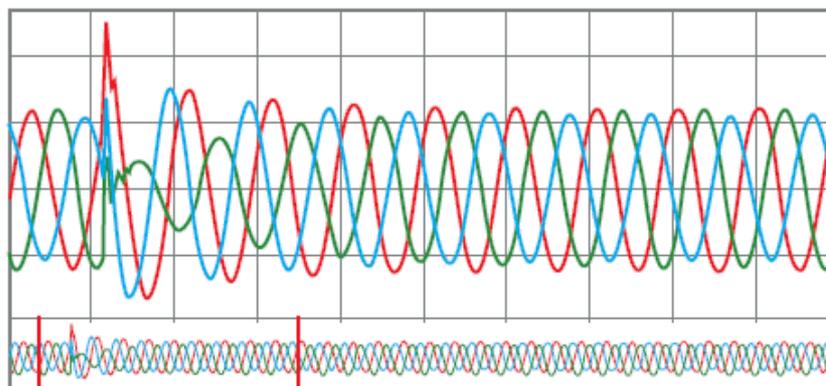


■ **Рис. 3.** Осциллограммы фазных напряжений при ОДЗЗ, комбинированная нейтраль сети 6 кВ

а) фидер «СПП-3» 10.11.2005; 3:53, $K_n = 1,93$



б) фидер «ЦРП-1» 13.12.2005; 22:08, $K_n = 2,14$



Развитие режима ОЗЗ в сети с компенсированной нейтралью Подчеркнем, что перенапряжения после повторных пробоев до перехода ОЗЗ в устойчивое «металлическое» однофазное замыкание с отключением

оборудования защитой могут быть достаточно высоки по сравнению с имевшими место после первого погасания дуги. Так, при отсутствии резистора в рассматриваемой сети были зарегистрированы замыкания с максимальным уровнем перенапряжений $2,7U_{\phi}$. На рис. 3 приведены характерные осциллограммы напряжений на фазах разных присоединений сети ТЭЦ КМК при заземлении нейтрали через параллельно включенные ДГР и резистор.

Таким образом, при установке резистора в нейтраль сети 6 кВ параллельно дугогасящему реактору наблюдается следующая картина: все попытки повторных зажигания и действительные повторные пробой имеют место, как правило, в течение одного-двух периодов промышленной частоты после первого замыкания на землю и не приводят в абсолютном большинстве случаев к перенапряжениям, превышающим первоначальные $2,0-2,1U_{\phi}$. Из рис. 3 видно также, что время восстановления напряжения в поврежденной фазе не превышает $3,0-3,5$ периодов промышленной частоты.

Необходимо всегда проводить оценку незаниженных – иначе говоря, максимальных действительных уровней перенапряжений. В данном случае они составляют $2,7U_{\phi}$ в сети без резистора против $2,35U_{\phi}$ с резистором.

АНАЛИЗ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ГОРЕНИЯ ДУГИ

В рассматриваемой сети при ОДЗЗ по условиям гашения перемежающейся дуги подавляющее большинство зарегистрированных повреждений обусловлено так называемым горением дуги в узком канале. Для этих дуг характерны принудительное гашение из-за сильного продольного дутья за счет разложения изоляции (масла) в канале пробоя и, следовательно, достаточно высокая скорость деионизации дугового промежутка.

При горении закрытой дуги в кабеле или муфте происходит науглероживание дугового канала, при котором через некоторое время дуговое замыкание может перейти в металлическое. Напряжение повторных пробоев дугового промежутка постепенно снижается. Можно показать (рис. 4), что при отсутствии резистора вероятность того, что время горения дуги не превысит 100 мс, составляет 0,95; причем возникновение длительного процесса горения с временами вплоть до максимума (195 мс) – крайне маловероятное событие, учитывая пологий характер интегральной кривой на интервале $0,95...1,0$. При резистивном заземлении нейтрали с вероятностью 0,95 время горения составит не более 35 мс.

Реальная картина горения дуг достаточно сложна. Определяющими факторами являются величина и характер квазиустановившегося тока замыкания (неосциллографированного в данной работе) и пробивное напряжение поврежденного места после гашения дуги. В рассматриваемых случаях длительность горения, а также условия гашения дуги определяются переходным сопротивлением в месте горения дуги, видом диэлектрика (бумага-масло), интенсивностью охлаждения, давлением в зоне горения дуги и др.

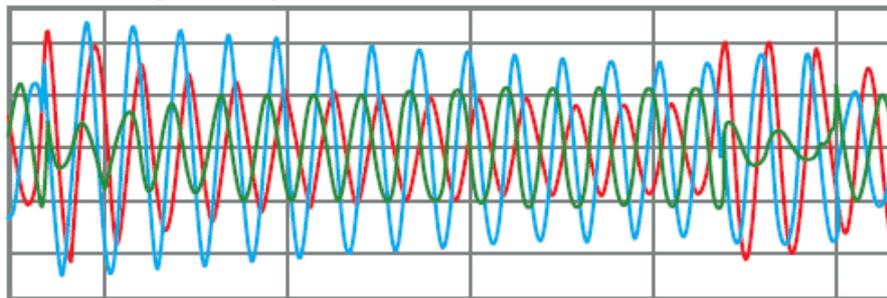
При комбинированном заземлении нейтрали сети дуга горит в среднем в три раза меньше по времени, чем при компенсированной нейтрали. Вероятность повторных пробоев, как показывают осциллограммы, значительно снижается. Следовательно, можно констатировать: включение резистора в нейтраль способствует самогашению дуги, препятствует созданию условий ее повторных зажигания и в целом облегчает работу электрической изоляции оборудования.

Процессы в сети 6 кВ ТЭЦ с компенсированной нейтралью при многократных повторных пробоях в разные интервалы времени (графики растянуты)

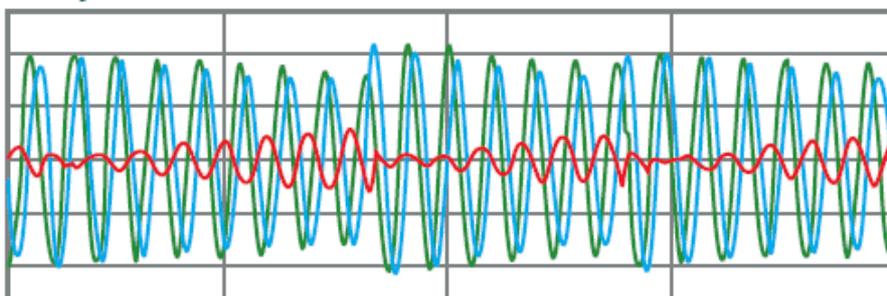
Рис. 4 ■

Масштаб – 50 мс на деление по оси абсцисс

а) плавное восстановление напряжения поврежденной фазы с повторными пробоями



б) частые многократные ОДЗ в одной фазе без перехода в устойчивое металлическое ОЗЗ



На рис. 4 приведены экспериментальные осциллограммы напряжений в фазах на секции шин ТЭЦ КМК при различной продолжительности процессов горения дуги и времени восстановления напряжения. Видно, что в случае реактированной нейтрали в зависимости от условий, при которых происходит пробой, восстановление напряжения поврежденной фазы зачастую обрывается: происходят повторные зажигания дуги.

АНАЛИЗ УГЛА ЗАМЫКАНИЯ И НАПРЯЖЕНИЯ ПРОБОЯ

Ниже представлены результаты исследования угла первого замыкания, причем в качестве исходных данных были приняты осциллограммы, снятые регистратором в сети 6 кВ ТЭЦ КМК до и после включения резистора в нейтраль. Принципиально наличие резистивного заземления не влияет на величину угла, при котором происходит пробой, что было также подтверждено. Большинство замыканий происходит именно при напряжении, достаточно близком к максимуму напряжения на повреждаемой фазе. Наибольшая частота пробоев наблюдается, как правило, после перехода через $U_{\phi \max} - 51,1\%$, (до достижения $U_{\phi \max} - 34\%$, в максимум напряжения - $14,9\%$). При этом, как уже указывалось, на величину угла не оказывает влияния наличие либо отсутствие резистора в нейтрали. Также было показано, что время горения дуги после первого пробоя фактически не зависит от угла, при котором происходит дуговое замыкание. Напротив, в зависимости от угла замыкания, а значит, и напряжения, при котором оно происходит, уровень перенапряжений может изменяться в достаточно широких пределах, поскольку напряжение на нейтрали жестко связано с углом замыкания. Т.е. чем ближе напряжение пробоя к максимуму, тем выше перенапряжения, возникающие при дуговом замыкании.

ПРОЦЕССЫ В БУМАЖНО-МАСЛЯНОЙ ИЗОЛЯЦИИ КАБЕЛЯ ПРИ ДУГОВОМ ЗАМЫКАНИИ

Характер горения дуги, также влияющий на значения перенапряжений, весьма сложен: он зависит как от места замыкания, так и от ряда других факторов (например, прочности изоляционного промежутка, ослабленной после предыдущих повреждений; чистоты изоляционной среды и наличия дефектов; момента зажигания дуги и т.д.).

В этой связи принципиально четкого определения требует физика процессов в изоляции оборудования – в рассматриваемой сети это БМИ кабелей – при дуговых замыканиях на землю.

При длительной эксплуатации кабельной сети происходит накопление и развитие дефектов, причем протяженность единичного дефекта измеряется долями миллиметра, реже – миллиметрами. Первоначальный пробой кабельной изоляции лишь иногда носит характер радиального, т.е. проходящего по кратчайшему пути между жилой и оболочкой или между жилами. Поскольку напряженность электрического поля в кабеле имеет как радиальную, так и тангенциальную составляющие, путь пробоя, как правило, существенно длиннее кратчайшего расстояния между электродами. При пробое и зажигании дуги за счет тепловой энергии происходит разложение пропитывающего состава, сопровождающееся газовыделением. При этом, с одной стороны, вытесняется

пропитывающий состав с трассы пробоя, что снижает электрическую прочность, с другой – поднимается давление в образующихся полостях, повышающее эту прочность. Наличие резистивного заземления, иначе говоря, появление активной составляющей тока замыкания, ведет к ускорению рассматриваемых процессов: происходит более значительное увеличение давления в появляющейся газовой «шубе», окружающей ствол дуги, вследствие чего гашение дуги происходит быстрее. Динамическое повышение переходного сопротивления в месте повреждения предотвращает обугливание изоляции. Всё это позволяет избежать отключения поврежденного фидера, так как развития замыкания и перехода его в двух-, трехполосное или многоместное повреждение не происходит.

После пробоя давление снижается и полость начинает заполняться пропитывающим составом. Вследствие этого повторный пробой по сравнению с первым обычно происходит при несколько меньшем напряжении, как видно на рис. 2б. Движение частиц способствует также некоторому смещению трассы пробоя. Многократные пробои приводят к образованию более или менее устойчивого разрядного канала.

Таким образом, при длительном существовании перемежающейся дуги (повторении пробоев) разложение пропиточного состава вблизи разрядного канала приводит к осушению прилегающей к нему области, что и вызывает обугливание стенок канала. Далее происходит прекращение дуговых разрядов и образование достаточно устойчивого проводящего угольного мостика.

Однако при токах порядка 15–20 А [2] за счет выплавления с поверхностей жилы и оболочки металлических частиц, постепенно заполняющих разрядный канал, образуется металлический проводящий мостик между жилой и оболочкой кабеля (либо между жилами). При этом замыкание переходит в неустраняющееся металлическое и требует отключения фидера, что и произошло примерно в 10% зарегистрированных в сети с компенсированной (только ДГР на шинах) нейтралью случаев. На основании результатов приведенного исследования может быть выстроена следующая обобщенная модель горения дуги в БМИ изоляции кабелей при резистивном заземлении нейтрали. Вследствие появления активной составляющей тока ОЗЗ повышается интенсивность испарения масла в канале горения дуги, повышается давление газа в месте горения, за счет чего гашение дуги происходит быстрее. Более активное выделение деионизирующих газов из обжигаемых дугой стенок изоляции приводит к возникновению ударных давлений в виде взрыва и к продольно-поперечному обдуванию дуги. Такой характер процесса обуславливает расщепление дуги, интенсивный отбор тепла и резкое снижение ее температуры, быстрое повышение сопротивления и образование пика напряжения гашения (активное падение напряжения). Происходит принудительный обрыв тока дуги.

При этом в газовом пузыре преобладает водород, составляющий 70–80% от всех образовавшихся газов. Кроме того, повышенная интенсивность газообразования в зоне ствола дуги ведет к ее расщеплению, давлением она очищается от токопроводящих элементов (углерода и паров металла), за счет чего указанная зона приобретает высокую электрическую прочность.

Всё это ведет к существенному снижению длительности горения дуги и времени воздействия перенапряжений на изоляцию оборудования.

ВЫВОДЫ

1. Характер процессов горения и гашения дуги при наличии в нейтрали резистора с очевидностью ведет к снижению уровня перенапряжений. Кроме того, в сети с комбинированной нейтралью происходит сокращение времени горения дуги после однократного пробоя примерно в 3 раза по сравнению с компенсированной нейтралью. Соответственно уменьшается вероятность развития дефектов в изоляции.

2. В сетях средних классов напряжения с изолированной или компенсированной нейтралью большую опасность представляют двойные (и многоместные) повреждения. Наличие резистора в нейтрали снимает проблему эскалации перенапряжений на здоровых фазах и, следовательно, существенно снижает вероятность их пробоя и возникновения многоместных повреждений.

3. Включение в нейтраль сети резистора способствует самогашению дуги, уменьшая степень повреждения изоляции и вероятность повторных пробоев.

Интенсивное горение закрытых дуг сопровождается возникновением ударного давления, в результате чего поврежденная изоляция может быть механически разрушена. Следовательно, нельзя исключать возможности повреждения оборудования, расположенного вблизи от места выброса продуктов горения дуги, и возникновения междуфазных коротких замыканий. Все эти достаточно тяжелые последствия дуговых замыканий в КЛ могут быть снижены с помощью усиления эффекта самопогасания дуги посредством включения в нейтраль активного сопротивления.

4. Предложенная модель горения дуги в бумажно-масляной изоляции кабелей свидетельствует: при наличии в нейтрали резистора характер процессов качественно меняется в сравнении с иными режимами заземления нейтрали сети. В случае комбинированного либо чисто резистивного способа заземления значительно уменьшаются длительность горения дуги и время воздействия возникающих перенапряжений на изоляцию электрооборудования.

ЛИТЕРАТУРА

1. Титенков С.С. России стоило бы подумать над аналогичным документом. Оценки и прогнозы // Новости ЭлектроТехники. – 2006. – № 3(39) – С. 42.

2. Беяков Н.Н. Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью // Электричество. – 1957. – № 5.