

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССОВ ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ 6 кВ С ДУГОГАСЯЩИМИ РЕАКТОРАМИ И РЕЗИСТОРАМИ В НЕЙТРАЛИ

САРИН Л.И. Директор ООО «ПНП БОЛИД» (Новосибирск)

ИЛЬНИНЫХ М.В. Начальник научно-исследовательского отдела ООО «ПНП БОЛИД» (Новосибирск)

ШИРКОВЕЦ А.И. Ведущий инженер научно-исследовательского отдела ООО «ПНП БОЛИД» (Новосибирск)

БУЯНОВ Э.В. Инженер ООО «АТ-сервис НК» (Новокузнецк)

ШАМКО В.Н. Ведущий эксперт Проектной группы Службы технического контроллинга РАО «ЕЭС России»

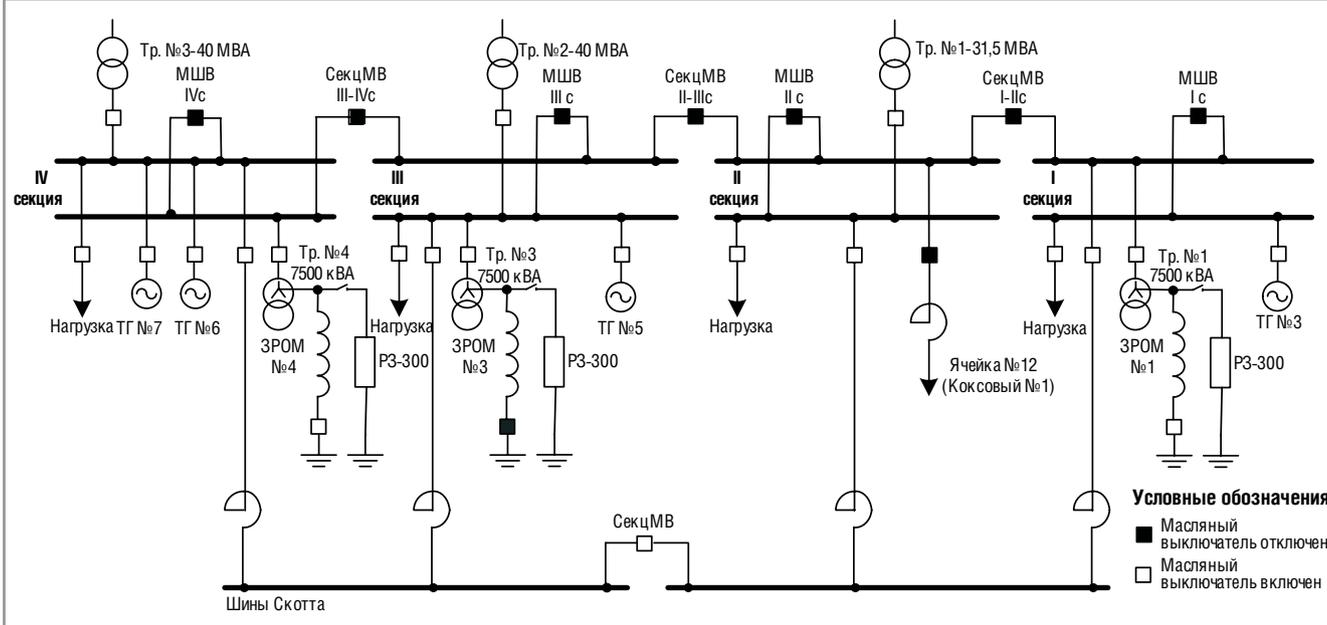
В настоящее время в России нормативно разрешен режим заземления нейтрали через резистор. Так, в ПУЭ 7 ред. указано, что «...работа электрических сетей 3–35 кВ может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор». В связи с этим весьма актуальным становится обобщение и анализ опыта эксплуатации сетей средних классов напряжения с резонансным, резистивным либо комбинированным (резистор включен параллельно ДГР) способом заземления нейтрали. Большую работу по обобщению опыта эксплуатации резисторов проводит ООО «ПНП БОЛИД», в частности, на ТЭЦ Новокузнецкого металлургического комбината (далее используем диспетчерское название «ТЭЦ КМК»), где до установки резисторов была введена в работу система мониторинга перенапряжений в сети 6 кВ, что позволило накопить статистику процессов в сети до установки резисторов и провести сравнительный анализ с процессами при включенных резисторах. Результаты исследования приведены ниже.

Процессы в сети 6 кВ ТЭЦ КМК регистрировались с помощью специального измерительного комплекса в период 23.12.2004–22.12.2005 г. 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 с регистрирующими приборами – цифровыми запоминающими осциллографами. Делитель изготовлен в климатическом исполнении УХЛ категории 3 по ГОСТ 151 15150-69 и рассчитан на преобразование сигналов в полосе частот (0,025–200) кГц.

Для осциллографирования фазных напряжений использовались цифровые 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 выборку для каждого канала. Такие характеристики позволили записывать процессы длительностью 6,55 сек. с частотой дискретизации 20 кГц.

Полученные в результате мониторинга сети 6 кВ ТЭЦ осциллограммы напряжений при ОЗЗ, зарегистрированные в течение года, требуют комплексного анализа в части оценки возникающих перенапряжений, времени существования повреждений; характера физических процессов, сопровождающих эти повреждения и т.д. Специфика сети ТЭЦ КМК (кабельная разветвленная сеть с достаточно большим числом

РИС. 1. ПРИНЦИПАЛЬНАЯ ОДНОЛИНЕЙНАЯ СХЕМА ГРУ – 6 кВ ТЭЦ НОВОКУЗНЕЦКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА С НЕЙТРАЛЬЮ, ЗАЗЕМЛЕННОЙ ЧЕРЕЗ ПАРАЛЛЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫЕ ДГР И РЕЗИСТОРЫ



присоединений) не всегда позволяет точно определить место замыкания, однако в данной работе такая задача не ставится.

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 ёмкостного тока ОЗЗ должна применяться при значениях этого тока более 30 А во всех сетях 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, 4 – на третьей отпайке (88 и 87 А соответственно). Таким образом, суммарный индуктивный ток ДГР равен (141,6–142,6) А, а перекомпенсация составляет всего 4,1–4,9 %, что меньше 5 % регламентированного ПУЭ значения раскомпенсации.

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 (комбинированное заземление нейтрали).

Резисторы типа РЗ-300-40-6 были введены в эксплуатацию в конце сентября 2005 г. Резистор для заземления нейтрали сети 6 кВ сопротивле-

нием 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.

Комбинированное заземление нейтрали позволяет эффективно ограничивать перенапряжения при ОЗЗ (в том числе и ОДЗ – 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.

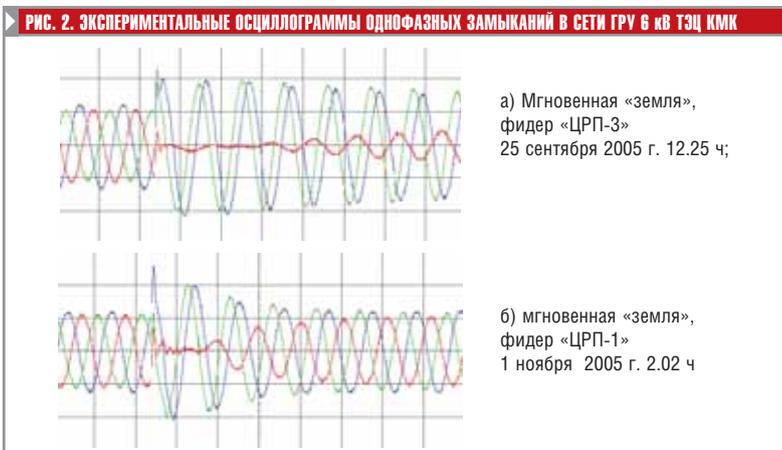
Главной целью исследования является сравнение особенностей процессов, происходящих при ОЗЗ в сети с компенсированной нейтралью (наличие только дугогасящих реакторов (ДГР) в нейтрали) и после установки резисторов параллельно катушке. С применением методов статистической обработки результатов по выборке, включающей 239 осциллограмм, показывается, как изменяется характер процессов, вызывающих опасные воздействия на изоляцию сети, в зависимости от способа заземления нейтрали.

СТАТИСТИКА ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ 6 кВ ТЭЦ КМК

Перенапряжения, создаваемые в кабельной сети дуговыми однофазными замыканиями на землю, оказываются наиболее опасными не только вследствие их высоких уровней, но и

ТАБЛИЦА 1. СТАТИСТИКА ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ 6 кВ ТЭЦ КМК В ПЕРИОД МОНИТОРИНГА

	В нейтрали только ДГР	В нейтрали ДГР и резистор
Всего замыканий на землю	98 (100 %)	141 (100 %)
Самоликвидировавшиеся после первого пробоя	68 (69,4 %)	127 (90,1 %)
Самоликвидировавшиеся после 2-го и более пробоев	20 (20,4 %)	14 (9,9 %)
Приведшие к отключению оборудования	10 (10,2 %)	0



того, что они многократно воздействуют на всю сеть (сразу на ряд ослабленных мест) и вызывают многоместные повреждения изоляции со значительным эксплуатационным ущербом.

В табл. 1 представлены данные по количеству замыканий на землю в исследуемой сети.

Согласно полученным осциллограммам напряжений при однофазных замыканиях в различных точках рассматриваемой сети были проведены исследования уровней перенапряжений, а также длительности горения дуги при однократном ее зажигании.

Значительная доля ОЗЗ в рассматриваемой сети – 20,4 % от общего числа – самоустраняется после второго пробоя и при отсутствии резистора (табл. 1). В то же время, около 10 % замыканий приводят к отключению оборудования, что свидетельствует о возможном нарушении бесперебойного электроснабжения потребителей и соответствующем недоотпуске электроэнергии.

Характерные экспериментальные осциллограммы, полученные в результате мониторинга в сети 6 кВ ТЭЦ КМК и иллюстрирующие различный характер протекания процессов при наличии и отсутствии резистора в нейтрали, представлены на рис. 2.

Резистивное заземление нейтрали не только снижает число однофазных замыканий с повторным зажиганием дуги (замыканий с числом пробоев два – 9,9 % от общего числа замыканий; более двух – не было вообще в 141 зарегистрированном случае), но и повышает надежность работы сети.

Для рассматриваемого временного периода число однофазных замыканий при установке

резистора в нейтраль сети увеличилось. Этот факт напрямую связан с сезонным увеличением повреждаемости кабельной сети, вызванной неблагоприятным сочетанием факторов внешней среды, промерзанием грунта, накоплением и развитием существующих дефектов, а также увеличением сетевой нагрузки.

Однако здесь уместно заметить, что при установке резистора в нейтраль сети отключений оборудования и, следовательно, перебоев в электроснабжении потребителей, не было вообще (табл. 1). Следует подчеркнуть, 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. Следовательно, время отключения поврежденного фидера снижается.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ, СОПРОВОЖДАЮЩИХ ЗАМЫКАНИЯ НА ЗЕМЛЮ

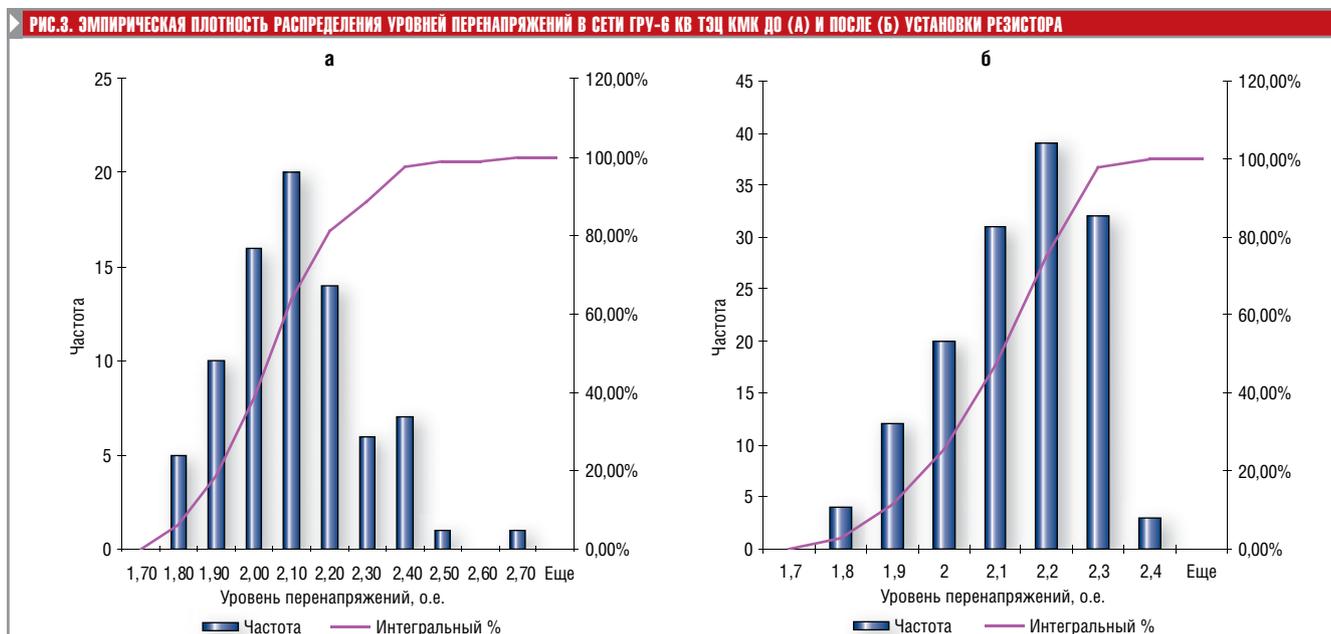
Развитие режима замыкания на землю в сети с компенсированной нейтралью зачастую связано с изменением схемы сети – как в результате действия релейной защиты, так и при оперативных переключениях. Следовательно, изменяется настройка ДГР, что в случае возникновения перемежающегося режима горения дуги может привести к возникновению опасных перенапряжений. Отметим, что 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 вследствие действий оперативного персонала и срабатывания релейной защиты.

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 $(1,8–2,0)U_{\phi}$. Данный факт был зафиксирован и при анализе результатов регистрации.

Максимальный уровень перенапряжений в сети до установки резистора составляет $2,7U_{\phi}$; однако из рис. 3 следует, что вероятность появления перенапряжений с уровнем свыше $2,4U_{\phi}$ при этом составляет всего 0,05 (5 %).

В случае заземления нейтрали через резистор, установленный параллельно ДГР, с вероятностью 0,95 возникающие перенапряжения не превысят $2,3U_{\phi}$. Как в первом (рис. 3 а), так и



во втором (рис. 3 б) случае интегральная кривая распределения на участке вероятностей 0,95–1,0 достаточно пологая, поэтому можно констатировать: возникновение максимальных перенапряжений в схеме, в частности, при наличии резистора в нейтрали – весьма редкое явление.

В некоторых источниках имеет место утверждение: 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. 4 а).

В то же время было снято большое количество осциллограмм, на которых наблюдались повторные многократные пробои (начальная часть рис. 4 б) примерно через 2–4 периода. Таким образом, происходят они значительно чаще, в отличие от классических представлений о процессе восстановления напряжения на поврежденной фазе (рис. 4 а), изложенных в [4–5].

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. 5 б) 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.

Подчеркнем, что перенапряжения после повторных пробоев до перехода ОЗЗ в устойчивое «металлическое» однофазное замыкание с отключением оборудования защитой, могут быть

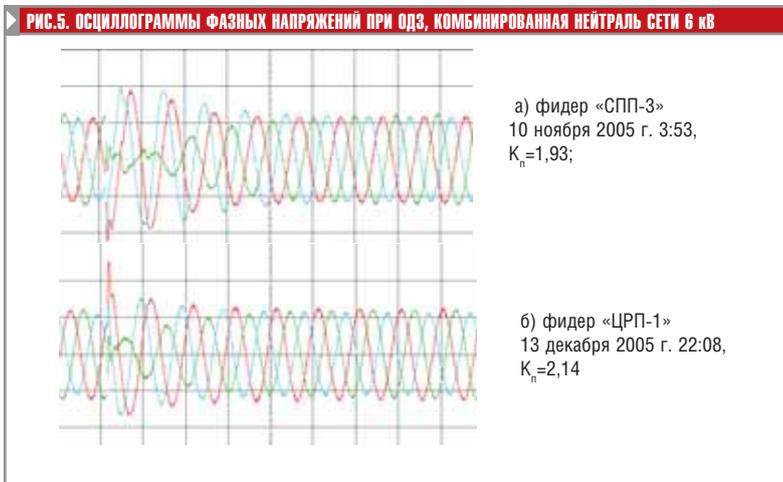


ТАБЛИЦА 2. ПРОСТЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УРОВНЕЙ ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ В СЕТИ 6 кВ ТЭЦ КМК ЗА ПЕРИОД 23.12.2004–22.12.2005

	В нейтрали только ДГР	В нейтрали ДГР и резистор
Математическое ожидание	2,06	2,10
Дисперсия	0,03	0,02
Среднеквадратическое отклонение	0,18	0,14
Максимум	2,70	2,35

ТАБЛИЦА 3. ПРОСТЫЕ СТАТИСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВРЕМЕНИ ГОРЕНИЯ ДУГИ ПРИ ОДЗ В СЕТИ 6 кВ ТЭЦ КМК ЗА ПЕРИОД 23.12.2004 – 22.12.2005

Характеристика	Без резистора	С резистором
Математическое ожидание (среднее), мс	50,2	17,5
Дисперсия, кв.мс	846	82,3
Среднеквадратическое отклонение, мс	29,1	9,07
Максимум, мс	195	38,0

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. 5 приведены характерные осциллограммы напряжений на фазах разных присоединений сети ТЭЦ КМК при заземлении нейтрали через параллельно включенные ДГР и резистор.

Для сети с комбинированным заземлением нейтрали наличие в отдельных случаях повторных однофазных замыканий указывает на то, что при данной величине сопротивления резистора все же не обеспечивается полного стекания заряда нулевой последовательности (равенство нулю напряжения на нейтрали) за время от момента самогашения дуги до момента возникновения максимального напряжения на поврежденной фазе, которое становится близким к фазному – порядка $(1,05-1,1)U_{\phi}$.

Таким, образом, при установке резистора в нейтраль сети 6 кВ параллельно дугогасящему реактору наблюдается следующая картина: все попытки повторных зажиганий и действительные

повторные пробойи 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 $(2,0-2,1)U_{\phi}$. Из рис. 5 видно также, что время восстановления напряжения в поврежденной фазе не превышает $(3,0-3,5)$ периодов промышленной частоты.

Определенный интерес представляют сведения в табл. 2 отдельные статистические характеристики уровней перенапряжений в сети с компенсированной нейтралью и при комбинированном ее заземлении.

Необходимо всегда проводить оценку заниженных, иначе говоря, максимальных действительных уровней перенапряжений: здесь, как видно, они составляют $2,7U_{\phi}$ в сети без резистора против $2,35U_{\phi}$ с резистором.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВРЕМЕНИ ГОРЕНИЯ ДУГИ В СЕТИ С РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ

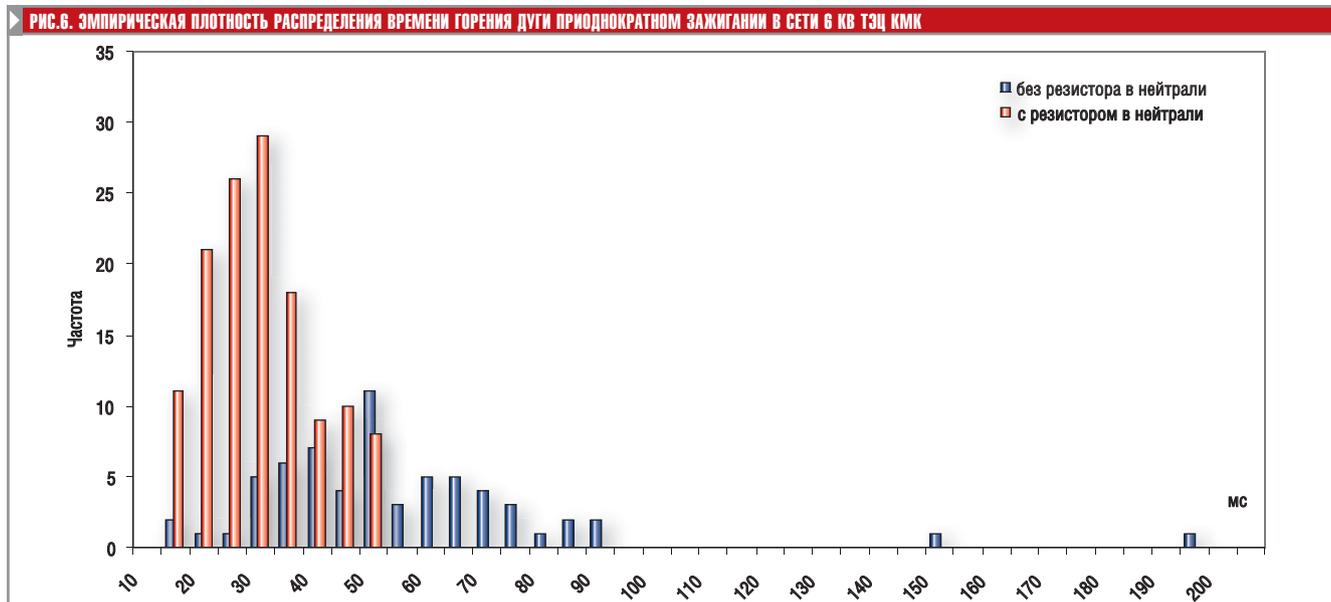
В кабельной сети 6 кВ ТЭЦ КМК при ОДЗ по условиям гашения перемежающейся дуги подавляющее большинство зарегистрированных повреждений обусловлено т.н. горением дуги в узком канале. Для этих дуг характерны принудительное гашение из-за сильного продольного дутья за счет разложения изоляции (масла) в канале 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 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 (рис. 6).

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. В табл. 3 представлены отдельные характеристики распределения времени горения дуги при ее однократном зажигании.

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 зажиганий и в целом облегчает работу электрической изоляции оборудования.

На рис. 7 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.

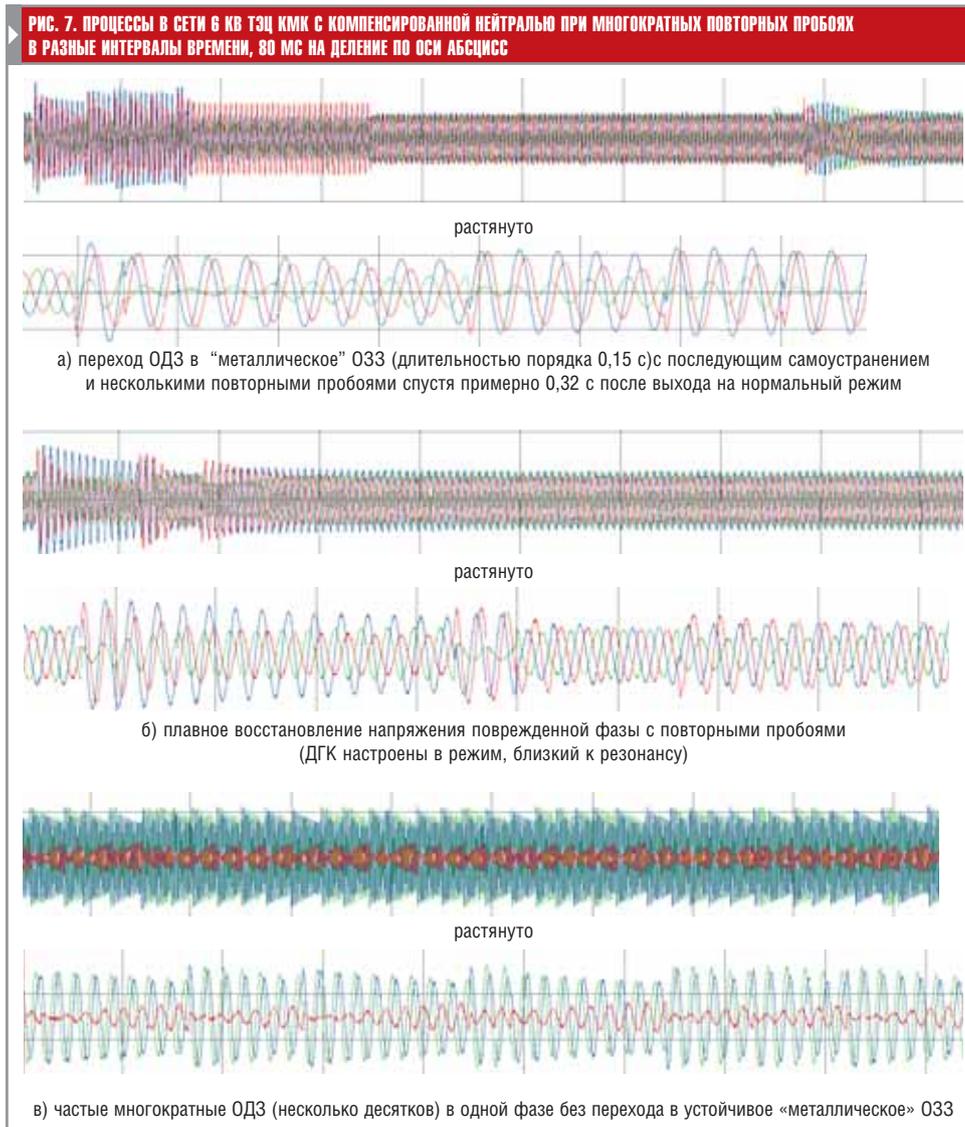


ТАБЛИЦА 4. ЗАВИСИМОСТЬ ЧИСЛА ПРОБОВ ОТ МОМЕНТА ЗАМЫКАНИЯ (ВЕЛИЧИНЫ ФАЗНОГО НАПРЯЖЕНИЯ)

Признак	Число (доля) замыканий
Пробой до достижения $U_{\text{Фmax}}$	48 (34 %)
Пробой в максимум напряжения	21 (14,9 %)
Пробой после перехода через $U_{\text{Фmax}}$	72 (51,1 %)
Всего	141 (100 %)

ИССЛЕДОВАНИЕ МОМЕНТА 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. В табл. 4 представлена графика доли замыканий, происшедших в сети в рассматриваемый период, в зависимости от момента замыкания.

Плотность распределения угла замыкания и напряжения пробоя в долях единиц приведены на рис. 8. Согласно рис. 8 большинство замыканий происходит именно при напряжении, достаточно близком к максимуму напряжения на повреждаемой фазе. Плотность распределения угла первого замыкания (рис.8 а) имеет два ярко выраженных пика и, вообще говоря, может быть построена отдельно для положительной (0–180°) и отрицательной (180–360°) полувольт напряжения.

Из приведенных гистограмм видно, что наибольшая частота пробоев наблюдается, как правило, после перехода через $U_{\text{Фmax}}$; при этом, как уже указывалось, на величину угла не оказывает влияние наличие (либо отсутствие резистора в нейтрали).

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, влияющий в том числе на значения перенапряжений и время существования дуги, 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

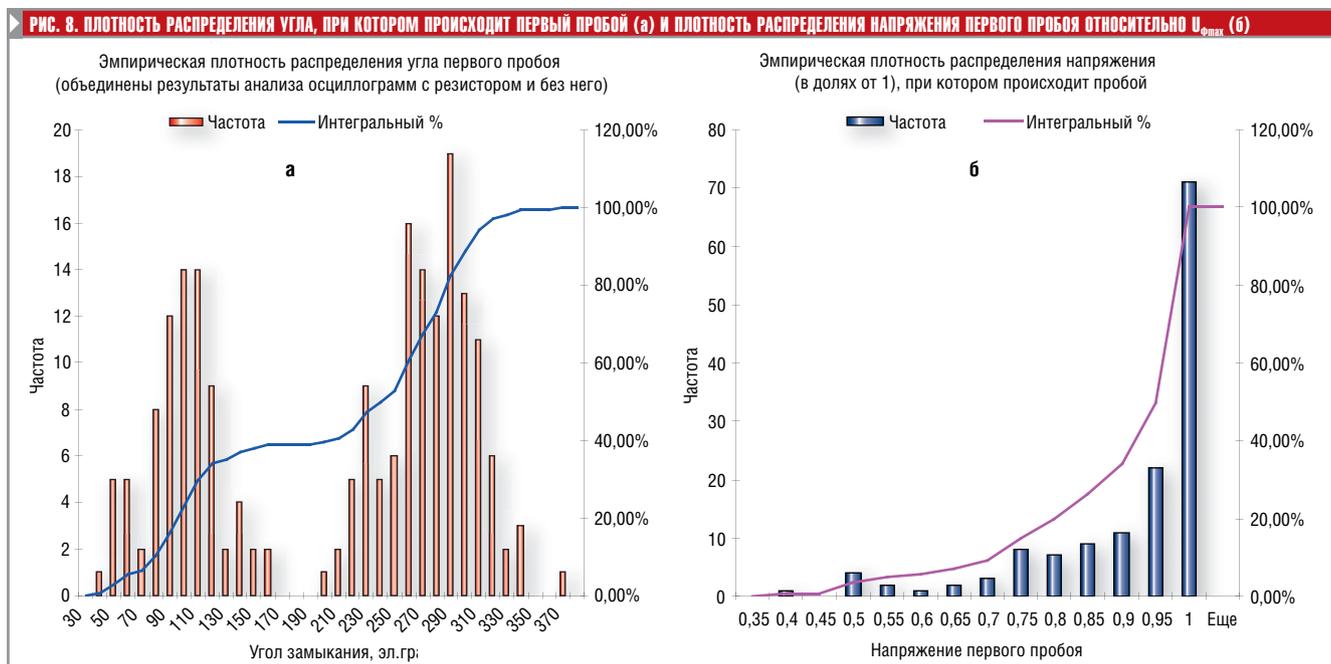
это бумажно-масляная изоляция кабелей – при дуговых замыканиях на землю.

При длительной эксплуатации кабельной сети происходит накопление и развитие дефектов, причем протяженность единичного дефектного участка 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 газовой выделением. 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. Все это позволяет избежать отключения поврежденного фидера, так как развития замыкания и перехода его в двух-, трехполюсное 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 (рис. 2, рис. 4 б). Движение частиц способствует также некоторому смещению трассы пробоя. Многократное повторение пробоев приводит к образованию более или менее устойчивого разрядного канала. В самом деле, из табл. 1 видно, что в сети без резистора только 69,4 % от общего числа замыканий самоустранились после первого пробоя, в то время как наличие резистора привело к существенному повышению этого показателя – до 90 %.

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 неустранимое металлическое и требует отключения фидера, что и произошло примерно в 10 % зарегистрированных в сети с компенсированной (только ДГР на шинах) нейтралью случаев.

Может быть выстроена следующая обобщенная модель горения дуги в БМИ изоляции кабелей при наличии резистора в нейтрали. Вследствие появления активной составляющей тока ОЗЗ повышается интенсивность испарения масла в канале горения дуги, повышается давление газа в месте горения и гашения 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 напряжение). Происходит принудительный обрыв тока дуги. При этом в газовом пузыре преобладает водород, составляющий 70–80 % от всех образовавшихся газов. Повышенная интенсивность газообразования в зоне створа дуги ведет к ее расщеплению, давлением она очищается от токопроводящих элементов (углерода и паров металла), за счет чего указанная зона приобретает высокую электрическую прочность. Это ведет к существенному снижению длительности горения дуги и времени воздействия перенапряжений на изоляцию оборудования.

ВЫВОДЫ

1. При комбинированном заземлении нейтрали (неотключаемый резистор параллельно дугогасящему реактору) уровень перенапряжений в сети 6 кВ ТЭЦ КМК не превышает $2,3_{U_{Ф}}$ с вероятностью 0,95, а время горения составляет не более 35 мс с той же вероятностью. В случае компенсированной нейтрали эти показатели будут равны $2,4_{U_{Ф}}$ и 100 мс соответственно. Максимальные же значения перенапряжений для режимов с компенсированной и комбинированной нейтралью составляют $2,7_{U_{Ф}}$ и $2,35_{U_{Ф}}$ соответственно. Характер процессов горения и гашения дуги при наличии в нейтрали резистора с очевидностью ведет к снижению уровня перенапряжений. Также уменьшается вероятность развития дефектов в изоляции.

2. В сетях средних классов напряжения с изолированной или компенсированной нейтралью большую опасность представляют двойные (и многоместные) повреждения: первой пробивается фаза с наиболее ослабленной изоляцией, далее инициируется длительное неустойчивое дуговое замыкание в другой фазе, характеризующееся частыми (каждые 1–2 периода промышленной частоты) неуспешными попытками выхода на восстановление и повторными пробоями. Наличие резистора в нейтрали снимает проблему эскалации перенапряжений на здоровых фазах и, следовательно, существенно снижает вероятность пробоя изоляции и возникновения многоместных повреждений.

3. Включение в нейтраль сети резистора способствует самогашению дуги, уменьшая не только время горения дуги, а, следовательно, и степень повреждения изоляции, но и вероятность пов-

торных пробоев. Интенсивное горение закрытых дуг сопровождается возникновением ударного давления, в результате чего поврежденная изоляция может быть механически разрушена. 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 уменьшается длительность горения дуги и время воздействия возникающих перенапряжений на изоляцию электрооборудования.

5. Считаю необходимым и экономически целесообразным рекомендовать использование для снижения уровня возникающих перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях изолированной и компенсированной нейтралью напряжением 3–35 кВ постоянно включенные в

нейтраль высокоомные резисторы, рассчитанные на возможность длительной работы в режиме однофазного замыкания на землю. Номинал резистора выбирается для конкретной схемы сети по условиям заданного уровня ограничения перенапряжений и работы релейной защиты.

ЛИТЕРАТУРА

1. Глушко В., Ямный О., Ковалев Э., Бохан Н. Белорусские сети 6–35 кВ переходят на режим заземления нейтрали через резистор // *Новости ЭлектроТехники*. – 2006. – № 3(39) – С. 37–40.

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

3. Софинский А.В., Кучеренко В.И., Хуртов И.И. и др. Резистивное заземление нейтрали сети собственных нужд Энгельской ТЭЦ-3 «Саратовэнерго» // *Электрические станции*. – 2003. – № 2.

4. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов – М.: Энергия, 1971.

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