

# АНАЛИЗ ОПЫТА ЭКСПЛУАТАЦИИ СЕТИ 6 кВ ТЭЦ КУЗНЕЦКОГО МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОГО КОМБИНАТА С КОМПЕНСИРОВАННОЙ И КОМБИНИРОВАННО ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

*Ильиных М.В., Сарин Л.И., Ширковец А.И. (ООО «ПНП БОЛИД», г.Новосибирск)*

## Постановка задачи

В статье рассматривается опыт эксплуатации сети 6 кВ ТЭЦ Кузнецкого металлургического комбината (КМК) в период 23.12.2004 – 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 приведен на *рис. 1*. В нормальной схеме все секции объединены через шины Скотта.

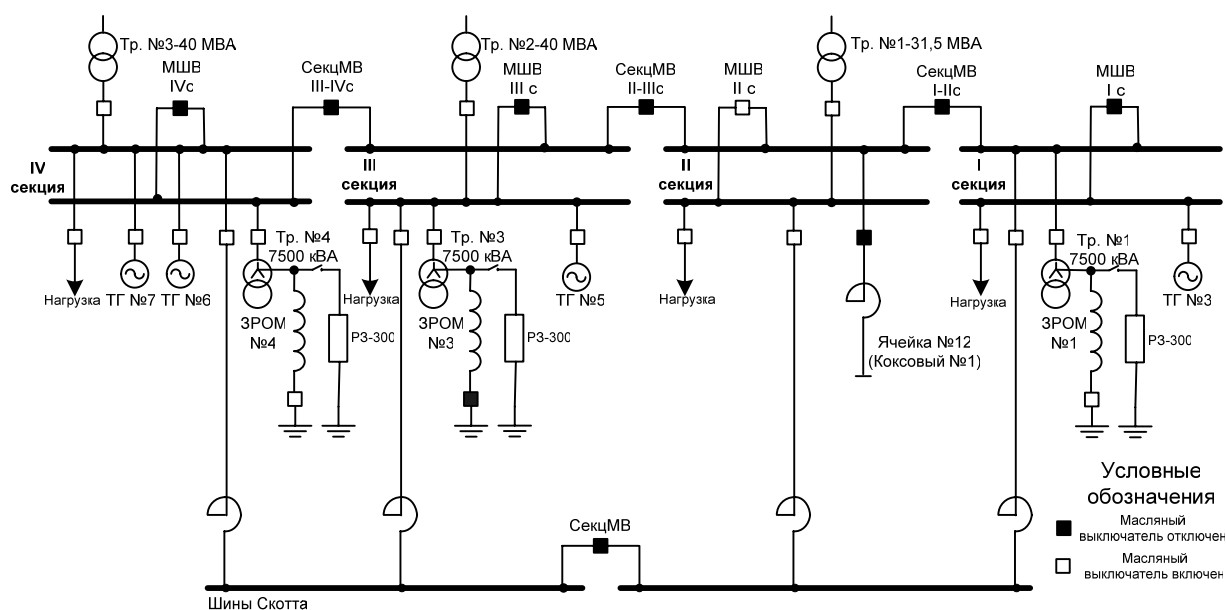


Рис. 1. Принципиальная однолинейная схема ГРУ – 6 кВ ТЭЦ КМК с комбинированно заземленной нейтралью

Суммарный емкостный ток однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) приведенной 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 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, 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. Резистор для заземления нейтрали сети 6 кВ сопротивлением 300 Ом выполнен из трех блоков по 900 Ом, соединенных параллельно, по 20 резистивных элементов ЭРЗ. Технические характеристики резистора приведены в *табл. 1*. Этот резистор рассчитан на время воздействия наибольшего фазного напряжения не менее 6 часов, что позволяет обходиться без устройств автоматики и защиты для его отключения.

Таблица 1

Технические характеристики РЗ-300-40-6

№ п.п.	Наименование параметра	Значение	
			не более
1.	Номинальное напряжение сети, кВ	6,0	
2.	Номинальная мощность, кВт	40	
3.	Сопротивление, Ом:	300±10%	
4.	Масса резистора, кг		490
5.	Габаритные размеры резистора, мм:		
	- длина		1910
	- ширина		1940
	- высота		2270

В конце 2004 года на шинах ГРУ была установлена система для регистрации напряжений в аварийных режимах. В процессе работы данной системы был получен достаточно большой объем фактических осциллограмм переходных процессов при однофазных замыканиях на землю.

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

**Главной целью настоящего исследования** является сравнение особенностей процессов, происходящих при ОЗЗ в сети с компенсированной нейтралью (наличие только дугогасящих реакторов в нейтрали) и после установки резисторов параллельно ДГР. С применением методов статистической обработки результатов по выборке, включающей 239 осциллограмм, показывается, 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 сетей номинального напряжения 6-35 кВ.

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, связанных 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 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». Кроме того, в белорусской энергосистеме уже введен (впервые!) ведомственный документ («Временные методические указания...») по резистивному заземлению нейтрали сетей 6-35 кВ.

В связи с этим весьма актуальным становится обобщение и анализ опыта эксплуатации сетей средних классов напряжения с резонансным, резистивным либо комбинированным способом заземления нейтрали.

### Характеристика и оценка повреждаемости сети

Перенапряжения, создаваемые в кабельной сети дугowymi однофазными замыканиями на землю, оказываются наиболее опасными не только вследствие их высоких уровней, но и того, что они многократно воздействуют на всю сеть (сразу на ряд ослабленных мест) и вызывают множественные повреждения изоляции со значительным эксплуатационным ущербом.

В табл. 2 приведены данные по количеству замыканий на землю в исследуемой сети.

Таблица 2

Статистика замыканий на землю в сети 6 кВ ТЭЦ КМК в период  
23.12.2004 – 22.12.2005

	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

Согласно полученным осциллограммам напряжений при однофазных замыканиях в различных точках рассматриваемой сети были проведены исследования уровней перенапряжений, длительности горения дуги при однократном ее зажигании, построена гистограмма распределения числа замыканий по месяцам (сезонная зависимость), а также выявлены фидеры, наиболее подверженные воздействию дугowych перенапряжений (рис.2).

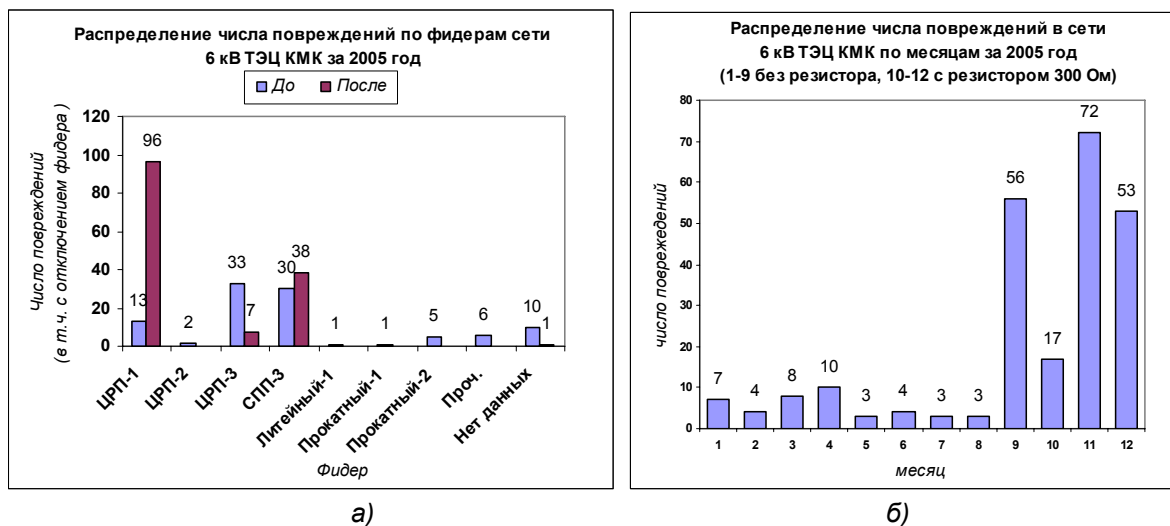


Рис.2. а) Доля ОЗЗ, приходящаяся на каждый фидер до и после установки резистора в нейтраль; б) распределение числа ОЗЗ по месяцам

Значительная доля ОЗЗ в рассматриваемой сети – 20,4% от общего числа – самоустраняется после второго пробоя и при отсутствии резистора (табл.2). Это обстоятельство проиллюстрировано на рис. 3. В то же время, около 10% замыканий приводят к отключению оборудования, что свидетельствует о возможном нарушении бесперебойного электроснабжения потребителей и соответствующем недоотпуске электроэнергии.

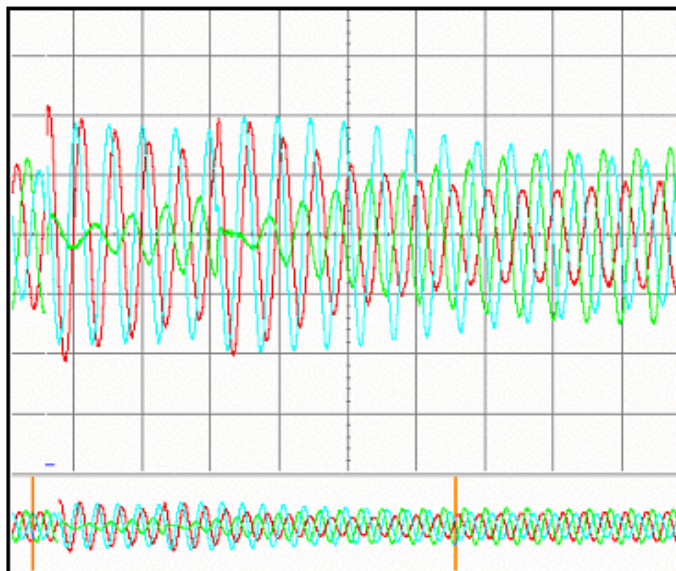


Рис. 3. Осциллограммы фазных напряжений при ОДЗЗ, нейтраль сети 6 кВ компенсирована /фидер 'ЦРП-1' 16 февраля 2005 г. 19:16, Кп=1,85/

Резистивное заземление нейтрали не только приводит к снижению числа 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, перерывов в электроснабжении потребителей, не было вообще (табл. 2). 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.

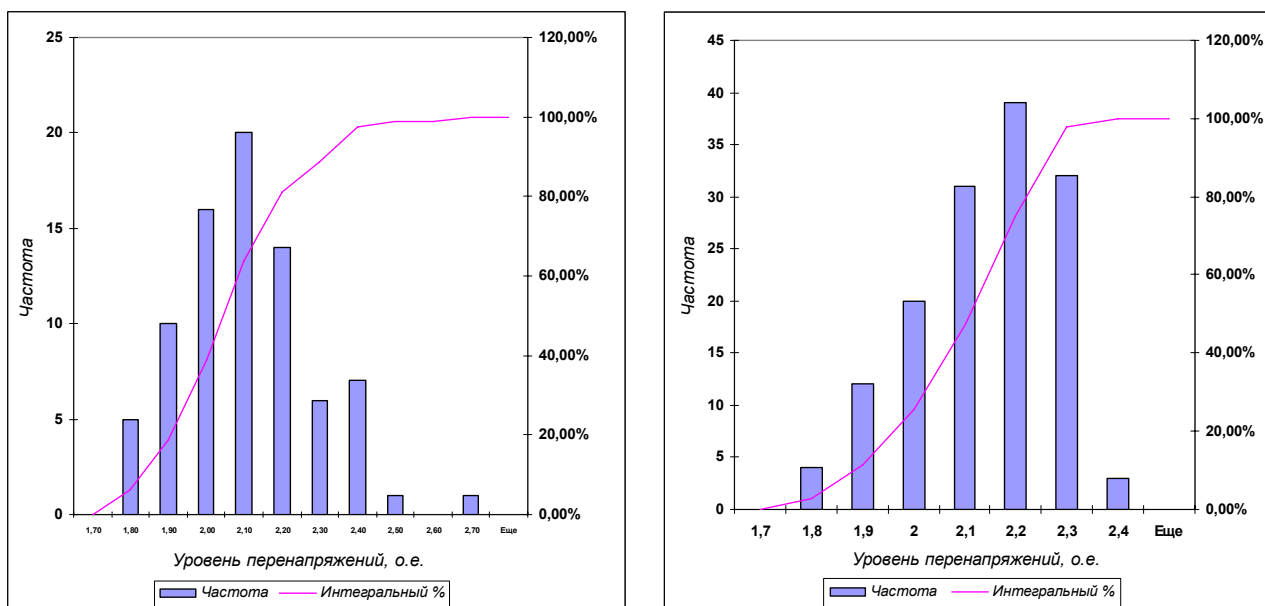
#### ***Анализ перенапряжений, воздействующих на изоляцию кабельных линий***

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.

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

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



а)

б)

*Рис.4. Эмпирическая плотность распределения уровней перенапряжений в сети ГРУ-6 кВ ТЭЦ КМК до (а) и после (б) установки резистора*

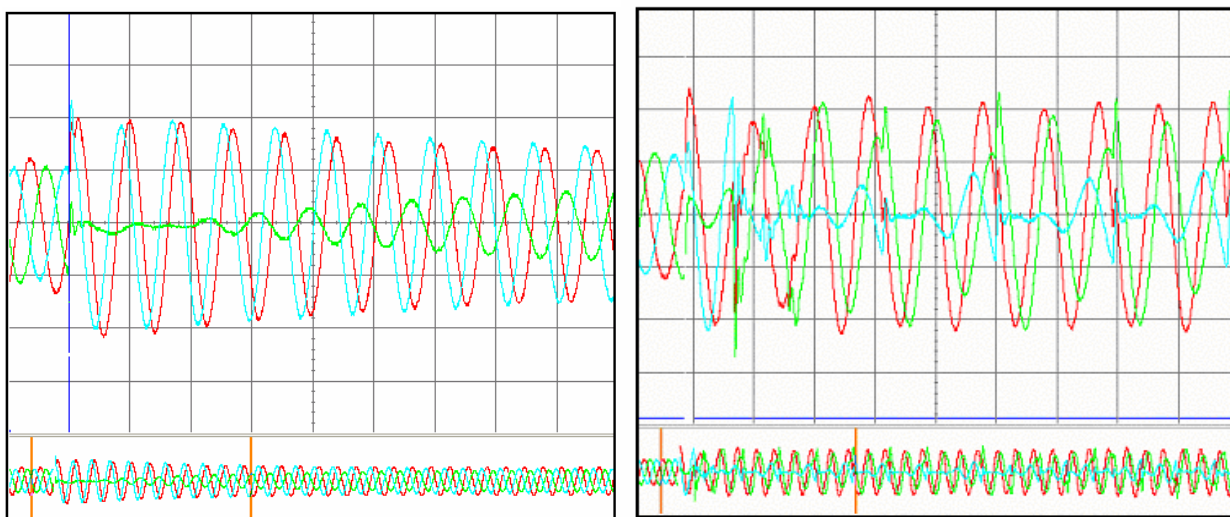
В случае заземления нейтрали через резистор, установленный параллельно ДГР, с вероятностью 0,95 возникающие перенапряжения не превысят  $2,3U\phi$ . Как в первом (*рис. 4а*), так и во втором (*рис. 4б*) случаях интегральная кривая распределения на участке вероятностей 0,95-1,0 достаточно пологая, поэтому 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. 5а*).

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



а)

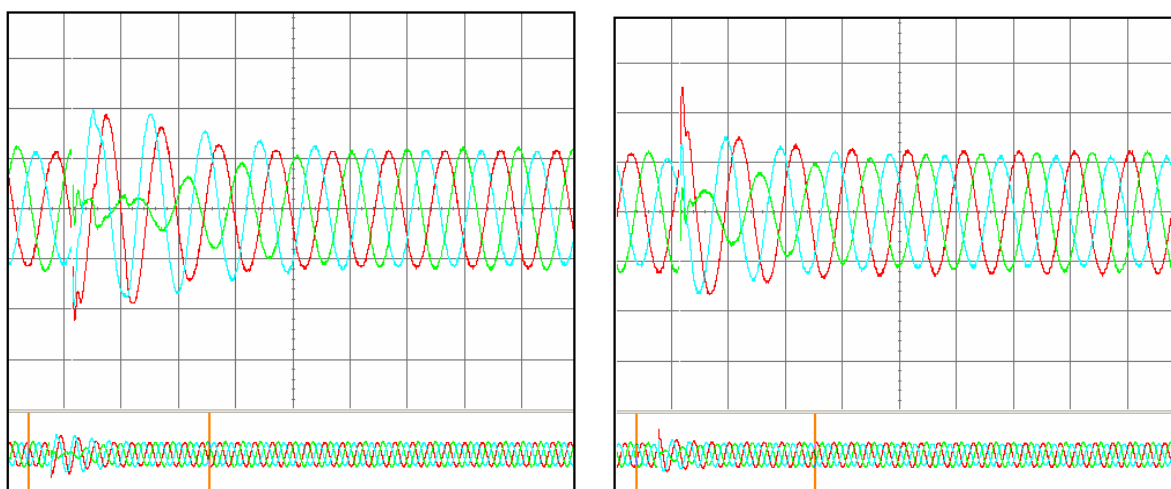
б)

Рис.5. Осциллограммы фазных напряжений при ОДЗЗ, нейтраль сети 6 кВ компенсирована: а) фидер 'ЦРП-3' 25 сентября 2005 г. 12.25 (резистора нет),  $K_{\text{п}}=2,2$ ; б) фидер 'Прокатный-2' 10 апреля 2005 г. 8:15 (резистора нет),  $K_{\text{п}}=2,35$

Из осциллограммы рис. 5б видно, 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 на 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 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  $2,7U_{\text{ф}}$ .

На рис. 6 приведены характерные осциллограммы напряжений на фазах разных присоединений сети ТЭЦ КМК при заземления нейтрали через параллельно включенные ДГР и резистор.



а)

б)

Рис.6. Осциллограммы фазных напряжений при ОДЗЗ, комбинированная нейтраль сети 6 кВ: а) фидер 'СПП-3' 10 ноября 2005 г. 3:53,  $K_{\text{п}}=1,93$ ; б) фидер 'ЦРП-1' 13 декабря 2005 г. 22:08,  $K_{\text{п}}=2,14$

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 зажигания и действительные повторные пробои 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.6 видно также, что время восстановления напряжения в поврежденной фазе не превышает  $(3,0-3,5)$  периодов промышленной частоты.

Определенный интерес представляют сведенные в табл. 3 отдельные статистические характеристики уровней перенапряжений в сети с компенсированной нейтралью и при комбинированном ее заземлении.

Таблица 3

**Статистические характеристики уровней перенапряжений при замыканиях на землю в сети 6 кВ ТЭЦ КМК за период 23.12.2004 – 22.12.2005**

Характеристика	В нейтрали только ДГР	В нейтрали ДГР и резистор
Математическое ожидание	2.06	2.10
Дисперсия	0.031	0.02
Среднеквадратическое отклонение	0.176	0.142
<b>Максимум</b>	<b>2.70</b>	<b>2.35</b>

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

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

### ***Процессы в бумажно-масляной изоляции кабеля при дуговом замыкании***

При длительной эксплуатации кабельной сети происходит накопление и развитие дефектов, причем протяженность единичного дефектного участка измеряется долями миллиметра, реже – миллиметрами. Первоначальной 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. 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, как видно из *рис.3*, *рис. 5б*. Движение частиц массы способствует также некоторому смещению трассы пробоя. Многократное повторение пробоев приводит к образованию более или менее устойчивого разрядного канала. В самом деле, из *табл. 2* 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 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 повышения 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 напряжение). 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.

Все 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 с вероятностью 0,95 не превышает  $2,3U_{\phi}$ , а время горения с той же вероятностью составляет не более 35 мс. В случае компенсированной нейтрали эти показатели будут равны  $2,4U_{\phi}$  и 100 мс, соответственно. Максимальные же значения перенапряжений для режимов с компенсированной и комбинированной нейтралью составляют  $2,7U_{\phi}$  и  $2,35U_{\phi}$ , соответственно.



Характер процессов горения и гашения дуги при наличии в нейтрали резистора 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 их пробоя и возникновения многоместных повреждений.

3. Построенная 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.

### *Литература*

1. *Титенков С.С.* России стоило бы подумать над аналогичным документом. Оценки и прогнозы. – Новости электротехники, 2006. – №3(39) – С.42.
2. *Беляков Н.Н.* Исследование перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сетях 6 и 10 кВ с изолированной нейтралью// Электричество. – 1957. - №5.