

# ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В СЕТИ 6 ... 35 кВ С ИЗОЛИРОВАННОЙ, КОМПЕНСИРОВАННОЙ И ЗАЗЕМЛЕННОЙ ЧЕРЕЗ РЕЗИСТОР НЕЙТРАЛЯМИ

Короткевич М.А., Протас А.М.

(Учреждение «Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций» МЧС Республики Беларусь, г. Минск)

В Республике Беларусь в электрических сетях напряжением 6...35 кВ, работающих с изолированной нейтралью или компенсацией емкостных токов, главное преимущество которых наиболее эффективно реализуется в воздушных сетях и состоит в возможности обеспечения бесперебойного электроснабжения потребителей в течение определенного времени при однофазных замыканиях на землю, постепенно внедряется заземление нейтрали через резистор и немедленное отключение линий с возникшими на них однофазными замыканиями на землю.

Рассмотрим уровни перенапряжений, имеющие место при металлических и дуговых замыканиях на землю в сети с различными способами заземления нейтрали.

## Сеть с изолированной нейтралью.

При металлическом замыкании фазы на землю, напряжение замкнувшейся фазы считается равным нулю, а напряжение смещения нейтрали  $U_N$  достигает фазного значения. Тогда напряжение поврежденных фаз относительно земли становятся равными линейным значениям и остаются такими до прекращения однофазного замыкания на землю.

Относительно протекания процесса повторных дуговых зажиганий на землю в литературе существуют различные мнения, связанные с продолжительностью горения дуги (половина периода промышленной или собственной частоты), возникающих уровнях перенапряжений на поврежденных и здоровых фазах, а также значений напряжений смещения нейтрали в момент первого и повторного зажиганий заземляющей дуги.

Укажем наиболее часто встречающиеся оценки отмеченных параметров (табл. 1). При этом объяснения процесса горения дуги по всем указанным в таб. 1 теориям, начинается с того, что первое зажигание дуги происходит при максимальном отрицательном значении напряжения поврежденной фазы. Повторные же зажигания дуги представляются в виде металлических замыканий. Так как высокочастотный ток в переходном процессе больше емкостного тока частотой 50 Гц, то обрыв дуги совершается в момент перехода через нуль высокочастотного тока, т.е. в момент максимума напряжения высокочастотных колебаний.

По теории У. Петерена [1], частота собственных колебаний при зажигании дуги  $f_1$  определяется суммарной индуктивностью цепи замыкания на землю ( $1,5L$ ) и емкостями неповрежденных фаз  $2C$ .

При учете затухания в контуре с сопротивлением  $r$  и междуфазных емкостей  $C_m$ , предельные значения перенапряжений достигают  $3,9U_{фм}$ , а наибольшее напряжение на поврежденной фазе равно  $3,6U_{фм}$ .

Представление повторных зажиганий дуги в виде металлических замыканий освобождает от необходимости учета у дуги вольт-амперной зависимости и позволяет рассматривать напряжение на дуге с четко выраженными пиками гашения и зажигания.

Из табл. 1 видно, что после каждого гашения дуги по теории У. Петерена имеет место постоянное нарастание напряжения смещения нейтрали. Восстановление напряжения на поврежденной фазе после гашения дуги имеет колебательный характер с высокочастотным пиком, превышающим величину фазного напряжения. После полупериода перенапряжения изменяют свой знак.

**Таблица 1 – Изменение напряжений смещения нейтрали, поврежденных и неповрежденных фаз дуговых замыканий в сетях с изолированной нейтралью**

Напряжения фаз $U_A$ , $U_B$ , $U_C$ и нейтрали $U_N$	Напряжение фаз по отношению к номинальному фазному напряжению в момент времени						Продолжительность горения заземляющей дуги, с	Периодичность повторных зажигания дуги, с	Примечание
	Предшествующего замыкания	Замыкания фазы на землю	Погасания заземляющей дуги	Предшествующий повторному зажиганию дуги	Повторного зажигания дуги	Повторного погасания дуги			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_A$	0,5	2,5	2,17	1,17	-0,5	-4,17	1/2f <sub>1</sub>	0,01	Теория Петерсена [1]
$U_B$	0,5	2,5	2,17	1,17	-0,5	-4,17			
$U_C$	-1,0	0	0,67	2,67	0	-3,6			
$U_N$	0	1,67	1,67	1,67	-0,3	-2,78			
$U_A$	0,5	2,5	-1,5	-0,5	-0,5	3,5	0,01	0,02	Теория Д. Петерса, Х. Слепяна [1]
$U_B$	0,5	2,5	-1,5	-0,5	-0,5	3,5			
$U_C$	-1,0	0	0	0	-2,0	0			
$U_N$	0	0	-1,0	-1,0	-1,0	-1,0			
$U_A$	1,0	0	0	1,0	0	0	1/2f <sub>1</sub>	0,01	По данным [2]
$U_B$	0,5	1,5	2,3	-0,5	-1,5	-3,5			
$U_C$	0,5	1,5	2,3	-0,5	-1,5	-3,5			
$U_N$	0	1,0	1,5	0	-1,0	-2,3			

Так как электрическая прочность промежутка в месте повреждения ограничена, то ограничены колебания напряжений на емкостях неповрежденных фаз и напряжения смещения нейтрали. Следовательно, значения дуговых перенапряжений тоже имеют свой предел.

По теории Дж. Петерса и Х. Слепяна, максимальное перенапряжения на здоровых фазах достигают  $3,5U_{фм}$ ; на поврежденной ( $-2U_{фм}$ ); напряжение смещения нейтрали после каждого гашения дуги ( $-U_{фм}$ ). Перенапряжения знака не изменяют.

С учетом затуханий свободных колебаний, максимальные перенапряжения не превышают ( $3,0-3,1U_{фм}$ ).

В соответствии с [2] максимальные значения напряжения поврежденных фаз при первом зажигании дуги составляет  $2,3U_{фм}$ , при повторном значении  $-3,5U_{фм}$ .

Данные табл. 1 указывают на различные в оценках изменения напряжения в переходных процессах при дуговых замыканиях на поврежденных фазах (от 0 до  $(-3,6U_{ф})$ ), неповрежденных фазах (от  $0,5U_{ф}$  до  $(-4,1U_{ф})$ ), нейтрали (от 0 до  $(-2,78U_{ф})$ ).

Для нормальной изоляции перенапряжения большой опасности не представляют, но они охватывают всю сеть и продолжаются до тех пор, пока не ликвидируется дуговое замыкание перемежающего характера. При наличии элементов сети с ослабленной изоляцией, дуговые перенапряжения могут приводить к междуфазным перекрытиям, вызывающим их аварийное отключение.

#### **Сеть с компенсированной нейтралью.**

Рациональным режимом работы дугогасящих реакторов считается режим их резонансной настройки, т.е. когда имеет место резонанс (равенство) емкостных токов линии и сдвинутого по отношению к нему на  $180^\circ$  индукционного тока, создаваемого катушкой реактора.

Максимальная длительность работы реактора при наибольшем токе и номинальном напряжении не должна превышать 6 часов.

Считается, что резонансная настройка дугогасящего реактора обеспечит минимальный ток в месте замыкания, минимальную скорость восстановления напряжения на поврежденной фазе после гашения дуги и минимальный уровень дуговых перенапряжений.

Однако в практике эксплуатации электрических сетей обеспечить режим резонансной настройки дугогасящих аппаратов не представляется возможным. Это связано с тем, что емкость сети, подключенная к данной секции шин напряжением 10 или 35 кВ центров питания или подстанций непрерывно изменяется за счет отключения отдельных линий для плановых и аварийных ремонтов, а также подключения новых линий или включения линий после выполнения на них работ технического обслуживания и ремонта. В условиях непрерывного изменения емкости сети и отсутствия системы плавной автоматической настройки компенсации, резонанс емкостных токов линий и индукционного тока реактора не может быть оперативно обеспечен в каждый момент времени.

Расстройка полной компенсации приводит к увеличению тока в месте повреждения и опасности появления значительных перенапряжений. Так, в электрической сети одного города за три года было зафиксировано 36 случаев одновременного повреждения нескольких (от 2 до 14 участков) питающих или распределительных линий напряжением 10 кВ, отходящих от одной и той же секции шин центра питания из-за перенапряжений на шинах 10 кВ центра питания и на шинах 10 кВ распределительных пунктов, возникших при однофазном замыкании на кабельных линиях в условиях расстройки компенсации емкостных токов дугогасящими реакторами. Особенно вероятны такие перенапряжения при несимметрии емкостных проводимостей линий или появления фазных режимов (например, недовключения или неодновременного включения в цепи заземляющих трансформаторов контактов фаз выключателей, обрыве токоведущего проводника. Ток расстройки на практике в ряде случаев, оказывается достаточным и для поддержания горения заземляющей дуги.

При применении дугогасящих реакторов основные недостатки сети с изолированной нейтралью те только не устраняются, но и дополняются специфическими недостатками, а именно увеличением в (20...100) раз напряжения смещения нейтрали при несимметрии фазных проводимостей, большей опасностью для изоляции неполнофазных режимов, более сложной релейной защитой и ограниченной продолжительностью работы реактора (до 6 часов).

#### **Сеть с заземленной через резистор нейтралью.**

Так как в настоящее время сети напряжением (6-10) кВ и 35 кВ достаточно надежны (имеется резервирование как на данном, так и на более высоком или более низком напряжениях, средства автоматического ввода резерва и т.п.), то будем рассматривать лишь возможность немедленного автоматического отключения однофазных замыканий.

Следовательно значение электрического сопротивления резистора должно выбираться исходя из необходимости гашения дуги, возникшей в месте повреждения, путем отключения места повреждения и дальнейшего восстановления диэлектрических свойств изоляции за время бестоковой паузы системы автоматического повторного включения.

Включение резистора в изолированную нейтраль сети приводит к появлению активного тока замыкания и увеличению в (1,2...2,0) раза тока замыкания на землю, а также к снижению напряжения смещения нейтрали, имеющее место из-за несимметрии емкостей фаз сети.

Однако при учете индуктивного сопротивления заземляющего трансформатора и большого активного сопротивления в месте однофазного замыкания, соответствующего обрыву провода с касанием его земли, ток замыкания на землю снижается более чем в два раза по сравнению с током замыкания в случае металлического соединения фазного провода с землей.

До отключения однофазного замыкания на землю (расчетной продолжительностью до 10 с) в сети с нейтралью, заземленной через резистор, также как и в сети с изолированной нейтралью, будет происходить горение дуги и перенапряжения по значению такие же как при первом зажигании дуги, будут также воздействовать на изоляцию.

Нами показано [3], что апериодическое затухание высокочастотных колебаний на поврежденных фазах реальной сети достигается при сопротивлении резистора в нейтрали не менее 100 и 400 Ом (соответственно в сети с кабельными и воздушными линиями напряжением 10 кВ) и 200 Ом (в сети с воздушными линиями напряжением 35 кВ).

Подключенный к сети резистор разрядит ее емкость за время, меньшее полупериода промышленной частоты, что указывает также на отсутствие возможности возникновения феррорезонансных явлений в цепи измерительных трансформаторов напряжения.

Тем не менее, в сети с резистором в нейтрали не обеспечивается эффективное заземление нейтрали. Поэтому фазную изоляцию следует выполнять также как и в сети с изолированной или компенсированной нейтралью, на линейное напряжение. Однако применение резисторов для заземления нейтрали сети не требует модернизации системы заземления и не приводит к утяжелению условий работы коммутационных аппаратов. Количество отключений линий из-за однофазных и междуфазных замыканий в случае заземления нейтрали через резистор возрастает примерно в 2,5 раза по сравнению с работой сети и изолированной нейтралью при одновременном снижении в большее число раз продолжительности воздействия на изоляцию перенапряжений в случае однофазных замыканий на землю.

На трехфазной модели-тренажере городской кабельной электрической сети напряжением 10 кВ для каждого из указанных видов рабочего заземления нейтрали нами фиксировались с помощью электронного осциллографа и персонального компьютера параметры электрического режима при однофазных замыканиях на землю (фазные и междуфазные значения напряжения, тока замыкания на землю и ток в нейтрали сети). При

этом оказалось, что значения перенапряжений в сети с изолированной и компенсированной нейтралью не превышали указанных [1] в соответствии с теорией Дж. Петерса и Х. Слепяна. В сети с заземлением нейтрали через резистор перенапряжения не происходили  $2,3U_{фм}$ , т.е. были такими же, как и при первом зажигании дуги.

### **Литература**

1. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью и с компенсацией емкостных токов. –М.: Энергия, 1974. – 152 с.
2. Защита сетей 6...35 кВ от перенапряжений: Под ред. Ф.Х. Халилова, Г.А, Евдокунина, А.И. Таджикибаева. –СПб.: Энергоатомиздат, Санкт-Петербургское отделение, 2002. -272 с.
- 3.Короткевич М.А. Эксплуатация электрических сетей /М.А. Короткевич. –Минск: Высшэйшая школа, 2005. – 364 с.