

Комплексный подход к выбору средств ограничения перенапряжений в сетях 6,10 кВ крупных промышленных предприятий целлюлозно-бумажной и металлургической промышленности

Ильиных М.В., Сарин Л.И. (ООО"ПНП БОЛИД" г.Новосибирск)

Крупные современные промышленные предприятия питаются от районных электрических сетей по ВЛ 110-220 кВ, а в ряде случаев имеют в своем составе одну или несколько собственных ТЭЦ. Связь системы электроснабжения предприятий с энергетической системой осуществляется через главную понизительную подстанцию (ГПП).

У данных предприятий имеется собственная большая разветвленная распределительная сеть 6-35 кВ протяженностью 100 и более километров, зачастую обеспечивающая энергоснабжение более мелких предприятий.

Распределительные сети 6-10 кВ – в основном радиальные и выполняются практически всегда кабельными линиями.

Состав потребителей электроэнергии на крупных предприятиях имеет достаточно широкий спектр. Из основных - это мощные двигатели 6-10 кВ приводов технологических механизмов производства и собственных нужд ТЭЦ 6-10 кВ, вентильные преобразователи для питания проводов картонно- и бумагоделательных машин, листовых и сортовых станков, в электроплавильных цехах – печи ДСП, руднотермические печи.

Кроме того, как видно из состава потребителей электроэнергии, ряд оборудования имеет нелинейную характеристику и является источниками высших гармоник.

Наличие мощного дорогостоящего оборудования, обеспечивающего непрерывность производственного цикла, выдвигает особые требования к бесперебойности электроснабжения и надежности работы электрооборудования.

Основные виды перенапряжений характерные для сетей 6-35 кВ:

- Перенапряжения при ОДЗ
- Перенапряжения при коммутации выключателями индуктивных элементов
- Перенапряжения при феррорезонансных явлениях
- Перенапряжений при резонансных явлениях в сети с ДГР
- Перенапряжений при ультрагармоническом резонансе
- Атмосферные перенапряжения

К наибольшим перенапряжениям в сети с изолированной и компенсированной нейтралью приводят однофазные замыкания на землю с перемежающейся дугой и коммутация индуктивных элементов [1-5].

Следует отметить, что перенапряжения при ОДЗ и различных феррорезонансных и резонансных явлениях охватывают целиком всю электрически связанную сеть. Данные перенапряжения существенно зависят от способа заземления нейтрали сети.

В большинстве случаев величина емкостного тока однофазного замыкания на землю для секций подстанций крупного предприятия находится в пределах 20-80 А, но в тоже время существуют отдельные секции с малыми величинами емкостных токов от 1 до 5 А. В связи с этим сети данных классов напряжений работают в режиме компенсированной нейтрали (нейтраль сети заземлена через дугогасящий реактор) либо изолированной нейтрали.

Наличие в сети элементов с нелинейными характеристиками и источников высших гармоник способствуют возникновению опасных для изоляции электрооборудования резонансных и феррорезонансных процессов.

При наличии ВЛ 6-10 кВ, связывающих ГПП с подстанциями сторонних потребителей, на сеть воздействуют и атмосферные перенапряжения. Грозовые перенапряжения могут также трансформироваться через силовые трансформаторы со

стороны ВЛ 110-220 кВ. Защита от грозных перенапряжений в данной статье не рассматривается.

Перенапряжения при ОДЗ

Наибольшая доля среди всех аварийных повреждений (до 80%) связана с возникновением дуговых перенапряжений при однофазных замыканиях на землю. Такие перенапряжения часто существуют в виде переходных процессов при перемежающейся дуге и опасны для электроустановок высокими кратностями перенапряжений $U_{пер}=(3\div 3,5)U_{ф}$, своей продолжительностью и шириной охвата сети, электрически связанной с местом повреждения [6].

Дуговые перенапряжения приводят к перекрытию или пробоем дефектной или ослабленной (загрязненной и увлажненной) изоляции оборудования. Кроме того, воздействие перенапряжений на изоляцию способствует накоплению и развитию дефектов, что приводит к снижению уровня изоляции и повышает вероятность ее повреждения при последующих воздействиях перенапряжений.

Перенапряжения при коммутации выключателями индуктивных элементов (электрических двигателей, трансформаторов)

Опасные перенапряжения для изоляции оборудования, особенно электрических двигателей, могут возникать в период включения и отключения выключателей [1,7].

В процессе выполнения технических операций производятся включения и отключения отдельных присоединений с помощью выключателей, коммутирующих электродвигатели вместе с соответствующими питающими кабелями. Кроме того, возможны коммутации электродвигателей в процессе АВР, отключения заторможенных электродвигателей и др. Все эти коммутационные операции сопровождаются перенапряжениями различной кратности и частоты.

Источником, создающим перенапряжения в сети, может являться сам выключатель. Уровень и вероятность появления этих перенапряжений существенно зависят от типа и качества настройки коммутационной аппаратуры.

Опасные коммутационные перенапряжения могут возникнуть как при включении выключателя, так и при его отключении даже в том случае, если выключатель работает идеально: т.е. замыкание контактов происходит мгновенно (без предпробоев), а размыкание - в нуле тока промышленной частоты (без повторных зажиганий и гашений дуги).

В реальных условиях работа выключателя может существенно отличаться от идеальной. При этом могут возникать следующие явления:

срез тока до его нулевого значения;

пробой межконтактного промежутка в процессе включения и отключения;

гашение дуги высокочастотного тока переходного процесса.

Все выключатели обнаруживают эти характеристики в различной степени (масляные, воздушные, элегазовые, вакуумные). Особенно это присуще вакуумным выключателям. Вакуумные выключатели создают нестабильную дугу при высокочастотном характере изменения тока с последующим очень быстрым его прерыванием.

Перенапряжения на зажимах двигателя при срезе тока с последующей эскалацией могут достигать $(6\div 7)U_{ф}$ и даже более.

Эскалация перенапряжений возможна при отключении, как коротких, так и длинных кабельных присоединений, при отключении как маломощных, так и мощных двигателей.

С увеличением мощности двигателя и уменьшением длины кабеля растет количество повторных зажиганий дуги в выключателе, что приводит к увеличению перенапряжений на двигателе.

Высокие частоты собственных колебаний, сопровождающие процессы при отключениях двигателей ВВ, могут привести к повреждению витковой изоляции двигателей. Наибольшие витковые перенапряжения возникают в начале и конце обмотки. Следует отметить, что в практике эксплуатации при отключении двигателя вакуумными выключателями достаточно часто наблюдается повреждение именно витковой изоляции статора.

Перенапряжения в сети 6 кВ при феррорезонансных явлениях

На секциях шин, работающих в режиме разземленной нейтрали, достаточно часто создаются условия возникновения феррорезонанса [8]. Толчком для феррорезонанса может являться любое аварийное и коммутационное перенапряжение. На напряжении 6 кВ таким толчком может быть кратковременное однофазное замыкание на землю, в результате которого происходит смещение нейтрали и повышение напряжения здоровых фаз до линейного. В сетях с изолированной или заземленной через дугогасящий реактор нейтралью феррорезонанс может развиваться при наличии индуктивности с насыщающимся сердечником, включенной параллельно фазной емкости сети на землю. Такой индуктивностью может служить обмотка трансформатора напряжения, режее обмотка силового трансформатора блока или трансформатора собственных нужд

Устойчивый феррорезонанс возможен при выполнении условий равенства реактивных параметров схемы на конкретном уровне перенапряжений и выполнении условий по балансу энергии. При попадании значения емкости шин в резонансный диапазон феррорезонансные перенапряжения имеют максимальное значение и достигают величин $U_{\max} \geq 3U_{\phi}$.

Перенапряжений при резонансных явлениях в сети с ДГР

При установке ДГР схема сети представляет собой резонансный контур, в котором возможны значительные повышения напряжения на индуктивности катушки [1].

Повышение напряжения на реактированной нейтрали в нормальном режиме происходит за счет резонанса напряжений в контуре: емкость линии – индуктивность ДГР. В цепь протекания токов входит индуктивность трансформатора, в нейтраль которого подключен ДГР.

При резонансном заземлении и большой добротности реактора $q = X_p/R_p$ напряжение на нейтрали может быть определено упрощенно по выражению $U_N \approx q \cdot U_{Nxx}$.

Поскольку добротность ДГР весьма велика (50-100), то даже при небольшой несимметрии сети при точной настройке катушки (или при попадании настройки катушки в резонанс), на нейтрали и, следовательно, на фазах могут возникнуть опасные перенапряжения.

В нормальном режиме эксплуатации смещение нейтрали может возникнуть в основном из-за различия емкости фаз ВЛ.

Значительное смещение нейтрали может возникнуть при попадании схемы в резонанс в случаях возникновения неполнофазных режимов подключения всей емкости сети, например, неполнофазном включении и отключении фаз выключателя линии.

Перенапряжений при ультрагармоническом резонансе

Существование высших гармоник в электрической сети в сочетании с возникновением однофазного дугового замыкания (ОДЗЗ) или неполнофазного режима в электрической сети 6-10 кВ может привести к появлению ультрагармонического резонанса, сопровождающегося значительным повышением напряжения в ряде случаев до $(4 \div 5)U_{\phi}$ и более, с последующим пробоем изоляции.

Защита от внутренних перенапряжений

Ограничение внутренних перенапряжений можно проводить различными способами: использовать заземляющие дугогасящие реакторы, резистивное заземление нейтрали, ОПН и разрядники вентильные (РВ), резисторы, шунтирующие дугогасящие промежутки выключателей, RC-цепочки ограничивающие коммутационные перенапряжения при отключении вакуумными выключателями ненагруженных трансформаторов и электродвигателей, управление моментом замыкания контактов выключателя при включении и отключении и т.д.

В табл.1 приведены уровни перенапряжений в сетях 6-35 кВ при коммутациях и однофазных дуговых замыканиях на землю и устройства для их ограничения.

При рассмотрении вопросов защиты от перенапряжений при ОДЗ следует отметить, что традиционное применение в отечественных сетях 6-35 кВ исключительно схем с изолированной и компенсированной нейтралью не во всех случаях является оправданным. Мировой практикой накоплен большой опыт эксплуатации сетей среднего класса напряжения с различным режимом заземления нейтрали. Активно-индуктивное заземление нейтрали позволяет сохранить преимущества схем с компенсированной нейтралью, связанные с ограничением токов однофазного замыкания на землю. Вместе с тем кардинально решается проблема дуговых и феррорезонансных перенапряжений. Все это дает возможность сократить значительную часть повреждений изоляции оборудования.

В седьмой редакции ПУЭ глава 1.2.16 разрешается применять заземление нейтрали сети через резистор, что позволяет кардинально решить проблемы дуговых и феррорезонансных перенапряжений, сокращая повреждения изоляции высоковольтного оборудования.

Резистивное заземление создает условия для быстрого и надежного определения места повреждения.

В качестве мер защиты оборудования от коммутационных перенапряжений могут быть использованы нелинейные ограничители перенапряжений и RC-цепочки.

Для надежной защиты изоляции двигателей от перенапряжений и ОПН и RC-цепочку необходимо устанавливать непосредственно на выводах двигателя.

В случае больших длин кабеля установка ограничительных аппаратов непосредственно за выключателем присоединения (в начале кабеля), может оказаться неэффективной, так как за счет волновых процессов в протяженном кабеле напряжение на двигателе превышает напряжение в месте установки ограничительного аппарата на $20\div 30\%$.

При установке ОПН развитие процесса коммутационных перенапряжений выключателя со срезом тока и многократным пробоем межконтактного промежутка показывает, что ОПН ограничил перенапряжения по максимальному уровню, т.е. защитил корпусную изоляцию двигателя до допустимого значения. Однако, поскольку ОПН «подключается» лишь при определенном повышении напряжения на двигателе, он практически не сказывается на начальной стадии процесса, характеризующейся достаточно высокими частотами, а, следовательно, и возможными значительными перенапряжениями на витковой изоляции двигателя.

Применение же RC-цепочки существенно влияет на изменение частоты собственных колебаний процесса при отключении тока промышленной частоты. Поэтому вероятность повторных зажиганий дуги в ВДК при оснащении двигателя RC-цепочкой снижается. Конденсаторы снижают волновое сопротивление цепи, ограничивая перенапряжения, вызванные срезом тока. Резисторы способствуют затуханию высокочастотного тока, уменьшают вероятность повторных зажиганий, ограничивают воздействие на другие фазы.

Таблица 1

Уровни коммутационных перенапряжений в сетях 6-35 кВ при коммутациях и однофазных дуговых замыканиях на землю и устройства для их ограничения

п/п	Вид коммутации	Максимальная кратность неограниченных перенапряжений	Рекомендуемый уровень ограничения	Устройства для ограничения перенапряжений
1	2	3	4	5
1	Включение ВЛ и КЛ в нормальном симметричном режиме	2,0	-	резисторы, шунтирующие дугогасящие промежутки выключателей
2	Включение ВЛ и КЛ при наличии в сети ОЗЗ	3,0-3,5	2,6-2,8	ОПН+ Резистор в нейтрали ДГР
3	Отключение ненагруженных ВЛ и КЛ	4,0-4,3	2,6-2,8	ОПН + Резистор в нейтрали
4	Отключение ненагруженных трансформаторов	5,0-6,0	3,0-4,3	ОПН
5	Отключение двойного замыкания на землю	3,3	2,6-3,0	Релейная защита ОПН
6	Включение электродвигателей при нормальном режиме сети 6-10 кВ	3,0-3,1	2,6-2,8	ОПН + Резистор в нейтрали
7	Включение электродвигателей при наличии в сети 6-10 кВ ОЗЗ	3,4	2,6-2,8	ДГР Резистор в нейтрали РВ RC-цепочка
8	Включение электродвигателей в процессе АВР и АПВ в сети 6-10 кВ	4,2	2,6-2,8	ОПН + Резистор в нейтрали
9	Отключение вращающихся электродвигателей 6-10 кВ	4,0-5,0	2,6-2,8	ОПН + Резистор в нейтрали

Продолжение табл. 1

1	2	3	4	5
10	Отключение заторможенных электродвигателей 6-10 кВ	5,0-6,0	2,6-2,8	ОПН + Резистор в нейтрали
11	Коммутации вакуумными выключателями индуктивных токов в сети 6—10 кВ: а) Срез тока при отключении заторможенного электродвигателя в конце кабеля;	5,0-8,0	2,6-2,8	ОПН + Резистор в нейтрали RC-цепочка
12	б) то же, но при больших мощности электродвигателя и длине кабеля;	2,6-2,9		
13	в) эскалация напряжения;	6,0-8,0		
14	г) виртуальный срез тока	крайне высокие кратности, но очень малая вероятность реализации		
15	ОДЗ в сетях с изолированной нейтралью	3,0-3,5	2,4-2,6	Резистор в нейтрали
16	ОДЗ в сетях с резонансно заземленной нейтралью	2,7-3,5	2,4-2,6	Резистор в нейтрали

Если же при относительно низкой скорости восстановления электрической прочности в ВДК даже при установке РС-цепочки произойдет повторное зажигание дуги, то на дальнейший характер процесса, характеризующийся весьма высокими частотами собственных колебаний, РС-цепочка практически не оказывает влияния.

В связи с этим параметры РС-цепочки должны выбираться исходя из условия отсутствия повторного зажигания дуги в ВДК.

ОПН или РС-цепочки, установленные непосредственно у зажимов двигателя, позволят избежать возможных опасных перенапряжений, возникающих как при отключениях, так и включениях присоединений с двигателями.

РС-цепочка, в отличие от ОПН, позволяет существенно ограничить крутизну импульса, а, следовательно, и возможные значительные перенапряжения на витковой изоляции двигателя.

Следует отметить также, повсеместный переход от разрядников к нелинейным ограничителям перенапряжений (ОПН) породил проблему повышенной аварийности ОПН в сетях 6 ÷ 35 кВ при дуговых однофазных замыканиях на землю. Длительные воздействия дуговых перенапряжений при отсутствии средств их подавления приводят к необходимости применения ОПН с высоким уровнем ограничения, что снижает их эффективность при коммутационных перенапряжениях. В противном случае, при некачественном подходе к выбору ОПН, они не выдерживают режима ОДЗ и выходят из строя, зачастую с развитием аварии.

Опыт эксплуатации ограничителей в сетях с разземленной нейтралью показывает случаи повреждения ОПН в режиме длительного однофазного замыкания. Такие случаи приведены в информационных материалах Башкирэнерго, Челябинэнерго, Саратовэнерго, Кузбассэнерго, Новосибирскэнерго.

В сетях, работающих в режиме разземленной нейтрали, режимы длительного дугового замыкания могут привести к тепловой нестабильности ОПН. В этом случае использование ОПН возможно только при совместном подключении к нейтрали резисторов для ограничения дуговых перенапряжений.

Общие положения по комплексному подходу к выбору средств ограничения перенапряжений в сетях крупных промышленных предприятий в сетях 6-35 кВ

На основании всего выше изложенного предлагается следующий комплексный подход к выбору средств ограничения перенапряжений в сетях 6-35 кВ:

1. Проведение детального анализа сети Заказчика в различных режимах, определение емкостных токов однофазного замыкания на землю, режима ведения его компенсации, выполнение экспериментальных и расчетных исследований возможных перенапряжений.

2. Организация эффективной системы защиты от перенапряжений с помощью следующих мероприятий взаимно дополняющих друг друга:

- оснащение нулевой точки сети высокоомным резистором для исключения опасных перенапряжений при ОДЗ, охватывающих все оборудование сетей, а также - эффективного подавления различных резонансных и феррорезонансных процессов, (при больших величинах емкостных токов однофазного замыкания на землю резистор устанавливается параллельно ДГР);

- оснащение присоединений с двигателями, трансформаторами защитными аппаратами (ОПН или РС-цепочками), устанавливаемыми преимущественно непосредственно у защищаемых объектов для обеспечения надежной эксплуатации корпусной и витковой изоляции.

В процессе эксплуатации должно осуществляться грамотное техническое обслуживание электротехнического оборудования, в том числе и релейной защиты, с контролем всех требуемых его настроек и параметров.

Исходя из выше изложенного при выборе аппаратов для защиты от перенапряжений в сети 6 кВ, содержащих электрические двигатели, может быть принят следующий ряд уровней ограничения перенапряжений (в долях амплитуды наибольшего фазного рабочего напряжения для сети генераторного напряжения $U_{фм} \text{ ампл} = 6,3 \cdot \sqrt{2}/\sqrt{3} = 5,14 \text{ кВ}$):

ограничение перенапряжений при ОДЗ за счет оснащение нулевой точки сети высокоомным резистором - 2,4-2,6 о.е. (12,33-13,34 кВ);

ограничение перенапряжений при коммутации электрических двигателей за счет установки ОПН или RC-цепочек - корпусной изоляции на уровне 2,7-2,8 о.е. (13,8-14,4 кВ) и витковой на уровне 4,3-5,6 о.е. (22,1-28,8 кВ) .

Номинал резистора должен выбираться из условия снижения напряжения на нейтрали между дугowymi пробоями до значения, исключающего эскалацию перенапряжений при последующих пробоях ослабленной изоляции аварийной фазы.

Номинал резистора должен также выбираться с учетом обеспечения подавления резонансных и феррорезонансных процессов.

В ряде случаев номинал резистора может быть выбран не только по условию ограничения дугowych перенапряжений, но и условию устойчивого срабатывания защит от однофазных замыканий на землю.

В случае установки на двигателях RC-цепочек емкостный ток однофазного замыкания на землю существенно увеличится, что соответственно приведет к уменьшению требуемого номинала резистора для заземления нейтрали сети.

Работы с использованием комплексного подхода к выбору средств ограничения перенапряжений были выполнены для ОАО «Сегежского ЦБК» и ОАО «Металлургический завод им. А.К. Серова».

Для данных предприятий был выполнен анализ сети для различных нормальных и ремонтных режимов, определены расчетным путем, а также с помощью экспериментальных замеров величины емкостных токов однофазного замыкания на землю, выданы рекомендации по ведению компенсации емкостного тока однофазного замыкания на землю.

Результаты экспериментальных замеров токов ОЗЗ показали наличие в токе значительной доли высших гармоник.

При наличии в токе значительной доли высших гармоник:

- величины тока, полученные с помощью стрелочных и цифровых амперметров, недостоверны и не могут быть использованы для настройки тока компенсации ДГР;

- определение емкостного тока ОЗЗ (тока компенсации ДГР) необходимо производить на основании осциллограмм с выделением гармоники 50 Гц и вычисления ее значения.

Настройка тока компенсации ДГР должна быть проведена по величине тока основной гармоники 50 Гц.

Проведенный анализ переходных процессов в сети ГРУ и СН 6 кВ ОАО «Сегежского ЦБК», сети 6 кВ ГПП-1 и ГПП-2 ОАО «Металлургический завод им. А.К. Серова» показал, что в процессе эксплуатации возможно возникновения опасных для изоляции электрических машин перенапряжений при ОДЗ и коммутации вакуумных выключателей. В связи с этим разработаны конкретные рекомендации и мероприятия для

ограничения перенапряжений путем применения резистивного заземления нейтрали, ОПН, РС-цепочек, выбраны требуемые величины резисторов и типы ОПН.

Литература

1. Защита сетей 6-35 кВ от перенапряжений./Под ред. Халилова Ф.Х., Евдокунина Г.А., Таджибаева А.И.-СПб.: Петербургский энергетический институт повышения квалификации Министерства топлива и энергетики Российской Федерации, 1997, 216с.
2. Гиндуллин Ф.А., Гольдштейн В.Г., Дульзон А.А., Халилов Ф.Х. Перенапряжения в электрических сетях 6-35 кВ.- М.: Энергоатомиздат, 1989 г.
3. Беляков Н.Н., Кузьмичева К.И., Ивановски А. Ограничение перенапряжений при дуговых замыканиях на землю в сети 6 кВ собственных нужд электростанций с помощью ОПН. - Эл. станций, 1991 г. N 4 .
4. Базуткин В.В., Евдокунин Г.А., Халилов Ф.Х. Ограничение перенапряжений, возникающих при коммутациях индуктивных цепей вакуумными выключателями. Электричество, №2, 1994.
5. Перенапряжения в электрических системах и защита от них. В.В.Базуткин, К.П.Кадомская, М.В.Костенко, Ю.А.Михайлов. Энергоатомиздат, С-П, 1995, 320с.
6. Лихачев Ф.А. Замыкания на землю в сетях с изолированной нейтралью с компенсацией емкостных токов.- М.: Энергия, 1971 г.
7. Кадомская К.П., Лавров Ю.А., Рейхердт А.А. Перенапряжения в электрических сетях различного назначения и защита от них: Учебник. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2004. – 368с. – (Серия «Учебники НГТУ»).
8. Поляков В.С. Исследование феррорезонансных явлений и мер их предотвращения в цепи с трансформаторами напряжения. Диссертация к.т.н. / ЛПИ. 1988, 215 с.