

СИСТЕМНЫЙ ПОХОД К ОБЕСПЕЧЕНИЮ НАДЕЖНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ИЗОЛЯЦИИ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ СРЕДНЕГО НАПРЯЖЕНИЯ

К.П.Кадомская, Новосибирский государственный технический университет

Системный подход к сооружению и эксплуатации электроэнергетических объектов. Надежная эксплуатация изоляции электрооборудования высокого напряжения может быть обеспечена лишь при наиболее полном учете условий её эксплуатации на всех стадиях сооружения электроэнергетических объектов: при их проектировании, конструировании электроэнергетического оборудования, технологии его изготовления, организации обслуживания в эксплуатации. В эту систему должны быть также включены диагностика и мониторинг изоляции в период её эксплуатации.

При таком подходе к проектированию и эксплуатации изоляционных конструкций оборудования высокого напряжения любому проектному решению должны предшествовать исследования воздействий на изоляцию в процессе её эксплуатации не только в нормальном эксплуатационном режиме, но и в разного рода аномальных режимах и процессах, связанных с коммутациями в электрической сети (под коммутацией в широком смысле этого слова следует понимать любое внезапное изменение схемы или параметров сети, например, замыкание токоведущих частей на землю), а также грозowymi поражениями объектов. Такие исследования разумно производить путем математического моделирования исследуемых процессов. При этом достоверность используемых математических моделей обычно контролируется путем сравнения результатов компьютерных исследований с результатами регистрации перенапряжений или специально поставленных экспериментов в действующих электрических сетях.

Следует также отметить, что при проектировании и конструировании электроэнергетических объектов должны учитываться также и электромагнитная совместимость электроэнергетической техносферы с биосферой и окружающей средой. Экологические аспекты должны учитываться при анализе влияния сооружаемых объектов на биосферу и окружающую среду при их эксплуатации в нормальном режиме. Аномальные режимы обычно кратковременны и могут не учитываться при анализе электромагнитной совместимости электроэнергетических объектов с биосферой. Так, например, снижение напряженности электростатического и электромагнитного полей по трассам двухцепных ВЛ 35 и 110 кВ может быть достигнуто с помощью соответствующей фазировки проводов цепей. Следует также отметить, что повышение пропускной способности ВЛ ВН за счет компактизации их конструкций также приводит к снижению интенсивности электростатических и магнитных полей по их трассам.

Внутренние перенапряжения в электрических сетях 6-35 кВ различного назначения и их ограничение.

Сети этих классов напряжения эксплуатируются, как правило, либо при изолированной нейтрали сети, либо при заземлении нейтрали через дугогасящий реактор (ДГР). В последнее время находят достаточно широкое применение и сети с резистивным заземлением нейтрали (при так называемых низкоомном или высокоомном резисторах). Классификация перенапряжений в сетях 6-35 кВ приведена на рис.1. Перенапряжения первой группы, охватывающие все электрооборудование, примыкающее к РУ, существенно зависят от способа заземления нейтрали сети. Перенапряжения второй группы за счет относительно небольшой протяженности сетей

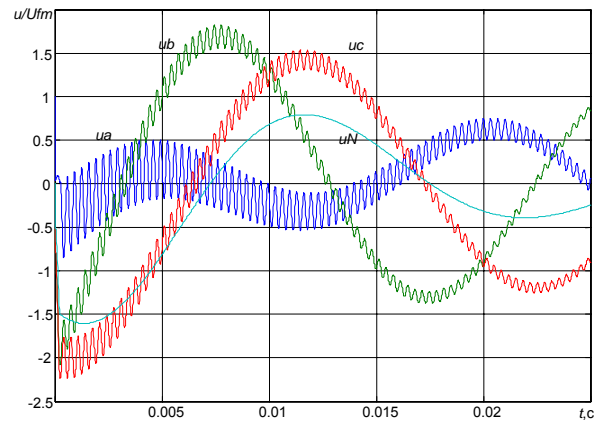
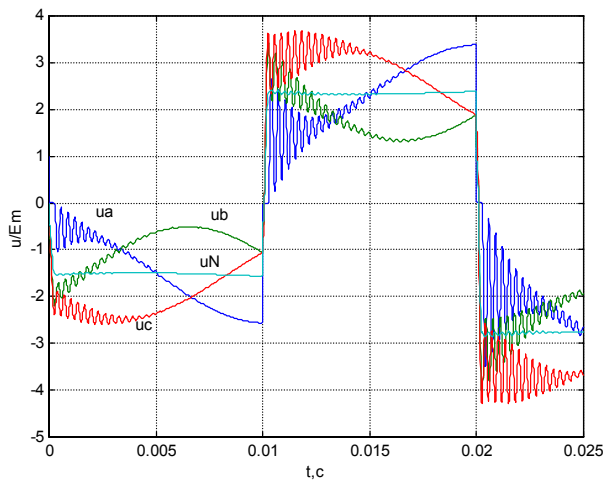
и соответственно их относительно небольшой емкости практически не зависят от способа соединения нейтрали электрической сети с землей.



Рис.1. Классификация внутренних перенапряжений перенапряжений в сетях 6-35 кВ

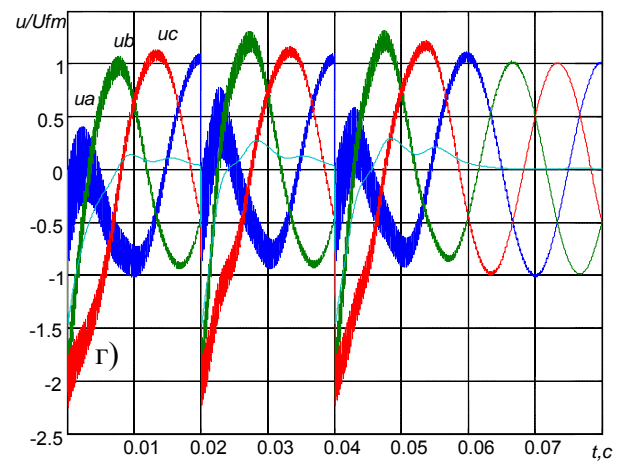
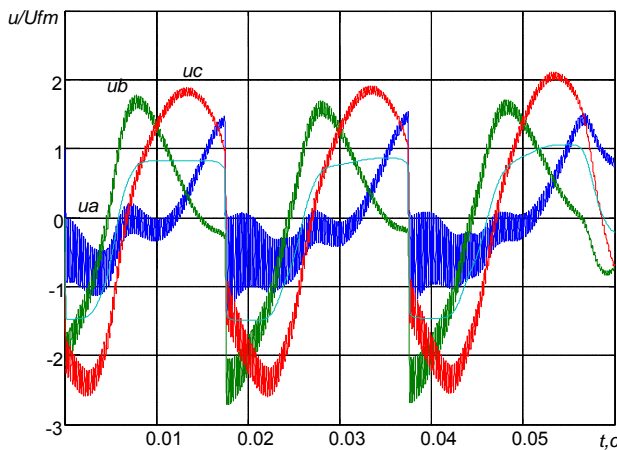
Однофазные дуговые замыкания на землю (ОДЗ). Эскалация перенапряжений при однофазных дуговых замыканиях на землю (ОДЗ) в случае изолированной нейтрали сети возникают за счет повторных зажиганий дуги, сопровождающихся повышением напряжения на изолированной нейтрали сети (рис.2,а). В случае заземления нейтрали через ДГР напряжение на нейтрали носит колебательный характер, что не всегда обеспечивает приемлемый уровень перенапряжений на изоляции оборудования относительно земли. При оснащении нейтрали сети ДГР эскалации не наблюдается лишь при степени компенсации емкостного тока сети, близком к единице (рис.2,б). При оснащении сети ТН электромагнитного типа напряжение на нейтрали сети носит колебательный нелинейный характер, что также приводит к снижению уровня перенапряжений, но не исключает удовлетворения условий существования опасных феррорезонансных явлений, обусловленных насыщением магнитопроводов ТН. Оснащение же нейтрали сети резистором не приводит к эскалации перенапряжений за счет разряда емкости сети через резистор после погасания дуги (рис.2,г), а также, как правило, исключает возможность возникновения опасных феррорезонансных явлений.

Так как ДГР применяются для ограничения токов замыкания на землю в схемах, в которых защита от замыканий на землю срабатывает, в основном, "на сигнал", то если к шинам РУ подходит несколько фидеров, то защита, как правило, является неселективной, так как факт замыкания на землю устанавливается с помощью трансформатора напряжения (ТН), фиксирующего появление напряжения на нейтрали сети. Поочередное отключение фидеров для нахождения поврежденного фидера может привести к дополнительному замыканию на землю вследствие возникновения коммутационных перенапряжений. В этой связи резистивное заземление нейтрали позволяет организовать селективную и чувствительную защиту, так как активный ток течет лишь по поврежденному фидеру. При однофазном замыкании на землю (ОЗЗ) в сети с резистивным заземлением нейтрали по неповрежденным фидерам текут лишь емкостные токи. В некоторых схемах они могут достигать значений, превышающих допустимую тепловую стойкость оборудования. В этом случае можно использовать параллельное соединение в нейтрали резистора и ДГР. Переходные же процессы при ОДЗ в таких схемах будут определяться практически лишь резистором нейтрали.



а)

б)



в)

г)

Рис.2. Процессы, сопровождающих дуговые замыкания на землю; а – нейтраль сети изолирована, б- нейтраль заземлена через ДГР, в – нейтраль сети изолирована, на шинах РУ установлены ТН, г – нейтраль сети заземлена через резистор

Установка ТН типов ЗНОЛ, ЗНОМ и НТМИ для контроля изоляции может привести при любых повышениях напряжения и выполнении условий феррорезонанса на субгармонических к опасным токам в обмотках высшего напряжения ТН. Поскольку устойчивый феррорезонанс - достаточно длительный процесс, то при этом может нарушиться тепловая стойкость ТН, что приводит к их возгоранию. Такие опасные условия возникают, как правило, при изолированной нейтрали сети или какого-либо локального участка сети, эксплуатируемого в некотором режиме при изолированной нейтрали. Предельными стационарными токами для ТН 6 и 10 кВ являются токи 0.2-0.3 А, а для ТН 35 кВ – 0.12-0.13 А. Как уже указывалось выше, при оснащении нейтрали

сети резисторами условия возникновения опасного феррорезонанса, обусловленного насыщением магнитопроводов ТН электромагнитного типа, нарушаются. В случае же эксплуатации сети в режиме изолированной нейтрали для исключения опасных феррорезонансных явлений целесообразно устанавливать антирезонансные ТН электромагнитного типа Раменского электротехнического завода – НАМИ. На рис.3 показана эффективность НАМИ в схеме, в которой при оснащении ее ТН типа НТМИ возникают вследствие выполнения условий феррорезонанса при ОДЗ повышенные токи в обмотке ВН ТН.

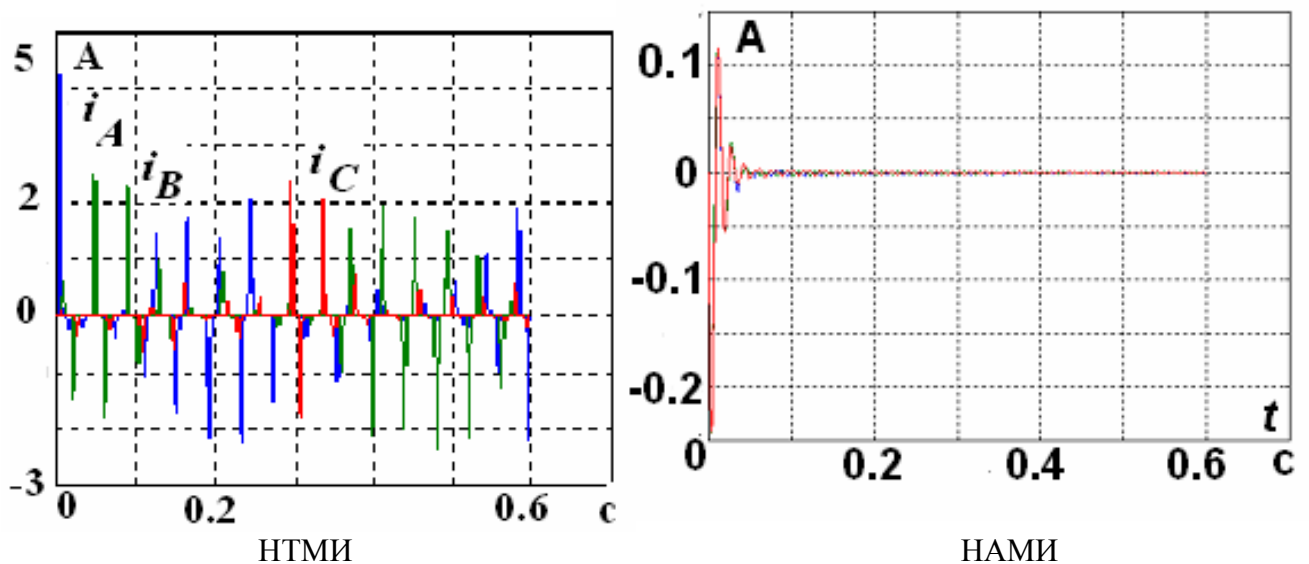
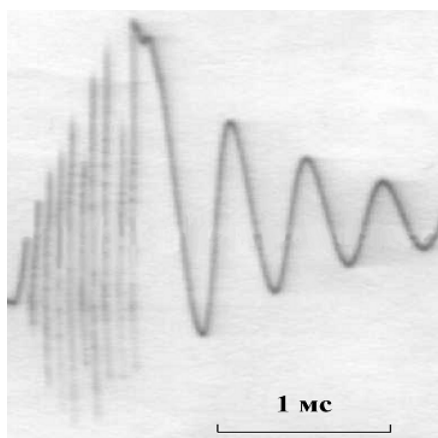


Рис.3. Токи в обмотке ВН ТН при ОДЗ в сети 6 кВ

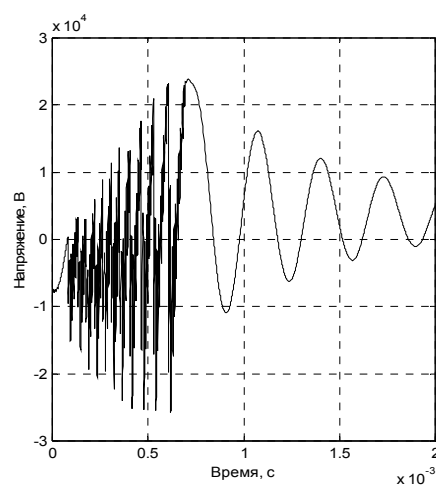
Таким образом, наиболее эффективным средством для исключения эскалации перенапряжений при ОДЗ и нарушения условий существования феррорезонанса за счет насыщения магнитопроводов ТН служит **оснащение нейтрали сети резистором**, величина сопротивления которого выбрана, исходя из разряда емкости сети через резистор за половину периода промышленной частоты. Для избежания опасных феррорезонансных явлений при изолированной нейтрали сети целесообразно устанавливать в сети антирезонансные ТН типа НАМИ. В таких схемах также необходимо устанавливать нелинейные ограничители перенапряжений, позволяющие ограничить перенапряжения до заданного уровня при их соответствующей энергоемкости, определяемой как сумму энергии, поглощаемой варисторами ОПН в течение процесса, сопровождающего дуговые замыкания на землю.

Коммутационные перенапряжения в сетях 6-35 кВ. Влияние коммутационной способности выключателей. Поскольку сети среднего напряжения (особенно сети 6 и 10 кВ, содержащие электрические машины) характеризуются за счет относительно небольшой протяженности малыми емкостями, то при коммутациях в таких сетях способ заземления нейтрали сети практически не сказывается на величинах коммутационных перенапряжений. Перенапряжения, возникающие при коммутациях присоединений, характеризующихся высокими частотами собственных колебаний, в таких сетях могут превысить уровень изоляции изношенного электрооборудования, а также вращающихся машин, обладающих относительно низкими уровнями электрической прочности как главной, так и витковой изоляции. В этой связи коммутации вращающихся машин и трансформаторов целесообразно осуществлять с помощью выключателей, в которых не возникают повторные зажигания дуги между контактами в процессе отключения. В последнее время в электрических сетях среднего

напряжения широко внедряются вакуумные и элегазовые выключатели (ВВ и ЭГВ). При этом в сетях собственных нужд электрических станций 6 кВ, как правило, устанавливаются вакуумные выключатели, а в сетях генераторного напряжения блоков электрических станций 13.8 – 24 кВ – элегазовые выключатели, зачастую входящие в состав элегазовых генераторных комплексов (ЭГК), включающих в себя помимо выключателей и другие аппараты: трансформаторы тока, трансформаторы напряжения, разъединители, дополнительные емкости и защитные аппараты типа ОПН. В настоящее время в сетях генераторного напряжения, содержащих укрупненные блоки с генераторами относительно небольшой мощности, стали устанавливаться и вакуумные выключатели. Элегазовые выключатели обладают достаточно высокой коммутационной способностью: начальная скорость восстановления электрической прочности в их дугогасительных камерах (ДГК) составляет 4-6 кВ/мкс. Поэтому, как правило, коммутация отключения токов короткого замыкания ЭГВ в цепях блоков не приводит к повторным зажиганиям дуги в их ДГК. Физика гашения дуги в вакууме совсем иная, чем в газовой среде. В настоящее время начальные скорости восстановления электрической прочности в вакуумных дугогасительных камерах (ВДК) выключателей таких фирм как SIEMENS или ABB достаточно высоки. Так, в стандарте IEEE Std C37.013 на коммутационную способность ВВ это значение составляет 0.425 кВ/мкс, фирма ABB гарантирует 0.32 кВ/мкс. Начальные скорости восстановления электрической прочности межконтактных промежутков в ВДК Российских фирм-изготовителей согласно экспериментальным результатам в полевых условиях по отключению заторможенных двигателей, проводимых в разное время на различных объектах каф. ТиЭВН НГТУ, существенно меньше – 40-60 кВ/мс. Если ориентироваться на скорости восстановления электрической прочности, гарантируемые стандартом IEEE Std C37.013 и фирмой ABB, то отключение заторможенных ЭД не должно сопровождаться повторными зажиганиями дуги и, следовательно, никаких защитных мер для обеспечения надежной эксплуатации как главной, так и витковой изоляции ЭД, при этой коммутации не понадобится. В случае же скорости порядка 40-60 кВ/мкс будут наблюдаться повторные зажигания дуги в ВДК, которые даже при условии оснащения ЭД ОПН могут привести к нарушению электрической прочности витковой изоляции ЭД. Отключение заторможенного ЭД, сопровождающееся повторными зажиганиями в ВДК ВВ, проиллюстрировано на рис.4.



а)



б)

Рис.4. Процессы при отключении ЭД вакуумным выключателем; а – оциллограмма в реальной сети 10 кВ, б – компьютерная оциллограмма

На рис.5 приведена компьютерная осциллограмма напряжения на первых витках ЭД, отключение которого сопровождается повторными зажиганиями дуги в ВДК.

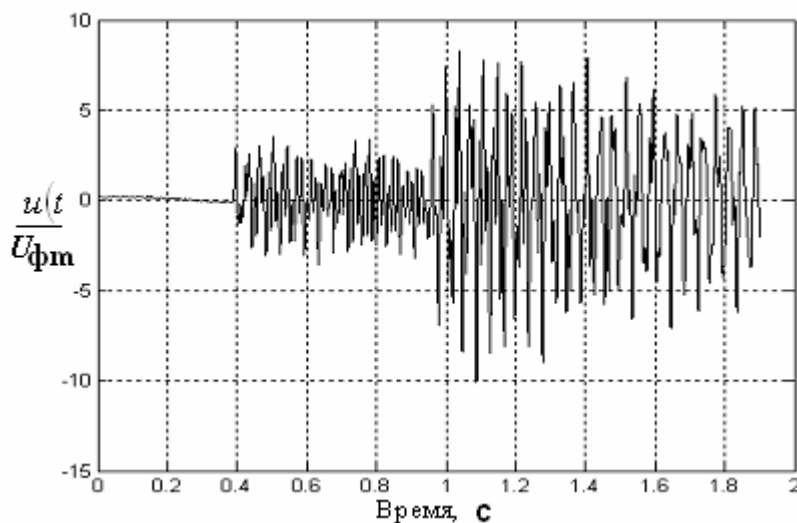


Рис.5. Напряжение на первых витках ЭД при его отключении вакуумным выключателем, сопровождающемся повторными зажиганиями дуги в ВДК

Исследования, проведенные И.Л.Дегтяревым, показали, что наиболее неблагоприятными с точки зрения возникающих при эскалации перенапряжений являются присоединения с ЭД мощностью 500 ÷ 2000 кВт, коммутируемые короткими кабелями.

Уменьшения скорости восстановления напряжения на контактах ВВ при отключении заторможенных двигателей можно добиться путем увеличения входной емкости ЭД с помощью подключения на его зажимы RC-цепочки, безындуктивная емкость которой приводит к снижению частоты собственных колебаний, и, следовательно, к снижению скорости нарастания напряжения на контактах ВДК.

Наиболее тяжелые условия с точки зрения коммутационной способности генераторных выключателей возникают при отключении первого полюса выключателя в случае трехфазного к.з. между генератором и выключателем (точка К3 на рис.6).

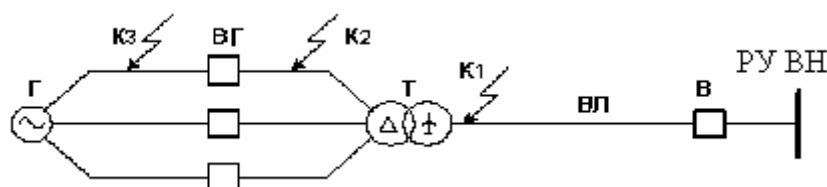


Рис.6. Принципиальная схема блока

При к.з. в точке К3 через выключатель протекает наибольший ток, определяемый мощностью других блоков станции и системы, примыкающей к РУ ВН, процессы же характеризуются большой частотой, определяемой, в основном, схемой замещения силового трансформатора блока, обладающего относительно небольшой входной емкостью. В схемах некоторых блоков начальная скорость восстановления напряжения может превысить величину, гарантированную стандартом IEEE Std C37.013- 425 кВ/мс. Так, на рис. 7 приведен процесс восстановления напряжения на контактах первого полюса генераторного выключателя на одном из укрупненных блоков, на который нанесена требуемая характеристика восстановления электрической прочности

межконтактного промежутка ВДК Из рисунка видно, что отсутствие повторных зажиганий будет наблюдаться при скорости восстановления электрической прочности в ВДК не менее 5 кВ/мкс.

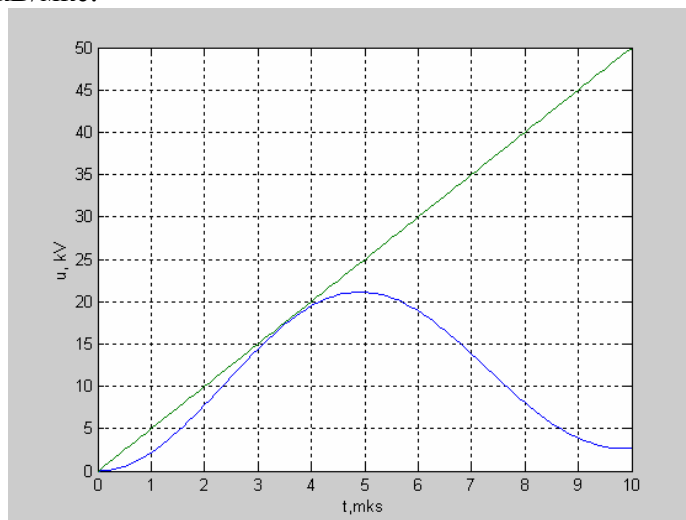


Рис.7. Процессы при отключении первого полюса выключателя при трехфазном к.з. в точке КЗ в сети генераторного напряжения укрупненного блока одной из ГЭС.

Изложенное позволяет заключить, что **основной характеристикой ВДК, определяющей наличие или отсутствие повторных зажиганий дуги, а, следовательно, и надежность коммутации, является начальная скорость восстановления электрической прочности между контактами ВДК после первого погасания дуги при отключении тока промышленной частоты**

Таким образом, в комплекс мер защиты от внутренних перенапряжений сетей 6-35 кВ входят:

- Резисторы в нейтрали сети или в достаточно редких случаях параллельное соединение ДГР и резистора (в зависимости от величины тока ОЗЗ);
- ОПН, требуемые параметры которых зависят от электрической прочности изоляции наиболее «слабого» в этом отношении элемента оборудования, от способа организации релейной защиты при ОЗЗ, а также от режима заземления нейтрали сети;
- *RC*-цепочки (необходимость установки которых зависит от характеристик коммутирующей аппаратуры);
- Повышение надежности эксплуатации сети с изолированной нейтралью может быть достигнуто путем установки антирезонансных трансформаторов напряжения типа НАМИ;
- Применение выключателей (особенно в сетях, содержащих элементы электрооборудования с витковой изоляцией- генераторы, электрические двигатели, трансформаторы) , коммутирующих присоединения без повторных зажиганий дуги в дугогасительных камерах.

Защита от грозовых перенапряжений. Как правило, РУ электрических сетей 6-35 кВ питаются по ВЛ высокого напряжения (ВЛ ВН) 110-500 кВ, подверженных ударам молнии. В частности, сети генераторного напряжения связаны с РУ ВН с помощью силовых трансформаторов. Поэтому удар молнии в воздушные переемы между РУ и трансформатором приводит к возникновению в сети генераторного напряжения опасных грозовых перенапряжений. Повышение надежности электрического питания

энергообъектов может быть обеспечено с помощью установки ОПН на опорах ВЛ 35-500 кВ. Такая мера защиты особенно актуальна в случае двухцепных электропередач. При ударе молнии в провод одной из цепей двухцепной ВЛ на проводах второй цепи могут возникнуть высокие кратности импульсных перенапряжений, что приводит к отключению обеих цепей и нарушению электроснабжения питаемых ими потребителей. На рис.8 приведен эскиз установки ОПН на опоре.

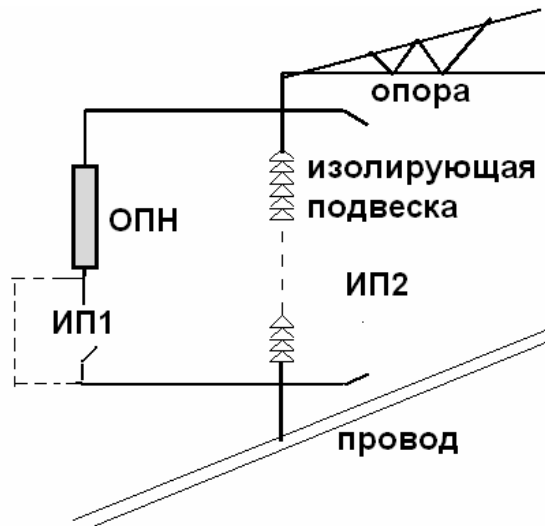


Рис.8. Эскиз установки ОПН на опоре

ОПН может быть присоединен к проводу либо наглухо, либо с помощью искрового промежутка. При глухом присоединении ОПН необходимо выбрать его энергоемкость таким образом, чтобы ОПН эксплуатировался без потери тепловой стойкости в течение всего срока службы его эксплуатации. При искровом присоединении ОПН необходимо обеспечить координацию пробивного напряжения ИП1 с электрической прочностью изолирующей подвески. Выбор того или иного способа присоединения ОПН к проводу определяется конкретными условиями. Требуемые токовые и энергетических характеристики подвесных ОПН, а также их расстановка по трассе и на проводах опор зависят от целого ряда факторов:

- От грозопоражаемости трассы ВЛ,
- От характеристик грунта, определяющих сопротивление заземления опор,
- От требуемой надежности эксплуатации ВЛ ВН и т.д.

При установке ОПН на опорах необходимо оценивать не только надежность эксплуатации ВЛ, но и надежность эксплуатации ОПН. Без сомнения оснащение ВЛ ВН, питающих РУ сетей 6-35 кВ промышленных объектов, подвесными ОПН повысит надежность эксплуатации этих объектов

Следует отметить, что на двухцепных опорах с вертикальной подвеской фаз средние фазы можно не оснащать ОПН, так как вероятность их поражения молнией мала из-за их экранирования верхними фазами. При анализе мест расстановки ОПН на опорах следует учитывать как прямые удары молнии в провода (прорыв молнии сквозь тросовую защиту), так и удар молнии в опору или в трос вблизи опоры, при которых также возникают перенапряжения на проводах ВЛ. В своей диссертации А.С.Зубков дает следующие рекомендации по установке на опорах защитных аппаратов :

- для защиты фаз ВЛ от перенапряжений, вызванных ударами молний в опору или в трос вблизи опоры, требуются ОПН с малой энергоемкостью (первой группы).

- для защиты фаз ВЛ от перенапряжений, вызванных ударами молний в фазные провода в пролете, достаточно установить ОПН с большой энергоемкостью (3-ей –4-ой групп) лишь на верхних фазах.

Заключение

- При проектировании строящихся или реконструируемых объектов необходимо проводить тщательное компьютерное моделирование всех аномальных режимов и процессов с целью выбора как защитной, так и коммутационной аппаратуры. В ряде случаев может возникнуть необходимость выдвинуть новые требования к этим аппаратам, которые могут быть выполнены их производителями
- В настоящее время в электрических сетях активно внедряется современная коммутационная и защитная аппаратура. В качестве дугогасительных и изоляционных сред в электрических аппаратах среднего напряжения вместо масла и воздуха внедряются вакуум и элегаз. Вместо разрядников с искровым присоединением внедряются безыскровые ОПН на основе высоколинейных оксидно-цинковых варисторов. Эти аппараты позволяют обеспечить существенно более простую их эксплуатацию. Высокий коммутационный ресурс вакуумных и элегазовых выключателей позволяет их эксплуатировать без ремонта в течение длительного времени. Однако, высокие коммутационные и защитные устройства этих аппаратов требуют более ответственного подхода к их выбору. Например, неотключаемый аппарат ОПН при неправильном выборе его характеристик может выйти из строя при превышении в течение некоторого времени допустимого напряжения в точке его подключения в нормальном эксплуатационном режиме. Неправильный выбор вакуумного выключателя может привести к перекрытию витковой изоляции вращающихся машин или трансформаторов.
- Поскольку каждый объект в какой-то мере уникален, то его проектирование, в том числе и выбор системы заземления нейтрали, коммутационных и защитных аппаратов и их характеристик должен производиться с учетом всех эксплуатационных ситуаций, в том числе и нестандартных. В настоящее время задача компьютерного исследования электромагнитных переходных процессов в каждом конкретном случае может быть решена достаточно легко, так как соответствующие исследовательские организации (в том числе ряд кафедр вузов) обладает комплексом программ для исследования электромагнитных переходных процессов в электрических сетях при достаточно достоверном моделировании коммутационной, измерительной и защитной аппаратуры, а также устройств релейной защиты и автоматики.