

ОБЕСПЕЧЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ КАБЕЛЬНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ СЕТЕЙ 6-10 кВ, ОСНАЩЕННЫХ СОВРЕМЕННЫМ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЕМ

Екимук С.С., Кадомская К.П. (Новосибирский государственный технический университет)

Постановка исследований

В настоящее время в распределительные сети 6, 10 кВ достаточно широко внедряется новое электрооборудование: кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ), т.е. кабели с пластмассовой изоляцией (КПИ), вакуумные выключатели, характеризующиеся высоким коммутационным ресурсом и требующие минимума обслуживания в течение срока их эксплуатации, безыскровые защитные аппараты (ОПН), а также антирезонансные трансформаторы напряжения электромагнитного типа (НАМИ). Организация кабельных сетей 6 и 10 кВ на основе КПИ требует более тщательного анализа аномальных режимов эксплуатации сети из-за свойств современной СПЭ изоляции, существенно отличающихся от свойств используемой ранее в кабелях этих сетей бумажной пропитанной изоляции (БМПИ). КПИ обладают повышенной на 15-20% пропускной способностью по отношению к КБМПИ и требуют существенно меньших эксплуатационных затрат на их монтаж и содержание [1]. Однако, если в кабелях на основе БМПИ технологические нарушения изоляции, возникающие, например, при однофазных дуговых замыканиях на землю (ОДЗ), могут самоустраняться через несколько периодов промышленной частоты без существенного изменения свойств бумажно-масляной изоляции при этом, то при электрическом пробое твердого диэлектрика в КПИ его электрическая прочность после исчезновения воздействия полностью не восстанавливается. При последующих нештатных воздействиях образовавшиеся в изоляции дендриты и триинги будут «прорастать» и, в конце концов, приведут к выходу из строя изоляции КПИ, возможно даже в нормальном режиме его эксплуатации. Особенно «чувствительна» изоляция из СПЭ к высокочастотным воздействиям, при которых импульс воздействующей силы оказывается значительным, что и приводит по существу к механическому нарушению изоляции из сшитого полиэтилена. Проведенный краткий анализ позволяет сделать заключение о необходимости такой организации эксплуатации кабельной распределительной сети на основе КПИ, при которой по возможности были бы исключены или сведены к минимуму ситуации, приводящие к возникновению высокочастотных перенапряжений.

Анализ штатных и нештатных ситуаций в кабельных распределительных сетях показывает, что высокочастотные воздействия на изоляцию кабелей могут наблюдаться, в основном при:

- **ОДЗ в случае повторных зажиганий дуги,**
- **При коммутациях кабелей вакуумными выключателями (ВВ), сопровождающихся повторными зажиганиями дуги в вакуумной дугогасительной камере (ВДК).**

Следовательно, надежная эксплуатация кабельной сети любого конструктивного исполнения (особенно сети на основе КПИ), возможна при отсутствии повторных зажиганий дуги при ОДЗ и в ВДК при коммутациях кабелей.

Далее рассматриваются меры, позволяющие выполнить намеченные задачи.

Процессы, возникающие при ОДЗ

Расчеты производились для достаточно разветвленной кабельной сети, питаемой от головной подстанции (ПС) 6 кВ. От этой подстанции отходят 15 КЛ различной протяженности (от 500 до 3700 м), питающих районные подстанции (РП), от которых, в свою очередь, отходят 15 кабелей длиной от 30 до 1750 м на переключательные подстанции (пункты) (ПП), питающие на напряжении 0.4 кВ потребителей. В настоящее

время сеть выполнена на основе кабелей типа АСБ трехфазного исполнения с секторными жилами сечений от 3×95 до 3×240 мм². Однако начата реконструкция этой сети с постепенной заменой кабелей с бумажно-пропитанной изоляцией типа АСБ на кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена.

В последнее время из-за изношенности сети, эксплуатируемой в режиме изолированной нейтрали, в ней участились технологические нарушения, в том числе связанные с однофазными замыканиями на землю (ОЗЗ) и однофазными дуговыми замыканиями (ОДЗ), приводящими как к тепловым перегрузкам кабелей, так и к перенапряжениям и, соответственно, к нарушению электрической прочности изоляции электрооборудования. При суммарной протяженности сети 6 кВ 34.5 км $C_{\Sigma\phi} = 13.24$ мкФ, $C_{\Sigma\phi\phi} = 4.16$ мкФ. Ток однофазного замыкания на землю в случае изолированной нейтрали (ИН) сети составил 45,4 А, что превышает допустимое значение для электрооборудования 6 кВ по его термической стойкости, равное 30 А. При изолированной нейтрали сети изоляция КЛ подвергается высокочастотным перенапряжениям при повторных зажиганиях дуги в процессе ОДЗ (рис.1).

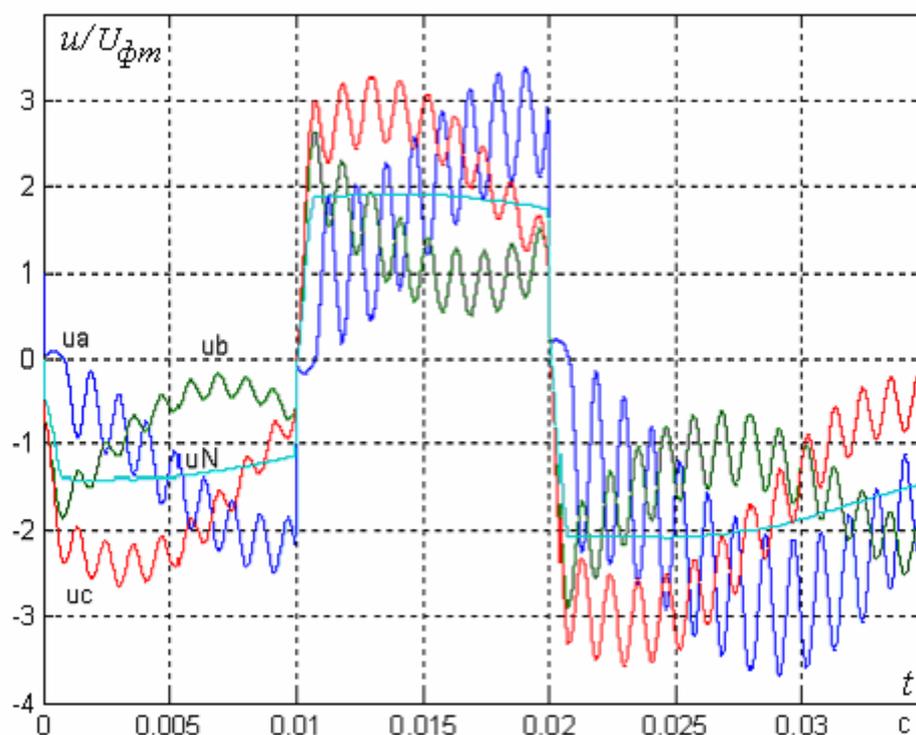


Рис.1. Компьютерные осциллограммы процессов при ОДЗ в сети 6 кВ (на шинах головной ПС 6 кВ установлен один ТН); нейтраль сети изолирована.

Математическая модель процессов, приведенных на рис.1, основывалась на гипотезе Петерсена условий горения дуги при учете двух её повторных зажиганий. Процессы на нейтрали, как видно из рис.1, носят нелинейный характер, обусловленный учетом процессов в магнитопроводе ТН, установленном на ПС 6 кВ. Из рисунка также следует, что при принятой гипотезе условий горения дуги перенапряжения на изоляции электрооборудования превышают трехкратный уровень при достаточно большом удельном весе в напряжении на фазах составляющих высоких частот. Следует отметить, что после погасания дуги опасных феррорезонансных явлений, обусловленных насыщением магнитопроводов ТН, не возникает. Это объясняется несоблюдением условий существования феррорезонанса в разветвленной кабельной сети, обладающей значительной емкостью.

Таким образом, анализ процессов, сопровождающих ОЗЗ и ОДЗ в рассматриваемой сети, эксплуатируемой с изолированной нейтралью, показывает, что электрооборудование этой сети подвергается как недопустимым тепловым воздействиям при ОЗЗ, так и

опасным перенапряжениям при ОДЗ. Исключить оба эти воздействия можно, изменив режим эксплуатации нейтрали сети. Ограничение емкостного тока замыкания на землю может быть достигнуто путем его компенсации с помощью установки в нейтраль сети дугогасящего реактора (ДГР). Поскольку конфигурация сети в процессе эксплуатации может меняться, то целесообразно устанавливать управляемые ДГР (УДГР) [2]. Ограничение перенапряжений при ОДЗ, в том числе и исключение эскалации перенапряжений может быть достигнуто путем оснащения нейтрали сети резистором. Последняя мера позволяет также осуществить чувствительную и селективную токовую защиту нулевой последовательности (ТЗНП) сети, позволяющую идентифицировать поврежденные фидер или другое электрооборудование.

Таким образом, повышение надежности эксплуатации электрооборудования разветвленной кабельной сети может быть достигнуто с помощью так называемого комбинированного заземления нейтрали – через параллельное соединение управляемого ДГР и резистора. Выбор индуктивности ДГР и сопротивления резистора должен производиться индивидуально для каждой сети. Можно наметить два альтернативных подхода к выбору параметров ДГР и резистора:

- Осуществлять неполную компенсацию емкостного тока ОЗЗ с помощью ДГР, резистор же выбирать, исходя из разряда некомпенсированной емкости сети за время порядка половины периода промышленной частоты;
- Выбирать величины индуктивности ДГР и сопротивления резистора по методике, принятой для выбора этих величин при заземлении нейтрали сети лишь через ДГР или лишь через резистор. Иными словами индуктивность ДГР выбирать, исходя из полной компенсации емкостного тока при ОЗЗ в сети, а сопротивление резистора – исходя из разряда емкости сети через резистор в течение примерно половины периода промышленной частоты.

Стационарный ток при однофазном замыкании на землю при этих подходах к выбору параметров элементов комбинированного заземления нейтрали определится как:

$$I_{O33} = \sqrt{((1 - k_L)I_{C_{\Sigma 3\phi}})^2 + I_{R_N}^2}, \quad (1)$$

где k_L – степень компенсации емкостного тока сети (трех фаз) индуктивным сопротивлением ДГР,

$$R_N = \frac{0.01}{3k_L C_{\Sigma 3\phi}}. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что при неполной компенсации емкости сети ($k_L < 1$) требуемое сопротивление в нейтрали сети увеличивается, а, следовательно, уменьшается активная составляющая тока однофазного замыкания на землю.

На рис.2,б приведены компьютерные осциллограммы процессов при ОДЗ в сети с теми же параметрами, что и на рис.1, но при комбинированном сопротивлении заземления нейтрали при $k_L = 1$ ($L_{ДГР} = 255$ мГн, $R_N = 130$ Ом). Сравнение осциллограмм рис.2 и рис.1 показывает, что при первом повторном зажигании дуги перенапряжения при комбинированном заземлении нейтрали снизились с $3.2 U_{\phi m}$ до уровня порядка $2 U_{\phi m}$, а при резистивном заземлении – до $2,4 U_{\phi m}$,

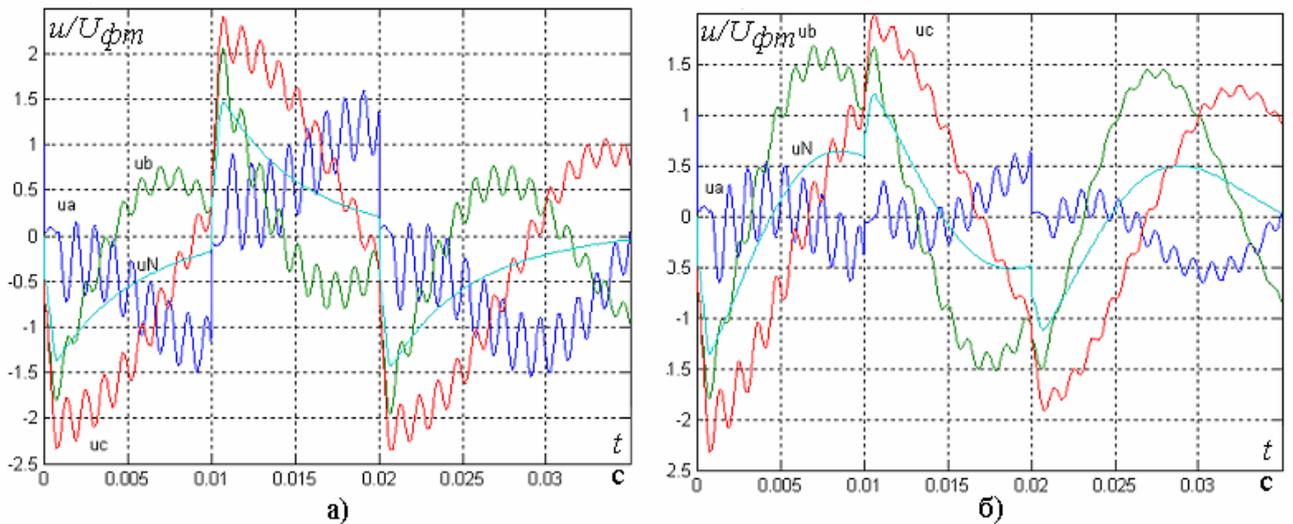


Рис.2. Компьютерные осциллограммы процессов при ОДЗ в сети с резистивным заземлением нейтрали (а) и с комбинированно заземленной нейтралью (б)

Токовая защита нулевой последовательности при комбинированном заземлении нейтрали

При изолированной нейтрали сети в стационарном режиме ОЗЗ по каждому фидеру течет ток нулевой последовательности, составляющий долю от полного тока ОЗЗ, пропорциональную емкости этого фидера. Поэтому организация селективной токовой защиты в такой сети невозможна. Факт ОЗЗ регистрируется на шинах ПС с помощью ТН, в рассечку обмотки которого, соединенной в треугольник, включено соответствующее реле. Поиск поврежденного фидера осуществляется при этом путем последовательного отключения и включения всех фидеров, питаемых от СШ. Во время этих действий могут возникнуть коммутационные перенапряжения, усугубляющие технологическое нарушение. Оснащение нейтрали сети резистором приводит к тому, что активная составляющая тока ОЗЗ, определяемая этим резистором, течет лишь по поврежденному фидеру. Условная простейшая схема, поясняющая распределение токов нулевой последовательности в сети при ОЗЗ, приведена на рис.3. На этом рисунке выделен поврежденный фидер.

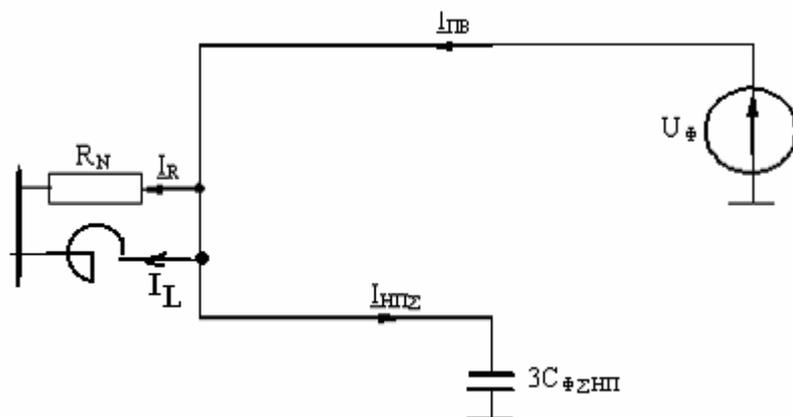


Рис.3. Упрощенная схема, поясняющая распределение токов нулевой последовательности при ОЗЗ

В рассматриваемой схеме при $k_L=1$ по поврежденному фидеру течет лишь активный ток, равный предельно допустимому току -30 А. По самому протяженному фидеру из остальных 14, длина которого примерно составляет 0.1 от протяженности всей сети 6 кВ, течет ток порядка 4.5 А. Следовательно, если с необходимым коэффициентом запаса по

чувствительности уставки ТРНП на фидерах сети будут порядка $30/1.25=24$ А, то защита с большим запасом будет селективной (при уставках реле на фидерах порядка 24 А ток в поврежденном фидере составляет величину порядка 30 А, а в самом протяженном неповрежденном фидере – порядка 4-5 А).

Требования к характеристикам вакуумных выключателей (ВВ)

Наибольшие частоты собственных колебаний на контактах (ВВ) при его отключении возникают при коммутациях наименее протяженных кабелей. Поэтому в качестве коммутируемого в рассматриваемой сети был выбран наименее протяженный кабель длиной 500 м. Основными характеристиками любого выключателя, в том числе и вакуумного, являются его **отключающая и коммутационная способности**. Коммутационная способность характеризуется, в основном, начальной скоростью восстановления электрической прочности между контактами выключателя при его отключении. В случае, если переходное восстанавливающееся напряжение (ПВН) на расходящихся контактах превышает восстанавливаемую электрическую прочность, между ними происходит повторное зажигание дуги в вакуумной дугогасительной камере (ДГК), характеризующееся высокочастотным процессом, воздействующим на изоляцию коммутируемого электрооборудования. В рассматриваемой сети 6 кВ этим воздействиям подвергается как изоляция кабелей, так и изоляция понизительных силовых трансформаторов, установленных на ПП. Следовательно, необходимо в сети устанавливать такие ВВ, которые коммутировали бы фидеры без повторных зажиганий дуги в ВДК. Поскольку на высокочастотные процессы, возникающие при коммутациях фидеров, практически не влияет способ соединения нейтрали сети с землей, определяющей коммутацией является отключение первого по очереди полюса выключателя, при которой наблюдается наибольшее напряжение на нейтрали сети. Характеристики ВВ, а также математические модели сети при оценке требований к коммутационной способности ВВ, включающие в себя и модель восстановления электрической прочности между расходящимися контактами в ВДК, приведены, в частности, в [3-5]. Восстановление электрической прочности между расходящимися контактами в ВДК в начальной стадии процесса описывалось выражением:

$$u_{эл.пр}(t) = k(t + t_0), \quad (3)$$

где t_0 – время между началом расхождения контактов и моментом прохождения тока промышленной частоты в выключателе через нулевое значение.

На рис.4 приведена компьютерная осциллограмма процессов, возникающих при отключении ВВ кабеля длиной 500 м в наиболее неблагоприятном случае при $t_0=0$. На рисунке нанесены также предельные кривые восстановления электрической прочности между контактами выключателя, при которых не будет наблюдаться повторных пробоев в ВДК. Эти кривые отвечают начальной скорости восстановления электрической прочности между расходящимися контактами выключателя $k \geq 40$ кВ/мс.

Такая скорость в настоящее время с запасом не превышает достигнутую начальную скорость восстановления электрической прочности между контактами в ВДК как зарубежных, так и отечественных производителей ВВ 6 и 10 кВ.

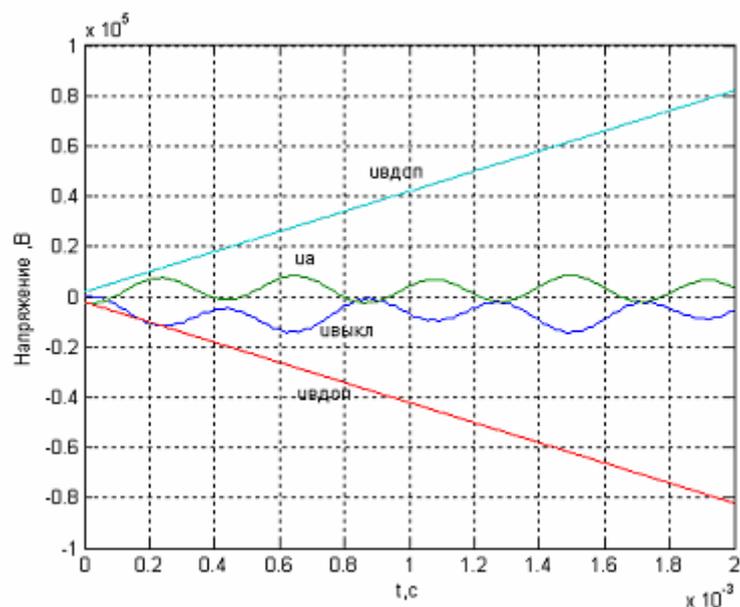


Рис.4. Компьютерные осциллограммы процессов при отключении ВВ кабеля длиной 500 м

Выводы

1. Для обеспечения надежной эксплуатации достаточно протяженной кабельной распределительной сети рекомендуется применять **комбинированное заземление нейтрали сети**, состоящее из параллельного соединения **резистора** и управляемого ДГР. Применение ДГР позволяет уменьшить стационарный ток однофазного замыкания на землю, тем самым обеспечив тепловую стойкость электрооборудования сети. Установка резистора в нейтрали сети позволяет уменьшить уровни перенапряжений, возникающих при ОДЗ и в большинстве случаев добиться отсутствия повторных зажиганий дуги, характеризующихся высокими частотами, а также обеспечить селективную и чувствительную токовую защиту нулевой последовательности, позволяющую надежно идентифицировать поврежденный фидер.

2. Выбор величины сопротивления резистора и индуктивности ДГР следует проводить индивидуально для конкретной сети с учетом её конструктивных параметров (типа и протяженности кабелей, а также схем питания потребителей и их резервирования).

3. В кабельных сетях может понадобиться установка антирезонансных ТН типа НАМИ лишь в случае небольшой или средней протяженности сети и установки нескольких ТН. В протяженных кабельных сетях условия феррорезонанса, обусловленного насыщением магнитопроводов ТН типов ЗНОМ, ЗНОЛ, из-за большой емкости сети, как правило, не выполняются.

4. Характерная протяженность отдельных фидеров в распределительных кабельных сетях позволяет устанавливать на них вакуумные выключатели с достигнутыми в настоящее время характеристиками начальной скорости восстановления электрической прочности между расходящимися контактами в ВДК при отключении ВВ.

5. Поскольку современные кабели напряжением 6 и 10 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена весьма неустойчивы к воздействиям высокочастотных перенапряжений, то в сетях на их основе должны быть по-возможности исключены ситуации, приводящие к высокочастотным воздействиям. Рассмотренные выше меры следует рекомендовать для кабельных сетей любого конструктивного исполнения. Однако, они совершенно необходимы для кабельных сетей с пластмассовой изоляцией, так как в сущности эти меры направлены на исключение по-возможности возникновения высокочастотных процессов значительной амплитуды как при ОДЗ, так и при коммутациях ВВ.

Литература

1. *Лавров Ю.А.* О повышении эксплуатационной надежности кабелей с пластмассовой изоляцией в городских распределительных сетях. Труды четвертой Всероссийской научно-технической конференции «Ограничение перенапряжений. Режимы заземления нейтрали. Электрооборудование сетей 6-35 кВ».- Новосибирск, 26-28 сентября 2006 г.- С. 75-83.

2. *Базылев Б.И., Брянцев А.М., Долгополов А.И. и др.* Дугогасящие реакторы с автоматической компенсацией емкостного тока замыкания на землю.-СПб.: ПЭИПК МТ и Э РФ.- 1999.-184 с.

3. *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.-368 с.: (Серия «Учебники НГТУ»)

4. *Таврида Электрик.* Вакуумная коммутационная техника нового поколения.- М.:Россия.-1999.-37 с..

5. *Greenwood A., Glinkowski M.* Voltage Escalation in Vacuum Switching Operation// IEEE Trans.on Power Delivery.-vol.3, No.4, October 1988.