

*Шарафутдинов Э.Р.,
студент магистратуры 2 курс,
факультет «Электроэнергетические системы и сети»
Институт электроэнергетики и электроники
Россия, г. Казань*

**ИССЛЕДОВАНИЯ ЦЕЛОСТНОСТИ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ ОПОР
ПРИ ОДНОФАЗНЫХ ЗАМЫКАНИЯХ НА ЗЕМЛЮ
В ВОЗДУШНЫХ ЛИНИЯХ 10 КВ**

***Аннотация:** Статья посвящена исследованию влияния однофазного замыкания на землю на железобетонные опоры в сетях напряжения 6-10 кВ.*

***Ключевые слова:** опора, замыкание, однофазное замыкание, воздушные линии.*

***Annotation:** The article is devoted to the investigation of the effect of a single-phase earth fault on reinforced concrete supports in 6-10 kV voltage networks.*

***Key words:** support, closure, single-phase closure, air lines.*

При ОЗЗ возможны повреждения, которые с точки зрения защиты можно разделить на несколько основных категорий:

- кратковременные пробои;
- «металлические», без дуговые ОЗЗ;
- ОЗЗ через большие переходные сопротивления;
- дуговые ОЗЗ;
- обрывы ВЛ, не сопровождающиеся длительными ОЗЗ.

Кратковременные пробои. Большинству «устойчивых» ОЗЗ предшествуют кратковременные неустойчивые пробои изоляции длительностью от 1 до 10 мс, сопровождающиеся значительными по продолжительности без токовыми паузами (от 1 до 17 минут). Время от

первого кратковременного пробоя до возникновения устойчивого ОЗЗ составляет от 1 минуты до 10 суток и более.

Бездуговое ОЗЗ. Такое замыкание появляется при возникновении надежной гальванической связи поврежденной фазы с землей (например, с заземленным корпусом электроустановки). При этом напряжения и токи нулевой последовательности можно считать синусоидальными и максимальными по величине. С точки зрения защиты бездуговое ОЗЗ – самый простой режим функционирования.

ОЗЗ через большие переходные сопротивления. Связь фазы с землей через неметаллические предметы (например, через деревянные части конструкции, при падении провода на сухой грунт и т. д.) иногда приводит к ОЗЗ с весьма большим переходным сопротивлением. Так, в эксперименте, при падении провода ЛЭП 35 кВ на песок отмечалось переходное сопротивление, которое в течение нескольких секунд изменялось примерно от 7 до 5 кОм. В Польше нормируемая величина такого сопротивления составляет 13,5 кОм, в Канаде – 7,5 кОм. Такие большие величины переходных сопротивлений могут существенно усложнить требования к защитах воздушных линий от ОЗЗ, поскольку с ростом переходного сопротивления уменьшаются как напряжения нулевой последовательности, так и токи нулевой последовательности.

Дуговое замыкание. Наблюдается при пробоях и перекрытиях фазной изоляции. При этом весьма часто наблюдается «прерывистая» форма кривой тока в дуге. Такая дуга называется перемежающейся. При этом ток в реле защиты при ОЗЗ может на какое-то время прерываться и содержит большое количество высокочастотных составляющих. В некоторых случаях в токе и напряжении нулевой последовательности могут возникать также субгармонические составляющие. Дуга, возникающая при ОЗЗ, может иногда прерываться на значительное, превышающее несколько периодов промышленной частоты, время. Исходя из анализа зависимости продолжительности бестоковой паузы, связанной с медленным зарядом

емкости поврежденной фазы после погасания дуги, от параметров сети, следует, что введение заземляющего резистора существенно уменьшает продолжительность такой паузы, что положительно сказывается на поведении защиты от замыканий на землю.

Значительное содержание высокочастотных составляющих в токах нулевой последовательности как поврежденной, так и неповрежденных ВЛ может привести к неселективной работе защиты. Токи нулевой последовательности, например, неповрежденных ВЛ могут в несколько раз превышать собственные емкостные токи при металлических ОЗЗ. Это объясняется тем, что высокочастотные составляющие в напряжении нулевой последовательности, которые, в частности, генерируются дугой, в значительной степени «усиливаются» в емкостных токах линий, так как емкостное сопротивление уменьшается пропорционально росту частоты. В результате токи в неповрежденных линиях могут существенно превысить емкостные токи, определенные при металлическом ОЗЗ, по которым ведется расчет уставок защиты.

Обрывы ВЛ, не сопровождающиеся длительными ОЗЗ. Иногда в сетях 6–35 кВ возникают повреждения, не приводящие к длительному протеканию тока нулевой последовательности, но как бы «смежные» с ОЗЗ, – например, обрыв шлейфа на ВЛ. Если шлейф висит, не прикасаясь к опоре, то ток нулевой последовательности отсутствует, и обычная защита от ОЗЗ не действует. При раскачивании ветром шлейф может кратковременно замыкаться на опору, что приведет к «клевкам» защиты, но ее срабатывание обычно не происходит из-за кратковременности такого замыкания.

Особенности ОЗЗ в зависимости от конструкции линии и режимы работы сети. Большое влияние на поведение защиты от ОЗЗ оказывает также схема сети, режимы ее работы и конструктивное исполнение линий. Очевидно, что при ОЗЗ процессы по-разному протекают в сетях с воздушными или кабельными линиями.

ОЗЗ в кабелях с пластмассовой изоляцией при достаточно больших емкостных токах сети часто приводит к устойчивому горению дуги. При тех же условиях ОЗЗ в кабеле с бумажной изоляцией, пропитанной масляно-канифольной мастикой, обычно приводит к разложению масла и бурному выделению газов. Турбулентное движение газов в образовавшемся газовом пузыре приводит к погасанию дуги, последующее зажигание которой происходит лишь после «рассасывания» образовавшихся газов.

Соответственно, при разных значениях тока ОЗЗ и различных фазах развития процесса длительность горения дуги и продолжительность бестоковых пауз могут варьироваться. В связи с этим, например, переход в кабельных сетях от мгновенно действующих защит от ОЗЗ к защитам, имеющим выдержку времени, может привести к отказам в тех случаях, когда продолжительность горения дуги становится меньше выдержки времени защиты.

В случаях ОЗЗ на ВЛ при наличии существенных бестоковых пауз, характерных для перемежающейся дуги, защиты от ОЗЗ, имеющие стандартную схему обеспечения выдержки времени, могут отказать, поскольку во время бестоковой паузы они «сбрасывают» замер по времени, – реле (или блок) выдержки времени возвращаются в исходное состояние. Для бесперебойного функционирования защиты в рассматриваемом случае необходимо обеспечить «запоминание» на некоторое время факта запуска защиты. Если в течение установленного времени запоминания ток нулевой последовательности появится вновь, защита должна срабатывать.

В случаях ОЗЗ на двухцепных ВЛ между двумя цепями одной ВЛ, подключенными к разным секциям, существует связь через межцепные емкости. При ОЗЗ на одной из цепей напряжение нулевой последовательности возникает на обеих секциях сборных шин, и токи нулевой последовательности протекают через линии, присоединенные как к одной секции сборных шин подстанции, так и к другой. Если не учесть эту особенность при разработке и

проектировании защиты, то возможны неселективные отключения неповрежденных линий при ОЗЗ в сети.

В некоторых сетях 35 кВ воздушные линии для удобства эксплуатации выполнены без транспозиции фазных проводов. При этом возникает несимметрия фазных емкостей относительно земли, что приводит к смещению нейтрали сети, т. е. появлению напряжения и токов нулевой последовательности при отсутствии ОЗЗ. Установка в нейтрали заземляющего резистора уменьшает это напряжение, тем не менее, в защитах от ОЗЗ появляется дополнительный ток, который, следует учитывать при расчете уставок.

Если в сетях 6–10 кВ, как правило, удастся установить кабельные трансформаторы тока нулевой последовательности, имеющие малый небаланс в нормальном режиме, то в сети 35 кВ обычно для защиты от ОЗЗ приходится использовать фильтры из трех трансформаторов тока, небаланс которых может быть в некоторых случаях весьма велик. Если не учитывать его при расчете уставок, то возможны неселективные срабатывания.

Периодически в практике эксплуатации воздушных линий 6-10 кВ наблюдаются случаи разрушения железобетонных опор, через которые протекал ток однофазного замыкания на землю (ЗНЗ), не превышающий 10 А. Исследования влияния однофазного ЗНЗ на железобетонные опоры в сетях напряжения 6-10 кВ проводились и раньше, но целью данной статьи не являлась связь термодинамических параметров в комлевой части железобетонной опоры с электрическими параметрами на питающей подстанции.

Результаты расчетов критической продолжительности режима ЗНЗ, показывают, что и в относительно коротких электрических сетях 10 кВ может произойти термическое повреждение железобетонной опоры. Например, для сети протяженностью 114 км при напряжении на заземленной фазе 570 В необратимые процессы деструктивных преобразований железобетона опоры

наступят через $t_k = 21,3$ ч. Быстрее всего (около 1-1,5 ч) эти процессы будут протекать, когда напряжение на заземленной фазе будет в диапазоне от 5,2 до 5,7 кВ независимо от длины отходящих воздушных линий 10 кВ.

Резюмируя результаты экспериментальных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. При токах ЗНЗ менее 10 А возможны протекания необратимых процессов деструктивных преобразований железобетонных опор.
2. По напряжению поврежденной фазы при ЗНЗ можно судить о целостности подземной части железобетонной опоры.
3. Математический расчет критической продолжительности ЗНЗ, при котором наступают необратимые процессы деструктивных преобразований железобетонных опор, произведен правильно. Расхождения вычисленного результата с опытным обусловлено следующими причинами:

- температура в опыте 6 измерялась не на теле опоры, а на расстоянии 5...7 см от тела опоры, это обусловлено техническими проблемами при погружении штыря с датчиками температуры. Поэтому существовала погрешность, связанная с отставанием нагрева измерителей температуры;
- в расчетном выражении (1) ввиду отсутствия исходных данных о температурах почвы за начальную температуру принималась температура окружающего воздуха, что не совсем точно, поскольку на глубине 50...60 см температура будет ниже.

Использованные источники:

1. Шерстобитов, Р.М. Показатели надежности и затраты на восстановления элементов сети ВЛ 10 кВ при однофазных замыканиях на землю / Р.М. Шерстобитов, М.А. Юндин // Механизация и электрификация сельского хозяйства. — 2011. — № 1. — С. 17–18.
2. Забелло, Е.П. Однофазные замыкания на землю в воздушных линиях 10 кВ на железобетонных опорах / Е.П. Забелло, М.П. Кондратьев // Электричество. — 1983. — № 1. — С. 51–54.

3. Шерстобитов, Р.М., Исследования целостности железобетонных опор при однофазных замыканиях на землю в воздушных линиях 10 кВ// Электротехнологии, электрификация и автоматизация сельского хозяйства. – 2012. –№1.– С.19-23.