

УДК 621.315.62.027.3.004.1

В. С.Собчук, к.т.н., проф.; Н. В.Собчук, к.т.н., ст. препод.;
Е. В.Слободянюк, ас.

НАРУШЕНИЕ КОНСТРУКТИВНОЙ КООРДИНАЦИИ ИЗОЛЯЦИИ И КУМУЛЯТИВНЫЙ ЭФФЕКТ ОТ СЕРИИ ГРОЗОВЫХ ИМПУЛЬСОВ

Рассмотрен и исследован процесс электрического пробоя эпоксидных вводов. Представлена математическая модель процесса их повреждения. Выявлено, что каналы электрического пробоя в эпоксидных вводах ВВБ 750 кВ являются результатом нарушения конструктивной координации изоляции и кумулятивного эффекта от серии грозовых импульсов.

Ключевые слова: эпоксидный ввод, электрический пробой, блуждающая волна, импульсное напряжение, продольная изоляция, грозозащитные разрядники.

Статистические материалы повреждаемости элементов конструкции выключателей 750 кВ, представленные службой ремонтов Юго-Западных электрических сетей (ЮЗЭС), свидетельствуют о том, что эпоксидные вводы дугогасительных камер повреждаются электрическим сквозным пробоем с образованием характерных дефектов, которые иллюстрируются фото. Чаще всего такие повреждения возникают в фазах А или С, связанных с крайними фазами проводов воздушной линии электропередач (ВЛЭП) 750 кВ.

Известно, что с большей вероятностью грозовые разряды поражают крайние фазы ВЛЭП при их горизонтальном размещении. Это происходит как в результате прорывов молнии через тросовую защиту, так и за счет электромагнитной связи троса и провода в динамическом режиме, когда на тросе возникает интенсивная импульсная корона.

Вышеизложенное позволяет утверждать, что инициаторами пробоев эпоксидных вводов в выключателях являются электромагнитные блуждающие волны от места прямого удара молнии в ВЛЭП в направлении подстанции. Во время продвижения блуждающих волн к подстанции (ПС) их амплитуда ограничивается импульсным уровнем изоляции линии, и поскольку они деформируются и затухают за счет влияния продольных и поперечных параметров ВЛЭП, поэтому не должны представлять опасность как для главной, так и для продольной изоляции обмоток трансформаторов и реакторов. В действительности наблюдается противоположное.

Известно [1], что по первичному каналу молнии в месте прямого удара молнии (ПУМ) может происходить без лидерной стадии до 10 – 15 и больше повторных главных разрядов, поэтому блуждающие волны набегают на ПС пачками импульсов.

Это создает условия для кумулятивного эффекта при формировании электрического пробоя изоляторов.

На выключатель с ВЛЭП от природного источника – молнии приходят опасные импульсные напряжения в виде аперiodических импульсов микросекундного диапазона.

По отношению к этим импульсам выключатель при определенных условиях – бестоковой паузы в цикле автоматического повторного включения (АПВ) является обострителем, преобразующим грозовые импульсы напряжения в опасные как для собственной изоляции, так и для продольной изоляции обмоток трансформаторов и шунтовых реакторов. К этому выводу приводит анализ его работы с помощью электрических схем замещения и математических моделей.

Принципиальная электрическая схема выключателя ВВБ-750 кВ представлена на рис. 1, на ней видно, что фаза выключателя имеет 16 единичных разрывов, каждый из которых зашунтирован двумя параллельно соединенными конденсаторами и имеет литые эпоксидные вводы.

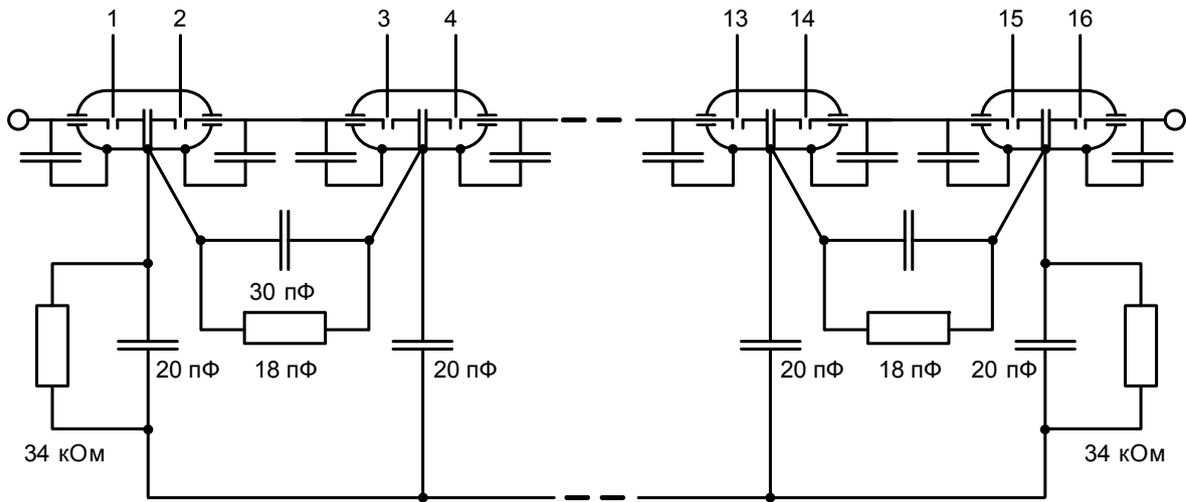


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема выключателя ВВБ-750 кВ

Схема замещения выключателя для набегающих импульсных напряжений грозового происхождения приведена на рис. 2.

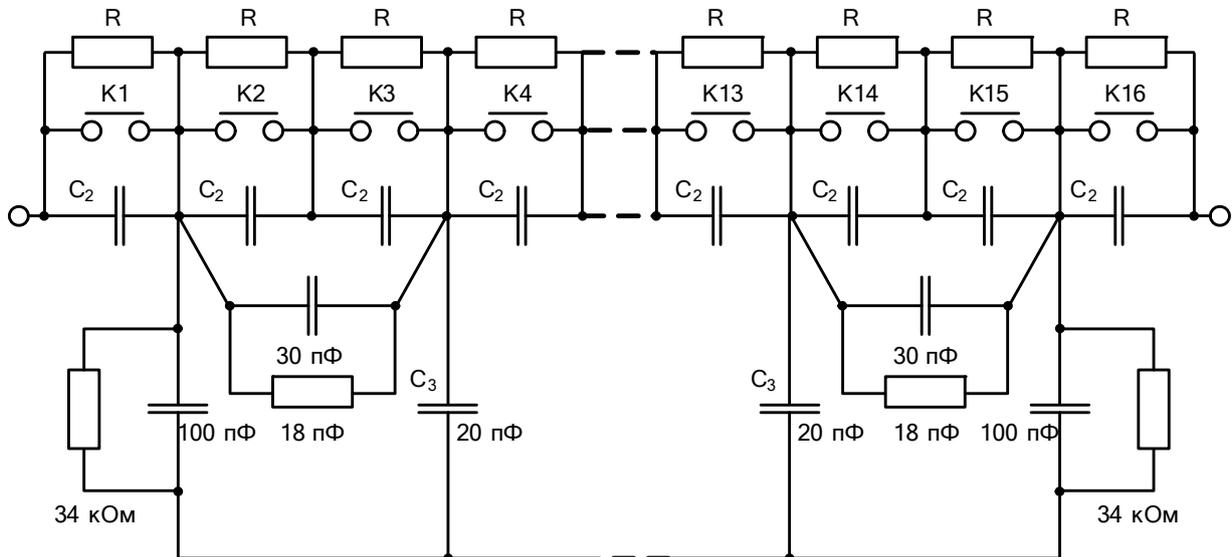


Рис. 2. Схема замещения выключателя для набегающих импульсных напряжений грозового происхождения:
 C_2 – емкости между электродами (продольные);
 C_3 – емкости электродов относительно бака (земли) – поперечные; R – сопротивление утечки изолирующей конструкции; ρ – волновое сопротивление линии.

Пробой промежутков имитируется замыканием ключей К. Сопротивления R обычно такие большие, что практически не влияют на импульсный процесс в схеме.

Пусть $2\rho \cdot C_e \ll t_{zan.min}$, где $t_{zan.min}$ – минимальное время запаздывания пробоя; C_e – эквивалентная емкость выключателя по отношению к шинному и линейному полюсам; ρ – волновое сопротивление линий Л1 и Л2. Длительность фронта стандартного импульса грозового происхождения обычно больше $t_{zan.min}$, поэтому анализ переходного процесса в схеме рис. 4 можно выполнять без учета влияния волнового сопротивления линий, считая, что после пробоя каждого ключа на оставшихся непробитыми успевает установиться напряжение в соответствии с соотношением продольных C_2 и поперечных C_3 удельных емкостей.

В данном случае расчетную схему замещения можно представить в виде многоячеечной схемы из “m” элементов (политрон). Импульсное напряжение по электродам выключателя

после пробоя k промежутков распределяется согласно (1):

$$U_{K+1} = 2U_0 \frac{ch(m-k)\gamma}{ch(m-j)\gamma}, \quad (1)$$

где $\gamma = \ln \left[1 + \frac{C_3}{2C_2} \left(1 + \sqrt{\frac{4C_2}{C_3} + 1} \right) \right]$; k – порядковый номер ключа.

В случае $C_3/C_2 < 2$ величину γ можно определить по более простой формуле:

$$\gamma = \ln \sqrt{\frac{C_3}{C_2}}$$

Мгновенную разность потенциалов можно определить на любом ключе K по формуле (1).

Например, для $j = 0$, то есть перед пробоем первого промежутка, на нем будет мгновенная разность потенциалов в виде:

$$\Delta U_1 = U_1 - U_2 = 2U_0 \left[1 - \frac{ch(m-1)\gamma}{ch(m\gamma)} \right]. \quad (2)$$

Если $j \gg 1$, а $m > 3$, то $\Delta U_1 = 2U[1 - \exp(-\gamma)]$.

Таким образом, при $\gamma = 1$ на первом промежутке перед пробоем будет $0,63 \cdot 2U_0$, то есть K_1 будет пробиваться с большой кратностью перенапряжения.

Перепад напряжения на k -том ключе после пробоя j промежутков будет иметь вид:

$$\Delta U_k = U_k - U_{k+1} = 4U_0 ch \frac{\gamma}{2} \frac{ch\left(m-k+\frac{1}{2}\right)\gamma}{ch(m-j)\gamma} \quad (3)$$

Для нашего объекта – воздушного выключателя ВВБ-750 кВ – имеем начальные условия: $m = 16$; $j = 3$; $m - j = 13$; $\gamma = 10$, поэтому напряжение на промежутке $k+1=4$ практически не зависит от γ и равно:

$$\Delta U_4 = 2U_0 [1 - \exp(-10)] \approx 2U_0 \quad (4)$$

где $U_0 \leq 1500$ кВ – напряжение срабатывания разрядника РВМК-750. Поэтому $\Delta U_4 \leq 3000$ кВ, а скорость нарастания напряжения на фронте возрастает до 10 МВ/мкс. При такой крутизне фронта импульсного напряжения создаются условия для нарушения конструктивной координации любого изолятора по пути следования импульса и, прежде всего, эпоксидного ввода самого выключателя, что приводит к сквозному электрическому пробоем по радиальному направлению.

В экспериментальных исследованиях [3] было установлено, что сквозные электрические пробои изоляторов импульсами напряжения с крутыми фронтами возникали после нескольких приложений. Подача на изолятор первого импульса напряжения с крутизной фронта больше 1 МВ/мкс приводит к искровому перекрытию по поверхности через 0,1 мкс. На осциллограмме в этот момент наблюдается срез напряжения. Одновременно в этот момент прикладывается напряжение и к изоляционному телу, но высокая напряженность электрического поля (НЭП) тут длится наносекунды. За это время может возникнуть только локальный частичный пробой вглубь твердой изоляции на глубину приблизительно $3 \cdot 10^{-5}$ м. Дальнейшее развитие разряда в глубину прекращается вследствие среза напряжения перекрытием и резким снижением НЭП в теле. Фактически толщина изоляционного тела в этом месте уменьшается на эту глубину. Однако появление микротрещины, заполненной воздухом, существенно искажает картину электрического поля, вследствие чего НЭП в конце трещины в десятки раз увеличивается от следующего импульса напряжения, который Наукові праці ВНТУ, 2008, № 1

по принципу эстафетной палочки продвигает канал дальше. Третий – четвертый импульсы, как правило, завершают сквозной электрической пробой. По мере продвижения каналов частичных пробоев в глубину изоляционного тела координирующий коэффициент от $1,6 \div 1,8$ уменьшается до $1,0$. Такой изолятор уже является дефектным, а эта многоступенчатая модель нарушения координации, которая учитывает кумулятивный эффект частичных последовательных пробоев, полностью соответствует экспериментальным данным [4].

Использованный в [4] осциллографический метод исследования процесса пробоев изоляторов в принципе не чувствительный к зарождению и развитию частичных пробоев, поскольку перекрытие нормального изолятора экранирует выявление этих процессов на осциллограмме.

Подача предпоследнего (относительно конечного эффекта) импульса завершает формирование канала сквозного пробоя до стадии равных вероятностей пробоя и перекрытия, поэтому последующий импульс воздействует на дефектный изолятор.

Импульсное напряжение с крутым фронтом приводит к чисто электрическому механизму пробоя изоляторов.

Основные геометрические размеры капилляров пробитых изоляторов – радиус и длина. Длина капилляра определяется типом изолятора и для эпоксидных вводов выключателей составляет $40 - 45$ мм.

Радиус капилляра не зависит от типа изолятора и изменяется в узком диапазоне величин $0,2 \div 0,3$ мм. Геометрические размеры кратеров откольных воронок не зависят от типа изолятора и определяются характеристиками диэлектрика. Размеры откольных воронок, которые возникают с обеих сторон канала пробоя, измерялись с помощью оптического прибора МПБ-2, с увеличением 24^* и ценой деления $0,05$ мм. Воронки имеют конусную форму с большим радиусом $1,5 \div 5$ мм, а меньшим, как у капилляра, то есть $0,2 \div 0,3$ мм.

На рис. 3 дано схематическое изображение интегральной картины дефектов в изоляторе после его импульсного пробоя. Участки эпоксидного компаунда, непосредственно примыкающие к каналу пробоя, разрушались до мелкодисперсной структуры, образуя зону раздавливания. Тут и в дальнейшем при описании последствий пробоя и разрушения изоляторов употребляются термины, используемые в теории разрушения твердых веществ с помощью взрывчатки. Это не случайно, потому что математические модели, описывающие разрушение твердых веществ взрывом взрывчатки, находящейся в шпуре, аналогичны моделям разрушения изоляторов после электрического пробоя импульсами.

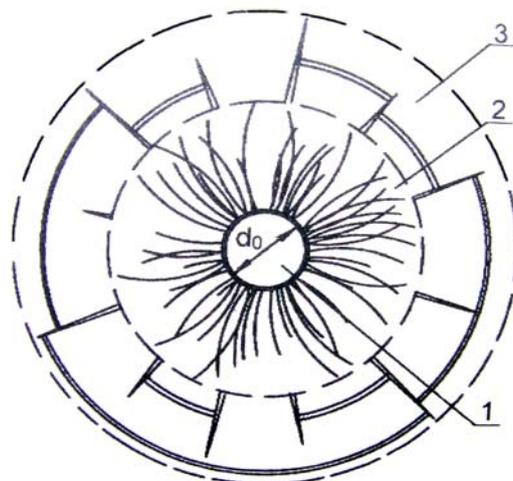


Рис. 3. Схематическое изображение интегральной картины дефектов в изоляторе после его импульсного пробоя:

1 – канал пробоя; 2 – зона раздавливания; 3 – зона радиальных и кольцевых трещин

От периферийных областей зоны раздавливания в направлении внешней поверхности изолятора образуется сеть радиальных и кольцевых (тангенциальных) трещин. Они образуют

в целом зону растрескивания. После первичного пробоя изолятора эти трещины не раскрыты, поэтому визуально наблюдаются как волосяные [4]. Входная и выходная откольные воронки появляются после того, как азимутальная ударная волна, дойдя до поверхности изолятора, отражается от нее (как границы раздела двух сред), вследствие чего возникают растягивающие механические напряжения, разрушающие устье канала электрического пробоя определенным образом.

Последующие экспериментальные исследования позволили выяснить, что разрядный градиент по капилляру не превышает 10 ± 1 кВ/см. Это дает возможность прогнозировать остаточный уровень изоляции дефектного изолятора. Так эпоксидный ввод выключателя имеет остаточный уровень $U_{проб.остат.} = 10 \cdot 4 = 40$ кВ.

Выводы

1. Каналы электрического пробоя в эпоксидных вводах ВВБ 750 кВ являются следствием нарушения конструктивной координации изоляции и кумулятивного эффекта от серии грозových импульсов, приходящих по воздушным линиям 750 кВ от места прямого удара молнии к узловой подстанции.

2. Относительно блуждающих волн грозового происхождения выключатели срабатывают как обострители, увеличивающие крутизну импульсных напряжений в несколько раз.

3. После выключателя обостренные импульсы набегает на обмотки автотрансформаторов и реакторов поперечной компенсации и образуют очень опасные градиенты на первых витках и катушках, что может привести к электрическому пробоею продольной изоляции.

4. Грозозащитные разрядники не влияют на крутизну заостренных импульсов, то есть не защищают продольную изоляцию обмоток.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чалмерс Дж. А. Атмосферное электричество –Л.: Гидрометеоздат, 1974. – 691с.
2. Месяц Г.А. Исследования по генерированию наносекундных импульсов большой мощности: Автореф. – Томск, 1966.
3. Собчук В.С. Экспериментальное исследование механизма разрушения линейных изоляторов при электрическом пробое // Электрические станции, – 1975. – №2. – с.71-72.
4. Собчук В.С. Импульсный метод профилактических испытаний штыревых изоляторов: Автореф. – Киев, 1983.
5. Собчук В.С., Пащенко В.Н., Собчук Н.В. Вимикач ВВБ-750 кВ як загострювач імпульсних напруг. – Вісник Національного університету “Львівська політехніка”. – 2000. – №400. – с.134–139.

Собчук Валерий Степанович — профессор кафедры электрических станций и систем;

Собчук Наталья Валериевна — ст. преподаватель кафедры электрических станций и систем;

Слободянюк Елена Валериевна — ассистент кафедры инженерной и компьютерной графики.
Винницкий национальный технический университет.