

Стекланный изолятор как индикатор внутреннего электрического состояния полимерного изолятора

Ким Ен Дар - д. т. н.; В.Л. Калмыков, В.А. Розов, О.А. Демидов - инженеры

Приведены результаты исследования электрических полей изолирующих подвесок на 330 кВ, составленных из полимерного изолятора типа ЛК с внутренним электрическим дефектом и тарельчатого изолятора типа ПС. Внутренний дефект в полимерном изоляторе моделировался заданием на части стеклопластикового стержня поверхностной проводимости различной величины и протяженности. Показана эффективность использования тарельчатых изоляторов в качестве детектора состояния внутренней электрической прочности полимерных изоляторов.

Мировой опыт применения линейных полимерных изоляторов с кремнийорганической защитной оболочкой в высоковольтных электрических сетях в настоящее время превышает более чем 20-30 лет [1-4]. Накопленные за этот период времени данные свидетельствуют о высоких эксплуатационных характеристиках изоляторов в районах подверженных сильным загрязнениям, что объясняется гидрофобными свойствами материалов защитной оболочки и эффектом переноса гидрофобности на загрязненный слой. Вместе с тем на сегодня остается актуальной проблема «старения» внутренней изоляции и сложность его обнаружения. К таким процессам относится хрупкое разрушение несущего элемента изолятора- стеклопластикового стержня, разъедание стеклопластикового стержня под действием частичных разрядов и последующий отрыв, развивающийся во времени пробой пограничной области стержень- защитная оболочка.

Как показано в работах [5, 6], хрупкое разрушение изоляторов удастся избежать применением заведомо химически устойчивых стеклопластиковых стержней и введением в практику производства специальных методов контроля. Что касается ухудшения изолирующих свойств изоляторов, то оно связано с явлениями старения пограничной области между защитной оболочкой и стеклопластиковым стержнем. В процессе длительной эксплуатации, как следствие теплового старения или по причине допущенного технологического нарушения при изготовлении, или вследствие грубого обращения при хранении, транспортировке и в процессе монтажа может произойти разгерметизация пограничной области изолятора. При этом создается условие проникновения или конденсации атмосферной влаги внутри изолятора, образуя очаги начала электрического разрушения изолятора. Такого рода внутренние частичные повреждения полимерных изоляторов обнаружить чрезвычайно сложно даже при тщательном осмотре с подъемом на

опору. По сообщениям электороэнергетического исследовательского института США [4], на сегодня еще находятся на стадии разработки проекты по созданию надежной и легко реализуемой методики контроля внутреннего электрического состояния полимерных изоляторов на расстоянии.

Проведенные нами ранее исследования электрических полей изоляторов для контактных сетей железных дорог показали [7], что снижение удельного сопротивления поверхности стеклопластикового стержня, приводит к деформированию исходного поля, создавая условие последующего развития поврежденной области. Для рассмотренных изоляторов было установлено, что значимое увеличение электрического поля обуславливают внутренние повреждения, характеризуемые поверхностной проводимостью стержня $\chi > 10^{-9} \text{См}$, а начиная с $\chi \approx 10^{-7} \text{См}$ при последующем ухудшении изоляции конфигурация поля меняется очень слабо. По мере прорастания поврежденного участка максимальная напряженность поля E_m увеличивается, однако она достигает критических для изоляции величин практически у противоположного электрода ($E_m \geq 30 - 50 \text{ кВ/см}$). Поэтому маловероятно, что изоляторы данного класса с частичными внутренними повреждениями могут быть выявлены оптическими методами вплоть до момента их полного пробоя.

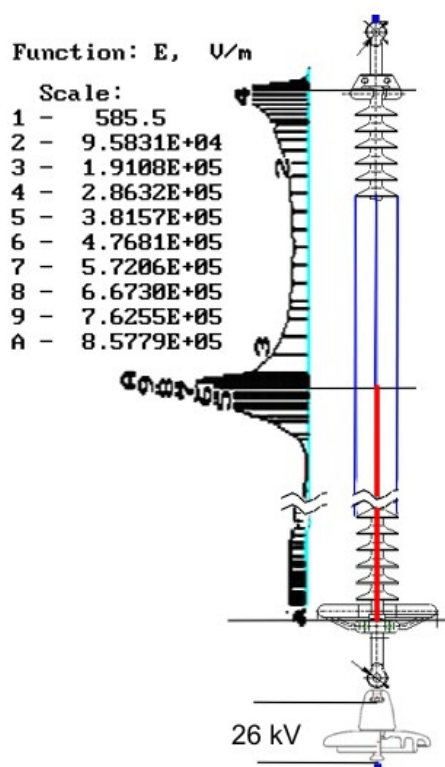


Рис. 1. Схема и пример расчета электрического поля изоляционной подвески

В рамках общего подхода численного интегрирования уравнения Лапласа методом конечных элементов, путем замены тонкослойных протяженных подобластей, что собой представляет поврежденная и увлажненная поверхность стержня, бестолщинными поверхностями, были выполнены расчеты электрических полей линейных изоляционных конструкции на класс напряжения 330 кВ. При этом тонкослойная область задавалась в виде бестолщинной поверхности с условной удельной поверхностной проводимостью и диэлектрической проницаемостью, как было сделано в [7].

Расчеты проводились в осесимметричной постановке задач. Расчетная схема изоляционной конструкции приведена на рис.1, где траверса и токопровод эквивалентировались соответствующими тороидами.

Объектами исследования были подвески из: полимерного изолятора типа ЛК70/330 со строительной длиной $L_{стр}=2880 \text{ мм}$; полимерного изолятора ЛК70/330 с последовательно

соединенным к нему со стороны траверсы стандартным изолятором из закаленного стекла ПС120Б (ПС120Б+ЛК70/330); полимерного изолятора ЛК70/330 с последовательно соединенным со стороны токопровода изолятором ПС120Б (ЛК70/330+ПС120Б).

Для определенности принимались следующие гипотезы потери электрической прочности полимерного изолятора вдоль границы стержень - оболочка:

1- разгерметизация со стороны оконцевателя, увлажнение, искажение электрического поля в сторону усиления, образование частичных разрядов и прораствание проводящих дорожек, чередуемое с увлажнением, пошаговое увеличение напряженности поля E_m на острие поврежденного участка, увеличение E_m до критических величин, пробой или перекрытие неповрежденного участка, что в конечном итоге, приведет к полной потере изоляционных свойств изолятора;

2- нарушение адгезионного слоя, например, как следствие теплового старения, конденсация влаги в пограничной области и снижение поверхностного сопротивления вдоль границы, в том числе, образование проводящих следов от частичных разрядов. Такой процесс может протекать более- менее равномерно по всей длине изолятора и со временем привести к электрическому отказу.

Первую гипотезу ухудшения изоляции условно можно отнести к динамически развивающемуся процессу, вторую- к статическому старению, и как будет показано ниже, для решаемой в работе задачи второй случай можно рассматривать как возможный установившийся этап первого случая.

Были рассмотрены два направления прораствания поврежденной области: со стороны высоковольтного потенциала и со стороны низковольтного потенциала. Результаты расчетов приведены на рис. 2-4.

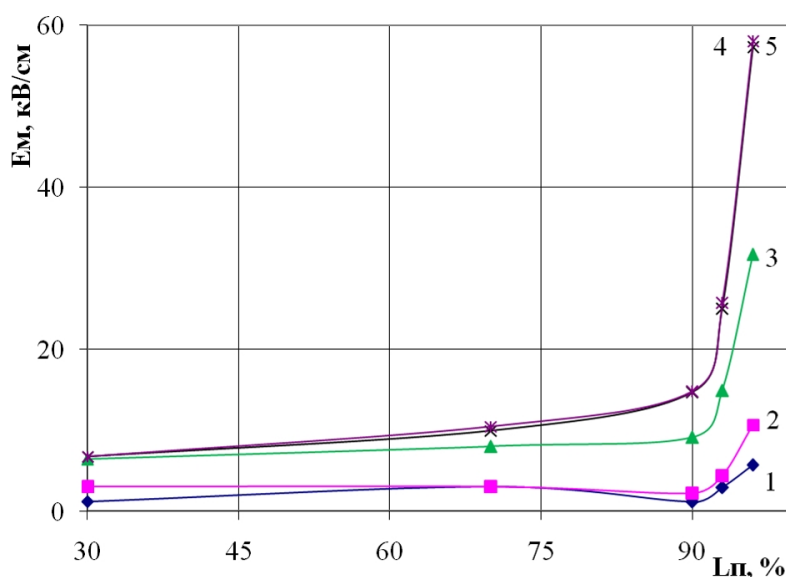


Рис. 2. Зависимость E_m в полимерном изоляторе от длины поврежденного участка при проводимости, $\lg \chi$ (См): 1- (-9); 2- (-8); 3- (-7); 4- (-6); 5- (-5).

Из рис. 2 хорошо видно, что эффект вытеснения электрического поля становится наглядным, если длина поврежденного участка приближается к некоторой критической величине $L_{пк}$, примерно равной 90 % всей изоляционной длины изолятора, $L_{из}$, а удельная проводимость вдоль границы стержень – оболочка превысит $10^{-9} - 10^{-8}$ См.

Как показывают расчеты, напряженность поля на внешней стороне защитной оболочки в 1,5-1,6 крат больше чем на ее внутренней стороне. Так как внутренняя прочность изоляции выше прочности воздуха, то при критической длине поврежденного участка в окрестности его острия может иметь место поверхностные разряды. Очевидно, интенсивность как внешних, так и внутренних частичных разрядов определяется возможными токами утечки по поврежденной поверхности изолятора, предельные значения которых можно оценивать простым соотношением:

$$I_{ут} = 2\pi\chi d (U_{нр}/L_{пк}) \quad (1)$$

где $U_{нр}$ - наибольшее рабочее напряжение сети;

d - диаметр стеклопластикового стержня.

Можно убедиться, что при величине $\chi \cong 10^{-6}$ См, являющейся по отношению роста максимальной напряженности поля E_m предельной (см. рис.2), токи разрядов не превышают единиц миллиампер, поэтому шунтирование неповрежденного отрезка изолятора еще не может одновременно привести к его полному пробою или перекрытию. Полная потеря электрической прочности полимерного изолятора, скорее всего, возможно при последующем увеличении проводимости до $\chi_1 > 10^{-4}$ См, при которой, согласно (1), токи в искровых каналах могут достигать сотни миллиампер.

Сравнивая результаты расчетов рассматриваемых изолирующих подвесок, можно видеть, что последовательно присоединенные тарельчатые изоляторы не вносят значительных изменений в картину напряженности электрического поля вдоль полимерного изолятора (рис. 3).

Вместе с тем по мере приближения поврежденного участка к противоположному электроду увеличивается разность потенциалов между электродами подвешенного изолятора. Величина перераспределяемого напряжения на тарельчатые изоляторы, как показано в таблице 1, зависит от места расположения этого изолятора и от принятого направления прорастания поврежденной области.

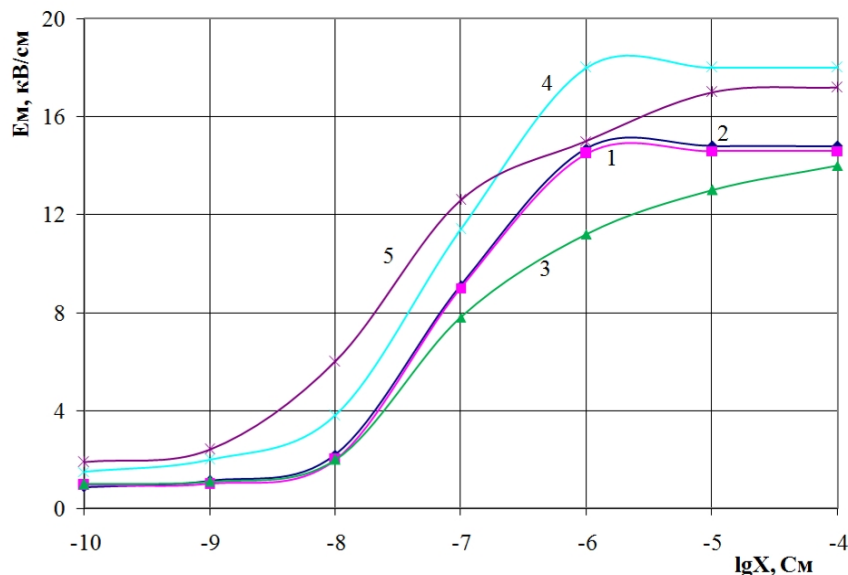


Рис. 3. Напряженность поля при $L_p=0,3L_{из}$ для подвесок:
 1,2-ЛК70/330, ПС120Б+ЛК70/330, повреждение от высокого потенциала (П);
 3, 4- ЛК70/330+ПС120Б, -от высокого, низкого П;
 5-ПС120Б+ЛК70/330,-от низкого П.

Таблица 1. Напряжение на тарельчатом изоляторе при различных длинах L_p , $\chi=10^{-6}См$

Схема подвески, от траверсы	Начало повреждения ЛК330	Падение напряжения на ПС 120Б, кВ			
		70%Лиз	90%Лиз	93%Лиз	96%Лиз
ПС120Б+ЛК330	От высоковольтного электрода	6,30	9,43	10,9	15,0
	От низковольтного электрода	21,0	27,0	28,0	37,8
ЛК330+ПС120Б	От высоковольтного электрода	19,0	41,0	43,0	47,0
	От низковольтного электрода	6,30	13,0	16,0	20,5

Из практики испытаний знаем, что коронирование изоляторов типа ПС120Б можно установить невооруженным глазом, если напряжение на изоляторе составляет выше 25-30 кВ. Из таблицы 1 видно, что не для всех рассмотренных примеров такие напряжения могут возникнуть на тарельчатом изоляторе, если на полимерном изоляторе сохраняются условно неповрежденные участки. Но, как отмечалось выше, при $L_p \geq 0,9L_{из}$ резко возрастает вероятность электрического шунтирования неповрежденного участка полимерного изолятора по внешней поверхности или по границе стержень-оболочка, вследствие этого при $L_p \rightarrow L_{из}$ напряжение на тарельчатом изоляторе увеличится значительно больше, чем приведено в таблице 1.

При $L_p \rightarrow L_{из}$, согласно рис. 4, напряжение на изоляторе может возрасти до уровня интенсивного коронирования, если $\chi > 10^{-7}См$. При последующем ухудшении изолирующих свойств полимерного изолятора напряжение на тарельчатом изоляторе может увеличиться

практически до разрядных напряжений, соответственно усилится яркость свечения изолятора. Можно предположить, что состояние интенсивных электрических разрядов по поверхности тарелки изолятора продолжится до тех пор, пока не наступит условие перехода от локального перекрытия к полному перекрытию или пробой изолирующей подвески.

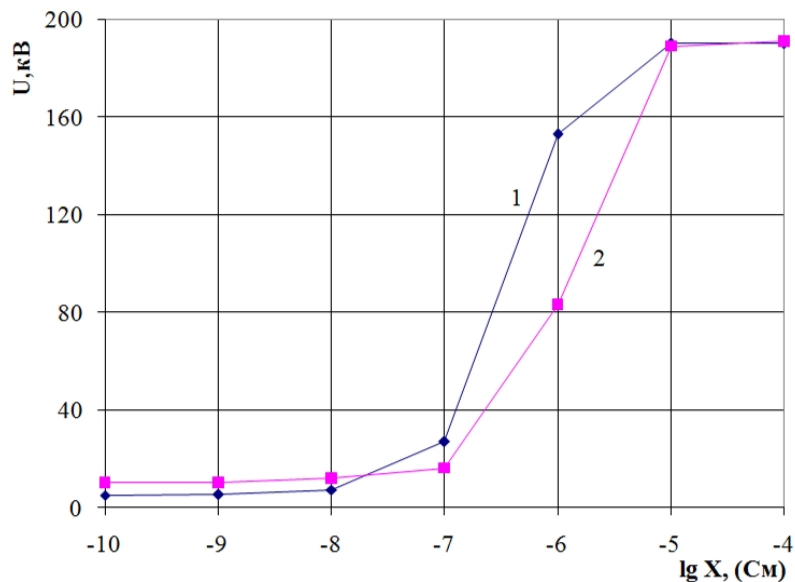


Рис. 4. Расчетное напряжение на тарельчатом изоляторе подвески:

1- ЛК70/330+ПС120Б; 2- ПС120Б+ЛК70/330



Рис. 5. Фотография коронирующего изолятора ПС120Б

Известно, что изоляционные детали из закаленного стекла могут разрушаться под термическим воздействием поверхностных разрядов, поэтому не исключено, что результатом увеличения напряжения на изоляторе окажется и разрушение тарелки изолятора [8]. Таким образом, интенсивные поверхностные разряды на тарельчатом изоляторе или отсутствие тарелки на изоляторе следует расценивать как внешнее отражение критического состояния внутренней изоляции полимерного изолятора. Такого рода внешние признаки могут быть обнаружены на большой дистанции при обходе или облете линии.

Эффект свечения тарельчатого изолятора при рабочем напряжении иллюстрирует фотография макета подвески ЛК70-330+ПС120Б (рис. 5). Приведенном здесь опыте внутреннее повреждение

полимерного изолятора имитировалось нанесением на поверхность стеклопластикового стержня по всей длине водного раствора соли KCl, измеренная удельная поверхностная проводимость колебалась в пределах 10^{-7} - 10^{-6} См. В ходе экспериментальных исследований с моделями полимерных изоляторов с внутренними повреждениями, при которых относительно просто было заметить на расстоянии около 30 - 40м коронирование тарельчатого изолятора, выраженных признаков разрядов на поверхности полимерного изолятора с такого же расстояния заметить не удавалось ни в случае с тарельчатым изолятором, ни без него.

На рис. 6 сопоставлены результаты испытаний изоляционных подвесок импульсными напряжениями. Эти данные показывают, что дополнение к полимерному изолятору тарельчатого изолятора со стороны высокого потенциала дает увеличение импульсной прочности на 120-150 кВ (на 8 - 10%). Поэтому при необходимости для такой комбинированной гирлянды длину полимерного изолятора можно уменьшить не меньше чем на строительную высоту тарельчатого изолятора. Кроме того, установленный у токопровода тарельчатый изолятор может служить в качестве демпфера опасных для полимерного изолятора динамических нагрузок на излом при пляске проводов.

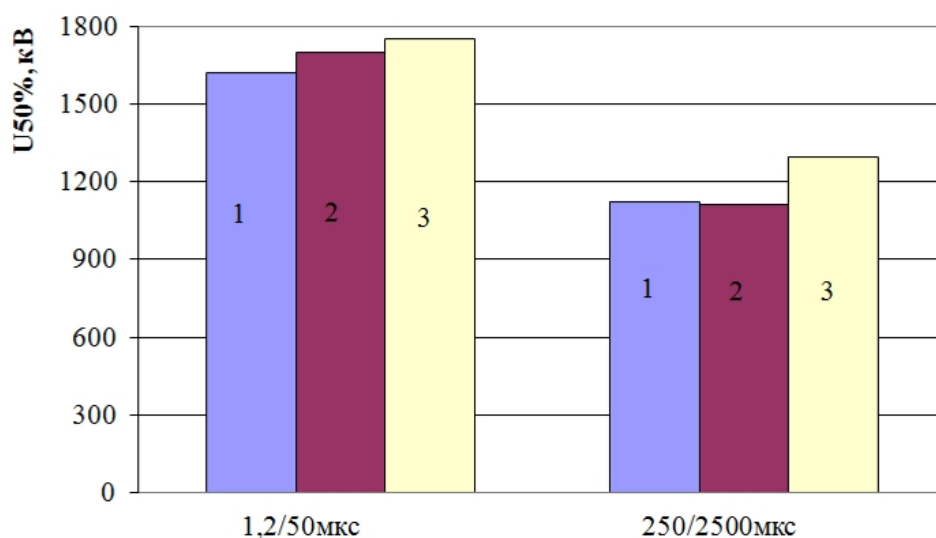


Рис. 6. Импульсные разрядные напряжения подвески:
1- ЛК70/330; 2- ПС120Б+ ЛК70/330; 3- ЛК70/330+ ПС120Б

Существует вероятность выхода со строя полимерного изолятора с ослабленной внутренней прочностью при перенапряжениях в сети. И в этом случае стеклянный изолятор может служить как дополнительный индикатор, поскольку на изоляторе остаются характерные следы воздействия силовых дуг в виде глубоких следов отслоения стекла или полного разрушения тарелки изолятора.

Выводы и рекомендации

Исходное электрическое поле в полимерном изоляторе подвергается значимой деформации, если удельная поверхностная проводимость на границе защитная оболочка - стеклопластиковый стержень превысит пороговую величину, 10^{-9} См.

Для полимерных изоляторов класса 330 кВ критическая длина поврежденного участка, по достижению которой возможен ускоренный процесс отказа изолятора по электрической прочности, составляет примерно 90% общей изоляционной длины.

Рекомендуется с целью упрощения индикации полимерных изоляторов с пониженной внутренней электрической прочностью применять последовательно присоединяемые к ним тарельчатые изоляторы из закаленного стекла с нормированной механической прочностью не ниже чем у полимерных изоляторов.

Предпочтительнее тарельчатый изолятор устанавливать со стороны токопровода, при этом ожидается более высокая чувствительность контроля полимерных изоляторов, эффект гашения динамических изгибающих нагрузок на полимерный изолятор и повышение импульсной прочности подвески.

В районах с сильными загрязнениями рекомендуется использовать тарельчатые изоляторы с гидрофобным покрытием из кремнийорганических эластомеров.

Литература

1. EPRI Survey of Application of Overhead Transmission Line Polymer Insulators in North America & Summary of EPRI Polymer Insulator Failure Database. World Conference & Exhibition on Insulations, Arresters & Bushings. Marbellu, Spain. 2003. P. 147-157.
2. Jim H. Duxbury. A Conservative Approach Toward Composite Insulators at BC Hydro: Current Factors and Future Considerations. World Insulator Congress & Exhibition. Shanghai, China. 2001. pp. 79-83
3. В. А. Кравченко, Е. А. Соломоник. Разработка, изготовление, опыт эксплуатации и производство полимерных изоляторов для ВЛ и подстанций напряжением 35-500 кВ в России. //Международная научно-техническая конференция. Санкт-Петербург. 2006
4. EPRI. Development of a Tool to Assess the Electrical Condition of Composite Insulators Prior to Live Work. www.epri.com, Product ID 1014572, 11/1/2006
5. J. Montesinos, R. S. Gorur, B. Mobasher, D. Kingsbury. Brittle Fracture in Nonceramic Insulators: Electrical Aspects of Microscopic Flaws in Glass Reinforced Plastic (GRP) Rods. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2002. P. 244-252.
6. J. Montesinos, R. S. Gorur, B. Mobasher, D. Kingsbury. Brittle Fracture in Nonceramic Insulators: Electrical Aspects of Microscopic Flaws in Glass Reinforced Plastic (GRP) Rods. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2002. P. 244-252.

7. Ким Ен Дар, Г. В. Сиченко, В. Л. Калмыков. Исследование электрического поля полимерных изоляторов с внутренним электрическим дефектом. // Залезнічний транспорт України – 2007 - №5 – С. 61 –63.
8. С. Ф. Покровский, Ким Ен Дар, С. В. Кукс. Исследование устойчивости загрязненных изоляторов к поверхностным разрядам // Информэнерго. Энергетика и электрификация. Сер. Строительство сельских Электросетей. - 1983. - Вып.10. - С. 11-13.