

ДИСТАНЦИОННАЯ ДИАГНОСТИКА ДЕФЕКТОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ ИЗОЛЯТОРАХ

А.В. Голенищев-Кутузов, Л.В. Ахметвалеева, Г.Р. Еникеева, Д.А. Иванов,
А.В. Семенников, Г.Д. Марданов

Казанский государственный энергетический университет,

г. Казань, Россия

alex.kutuzov@mail.ru

Резюме: На основе ранее разработанного на кафедре ПЭС КГЭУ двухканального дистанционного метода измерения, набора характеристик ЧР с одновременным использованием электромагнитных и акустических датчиков, позволяющего дистанционно измерять и оценивать техническое состояние высоковольтных изоляторов (ВИ). В статье изложены результаты разработок в развитие ранее предложенного метода, позволившего определять не только вид и место расположения дефекта, но и его размеры и степень влияния на рабочее состояние ВИ. Особое внимание обращено на эволюцию дефектов под действием перенапряжения и других электрофизических процессов в условиях эксплуатации. В частности, недавно была обнаружена генерация сверхбольших ЧР, способных создавать эрозию диэлектрических поверхностей дефектов, выполнено обследование технического состояния высоковольтных полимерных изоляторов. Все измерения выполнялись на экспериментальном стенде путем бесконтактного приема импульсных сигналов ЧР электромагнитным перестраиваемым приемником в диапазоне 50-600 МГц. Осуществлялась их индикация и компьютерная обработка с целью определения в каждом из дискретных интервалов фазового напряжения средних значений количества и интенсивности импульсов ЧР, которые либо не превышают допустимый порог для возникновения дефектов и их развития, по сравнению с эталонным ВИ, или превышают его. По результатам предварительных стендовых испытаний на модельных образцах и реальных ВИ в условиях эксплуатации, и полученного набора параметров ЧР, были установлены диагностические признаки, позволяющие определить вид, места расположения наиболее опасных дефектов и степень их влияния на работоспособность ВИ. При этом, наличие наиболее опасных дефектов определяется расширением фазовых интервалов излучения ЧР, резким увеличением ЧР в отрицательных полупериодах высокого напряжения по сравнению с положительными полупериодами, а также по значительному отличию ширины и формы одиночных импульсов ЧР.

Ключевые слова: дистанционная диагностика, высоковольтные изоляторы, дефекты, частичные разряды.

Благодарности: Научные исследования выполнены при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках соглашения 075-15-2020-172.

Для цитирования: Голенищев-Кутузов А.В., Ахметвалеева Л.В., Еникеева Г.Р., Иванов Д.А., Семенников А.В., Марданов Г.Д. Дистанционная диагностика дефектов в высоковольтных изоляторах // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2020. Т. 22. № 2. С. 117-127. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-1-117-127.

REMOTE TESTING FOR DEFECTS IN SERVICE HIGH-VOLTAGE INSALATORS

A.V. Golenishchev-Kutuzov, L.V. Akhmetvaleeva, G.R. Enikeeva, D.A. Ivanov,
A.V. Semennikov, G.D. Mardanov

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
e-mail: alex.kutuzov@mail.ru

Abstract: *On the basis of the two-channel remote measurement method previously developed at the Department of PES KGEU, a set of characteristics of the PD with the simultaneous use of electromagnetic and acoustic sensors, which allows you to remotely measure and evaluate the technical condition of high-voltage insulators (HVI). The article presents the results of developments in the development of the previously proposed method, which allowed to determine not only the type and location of the defect, but also its size and the degree of influence on the working condition of the VI. Particular attention is paid to the evolution of defects under the influence of overvoltage and other electrophysical processes in operating conditions. In particular, the generation of ultra-large PDs that can create erosion of the dielectric surfaces of defects was recently discovered, and the technical condition of high-voltage polymer insulators was examined. All measurements were performed on an experimental bench by non-contact receiving pulse signals of the PD by an electromagnetic tunable receiver in the range of 50-600 MHz. Their indication and computer processing were carried out in order to determine in each of the discrete intervals of the phase voltage the average values of the number and intensity of PD pulses, which either do not exceed the allowable threshold for the occurrence of defects and their development, in comparison with the reference HVI, or exceed it. Based on the results of preliminary bench tests on model specimens and real HVIs under operating conditions, and the obtained set of PD parameters, diagnostic signs were established that made it possible to determine the type, location of the most dangerous defects and the degree of their influence on the HVI working capacity. At the same time, the presence of the most dangerous defects is determined by the expansion of the phase intervals of PD radiation, a sharp increase in PD in negative half-periods of high voltage compared with positive half-periods, and also by a significant difference in the width and shape of single PD pulses.*

Keywords: *remote diagnostics, high-voltage insulators, defects, partial discharges.*

Acknowledgments: *Scientific research was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation under the agreement 075-15-2020-172.*

For citation: Golenishchev-Kutuzov AV, Akhmetvaleeva LV, Enikeeva GR, Ivanov DA, Semennikov A.V, Mardanov GD. Remote testing for defects in service high-voltage insalators // *Power engineering: research, equipment, technology*. 2020; 22(2):117-127. doi:10.30724/1998-9903-2020-22-2-117-127.

Введение

В связи с актуальностью проблемы бесконтактной диагностики высоковольтных изоляторов (ВИ) в процессе эксплуатации, возникла необходимость в разработке новых методов диагностики содержащихся в них дефектов, дополняющих уже существующие методы, рекомендованные ГОСТ Р 55191 и международным стандартом IEC 60060-1:2010. До настоящего времени, одним из наиболее эффективных является способ,

использующий частичные разряды (ЧР) для определения рабочего состояния ВИ. Основными проблемами при их использовании является неразработанность соответствующей аппаратуры и отсутствие нормированных параметров ЧР для реальных ВИ. На кафедре ПЭС КГЭУ в последние годы был разработан комплексный метод, с одновременным использованием электромагнитных и акустических датчиков, позволяющий дистанционно измерять набор характеристик ЧР и по ним судить о техническом состоянии ВИ [1]. В статье изложены результаты по развитию ранее предложенного метода, позволившего определять не только вид и место расположения дефекта, но и его размеры и степень влияния на рабочее состояние ВИ. Особое внимание обращено на развитие дефектов под действием перенапряжения и других электрофизических процессов в условиях эксплуатации. В частности, недавно была обнаружена генерация сверхбольших ЧР [2], способных создавать эрозию диэлектрических поверхностей дефектов, однако особенности возникновения сверхбольших ЧР на модельных образцах до сих пор не были вполне изучены, хотя, какого-либо обсуждения подобных индуцированных эффектов в высоковольтных изоляторах, по нашим данным, не проводилось [3-6].

Аппаратура, методика измерений и образцы

Все измерения выполнялись на экспериментальном стенде [7] путем бесконтактного приема электромагнитных импульсов ЧР всеволновой телевизионной антенной «Дельта Н111-01», с коэффициентом усиления 28 дБ, соединённой с широкополосным перестраиваемым приёмником «AOR AR 5000A», позволяющим детектировать сигналы в интервале частот 0.5–800 МГц. Регистрация акустических импульсов осуществляется активной параболической антенной «ParaDish-2», соединённой с приёмником «SDT-270» на частоте 40 кГц. В дальнейшем проходила компьютерная обработка с целью определения в каждом из дискретных интервалов фазового напряжения средних значений количества и интенсивности импульсов ЧР, которые либо не превышают допустимый порог для возникновения дефектов и их развития по сравнению с эталонным ВИ, или превышают его.

Изоляторы с ЧР первого типа мы отнесли к классу бездефектных, и с ЧР второго типа к дефектным изоляторам. Такое разделение, конечно, имеет несколько условный характер, поскольку до сих пор для ВИ нет нормативных документов по оценке дефектов по характеристикам ЧР. При этом наличие наиболее опасных дефектов определяется расширением фазовых интервалов излучения ЧР, резким увеличением ЧР в отрицательных полупериодах высокого напряжения по сравнению с положительными полупериодами, а также по значительному отличию ширины и формы одиночных импульсов ЧР. Для измерения параметров характеристик ЧР в зависимости от приложенного напряжения использовался регулируемый источник переменного высокого напряжения.

В качестве исследуемых образцов использовались полимерные ВИ ЛК 70/35, снятые с эксплуатации и имевшие различные дефекты. Виды дефектов, их размеры и местоположение были вначале оценены визуально, а затем на стенде были измерены наборы характеристик ЧР, соответствующие видам дефектов, в зависимости от приложенного напряжения (до 40 кВ). Накопление сигналов ЧР выполнялось в течение 18 с, что вполне удовлетворяло стохастическому характеру возникновения ЧР. Это позволяло обнаруживать сверхбольшие ЧР, периодичность которых не превышала 1-5 раз за период сети.

Результаты обследования ВИ

В результате сравнительного анализа данных после компьютерного накопления и обработки сигналов ЧР в виде набора характеристик, соответствующих каждому виду дефектов в ВИ, визуальным осмотром были выделены малодефектные и содержащие крупные дефекты ВИ. В свою очередь, последние были разделены на: содержащие

дефекты на стержне и имевшие нарушение контакта между стержнем и концевателем. Однако главным отличием ВИ первой и второй групп стало обнаружение в ВИ с крупными дефектами сверхбольших ЧР. Примеры характеристик ЧР для малодефектных ВИ представлены на рис. 1.

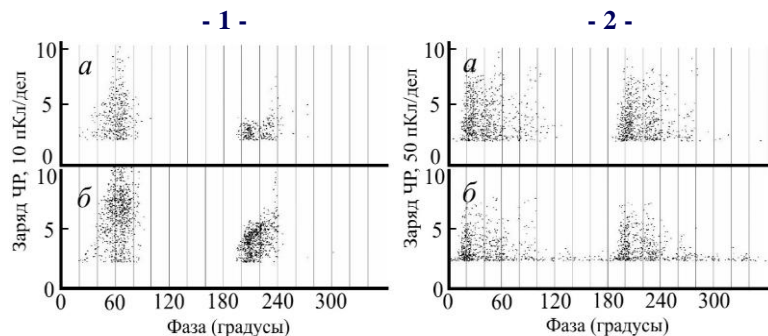


Рис.1. Амплитудно- фазовые характеристики ЧР малодефектного (1) и дефектного (2) полимерных ВИ ЛК 70/35, измеренные электромагнитным (а) и акустическим (б) датчиками.

Характеристики ЧР симметричны для обоих фазовых интервалов, ширина которых увеличивается с ростом размеров дефектов на стержне. Также наблюдалась однозначность характеристик ЧР, измеренная с помощью электромагнитных и акустических датчиков. Характеристики ЧР для малых дефектов на стержне и стержне-оконцевателе, на которых не сказывалось влияние небольших индуцированных полей, незначительно отличались друг от друга. Значительно отличались характеристики ЧР для крупных дефектов. Если для мелких дефектов ЧР возникали вблизи максимальных фазовых значений приложенного напряжения (90° и 270°), и постепенно возникающие ЧР снижались до 30° - 40° и 210° - 290° , а вблизи 0° и 180° ЧР отсутствовали, то для крупных дефектов максимальное количество и интенсивность были обнаружены именно вблизи нулевых и 180° значений фаз приложенного поля.

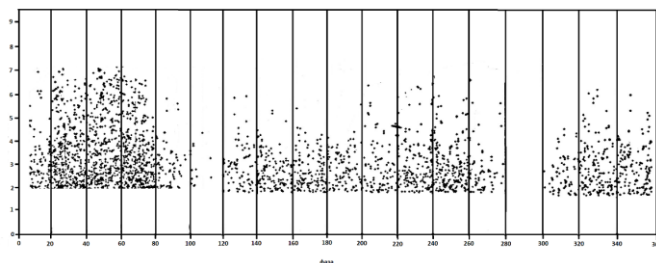


Рис.2. Амплитудно-фазовая характеристика ЧР для ВИ ЛК 70/35 с большим дефектом на стержне.

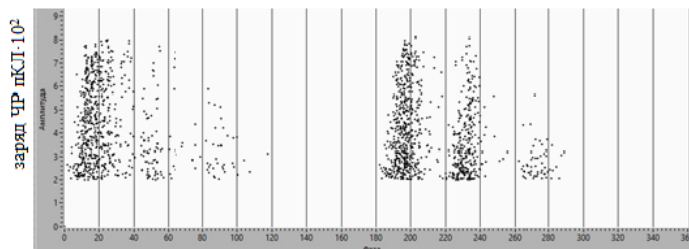


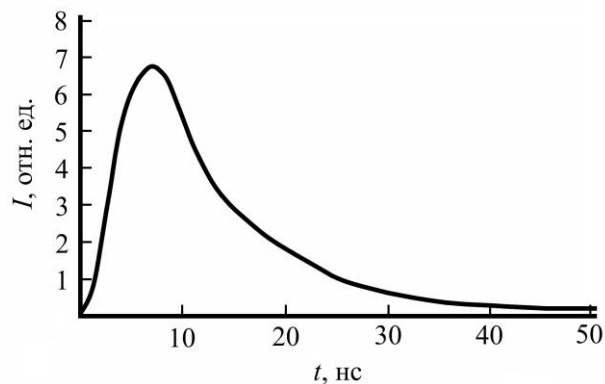
Рис.3. Амплитудно-фазовая характеристика ЧР для ЛК 70/35 с большим дефектом стержень-оконцеватель.

На рис. 2 представлены характеристики ЧР на стержне, а на рис. 3 – подобная характеристика для дефекта стержень-оконцеватель. Отличие характеристик состоит в переходе от почти симметричного, в первом случае, – фазового распределения интенсивностей и количества ЧР, – к несимметричному фазовому распределению параметров ЧР.

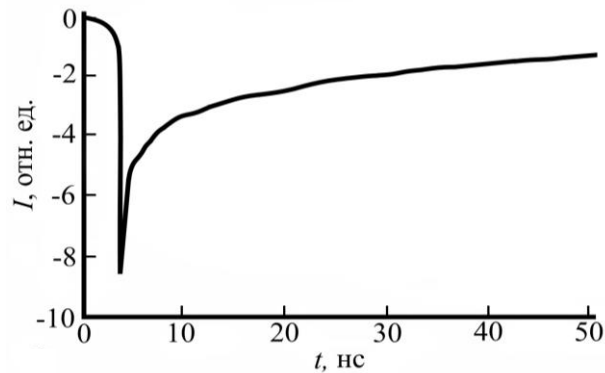
Вид дефекта отражается и на форме импульсов ЧР. Это обстоятельство неоднократно пытались использовать для контроля и определения дефектов в ВИ. Однако само измерение формы импульсов при использовании контактного метода связано с определенными дополнительными сложностями, зависящими от метода детектирования. В различных способах детектирования, на форму импульсов влияют параметры резонансных контуров, резистивные или емкостные связи, поэтому в ряде случаев наблюдались как экспоненциальные, так и колебательные формы с различной длительностью самих импульсов ЧР [8-10]. По-видимому, наиболее точную форму и длительность импульса можно определить с помощью детектирования импульсов бесконтактным электромагнитным методом на высоких (10^8 - 10^9 Гц) частотах.

Теоретическое моделирование формы и длительности импульсов ЧР для уже рассмотренного выше дефекта электрод-полость и диэлектрик-электрод было выполнено в работе [11]. Было установлено, что процесс возникновения ЧР в полости различен для положительных и отрицательных разрядов. Поскольку положительные разряды возникают за счет дрейфа положительных зарядов вдоль оси z к поверхности диэлектрика, то вследствие малой подвижности ионов, время их прибытия на поверхность больше, чем для перемещающихся индуцированных полем электронов. Это обстоятельство отражается на форме положительных импульсов (рис. 4 а) с относительно медленно возрастающей частью импульса ЧР. Отрицательные импульсы ЧР по сравнению с положительными импульсами имеют более острую форму нарастания интенсивности (рис. 4 б), определяемую большей скоростью перемещения электрона к поверхности диэлектрика при отрицательном полупериоде приложенного напряжения. Дальнейшее более плавное уменьшение как положительного, так и отрицательного импульсов ЧР, как предположено в [11], связано с перемещением положительных и отрицательных зарядов по поверхности диэлектрика. Индуцированные электроны не участвуют в этом процессе, поскольку сразу же поглощаются ионами. Растущие передние части положительного и отрицательного импульсов ЧР носят стримерный характер.

После достижения положительными ионами поверхности полости площадь разряда начинает возрастать, что не характерно для отрицательного ЧР, а ток положительного ЧР начинает спадать, что приводит к постепенному однородному распределению электрического поля на поверхности диэлектрика, граничащего с полостью.



а)



б)

Рис. 4. Теоретическая форма импульсов ЧР на дефекте «электрод-полость-полимер»: а – положительный импульс, б – отрицательный импульс

Меньшая электрическая прочность границы раздела двух диэлектрических сред с различными диэлектрическими и электрическими характеристиками, как показали исследования последних лет [12, 13] объясняются, по крайней мере, совокупностью нескольких факторов: искажением электрического поля, параметрами воздействующего электрического напряжения, подпиткой развивающегося разряда через емкость изолятора, особенностями контакта электродов с изолятором, положение изолятора относительно силовых линий электрического поля.

Обсуждение полученных результатов

До настоящего времени, теоретическому [14, 15] и менее распространенному – экспериментальному [16] изучению характеристик ЧР на дефектах, было посвящено значительное количество исследований. Однако в большинстве из них рассматривались особенности ЧР на дефектах в виде трещин или полостей в эталонных диэлектрических материалах с однородной структурой матрицы (фарфор или эпоксидная смола) [17, 18].

В то же время, в высоковольтных изоляторах (ВИ) используются, как минимум, два материала (диэлектрические стержни и металлические электроды-фланцы в керамических ВИ) и три материала (фланцы, стеклопластиковые стержни (или трубки) и резиновые ребристые оболочки в полимерных ВИ). Во всех случаях ЧР возникают в условиях наличия каких-либо дефектов уже при приложении стандартного рабочего напряжения. Более того, в ряде случаев, особенно в полимерных ВИ, сами ЧР являются причиной ускоренного старения ВИ. В большинстве случаев ЧР возникают при частичном (неполном) электрическом пробое воздушного промежутка, поскольку в нем напряженность E_k приложенного электрического поля E_a выше, чем в однородном диэлектрике E_i :

$$E_k = (\epsilon_D / \epsilon_B) E_i \quad (1),$$

где ϵ_D и ϵ_B соответственно диэлектрические проницаемости твердого диэлектрика и воздуха (газа).

Повышение напряженности в воздушном зазоре будет приводить к изменению значений поля пробоя. При этом ионизационные процессы (тлеющий и частичный разряды) будут начинаться при существенно меньшем напряжении, чем в основном изоляционном промежутке. Продукты ионизации (свободные электроны и ионы) выходят из воздушного промежутка на поверхность диэлектрика и инициируют его дальнейший пробой или перекрытие при пониженном напряжении. При этом, практически всегда пробой происходит не за счет разряда непосредственно через диэлектрик, а через его границу с воздухом ($U_{пер}$). Это наиболее характерно для опорных изоляторов.

Электрическому пробую газового промежутка предшествует несколько этапов ионизации. На первом из них первичные электроны, в основном испускаемые с электродов, ионизируют нейтральные атомы и создают дополнительные электроны. Эти движущиеся в электрическом поле электроны образуют лавины. Для образования электрического разряда, причем первичный разряд имеет вид отдельных узких струек (стримеров), необходимо, чтобы каждый электрон на пути d_0 между электродами осуществлял определенное число ионизаций K :

$$K = \alpha d_0 \quad (2),$$

где α – коэффициент ударной ионизации.

В реальных условиях коэффициенту K можно сопоставить напряжение электрического пробоя $U_{пр}$:

$$U_{пр} = \alpha \frac{P}{P_0} d_0 + b \sqrt{\frac{P}{P_0}} d_0, \quad (3),$$

где P - давление газа, P_0 - нормальное давление (101,3 кПа, $T = 293$ К).

Для воздуха при нормальных условиях ($P=P_0$) $\alpha = 24,5$ кВ/мм, $b = 6,4$ кВ/см. Таким образом, в первом приближении

$$U_{пр} \approx \alpha d_0, \quad (4),$$

т. е. пробивное напряжение линейно растет с увеличением разрядного промежутка.

При возникновении локального перенапряжения E_k , превышающего пороговое поле электрической прочности (E_v), возникают ЧР. Случайное распределение моментов ЧР и сильная вариация их интенсивностей позволяет относить природу ЧР к стохастическим процессам. Сложность определения параметров ЧР также зависит от эволюции распределения электрических полей внутри промежутка пробоя во временном интервале воздействия высокого напряжения.

Как уже обсуждалось во введении, в ряде работ по компьютерному анализу моделирования приповерхностного дефекта, представленного в виде сферической полости в полимере [3-6], рассматривалось влияние индуцированных полей от предыдущих ЧР на последующие заряды. В данной работе мы использовали подобное представление для построения более реалистичной модели электрофизических процессов ЧР, в зависимости от вида и размеров дефектов в полимерных ВИ, с учетом обнаружения сверхбольших ЧР. Особенностью сверхбольших ЧР является участие в процессе их излучения индуцированного предыдущими ЧР зарядового поля на диэлектрических поверхностях дефекта. Заряды создаются ионами и электронами в полости дефекта при ионизации воздуха в нем стримерными ЧР, а затем осаждаются на поверхностях в виде полей $[E_{чр}]$. Интенсивности полей последующих ЧР определяются геометрической комбинацией приложенного к ВИ поля E_a и индуцированного поля E_i (рис. 5).

При одинаковых знаках E_a и E_i , поле $E_{чр}$ возрастает, а при разных знаках – убывает. Наибольшее количество и интенсивность будут у отрицательных ЧР, создающихся суммой отрицательных по знаку полей E_a и E_i , соответствующих фазовым интервалам 130° – 230° , фазовые интервалы положительных ЧР 0° – 20° и 300° – 360° , в основном, создаются полями положительно индуцированных зарядов на поверхностях дефекта. Равномерное распределение числа и интенсивности ЧР в обоих полупериодах сети соответствует симметричности расположения зарядов на обеих поверхностях дефекта в приложенном поле – например, дефекту на стержне. Резкая фазовая асимметричность возникновения сверхбольших ЧР с превышением отрицательных ЧР, на наш взгляд, определяется асимметричностью зарядовых полей на дефекте.

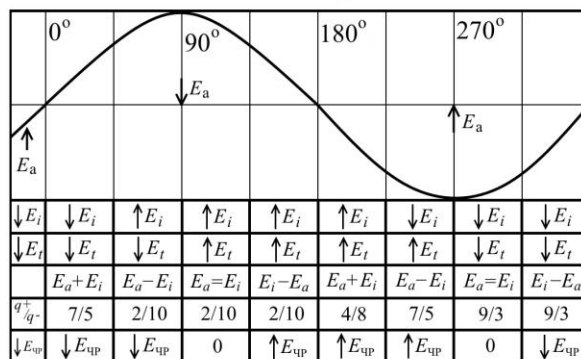


Рис.5. Схема фазового распределения градиентов приложенного поля E_a и индуцированного поля зарядов E_i , поля ЧР (E_{cr}), и суммарного поля $E_t = E_a \pm E_i$.

Такой вид дефекта характерен для плохого контакта между стержнем ВИ и металлическим оконцевателем. Подобное отличие характеристик ЧР позволяет разделять наиболее часто встречающиеся дефекты на стержне и контакте стержень-оконцеватель. Было обнаружено изменение интенсивности и фазового смещения в сторону меньших углов сверхбольших ЧР. Однако интенсивность и количество отрицательных ЧР возрастает, а положительных ЧР уменьшается. Особенно этот процесс характерен для дефектов стержень-оконцеватель. Наиболее сильные изменения в характеристиках ЧР наблюдались с ростом размеров дефектов, т. е. с увеличением длины воздушного промежутка в зазоре между двумя диэлектрическими поверхностями (дефект на стержне) или в зазоре между диэлектриком и металлом (дефект стержень-оконцеватель). От размеров воздушного зазора, даже при стандартном приложенном напряжении, зависят условия возникновения ЧР и последующего накопления зарядов на диэлектрических поверхностях дефекта. Этот эффект может быть объяснен увеличением скорости перемещения зарядов и их плотности на диэлектрических поверхностях полости дефекта. Возрастание интенсивности и количества сверхбольших ЧР на дефекте типа «стержень-оконцеватель», по-видимому, чаще всего, являются причиной выхода из строя полимерных ВИ, что уже ранее наблюдалось на ряде подстанций [8].

Заключение

Главным итогом наших исследований является обнаружение сверхбольших ЧР, способных ускорять процесс деградации поверхности уже существующих дефектов. Такая деградация приводит к увеличению размеров дефектов и последующему пробоям ВИ. Причем, первоначальные размеры дефектов или неоднородностей диэлектрика являются определяющим фактором в развитии пробоя. Необходимым элементом подобного пробоя служит такой размер дефекта или неоднородности, при котором при рабочем напряжении на них возникают первичные ЧР. Таким образом, как показали наши эксперименты, сверхбольшие ЧР являются не только индикатором дефектов в ВИ, но сами могут становиться причиной ускоренного старения высоковольтных диэлектрических элементов. Вследствие этого, при анализе характеристик ЧР необходимо не только учитывать параметры обычных ЧР, но и, путем накопления периодов измерения, определить наличие сверхбольших ЧР, их интенсивность и количество за один период фазы высокого напряжения.

Литература

1. Голенищев-Кутузов А.В., Голенищев-Кутузов В.А., Иванов Д.А., и др. Способ бесконтактной дистанционной диагностики состояния высоковольтных изоляторов. Патент на изобретение № 2679759. РФ. 21.03.2018.
2. Salustiano R., Capelini R. M., de Abreu S. R. et al. Development of new methodology for insulators inspections on aerial distribution lines based on partial discharge detection tools / ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application. 8-11 Sept. 2014. IEEE. 2014. P. 1-4.
3. Illias H. A., Chen G., Lewin P. L. The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events // Journal of Physics D: Applied Physics. 2011. V. 44. N. 24. P. 245202.
4. Callender G., Golosnoy I. O., Rapisarda P., et al. Critical analysis of partial discharge dynamics in air filled spherical voids // Journal of Physics D: Applied Physics. 2018. V. 51. N. 12. P. 125601.
5. Wu K., Pan C., Meng Y., Cheng Y. Dynamic behavior of surface charge distribution during partial discharge sequences // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. V. 20. N. 2. P. 612-619.
6. Villa A., Barbieri L., Gondola M., et al. A PDE-based partial discharge simulator // Journal of Computational Physics. 2017. V. 345. P. 687-705.
7. Голенищев-Кутузов А. В., Голенищев-Кутузов В. А., Иванов Д. А., и др. Комплексный метод дистанционного контроля состояния высоковольтных изоляторов // Известия вузов. Проблемы энергетики. 2016. № 5-6. С. 87-93.
8. Golenishchev-Kutuzov A.V., Golenishchev-Kutuzov V.A., Ivanov D.A. et al.. Effect of partial discharges on the operating condition of high-voltage insulators. Web of Conferences 124, 03001 (2019).
9. Broniecki U., Bergnan V., Tnittmann U. Visualization of synchronous acoustic and electric PD measurement data. Proc. 16th International Symposium High Voltage Engineering, Johannesburg, 2009, p. 196.
10. Исмагилов Ф. Р., Максудов Д. В. Математическое моделирование развития частичных разрядов в процессе старения диэлектрика. Вестник УГАТУ, Уфа, 2011. Т. 15. №3. С. 98-100.
11. Pan Ch. Meng Y., Wu K., Han Z. Simulation of partial discharge sequences using fluid equations. J. Phys. D. Appl. Phys., V. 44, p. 255201, 2011.
12. Sasaki A, Kato S, Takahashii E., Kishimoto Y., et al. Simulation of discharge in insulating gas from initial partial discharge to growth of stepped leader using the percolation model. The Japan Society of Applied Physics. 2016. V. 55. № 2.
13. Гайворонский А.С. Повреждения полимерных изоляторов и их диагностика при эксплуатации. Главный энергетик. 2010. № 2. С. 23-27.
14. Heitz. A generalized model for partial discharge processes based on a stochastic process approach. «J. Phys. D», «Appl.Phys». 1999. V. 32. P. 1012.
15. Киншт Н.В., Петрунько Н.Н. Об оценке параметров частичных разрядов. Электричество. 2016. №6. С. 51-56.
16. Аввакумов М.В., Голенищев-Кутузов А.В. Методика исследования электрического пробоя элементов из электротехнического фарфора. «Известия вузов. Проблемы энергетики», 2003. №5-6. С. 130-134.
17. Гатауллин А.М., Матухин В.Л., Шмидт С.В., Крупнов Б.А. Комплексный метод регистрации параметров частичных разрядов изоляции электрооборудования. «Известия вузов. Проблемы энергетики». 2010. №9-10. С. 98-104.
18. Evagorou D., Kyprianou A., Lewin P. L. Feature extraction of partial discharge signals using the wavelet packet transform and classification with a probabilistic neural network. IET Sei. Meas. Technol. 2010. V.4. p. 177.

Авторы публикации

Голенищев-Кутузов Александр Вадимович – д-р. ф.-м. наук, заведующий кафедрой Промышленная электроника и светотехника (ПЭС), Казанский государственный энергетический университет.

Ахметвалеева Ляля Вахитовна – канд. пед. наук., доцент кафедры Промышленная электроника и светотехника (ПЭС), Казанский государственный энергетический университет.

Еникеева Гульсум Рауфовна – канд. ф.-м. н., доцент кафедры Промышленная электроника и светотехника (ПЭС), Казанский государственный энергетический университет.

Иванов Дмитрий Алексеевич – канд. техн. наук., доцент кафедры Промышленная электроника и светотехника (ПЭС), Казанский государственный энергетический университет.

Семенников Антон Владимирович – канд. ф.-м. н., ст. преп. кафедры Промышленная электроника и светотехника (ПЭС), Казанский государственный энергетический университет.

Марданов Георгий Дамирович – канд. техн. наук., асс. кафедры экономики, финансового права и информационных технологий, Казанский юридический институт МВД РФ.

References

1. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et al. *Method for non-contact remote diagnostics of the state of high-voltage insulators*. Patent for invention No. 2679759. RF . 03.21.2018.
2. Salustiano R, Capellini RM, de Abreu SR, et al. *Development of new methodology for insulators inspections on aerial distribution lines based on partial discharge detection tools* / ICHVE International Conference on High Voltage Engineering and Application. 8-11 Sept. 2014. IEEE, 2014. pp. 1-4.
3. Illias HA, Chen G, Lewin PL. The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2011;4(24):245202.
4. Callender G, Golosnoy IO, Rapisarda P, et al. Critical analysis of partial discharge dynamics in air filled spherical voids. *Journal of Physics D: Applied Physics*. 2018;51(12):125601.
5. Wu K, Pan C, Meng Y, Cheng Y. *Dynamic behavior of surface charge distribution during partial discharge sequences* // IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2013. V. 20. №2. P. 612-619.
6. Villa A, Barbieri L, Gondola M, et al. A PDE-based partial discharge simulator. *Journal of Computational Physics*. 2017;345:687-705.
7. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov D. A, et al. A complex method for remote monitoring of the state of high-voltage insulators. *University Bulletin. Energy issues*. 2016;5-6:87-93.
8. Golenishchev-Kutuzov AV, Golenishchev-Kutuzov VA, Ivanov DA, et al. Effect of partial discharges on the operating condition of high-voltage insulators. Web of Conferences 124, 03001 (2019).
9. Broniecki U, Bergnan V, Tnittmann U. Visualization of synchronous acoustic and electric PD measurement data. *Proc. 16th International Symposium High Voltage Engineering*. Johannesburg, 2009, p. 196.
10. Ismagilov FR, Maksudov DV. Mathematical modeling of the development of partial discharges in the aging process of a dielectric. *Bulletin of USATU, Ufa*. 2011;15(3):98-100.
11. Pan Ch. Meng Y, Wu K, Han Z. Simulation of partial discharge sequences using fluid equations. *J. Phys. D. Appl. Phys.* 2011;44:255201.

© А.В. Голенищев-Кутузов, Л.В. Ахметвалеева, Г.Р. Еникеева, Д.А. Иванов, А.В. Семенников, Г.Д. Марданов

12. Sasaki A, Kato S, Takahashii E., et al. Simulation of discharge in insulating gas from initial partial discharge to growth of stepped leader using the percolation model. *The Japan Society of Applied Physics*. 2016;55(2).

13. Gaivoronsky AS. Damage to polymer insulators and their diagnostics during operation. *Chief Power Engineer*. 2010;2:23-27.

14. Heitz. A generalized model for partial discharge processes based on a stochastic process approach. *J. Phys. D, Appl. Phys.*, 1999;32:1012.

15. Kinsht N. V, Petrunko NN. On the estimation of the parameters of partial discharges. *Electricity*. 2016;6:51-56.

16. Avvakumov MV, Golenishchev-Kutuzov AV. Methodology for the study of electrical breakdown of elements from electrical porcelain. *University News. Energy Problems*. 2003;5-6:130-134.

17. Gataullin AM, Matukhin V. L., Schmidt S. V., Krupnov B. A. An integrated method for recording the parameters of partial discharges of insulation of electrical equipment. *University News. Energy Problems*. 2010;9-10:98-104.

18. Evagorou D, Kyprianou A, Lewin PL. *Feature extraction of partial discharge signals using the wavelet packet transform and classification with a probabilistic neural network*. IET Sei. Meas. Technol, 2010;4:177.

Authors of the publication

Alexandr V. Golenishchev-Kutuzov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia. Email: alex.kutuzov@mail.ru.

Liliya V. Akhmetvaleeva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Gulsum R. Enikeeva – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Dmitriy A. Ivanov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Anton V. Semennikov – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Georgiy D. Mardanov – Kazan Low Institute, Kazan, Russia.

Поступила в редакцию

29.02.2020г.