

УДК 621.315.2.016.2

Н.В. Пономарев

АНАЛИЗ МЕТОДОВ ДИАГНОСТИКИ СОСТОЯНИЯ СИЛОВЫХ ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ

Современные тенденции развития электроэнергетики направлены на достижение задач, наиболее рационального использования природных энергетических ресурсов, сохранение экологии, повышение надежности электроснабжения и качества электроэнергии, выполнение требований потребителей с неравномерным графиком нагрузки, энергоснабжения крупных мегаполисов и децентрализованной нагрузки, которые явились следствием новых условий функционирования электроэнергетики как социально- и клиентоориентированной инфраструктуры.

Вышеперечисленные требования в большинстве развитых стран стали причиной модернизации электроэнергетики на базе инновационной организационно-технологической платформы Smart Grid. Модернизация должна обеспечить не только восстановление основных производственных фондов, но и обеспечение энергетической безопасности и экономической эффективности. Одной из наиболее важных задач решаемых инновационной системой Smart Grid является обеспечение надежности электроснабжения. Данная задача, как и инновационная система Smart Grid в целом, не может быть решена без разработки и внедрения технологического базиса, т.е. новых датчиков и методов контроля состояния электрооборудования [1,2].

Наиболее перспективным способом контроля состояния электрооборудования является неразрушающий контроль качества изоляции электрооборудования [6]. В число наиболее важного электрооборудования на промышленных предприятиях, надежность которого требуется контролировать и поддерживать на достаточном уровне, является высоковольтные силовые кабельные линии (КЛ). На сегодняшний день разработано множество датчиков и методов неразрушающего контроля состояния изоляции КЛ. Множество которых, ставит задачу определения наиболее подходящего метода и датчика или комбинации методов и датчиков неразрушающего контроля состояния изоляции. Ниже проведен анализ наиболее распространенных неразрушающих методов контроля состояния изоляции КЛ:

- измерение сопротивления изоляции;
- измерение диэлектрических потерь;
- измерение частичных разрядов;
- измерение емкости кабельных линий;
- измерение коэффициента абсорбции;
- тепловизионный метод;
- рентгеновский метод;
- измерение и анализ возвратного напряже-

ния,

- метод рефлектометрии (импульсный, высокочастотный).

Анализ методов контроля изоляции, должен основываться на физических процессах, происходящих в изоляции КЛ. Основные причины повреждений КЛ -дефекты изоляции, которые возникают в процессе изготовления, хранения, транспортировки, монтажа и эксплуатации. Дефекты можно разделить на распределенные (недостаточная толщина изоляции, увлажнение изоляции, внешнее загрязнение, коррозия и др.) и локальные (складки, трещины, вмятины, надрезы, газовые включения, вкрапления и др.). Такие дефекты в зависимости от физических свойств диэлектриков, рода тока, величины приложенного напряжения, условий эксплуатации и др. могут быть причинами двух основных видов пробоя изоляции: электрический пробой и тепловой пробой.

Особенностью этих видов пробоя является зависимость пробивной напряженности от температуры и времени воздействия. При электрическом виде пробоя пробивная напряженность не зависит от температуры и времени воздействия напряжения, напротив, при тепловом виде пробоя пробивная напряженность зависит как от температуры, так и от длительности воздействия напряжения. Вышеизложенное было учтено при составлении требований к методам контроля изоляции КЛ. Для проведения анализа неразрушающих методов контроля укажем основные требования к методам:

- 1) безопасность проведения испытания для изоляции КЛ;
- 2) определение величины распределенного дефекта (дефектов);
- 3) определение величины локального дефекта (дефектов);
- 4) определение вида дефекта;
- 5) определение местонахождения дефекта в изоляции КЛ;
- 6) электробезопасность проведения испытания;
- 7) низкая стоимость аппаратуры контроля изоляции КЛ;
- 8) наименьшее время проведения испытания;
- 9) проведение испытания без отключения КЛ;
- 10) информативность полученных данных.

В табл. 1 приведено сравнение неразрушающих методов контроля изоляции по вышеуказанным требованиям.

Рассмотренная выше таблица сравнения неразрушающих методов контроля изоляции показывает, что методы рефлектометрии наиболее

полно отвечают сформулированным основным требованиям. Однако методы рефлектометрии имеют разные особенности, которые, способствуют или препятствуют выполнению основных требований. Рассмотрим методы рефлектометрии:

1) импульсная рефлектометрия:

- простой импульс
- сложный импульс
- вейвлет импульс

2) высокочастотная рефлектометрия.

В настоящее время метод импульсной рефлектометрии (МИР) разрабатывается для диагностики состояния КЛ [7]. Однако этот метод имеет свои недостатки. Применение МИР сталкивается с трудностью анализа полученных рефлексограмм из-за несовершенства измерительной аппаратуры, физических свойств КЛ и формы излучаемого импульса.

Значительным недостатком этого метода является сложность анализа полученных рефлексограмм вследствие содержания высших гармоник в излучаемом зондирующем импульсе [8]. Содержание высших гармоник в зондирующем импульсе (нелинейность импульса) приводит к искажению отраженного импульса, что является следст-

вием слияния отражений от неоднородностей волнового сопротивления изоляции КЛ. В некоторых случаях это явление делает невозможным отыскание высокоомных локальных и распределенных дефектов. Степень проявления этих недостатков, возможно, снизить за счет уменьшения длительности зондирующего импульса (треугольный импульс), однако при этом не удается достичь требуемой амплитуды импульса для повышения чувствительности на больших длинах КЛ. Немаловажным является тот факт, что небольшая неточность определения коэффициента укорочения приводит к значительному искажению расстояния до неоднородности изоляции КЛ. Стоит отметить, что стоимость применяемого оборудования на сегодняшний день весьма значительна.

С целью повышения точности и чувствительности в современных приборах диагностического оборудования применяются различные зондирующие импульсы, которые можно разделить на простые, сложные и вейвлет импульсы.

Сложные представляют собой простые импульсы, излученные в определенной последовательности. При этом диагностическое оборудование принимает и обрабатывает отраженные им-

Таблица 1. Анализ неразрушающих методов контроля изоляции

Неразрушающие методы контроля изоляции	Безопасность проведения испытания для изоляции КЛ	Определение величины распределенного дефекта	Определение величины локального дефекта	Определение вида дефекта	Определение локализации дефекта в изоляции КЛ	Электробезопасность проведения испытания	Низкая стоимость аппаратуры контроля изоляции КЛ	Шайменьшее время проведения испытания	Проведение испытания без отключения КЛ	Информативность полученных данных
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Контроль по сопротивлению изоляции	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-
Контроль по величине диэлектрических потерь	+	+	-	-	-	-	-	-	-/+	-
Контроль частичных разрядов	+	+	+	-/+	-/+	+	-	+	+	-/+
Контроль по величине емкости КЛ	+	+	-	-	-	-	+	-	-	-
Контроль по величине коэффициента абсорбции	+	+	-	-	-	+	+	+	-	-
Тепловизионный контроль	+	+	+	-	+	+	-	+	+	+
Рентгеновский метод контроля	+	-	+	+	+	+	-	+	-	+
Контроль по измерению возвратного напряжения	+	+	-	+	-	+	+	-	-	-
Контроль методом рефлектометрии	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+

пульсы с учетом этой последовательности. Вейвлет импульс представляет собой кратковременный линейно затухающий импульс, который может обеспечить более высокую точность получаемых рефлектограмм, однако предельная точность ограничена временем излучения зондирующего импульса.

Применение всех типов импульсов не исключает ошибки измерений связанных с неточным определением коэффициента укорочения. Кроме того, при реализации метода импульсной рефлектометрии для помехозащищенности требуется использование фильтров низких и высоких частот. Метод импульсной рефлектометрии реализован в серии приборов РЕЙС фирмы СТЕЛЛ (г. Брянск) для определения мест повреждений в КЛ (обрыв, короткое замыкание).

Метод высокочастотной рефлектометрии основан на анализе зависимости входного сопротивления КЛ от частоты приложенного напряжения. Результатом анализа является график спектральной плотности пространственных гармоник, полученных в результате преобразования Фурье в зависимости от длины линии [3, 4].

На рис. 1 представлены графики спектральной плотности пространственных гармоник. По оси абсцисс отложены расстояния от начала кабельной линии до нерегулярности, по оси ординат спектральная плотность пространственных гармоник. Как видно из рисунка, амплитуды спектра соответствуют местоположению и величинам дефектов изоляции кабельной линии. Таким образом, метод позволяет определить местоположение локальных дефектов и границы распределенного дефекта, которые на схеме замещения могут быть представлены емкостью и проводимостью, но и оценить их величину и характер. Данный метод менее критичен в аппаратурной реализации, чем метод импульсной рефлектометрии, а точность метода контроля определяется шагом дискретизации и выбранной длиной волны [3, 4].

Сопоставляя специфические особенности каждого неразрушающего метода диагностики состояния изоляции КЛ, можно утверждать, что метод высокочастотной рефлектометрии является наиболее перспективным для использования в системах диагностики КЛ.

Современные тенденции развития электроэнергетики основываются на базе концепции Smart Grid, что требует от разработчиков методов и систем контроля состояния КЛ учитывать её требования. Одним из требований концепции Smart Grid является то, что система мониторинга должна быть способна непрерывно отслеживать и прогнозировать состояние КЛ, т.е. предоставлять полную информацию для принятия адекватного оперативного решения о распределении нагрузки и продолжении или ограничении эксплуатации КЛ.

Такие требования приводят к заключению о недостаточности мониторинга состояния КЛ методами, основывающимися на измерении электрических величин, т.к. немаловажным фактором надежности изоляции КЛ является тепловой режим работы КЛ.

Из наблюдений за параметрами КЛ известно, что существует зависимость сопротивления изоляции, уровня частичных разрядов от температуры КЛ. Проведенный анализ практического применения системы мониторинга температуры изоляции КЛ [5] показал, что она является незаменимым источником информации для надежной эксплуатации КЛ.

Система мониторинга температуры изоляции КЛ основывается на методе оптической рефлектометрии (Fiber Optic Distributed Temperature Sensing) [10]. Система состоит из источника поляризованного света, оптоволокна проложенного в пределах поперечного сечения силового кабеля или прикрепленного к силовому кабелю снаружи и приемника светового луча. Анализ спектра света отраженного от неоднородностей оптоволокна

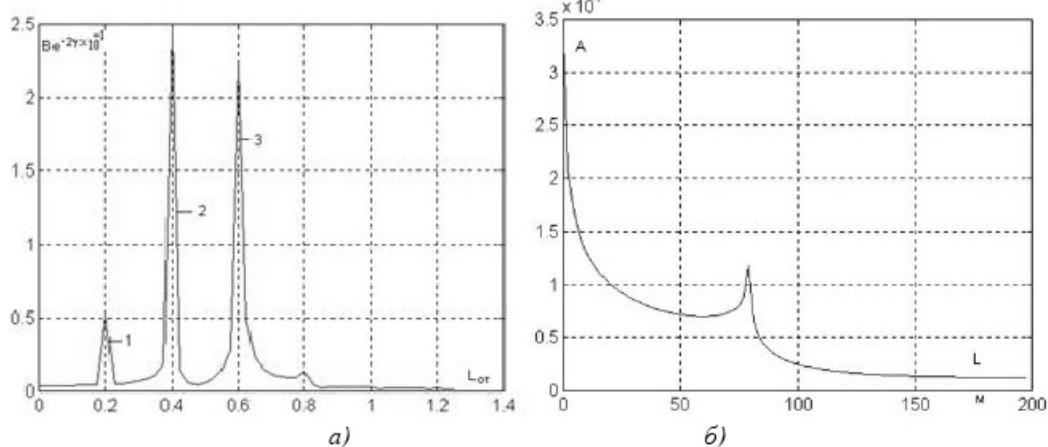


Рис.1. Графики спектров плотности:
а) 1,2,3 – амплитуды, соответствующие локальным дефектам;
б) спектр плотности для кабельной линии с распределенным дефектом.

(обратное рассеивание) предоставляет информацию о температуре изоляции КЛ в любом месте линии с разрешением 1 метр и точностью 1 °С. Также, так как система измерения выполняется на основе сигналов, передающихся по оптическим волокнам, наличие электромагнитного воздействия для блока контроля системы не имеет значения.

Информация о температуре изоляции КЛ дает возможность адекватно оценивать тепловой режим работы КЛ и определять природу развивающегося дефекта изоляции (тепловая или электрическая), что в свою очередь дает незаменимую информацию для принятия решения о дальнейшей эксплуатации КЛ.

Такие выводы делают выгодным применения сочетания методов контроля изоляции КЛ: высокочастотной рефлектометрии и тепловизионного контроля. Однако, применение такого сочетания становится значительно дорогостоящим, поэтому их совместное применение оправдано при установке на КЛ сверх высокого напряжения и высокоответственные КЛ.

Информация о сопротивлении (емкости, проводимости) и температуре изоляции, напряжения и перенапряжений сети дает возможность не только диагностировать состояние КЛ, но и прогнози-

ровать состояние КЛ в будущем при прогнозируемых нагрузках и условиях окружающей среды.

Эти возможности будут реализованы посредством определения совокупной зависимости состояния изоляции КЛ от температуры, перенапряжений, сопротивления изоляции и т.п., которая будет использована в автоматизированной системе мониторинга состояния КЛ.

Такая система будет способна отслеживать и прогнозировать состояние КЛ, что обеспечит высокую надежность электроснабжения, за счет своевременного профилактического ремонта КЛ, ограничения нагрузки на ослабленную изоляцию КЛ или устранения факторов ухудшающих условия эксплуатации КЛ. При использовании такой системы обслуживающий персонал сможет планировать профилактические ремонты по состоянию КЛ, а значит уменьшить негативное влияние профилактических испытаний повышенным напряжением на изоляцию КЛ и повысить свою осведомленность о состоянии изоляции КЛ. Вероятностная оценка выхода из строя изоляции КЛ может быть использована такой системой для принятия решения о ремонте или замене КЛ. Такая система в будущем будет представлять технологический базис концепции Smart Grid.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кобец, Б.Б. Инновационное развитие электроэнергетики на базе концепции Smart Grid.* / Б.Б. Кобец, И.О. Волкова . — М.: ИАЦ Энергия, 2010. — 208 с.
2. *Кобец, Б.Б. Smart Grid как концепция инновационного развития электроэнергетики за рубежом /* Б.Б. Кобец, И.О. Волкова, В.Р. Окороков // Энергоэксперт, 2010. — №2. — С. 52 – 58.
3. *Лебедев, Г.М. Математическое моделирование локальных дефектов изоляции силовых кабелей 6-10 кВ /* Г.М. Лебедев, Н.А. Бахтин, В.И. Брагинский. // Электричество, 1998. — №12. — С. 23 – 27.
4. *Лебедев, Г.М. Определение дефектов изоляции кабельных линий высокочастотным методом контроля /* Г.М. Лебедев, Н.А. Бахтин, В.И. Брагинский. // Электрика, 2003. — №7. — С. 37 – 40.
5. *Беляков, В.В. Мониторинг силовых кабельных линий с адаптацией к условиям окружающей среды в режиме реального времени /* В.В. Беляков, А.В. Малышев // Электро, 2008. — №5. — С. 38 – 40.
6. *Привалов, И.Н. Современные методы и технические средства для испытаний и диагностики силовых кабельных линий номинальным напряжением до 35 кВ включительно //* Петербургский энергетический ин-т повышения квал. руков. работ. и мпец. (ПЭИПК). — СПб., — 2008. — 104 с.
7. *Гильманов, Э.А. Повышение эффективности эксплуатации кабельных линий электропередачи на основе диагностики методом импульсной.* Автореф. дис. канд. ... техн. наук: 05.12.13, 05.11.16 // Уфимский гос. авиационный технич. университет. Уфа, 2009. — 17 с.
8. *Лебедев, Г.М. Повышение эффективности эксплуатации кабельных линий 6-10 кВ в системах электроснабжения на основе неразрушающей диагностики.* дис. ... докт. техн. наук: 05.09.03. / Московский энергетический институт. (Технический университет). Защищена 19.10.2007. — М., 2007.- 408 с.
9. *Diagnostic Testing of Underground Cable System / R. Hartlein [и др.] . — Georgia Tech Research Corporation, 2010. — 323 с.*
10. *SENSORTRAN Technology: DTS Basics.* URL: http://www.sensortran.com/technology_dtsbasics.php (дата обращения: 29.05.2012)

□ Автор статьи:

Пономарев

Никита Викторович,
аспирант каф. электроснабжения
горных и промышленных предпри-
ятий КузГТУ. E-mail:
nikitaponomarev@yandex.ru