

Диагностика кабельных линий

В.А. Шабанов, инженер-энергетик цеха сетей и подстанций Уральского электрохимического комбината

Целью диагностики технического состояния является оценка способности кабеля выполнять свои функции в заданных условиях эксплуатации. Поскольку на предприятиях России в эксплуатации находится большинство кабелей с бумажно-масляной изоляцией, проработавших 25 лет и более, то в данной статье рассматриваются методы диагностики применительно к силовым кабелям на напряжение 6-10 кВ, преимущественно с бумажно-масляной изоляцией. Для оценки состояния кабелей в эксплуатации применяются методы разрушающей диагностики с подачей повышенного испытательного напряжения, а так же ведутся разработки неразру-

шающих методов, по результатам которых возможно оценить состояние изоляции.

Повреждения в кабелях с бумажно-масляной изоляцией при разрушающих испытаниях локализуются, главным образом, в концевых и соединительных муфтах. На нашем предприятии эксплуатируется более 300 кабельных линий общей протяженностью около 250 км на напряжение 6-10 кВ. Выход из строя кабельной арматуры зачастую связан с нарушением технологии монтажа арматуры.

Из практики эксплуатации кабельных линий известно, что положительные результаты испытаний повышенным напряжением отнюдь не гарантируют последующую безаварийную работу электрооборудования. Например, после успешных испытаний повышенным напряжением кабельных линий случается выход их из строя в ближайшие после этого месяцы, и даже дни (табл. 1). Кроме того, испытания повышенным выпрямленным напряжением кабелей с изоляцией из резины и полиэтилена практически бесполезны, так как такого типа изоляция обладает малыми токами утечки и для нее не характерно развитие теплового пробоя.

С другой стороны, гарантия того, что кабель выдерживает какой-то уровень испытательного напряжения, хозяину кабельной линии не очень-то и важно. Ему важнее, чтобы был определен остаточный ресурс кабеля, либо, чтобы кабель гарантированно проработал до следующего испытания (ремонта).

Здесь следует уточнить, что ресурс кабеля нельзя путать со сроком службы, поскольку ресурс определяет фактическую наработку кабеля, зависящую от нагрузки, а срок службы характеризует



Рис. 1. Поврежденная в работе соединительная муфта СС-100. Авария произошла из-за увлажнения изоляции по причине плохой пайки оболочки муфты к трубе



Рис. 2. Повреждение в концевой муфте «Райхем». Причина выхода: повреждение изоляции в месте установки заземляющего проводника при подготовке к монтажу концевой муфты

Таблица 1. Повреждения на КЛ 6-10 кВ на УЭХК

Год	2006	2007	2008
Количество выходов из строя КЛ на 6-10 кВ	34	33	36
Количество выходов из строя КЛ при испытаниях	28	29	27
Количество выходов из строя КЛ в работе	6	4	9
Количество повреждений в кабельной арматуре	25	24	32

календарное время работы кабеля. Зависимость ресурса изоляции от напряженности поля E и температуры T выражается:

$$\tau_p = AE^{-n} e^{W_a/KT},$$

где K — постоянная Больцмана, W_a — энергия активации, A — постоянная, n — показатель степени, зависящей от особенностей изоляционной конструкции, вида изоляции, рода напряжения.

В кабельной изоляции могут происходить различные формы пробоя: тепловой, ионизационный и электрический. При эксплуатации кабеля происходит либо тепловой, либо ионизационный пробой. При испытании же кабеля высоким напряжением из-за ограниченного времени приложения напряжения может происходить электрический, либо ионизационный пробой. Ионизационный пробой может развиваться при приложении напряжения от нескольких минут до нескольких лет. При испытании повышенным выпрямленным напряжением процессы ионизации усиливаются в несколько раз, поэтому за нормируемое время испытания (5 минут) происходит усиленное старение изоляции, которое совсем не обязательно приводит к пробую и выявлению дефекта. Поэтому преимущество неразрушающих методов испытаний является то, что в момент испытаний кабель не подвергается старению.

Можно сформулировать требования к идеальному методу диагностики кабелей:

- должен производить неразрушающую диагностику без ухудшения эксплуатационных характеристик КЛ,
- по результатам диагностики должна быть с достаточной степенью вероятности гарантирована безаварийная работа кабеля до следующего испытания,
- должен быть простым в использовании в условиях эксплуатации, в том числе при обработке результатов испытаний,
- диагностировать кабели с различными типами изоляции и конструкцией,
- иметь минимальную стоимость использования.

На сегодняшний день, метод, удовлетворяющий вышеуказанные требования отсутствует, но работы по выявлению соответствующего достоверного браковочного критерия и поиска новых методов диагностики производятся многими разработчиками.

Методы контроля кабелей в эксплуатации



Можно указать возможные методы диагностики изоляции кабелей 6-10 кВ в эксплуатации.

Рассмотрим неразрушающие методы диагностики.

Измерение сопротивления изоляции

Измерение сопротивления изоляции ($R_{из}$) является весьма чувствительным и недорогим методом контроля однородности изоляции кабеля, которым в настоящее время на большинстве предприятий пренебрегают. При измерении $R_{из}$ необходимо учитывать явление поляризации и абсорбции. Так, для нормального кабеля с бумажно-масляной изоляцией сопротивление изоляции вначале достаточно низкое, а затем постепенно возрастает. Поэтому браковочным критерием является не только абсолютное значение $R_{из}$, но коэффициент абсорбции (соотношение сопротивления изоляции через 60 секунд (R_{60}) к сопротивлению изоляции через 15 секунд (R_{15})). Кроме того, при измерении $R_{из}$ важно учитывать различие измеренных значений по фазам.

Измерение емкости изоляции C и тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$

Измерения производят на различных частотах. При этих испытаниях необходимо оценивать приращение $\text{tg}\delta$ при увеличении приложенного напряжения. По этой характеристике судят о наличии газовых включений в изоляции кабеля. Измерение емкости изоляции C и тангенса диэлектрических потерь $\text{tg}\delta$ аналогично $R_{из}$ следует сравнивать по

фазам. Измерение C , $\operatorname{tg}\delta$, $R_{\text{из}}$, могут служить браковочным критерием только в предпробойный период, когда дефект уже почти полностью развился.

Измерение характеристик частичных разрядов (ЧР)

Один из прогрессивных методов, реализованный в России в наибольшей мере в приборах ООО «Тест» г. Пермь. При данном виде диагностики измеряется:

- распределение и величина ЧР по длине КЛ,
- количество ЧР в дефектных местах,
- напряжение возникновения и напряжение гашения ЧР.

По результатам измерений характеристик ЧР может быть определено расстояние до дефектного места с перспективой замены аварийного участка. Данный метод дает неплохие результаты для кабелей с изоляцией из полиэтилена, но практически не фиксирует дефекты в бумажно-масляной изоляции.

Снятие эхограмм КЛ

Для определения остаточного ресурса кабеля и эффективного места определения повреждения в КЛ в службах по испытанию необходимо создавать библиотеку эхограмм кабелей, находящихся в эксплуатации. Тогда при диагностике кабеля полученная эхограмма сравнивается с эхограммой из архива, и место дефекта, если он прогрессирует, может быть определено по появлению нелинейности (различие с исходной эхограммой).

Метод возвратного напряжения

Метод возвратного напряжения был разработан венгерским ученым Nemeth. При этом методе измеряются зависимости напряжения саморазряда и восстанавливающегося напряжения от времени.

На нашем предприятии разрабатывается прибор, в котором реализуется несколько модифицированный метод. Прибор позволяет снять четыре зависимости, по которым производится оценка остаточного ресурса кабеля (рис. 1). При таком виде диагностике к исследуемому кабелю прикладывается испытательное постоянное напряжение не больше рабочего напряжения, поэтому ускоренного старения изоляции кабеля не происходит.

В первом опыте к образцу кабеля прикладывается постоянное напряжение и выдержи-

вается определенное время для возбуждения поляризационных процессов. Кривая саморазряда $U_d(t)$ (рис. 1, а) характеризуется двумя касательными Sd_1 и Sd_2 . Касательная Sd_1 проводится в момент времени снятия напряжения с образца кабеля t_0 и характеризуется углом к горизонтали α_1 . Касательная Sd_2 проводится через 2 секунды после снятия напряжения (t_1) и фиксируется угол α_2 .

Кривая восстанавливающегося напряжения (рис. 1, б) измеряется после заряда постоянным напряжением до времени t_0 с последующим кратковременным закорачиванием испытываемого кабеля на время 3 секунды до момента t_1 . Кривая восстанавливающегося напряжения характеризуется касательной Sr_1 (угол α_3) в момент снятия заземления (t_1) и через 2 секунды касательной Sr_2 (угол α_4) в момент t_2 . Данная кривая характеризует степень поляризационных процессов, что позволяет судить о степени старения изоляции кабеля.

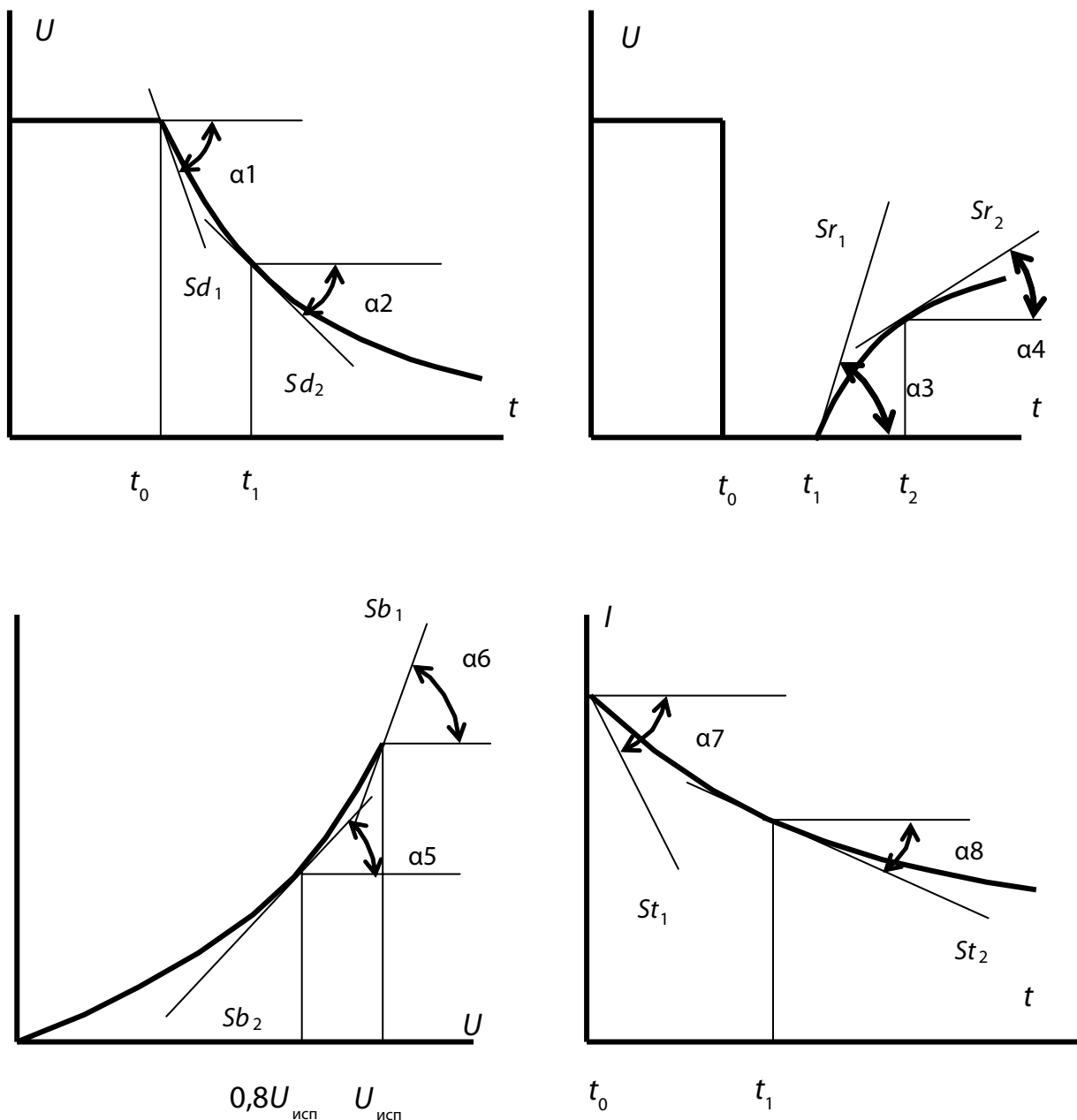
Кривая зависимости тока утечки от напряжения при поднятии напряжения от нуля до испытательного с нормируемой скоростью подъема (рис.1, в). Эта зависимость характеризуется касательными Sb_1 при $0,8U_{\text{исп}}$ (угол α_5) и в конце подъема при $U_{\text{исп}}$ (угол α_6).

Кривая зависимости тока утечки от времени $I_{\text{ут}}(t)$ после приложения испытательного напряжения (рис. 1, г) характеризуется касательной St_1 в момент t_0 сразу же после подачи испытательного напряжения $U_{\text{исп}}$ (угол α_7) и после выдержки времени 10 сек (t_1) (угол α_8). Данная зависимость должна хорошо соотноситься с кривой саморазряда, поскольку эти кривые, главным образом, говорят об увлажнении изоляции. Чем неоднородней полученные кривые (чем больше углы $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_7, \alpha_8$), тем больше увлажнена изоляция кабеля и тем больше вероятность пробоя кабеля. Особенно эффективны данные зависимости при определении дефектов концевых и соединительных муфт.

В настоящее время ведется работа по определению граничных значений углов α_1 — α_8 для определения остаточного ресурса кабеля.

Исходя из вышеизложенного, можно сделать вывод о том, что разработка неразрушающих методов диагностики кабелей является весьма перспективной задачей, которая позволит увеличить надежность электроснабжения потребителей — основную задачу энергоснабжающих организаций.

Рис. 3. Кривые, измеряемые прибором неразрушающего метода контроля кабелей



Литература

1. Боев М.А., Канискин В.А. и др. Эксплуатация силовых электрических кабелей. Часть 2. Диагностика силовых кабелей и определение остаточного ресурса в условиях эксплуатации: Учебное пособие. — СПб.: Издательство Петербургского энергетического института повышения квалификации руководящих работников и специалистов Министерства энергетики РФ, 2001.

2. Канискин В.А., Таджибаев А.И. и др. Эксплуатация силовых электрических кабелей. Часть 7. Методы испытаний и диагностики силовых кабелей: Учебное пособие. — СПб.: Издательство Петербургского энергетического института повышения квалификации руководящих работников и специалистов Министерства энергетики РФ, 2003.

3. Шкляр А.С. Будущее кабельных линий — комплексная диагностика // Кабель-News, 2009. — №5. — С. 21—23.