



ЭКСПЛУАТАЦИЯ, МОНТАЖ И НАЛАДКА

Факторы снижения электрической прочности кабельной изоляции из сшитого полиэтилена и причины ее повреждения в эксплуатации

Ширковец А. И., канд. техн. наук, Лиске А. Г., инж.

ООО «Болид», Новосибирск

Приведены результаты исследования механизмов снижения в процессе эксплуатации электрической прочности кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ). Показано, что развитие канала пробоя в кабельной изоляции из СПЭ происходит с разной скоростью, пропорциональной амплитуде и частоте воздействующего напряжения. С использованием опыта эксплуатации и результатов диагностирования СПЭ-изоляции силовых кабелей актуализированы причины повреждения элементов кабельных линий (КЛ). Представлены классификация и критерии оценки технического состояния силовых кабелей в условиях эксплуатации. На основе исследований для проектных и эксплуатирующих организаций предложены методические и практические рекомендации по обеспечению нормативного срока службы КЛ с СПЭ-изоляцией.

Ключевые слова: сшитый полиэтилен, электрическая прочность, кабельная линия, частота приложенного напряжения, электрические триинги, причины повреждения, нормативный срок службы.

В настоящее время при проектировании, строительстве и модернизации электрических сетей напряжением 6 – 500 кВ повсеместно внедряются силовые кабели с изоляцией из СПЭ, использование которых нормативно закреплено в Положении о единой технической политике ОАО «Российские сети». Надежность эксплуатации СПЭ-кабелей обусловлена высоким уровнем технологии их производства, прокладки и монтажа. Однако из-за развития электрических (ЭТ) и водных (ВТ) триингов на микродефектах в толще СПЭ-изоляции этих кабелей происходит ее деградация [1, 2]. В зависимости от потока перенапряжений (коммутаций) и их параметров это приводит к снижению электрической прочности и сокращению ресурса изоляционной конструкции КЛ.

Пробой изоляции КЛ возможен как в режиме текущей эксплуатации, так и при высоковольтных испытаниях. Поэтому актуальным является анализ физических процессов, вызывающих снижение электрической прочности СПЭ-изоляции при воздействии напряжения в широком диапазоне частот.

Опасность развития пробоя кабеля и возникновения аварийной ситуации следует оценивать на основе анализа интегрального состояния изоляции (сопротивление изоляции, коэффициент абсорбции, $\text{tg}\delta$), а также уров-

ня кажущегося заряда, частоты следования импульсов частичного разряда (ЧР) и динамики их развития [3]. Это возможно с привлечением методов диагностирования со снятием напряжения, а также мониторинга ЧР в процессе эксплуатации. Наиболее перспективной задачей представляется оценка остаточного ресурса КЛ, однако ее решение сопряжено со сложностью взаимного учета ряда переменных факторов, обусловленных тепловым режимом КЛ (ток нагрузки, климатические условия, способ прокладки), параметрами воздействующих напряжений в нормальном и аварийных режимах эксплуатации, количеством КЗ в сети, значением токов КЗ и т. д.

Для обеспечения декларируемого производителями кабеля и арматуры срока службы силовых КЛ с СПЭ-изоляцией необходимо определить и нормативно закрепить требования, которые позволят повысить надежность и безопасность эксплуатации таких линий.

Анализ частотной зависимости электрической прочности и оценка скорости и времени развития канала пробоя

Кратковременная электрическая прочность СПЭ-изоляции нового кабеля (30 – 40 кВ/мм для классов 6 – 35 кВ и 60 – 70 кВ/мм для

Рис. 1

клас
типа
под
нуль
пла
ско
мно
доп
тов

↑

про
нос
кот
диз
туда
изол
опр
ряд
мая
част
паз

↓

тал
про
ден
 $E_{пр}$
ной
ног
мас
стел
СП
деф
рав
(50
фек
(50
час
ног
ляц
2,5
СП

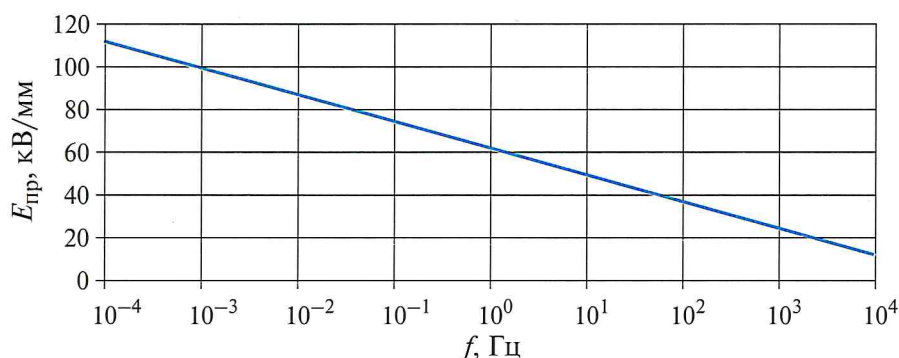


Рис. 1. Гипотетическая частотная зависимость электрической прочности СПЭ-изоляции нового промышленного кабеля без механических дефектов

классов 110 – 500 кВ) зависит от размера и типа микродефектов, определяемых чистой подаваемом в технологический экструдер гранулированного полиэтилена, параметрами расплава экструдата (вязкостью, температурой, скоростью подачи), гладкостью поверхности многопроволочной жилы и т. д. Предельные допустимые размеры технологических дефектов регламентированы ГОСТ Р 55025–2012 [4].

Механизм снижения кратковременной прочности СПЭ-изоляции связан с интенсивностью разрядных процессов в каналах ЭТ, которая повышается с ростом температуры диэлектрика и напряженности поля. Амплитуда, форма и частота приложенного к СПЭ-изоляции напряжения в значительной мере определяют скорость роста ЭТ и канала разряда. Экспериментально подтверждена прямая зависимость скорости развития ЭТ от частоты воздействующего напряжения в диапазоне до 2 кГц [5].

На модели силового кабеля экспериментально был показан характер снижения прочности с ростом частоты для неповрежденной СПЭ-изоляции [6]. На частоте 50 Гц $E_{пр} \approx 85$ кВ/мм, т. е. в 2,12 раза выше исходной прочности СПЭ-изоляции промышленного кабеля среднего напряжения [2]. Приняв масштабный коэффициент 1:2,12, оценим степень снижения $E_{пр}$ с ростом частоты. Для СПЭ-изоляции промышленного кабеля без дефектов значения прочности принимаются равными 73,4 кВ/мм (0,1 Гц) и 40 кВ/мм (50 Гц), а для кабеля с механическими дефектами — 28,7 кВ/мм (0,1 Гц) и 19,5 кВ/мм (50 Гц) соответственно (рис. 1). Очевидно, на частоте 50 Гц наблюдается снижение пробивного напряжения из-за дефектов в СПЭ-изоляции в 2,05 раза, а на частоте 0,1 Гц — в 2,56 раза.

Из рис. 1 следует, что для кабельной СПЭ-изоляции без повреждений наибольшая

электрическая прочность достигается на низких частотах: на сверхнизких частотах (СНЧ) 0,01 – 0,1 Гц она в 2,15 – 1,84 раза превышает расчетное значение $E_{пр} = 40$ кВ/мм (50 Гц). С ростом частоты воздействующего на СПЭ-кабель напряжения от 50 Гц до 1 кГц прочность вулканизированной полимерной изоляции снижается в 1,7 раза, а с ее увеличением до 10 кГц — в 3,5 раза. Негативное воздействие высокочастотных перенапряжений на СПЭ и снижение времени до пробоя необходимо учитывать при расчете запаса по толщине изоляции при конструировании силовых кабелей.

Зная толщину дефектной изоляции СПЭ-кабеля (3,4 – 4,0 мм для кабелей 10 кВ; 5,5 мм для кабелей 20 кВ; 8,5 – 9,0 мм для кабелей 35 кВ), можно определить время развития его полного пробоя при заданном испытательном напряжении. В табл. 1 приведено время достижения полного пробоя СПЭ-изоляции с дефектами в зависимости от значения, формы и частоты приложенного напряжения. Данные получены с использованием значений скорости развития канала пробоя в СПЭ-изоляции, указанных в стандарте [7].

Результаты, представленные в табл. 1, позволяют сделать вывод, что расчетная рекомендуемая длительность высоковольтных испытаний для выявления выраженных дефектов в СПЭ-изоляции составляет при приложении напряжения $3U_0$ синусоидальной формы (0,1 Гц) не менее 19 – 22 мин для КЛ 10 кВ, 26 – 30 мин для КЛ 20 кВ и 40 – 50 мин для КЛ 35 кВ. Это согласуется с результатами высоковольтных испытаний на СНЧ нескольких тысяч КЛ номинальным напряжением 15 кВ с СПЭ-изоляцией [8], которые показали, что 68 % дефектов выявляются после 12 мин испытаний, 89 % — после 30 мин, 96 % — после 45 мин и 100 % — после 60 мин.

Таблица 1

Номинальное напряжение кабеля, кВ	Частота приложенного напряжения относительно U_0					
	50 Гц		0,1 Гц “синус”		0,1 Гц “прямоугольный косинус”	
	Скорость роста канала пробоя при испытательном напряжении, мм/ч					
	$2U_0$	$3U_0$	$2U_0$	$3U_0$	$2U_0$	$3U_0$
	1,7 – 2,4	2,2 – 5,9	2,3	10,9 – 12,6	1,4	3,4 – 7,8
Время до пробоя, ч						
10	1,42 – 2,35	0,58 – 1,82	1,48 – 1,74	0,32 – 0,37	2,43 – 2,86	0,44 – 1,18
20	2,29 – 3,24	0,93 – 2,50	2,39	0,44 – 0,50	3,93	0,71 – 1,62
35	3,54 – 5,29	1,44 – 4,09	3,70 – 3,91	0,67 – 0,83	6,07 – 6,43	1,09 – 2,65

Результаты диагностических обследований

Рассмотрим количественные показатели на основе опыта эксплуатации кабелей напряжением 10 кВ с СПЭ-изоляцией в системах электроснабжения ряда промышленных предприятий. Первые прокладка, монтаж четырех линий и ввод их в эксплуатацию состоялись в 1996 г., а массовое использование СПЭ-кабелей началось в 2003 – 2005 гг. Общая длина КЛ на основе кабелей с СПЭ-изоляцией равняется 684,1 км (из них одножильных кабелей — 244,3 км, трехжильных — 439,8 км). Из общего количества эксплуатируемых на предприятиях КЛ (1848) за период до 2012 г. произошло 146 повреждений (100 %), в том числе в концевых муфтах — 134 (91,8 %), в соединительных муфтах — 7 (4,8 %), на строительных длинах кабеля — 5 (3,4 %). Главная причина выхода из строя КЛ с СПЭ-изоляцией — некачественный монтаж кабельной арматуры: разбор части поврежденных муфт показал, что с ним связано 96,6 % случаев выхода из строя КЛ 10 кВ с СПЭ-изоляцией в рассматриваемых сетях.

Детальный анализ повреждений свидетельствует, что в 65 случаях (44,5 %) аварийного отказа КЛ проводились приемо-сдаточные либо периодические испытания выпрямленным напряжением 15 – 60 кВ длительностью 5 – 15 мин согласно нормам испытаний постоянным напряжением по ПУЭ (п. 1.8.40), ПТЭЭП (п. 6.3, 6.9), РД 34.45-51.300-97 “Объем и нормы испытаний электрооборудования” (п. 29.2), которые были разработаны для кабелей с БПИ, но неприемлемы для СПЭ-кабелей.

Отмечено, что 55 случаев повреждений (37,7 %) имели место при наличии вакуумных коммутационных аппаратов на соответствующих присоединениях, однако из них в

28 случаях (19,2 %) негативным фактором с условно “большим” весовым коэффициентом являются испытания выпрямленным напряжением. Поэтому можно считать, что “чистое” влияние на прочность СПЭ-изоляции ВЧ перенапряжений, возникающих при коммутациях, имело место лишь в оставшихся 27 случаях (18,5 %).

Повреждения элементов КЛ в пределах одного объекта происходили, как правило, в течение относительно небольшого промежутка времени (не более 1,5 – 2 лет с момента ввода в эксплуатацию), после чего ситуация с отказами стабилизировалась и повреждения практически прекратились.

При известных длине СПЭ-кабелей и сроке эксплуатации была оценена удельная повреждаемость: она составила 2,37 – 3,04 на 100 км/год. Это как минимум на порядок превышает достигнутый в странах Европы и США уровень повреждаемости КЛ на основе СПЭ-кабелей среднего напряжения (0,005 – 0,200 на 100 км/год). В электросетевых компаниях России средний уровень рассматриваемой удельной повреждаемости равен 0,25 – 1,50 на 100 км/год.

Выполненные ООО “Болид” в 2011 – 2014 гг. экспериментальные исследования по диагностированию и детализации причин повреждаемости КЛ 10 кВ с СПЭ-изоляцией подтвердили приведенные данные. Степень старения СПЭ-изоляции силовых КЛ в эксплуатации определяется согласно классификации и по критериям оценки, представленным в табл. 2.

Ниже приведены результаты диагностирования состояния КЛ с СПЭ-изоляцией в сетях 10 кВ за 2011 – 2014 гг. (суммарная длина

К
Ф
со

Нор

Работоспособное

Уху

Пре
аваКЛ
ме
Сос
Раб
Раб
огр
Раб
огр
Уху
Првве
кле
бел
На
та
дл
ти

Таблица 2

Классификация состояния	Максимальное значение кажущегося заряда ЧР в локальном дефекте, пКл	Средняя частота возникновения ЧР в локальном дефекте, с ⁻¹	Действующее напряжение возникновения ЧР (для кабелей 10 кВ), кВ	Степень старения изоляции	Рекомендации персоналу при проведении технического обслуживания и ремонтов
Норма	≤ 1200	≤ 0,066	≥ 10,0	Старение/увлажнение отсутствует	Эксплуатация без ограничений, техническое обслуживание согласно нормативной документации, диагностирование — через 3 — 5 лет
Работоспособное	с незначительными отклонениями 1200 — 4400	0,066 — 0,150	10,0 — 8,0	Низкая степень старения, наличие дефектов фиксируется отдельными методами контроля	
	со значительными отклонениями 4400 — 7500	0,15 — 0,23	8,0 — 6,0	Средняя степень старения, наблюдается тенденция дальнейшей деградации изоляции	
Ухудшенное	7500 — 10 500	0,23 — 0,70	6,0 — 3,2	Сильное старение, ресурс изоляции ограничен	Плановая замена кабеля/участка кабеля или плановое определение причин ухудшенного состояния (проведение испытаний повышенным напряжением СНЧ, неразрушающий контроль) и устранение причин ухудшенного состояния — в течение 1 года
Предварийное	> 10 500	> 0,7	< 3,2	Предельная степень старения или наличие локального дефекта	Перевод потребителя на резерв, немедленный вывод кабеля из эксплуатации с ремонтом или заменой

КЛ — 84,8 км), выполненного методами измерения $\operatorname{tg} \delta$ и локализации ЧР:

Состояние КЛ	Количество КЛ (%)
Работоспособна	130 (49,8)
Работоспособна с незначительными ограничениями	57 (21,9)
Работоспособна со значительными ограничениями	40 (15,3)
Ухудшенное	11 (4,20)
Предварийное	23 (8,80)
Итого 261 (100)	

Диагностируемые линии с изоляцией были введены в эксплуатацию в 2007 — 2011 гг., прокладка выполнена преимущественно в кабельных полуэтажах с выходом на эстакады. Нагрузка КЛ в нормальном режиме эксплуатации не превышала 30 — 50 % номинальной для конкретных типов кабеля. Следует отметить, что в числе обследованных линий 13

(14,7 %) не прошли испытаний оболочки выпрямленным напряжением 10 кВ в течение 1 ÷ 10 мин.

Как видно из приведенных данных, каждая одиннадцатая КЛ подлежит немедленному ремонту. Это связано с критическими уровнями ЧР (см. табл. 2) и недопустимым ростом $\operatorname{tg} \delta$: в 5 — 10 раз и более относительно значений $(0,8 \div 1,2) \cdot 10^{-3}$ при воздействии приложенного напряжения $(1 \div 2)U_0$. Характерные диаграммы распределения ЧР в СПЭ-изоляции кабелей представлены на рис. 2 и 3. Регистрируемые ЧР сконцентрированы в точках повышенных градиентов поля на дефектах и выступах жилы и металлического экрана, а также в точках ненормативного перегиба кабеля, где возникают механические перенапряжения (см. рис. 2).

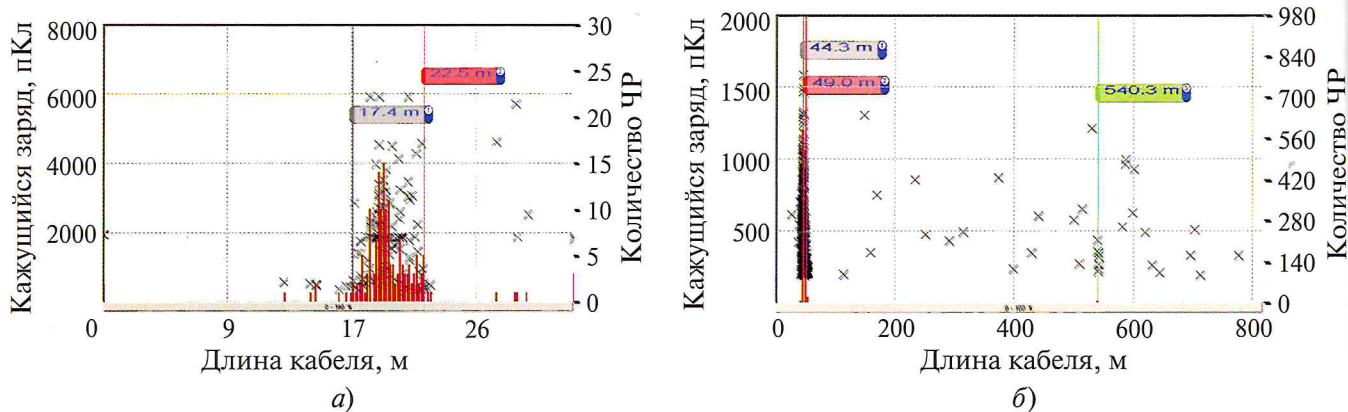


Рис. 2. Характерные диаграммы локализации в СПЭ-изоляции ЧР, вызванных механическими перенапряжениями в местах перегиба кабеля:

а — отметка 17,4 – 22,5 м, $q_{max} = 6000$ пКл; б — отметка 44,3 – 49,0 м, $q_{max} = 1200$ пКл

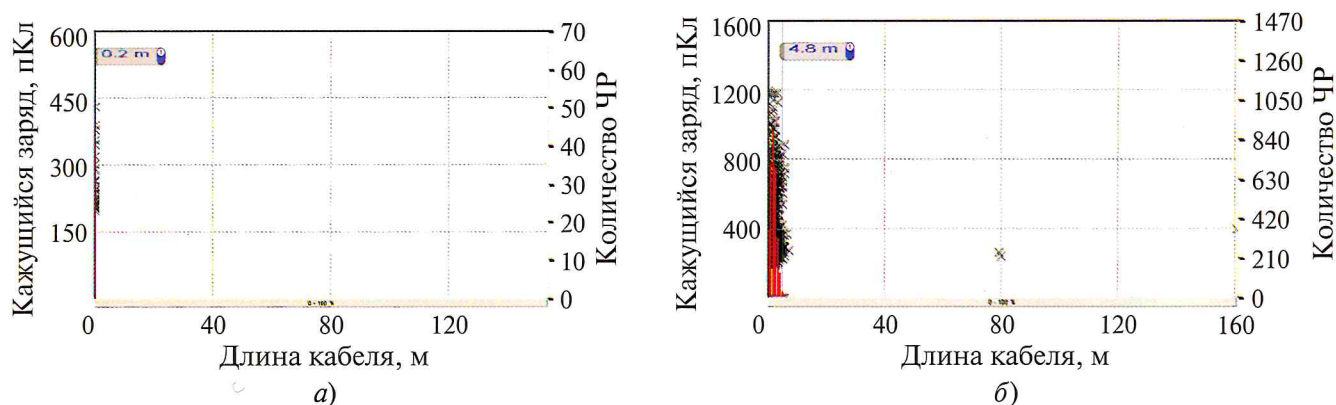


Рис. 3. Характерные диаграммы локализации в концевой муфте СПЭ-кабеля ЧР, обусловленных дефектами монтажа:

а — на момент первого измерения ($q_{max} = 300$ пКл); б — при повторном измерении спустя 3 года ($q_{max} = 1000$ пКл)

Повторное диагностирование, выполненное на четырех трехжильных КЛ спустя 3 года после ввода в эксплуатацию (см. рис. 3), показало, что амплитуда ЧР (уровень кажущегося заряда q_{max}), локализованных в концевых муфтах, возросла в среднем в 3 раза, а частота следования — в 20 раз.

Типичные дефекты, характеризующие повреждение основной изоляции кабеля, в подавляющем большинстве случаев обнаруживаются в концевых и соединительных муфтах. В то же время источниками ВТ являются, как правило, грубые повреждения наружной оболочки (проколы, царапины, задиры) при протяжке, приводящие к нарушению продольной и поперечной герметизации кабельной конструкции.

Наибольшее количество дефектов (78 %) в обследованных СПЭ-кабелях и муфтах связано с ошибками монтажа муфт и нарушением технологии прокладки кабелей; эксплуатационные и производственные дефекты в сумме составили 12 % потенциальных точек пробоя изоляции. Также выявлено, что около 10 %

от общего числа обследованных КЛ не содержат опасных дефектов, что не исключает возможности развития в изоляции этих линий водных триингов, которые практически не диагностируются современными методами неразрушающего контроля. Это обусловлено тем, что ВТ, представляющие собой комбинации деструктированного полимера и воды, обладают слабыми электроизоляционными свойствами и могут не приводить к заметному снижению сопротивления изоляции и повышению $\text{tg } \delta$. Для формулирования достоверного заключения о техническом состоянии линии с СПЭ-изоляцией необходимо сопоставлять результаты измерений по разным фазам каждой линии и по однотипным КЛ в подобных условиях эксплуатации.

Рекомендации по обеспечению нормативного срока службы КЛ

Кажущийся заряд, напряжения возникновения и гашения ЧР в газовоздушных полосках СПЭ-изоляции и частота следования ЧР —

значе
щие
микр
поли
явлен
польз
напр
обсл
метр
сти
ции
и мс
щью
на л
роят
введ
повы
им 1
отне
альн
ские
зици
регул
ции).
ких
вок
реак
окис
(обес
энер
дяди
соста
щити
Э
посл
тими
испо
авто
фиде
При
соед
ком
мые
рост
ния
пи 1
лива
и ц
дрят
мым
С
наде
изол
ров
тани
2013

значимые диагностируемые факторы, влияющие на скорость развития ЭТ по границам микродефектов, а значит, и канала пробоя в полимерном диэлектрике. Своевременное выявление дефектов в кабеле возможно с использованием щадящего метода испытаний напряжением СНЧ, а также диагностических обследований, включающих измерение параметров и локализацию ЧР. Контроль скорости развития дефектов в толще СПЭ-изоляции в условиях эксплуатации затруднителен и может быть частично реализован с помощью специальных устройств мониторинга ЧР на линии. Для кардинального снижения вероятности аварийных отказов КЛ необходимо внедрять комплекс мер, направленных на повышение стойкости СПЭ-изоляции к обоим видам триингов. К таким мерам можно отнести **конструктивные** (продольную и радиальную герметизацию кабелей), **технологические** (повышение чистоты полимерной композиции, оптимизацию режимов экструзии и регулярную ревизию оборудования вулканизации), **химические** (применение триингостойких полимерных композиций, введение добавок на стадии полимеризации, вступающих в реакцию с водой, а также препятствующих окислению полимера), **эксплуатационные** (обеспечение соответствия качества электроэнергии требованиям ГОСТ, внедрение щадящих и неразрушающих методов контроля состояния СПЭ-изоляции и устройств ее защиты от высокочастотных перенапряжений).

Эффективным мероприятием для защиты от последствий замыканий на землю является оптимизация режима заземления нейтрали сети с использованием высоковольтных резисторов и автоматическим отключением поврежденного фидера с минимальной выдержкой времени [3]. При наличии вакуумных выключателей на присоединениях с кабелями с СПЭ-изоляцией рекомендуется применять *RC*-цепи, включаемые по схеме "фаза-фаза" для исключения роста емкостного тока однофазного замыкания [9], системы *ZORC* (комбинация *RC*-цепи и ограничителя перенапряжений, устанавливаемого параллельно линейному резистору) и продольные *RL*-фильтры [10], а также внедрять вакуумные выключатели с управляемым моментом коммутации [11].

Одно из эффективных средств повышения надежности эксплуатации кабелей с СПЭ-изоляцией — рациональный выбор параметров и периодичности высоковольтных испытаний [3]. Введенный в действие 1 июля 2013 г. ГОСТ Р 55025–2012 [4] содержит гар-

монизированные с международными нормами МЭК и CENELEC требования к качеству кабельной продукции с СПЭ-изоляцией и соответствующим процедурам контроля для производителя. В указанном стандарте приведены нормы высоковольтных испытаний после прокладки и монтажа: в п. 10.6 регламентируется возможность испытания КЛ переменным напряжением $3U_0$ частотой 0,1 Гц в течение 60 мин, что соответствует рекомендуемым европейским нормам. Однако для повышения надежности эксплуатации КЛ с СПЭ-изоляцией необходимо в формате единого стандарта реализовывать как методические, так и практические мероприятия, позволяющие обеспечить срок службы КЛ, близкий к нормативному (30 лет).

Методические мероприятия:

уточнение математических моделей развития пробоя кабельной изоляции, что позволит корректно оценивать влияние первичных параметров сети на протекание электромагнитных процессов и выбирать оптимальные устройства защиты изоляции новых и изношенных кабельных сетей;

разработка инженерных методик оценки остаточного ресурса КЛ с полимерной изоляцией при разных сроках эксплуатации (из-за сложности эта задача сегодня полностью не решена);

разработка новых конструкций соединительных и концевых муфт, оптимизация геометрии полевывравнивающих элементов в кабельной арматуре;

разработка и внедрение отраслевой нормативно-технической документации по выбору, прокладке, монтажу и эксплуатации КЛ на основе кабелей с СПЭ-изоляцией.

Практические мероприятия:

модернизация технологии изготовления кабельной изоляции из СПЭ и СПЭ-композиций для сокращения скорости прорастания триингов и минимизации геометрических размеров дефектов на этапе производства;

внедрение норм и методов входного контроля кабелей, арматуры и материалов для экспертной оценки их качества и предотвращения прокладки и монтажа бракованной и фальсифицированной продукции;

контроль за соблюдением требований производителя кабельной продукции на каждом этапе монтажа и прокладки КЛ;

применение щадящих и неразрушающих методов контроля и испытаний: высоковольтных испытаний напряжением СНЧ, диагностических обследований после прокладки и

монтажа КЛ, а также через 1,5 – 2 года после ввода в эксплуатацию; составление диагностических паспортов КЛ, накопление базы диагностических данных по каждой линии.

Предлагаемые мероприятия реализованы в разработанных с участием авторов статьи стандартах ОАО “МРСК Сибири” и ОАО “Ленэнерго” по выбору, прокладке и технологии эксплуатации силовых КЛ с СПЭ-изоляцией напряжением 6 – 110 кВ.

Выводы

1. Электрическая прочность неповрежденной кабельной СПЭ-изоляции снижается с ростом частоты приложенного напряжения от СНЧ до единиц мегагерц. Дефекты в полимерной изоляции приводят к уменьшению ее прочности более чем в 2 раза в диапазоне частот 0,1 – 50 Гц.

2. Оптимальная длительность высоковольтных испытаний частотой 0,1 Гц для выявления опасных (развитых) дефектов в СПЭ-изоляции с вероятностью не ниже 0,95 составляет 45 – 60 мин.

3. Разработанные классификацию и критерии оценки технического состояния силовых кабелей на основе диагностической информации о максимальном значении, средней частоте и действующем напряжении возникновения ЧР в локальном дефекте СПЭ-изоляции рекомендуется использовать при их эксплуатации.

4. Предложенный комплекс мероприятий, направленных на обеспечение нормативного срока службы КЛ с полимерной изоляцией, должен быть закреплен в национальном стандарте для эксплуатирующих организаций.

Список литературы

1. **Morshuis P. H.** Degradation of Solid Dielectrics due to Internal Partial Discharges: Some thoughts on

progress made and where to go now. — IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, vol. 12, No. 5.

2. **Образцов Ю. В.** Отечественные кабели среднего и высокого напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена для линий электропередачи. — Кабель-News, декабрь 2009 — январь 2010.
3. **Ширковец А. И.** Технология эксплуатации и критерии отбраковки кабелей среднего напряжения с изоляцией из сшитого полиэтилена. — Энергетик, 2011, № 10.
4. **ГОСТ Р 55025–2012.** Кабели силовые с пластмассовой изоляцией на номинальное напряжение от 6 до 35 кВ включительно. Общие технические условия.
5. **Effect of Applied Voltage Frequency on Electrical Treeing in 22 kV Cross-Linked Polyethylene Insulated Cable / R. Thiamsri, N. Ruangajonmathee, A. Oonsivilaiand, B. Marungsri.** — World Academy of Science. Engineering and Technology, 2011, vol. 5.
6. **Gockenbach E., Hauschild W.** The Selection of the Frequency Range for High-voltage On-site Testing of Extruded Cable Systems. — IEEE Insulation Magazine, 2006, vol. 16, No. 6.
7. **IEEE Std. 400TM-2001** Guide for Field Testing and Evaluation of the Insulation of Shielded Power Cable Systems (Руководство по полевым испытаниям и оценке состояния изоляции экранированных силовых кабельных систем).
8. **Moh S. C.** Very low Frequency Testing — Its Effectiveness in Detecting Hidden Defects in Cables. — CIRED, Barcelona, 2003.
9. **Пат. 2305887 РФ. МПК Н 02 Н 9/04, Н 02 J 3/20.** Высоковольтная электрическая сеть с электродвигателями / В. Е. Качесов. — Оpubл. в бюлл. 2007, № 25.
10. **Protecting distribution transformers against Very Fast Transients due to switching operation / D. Smulaga, W. Piasecki, M. Ostrogorska, and others.** — Modern Electric Power Systems, Wroclaw, Poland, 2010 (www.meps10.pwr.wroc.pl, ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp/06007272.pdf).
11. **Пат. 2432635 РФ. МПК Н 01 Н 33/666, Н 01 Н 83/00.** Синхронный вакуумный коммутационный аппарат / И. А. Лебедев, С. И. Одокиенко, Е. В. Прохоренко. — Оpubл. в бюлл., 2011, № 30.

nio_bolid@mail.ru

The factors reducing the electrical strength of cross-linked polyethylene (XLPE) cable insulation and causes of damage in operation

Shirkovets A. I., Liske A. G.

The results of studying the mechanisms of in-service reduction of the electric strength of cables with cross-linked polyethylene (XLPE) insulation are presented. It is shown that breakdown-path propagation rate in XLPE cable insulation is proportional to the amplitude and frequency of the applied voltage. Proceeding from the operating experience and diagnostics of XLPE insulation of power cables we actualized the causes of damaging the elements of cable lines (CL) and present the classification and criteria for in-service evaluation of technical condition of power cables. Data of the research are used to provide guidance and action-oriented recommendations for the project and operating entities aimed at ensuring rated lifetime of cable lines with cross-linked polyethylene insulation.

Keywords: cross-linked polyethylene (XLPE), breakdown strength, cable line, frequency of the applied voltage, electrical tree, causes of damage, rated (standard) service life.

1 о
дар
тов.
“Д
уст:
ГО
янь
при
под
тич
ГО
лог.
ГО
201.
тре

Д
на
пе

Пр
* Е
клик
вет

1 Г
га
“Т
нь
пл
2 За
3 И:
же
ле
4 Н:
ско
5 Н:
6 Н:
чес