

КАБЕЛИ С ИЗОЛЯЦИЕЙ ИЗ СШИТОГО ПОЛИЭТИЛЕНА И ИХ ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

В.Н.Радкевич, к.т.н., доцент кафедры “Электроснабжение” БНТУ

Р.В.Романов, зам. главного инженера Минских кабельных сетей

Силовые кабели с полимерной изоляцией предназначены для передачи и распределения электроэнергии в стационарных установках при температуре окружающей среды от -50 до $+50^{\circ}\text{C}$ на линиях с неограниченной разностью уровней прокладки. Кабели с пластмассовой изоляцией просты при монтаже, экологичны (вследствие отсутствия в них масел и битума), имеют высокие эксплуатационные характеристики. Полимерная изоляция жил кабеля в отличие от бумажной не впитывает влагу и, следовательно, не требует металлической защитной оболочки. Наружная оболочка также изготовлена из пластмассы, что существенно снижает стоимость кабеля.

Сравнительно ограниченная химическая стабильность, высокие коэффициенты теплового расширения и термопластичность полимерных материалов оказывают негативное влияние на электрические и механические характеристики изоляции кабелей. В силу указанных причин кабели с пластмассовой изоляцией нашли широкое применение в основном в электрических сетях (ЭС) напряжением до 1 кВ. Как правило, используются кабели с изоляцией из поливинилхлоридного пластиката, который по основным электрическим характеристикам уступает полиэтилену. В ЭС напряжением выше 1 кВ кабели с полимерной изоляцией применяются крайне редко. Сети напряжением 6 (10) кВ выполняются кабелями с бумажной пропитанной изоляцией, несмотря на присущие им недостатки. Сложившийся подход фактически узаконен действующей нормативно-технической документацией [1], в которой недостаточное отражение нашли основные положения по применению кабелей с пластмассовой изоляцией в электроустановках напряжением выше 1 кВ.

Поиски путей повышения химической, механической и термической стойкости полимеров привели к идее “сшивки” полиэтилена, реализованной в 70-х гг. прошлого столетия. Под сшивкой понимается процесс создания пространственной решётки в полиэтилене высокой плотности путём образования продольно-поперечных связей между макромолекулами пластмассы. Чем больше степень сшивки, тем прочнее полиэтилен и тем выше его хрупкость. Поэтому весьма важно уста-

новить оптимальную степень сшивки полиэтилена для кабельной изоляции.

В результате сшивки улучшаются механические свойства, повышается химическая и температурная стойкость, уменьшается пластичность полиэтилена.

Промышленностью освоено три основных способа сшивки полиэтилена:

- пероксидная (нагрев в присутствии пероксидов);
- силановая (обработка влагой полиэтилена высокой плотности, в который предварительно был имплантирован силан и катализатор);
- радиационная (поток элементарных частиц).

При производстве кабелей напряжением до 500 кВ применяется пероксидный способ, при котором степень сшивки полиэтилена должна быть не ниже 75%. Силановый способ (степень сшивки — 65%) используется при выпуске кабельной продукции напряжением до 33 кВ. Исторически сложилось так, что наибольшее распространение получила технология пероксидной сшивки, осуществляемая в среде нейтрального газа при давлении 0,8–0,9 МПа и температуре 285–400 $^{\circ}\text{C}$. Однако строго не доказано, что именно этот способ имеет преимущества перед другими.

Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) на напряжение выше 1 кВ выпускаются одно- и трёхжильными. В соответствии с ГОСТ 24183–80 сечения многожильных кабелей напряжением до 35 кВ должны быть не более 300 мм², а одножильных — 1000 мм². Таким образом, одножильная конструкция кабеля позволяет повысить пропускную способность линий электропередачи за счёт увеличения сечения жилы и расширить область применения кабелей с пластмассовой изоляцией до напряжения 500 кВ. Одножильные кабели легче прокладывать и монтировать как в кабельных сооружениях, так и в земле. При этом кабели могут располагаться в одном горизонтальном ряду с расстоянием между ними в свету, равным диаметру кабелей, или треугольником вплотную.

Одножильный кабель напряжением 6 (10) кВ имеет круглую многопроволочную жилу из алюминия или меди, покрытую полупроводящим слоем, изоляцию из СПЭ, электромагнитный экран из медной проволоки и ленты, оболочку из полиэтилена повышенной твёрдости или поливинилхлоридного пластиката пониженной горючести. Между изоляцией жилы и проволочным экраном размещается полупроводящий слой (экран), способ-

ствующий выравниванию электрического поля в высоковольтном кабеле. Полупроводящие слои выполнены из СПЭ, чем обеспечиваются одинаковые температурные коэффициенты объёмного расширения экранов и изоляции с целью исключения возможности образования газовых включений, которые являются очагами ионизации в кабеле.

Изоляция жил и электропроводящие экраны из полиэтилена изготавливаются методом тройной экструзии, после чего сшиваются все три слоя. Экструзия заключается в непрерывном выдавливании размягчённой пластмассы через отверстия определённого размера на специальной установке — экструдере.

Современная технология обеспечивает надёжную адгезию (сцепление поверхностей разнородных тел) между экранами и изоляцией и исключает газовые включения по всей толщине изоляции, а также на границе с экранами. Для обеспечения продольной герметизации экрана в кабеле могут использоваться водоблокирующие ленты.

В табл.1 приведены некоторые сравнительные характеристики кабелей напряжением 10 кВ с изоляцией из СПЭ и пропитанной бумаги.

Как видно из табл. 1, кабели с изоляцией из СПЭ обладают лучшими техническими характери-

стиками. Более высокая допустимая температура жил и меньшее термическое сопротивление изоляции, обеспечивающее лучший отвод теплоты в окружающую среду, определяют большую пропускную способность кабелей с изоляцией из СПЭ по сравнению с кабелями с бумажной изоляцией при одинаковом сечении жил.

В табл. 2 и 3 приведены длительно допустимые токи для трёхжильных кабелей с алюминиевыми и медными жилами с бумажной изоляцией (типа ААБ, АБ, АСБ, СБ и т.п.) и одножильных кабелей с изоляцией из СПЭ (типа АПВП, ПВП, АПВВ, ПВВ и т.п.) при прокладке в земле для температуры окружающей среды +15°С (перед чертой) и в воздухе — для температуры среды +25°С (за чертой).

В табл. 4 даны кратности длительно допустимых токов одножильных кабелей с полиэтиленовой изоляцией по отношению к допустимым токам трёхжильных кабелей с бумажной изоляцией. Как видно, линия напряжением 10 кВ, состоящая из трёх одножильных кабелей с изоляцией из СПЭ, обладает значительно большей пропускной способностью, чем линия с таким же сечением жил, выполненная трёхжильным кабелем с бумажной пропитанной изоляцией. При прокладке в одной

Таблица 1. Характеристики кабелей напряжением 10 кВ

Характеристика	Кабель с изоляцией	
	из СПЭ	бумажной
Длительно допустимая температура нагрева жил, °С	90	70
Предельно допустимая температура жил при протекании тока короткого замыкания, °С	250	200
Относительная диэлектрическая проницаемость при температуре +20°С	2,4	4,0
Коэффициент диэлектрических потерь при температуре +20°С	0,001	0,004
Удельное тепловое напряжение материала изоляции жил, см·К/Вт	300–400	500–650

Таблица 2. Допустимый длительный ток для кабелей напряжением 10 кВ с алюминиевыми жилами

Площадь сечения жилы, мм ²	Допустимый ток, А		
	трёхжильных кабелей с бумажной изоляцией	одножильных кабелей при расположении	
		треугольником	в одной плоскости
50	140/105	170/185	175/225
70	165/130	210/235	215/280
95	205/155	250/285	260/340
120	240/285	280/330	295/390
150	275/210	320/370	330/440
185	310/235	360/425	375/505
240	355/270	415/505	440/595
300	—	475/580	495/680
400	—	540/675	570/770
500	—	610/780	650/865
630	—	680/910	750/1045
800	—	735/1050	820/1195

плоскости допустимые по нагреву токи одножильных кабелей несколько больше, чем при расположении треугольником (в среднем на 6,3% — при прокладке в земле и на 15,55% — в воздухе). Отметим также, что при прокладке в воздухе одножильные кабели с изоляцией из СПЭ допускают существенно большие токи, чем при прокладке в земле, что не характерно для трёхжильных кабелей с бумажной изоляцией.

Важнейшими характеристиками кабелей являются их активные и индуктивные сопротивления. В справочной литературе и данных заводов-изготовителей для кабелей с изоляцией из СПЭ приводятся значения удельных сопротивлений жил постоянному току (омическое сопротивление) при температуре +20°C. При переменном токе 1000 А и более даже при частоте 50 Гц в проводниках проявляется поверхностный эффект, эффект близости и индуктивного переноса мощности, приводящие к перераспределению тока по сечению проводника и повышению его активного сопротивления. Увеличение сопротивления проводника при

переменном токе вызывает дополнительные потери активной мощности и электроэнергии. Отметим, что в установках с большими номинальными токами более благоприятным является симметрическое расположение кабелей треугольником. К сожалению, в технической литературе отсутствуют сведения о сопротивлении кабелей протеканию переменного тока большой величины.

Одножильные кабели с изоляцией из СПЭ допускают большие токи нагрузки при одном и том же сечении жил, чем трёхжильные кабели с бумажной изоляцией. Следовательно, для питания определённой нагрузки можно применять одножильные кабели меньшего сечения. С одной стороны, это снижает расход цветного металла и, как следствие, капитальные затраты на сооружение кабельной линии, а с другой — несколько увеличивает потери электроэнергии в ЭС. При работе кабелей с предельно допустимым током нагрузки жилы нагреваются до температуры 90°C, что обуславливает повышение потерь электроэнергии из-за увеличения активного сопротивления жил. Всё это

Таблица 3. Допустимый длительный ток для кабелей напряжением 10 кВ с медными жилами

Площадь сечения жилы, мм ²	Допустимый ток, А		
	трёхжильных кабелей с бумажной изоляцией	одножильных кабелей при расположении	
		треугольником	в одной плоскости
50	180/135	220/245	230/290
70	215/165	270/300	280/360
95	265/200	320/370	335/435
120	310/240	360/425	380/500
150	355/270	410/475	430/560
185	400/305	460/545	485/635
240	460/350	530/645	560/745
300	—	600/740	640/845
400	—	680/845	730/940
500	—	750/955	830/1050
630	—	830/1115	940/1160
800	—	920/1270	1030/1340

Таблица 4. Отношение длительно допустимых токов одножильных кабелей с изоляцией из СПЭ к токам трёхжильных кабелей с бумажной изоляцией (10 кВ)

Площадь сечения жилы, мм ²	Кабели с алюминиевыми жилами		Кабели с медными жилами	
	расположенные треугольником	расположенные в одной плоскости рядом	расположенные треугольником	расположенные в одной плоскости рядом
50	1,21/1,76	1,25/2,14	1,22/1,81	1,28/2,15
70	1,27/1,81	1,30/2,15	1,26/1,82	1,30/2,18
95	1,22/1,84	1,27/2,19	1,21/1,85	1,26/2,18
120	1,17/1,78	1,23/2,11	1,16/1,77	1,23/2,08
150	1,16/1,76	1,20/2,10	1,15/1,76	1,28/2,07
185	1,16/1,81	1,21/2,15	1,15/1,79	1,21/2,08
240	1,17/1,87	1,24/2,20	1,15/1,84	1,22/2,13

целесообразно учитывать при технико-экономическом сравнении вариантов ЭС.

Индуктивные сопротивления одножильных кабелей с изоляцией из СПЭ выше, чем жил того же сечения кабелей с бумажной изоляцией в среднем на 35,5% при расположении треугольником и на 106,65% — при прокладке рядом в одной плоскости. Следовательно, при наличии реактивных нагрузок потери напряжения в одножильных кабелях будут выше, чем в трёхжильных. Отметим, что при прокладке одножильных кабелей в одной плоскости индуктивное сопротивление жил примерно в 1,6 раза больше, чем при расположении треугольником.

Ёмкость одножильного кабеля сечением жилы 50–240 мм составляет 0,23–0,41 мкФ/км, в то время как трёхжильного кабеля — 0,29–0,46 мкФ/км. Ёмкость кабелей с изоляцией из СПЭ в среднем на 17% меньше, чем трёхжильных кабелей с бумажной пропитанной изоляцией. Следовательно, ёмкостные токи замыкания на землю при использовании одножильных кабелей с изоляцией из СПЭ в электроустановках с изолированной нейтралью будут меньше, что также можно отнести к достоинствам этих кабелей.

Основным преимуществом кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена является низкая удельная повреждаемость. В литературных источниках нет достоверной информации о параметрах потока отказов и времени восстановления трёхфазных линий 6 (10) кВ, выполненных одножильными кабелями с полимерной изоляцией, из-за незначительного опыта эксплуатации таких линий в Беларуси, России и других странах СНГ. Зарубежный опыт показывает, что процент электрических пробоев кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на 2–3 порядка ниже, чем кабелей с бумажной изоляцией [3]. Например, в Германии удельная повреждаемость кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, которые применяются в электрических сетях страны с 1982 г., составляет 0,02–0,05 1/год на 100 км, тогда как по данным [4] кабелей с бумажной изоляцией — 0,93–8,7 1/год на 100 км. Так как основным видом повреждения одножильных кабелей является, как правило, однофазное замыкание на землю в сетях с изолированной нейтралью и однофазное короткое замыкание в сетях с глухозаземленной нейтралью, то использование кабелей с полимерной изоляцией существенно снизит трудозатраты эксплуатационного персонала, свя-

занные с ремонтом линий. Годовые издержки эксплуатации уменьшаются также вследствие сокращения суммарных трудозатрат и затрат времени на поиск отказавшего участка распределительной линии, а также на восстановление электроснабжения потребителей из-за меньшего числа аварийных отключений. Надёжность электроснабжения потребителей, подключённых к распределительным сетям напряжением 6 (10) кВ, существенно повышается.

Широкому внедрению одножильных кабелей с полиэтиленовой изоляцией препятствует их относительно высокая стоимость из-за более сложной технологии производства, применения более дорогих материалов и большего их расхода. При одинаковой пропускной способности стоимость трёх одножильных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена на 50–60% больше, чем трёхжильного кабеля с бумажной изоляцией [3].

ВЫВОДЫ

Учитывая опыт зарубежных стран, можно полагать, что кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена будут постепенно вытеснять из применения кабели с бумажной изоляцией в системах электроснабжения городов и промышленных объектов. В первую очередь такие кабели целесообразно использовать на питающих линиях, при необходимости передачи большой мощности на относительно короткие расстояния, при большой разности уровней прокладки кабельных линий, а также при повышенных требованиях к надёжности электроснабжения потребителей электроэнергии. Их использование в перспективе может повлечь за собой изменение принципов построения схем электроснабжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок.— М.: Энергоатомиздат, 1985.— 640 с.
2. Ветхов П.С. СПЭ — кабель компании АББ “Москабель” // Новости электротехники.— 2003.— №2.
3. Ветхов П.С. Применение полиэтиленового кабеля среднего напряжения для промышленных предприятий // Промышленная энергетика.— 2001.— №8.
4. Справочник по проектированию энергосбережения / Под ред. Ю.Г.Барабина и др.— М.: Энергоатомиздат, 1990.— 576 с.