

УДК 621.3

Современные конструкции силовых кабелей

Веракса Р.В.

Научный руководитель - ассистент ЮРШО Е.Л.

Силовой кабель - это электрический кабель, предназначенный для передачи электроэнергии от места её производства (или преобразования) к промышленным предприятиям, силовым и осветительным установкам стационарного типа, транспортным и коммунальным объектам. Термин силовой кабель в общепринятом смысле относят обычно к кабелям на напряжение до 35 кВ, преимущественно с бумажной изоляцией, пропитанной вязким изоляционным составом. Для более высоких напряжений используют кабель с избыточным давлением масла.

Наиболее массовое применение нашли силовые кабели на напряжение до 10 кВ (рисунок 1.), содержащие три алюминиевые или (реже) медные токопроводящие жилы секторной формы сечением до 240 мм². Основная изоляция такого силового кабеля — спирально наложенные на каждую жилу бумажные ленты, пропитанные вязким изоляционным составом (75—85% минерального масла и 15—25% канифоли). Толщина изоляции жилы (фазной изоляции) зависит от номинального напряжения кабеля и составляет от 0,75 мм при 1 кВ до 2,75 мм при 10 кВ. На скрученные вместе изолированные жилы накладывают токо непроводящую поясную бумажную изоляцию, толщина которой примерно вдвое меньше толщины фазной. Поверх поясной изоляции методом прессования накладывают герметичную металлическую оболочку из свинца или алюминия (последний получает преимущественно распространение), а затем — защитный покров. Силовые кабели на напряжение 20 и 35 кВ имеют жилы круглой формы с фазной изоляцией толщиной до 9 мм; у каждой жилы — отдельная металлическая оболочка или экран из металлической фольги.

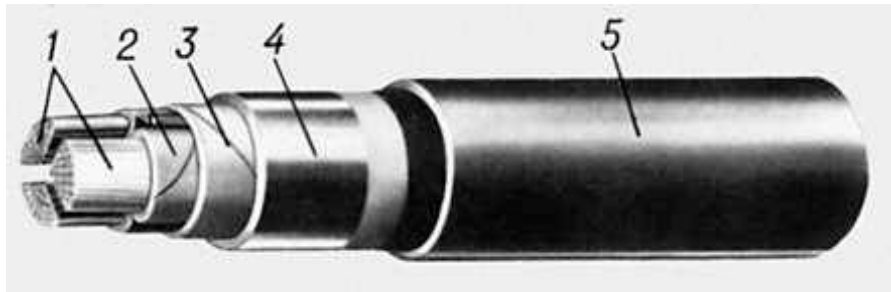


Рисунок 1 – Трёхжильный силовой кабель на напряжение 6 кВ: 1 — секторные многопроволочные алюминиевые жилы; 2 — фазная бумажная изоляция; 3 — поясная бумажная изоляция; 4 — алюминиевая оболочка; 5 — пластмассовая (поливинилхлоридная) защитная оболочка.

В диапазоне рабочих температур от 50 до 80 °С вязкость масляно-канифоливого состава снижается, поэтому на наклонных участках трассы прокладки силовых кабелей из-за постепенного стекания жидкой изоляции верхние участки силовых кабелей могут прийти в негодность. В связи с этим строго ограничивается максимально допустимая разность высот между верхней и нижней точками трассы (от 5 до 25 м для кабелей с напряжением соответственно от 35 до 1 кВ).

Основные направления совершенствования силовых кабелей — расширение выпуска кабелей с не стекающим пропиточным составом, позволяющим прокладывать трассы с крутонаклонными и вертикальными участками, а также переход от бумажной изоляции к полимерной (поливинилхлоридной, полиэтиленовой). Применение прогрессивных видов изоляции, помимо значительной экономии дефицитной бумаги, масел и канифоли, сокращает трудоёмкость и длительность технологических операций при производстве кабеля, уменьшает его массу, а также повышает допустимую рабочую температуру (силовой

кабель с изоляцией из вулканизируемого полиэтилена даже при температурах до 150 °С в течение некоторого времени сохраняет высокую стойкость к деформациям, что очень важно при коротких замыканиях). В последнее время набирают масштабы использования кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Существует также ряд инновационных решений в области кабельной промышленности. Одна из главных инноваций сегодня — сверхпроводящие кабели. Обычные медные кабели могут пропускать ток не больше тысячи ампер. Сверхпроводящие легко передают 5 кА. В прошлом году в Китае испытали кабель на 20 кА. В Южной Корее существует специальная государственная программа развития сверхпроводящих кабельных сетей. Каждый год на нее выделяется около 10 миллионов долларов США. Ясно, что в будущем нас ждет переход на сверхпроводящие кабели.

В настоящее время повысился интерес потребителей к новым кабелям с изоляцией из сшитого полиэтилена (рисунок 2.) (СПЭ, XLPE), которые в недалеком будущем заменят кабели с бумажно-пропитанной (БПИ) и поливинилхлоридной (ПВХ) изоляцией. Это связано с тем, что СПЭ-кабели обладают рядом значимых преимуществ:

- 1) за счет увеличения допустимой температуры жилы достигнута большая пропускная способность кабеля (в зависимости от условий прокладки, допустимые нагрузочные токи на 1/6 – 1/3 выше, чем у кабелей с бумажной изоляцией);
- 2) высокая устойчивость к влаге, при этом отпадает необходимость в металлической оболочке;
- 3) при коротком замыкании обеспечивается больший ток термической устойчивости;
- 4) изоляционные электрические характеристики выше, а диэлектрические потери ниже;
- 5) меньше допустимый радиус изгиба кабеля;
- 6) поскольку для изоляции и оболочки применяются полимерные материалы, то для прокладки кабелей при температурах -20°C их предварительный подогрев не требуется;
- 7) неограниченные возможности по прокладке кабелей на трассах с любой разностью уровней;
- 8) СПЭ-кабель имеет меньшие габариты и массу, как следствие прокладка кабеля, как в кабельных сооружениях, так и в грунте на сложных трассах становится легче.



Рисунок 2 – Кабели с изоляцией из сшитого полиэтилена

Основной особенностью СПЭ-кабелей является их принципиально новая изоляция — сшитый полиэтилен. Полиэтилен как изоляция известен достаточно давно. Но обычному термопластичному полиэтилену присущи серьезные недостатки, главным из которых

является резкое ухудшение характеристик при температурах, близких к температуре плавления. Изоляция из термопластичного полиэтилена начинает терять форму, электрические и механические характеристики уже при температуре 85 °С.

Изоляция из сшитого полиэтилена сохраняет форму, электрические и механические характеристики даже при температуре 130 °С.

Термин «сшивка» или «вулканизация» подразумевает обработку полиэтилена на молекулярном уровне. Поперечные связи, образующиеся в процессе сшивки между макромолекулами полиэтилена, создают трехмерную структуру, которая и определяет высокие электрические и механические характеристики материала, меньшую гигроскопичность, большой диапазон рабочих температур.

Наибольшее распространение получила технология пероксидной сшивки, когда сшивка полиэтилена происходит с использованием специальных химических веществ — пероксидов в среде нейтрального газа при определенных температуре и давлении. Такая технология позволяет получить достаточную степень сшивки по всей толщине изоляции и обеспечить отсутствие воздушных включений. Помимо хороших диэлектрических свойств, это и больший, чем у других кабельных изоляционных материалов, диапазон рабочих температур, и отличные механические характеристики. Пероксидная технология применяется при производстве кабелей среднего и высокого напряжений.

Менее распространенной является силанольная сшивка, при которой в полиэтилен добавляются специальные смеси (силаны) для обеспечения сшивки при более низкой температуре. Сектор применения этой более дешевой технологии охватывает кабели низкого и среднего напряжений.

На сегодняшний день многие страны уже положительно оценили эксплуатационные характеристики кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ) на среднее и высокое напряжение и практически полностью перешли на их использование. Так, например, составляющая доля всего рынка силовых кабелей равняется в США и Канаде – 85%, в Германии и Дании – 95%, а в Японии, Франции, Финляндии и Швеции в распределительных сетях среднего напряжения используется только кабель с изоляцией из СПЭ.

Прикладные исследования по использованию эффекта сверхпроводимости, достигаемого у сверхпроводящих материалов (сверхпроводников) при температурах ниже критических, ведутся уже на протяжении многих десятков лет. В начале 60-х годов на базе сверхпроводящих материалов и криогенной техники с использованием в качестве хладагента жидкого гелия (температура кипения жидкого гелия – 4,2 К при нормальном давлении) зародились низкотемпературные сверхпроводниковые технологии (НТСП-технологии). Основу освоенных промышленностью сверхпроводящих материалов составляли два вещества: сплав Nb-Ti (с параметрами: критическая температура – 9,6 К при нулевых магнитном поле и токе, критическое магнитное поле – 12 Тл при 4,2 К и нулевом токе, критическая плотность тока – $3 \cdot 10^9$ А/м² при 4,2 К и в магнитном поле 5 Тл) и интерметаллическое соединение Nb₃Sn (с параметрами: критическая температура – 18,3 К при нулевых магнитном поле и токе, критическое магнитное поле – около 22 Тл при 4,2 К и нулевом токе, критическая плотность тока – более 10^9 А/м² при 4,2 К и в магнитном поле 10 Тл). Стоимость первого материала составляла несколько долларов за 1 кА/м, стоимость второго была, примерно, равной 10 долларам за 1 кА/м.

Сверхпроводящие провода представляли собой сложные конструкции из разнородных материалов с ультратонкими нитями собственно сверхпроводника. Технология их изготовления была освоена в США, СССР, Японии, Германии, Англии. Были созданы жесткие и гибкие кабели переменного тока мощностью до 3 ГВА (рисунок 4.).

Несмотря на достигнутые успехи в области низкотемпературных сверхпроводников (НТСП), применение НТСП-кабелей сдерживалось не-обходимостью использования для охлаждения не возобновляемого и дорогостоящего жидкого гелия (цена жидкого гелия – 5–10 долларов за 1 литр).



Рисунок 4 – HTСП-кабель на 3 ГВА (разработка ВНИИКП)

Мощным толчком к развитию сверхпроводниковых технологий стало открытие в 1986 г. высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) с критическими температурами перехода в сверхпроводящее состояние, превышающими температуру 77,3 К, то есть температуру кипения жидкого азота при нормальном давлении. Соответственно, в ВТСП-технологиях появилась возможность использовать в качестве хладагента вместо не возобновляемого и дорогостоящего жидкого гелия (5–10 долларов за 1 литр) значительно более дешевый жидкий азот (0,1–0,3 долларов за 1 литр), упростить систему криостатирования, повысить ее надежность в эксплуатации, а также сократить эксплуатационные расходы.

Технология керамических сверхпроводников еще находится в стадии становления и развития. Однако уже к середине 90-х годов были разработаны конструкции 1-го поколения ВТСП-проводов на основе соединения $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_x$ (Bi-2223) (критическая температура – 104 К, критическая плотность тока – 108 А/м²). В настоящее время в США, Японии и странах Европы налажен опытно-промышленный выпуск ВТСП-проводов 1-го поколения на основе висмута с использованием так называемой технологии "порошок – в трубе", когда исходный порошок соединения запрессовывается в металлическую серебряную трубку, которая многократно обжимается и термообрабатывается. Эта технология сложна и дорога. Стоимость ВТСП-проводов (более 200 долларов за 1 кА/м) более чем на порядок превышает стоимость медного провода (около 15 долларов за 1 кА/м). По оценкам производителей при развитии массового производства стоимость ВТСП-проводов 1-го поколения может быть снижена до 50 долларов за 1 кА/м.

Значительные перспективы практического применения ВТСП-технологий открылись при появлении в 2002–2003 годах высокотемпературных сверхпроводников 2-го поколения на основе иттриевых керамик. Плотность тока в сверхпроводниках 2-го поколения в несколько раз выше, чем в сверхпроводниках 1-го поколения. Увеличение плотности тока и использование сравнительно недорогих материалов в сверхпроводниках 2-го поколения дают основание полагать, что стоимость ВТСП-проводов 2-го поколения при массовом производстве может снизиться до 20–30 долларов за 1 кА/м, что сделает сверхпроводящие кабели экономически более конкурентно-способными по отношению к кабелям традиционного исполнения.

В настоящее время два ВТСП-силовых кабеля длиной по 30 м каждый в течение нескольких лет успешно проходят испытания в реальных энергосистемах (проект Southwire и проект NKT Cable). Японская корпорация Sumitomo Electric совместно с энергетической компанией ТЕРСО завершила длительные испытания трехжильного ВТСП-кабеля на напряжение 66 кВ (1000 А) длиной 100 м. В 2003 г. группа компаний, включая корпорацию Sumitomo Electric и компанию Super Power, начала реализацию проекта по производству ВТСП-кабеля длиной 350 м с напряжением 34,5 кВ (800 А) для его прокладки между двумя подстанциями Нью-Йорка. Компания NEXANS и китайская компания Innorpower

Superconductor Cable ведут испытания трехфазного кабеля 35 кВ (2000 А) длиной 30 м, смонтированного на севере Китая в провинции Юннань.



Рисунок 5 – ВТСП-кабель 138 кВ (2400 А) длиной 660 м

Таким образом, находящиеся в настоящее время в опытно-промышленной эксплуатации сверхпроводящие силовые кабели имеют длину до 500-600 м. В ближайшие несколько лет их длина может быть увеличена до 3 км. Несмотря на достигнутые успехи в области низкотемпературных сверхпроводников (НТСП), применение НТСП-кабелей сдерживалось не-обходимостью использования для охлаждения не возобновляемого и дорогостоящего жидкого гелия (цена жидкого гелия – 5–10 долларов за 1 литр).

ТСП-кабели имеют два типа конструкции, принципиально отличающиеся друг от друга: ВТСП-кабели с холодным диэлектриком (CD) и ВТСП-кабели с теплым диэлектриком (RTD).

ВТСП-кабели по сравнению с традиционно применяемыми кабелями имеют существенные преимущества: большая пропускная способность при использовании более низкого класса номинального напряжения, при меньших потерях, меньшем весе и компактности; пожаробезопасность; экологичность и др. Проведенные сравнительные технико-экономические расчеты в НИЦ «Курчатовский институт», ВНИИКП, ВЭИ показали, что даже при сегодняшней высокой цене на ВТСП-материалы, полные затраты (учитывая прокладку и эксплуатационные расходы) для обычных кабелей и ВТСП-кабелей примерно одинаковы. Если в ближайшие годы разработчикам и производителям сверхпроводящих материалов удастся добиться существенного снижения цены на ВТСП-материалы, которые составляют до 90 % в стоимости кабеля, то выгода от применения ВТСП-кабелей станет очевидной.

Литература

1. Преимущества кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена. [Электронный ресурс] / :<http://www.elec.ru/articles/preimushestva-kabelej-sizolyaciej-izsshitogo-polie/>.
2. Калимуллина Д.Д., Гафуров А.М. Потребности в строительстве изолированных проводов среднего класса напряжения. // Инновационная наука. - 2016. - № 3-3. – С. 84-85.
3. Изоляционные материалы из сшитого полиэтилена. [Электронный ресурс] / Режим доступа: <http://propolyethylene.ru/shitij/izolyaziya.html>.

4. Калимуллина Д.Д., Гафуров А.М. Выбор экономически выгодных сечений проводов при строительстве линий электропередач. // Инновационная наука. - 2016. - № 3-3. – С. 90-91.
5. Сверхпроводящие кабели. [Электронный ресурс] /<http://pue8.ru/kabelnye-linii/134-sverhprovodyaschie-kabeli.html>