

交联聚乙烯 (XLPE) 绝缘电力电缆概论

王伟 阎孟昆 姜芸 严有祥 著



西北工业大学出版社

Jiaolian Juyixi (XLPE)

交联聚乙烯(XLPE)

Jueyuan Dianli Dianlan Gailun

绝缘电力电缆概论

王 伟 阎孟昆 著
姜 芸 严有祥

西北工业大学出版社

西 安

【内容简介】 本书从使用角度出发,详细论述了交联聚乙烯(XLPE)绝缘电力电缆(简称“XLPE 绝缘电缆”)材料、结构等方面的性能,以及理论数据和理论运算,并以此为基础重点讲述了 XLPE 绝缘电缆选型、安装、运行、维护以及电缆试验的标准和要求,介绍了一些电力部门使用该种电缆的经验及新技术的应用,并分析了 XLPE 绝缘电缆的发展趋势。

本书是使用 XLPE 绝缘电缆工程技术人员常备的学习和工作手册,也可供电力部门有关人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

交联聚乙烯(XLPE)绝缘电力电缆概论/王伟等
著. —西安:西北工业大学出版社,2018.7
ISBN 978-7-5612-6144-6

I. ①交… II. ①王… III. ①电力电缆—塑料绝缘
电缆—研究 IV. ①TM247

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2018)第 167882 号

策划编辑:雷 军
责任编辑:雷 军

出版发行:西北工业大学出版社
通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072
电 话:(029)88493844 88491757
网 址:www.nwpu.com
印 刷 者:西安新华印刷厂
开 本:850 mm×1 168 mm 1/32
印 张:22.5 插页 2
字 数:575 千字
版 次:2018 年 7 月第 1 版 2018 年 7 月第 1 次印刷
定 价:88.00 元

前 言

随着电力事业的飞速发展,电力电缆的使用量发生了惊人的变化,特别是近年来交联聚乙烯(XLPE)绝缘电力电缆(以下简称XLPE绝缘电缆)的使用,现场技术工人迫切需要了解有关新绝缘电缆——XLPE绝缘电力电缆——的技术性能、安装、运行、维护及电缆试验方面的知识。

目前有关油纸绝缘和充油纸绝缘电缆的教材较多,但还没有一本全面详细地介绍XLPE绝缘电缆的书籍。为此,我们综合了一些现场经验和理论知识,以及原水电部教育司等编写的职工教育教材中有关XLPE绝缘电缆的内容,从XLPE绝缘电缆的性能、制造、安装、运行维护、试验及最新发展起来的在线检测技术等方面,详细地介绍了有关XLPE绝缘电缆的知识和相关理论公式以及数据计算方法,半导体屏蔽、绝缘设计、电缆试验、电缆及附件选型、状态检修方法及带电检测的内容均是第一次与读者见面,特别是近年来XLPE绝缘电缆运行中带电检测局部放电已经成为电缆运行必备检修方法之一,而这方法的理论基础又不是很成熟,标准也不是很完善,造成了很多现场问题,不解释清楚这些内容,对今后XLPE绝缘电缆的广泛使用将有很大阻碍。

参加本书写作的有国网电力科学研究院王伟;中国电力科学研究院阎孟昆;国网上海电力公司姜芸;国网福建电力公司厦门电力分公司严有祥。本书的写作得到了许多老专家的大力帮助和支持,在此表示衷心感谢。

写作本书曾参阅了相关文献、资料,在此,谨向其作者深致谢忱。

由于笔者在资料收集方面还有欠缺,书中难免会有不足之处,恳请广大读者指正批评,以便我们提高。

笔者

2017年8月

目 录

第 1 章 XLPE 绝缘电缆发展历史	1
第 2 章 XLPE 绝缘电缆的结构和材料	7
2.1 电缆的结构	7
2.2 电缆导体材料	20
2.3 电缆绝缘材料	34
2.4 电缆内、外部的半导体屏蔽层	94
2.5 金属屏蔽	104
2.6 非金属外护套	108
第 3 章 XLPE 绝缘电缆数理统计理论与参数计算	110
3.1 理论基础	110
3.2 确定电缆的击穿分布参数	112
3.3 绝缘厚度与击穿电场相关性分析	123
3.4 220kV 电缆结构的典型设计	124
3.5 试验分析	126
3.6 运行中电缆可靠性估算	133
3.7 用计算预期使用寿命方法估算电缆可靠性	134
第 4 章 XLPE 绝缘电缆电性参数	136
4.1 电场分布	136
4.2 电缆导体电阻	145
4.3 电感	152

4.4	电容	155
4.5	金属屏蔽层(或金属套)感应电压	157
4.6	金属护层过电压	165
第5章	XLPE 绝缘电缆附件电性参数	200
5.1	电缆附件电场分布	200
5.2	应力控制结构及计算	201
5.3	电缆附件边界特性	213
5.4	终端电气计算	243
5.5	接头电气计算	249
5.6	电缆的回缩	253
5.7	配套单元	254
第6章	XLPE 绝缘电缆线路设计参数确定	256
6.1	电力系统和电缆绝缘等级	256
6.2	电缆载流量的选择	262
6.3	电缆短路容量和过载能力	288
第7章	XLPE 绝缘电缆附件设计参数确定	302
7.1	附件基本要求	302
7.2	金具选择	304
7.3	电缆附件选择	306
第8章	XLPE 绝缘电缆的敷设安装	329
8.1	电缆敷设环境和条件	329
8.2	电缆敷设方式及要求	331
8.3	电缆敷设方法	348

8.4	电缆防火与阻燃	364
第9章	XLPE 绝缘电缆附件安装	372
9.1	电缆附件的基本性能	372
9.2	绕包附件安装	374
9.3	热缩附件安装	378
9.4	预制附件安装	393
9.5	接地箱、接地保护箱和交叉互连箱安装	411
9.6	电缆封铅工艺	413
9.7	高压电缆附件安装位置	419
第10章	XLPE 绝缘电缆金属护套的连接与接地	425
10.1	金属护套连接与接地的作用	425
10.2	金属护套连接与接地的方法	428
10.3	均压线及护套保护器的接线方法理论计算	433
10.4	保护器安装和护套接地注意事项	440
第11章	XLPE 绝缘电缆试验	449
11.1	试验方法的发展	449
11.2	试验性质定义	450
11.3	试验场地要求	456
11.4	试验主要设备及原理	460
11.5	现场绝缘电阻测量	475
11.6	现场正序和零序阻抗测量	478
11.7	现场耐压试验	479
11.8	现场相位检查	493
11.9	预防性试验操作步骤及测试结果的判断	494

第 12 章 XLPE 绝缘电缆状态检修及方法	498
12.1 状态检修引出原因	498
12.2 状态、状态变化、状态参数、各种检修的定义	501
12.3 确定电缆线路状态检修的基本方式	504
12.4 电缆运行全寿命理论	504
12.5 状态检修技术的必备条件	507
12.6 状态信息的构成	508
12.7 状态分析和检修策略	509
12.8 从在线监测到状态检修	513
12.9 预防性试验、定期巡检和状态检修的关系	515
12.10 状态检修的重点	516
12.11 停电预防性试验及缺陷	518
12.12 在线检测方法	530
12.13 新型预防性试验方法	556
第 13 章 XLPE 绝缘电缆带电局部放电检测	565
13.1 带电局部放电检测分类	565
13.2 局部放电的测量原理	571
13.3 几种测量局部放电用传感器性能	575
13.4 局部放电的传播特性	590
13.5 模拟局部放电信号的选择	593
13.6 局部放电的表征参数	595
13.7 新旧评价局部放电方法的区别及实例	604
13.8 现场局部放电测量理论的缺陷和发展方向	610

第 14 章 电缆故障的检测	618
14.1 电缆故障性质的确定	618
14.2 测试方法分类	620
14.3 用直流单臂电桥测量电缆故障	622
14.4 低压脉冲法	633
14.5 闪络法	635
14.6 感应法	643
14.7 声测法	650
第 15 章 XLPE 绝缘电缆的运行、维护、技术管理和安全措施	656
15.1 电缆线路的运行	656
15.2 电缆线路的维护	671
15.3 电缆线路的技术管理	674
15.4 电缆敷设安全措施	678
15.5 附件安装安全措施	680
15.6 隧道和水上工作	681
15.7 电缆试验工作	683
15.8 电缆线路维护成本	683
15.9 电缆事故分析步骤	692
参考文献	696
作者简介	707

第 1 章 XLPE 绝缘电缆发展历史

XLPE 绝缘电缆的使用和发展虽只有 30 多年的历史,但由于其具有机械性能好,安装维护方便,绝缘性能优异,传输容量比同截面油纸绝缘电缆大,生产工艺简便,以及利于大规模生产等优点,所以随着材料工业及相关产业的不断发展,XLPE 绝缘电缆在电力系统中的应用日益广泛。

当前,交联聚乙烯绝缘电力电缆在输配电系统中的实用电压已达到交流 500 kV,直流 320 kV,更高电压等级的交联聚乙烯绝缘电力电缆正在研究开发中。在发达国家,早在 20 世纪三四十年代就已有中低压的交联聚乙烯绝缘电力电缆投入运行。由表 1-1 可见,随着电压增加,油纸绝缘、聚氯乙烯(PVC)绝缘、不滴流油纸绝缘、丁基橡胶绝缘等品种的电 缆已无法适用,于是聚乙烯(PE)、交联聚乙烯(XLPE)、合成橡胶绝缘材料在第二次世界大战中迅速发展起来,且发展速度越来越快,电压等级越来越高。1972 年后,又发展出了 110 kV 级以上的 XLPE 绝缘电缆。

表 1-1 各国 XLPE 和 PE 绝缘电缆发展动态

国家	年代	品种	电压等级 kV	容量	截面	最大场强	绝缘厚度	备注
				MV·A	mm ²	kV·mm ⁻¹	mm	
美国	1970	XLPE	138					试验安装
美国	1981	XLPE	345			10.0	26.2	研制品
瑞典	1973	XLPE	145		500	7.0	20.0	正式运行
瑞典	1973	XLPE	245			12.0		现场试验

续表

国家	年代	品种	电压等级 kV	容量	截面	最大场强	绝缘厚度	备注
				MV·A	mm ²	kV·mm ⁻¹	mm	
日本	1970	充硅油的 XLPE	66					正式运行
日本	1970	XLPE	154			20.0		正式运行
日本	1978	XLPE	(187) 225		1 000	15	25.0	研制品
法国	1969	XLPE	250 (225)	300	1 200	8.3	22.0	试验运行
法国	1981	PE	400		1 500	15.0	27.0	研制
西德	1968	PE	110					已运行
西德		PE	220			10.0		试验性
西德	1981	PE	400					研制
意大利		乙丙橡胶	150	160	400	6.3	24.3	已运行
匈牙利		PE	120	139	240			水冷电 缆系统

图 1-1 和图 1-2 所示为电缆电压等级发展曲线,由图可见,以 XLPE 绝缘电缆为代表的塑料绝缘电力电缆发展速度较快。如日本 XLPE 绝缘电缆电压等级的发展历史为:1955 年首次研制成功;1961 年达到 33 kV;1962 年达到 66 kV;1965 年达到 77 kV;1969 年即可生产 110 kV 的 XLPE 绝缘电缆。

这种速度代表了发达工业国家 XLPE 绝缘电缆的发展速度,表 1-1 所示为各国 XLPE 和 PE 绝缘电缆发展动态。目前日本

使用的 XLPE 绝缘电缆已占整个电力电缆用铜量的 85%，且 275 kVXLPE 绝缘电缆已投入运行，并已研制标称截面为 2 000 mm² 的 500 kVXLPE 绝缘电缆。北欧、东欧、苏联等国家也已大量生产这种类型电缆。瑞典于 1965 年开始生产 XLPE 绝缘电缆，到 1975 年，12 kV 等级的 XLPE 绝缘电缆已占 70%，至今，24~84 kV 的 XLPE 绝缘电缆已占 100%，1964 年美国低压级油纸、塑料电缆一起使用，15 kV 以上开始试用 PE 和 XLPE 绝缘电缆。德国 PVC 绝缘电缆甚至使用到 6~10 kV 等级，英国多使用不滴流油纸绝缘电缆，塑料电缆受到限制。1970 年各国在 10~30 kV 低压领域中，PE 使用量为 16%，XLPE 使用量为 6%~8%。20 世纪 70 年代后期，由于美国解决了中低压电力电缆水树枝、电树枝等材料问题，使 PE 和 XLPE 绝缘电缆有了很大发展，在 15 kV 级系统中大量使用塑料电缆，而油纸绝缘电缆几乎被淘汰。表 1-2 所示为 1971 年美国使用电缆品种的百分比。

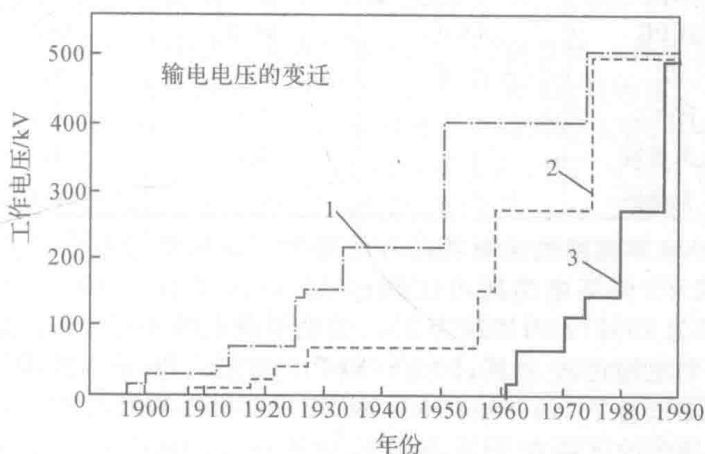


图 1-1 油纸及 XLPE 绝缘电缆发展

1—国外油纸绝缘电缆；2—国内油纸绝缘电缆；3—塑料绝缘电缆

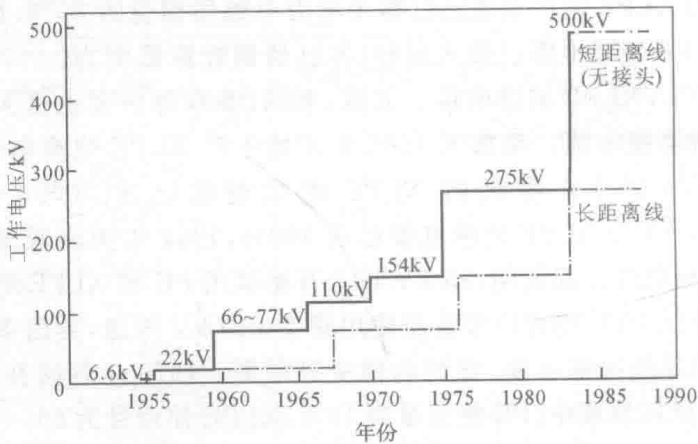


图 1-2 XLPE 绝缘电缆的最高工作电压的变化图

表 1-2 1971 年美国使用电缆品种百分比 单位:(%)

品种	中压配电	低压配电	设备连接线
油纸	0.7		
XLPE	43.0	87.9	86.6
PE	50.8	2.8	6.5
PVC		3.1	2.7
乙丙橡胶	1.4	1.1	1.1
丁基橡胶	4.1	5.1	1.1

1975 年橡塑绝缘电缆已开始领先于油纸绝缘电缆。美国橡塑绝缘中, 低压电缆所占比例已达 99%, 其中 15 kV 级 PE 和 XLPE 为 95%, 乙丙橡胶为 2%, 油纸绝缘电缆小于 1%。德国 1 kV 塑料电缆已占 90%; 10 kV XLPE 占 5%, PE 占 8%, PVC 占 12%, 油纸占 72%; 25~35 kV XLPE 占 34%, 油纸占 42%, 20 世纪 80 年代油纸降为 20%, XLPE 升为 56%。英国 1 kV 及以下, PVC 和 XLPE 占 67%, 80 年代升到 75%。80 年代末、90 年代初, 10 kV 中, XLPE 绝缘电缆略超过油纸, 特别是新上项目, 油纸绝缘电缆将被淘汰, 20~30 kV 中, XLPE 绝缘电缆加上其他橡塑电缆占 80% 或更高, 高压电缆领域, XLPE 绝缘电缆也已达到油纸

绝缘电缆占有率。虽然在超高压等级上,例如 765 kV 电压 XLPE 绝缘电缆还无法和充油电缆竞争,但从现在研制出的 550 kV XLPE 绝缘电缆的制造水平来看,在不久的将来,XLPE 绝缘电缆赶上或超过充油电力电缆是可能的,这主要是由于 XLPE 绝缘电缆具有较高的运行温度,使得电缆载流容量增加;XLPE 绝缘电缆还具有弯曲半径较小,质量轻,无须供油系统,维护和安装都较容易等优点。

在海底电缆(submarine cable)的发展历程上,绝缘材料也正在从纸绝缘向 XLPE 绝缘发展。海底电缆是敷设在海底及河流水下的电力电缆,海底电力电缆主要用于水下传输大功率电能,与地下电力电缆的作用等同,只是应用的场合和敷设的方式不同。由于海底电缆工程被世界各国公认为是复杂困难的大型工程,从环境探测、海洋物理调查以及电缆的设计、制造和安装都应用复杂技术,因而海底电缆的制造国家在世界上为数不多,主要有挪威、丹麦、日本、加拿大、美国、英国、法国、意大利等,这些国家除制造外还提供敷设技术。目前我国应用的海底超高压电力电缆,例如 500 kV 海底电缆仍然需要进口,其余高压 110~220 kV 和 6~35 kV 中压海底电缆已经全部能够生产。全世界第一条海底电缆是 1850 年在英国和法国之间铺设的。1949 年后,我国在宁波、烟台、海南等地相继敷设投运了不同绝缘类型的海底电缆,其中琼州海峡的 500 kV 海缆单根长度达到 32 km,上海、厦门在过江和过海隧道中也敷设有交流和直流高压电缆。近些年,由于交联聚乙烯绝缘电力电缆技术的成熟,大量海上风电场开始使用这种绝缘电缆。

在制造技术方面,20 世纪 80 年代末,沈阳电缆厂用 2+2 悬链工艺制造成我国第一根 110 kV 交联电缆;90 年代初,上海电缆厂开始用立式交联工艺生产 110 kV 交联电缆;郑州电缆厂在试制成功 110 kV 交联电缆后,1996 年首次用立式干法工艺生产 220 kV 交联电缆并通过两部鉴定,填补了国内空白。目前,国内生产 110~500 kV 交联聚乙烯绝缘电力电缆技术水平基本接近当代世界先进水平。初期的 XLPE 使用水蒸气作为化学反应的加压和加热媒质,因此,此法称为湿法交联。一般认为 XLPE 绝缘中含有微米大小微孔,湿法交联的水蒸气在高湿高压下容易向

熔融的 PE 中渗透,故这种方法会增加 XLPE 中微孔数量及增大微孔尺寸。20 世纪 70 年代初,各国厂家相继推出干法交联,减少了 XLPE 中的微孔和水分,提高了 XLPE 绝缘电缆运行的可靠性。70 年代末,XLPE 制造方面又有了更大发展,除了完善 XLPE 本身的良好物理和电性能外,又出现了新型的半导体屏蔽材料及超净绝缘材料,使绝缘体中的杂质含量进一步减少,在工艺上又引进了多层共挤法,减少了层间界面,使 XLPE 绝缘电缆局部放电量大为下降,为超高压电缆的发展奠定了基础。

在半导体屏蔽方面,最初在 XLPE 绝缘电缆上使用的是涂石墨层布带绕包在绝缘上,这种方法由于界面问题,使得电缆局部放电很大,这种电缆一旦进水,水分直接和绝缘接触,易引发水树和电树,因此在国外 20 世纪 70 年代就已经被淘汰,而在我国直到 80 年代各厂商才逐步淘汰了这一工艺,以后半导体屏蔽使用三层同时挤出工艺,材料采用 XLPE,且在材料中加入防水树剂和防电子发射剂,使得电缆性能更加优异。

在绝缘制造方面,20 世纪 90 年代开始,为了减少 XLPE 绝缘回缩问题,采用了芬兰公司的消除制造应力装置,使得电缆回缩问题得到改善。

1992 年,皮瑞利的北美分公司和美国能源署合作,开始超导电缆技术的研究和开发,从而使美国在超导电缆技术开发上成为全球第一个国家。2000 年 2 月,由美国南线公司、橡树岭国家实验室(ORNL)和 IGC 联合开发了 30 m,12.5 kV,1.25 kA 三相高温超导冷绝缘电缆。它安装在卡罗尔顿的南方线缆公司,并且成功运行。在纽约,长岛电力局(LIPA)和美国超导公司宣布,世界上第一个高温超导电缆系统运行电压为 138 kV,于 2008 年 4 月 22 日在长岛投入运行,电缆线路由 3 个平行敷设的单相高温超导电缆组成,电缆安装在 LIPA 的输电通道中,它有 6 个终端装置与电网相连,高温超导电缆长度是 600 m,采用低温液氮冷却系统。

日本、韩国和欧洲的一些国家也对不同电压等级的超导电缆进行了研制。中国第一条 35 kV/2 kA,33.5 m 长超导电缆于 2004 年在云南省投入运行。

第 2 章 XLPE 绝缘电缆的结构和材料

2.1 电缆的结构

交联聚乙烯绝缘电缆是以交联聚乙烯作为绝缘的塑料电缆，XLPE 是 Cross Linded Polyethylene 的简称。国产的 XLPE 绝缘电缆用 YJLV 和 YJV 表示，YJ 表示交联聚乙烯，L 表示铝芯（铜芯可省略），V 表示 PVC 护套。图 2-1 所示为单芯交联聚乙烯绝缘电缆结构。图 2-2 所示为三芯交联聚乙烯绝缘电缆结构。

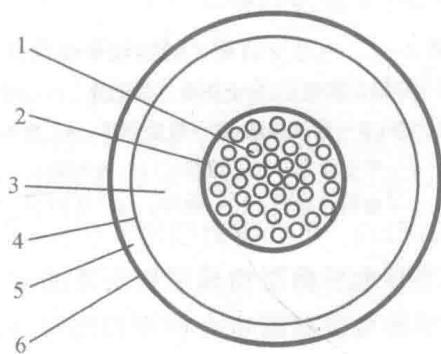


图 2-1 单芯交联聚乙烯绝缘电缆结构

1—导体；2—内层半导体层；3—绝缘体；4—外层半导体层；
5—护套；6—保护（防腐蚀）层

交联聚乙烯绝缘电缆所用线芯除特殊要求外，均采用紧压型线芯，其作用如下：