

王 伟 等编著

XLPE

INSULATED

CABLE



交联聚乙烯 (XLPE)

绝缘电力电缆技术基础

(第3版)

西北工业大学出版社

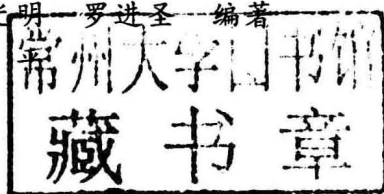
交联聚乙烯(XLPE)绝缘 电力电缆技术基础

(第3版)

王 伟 郑建康

王光明 罗进圣 编著

赵



西北工业大学出版社

【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,并以此为基础重点讲述了 XLPE 绝缘电缆选型、安装、运行、维护、交接、预防性试验的标准和要求,介绍了一些电力部门使用该种电缆的经验,分析了 XLPE 绝缘电缆的发展趋势。

本书是使用 XLPE 绝缘电缆的工程技术人员必备的学习、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)绝缘电力电缆技术基础/王伟等编著.
—3 版. —西安:西北工业大学出版社,2011.6
ISBN 978-7-5612-1006-2

I. 交… II. 王… III. 交联聚乙烯—绝缘电缆 IV. TM247

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 111493 号

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.nwpup.com

印刷者:陕西向阳印务有限公司

开 本:850 mm×1 168 mm 1/32

印 张:18.125 插页 2

字 数:463 千字

版 次:2011 年 6 月第 3 版 2011 年 6 月第 1 次印刷

定 价:75.00 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——交联聚乙烯(XLPE)绝缘电力电缆——的技术性能、安装运行、维护及交接试验方面的知识。

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,有关半导体屏蔽、绝缘设计、电缆及附件选型、在线检测的内容均是第一次和读者见面,这些内容对今后 XLPE 绝缘电缆的广泛使用将有很大帮助。

参加本书编写的有:国家电网电力科学研究院王伟;西安供电公司郑建康;南京供电公司王光明;杭州供电公司罗进圣,石家庄供电公司赵平。本书的编写得到了许多老专家的大力帮助和支持,在此表示衷心感谢。

由于我们经验不足,水平有限,同时在资料收集方面还有不足之处,恳请广大读者指正批评,以便我们提高。

编著者

2011 年 3 月

目 录

第 1 章	交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆发展历史	1
第 2 章	交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆的结构和材料	6
2.1	电缆的结构	6
2.2	电缆导体材料	13
2.3	电缆绝缘材料	27
2.4	电缆内、外部的半导体屏蔽层	82
2.5	金属屏蔽	90
第 3 章	交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆数理统计理论与参数计算	95
3.1	理论基础	95
3.2	确定电缆的击穿分布参数	97
3.3	绝缘厚度与击穿电场相关性分析	108
3.4	220kV 电缆结构的典型设计	109
3.5	试验分析	111
3.6	运行中电缆可靠性估算	118
3.7	用计算预期使用寿命方法估算电缆可靠性	119
第 4 章	交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆电性参数	121
4.1	电场分布	121
4.2	电缆导体电阻	128
4.3	电感	135
4.4	电容	138

4.5	金属屏蔽层(或金属套)感应电压	140
4.6	金属护层过电压	145
第5章	交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆附件电性参数	178
5.1	电缆附件电场分布	178
5.2	应力控制结构及计算	179
5.3	电缆附件边界特性	191
5.4	终端电气计算	209
5.5	接头电气计算	213
5.6	电缆的回缩	217
5.7	配套单元	218
第6章	交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆线路设计参数确定	219
6.1	电力系统和电缆绝缘等级	219
6.2	电缆载流量的选择	225
6.3	电缆短路容量和过载能力	251
第7章	交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆附件设计参数确定	265
7.1	附件基本要求	265
7.2	金具选择	267
7.3	电缆附件选择	269
第8章	交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆的敷设安装	292
8.1	电缆敷设环境和条件	292
8.2	电缆敷设方式及要求	294
8.3	电缆敷设方法	310
8.4	电缆防火与阻燃	327

第 9 章 交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆附件安装	334
9.1 电缆附件的基本性能	334
9.2 绕包附件安装	336
9.3 热缩附件安装	340
9.4 预制附件安装	355
9.5 接地箱、接地保护箱和交叉互连箱安装	373
9.6 电缆封铅工艺	375
9.7 高压电缆附件安装位置	381
第 10 章 交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆金属护套的连接与接地	386
10.1 金属护套连接与接地的作用	386
10.2 金属护套连接与接地的方法	389
10.3 均压线及护套保护器的接线方法	394
10.4 保护器安装和护套接地注意事项	401
第 11 章 交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆的交接及预防性试验 ...	407
11.1 状态、状态变化、状态参数、各种检修的定义	408
11.2 确定电缆线路状态检修的基本方式	410
11.3 电缆运行全寿命理论	411
11.4 状态检修技术的必备条件	413
11.5 状态信息的构成	415
11.6 状态分析和检修策略	416
11.7 从在线监测到状态检修	419
11.8 预防性试验,定期巡检和状态检修的关系	422
11.9 状态检修的重点	423
11.10 绝缘电阻测量	424

11.11	正序和零序阻抗测量	427
11.12	耐压试验	428
11.13	相位检查	443
11.14	预防性试验操作步骤及测试结果的判断	444
第 12 章	交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆在线检测	449
12.1	在线检测引出原因	449
12.2	停电预防性试验及缺陷	451
12.3	在线检测方法	463
12.4	新型预防性试验方法	489
第 13 章	电缆故障的检测	498
13.1	电缆故障性质的确定	498
13.2	测试方法分类	500
13.3	用直流单臂电桥测量电缆故障	502
13.4	低压脉冲法	513
13.5	闪络法	515
13.6	感应法	523
13.7	声测法	530
第 14 章	交联聚乙烯(XLPE)电缆的运行、维护、技术管理和安全措施	536
14.1	电缆线路的运行	536
14.2	电缆线路的维护	544
14.3	电缆线路的技术管理	545
14.4	电缆敷设安全措施	550
14.5	附件安装安全措施	552

14.6	隧道和水上工作·····	553
14.7	电缆试验工作·····	554
14.8	电缆线路维护成本·····	554
14.9	电缆事故分析步骤·····	563
参考文献 ·····		568
作者简介 ·····		569

第 1 章 交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆发展历史

交联聚乙烯(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,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,使 XLPE 绝缘电缆在电力系统中的应用日益广泛。

目前,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 275 kV,并已试验运行 500 kV 的交联聚乙烯绝缘电力电缆。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。从表 1-1 可见,随着电压增加,油纸绝缘、PVC 聚氯乙烯绝缘、不滴流油纸绝缘、丁基橡胶绝缘等品种的电缆已无法适应,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 级以上的交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆。

表 1-1 各国 XLPE 和 PE 电缆发展动态

国家	年代	品种	电压 等级 kV	容量 $\frac{\text{mV} \cdot \text{A}}{\text{mm}^2}$	截面 mm^2	最大场强 $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$	绝缘 厚度 mm	备注
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
日本	1970	充硅油的 XLPE	66					正式运行

续 表

国家	年代	品种	电压等级 kV	容量 $\text{mV} \cdot \text{A}$	截面 mm^2	最大场强 $\text{kV} \cdot \text{mm}^{-1}$	绝缘厚度 mm	备注
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

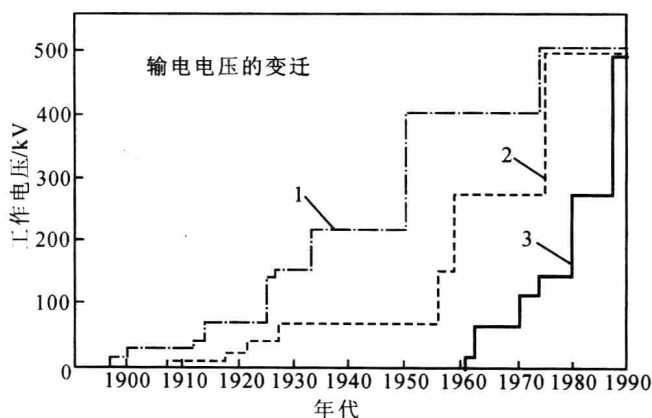


图 1-1 油纸及 XLPE 电缆发展

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1-1和图1-2所示为电缆电压等级发展曲线,由图可见,以交联聚乙烯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。

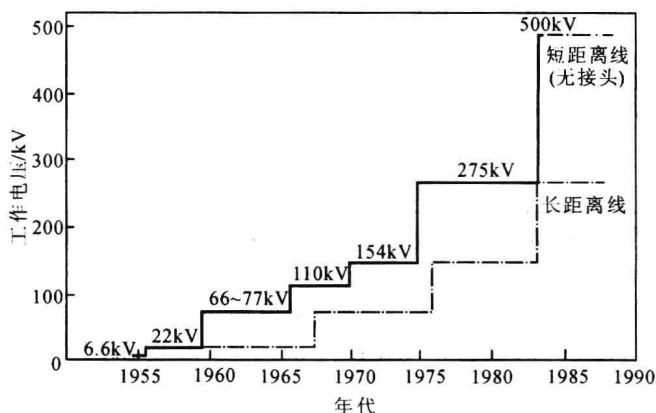


图1-2 XLPE电缆的最高工作电压的变化图

这种速度代表了发达工业国家交联聚乙烯绝缘电缆的发展速度,如表1-1所示各国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 kV交联聚乙烯绝缘电缆已投入运行,并已研制标称截面为2 000 mm²的500 kV交联聚乙烯电缆。北欧、东欧、前苏联等国家也已大量生产这种类型电缆。瑞典于1965年开始生产交联聚乙烯电缆,到1975年,12 kV等级的交联聚乙烯电缆已占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低压电压电缆领域中,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,如表 1-2 所示为 1971 年美国使用电缆品种的百分比。

表 1-2 1971 年美国使用电缆品种百分比 %

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	1.4	1.1	1.1
丁基	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 绝缘电缆将略超过油纸,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。

在制造技术方面,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 30m,12.5kV,1.25kA 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的电压等级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 交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆的结构和材料

2.1 电缆的结构

交联聚乙烯电缆是以交联聚乙烯作为绝缘的塑料电缆，XLPE 是 Cross Linded Polyethyene 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电缆结构。图 2-2 所示为三芯交联聚乙烯电缆结构。

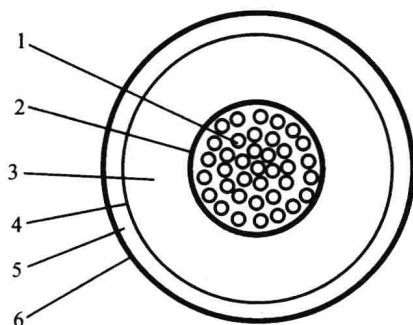


图 2-1 单芯交联聚乙烯电缆结构

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

交联聚乙烯电缆所用线芯除特殊要求外，均采用紧压型线芯，其作用是：

- (1)使外表面光滑,防止导丝效应,避免引起电场集中;
- (2)防止挤塑半导体屏蔽层时半导体材料进入线芯;
- (3)可有效地防止水分顺线芯进入。

因此,在电缆安装时应选用配合紧压线芯的金具,否则压接质量不好,引起连接部位发热。

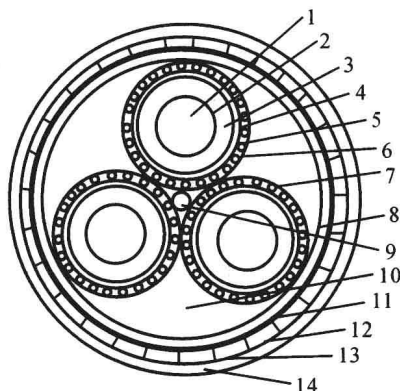


图 2-2 三芯交联聚乙烯电缆结构

- 1—导线；2—导线屏蔽层；3—交联聚乙烯绝缘；4—绝缘屏蔽层；
5—保护带；6—铜线屏蔽；7—螺旋铜带；8—塑料带；
9—中心填芯；10—填料；11—内护套；
12—扁钢带铠装；13—钢带；14—外护套

绝缘内外的半导体屏蔽层均采用加炭黑的交联聚乙烯料,早期交联电缆的外半导体屏蔽层也有使用石墨布绕包形成的,但这种结构性能不好,随着内、外半导体屏蔽层及绝缘三层同时挤出工艺的成熟,现在已经被淘汰,当选用电缆时应尽量不采用绕包型屏蔽结构电缆。半导体屏蔽层的体积电阻率一般在 $10^4 \Omega \cdot \text{cm}$ 以下,其厚度一般为 $1 \sim 2 \text{ mm}$,根据国家标准, 10 kV 及以下电缆的外半导体层为可剥离层, 35 kV 以上为不可剥离层,这种要求的主

要原因是因为可剥离层的存在使电缆抗局部放电能力降低,当安装附件时,会在微小局部造成气隙。

电缆金属屏蔽层,又称铜带屏蔽,它将对电缆故障电流提供回路并提供一个稳定的地电位,铜带(丝)的截面可按故障电流大小、持续时间,以及接地为一端还是两端选定。35 kV 及以下电压等级的单芯和三芯交联电缆用钢带作为铠装层,起机械保护作用。110 kV 及以上电压等级 XLPE 电缆的铠装均采用波纹铝(铜、铅、不锈钢)护套,作为铠装和内防水护套用,因为不论是 PE 或 PVC 护套,其吸水率分别为 0.01% 和 0.15%~1%,而金属几乎不透水,所以超高压电缆均用不透水的金属内护套。如广州供电局引进的日本生产的 110 kV XLPE 绝缘电缆,采用的是波纹铝护套;石家庄供电局引进的瑞典 110 kV XLPE 绝缘电缆,采用的是波纹铜护套;济南供电局引进的澳大利亚 110 kV XLPE 绝缘电缆,采用的是波纹不锈钢护套;等等。另外,在超高压电缆内护套中,还有防水带等隔水工艺,使得已进入的水分不易扩散。

中、低压交联聚乙烯的内外护套层一般采用 PVC 材料,厚度一般为 3~4 mm,内护套也有厂家使用 PE 材料,这主要是为了减少渗水,因为 PE 的吸水率小于 PVC。外护套一般使用 PVC 材料,因为 PVC 材料的防火阻燃性能比 PE 的好,这种结构的电缆已在北京地区大量采用。对于超高压的 110 kV XLPE 绝缘电缆外护套,由于有耐压要求,为了现场试验需要在 PVC 护套外层涂有一层导电石墨,电缆验收时一定要检查导电层是否完整,否则对护套的试验将没有意义。

以下为几例 XLPE 绝缘电缆结构及结构尺寸。

图 2-3 所示为单芯 XLPE 绝缘水底电缆结构(单层钢丝铠装)。图 2-4 所示为三芯 XLPE 绝缘水底电缆结构(单层钢丝铠装)。在特殊情况下,电缆还可采用两层钢丝铠装。