

中高压电缆系统 老化诊断及修复

Aging Diagnosis and Rejuvenation of
Cable Systems for Medium and High Voltage

周凯等著



科学出版社

中高压电缆系统老化诊断及修复

周 凯 等 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

随着中国城市化的发展,交联聚乙烯(XLPE)电缆在城市电网中得到广泛应用。然而在长期运行过程中,在电缆线路中不可避免会引发诸如水树、电树、热老化或者局部放电等绝缘劣化现象,导致电缆运行可靠性下降,进而对电缆系统的安全稳定运行产生不利影响。本书主要介绍电缆及其附件的绝缘老化理论和老化规律,绝缘老化的诊断方法,以及电缆的修复技术及工程应用。本书既注重理论的深度,同时也加入一些实际案例介绍,与实践紧密结合,并系统介绍电缆绝缘中的老化现象及发展规律,诊断电缆的绝缘状态的方法及相应绝缘修复技术的运用,对于提高电缆线路的安全稳定运行具有重要的理论和工程价值。

本书适合电气工程专业中电力系统、高电压技术方面的院校师生,电力系统中高压电缆线路设计、运行和维护人员,电缆及附件制造、设计和测试工程师阅读学习。

图书在版编目(CIP)数据

中高压电缆系统老化诊断及修复 / 周凯等著. — 北京:科学出版社, 2018.8

ISBN 978-7-03-057220-2

I. ①中… II. ①周… III. ①电力电缆-老化-故障诊断 ②电力电缆-故障修复 IV. ①TM247

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 084630 号

责任编辑:莫永国 / 责任校对:江 茂
责任印制:罗 科 / 封面设计:墨创文化

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

成都锦瑞印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年8月第 一 版 开本:787×1092 1/16

2018年8月第一次印刷 印张:25.25

字数:400千字

定价:150.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

本书作者名单

第一作者：周 凯

主要作者：李康乐 龚 薇 张 涛 朱光亚

其他作者：赵 威 陶霏涛 李旭涛 万 利

陶文彪 杨明亮 吴 科 何 珉

黄 明 杨 滴 李天华 陈 讴

赵世林 张福忠 陈泽龙 张春烁

黄永禄 陈诗佳 汪先进 熊 庆

前 言

本书的科研积累起源于本人于 2008 年 6 月在加拿大滑铁卢大学与 Shesha Jayaram 教授开展的关于电缆附件的合作研究。但实际上，这一研究内容更早也可追溯到 2004 年我攻读博士期间在吴广宁教授的指导下从事的关于固体绝缘的老化和表征方面的研究工作。此后，我于 2009 年在四川大学正式开始电缆方面的研究工作。当时，在四川电力科学研究院的支持下，开展了电缆修复方面的研究工作，从此系统性地开始了电缆方面的研究。随后我在 2012~2013 年到了美国，与美国密西西比州立大学教授 Grzybowski 开展电缆老化方面的合作研究，对电缆老化及试验方面有了更为深入的理解。在本书的完成期间，我先后与意大利博洛尼亚大学的 Cavallini 教授、英国南安普敦大学的陈光辉教授、格拉斯哥卡利多尼安大学的周承科教授和蒙彼利埃大学的 Castellon 教授进行了电缆研究领域的深入学术交流，得到了很多的思想启发。我们的研究小组也先后派出了 30 余人次参与多个相关的国际和国内学术会议，开阔了我们的研究视野。

在本书的完成期间，我先后得到工业界同行如中国电力科学研究院的赵健康、欧阳本红、北京供电公司黄鹤鸣、国网电力科学研究院的王伟、成都供电公司的杜灏等工业界同行的帮助，使得我们的研究工作更加切合实际的需要。本书的出版也得益于我们和四川电力科学研究院的长期项目合作研究，使得很多的研究工作得以延续。2014 年，在学术界同行的支持下，获得了国家自然科学基金面上项目资助，使得研究方向得以稳固下来。从 2010 年至今，我们先后承担了 20 多个来自工业的电缆科研项目，累计完成的科研经费超过 1000 万元，发表文章超过 100 余篇，授权发明专利超过 10 项，参与起草行业标准一部，获得国网公司和四川省的科技进步奖各一项。经过大约 10 年的研究积累，我们对电缆方面问题的认识和理解更为深刻，将过去的工作进行整理和总结，形成本书的主要内容。

很多人最初认为电缆很简单，就是导体外加上一层绝缘体，是一个简单的绝缘结构。但是，事实上正好相反，电缆从开始出现到最终的大规模应用，经历了 100 多年的发展历史，面临了许多的挑战，也经历了许多重要的技术变革，才发展成今天的电缆。电缆工程技术非常复杂，与电气、材料、机械、物理和化学等专业密切相关，甚至与金属材料和电化学等也有密切关联。因此，电缆工程是一门专业性非常强的学问，需要我们加强这方面的研究和学习。在本书中，我们特别强调了中国的城市化过程所带来的电缆运行方面的问题和挑战，随着城市化的深入推进，电缆的使用已非常普遍。近年来，实际运行中各种电缆故障频发，因此深入分析中高压电缆系统所面临的问题，研究电缆老化诊断及修复机理，对电缆故障的预防、寿命的延长、系统保护的迅速动作、故障点的快速查找及恢复具有深刻的意义，应当引起足够的重视。

本书是在国家自然科学基金(No. 51477106, 纳米复合填充物对水树的修复及其在多因子老化下的作用机理研究; No. 51877142, 多应力下电缆附件界面的绝缘老化及修复填

充物的作用机理研究)、中国博士后基金及特别资助(No. 2014M562323)、四川大学优秀青年学者基金(No. 2015SCU04B0, 纳米复合填充物对水树的修复机理研究)、南方电网重点项目、国家电网公司科技项目等多个项目的经费支持下,结合近年来国内外中高压电缆系统老化诊断及修复研究取得的研究成果,对中高压电缆系统老化诊断及修复所开展系列研究工作的一个总结。

本书共分 14 章,其中第 1 章~第 4 章为电缆及附件的发展历史和一些相关的基础知识,系统性地介绍电缆及附件的发展和演变、电缆材料的物理基础、电缆的制造等内容。第 5 章~第 7 章为电缆及附件的绝缘测试技术及状态监测。第 8 章研究高频谐波作用下的电缆附件电气行为及物理机理。第 9 章~第 11 章为电缆绝缘的水树老化机理及影响因素、电树的一些基础知识等。第 12 章~第 14 章基于上述电缆绝缘老化机理,介绍电缆绝缘的老化修复机理、效果及工程实践,最后提出交联聚乙烯(XLPE)电缆中水树缺陷的预修复研究。

现在收入本书的主要研究工作来自于已毕业研究生的研究工作,另外一些内容则直接取自当时这些学生合作发表的论文。本书是作者和课题组成员长期工作的结晶,周凯负责全书的统稿,龚薇负责第 2 章~第 8 章的编写统稿并承担出版过程的相关工作。本书在撰写过程中也参考和引用了国内外专家学者的相关研究成果,在此向他们表示衷心的感谢!由于作者水平有限,书中的一些观点、方法难免存在争议,理论介绍有失完整,敬请各位专家和读者批评指正。

周凯

2018 年 8 月于四川大学

目 录

第1章 中高压电缆系统概述	1
1.1 城市化与电缆系统的发展	1
1.2 中国的电压等级和电缆的分类及特点	3
1.2.1 电压等级	3
1.2.2 电缆的分类和特点	4
1.2.3 XLPE 电缆结构及特点	6
1.3 电缆和架空线比较	7
1.3.1 电缆和架空线的性能比较	7
1.3.2 我国公共电网中电缆的发展	9
1.4 电缆和绝缘材料的发展历史	10
1.4.1 电缆的发展历史	10
1.4.2 电缆的类型及其应用领域	11
1.4.3 电缆的绝缘介质	13
1.4.4 电缆绝缘材料的发展	14
1.5 电缆附件的发展和分类	15
1.5.1 电缆附件的电场控制原理	16
1.5.2 电缆附件的发展和分类	18
1.5.3 电缆中间接头	24
1.5.4 电缆附件的界面问题	28
1.5.5 电缆附件的品质与应用	31
参考文献	33
第2章 电缆的基本结构和电气参数	35
2.1 电缆的工作原理	35
2.2 电缆的基本结构	37
2.3 电场和电位分布	42
2.4 电缆的电气参数	44
2.5 导体	47
2.6 屏蔽层	50
参考文献	55
第3章 电缆绝缘材料的高分子物理基础	57
3.1 高聚物的结构	57
3.1.1 概述	57

3.1.2	高分子的结构	57
3.1.3	高聚物的固体结构	58
3.2	固体内高分子的运动	66
3.3	高聚物的性能	68
3.4	电学性能	71
	参考文献	74
第4章	XLPE 电缆制造基础	76
4.1	XLPE 的制造	76
4.1.1	PE	76
4.1.2	XLPE	78
4.1.3	XLPE 的交联方法	79
4.1.4	抗水树交联聚乙烯 (TR-XLPE)	83
4.2	非金属屏蔽材料	84
4.3	护套材料	84
4.4	铠装材料	85
4.5	金属屏蔽材料	85
4.6	制造过程	86
	参考文献	91
第5章	电缆的现场绝缘测试技术	92
5.1	电力系统的中性点接地方式	92
5.2	电缆的额定电压规则	94
5.3	试验类型分类	95
5.4	破坏性试验	96
5.4.1	交流耐压试验	96
5.4.2	直流耐压试验	99
5.5	非破坏性试验	100
5.6	电缆绝缘测试技术	103
5.6.1	极化-去极化电流法	104
5.6.2	频域介电谱法	110
5.6.3	振荡波局部放电检测	115
5.6.4	反射系数谱法	119
	参考文献	121
第6章	电缆附件中的局部放电	123
6.1	电缆附件中的电场分布	123
6.2	绝缘缺陷的局部放电	123
6.3	PD 数据的采集分析与时频聚类技术	127
6.4	常见缺陷的放电模式	130
6.5	气隙缺陷的放电发展	134

6.6	气隙缺陷的老化阶段模型	139
6.7	不同负荷电流下电缆终端的 PD 特征	141
6.7.1	电缆终端 PD 实验平台及特征量检测	142
6.7.2	实验结果及分析	143
6.7.3	电缆终端 PD 特征分析	146
6.8	新型涂料的耐局放特性研究	151
	参考文献	153
第 7 章	电缆系统的绝缘状态监测	155
7.1	电缆系统在线监测技术概况	155
7.2	PD 在线监测技术	158
7.3	电缆附件的 PD 监测技术	160
7.4	基于暂态对地电压法的电缆终端监测技术	167
7.5	高压电缆系统的 PD 监测技术	173
7.5.1	交叉互联接地系统	173
7.5.2	交叉互联系统中的局放	174
7.5.3	高压电缆附件 PD 检测	175
	参考文献	183
第 8 章	高频谐波作用下的电缆附件电气行为	185
8.1	中压电缆系统中的谐波问题	185
8.2	非线性电介质电场控制理论	186
8.3	谐波电压合成装置及原理	188
8.4	谐波作用下电缆终端热点温升的研究	190
8.5	电缆终端电-热耦合场仿真与理论分析	194
8.6	PWM 脉冲电压下电缆终端多热点特征及其瞬态电场仿真	200
	参考文献	204
第 9 章	电缆的水树老化	206
9.1	水树的基本概念、分类与影响因素及特点	206
9.2	水树的引发机理	211
9.3	水树的表征手段和形态	212
9.4	水树的仿真模型	221
9.5	水树的电-机械疲劳理论	222
9.6	材料的黏弹性与水树老化现象	228
9.6.1	蠕变理论	228
9.6.2	水树与水树蠕变	230
9.6.3	水树自愈特性对宏观介电性能的影响	232
	参考文献	235
第 10 章	不同应力下水树的生长规律	239
10.1	不同老化阶段下水树的生长特性	239

10.2	电压波形对水树生长的影响	241
10.2.1	不同电压波形下的水树	242
10.2.2	不同电压波形下的 Maxwell 应力及形变	243
10.2.3	直流电场对水树生长的影响	245
10.3	频率对水树生长的影响	246
10.4	温度对水树生长的影响	249
10.4.1	不同温度下的水树生长	249
10.4.2	温度转换下的水树生长特征	252
10.5	直流电压下离子对水树生长的影响	255
10.5.1	不同极性下的水树特征	255
10.5.2	基于双电层模型的离子扩散	256
10.5.3	水分扩散和离子扩散对水树生长影响	258
10.6	机械应力对水树生长的影响	260
	参考文献	267
第 11 章	XLPE 电缆的电树老化	272
11.1	XLPE 电缆的电树枝化研究	272
11.2	XLPE 电缆中的电树枝化的机理与特点	273
11.2.1	定义、分类与生长参数	274
11.2.2	影响电树引发与生长的因素	275
11.2.3	电树枝的引发特点及机理	276
11.3	交流电压下电树的引发和生长特点	277
11.4	水树和电树的相互转换	286
11.4.1	水树向电树的转换	286
11.4.2	电树向水树的转换	288
	参考文献	292
第 12 章	水树老化电缆的绝缘修复机理和工程实践	295
12.1	电缆绝缘修复的现实意义	295
12.2	修复技术的研究现状	296
12.3	修复的化学反应原理及方法	299
12.3.1	修复的化学反应原理	299
12.3.2	修复实施方法	300
12.3.3	现场修复技术	302
12.4	修复液的扩散原理与行为	310
12.5	修复后的介电性能评估	313
12.6	修复后的微观结构表征	315
12.7	修复技术的工程实践	321
12.7.1	自然老化电缆的修复实验	321
12.7.2	运行电缆的现场修复实验	327

参考文献	333
第 13 章 有机-无机纳米复合填充修复及长期作用	336
13.1 纳米复合电介质	336
13.2 水树修复的基本原理及生成物	337
13.3 修复后电缆的介电性能和微观结构	340
13.3.1 实验室加速老化电缆的修复	340
13.3.2 半导体层的修复	345
13.3.3 运行老化电缆的修复	349
13.4 绝缘增强机理	350
13.5 不同配方修复液的修复效果	351
13.6 修复后的长期稳定性研究	355
参考文献	362
第 14 章 XLPE 电缆中水树缺陷的预修复研究	364
14.1 预修复的作用机理	364
14.2 预修复对 XLPE 电缆的作用效果	368
14.3 预修复的影响因素	375
14.4 预修复电缆在冲击电压下的缺陷发展及演变	383
参考文献	390
附录: 四川大学高压电缆系统实验室简介	392

第 1 章 中高压电缆系统概述

1.1 城市化与电缆系统的发展

(1) 人口和电力消费。根据国际能源署的研究报告, 1980~2020 年, 随着世界人口的不断增加, 电力消费也随之增加, 尤其是发展中国家的人口和电力消费增加迅速, 相反发达国家电力消费所占的比重却在下降, 发展趋势如图 1-1^[1]所示。预计, 2000~2020 年, 世界人口年均增加 1.2%, 新兴工业化国家电力能源消费每年增加 4.2%。以中国为例, 2000~2020 年, 中国的人口峰值预计在 2020 年将达到 14 亿左右。相比 2000 年, 人口增加了 1 亿, 这些新增人口必将产生新的电力能源需求。此外, 更为关键的是城市化进程对电力能源需求的影响。由于城市化的发展将带来生活方式的变化, 必然也会带来新的电力能源需求。在 2000 年, 中国的装机容量仅为 3 亿千瓦, 预计在 2020 年中国装机总量将达到 16 亿千瓦, 年平均保持 0.65 亿千瓦/年的增加^[2]。这表明人口的增加会影响电能需求, 尤其是在新兴工业化国家, 比如中国、印度等; 同时, 由于城市化进程的影响, 新兴工业化国家和发展中国家对电能的需求也远高于发达国家。

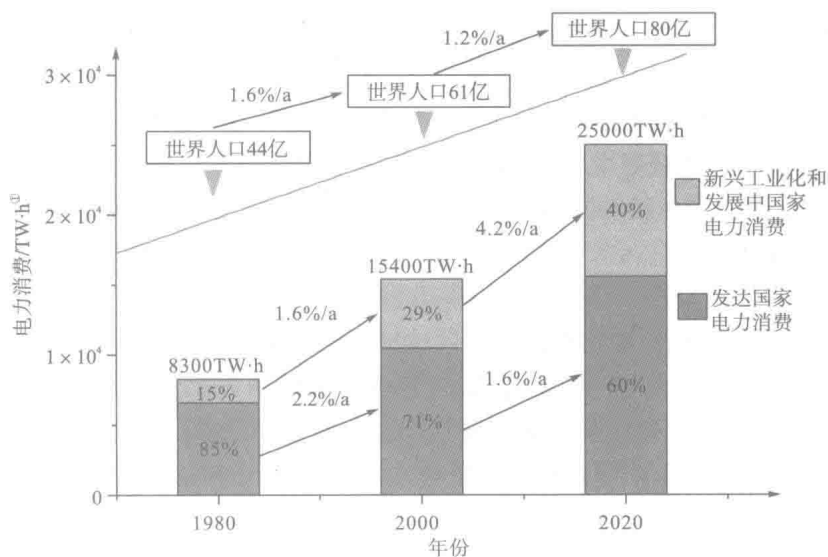


图 1-1 1980~2020 年世界人口和能源消费^[1]

数据来源: 国际能源署, 08/2002。

(2) 中国的城市化进程。1978 年, 中国城镇人口比重只有 16%, 而 1996 年该比重上升到 31%。从此, 中国城镇化开始进入快速发展时期, 到 2006 年, 城镇人口比重已上升

① 1 TW·h = 1 × 10⁹ kW·h。

到 44%^[3]。1996~2006 年, 城镇人口比重平均每年提升 1.4 个百分点, 相比 1978~1996 年平均每年提升 0.6 个百分点的增速快了 1 倍多。2008 年底, 全国城镇人口比重上升到 46%, 比 2007 年提高了 0.7 个百分点, 中国进入城市化中期发展阶段。到 2010 年, 全国城市人口达到 6.3 亿左右, 城市化水平达到 48%; 预计到 2020 年, 城市化发展水平将达到 58% 左右。可以说, 目前及未来一段时间, 中国城市化处于加速发展时期, 城镇人口持续快速扩张是这一阶段的基本特征。

如果到 2050 年中国达到中等发达国家水平, 中国的城市化率将达到 70%~80%。这意味着, 2000~2050 年的 50 年时间内, 中国的城市化增长率为每年 0.78%~0.98%。这也意味着在这 50 年内, 中国将有 7.2 亿~8.8 亿人口从农村转移到城市, 以年计, 每年需要进入城市的人口多达 1000 多万人。可以想象, 如此巨大的城市化规模, 必然带来巨大的电能需求的增加。

(3) 城市化进程与电力消费。城市化进程意味着能源的大量消耗与结构转换。一方面, 城市化进程中的工业化特征是高耗能产业的迅速发展。城市交通与基础设施的完善需要大量的能源, 工业化的过程也将需要大量的能源消耗。另一方面, 在政策的推动下, 能源消费特征与消费结构也将发生转变。农村人口移居城市后, 电力将替代煤炭、木材等传统能源, 最为显著的是城市交通发展会导致更多的电力消费。比如, 近年来提倡的绿色电能替代是国内外未来发展趋势, 德国宣布 2030 年或将禁止出售传统内燃机汽车; 荷兰政府讨论 2040 年不再出售柴油和汽油车型; 英国政府计划提高环境污染税征收额度, 并承诺到 2040 年前, 禁止生产使用所有新的柴油和汽油汽车^[4]; 中国于 2017 年 9 月已启动研究制订传统能源汽车禁售时间表^[5]。可以预见, 庞大的电能消费需求, 将导致电力消费的持续增加。

人均用电量这个指标可以在一定程度上反映一个国家或地区经济发展水平和人民生活水平。从全球看, 人均用电量可以大致分为四个档次: 第一个档次是年人均用电量为 10000 kW·h 以上的, 主要是北美、北欧及澳大利亚等少数发达国家和地区; 第二个档次是年人均用电量为 5000~10000 kW·h, 大部分发达国家都在此列; 第三个档次为 2000~5000 kW·h, 主要包括金砖国家等新兴市场; 第四个档次是不足 2000 kW·h, 主要是一些发展中国家和欠发达地区^[6]。当然, 在中国由于地域差异, 各个地区之间的人均用电水平差异很大, 尤其在一些能源输出地区和欠发达地区的人均用电量, 存在较大的差距, 但目前我国大部分地区水平处于第三档次, 即在 2000~5000 kW·h。截至 2014 年, 我国人均用电量是 4038 kW·h/年, 相比美国、欧洲等国家和地区 10000 kW·h/年的水平, 仍然还有较大的差距。预计 2020 年中国人均电力消费水平将超过 5000 kW·h。若 2020 年中国人均用电达到 5000 kW·h, 则大致相当于英国、日本 20 世纪 70 年代末和韩国 90 年代末的水平。此外, 另一个与经济发展水平和人民生活水平相关的指标是人均生活用电量。上文提到的人均用电量, 里面包含了工业用电量, 实际上并不能真实反映生活用电量的水平, 尤其是人们的实际生活和城市化水平, 因此可以将人均生活用电量作为城市化和当地经济发展水平的参考。2011 年主要国家人均年生活用电量来看, 美国、加拿大最高, 超过 4400 kW·h; 法国、日本超过 2000 kW·h; 德国、韩国、意大利超过 1000 kW·h; 俄罗斯超过 900 kW·h; 巴西为 462 kW·h; 印度最低, 仅为 137 kW·h。2011 年, 中国人均年生活用电量为 417 kW·h, 不到美国的 1/10; 但中国人均年生活用电量增速最快, 2000~2011

年,中国该数据年均增长超过10%。2012年中国各省(自治区、直辖市)人均年生活用电量的平均水平是461 kW·h。经济越是发达的地区人均生活用电量也就越高,北京市人均年生活用电量接近800 kW·h,而甘肃省只有257 kW·h。值得注意的是,由于各地产业结构不同,特别是工业比重不同,人均用电量高的地区未必人均生活用电量高。例如,内蒙古自治区的能源等重工业比重大,人均用电量达到8112 kW·h,排名全国第三,但人均生活用电量仅为408 kW·h,排名全国第14^[7]。由此可知,和发达国家相比,我国的人均生活用电量还有很大的提升空间。

(4)城市化对电缆系统的需求。随着城市化的快速发展,人们对电能的需求量不断增加,而且中国城市的人口和工业集中度更大,城市电网的建设将进一步加大。现代城市化一个重要的特征是建设现代环境友好型城市,过去的架空线路在成本、过载能力、故障抢修处理等方面都比电缆有优势,但是,随着人们对环境和谐的现代化城市的需求和绝缘材料的飞速发展,以往在市区道路两边的架空输配电线路的方法已逐步被电缆所取代。地下电缆线路和架空线路相比,可以节省空中走廊,减少输配电线路对城市市容的影响,在供电可靠性方面,架空线路易受高空落物、雷击、鸟害等影响而引发停电事故。同时,架空线路不易维护,供电可靠性差等劣势难以满足输配电工程发展的需求。

自1890年世界上首次使用电力电缆至今,已有100多年的历史。电力电缆线路得以迅速发展的原因主要有以下几个方面。①对于发达的工业化国家来说,因为人口的增加和公共交通运输的需求,必须通过电缆来实现电力的传输。②近年来,公众的环保意识逐渐提高,特别是在一些大城市,不论是在市区还是郊区建立新的架空输电系统都是很难获得公众认可的。随着我国城市建设的迅速发展,公众和政府都希望用地下电缆替代传统的架空线,尤其是电压等级在110 kV以上的高压电缆系统。③在一些发展中国家,比如中国、印度的一些大城市,由于城市化的发展对电缆系统有着强烈的需求,导致其110 kV和220 kV的高压电缆系统发展非常迅速,因此,地下的输电和配电系统变得越来越重要。无论在城市的中期还是长期的规划中,地下电缆和电缆系统的重要性都将更加凸显。

在过去的十年,随着我国经济和城市化水平的快速发展,中国国家电网公司的电缆使用量也在稳步增长。截至2010年底,国家电网公司系统6~500 kV在运电缆线路达到386768回,回路总长度为234166 km。2000~2010年,110 kV电缆年平均增长率为27%,220 kV年平均增长率为24%。6~500 kV的XLPE(交联聚乙烯)绝缘电缆占98.68%。电缆设备的平均投运年限为5.9年。83%的电缆线路位于我国的华东、华北、华中区域^[8]。目前,我国一线城市的核心城区的电缆化率已达到90%以上甚至更高,比如上海电网在中心城区达95%左右,而北京核心区的电缆化率为94%,部分二线城市的电缆化率也超过70%^[9-11]。

1.2 中国的电压等级和电缆的分类及特点

1.2.1 电压等级

通常的电力系统包括发电、输电、配电和用电几个环节,由架空线、电缆、变压器、发电机和开关设备等组成,从发电厂、变电站向用户输送电能。由于功能不同,电网包含不同等级的电压。在中国,有几个主要的电压等级:380/220 V、3 kV、6 kV、10 kV、

35 kV、110 kV、220 kV、330 kV、500 kV、750 kV、1000 kV，直流 ± 800 kV等。其中，低压 380/220 V；中压 3~35 kV，主要承担配电任务，35 kV 主要在农村电网使用，10 kV 在城市配电系统中使用；高压 110~220 kV；超高压 330~750 kV；特高压交流 1000 kV 及以上。直流线路电压等级和交流略有不同，其中高压直流 ± 600 kV 及以下；特高压直流 ± 750 kV 和 ± 800 kV。

在中国，三相电缆在 400 V(通常称为“1 kV 电缆”)到 500 kV(超高电压电缆)之间的所有等级电压的应用非常广泛。由于各个国家和各个行业对电压等级的划分也有可能不同，本书主要参考国际上的一些通行的划分标准(高压电缆： $35 \text{ kV} < U_N \leq 220 \text{ kV}$ ，超高压电缆： $U_N > 220 \text{ kV}$ ，其中， U_N 指电缆额定电压)。

500 kV 的超高压电网由电缆提供远距离大功率的电能传输，目前主要是在我国几个一线城市使用，如北京市、上海市等地。在大城市，110 kV、220 kV 电缆的高压电网从发电厂或变电站向主要能源消费节点输送电能。在这些节点通过 10 kV 的中压电网进一步进行分布。大多数消费者连接的是低压电网，如 380/220 V 电压等级。应当指出，电缆额定电压 U_N 仅用于指定系统的线电压(比如 110 kV 电缆指该电缆适用于 110 kV 系统)，而电缆绝缘的测试校验电压通常建立在系统运行的最高电压 U_m 基础之上，其至少等于最高持续运行电压，通常高于系统额定电压的 5%~20%。比如 10 kV 电缆的额定电压为 10 kV，该配电系统的平均电压为 10.5 kV，考虑电压偏差为 1.1 倍，因此其最高持续运行电压为 12 kV，依此类推，35 kV 系统电缆的最高持续运行电压为 40.5 kV。

1.2.2 电缆的分类和特点

电网的运行离不开电缆的支持，电缆作为电力系统的重要组成部分，承担着电能的运输和分配等任务。电缆从基本结构上看，主要由以下三部分组成，如图 1-2 所示。①导电的缆芯，用于传输电能；②绝缘层，保护电能沿导电线芯传输，在电气上使导体与外界隔离；③保护层，起保护密封作用，使绝缘层不受外界潮气侵入，不易损伤，从而保持绝缘性能良好。但在实际的电缆制造中远不只这三层，还包括绝缘屏蔽、导体屏蔽、填充层和钢铠等。

电缆有多种分类方法，可按电压等级分类、按线芯截面积分类、按导体芯数分类、按绝缘材料分类等。

(1) 按电压等级分类。电缆都是按照一定电压等级制造的，按电压等级可以分为以下四类：①低压电力电缆：1 kV；②中压、中高压电力电缆：6~35 kV；③高压电力电缆：63~220 kV；④超高压电力电缆：大于 220 kV，目前常见的最高电压等级为 500 kV，但国外也有更高电压等级电缆制造成功的报道。

(2) 按导电线芯截面积分类。我国电缆导电线芯标称截面系列为 2.5 mm^2 、 4 mm^2 、 6 mm^2 、 10 mm^2 、 16 mm^2 、 25 mm^2 、 35 mm^2 、 50 mm^2 、 70 mm^2 、 95 mm^2 、 120 mm^2 、 150 mm^2 、 185 mm^2 、 240 mm^2 、 300 mm^2 、 400 mm^2 、 500 mm^2 、 625 mm^2 、 800 mm^2 ，共 19 种。高压充油电缆导电线芯标称截面系列为： 100 mm^2 、 240 mm^2 、 400 mm^2 、 600 mm^2 、 700 mm^2 、 845 mm^2 ，共 6 种。事实上，随着电网希望能进一步提高传输功率的迫切需求， 1000 mm^2 ，甚至 2500 mm^2 截面的高压电缆也已投入运行。

(3) 按导体芯数分类。电缆导电线芯数有单芯电缆、二芯电缆、三芯电缆、四芯电缆、

五芯电缆。①单芯电缆通常用于传送单相交流电、直流电；也可在特殊场合使用，如高压电机引出线等。60 kV 及其以上电压等级的充油、充气高压电缆多为单芯。②二芯电缆多用于传送单相交流电或直流电。③三芯电缆主要用于三相交流电网中，在 35 kV 及以下的各种电缆线路中得到广泛的应用。④四芯电缆多用于低压配电线路中的三相四线制系统。⑤五芯电缆比四芯电缆多了一根专门的地线，多用在安全要求较高，设备要求统一接地的场所。

(4)按绝缘材料分类。目前，应用在电力电缆中的绝缘材料比较多，它也决定了电力电缆的结构形式及主要性能，通常有油浸纸绝缘电缆和塑料绝缘电力电缆两大类，如图 1-3 所示为高压的 XLPE 电缆和油纸电缆。

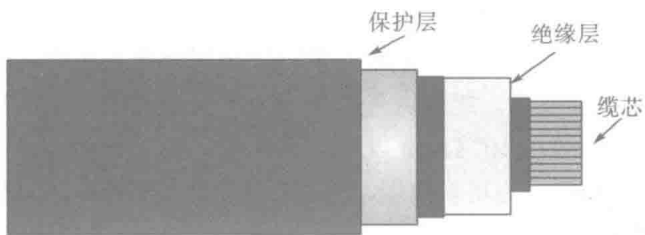


图 1-2 电缆模型及基本结构



图 1-3 高压的 XLPE 电缆和油纸电缆

①绝缘纸主要成分为天然纤维素，其分子链在绝缘中的聚集态为结晶和无定形二相共存的形式。油浸绝缘纸在电-热应力的协同作用下发生纤维素裂解，生成水分、酸、呋喃衍生物及碳氢化合物等，影响绝缘的电气、机械性能。绝缘纸分子结构和聚集态结构在电热老化应力作用下，纤维素链的醚键易于打开，老化后期纤维素六边环结构会破坏严重，同时绝缘纸的结晶度和晶粒大小呈下降趋势。此外，水分、酸和温度等因素都会对油浸纸绝缘电力电缆寿命产生影响。油纸电缆的绝缘结构是一种较为稳定的绝缘结构，其有着很长时间的的使用历史和运行经验，尤其是在高压输电领域。

②塑料绝缘电缆是挤包型绝缘电缆的一种。由于近几年的发展速度较快，其已有完全取代油浸纸绝缘电缆的趋势。其主要特征是生产过程简单、容易敷设、安装维护方便。塑料绝缘电缆广泛应用于各种电压等级系统，根据绝缘材料成分不同有以下几种类型。

第 1 类，聚氯乙烯(PVC)绝缘电缆：主要用于 6/6 kV、6/10 kV 及以下中低压电压等级系统中，在 1 kV 以下配电线路中应用最多，电缆结构多数不带金属屏蔽层，对于特殊用途的电缆，如部分矿用电缆、油田井用电缆等，也会带单芯独立金属屏蔽或平行扁状结构。

由于 PVC 绝缘低压电缆在配电系统中的大量应用，在实际中很少对其定时进行试验维护，随着运行年限的增加，电缆的故障较多，相当一部分电缆处于不良工作状态，多表现为相间或相对地泄漏性高阻故障等。

第 2 类，交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆：XLPE 具有良好的耐热性、耐化学稳定性和耐热老化性等优势，被大量用于现今的电力输配电系统中。我国近十多年来，年消耗 XLPE 绝缘材料已超过 2 万吨，XLPE 电缆已是我国电力电缆中需要量最大的品种。我国已制定

了十几种 XLPE 电缆的标准。鉴于 XLPE 电缆在我国被大量使用,尤其是在中高压电网中的大量应用,下一小节将专门就其特点进行更为详细的介绍。

XLPE 电缆适用于输电网、配电网、工业装置或其他需要大容量用电领域,用于固定敷设在交流 50 Hz、额定电压 6~500 kV 的电力输配电线路上,主要功能是输送电能。XLPE 电缆是利用化学或物理的方法,使电缆绝缘 PE(聚乙烯)分子由线性分子结构转变为立体网状分子结构,即热塑性的 PE 转变为热固性的 XLPE,从而大大提高它的耐热性和机械性能,减少它的收缩性,使其受热以后不再熔化,并保持优良的电气性能。与 PE 相比,其耐热温度更高,可以传输更大的功率。

1.2.3 XLPE 电缆结构及特点

XLPE 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防止挤塑半导电屏蔽层时半导电料进入线芯;③有效地防止水分顺线芯进入;④有利弯曲。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,会引起连接部位发热。绝缘内外的半导电屏蔽层均采用加炭黑的 XLPE 料,半导电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 1~2 mm。根据国家标准,10 kV 及以下电缆的外半导电层为可剥离层,35 kV 以上为不可剥离层,其主要原因是可剥离层的存在使电缆抗局部放电能力降低,当附件安装时可能会造成局部气隙。

电缆金属屏蔽层,又称铜屏蔽层,它为电缆故障时的短路电流提供通路和一个稳定的地电位,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常用钢带作为铠装层,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,所以高压或超高压电缆均用不透水的金属内护套。另外,在高压电缆内护套中,还有防水带等隔水工艺,使得已进入的水分不易扩散。10 kV 三芯 XLPE 电缆结构如图 1-4 所示,110 kV 单芯 XLPE 电缆结构如图 1-5 所示。

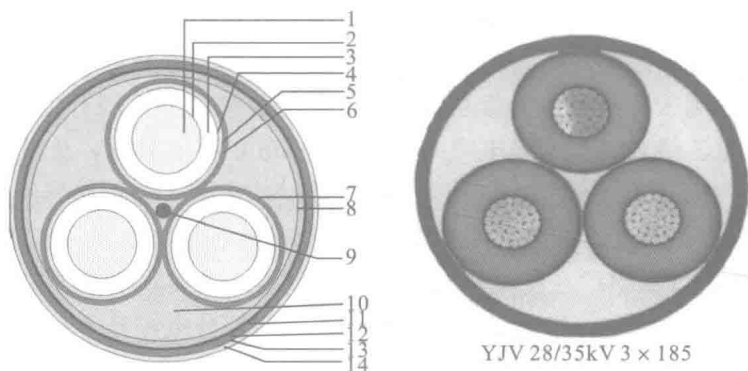


图 1-4 10kV 三芯 XLPE 电缆结构

注: 1-导线; 2-导线屏蔽层; 3-XLPE 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-铜带; 14-外护套