



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

超高压交流地下电力系统的性能和规划

EHV AC Undergrounding Electrical
Power: Performance and Planning

(意) R. Benato 著
A. Paolucci
徐政 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



本书主要讲述了地下交流电力系统的建模和运行特性分析方法,内容包括交流电缆系统和气体绝缘管线的数学模型,交流超高压电缆的运行特性分析方法,交流超高压架空线路与地下电缆混合系统运行特性的分析方法,以及架空线路与地下电缆的技术、经济比较等。本书适合于从事电缆制造的技术人员,电力系统规划、设计、运行的工程师,以及高等院校电气工程专业的教师和研究生阅读。

Translation from the English language edition: “EHV AC Undergrounding Electrical Power: Performance and Planning” by Roberto Benato & Antonio Paolucci (edition: 1; year of publication: 2010).

Copyright© 2010 Springer Verlag London, as a part of Springer Science + Business Media.

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社独家出版。版权所有,侵权必究。

本书版权登记号:图字 01-2010-7822 号。

图书在版编目(CIP)数据

超高压交流地下电力系统的性能和规划/(意)贝纳特(Benato. R), (意)保卢西(Paolucci. A)著;徐政译. —北京:机械工业出版社, 2012. 4
(国际电气工程先进技术译丛)

EHV AC Undergrounding Electrical Power: Performance and Planning

ISBN 978-7-111-37511-1

I. ①超… II. ①贝…②保…③徐… III. ①超高压-交流-电力系统-研究 IV. ①TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 032091 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:付承桂 责任编辑:任鑫

版式设计:霍永明 责任校对:陈延翔

封面设计:马精明 责任印制:杨曦

北京双青印刷厂印刷

2012 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·10.75 印张·205 千字

0 001—3 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-37511-1

定价:49.80 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心:(010) 88361066

门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售一部:(010) 68326294

教材网:<http://www.cmpedu.com>

销售二部:(010) 88379649

读者购书热线:(010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

译者的话

随着城市化进程的加速和海洋输电的兴起，以及对环境保护的日益重视，地下电缆输电和海底电缆输电得到了很大的发展。电缆输电与架空线输电在特性上有很大的不同，由于电缆电容比架空线大得多，交流输电时，电缆长度达到一定限值后，电缆中全部输送容量将仅仅用来对电缆自身充电，功率将无法送出，这使得不加补偿的电缆线路输电距离远远低于架空线路。另外，电缆运行的一个根本性特点是，电缆绝缘层的工作温度不能超过其耐热寿命允许值。因此，对于电缆运行特性的分析，总是以载流量计算为其核心问题。关于电力电缆的研究，国际上相当重视，主要的国际学术组织如国际电工委员会（IEC）、国际大电网会议（CIGRE）等都设有专门的研究委员会。例如，CIGRE 就专门设置有“绝缘电缆”（编号 B1）的研究委员会，同时它也是 CIGRE 16 个专门委员会之一。IEC 关于电力电缆的代表性成果有 IEC 60287 和 IEC 60853 两个国际标准。但总体上看，国际上关于电力电缆电气运行特性方面的研究，资料并不多见；2009 年出版了一本海底电力电缆方面的专著，2011 年该著作已被翻译成中文，即由机械工业出版社出版的《海底电力电缆：设计、安装、修复和环境影响》。但该书没有论述电力电缆电气运行特性方面的问题。国内关于电力电缆方面的研究，代表性的成果是国家标准 GB 50217—2007《电力工程电缆设计规范》和行业标准 DLT 5221—2005《城市电力电缆线路设计技术规定》。希望本书的翻译能对我国地下交流输电技术的发展有所帮助。

限于译者水平，译稿中难免存在错误和不妥之处，恳请广大读者批评指正。译者联系方式：电话（0571）87952074，电子邮箱 xuzheng007@zju.edu.cn。

徐 政

2011 年 11 月

于浙江大学求是园

原书序言

当前，高压和超高压绝缘电缆正呈现出快速发展的态势，并且更重要的是，与以往相比，在越来越多的场合开始考虑采用高压和超高压电缆输电系统。

这意味着目前绝缘电缆被用户看作为提升电网能力的一种方案，可以有效、快速和可靠地解决各种复杂问题。例如，通过混合使用架空线路和地下电缆，而不像以往那样仅仅使用架空线路，可以解决过去完全不可能解决的问题。

促成上述趋势的原因有两个：一个是对环境保护的更加关注，使得架空线路不再是有吸引力的方案；另一个是技术的不断进步使得绝缘电缆更具有竞争性。因此，需要对现代电缆系统和混合系统应用的可能性进行客观的评价。

基于上述背景，为了更好地了解将绝缘电缆用于电网时需要考虑的因素，本书所作的贡献是及时而有效的。

本书内容全面，包含了相关的技术问题，并结合经济、环境和社会因素进行了分析，一定会引起电缆系统用户、电缆工程师以及电气工程领域学生的兴趣。

Aldo Bolza

2009年5月于意大利 Milan

原 书 前 言

我们将探索不息，
而所有这些探索的终点，
将会是我们曾经起步的始点，
但却是第一次认识这个始点。

——摘自诗人艾略特 (T. S. Eliot) 的《Four Quartets》

在交流电力系统的发展过程中，很多年来一直将长距离输电线路等同于架空线路，而高压和超高压绝缘电缆大多用于海底直流输电系统。在最近的几十年中，关于环境保护的意识越来越强，使得架空线路的修建面临极大的限制；而高质量挤包绝缘电缆（交联聚乙烯——XLPE 电缆）可靠性的增加，已激发了电网规划人员和电网业主使用大量交流高压和超高压电缆线路。因为电缆线路具有无可置疑的适应性，它可以解决电网改变、扩展和加强过程中所遇到的用地问题。当前，在电气工程师的行话中，诸如地下、地下电缆和混合线路（架空线路与地下电缆的级联）等术语已经有了很清晰的意义。

电网中一条新线路（架空线路、地下电缆或者混合线路）的规划，需要经过大量的电网仿真验证，这些仿真包括潮流计算、短路电流计算和暂态分析等。通常，在进行这些研究之前，先要进行先决条件分析，以帮助电网规划人员确定结构、进行比较以及选择更合适的方案，特别是在可选方案非常多的情况下，如与绝缘电缆相关的工程。事实上，本书的内容就是针对先决条件分析阶段有关电能输送方面的问题而展开的，并特别注重运行方面的要求。

根据一个世纪前就已经确立的输电线路经典方程，采用全新的方法进行重新整理，本书作者创造了一些新的有功-无功 (PQ) 能力图（见第3章的地下电缆能力图和第4章的混合线路能力图）。一旦确定了满足输电线路寿命和电能质量约束的电压和电流极限值，那么在 PQ 能力图上就可以直接看到在这些极限值之内可能达到的最好性能。这些 PQ 能力图考虑了稳态载流容量、稳态电压水平、次暂态电压、并联补偿度和其他重要参数，其重要性可类比于功率圆图。它们在如下两个方面极其有用：一方面能够为地下电缆和混合线路的规划提供原创性的有效指导；另一方面能够使这些规划的输电线路与原有的电力系统完全兼容。

贯穿本书，有多处对电路理论进行了重新阐述，其中之一就是重新认识了

VI 超高压交流地下电力系统的性能和规划

Ossanna 理论。Ossanna 理论建立于 1926 年，本书的 3.9.2 节对它重新进行了阐述。该理论不仅简单，而且是一种极其美妙且强有力的解析分析工具。采用该理论，一旦固定线路某一端口的复功率，就能直接计算出任何交流系统中电压的可能运行状态，而不需要目前通常使用的迭代步骤。Ossanna 理论在进行输电线路性能分析时特别有用，实际上它应当被看作是电路理论中的一个重要工具。

此外，本书的第 6 章从工程客观的角度，给出了地下电缆与架空线路经济性比较的一个框架，并试图帮助相关的用户明晰这个具有主观印象的领域。

本书的主要内容如下：

1) 对大型超高压电缆工程作了一个全景描述（见第 1 章）。其中，基于某些示范性工程的详细报告对某些工程进行了较详细的描述。

2) 针对典型的架空线路和具有循环换位的交叉互连电缆线路以及气体绝缘管线，概述了用于分析稳态特性的正序模拟方法（见第 2 章）。

3) 倡导持之以恒地使用某些国际标准和国家标准。

4) 描述了新颖的 PQ 能力图，给出了地下电缆和混合线路 PQ 能力图的很多例子。 PQ 能力图可以全面而彻底地看清在所选定的电压和电流约束条件下的输电线路的性能。

5) 给出了与输电线路（包括地下电缆和混合线路）空载合闸和空载分闸相关的准则。

6) 对某些标准的解析表达式的物理意义进行了教学意义上的评述。

7) 介绍了基于作者自创的工频矩阵方法进行地下电缆多导体分析的步骤，并给出了分析的案例。这种方法可以研究所有电缆导体（包括相导体和护套）的电气特性，并能够通过相互比较来验证简化方法的有效性。

8) 描述了对架空线路与电缆线路进行技术和经济性比较的方法（见第 6 章），可以作为欧盟推荐的环境影响评估的一个部分。

作者希望本书能给电气工程师提供一套现代而完整的分析工具以应对未来电网的挑战，在未来电网中，地下输电将会起到关键性的作用。

Roberto Benato 和 Antonio Paolucci

2009 年 6 月于意大利 Padova

目 录

译者的话

原书序言

原书前言

第 1 章 世界范围的高压电缆统计和几个大型电缆工程..... 1

1.1 引言	1
1.2 已投运电缆的长度统计	3
1.3 超高压电缆系统的大型工程	5
1.4 Sardinia-Corsica 的陆地和海底 150kV 交流电缆系统——SAR. CO	7
1.5 西班牙马德里 Barajas 机场工程	11
1.5.1 Barajas 工程的时间节点	11
1.5.2 Barajas 工程的技术特性	12
1.5.3 Barajas 工程的隧道和接地系统特性	13
1.5.4 Barajas 工程的超高压电力电缆	13
1.5.5 Barajas 工程隧道中电缆的敷设	15
1.5.6 Barajas 工程的转接站和保护方案	17
1.6 意大利 Turbigo-Rho 混合线路中的 380kV 双回电缆	18
1.6.1 Turbigo-Rho 工程的时间节点	19
1.6.2 Turbigo-Rho 混合线路的地下电缆工程	20
1.6.3 超高压电力电缆	21
1.7 Turbigo-Rho 混合线路电缆的敷设	22
1.7.1 Turbigo-Rho 混合线路电缆的转接站和保护方案	25
参考文献	26

第 2 章 对称线路的正序模型 28 |

2.1 引言	28
2.2 一条均匀线路的传输矩阵	28
2.3 单芯电缆单位长度参数的计算	31
2.3.1 电缆 r 的计算	31
2.3.2 电缆 l 的计算	32

2.3.3 电缆 c 的计算	33
2.3.4 电缆 g 的计算	33
2.4 气体绝缘管线 GIL 的单位长度参数计算	35
2.4.1 GIL 单位长度视在电阻 r 的计算	35
2.4.2 GIL 单位长度电感 l 的计算	36
2.4.3 GIL 单位长度电容 c 的计算	37
2.4.4 GIL 单位长度并联电导 g 的计算	37
2.5 从基本矩阵导出的其他矩阵关系式	38
2.6 两端口电路 (TPN) 的级联	39
2.7 在电气和热力上没有耦合的相同两端口电路的并联连接	40
2.8 并联无功补偿	41
2.8.1 均匀分布补偿	42
2.8.2 集中补偿	43
参考文献	44
第3章 长距离交流超高压电缆的运行特性	45
3.1 引言	45
3.2 基本约束	45
3.3 第1步分析——对应于 I_R 固定和 $U_{os}(\delta)$ 中的 δ 可变	48
3.4 第2步分析——对应于 I_s 固定和 $U_{os}(\theta)$ 中的 θ 可变	49
3.5 沿电缆线路的电压和电流	50
3.6 满足基本约束条件和受端电压水平要求时的功率值	52
3.7 空载投入和切除	55
3.8 有功功率与无功功率能力图	58
3.8.1 长度 d 的理论极限	64
3.9 功率区域内的稳态运行点	67
3.9.1 加强版 PQ 能力图	67
3.9.2 Ossanna 方法的应用	69
3.10 气体绝缘管线 (GIL)	73
3.11 $U_{os} \neq 230\text{kV}$ 时的运行情况	75
3.12 作为交集的“受端域”与“送端域”	75
3.12.1 作为交集的“受端域”的确定	75
3.12.2 作为交集的“送端域”的确定	76
3.13 具有集中并联补偿的电缆沿线分析	77
3.14 结论	80

参考文献	80
第 4 章 交流超高压架空线路和电缆混合系统的运行特性	81
4.1 引言	81
4.2 混合线路: 架空线路-地下电缆-架空线路	81
4.3 用于系统分析的传输矩阵	84
4.4 第 1 步分析	84
4.5 第 2 步分析	86
4.6 PQ 能力图	88
4.6.1 R 端的相电压水平	90
4.7 空载投入和切除	90
4.8 以 PQ 能力图为指导	96
4.9 作为交集的“受端域”与“送端域”	101
4.10 完整的分析	103
4.10.1 基于 Ossanna 方法和矩阵算法的完整分析	104
4.11 电路方面的专题	105
4.11.1 矩阵 $\underline{N}_{H1}$ 、 $\underline{N}_{S1}$ 、 $\underline{N}_{R1}$	105
4.11.2 矩阵 $\underline{N}_{H1}$ 的元素	105
4.11.3 矩阵 $\underline{N}_{S1}$ 的元素	107
4.11.4 矩阵 $\underline{N}_{R1}$ 的元素	107
4.11.5 矩阵 $\underline{N}_{R2}$ 、 $\underline{N}_{S2}$ 、 $\underline{N}_{R2}$	107
4.12 结论	108
参考文献	109
第 5 章 地下电缆的多导体分析	110
5.1 引言	110
5.2 由三根单芯电缆构成的电缆线路的多导体单元	111
5.2.1 用于模拟基本单元的导纳矩阵 $\underline{Y}_\Delta$	113
5.2.2 采用简化的 Carson-Clem 公式计算矩阵 $\underline{Z}_L$	113
5.2.3 采用完整的 Carson-Clem 公式计算矩阵 $\underline{Z}_L$	114
5.2.4 采用 Wedepohl 理论计算矩阵 $\underline{Z}_L$	114
5.2.5 矩阵 $\underline{Y}_{TA}$ 的计算	115
5.3 换位接头的模拟—— $\underline{Y}_j$	116
5.4 护套接地和并联电抗器的模拟—— $\underline{Y}_E$ 和 $\underline{Y}_{Eg}$	116

X 超高压交流地下电力系统的性能和规划

5.5 多导体送端的电源模型	118
5.6 用于负载模拟的等效受端矩阵	119
5.7 由“分块导纳矩阵”模拟的模块级联：一个一阶简单电路	120
5.7.1 在一阶简单电路中引入其他模块及稳态分析	121
5.7.2 空载合闸次暂态分析	123
5.8 k 个模块级联后的等效导纳矩阵	124
5.9 多导体分析应用于第3章早已研究过的60km#b 电缆	125
5.9.1 与其他方法的比较	133
5.10 结论	134
参考文献	135
第6章 交流架空线路与地下电缆总体成本的比较方法	136
6.1 引言	136
6.2 比较过程中所用的交流架空线路和地下电缆	137
6.3 架空线路和地下电缆的投资成本	142
6.4 能量损耗及其实际成本	143
6.5 用地的负担	146
6.6 对视觉的影响	148
6.7 运行和维护 (O&M) 费用	149
6.8 拆除与退役成本	150
6.9 地下电缆并联无功补偿的成本	150
6.10 两个算例——10km 长的#a1 架空线路与 2#c1 地下电缆	152
6.10.1 基于图 6-14a 负荷持续曲线的第 1 个案例分析	152
6.10.2 基于图 6-14b 负荷持续曲线的第 2 个案例分析	154
6.10.3 主要参数的灵敏度分析	154
6.11 取图 6-14a 持续曲线时对 6.9 节案例的分析	155
6.12 结论	156
参考文献	157

第 1 章 世界范围的高压电缆统计和几个大型电缆工程

1.1 引言

美国国家工程院已经就电网的发展进行了公正的陈述^[1]，即电网是 20 世纪最大的工程成就。

看不见的电及由电构成的网络在工业界被认为是绝对理所当然的，尽管电网跨度很大并有可能存在弱点（停电）。工程师们在思考电的不可见性时，会自然地将其思路转到电缆的地下化。

自从输电和配电出现以来，地下化一直具有关键性的作用。

值得纪念的是，为纽约珍珠街供电的第一条输电线路是在 1882 年建成的，采用的是敷设在街道下沟道中的直流绝缘导体。此外，英国第一个已知的公用供电系统出现于 1881 年，它利用一条小河中的水力进行发电，以点亮 Surrey 县的 Godalming 街。那时候，没有法定的权力来迫使想要成为供电商的人将电缆埋到街道或人行道的下面。因此，Godalming 街的电缆被敷设在街道的排水沟中^[2]。

世界范围内，由于对人口稠密城市及其郊区的安全性以及对市容建筑的关注度在不断地增长，同时很多地方为了保护其风景价值，越来越需要将某些设施建筑在地下。

一方面，为了对输电网络进行加强使其更加坚固；另一方面，新建架空线路遇到的困难几乎是难以克服的。这些导致在输电网络中越来越多地倾向于使用地下输电线路。

由于电力网络已处于非常成熟的阶段，因此从中长期看，电缆系统的重要性必定会稳步提高。上述断言可以用很多论据来论证^[3]，即

- 1) 工业化国家中大都市圈不断增长的能源消耗只能通过采用地下电缆来满足；
- 2) 由于公众环境保护意识的日益增强，新建架空线路存在巨大的困难，即使是在大都市区域的外面；
- 3) 在某些国家，磁场辐射的极限值将迫使电网拥有者或电网运行人员将部分既存的架空线路替换成地下电缆；
- 4) 部分既存的由充油纸绝缘电缆构成的电缆网（建成于 20 世纪 50 年代末

之前)必须更换成新的,因此在未来几年中需要重新投资地下电缆;

5) 在很多发展中国家(例如土耳其的几个区域)对可靠的供电系统存在着大量的需求;

6) 发展中国家将主要使用电缆来扩张其电网。

对于上述的很多情况,输电线路不再是单一型式的,而是架空线路与电缆线路的混合。本书将仔细讨论这种新型线路,即混合线路。

下面是另一个值得仔细考虑的问题。本书作者在面对电力基础设施受制于土地约束问题时,经常引用美国电力研究院(EPRI)书中卓越的一节^[4]。该节认为,为了满足大型的工业化地区间不断增长的交换的需要,开发共用走廊是完全必要的。具体内容如下:

“共用走廊:由于生态和经济两方面的原因,未来输电系统扩展时,特别是大都市附近地区内的输电线路扩展时,将必须考虑与其他土地使用者共用其走廊。由单个电力公司单独使用土地会导致自然资源的低效利用。未来开辟新的线路走廊时必须考虑高速公路网、输油与输气管道、污水管道、附近的输电线路、电话线路、地下输电系统以及休养与娱乐设施的合适位置。这种线路走廊的开辟需要政府与工业界的协调努力。最近的一项研究^[5]概述了为充分利用其线路走廊电力公司可能遵循的步骤。”

上述 EPRI 的思路是对应美国的情况而提出的,尽管美国具有广阔的土地资源,但对于其他很多国家,上述思路也是强烈推荐的。

在欧洲,这个主题是如此的敏感和存在争议,使得国际大电网会议(CIGRE)专门成立了一个工作组 B1.08^[6],其名称为“多用途或共用结构中的电缆系统”;另外还成立了一个联合工作组 B3/B1.09^[7],其名称为“结构中的长距离大容量气体绝缘管线”,来研究这些技术方案的可行性和特性。

将特定土地上的基础服务设施(例如输电系统和交通系统)进行合理化布置,代表了在环境与技术的协调意识方面达到了一个更高的层次。当然,这仍然是一个巨大的技术问题,因为实现不同基础设施之间的完全兼容不是一件简单的事。此外,还有很多需要在邻近国家之间开辟新廊道的工程,而这些廊道属于群山之间的唯一通道。这种情况下,只能将交通线路(铁路和高速公路)与能源输送线路合并并在同一个廊道或同一个结构中^[8-13]。

这样可以对跨国的薄弱网络进行加强,因为往往由于跨国电网的薄弱阻碍了国际间电力市场的有效发挥。

不同性质的结构与输电线路共用一个走廊是对输电走廊的一种优化利用,协调不同技术领域的需要看来是 21 世纪的挑战。

另外再次说明,多目标结构可能会导致电缆技术的更快发展。

1.2 已投运电缆的长度统计

搜集目前已投运的交流地下电缆与架空线路的长度数据有助于对电缆整个发展过程有一个连贯的认识，并有助于了解未来地下电缆在电网中的发展趋势。

以下的统计数据来自于国际大电网会议（CIGRE）的研究报告^[14]，该研究报告通过向工作委员会成员发放问卷的方式搜集数据。

为了将相似的设计和运行原理进行归类，该统计数据被分成5个电压范围，分别为

- 1) 50 ~ 109kV;
- 2) 110 ~ 219kV;
- 3) 220 ~ 314kV;
- 4) 315 ~ 500kV;
- 5) 501 ~ 764kV。

该研究报告特别强调了在某些情况下搜集数据的困难性，特别是具有大量独立电力公司的国家，如美国和德国。

此外，在有些国家，维护此类数据的国家机构已经不能继续，因为电力公司已经从国家管制中释放出来，经历了重组、合并和收购的过程。

但是，尽管如此，图1-1还是给出了地下电缆线路的总长度占总线路长度的百分数。

从图1-1可以看出，大多数的线路是架空线路，地下电缆只占少部分。地下电缆线路的比例从50 ~ 109kV电压范围的6.6%下降到315 ~ 500kV电压范围的0.5%。

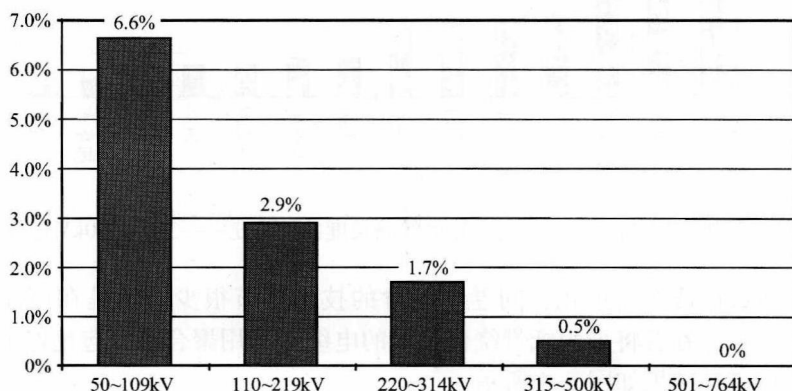


图1-1 交流地下电缆占总输电线路长度的百分比——对应5个电压范围

图 1-2 展示了不同国家在 220 ~ 314kV 电压范围内地下电缆所占的比例，而图 1-3 则给出了不同国家在 315 ~ 500kV 电压范围内地下电缆所占的比例。

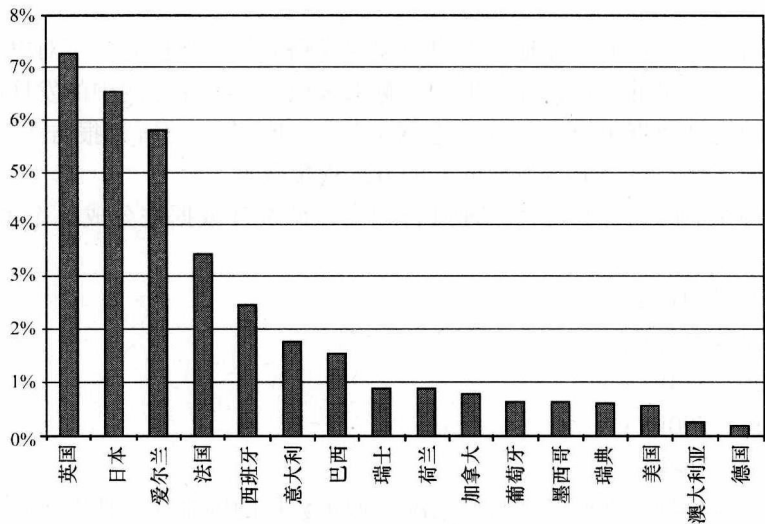


图 1-2 不同国家交流地下电缆占总输电线路长度的百分比——220 ~ 314kV 电压范围

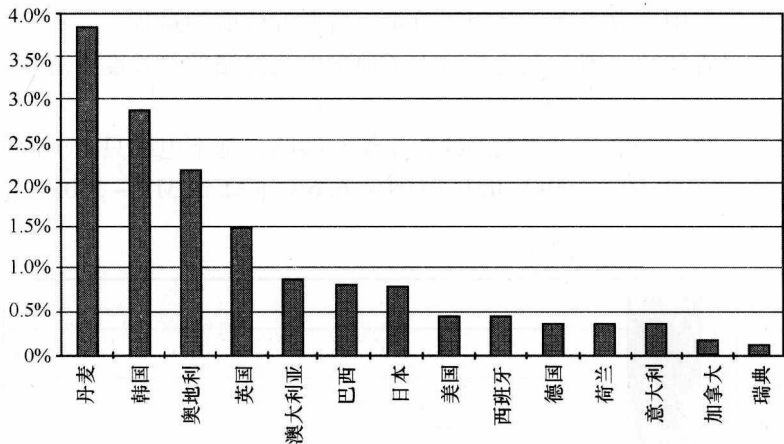


图 1-3 不同国家交流地下电缆占总输电线路长度的百分比——315 ~ 500kV 电压范围

为了使数据搜集简单化，问卷中包含的技术细节很少。但是在可能的情况下，还是要求回答者将采用纸带绕包技术的电缆与采用聚合物挤包绝缘的电缆区分开来。相应的结果如图 1-4 所示。

从图 1-4 中可以看出，电压等级越高挤包绝缘电缆所占比例越低，这反映了在这些电压等级上，电缆技术进步较慢。

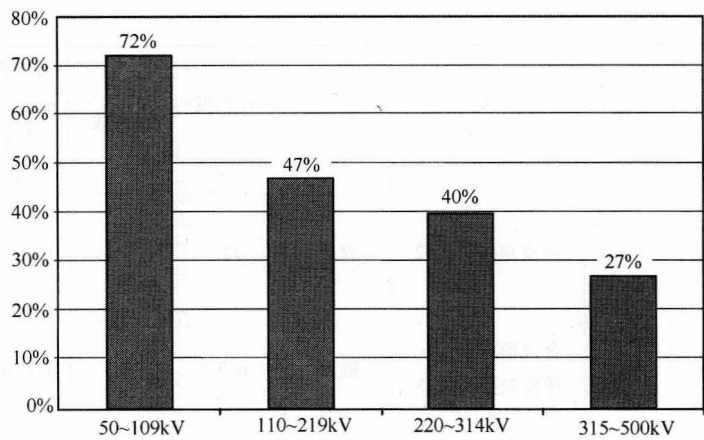


图 1-4 聚合物挤包绝缘电缆所占的百分比

挤包绝缘首先应用于较低电压等级和较低电气应力的电缆中，随着该技术的进步，逐渐应用到较高电压等级和较高电气应力的电缆中。

自从 1960 年代初期开始，50kV 的挤包绝缘电缆已经开始使用，而直到 2000 年左右，400kV 和 500kV 的挤包绝缘电缆输电线路才开始使用。

已经投运的电缆长度数据清楚地表明，电力公司更倾向于使用架空线路而不是地下电缆。

对于 50 ~ 109kV 的电压范围，93% 的输电线路是架空线路，而在 501 ~ 764kV 的电压范围，没有已投运的电缆工程。

1.3 超高压电缆系统的大型工程

为了展示最近几十年中超高压地下输电的巨大发展，推出表 1-1 和表 1-2^[15]是特别有意义的。很多超高压电缆工程是长距离架空线路的一部分，例如 Turbigio-Rho 工程和 Barajas 工程等，这再次表明了混合输电线路的重要性。

表 1-1 主要的超高压地下电缆工程（工频交流）^[15]

国 家	额定线 电压/ kV	接头的 类型和数目	工程类型	路径长度/ km	回路数	导体截面积/ mm ² ，冬季的 总输送容 量/MW	投运 年份
丹麦 (哥本哈根南 电缆通道)	400	合成预制接头，72	直埋	22	1	1600 铜，975	1997

6 超高压交流地下电力系统的性能和规划

(续)

国 家	额定线 电压/ kV	接头的 类型和数目	工程类型	路径长度/ km	回路数	导体截面积/ mm ² , 冬季的 总输送容 量/MW	投运 年份
丹麦 (哥本哈根北 电缆通道)	400	预模制接头, 42	直埋	12	1	1600 铜, 800	1999
德国 (柏林/ BEWAG Mitte- Friedrichshain)	400	合成预制接头 + 预模制接头, 48	隧道	6.3	2	1600 铜, 1100	1998
德国 (柏林/ BEWAG Friedrichshain- Marzahn)	400	合成预制接头 + 预模制接头, 30	隧道	5.5	2	1600 铜, 1100	2000
日本 (东 京——按日本 规范建设)	500	挤压成型接头, 264	隧道	39.8	2	2500 铜, 2400 (将来采用强 制冷却)、 1800 (目前)	2000
阿拉伯联合 酋长国 (Abu Dhabi)	400	预模制接头, 12	排管和 工作井	1.3 ^①	4	800 铜, 未得到	2000
西班牙马德里 (Barajas)	400	合成预制接头 + 预模制接头, 96	隧道	12.8	2	2500 铜, 3440	2004
丹麦 (Jutland)	400	预模制接头, 96	直埋和 排管	14.5	2	1200 铝, 1200	2004
英国 (伦敦)	400	合成预制接头, 60	隧道	20	1	2500 铜, 1600	2005
荷兰 (鹿特丹)	400	预模制接头, 3	直埋和 排管	2.25	1	1600 铜, 1000	2005
奥地利 (Wienstrom)	380	预模制接头, 30	直埋和隧 道和工作 井	5.2	2	1200 铜, 1400	2005
意大利 (米兰) 见 1.6 节 Turbigo- Rho 的混合线路	380	预模制接头, 60	直埋和 排管	8.4	2	2000 铜, 2100	2006

① 为 15 根电缆总计的长度, 实际使用的是三相四回路。

表 1-2 400kV 工程所采用的设计准则^[15]

工 程	电缆回路	导 体	电气应力 内/外 /(kV/mm)	金 属 屏 蔽	外 护 套	接 头
柏 林	A	1600mm ² 铜 5 片	11. 5/5. 4	铜线 + 层 叠铝箔	具有阻燃 漆的聚乙烯	39 个合成预 制接头
	B	1600mm ² 铜 5 片	12. 5/6. 2	铜线 + 层 叠铝箔	具有阻燃 漆的聚乙烯	15 个预模制 接头
	C	1600mm ² 铜 6 片	12. 5/6. 2	皱纹铝	具有阻燃 漆的聚乙烯	24 个预模制 接头
哥本 哈根		1600mm ² 铜单根	11. 5/4. 9	挤压成形 的铝	具有半导 体层的聚乙 烯	72 个合成预 制接头和 15 个预模制接头
马德里 (Barajas)	A	2500mm ² 铜 6 片	11. 6/6. 5	铜线 + 层 叠铝箔	具有阻燃 层的聚乙烯	48 个合成预 制接头
	B	2500mm ² 铜 6 片	12. 5/7. 2	焊接层叠铝 箔	阻燃聚乙 烯	48 个预模制 接头
伦 敦		2500mm ² 铜 6 片	11. 6/6. 5	铜线 + 层 叠铝箔	具有阻燃 层的聚乙烯	60 个合成预 制接头
Jutland		1200mm ² 绞合铝线	12. 6/6	铝线 + 层 叠铝箔	具有半导 体层的聚乙 烯	96 个预模制 接头
鹿特丹		1600mm ² 铜	11. 8/5. 9	挤压成形 的铝	聚乙烯	6 个预模制 接头
维也纳		1200mm ² 铜 5 片	12. 1/5. 7	铜线 + 焊 接铝	聚乙烯	30 个预模制 接头
Turbigo- Rho		2000mm ² 铜 6 片	11. 8/6. 4	焊接铝	聚乙烯	66 个预模制 接头

1.4 Sardinia- Corsica 的陆地和海底 150kV 交流电缆系统——SAR. CO

这个工程可以认为是海底高压交流电缆的样板工程^[16]。尽管 Sardinia 岛与 Corsica 岛之间部分地已由直流 200kV 的海底电缆连接起来（该工程建于 1960 年