

智能电网 关键技术研究与应用丛书

# 高压直流挤包 绝缘电力电缆系统 及其工程应用

Extruded Cables  
for High-Voltage Direct-Current  
Transmission:  
Advances in Research  
and Development

[意] 乔瓦尼·马赞蒂 (Giovanni Mazzanti) 著  
马西莫·马里奥特 (Massimo Marzinotto) 著  
夏俊峰 等译

智能电网关键技术研究与应用丛书

# 高压直流挤包绝缘电力 电缆系统及其工程应用

Extruded Cables for High – Voltage Direct – Current  
Transmission: Advances in Research and Development

[意] 乔瓦尼·马赞蒂 (Giovanni Mazzanti) 著  
马西莫·马里奥特 (Massimo Marzinotto)

夏俊峰 徐晓峰 孙建生 张大鹏 仲伟霞 方乐明 译

机械工业出版社

Copyright © 2013 by The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled *Extruded Cables for High - Voltage Direct - Current Transmission: Advances in Research and Development*, ISBN: 978 - 1 - 118 - 09666 - 6, by Giovanni Mazzanti and Massimo Marzintotto, Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

本书中文简体字版由 Wiley 授权机械工业出版社出版, 未经出版者书面允许, 本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有, 翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字: 01 - 2013 - 8270 号。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

高压直流挤包绝缘电力电缆系统及其工程应用 / (意) 乔瓦尼·马赞蒂等著; 夏俊峰等译. —北京: 机械工业出版社, 2018. 11

(智能电网关键技术研究与应用丛书)

书名原文: *Extruded Cables for High - Voltage Direct - Current Transmission: Advances in Research and Development*

ISBN 978-7-111-61508-8

I. ①高… II. ①乔… ②夏… III. ①高压直流发生器 - 绝缘 - 电力电缆 - 研究 IV. ①TM833②TM247

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2018) 第 268752 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: 翟天睿

责任校对: 张晓蓉 封面设计: 鞠 杨

责任印制: 张 博

三河市国英印务有限公司印刷

2019 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 18.5 印张 · 376 千字

0 001 — 3 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-61508-8

定价: 99.00 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

服务咨询热线: 010-88361066

机工官网: [www.cmpbook.com](http://www.cmpbook.com)

读者购书热线: 010-68326294

机工官博: [weibo.com/cmp1952](http://weibo.com/cmp1952)

010-88379203

金书网: [www.golden-book.com](http://www.golden-book.com)

封面无防伪标均为盗版

教育服务网: [www.cmpedu.com](http://www.cmpedu.com)

本书是一本完整阐述高压直流（HVDC）挤包绝缘电缆系统的技术专著，涵盖了电缆线路、绝缘材料和附件的设计和工程技术，以及电缆性能、寿命和可靠性问题。

全书内容丰富，由浅入深，共分为7章，主要内容包括 HVDC 电缆输电基础，HVDC 挤包绝缘电缆设计的主要原则，HVDC 挤包绝缘中空间电荷的存储、效应以及测量方法，HVDC 挤包电缆系统的改进设计，HVDC 电缆挤包绝缘寿命模型，以及世界上主要的 HVDC 挤包绝缘电缆系统。

书中对目前最新的 HVDC 电缆挤包绝缘材料的改进方法进行了详细阐述，还介绍了 HVDC 电缆系统配套应用附件的设计和应用情况。同时，本书还对 HVDC 电缆挤包绝缘寿命模型的研究进行了总结。

本书适合从事电力电缆，特别是 HVDC 电缆的研究、制造、工程设计、运行维护等工作的人员学习使用，也可以作为电线电缆相关专业研究生和本科生的参考书。

# 译者序

高压直流（HVDC）挤包电缆系统是目前电缆行业最受关注的发展领域，在能源全球互联的背景下，其应用的电压等级和输送容量不断提高，已经达到 $\pm 600\text{kV}$ 和7.0GW。

本书是一本完整阐述 HVDC 挤包绝缘电缆系统的技术专著，并且对 HVDC 电缆挤包绝缘寿命模型进行了阐述。

全书内容丰富，由浅入深，共分为7章，主要内容包括 HVDC 电缆输电基础，HVDC 挤包绝缘电缆设计的主要原则，HVDC 挤包绝缘中空间电荷的存储、效应以及测量方法，HVDC 挤包电缆系统的改进设计，HVDC 电缆挤包绝缘寿命模型，以及世界上主要的 HVDC 挤包绝缘电缆系统。

本书适合从事电力电缆，特别是 HVDC 电缆的研究、制造、工程设计、运行维护等工作的人员学习使用，也可以作为电线电缆相关专业研究生和本科生的参考书。

本书是在上海电缆研究所参与翻译的同仁们倾力合作、认真工作下得以完成的。本书第1章由徐晓峰翻译，第2章由方乐明翻译，第3章由张大鹏翻译，第4章和第6章由夏俊峰翻译，第5章由仲伟霞翻译，第7章由孙建生翻译，全书由孙建生统稿。此外，王乐工程师参与了部分章节的校对工作，在这里一并致以衷心的感谢。

由于时间仓促和专业知识所限，译稿难免存在疏漏和错误之处，恳请读者批评指正。

孙建生执笔

# 原 书 序

高压直流 (HVDC) 输电已不是新话题。爱迪生是直流领域的先驱,曾在 1882 年建设了一条 45km 长的线路,旋转直流电机布置在两端,连接米斯巴赫和慕尼黑。其后的 50 多年间,随着汞弧整流器的出现,数条 HVDC 连接建成。但在交流输电技术优势出现后,它们逐渐退出了运行。交流技术得益于变压器的使用,它与送电端直接连接,用电高效,实现了升压和降压。尽管交流感应电机可能并不高效,但它可靠且易于维护,制造成本也低。20 世纪以来,配电系统的发展使得城区内的用电与发电相连接,城区外则利用输电系统与国家电网连接。

然而,正如鲍勃·迪伦的著名歌曲所唱,“时代在变革 (The times they are a - changin)”。电网不再是国家级的,而是将欧洲各个国家、美国各州和中国各省连接。它已经趋向于泛州际的电网,典型面积可达千万平方公里,距离超过 4000km。但电网的输电线路很少超过 100km,部分原因是交流输电的容性和感性限制,且缺乏其他设计经验。网络变得日益拥挤,有时比利时电网输送容量的 90% 都不是比利时人在使用,它仅是穿越该国电网,而把两侧的邻国连接起来。

目前,输电网与没有高速公路 (或州际高速) 的路网相似,它需要电力高速路,以实现跨州的远距离大容量输送,这在一定程度上将用户与持续电源连接。例如,欧洲北部的多风潮湿气候提供了风电和水电资源;阳光充沛的南部供给着光伏和太阳能热。人们通常避开潮湿、多风和炎热的气候,以及需要长距离输电连接能源中心和人口中心。或许出于安全考虑,核电站一般远离城市。例如中国宜昌的三峡大坝,也同样需要跨越上千公里,将接近 10 个核电站的发电容量输送至上海。跨越东西的州际电力高速通道可实现“电力削峰填谷”。美国大陆的 4000km 宽度一般可达地球圆周长度的 10%,因而存在 2.5h 的时差。住在西部的居民早上打开电热水壶的时候,东部居民可能还在睡觉;西部居民烧饭的时候,东部居民或许正在洗碗。因此,东部与西部之间输电能

够降低区域发电峰值的要求。电网发展已进入 21 世纪，HVDC 输电系统可为远距离送电提供合适的技术方案，满足较低损耗和缩减通道空间的要求。

因为现有电网相互连接，所以还存在其他问题。对于大规模互联交流网络系统，连锁故障（某个网络的故障影响另一个关联网络，产生多米诺骨牌效应，致使其他关联网络接连故障）难以控制。2003 年 8 月，连锁故障导致美国东北部、中西部及加拿大安大略的 550 万人停电。交流电网间的 HVDC 背靠背连接可成为有效屏障，防止类似大范围故障的发生。放松管制与私有化、智能电网以及一些可再生能源（如风能）将导致供需变化更快的系统，响应需要更为迅速。与交流系统相比，直流系统没有相位同步问题，更容易满足这些要求。

当然，HVDC 的发展带来了一些技术挑战。20 世纪 80 年代以来，聚合物挤包绝缘（一般为交联聚乙烯）的高压交流（HVAC）电力电缆已经成功实现大规模应用。这些电缆能承受几十至几百千伏的电压，承载上千安的电流。三相系统可将大型电站的所有电能全部送出。早期挤包电缆的可靠性问题已通过三层共挤和超净材料技术克服，前者实现聚合物的导体屏蔽与绝缘屏蔽同时挤出；后者通过采用先进工艺，避免水分、杂质和微孔的出现，有效控制了界面凸起。受几何参数影响，绝缘内越靠近导体，电场越高，但变化不是很大。尽管靠近导体的绝缘温度显著高于外层屏蔽，但只对交流电缆的电场分布略有影响，这是因为电场主要受介电常数影响，受温度影响较小。因此，电场强度通常定义为外加电压与其几何参数的比值，这很重要，因为高场强使劣化加速，可导致击穿。在直流条件下，情形完全不同。电场与电导有关（电导与温度密切相关），而绝缘内积聚的电荷（空间电荷）可使电场增加。HVDC 挤包电力电缆的制造与应用需要深入理解这些现象。

伴随 HVDC 输电系统应用再次兴起，本书出版正当其时。我相信，这本书会引起这类系统运营商和制造商的极大兴趣。尽管有些问题尚待解决，尤其是更高电压和更大容量下运行的探索，而本书将为其提供指导。它还将全面介绍该领域的研究者，以及那些新电缆材料和系统的开发者。

在 2012 年 IEEE 电气绝缘与介电现象会议上，我很荣幸受 Giovanni Mazzanti 邀请来为本书作序。感谢参与编写工作的所有人！

**John Fothergill**

伦敦城市大学



# 原书前言

高压直流（HVDC）挤包电缆系统是一项快速发展的技术，作为战略性领域，正经历着迅猛的市场成长周期。HVDC 输电似乎已经对未来数十年的输电战略产生了深远的影响。

目前，尚无关于 HVDC 挤包电缆系统的技术专著，因而我们编写这本书，介绍 HVDC 挤包电缆系统研发活动的最新进展，满足了解 HVDC 输电发展状况的需求。如果能达到这一目的，那也应感谢各方面的支持，包括科技文献中的重要论文，以及全球主要 HVDC 电缆系统制造商提供的宝贵资料。因此，我们衷心感谢论文的作者或资料的提供者，是他们使本书成稿变为可能。为此，我们还在每章末尾认真汇编了参考文献列表。

然而，关于 HVDC 挤包电缆系统的技术文献非常广泛，很难提及这一主题的所有信息来源。此外，为了将篇幅控制在合理范围，在这本书众多可能的议题中，我们选择了那些更有创新、更符合 HVDC 挤包电缆系统的特性，而只提到高压电缆技术的一些重要方面。因此，如果一些提供的资料（尽管很出色）没有在书中包含，那么我们致以诚挚的歉意。此外，如果您发现书中有遗漏的重要内容，请尽管告知，这些建议对我们今后的工作会很有帮助。

我们已经尽力编撰大量的参考资料，并清楚地呈现给读者。因此，我们常从这类参考资料中直接提供引用和数据，尽量避免个人的解释或思路，从而让读者形成自己的观点。

基于上述原因，可认为本书首先面向来自电力公司和输电系统运营商的电力工程师，也适用于电缆制造行业。更广泛地说，它适合来自业界和学术界、从事 HVDC 输配电工作的人们，包括现场工程师和研究人员。此外，本书还可作为电力专业研究生和高年级本科生的背景阅读材料。

**Giovanni Mazzanti**  
**Massimo Marzotto**



# 目录

译者序  
原书序  
原书前言

===== ===== =====	<b>第 1 章 概述</b> .....	1
	参考文献 .....	6
===== ===== =====	<b>第 2 章 HVDC 电缆输电基础</b> .....	9
	2.1 HVDC 输电的历史 .....	9
	2.2 HVAC 与 HVDC 输电系统的经济比较 .....	15
	2.3 HVDC 输电系统的配置和运行模式 .....	16
	2.4 CSC 和 VSC 整流器 .....	20
	2.4.1 线性整流电流源换流器的运行 .....	20
	2.4.2 自整流电压源换流器的操作 .....	21
	2.4.3 CSC 与 VSC: 它们如何影响电缆绝缘 .....	23
	2.5 HVDC 输电电缆 .....	23
	2.5.1 陆上和海底电缆输电 .....	23
	2.5.2 不同类型 HVDC 电缆 .....	25
	2.5.3 HVDC 电缆绝缘 .....	30
	参考文献 .....	32
===== ===== =====	<b>第 3 章 HVDC 挤包绝缘电缆设计的主要原则</b> .....	35
	3.1 HVAC 和 HVDC 挤包型绝缘电缆的差异 .....	35

3.1.1	结构差异 .....	35
3.1.2	HVDC 挤包型绝缘电缆的典型结构 .....	36
3.1.3	电场分布的差异 .....	41
3.2	瞬态直流电场分布 .....	53
3.2.1	到达稳态直流电场分布的时间 .....	54
3.2.2	HVDC 电缆运行阶段的定义 .....	55
3.2.3	不同阶段的电场分布 .....	56
3.3	环境温度对 HVDC 挤包电缆稳态电场的影响 .....	63
3.4	叠加在直流电压上的脉冲 .....	64
3.5	HVDC 电缆冲击电压实验的统计方法 .....	66
3.6	受陷阱空间电荷效应影响的应力分布修正 .....	72
3.7	HVDC 挤包电缆电介质 .....	74
3.8	PE 形态及其对电性能的影响 .....	78
	参考文献 .....	80

## 第 4 章

	<b>HVDC 挤包绝缘中的空间电荷：存储、效应和测量方法</b> .....	84
--	---	----

4.1	HVDC 电缆绝缘中的空间电荷 .....	85
4.2	绝缘聚合物中电荷注入和转换 .....	90
4.2.1	低场传导 .....	90
4.2.2	高场传导 .....	94
4.3	空间电荷积累 .....	99
4.3.1	电荷产生 .....	99
4.3.2	电荷陷阱 .....	105
4.4	HVDC 挤包绝缘的空间电荷测试方法 .....	108
4.4.1	热测法 .....	111
4.4.2	压力波法 .....	118
4.4.3	陷阱深度和空间电荷迁移率的评估技术 .....	130
4.5	空间电荷测量技术的最新进展 .....	135
4.5.1	热阶跃脉冲法在 HVDC 电缆空间电荷测试中的应用 .....	135
4.5.2	PEA 技术在 HVDC 电缆空间电荷测量中的应用 .....	141
4.5.3	压力波法的最新进展 .....	158
4.6	电力电缆最佳空间电荷测量方法的比较： PEA 与 TSM 对比 .....	159
	参考文献 .....	165

## 第 5 章 HVDC 挤包电缆系统的改进设计 ..... 172

- 5.1 HVDC 电缆的挤出聚合物绝缘的改善研发趋势 ..... 173
  - 5.1.1 HVDC 挤包绝缘的改善有待解决的问题 ..... 173
  - 5.1.2 HVDC 电缆聚合物绝缘材料的性能优化 ..... 174
  - 5.1.3 HVDC 挤包绝缘的开发历史 ..... 175
- 5.2 交流场合用的 LDPE、XLPE 或 HDPE 电缆混合物未加改进直接用于 HVDC 应用领域 ..... 177
- 5.3 无电应力反转或电应力反转受限的直流电缆 ..... 178
- 5.4 抑制聚合物内部空间电荷的发展 ..... 179
  - 5.4.1 改善电极绝缘界面特性 ..... 179
  - 5.4.2 整体绝缘性能的改善 ..... 180
- 5.5 HVDC 挤出电缆改进设计方面的进一步要求 ..... 188
- 5.6 HVDC 挤包电缆的改进设计 ..... 190
  - 5.6.1 首例改进设计的 HVDC 挤包电缆 ..... 191
  - 5.6.2 哥特兰岛项目的电缆设计 ..... 191
  - 5.6.3 默里连接项目相关的电缆设计 ..... 192
  - 5.6.4 跨湾工程项目的电缆设计 ..... 194
  - 5.6.5 其他改进的电缆设计 ..... 195
- 5.7 HVDC 挤包电缆系统用附件的改进设计 ..... 197
  - 5.7.1 哥特兰岛项目相关的附件设计 ..... 201
  - 5.7.2 默里连接项目相关的附件设计 ..... 202
  - 5.7.3 HVDC 挤包电缆附件目前的工艺水平 ..... 203
- 5.8 电缆系统设计的改进 ..... 207
- 5.9 HVDC 挤包绝缘电缆系统的试验 ..... 208
- 参考文献 ..... 211

## 第 6 章 HVDC 电缆挤包绝缘寿命模型 ..... 219

- 6.1 基本原理 ..... 219
  - 6.1.1 绝缘寿命模型的传统方法 ..... 221
  - 6.1.2 HVDC 挤包绝缘寿命模型的可能性框架 ..... 229
- 6.2 基于空间电荷的挤包 HVDC 电缆寿命模型 ..... 242
  - 6.2.1 电场限制空间电荷模型 ..... 243
  - 6.2.2 空间电荷 DMM 模型 ..... 245

6.3 从空间电荷到局部放电：基于微小空隙损伤发展的 寿命模型·····	249
6.3.1 PE-空隙界面的电荷积累及向空隙内的 电荷注入·····	250
6.3.2 空隙内热电子雪崩形成·····	251
6.3.3 空隙-PE界面向PE内部的损伤发展·····	252
6.3.4 模型在挤出HVDC绝缘失效时间估算 方面的应用·····	253
6.4 空间电荷：老化的原因还是结果·····	256
参考文献·····	262

## 第7章 世界上主要的HVDC挤包绝缘电缆系统····· 268

7.1 概述·····	268
7.2 运行中的挤包绝缘电缆系统·····	272
7.2.1 哥特兰岛联网工程·····	272
7.2.2 默里连接工程·····	274
7.2.3 纽约长岛电缆工程·····	276
7.2.4 Troll A 天然气平台·····	277
7.2.5 Estlink 联网工程·····	278
7.2.6 BorWin 1 联网工程·····	279
7.2.7 美国跨湾工程·····	279
7.2.8 日本北海道-本州联络线工程·····	282
参考文献·····	283

# 第 1 章

## 概 述

与高压交流 (High Voltage Alternate Current, HVAC) 输电相比, 高压直流 (High Voltage Direct Current, HVDC) 输电变得越来越有竞争力, 如图 1.1 和图 1.2 所示。尤其对大容量远距离输电的场合, 具体介绍见本章参考文献 [1-5] 和本书第 2 章。由于 HVDC 输电系统的许多技术和商业优势, 它可采用传统的电流源换流器 (Current Source Converter, CSC), 或更新开发的电压源换流器 (Voltage Source Converter, VSC), 如图 1.3 所示。

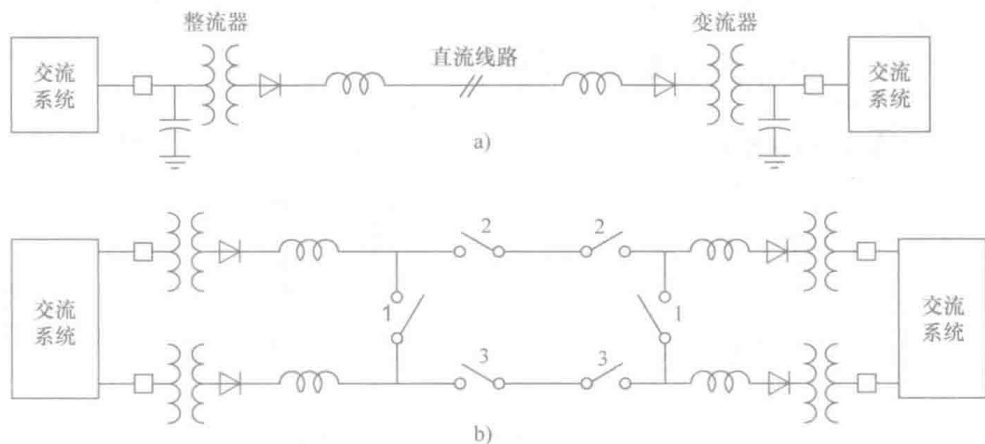


图 1.1 单回 HVDC 输电系统图

a) 单极系统 b) 双极系统

关于输电线路的形式 (HVAC 和 HVDC), 可以是架空线路也可以是电缆线路。架空线路造价更低; 但电缆线路适于穿越大面积城区或开阔海域的场合。特别是对长距离海域穿越的场合, HVDC 电缆线路是唯一可行的技术方案<sup>[1]</sup>。对公众而言, 与架空线路相比, 电缆线路没有视觉影响, 环境影响较小<sup>⊖</sup>。

⊖ 公众认为电缆线路与架空线路相比, 对环境没有影响; 对视觉无影响显而易见。事实上, 与架空线路比较, 地下电缆输电线路对环境的影响较小有待商榷。陆缆线路多数需要沿线开挖施工, 深度 1~2m; 电缆在役期间要持续维护地表植被, 避免线路上方树木生长, 影响电缆运行。对于架空线路, 只有线路下方的树木高度需要修整, 避免触及导线。水下电缆的敷设施工同样可能对环境产生一定影响。

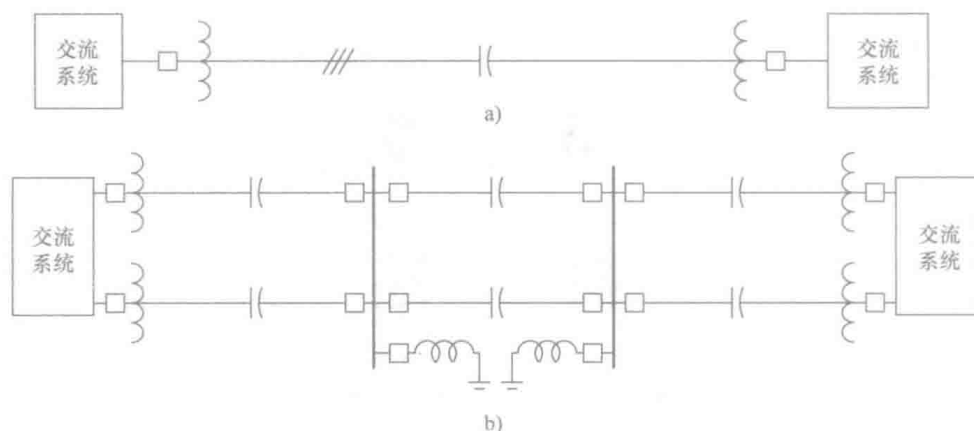


图 1.2 单回 HVAC 输电系统图

a) 单回路三相交流线路 b) 双回路三相交流线路

注：图中所示串联电容和并联电抗需要分别补偿，即在长线路上串联电抗和并联电容。

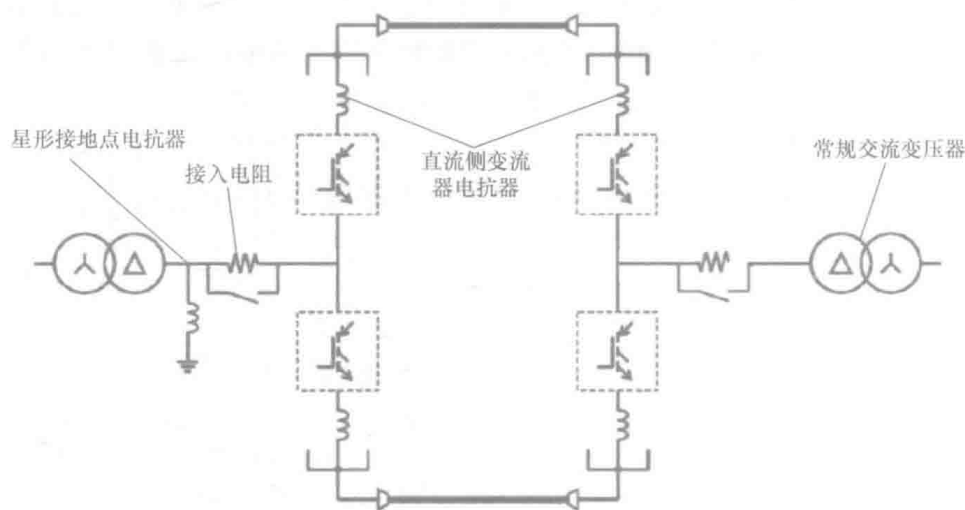


图 1.3 单回 HVDC VSC 输电系统图

当铁路或公路隧道已建成可用时，电缆线路可特别作为一项技术选择。在这一条件下，电缆线路整合入既有运输廊道，敷设费用比传统的地下线路低，因此可显著降低电缆线路造价。的确，这种整合并不轻松，需从工程和技术角度仔细考量，要遵从多重准则，如安装敷设、空间相容、电磁兼容、潜在接地故障对外部的影响、电缆（线路）结构的协同实现、火灾特性等<sup>[6]</sup>。

就 HVDC 输电电缆绝缘而言，目前全球大多数运行的 HVDC 工程都采用油纸绝缘电缆。尤其是 20 世纪 50 年代以来，以下油纸绝缘技术已经成功用于地下（海底或陆上）HVDC 输电系统<sup>[3]</sup>：

1) 浸渍不滴流（Mass Impregnated Nondraining, MIND）；

- 2) 自容充油 (Self Contained Oil Filled, SCOF);
- 3) 高压充油 (High Pressure Oil Filled, HPOF);
- 4) 充气 (Gas Filled, GF)。

自容式充油电缆 (也称作埃曼纽利电缆) 已经在欧洲应用, 而高压充油和充气电缆已在北美广泛应用。迄今为止, 多数大容量输电采用的 HVDC 电缆都选用黏性浸渍纸 (MIND) 绝缘<sup>[7]</sup>, 是因为这类电缆具有很高的运行可靠性, 但是这类电缆系统的运行温度受限。为解决 MIND 电缆在循环负载下的弱点的更多研究<sup>[8]</sup>, 可为更大输电容量时的应用做好准备。

自容充油、高压充油和充气电缆有运行限制条件会影响相应电缆系统运行温度和敷设长度; 此外, 使用充油电缆带来的环境问题也不容忽视<sup>[3]</sup>。油纸绝缘电缆的制造过程相当复杂, 成本也很高<sup>[7]</sup>。由于这些原因, 一些制造商正在开发一种 HVDC 电缆系统, 与传统 MIND 电缆很相似, 采用聚丙烯复合纸 (Polypropylene Paper Laminate, PPL) 绝缘和点滴流特性的浸渍材料。这类电缆系统设计用于导体工作温度在 80 ~ 90℃ 的场合。然而, 它还是一项成熟的技术<sup>[3]</sup>。

普遍认为 HVDC 挤包绝缘电缆与传统油纸绝缘电缆相比有显著的优势, 例如<sup>[3,9]</sup>:

- 1) 可实现更高的导体温度, 在相同输电要求下, 电缆更为紧凑 (事实上, 导体温度受限于绝缘的最高容许温度)。传统 MIND 电缆的温度限定在 55℃ 以下, 以降低系统负载减少时出现收缩空隙的风险。更高的温度还会降低绝缘油的黏度, 产生绝缘油迁移的风险, 致使上部绝缘层的油分浓度减小, 并导致严重的后果。交联聚乙烯 (Cross Linked Polyethylene, XLPE) 绝缘交流电缆系统的典型运行温度是 90℃。目前, HVDC 电缆的挤包绝缘在某些场合可以运行在这一温度 (见本书第 3 章和第 5 章)。

- 2) 可采用更轻型的防潮阻隔, 电缆重量更轻。
- 3) 挤包电缆连接更简便。
- 4) 对于自容充油、高压充油和充气电缆, 具备以下优点:

- ① 增加系统长度, 没有油/气压力的限制, 挤包介质的 HVDC 电缆系统可用于远距离输送的场合;

- ② 减少维护工作, 系统不需要配备油/气系统的供油罐、仪表或报警系统, 免去了相应的维护工作。

由于挤包绝缘与油纸绝缘相比具备以上这些优点, 因此推动了更大输电容量的 HVDC 电力电缆采用聚合物绝缘。自从 20 世纪 70 年代以来, 业界做了多次尝试, 将挤包绝缘引入实际应用中, 但直至 20 世纪末仍未成功。第一个 HVDC 挤包电缆试验品采用传统的热塑性 PE<sup>[10]</sup> 或 XLPE, 最终失败了。这一电缆系统在运行电压下过早故障, 且在极性反转试验时尤其脆弱。显而易见, 需要进行更深入的研究, 以实现 HVDC 输电系统要求的电气功能特性。



自 20 世纪末以来, 业界为研制 HVDC 挤包电缆开展了大量研究工作, 这些研究可在国际工程技术文献中查找到, 例如本章参考文献 [3, 7, 9-28]。

由于材料技术和挤出工艺的进步, 产品情况已经改变。此外, 研究直流电场分布的新试验方法以及深化的理论认识, 使 HVDC 挤包电缆的研制成为可能。除了空间电荷特性测量技术外<sup>[15-20]</sup>, 能够耐受 HVDC 的新型 PE 基材绝缘料也已完成试制<sup>[9,21]</sup>。

这些进展的第一个显著成果是世界首个 HVDC 输电系统于 1999 年在瑞典哥特兰岛投运, 选用挤包聚合物绝缘电缆<sup>[22]</sup>。这一系统采用绝缘栅双极型晶体管 (Insulated Gate Bipolar Transistor, IGBT) 构成的 VSC, 当时 IGBT 是先进的半导体装置 (见本书第 2 章)。这一技术路线避免极性反转给 HVDC 聚合物绝缘电缆带来的难题。极性反转耐受对电阻性绝缘至关重要, 会导致其直流击穿。研究发现, 极性反转条件下的击穿电阻减少约 10%<sup>[9]</sup>。相应的电缆绝缘选用 XLPE 材料。

因此直到 2011 年, HVDC 挤包电缆系统与 VSC 技术的组合优势才体现出来, 并应用于全球最长的地下输电系统 (180km) 和海底电缆工程 (见本书第 7 章)<sup>[25-27]</sup>——澳大利亚默里连接工程<sup>[24]</sup>。这些产品和技术越来越多地用于海上工程, 包括离岸风场<sup>[26,29]</sup>。2011 年, 最高电压等级 HVDC 挤包电缆系统应用于美国跨湾电缆 (见本书 7.2.7 节),  $\pm 200\text{kV}$ , 400MW, VSC 双极海底电缆穿过加州的旧金山海湾<sup>[13,26,27]</sup>。2012 年, 相同电压等级的产品被用于一项东西互联工程,  $\pm 200\text{kV}$ , 500MW, VSC 双极陆上与海底挤包电缆系统, 连接英格兰和爱尔兰电网。VSC 技术配套可用的 HVDC 挤包电缆系统电压已超过 300kV, 输电容量最大约 1000MW<sup>[25,28]</sup>, 目前全球 CSC 换流站技术配套的最高额定电压的 HVDC 挤包电缆系统为日本北海道一本州联络线工程,  $\pm 200\text{kV}$ , 500MW, VSC 双极陆上与海底联络 (见本书 7.2.8 节)。

HVDC 挤包电缆技术自 20 世纪 70 年代出现后进行了小规模应用, 在 2000 年后迎来了新的时代。这是业内科学家和工程师对绝缘材料和系统持续努力研发的结果, 为 HVDC 挤包电缆系统应用带来光明, 期间克服了显见的挑战, 即更高的电压等级、更大的输电容量以及可靠的极性反转。

本书主要内容安排如下:

第 2 章将介绍 HVDC 电缆输电的基本知识。

1) 简要描述 HVDC 输电的发展历史, 并与传统 HVAC 输电进行优缺点的比较;

2) 从经济角度比较 HVDC 输电系统和 HVAC 输电系统;

3) 分析 HVDC 输电系统的配置与运行模式, 集中在换流器 (电流源型和电压源型) 部分, 最终目标是说明换流器形式对 HVDC 电流绝缘的影响;

4) 回顾 HVDC 输电电缆的主要类型, 一方面强调陆缆与海缆的不同, 另一方面说明油纸绝缘电缆与挤包绝缘电缆的差异。

第 3 章将阐述 HVDC 挤包电缆设计的主要原则。

- 1) 强调 HVAC 电缆与 HVDC 电缆的区别, 尤其是稳态与暂态条件的电场分布;
- 2) 探讨敷设环境温度对 HVDC 挤包电缆稳态电场的影响;
- 3) 介绍直流电压叠加冲击效应, 概述关于 HVDC 挤包电缆冲击电压试验水平的最新统计方法;
- 4) 介绍因空间电荷作用修正场强分布的相关问题;
- 5) 列出 HVDC 挤包电缆用 PE 介电材料, 重点介绍 PE 形态及其对电缆绝缘电气性能的影响。

第4章将围绕 HVDC 挤包绝缘内空间电荷存储议题展开, 包括相关的多种效应。

- 1) 绝缘聚合物内的电荷注入与运输;
- 2) 低场电导机制 (包括欧姆电导和离子电导);
- 3) 高电场电导机制 (电极电荷注入和体效应高电场电导机制);
- 4) 解释产生空间电荷集聚的过程;
- 5) 电荷生成 (电子电荷注入、杂质的电场辅助热电离、空间多相极化和与稳态直流电流耦合的介电常数与电导率的空间变化率);
- 6) 电荷陷阱 (物理缺陷和化学缺陷)。

之后全面介绍 HVDC 挤包绝缘的空间电荷测量方法, 比较近年来不同的测量方法, 可将其分为以下两类:

- 1) 热方法, 如热脉冲法、激光强度调制法 (Laser Intensity Modulation Method, L IMM) 和温差法 (Thermal Step Method, TSM);
- 2) 压力波法, 如压力波传播 (Pressure Wave Propagation, PWP) 法、激光诱导压力脉冲 (Laser Induced Pressure Pulse, LIPP) 法<sup>①</sup>和电声脉冲 (Pulse Electro-acoustic, PEA) 法。

后面的内容将介绍 HVDC 电缆挤包绝缘空间电荷测量适用技术的最新进展, 如 TSM、PEA 和 PWP 技术, 综合比较 PEA 和 TSM 方法测量电力电缆空间电荷。

第5章将介绍关于 HVDC 挤包电缆系统的设计进展, 讨论最近的相关研究开发活动。分析 HVDC 电缆系统用挤包聚合物绝缘改进的研发趋势, 并提及以往不同的技术路径。着重介绍抑制绝缘空间电荷的常规方法和最新方法, 即通过以下途径:

- 1) 改变电极/绝缘界面的特性;
- 2) 利用添加剂或填料改变绝缘体特性。

接下来将详细说明改进 HVDC 挤包电缆设计的进一步要求, 实际 HVDC 挤包电缆及附件 (终端和中间接头) 的改进设计, 以及整体系统。其中引用了相关文献数据和主要制造商提供的资料。

第6章将围绕 HVDC 挤包电缆绝缘寿命模型展开, 主要内容如下:

- 1) 回顾传统电力电缆寿命模型和可靠性预期的基本知识, 包括传统的绝缘寿

<sup>①</sup> 参见本书 4.4.2 节, 目前 LIPP 法比 PWP 法在实际中采用更多。