

169485

—TM721.1  
4093

# 高压直流输电系统的运行和控制

李兴源 编著

科学出版社

1998

## 内 容 简 介

随着电力电子技术、计算机技术和控制理论的迅速发展,使高压直流输电技术日趋完善.在特定条件下,例如大功率远距离输电、海底电缆和交流系统间异步联接等,高压直流输电的优点超过交流输电.我国电网正在不断发展,各大区之间的联网势在必行,采用交、直流输电系统成为必然趋势.由于高压直流输电技术具有十分重要的意义,因此本书不仅系统地阐述了高压直流输电系统的基本理论和特性,而且深入讨论与运行和控制有关的重要问题、解决方法、分析和仿真技术.尤其注重介绍直流系统的高级控制技术,如最优功率调节器、模糊逻辑控制、变结构控制和自校正调节器的设计等,还列举了若干已投运系统的实例.此外,还阐述了在两端直流系统基础上发展起来的多端和多馈入直流系统的结构和特性,并且讨论了新发展的一些高压直流输电系统方案.

本书可作为高等院校电力系统及其自动化专业高年级本科生和研究生教材或参考书,并可供电力系统规划、设计、运行和管理人员参考.

### 图书在版编目(CIP)数据

高压直流输电系统的运行和控制/李兴源编著. -北京:科学出版社,1998  
ISBN 7-03-006269-8

I. 高… II. 李… III. ①高电压-直流-输电-电力系统运行  
②高电压-直流-输电-电力系统-控制 IV. TM721.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(97)第 21299 号

科 学 出 版 社 出 版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

新 世 纪 印 刷 厂 印 刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1998 年 6 月 第 一 版 开本: 787×1092 1/16  
1998 年 6 月 第一次印刷 印张: 16  
印数: 1—3 000 字数: 360 000

定价: 26.00 元

## 前 言

自从 1954 年世界上第一条工业性的高压直流输电线路投运以来,随着电力电子技术、计算机技术和控制理论的迅速发展,使高压直流输电技术日趋完善.在特定条件下,例如大功率远距离输电、海底电缆和交流系统间异步联接等,高压直流输电的优点超过交流输电.根据 IEEE 统计,截至 1996 年底,世界上已投运的直流工程已有 56 项,输电容量达 54.166GW.我国自行建成的舟山 100kV 海底电缆直流输电和引进的葛州坝—上海 500kV 直流输电工程已相继投产.天生桥—广州 500kV 直流输电工程也将于 1998 年前后投入运行.此外,三峡—华东两回直流输电方案也已审定.随着我国电网的迅速发展,各大区之间的联网势在必行,采用交、直流输电系统成为必然趋势.

由于高压直流输电技术有十分重要的意义,人们为此进行了大量的研究工作,出版了许多专著和发表了大量文章.尤其是近十多年来,随着计算机技术和控制理论的进步,根据已投运的直流输电系统中发现的问题,又有大量的研究成果问世.但是,这些文章散见于各学术刊物,将它们系统地整理成专著的还不多见.为此,作者收集了近年来发表的大量文章及有关资料,结合教学和科研的需要而编写成本书.因此,本书不仅系统地阐述了高压直流输电系统的基本理论和特性,而且深入地讨论了与运行和控制有关的重要问题、解决方法、分析和仿真技术、新技术和新方案.

本书共分为六个部分.

第一部分,系统地阐述了换流器理论、高压直流输电系统的结构、控制及其特性、谐波及其抑制.这些内容在第一、二、三和第四章中论述.

第二部分,着重讨论高压直流系统的主要研究方法,即建立数学模型、交流和直流潮流计算、小干扰和暂态数字仿真技术.这是第五章的内容.

第三部分,深入讨论提高交流系统性能的附加直流控制和交、直流系统间的相互作用以及解决方法.这些见于第六、七章的内容,对于高压直流输电系统的运行和控制是极为重要的,因此还列举了若干已投运系统的实例.

第四部分,在第八章中简明扼要地阐述了高压直流输电的故障和保护.

第五部分,较系统地阐述了在两端直流系统基础上发展起来的多端和多馈入直流系统的结构和特性.在第九、十章中包含了这些内容.

第六部分,在第十一章中较完整地讨论了新的高压直流输电系统方案,即发电机—换流站直接联接、无变压器的直流换流站和并联线路投切.

本书可作为高校电力系统及其自动化专业高年级本科生和研究生教材,并可供电力系统规划、设计、运行和管理人员参考.

本书的大部分插图都是由肖先勇和伍鸿戟同志绘制的.谨在此表示由衷的感谢!

限于作者的理论水平和实践经验,本书中难免存在缺点和错误,恳请读者不吝赐教.

编著者

# 目 录

## 前言

|                                  |      |
|----------------------------------|------|
| <b>第一章 导论</b> .....              | (1)  |
| § 1.1 高压直流输电概况 .....             | (1)  |
| § 1.2 高压直流输电运行特性及其与交流输电的比较 ..... | (2)  |
| 1.2.1 技术性能 .....                 | (2)  |
| 1.2.2 可靠性 .....                  | (4)  |
| 1.2.3 经济性 .....                  | (4)  |
| § 1.3 高压直流输电系统的结构和元件 .....       | (5)  |
| 1.3.1 高压直流联络线的分类 .....           | (5)  |
| 1.3.2 高压直流输电系统的元件 .....          | (7)  |
| <b>第二章 换流器理论及特性方程</b> .....      | (9)  |
| § 2.1 阀特性 .....                  | (9)  |
| § 2.2 换流器电路分析.....               | (10) |
| 2.2.1 忽略电源电感的分析 .....            | (12) |
| 2.2.2 包括换相叠弧的分析 .....            | (16) |
| § 2.3 整流器和逆变器工作方式.....           | (21) |
| § 2.4 交流量和直流量之间的关系.....          | (24) |
| § 2.5 换流变压器的额定值.....             | (25) |
| § 2.6 多桥换流器.....                 | (26) |
| <b>第三章 谐波及其抑制</b> .....          | (29) |
| § 3.1 高压直流输电系统的谐波.....           | (29) |
| 3.1.1 换流站交流侧特征谐波 .....           | (29) |
| 3.1.2 换流站直流侧特征谐波 .....           | (31) |
| 3.1.3 非特征谐波 .....                | (31) |
| § 3.2 谐波抑制装置的选择.....             | (32) |
| 3.2.1 滤波装置 .....                 | (32) |
| 3.2.2 平波电抗器 .....                | (33) |
| § 3.3 交流滤波器设计.....               | (34) |
| 3.3.1 设计的一般考虑.....               | (34) |
| 3.3.2 各种滤波器的设计 .....             | (37) |
| § 3.4 直流侧滤波器设计.....              | (41) |
| § 3.5 增加脉波数来抑制谐波的方法.....         | (42) |
| <b>第四章 高压直流输电系统的控制和特性</b> .....  | (44) |
| § 4.1 控制的基本原理.....               | (44) |

|            |                            |              |
|------------|----------------------------|--------------|
| 4.1.1      | 基本的控制方程及其选择                | (44)         |
| 4.1.2      | 控制特性                       | (46)         |
| 4.1.3      | 基本控制原理的概括                  | (52)         |
| § 4.2      | 控制系统的实现                    | (52)         |
| § 4.3      | 换流器触发脉冲控制系统                | (54)         |
| 4.3.1      | 分相触发脉冲控制系统                 | (54)         |
| 4.3.2      | 等间隔触发脉冲控制系统                | (56)         |
| § 4.4      | 换流器的全数字式控制器                | (61)         |
| 4.4.1      | 控制器的功能                     | (61)         |
| 4.4.2      | 控制器的软件和硬件                  | (61)         |
| § 4.5      | 阀的闭锁和旁路                    | (65)         |
| § 4.6      | 起动、停运和潮流的逆转                | (66)         |
| <b>第五章</b> | <b>高压直流输电系统的数学模型、分析和仿真</b> | <b>(68)</b>  |
| § 5.1      | 用于高压直流系统控制研究的标准模型          | (68)         |
| 5.1.1      | 第一个 CIGRE HVDC 标准模型        | (68)         |
| 5.1.2      | 新的 CIGRE HVDC 标准模型         | (71)         |
| § 5.2      | 高压直流输电系统的稳态模型和潮流的顺序解法      | (73)         |
| 5.2.1      | 高压直流输电系统的稳态模型              | (74)         |
| 5.2.2      | 交、直流潮流的顺序解法                | (75)         |
| § 5.3      | 交、直流潮流的改进统一解法              | (80)         |
| 5.3.1      | 直流系统标么方程                   | (81)         |
| 5.3.2      | 改进的统一解法                    | (82)         |
| § 5.4      | 高压直流输电系统的线性状态空间模型          | (90)         |
| 5.4.1      | 高压直流联络线                    | (91)         |
| 5.4.2      | 静止无功补偿器(SVC)               | (93)         |
| § 5.5      | 高压直流输电系统的暂态仿真              | (95)         |
| 5.5.1      | EMTP 和换流器模块                | (95)         |
| 5.5.2      | 网络模型和解法的选择                 | (96)         |
| 5.5.3      | 换流器模块的仿真方法                 | (100)        |
| § 5.6      | 静止无功补偿器的暂态仿真               | (103)        |
| 5.6.1      | 静止无功补偿器模型                  | (103)        |
| 5.6.2      | 基于 EMTP 的仿真技术              | (108)        |
| § 5.7      | 稳定研究中高压直流输电系统模型选择的一般原则     | (110)        |
| <b>第六章</b> | <b>提高交流系统性能的附加直流控制</b>     | <b>(117)</b> |
| § 6.1      | 对交流系统功率振荡的阻尼               | (117)        |
| 6.1.1      | HVDC 联络线接于交流联络线中间的系统       | (117)        |
| 6.1.2      | 交、直流联络线并行系统                | (122)        |
| 6.1.3      | 高压直流系统约束的影响                | (123)        |
| § 6.2      | 最优功率调节控制器的设计               | (126)        |

|            |                             |              |
|------------|-----------------------------|--------------|
| 6.2.1      | 元件连接的数学模型                   | (126)        |
| 6.2.2      | 基于主特征值灵敏度的最优控制              | (127)        |
| § 6.3      | 提高交流系统暂态稳定性的附加控制            | (128)        |
| 6.3.1      | 系统的描述                       | (129)        |
| 6.3.2      | 没有附加控制的系统性能                 | (131)        |
| 6.3.3      | 基于极点配置的附加控制                 | (131)        |
| § 6.4      | 阻尼交流系统的次同步振荡                | (132)        |
| 6.4.1      | 次同步振荡阻尼的控制原理                | (133)        |
| 6.4.2      | 次同步振荡控制的实例                  | (135)        |
| § 6.5      | 模糊逻辑控制和变结构控制                | (136)        |
| 6.5.1      | 系统模型和 HVDC 动力学              | (136)        |
| 6.5.2      | 模糊逻辑控制                      | (137)        |
| 6.5.3      | 变结构控制                       | (140)        |
| 6.5.4      | 性能比较                        | (141)        |
| § 6.6      | 自校正电流调节器的设计                 | (142)        |
| 6.6.1      | 交、直流系统的离散模型                 | (142)        |
| 6.6.2      | 辨识算法                        | (145)        |
| 6.6.3      | 实时控制设计                      | (146)        |
| § 6.7      | 直流换流器的无功功率和电压控制             | (147)        |
| 6.7.1      | 直流换流器的 $P$ - $Q$ 图          | (148)        |
| 6.7.2      | 直流换流器用于电压控制                 | (148)        |
| 6.7.3      | 用直流换流器和 SVC 进行电压控制的比较       | (149)        |
| 6.7.4      | 无功功率调节的实例                   | (150)        |
| <b>第七章</b> | <b>交流和直流系统间的相互作用</b>        | <b>(153)</b> |
| § 7.1      | 概述和定义                       | (153)        |
| 7.1.1      | 短路比和有效短路比                   | (153)        |
| 7.1.2      | 无功功率和交流系统的强度                | (154)        |
| 7.1.3      | 与低有效短路比系统相关的问题              | (155)        |
| 7.1.4      | 与弱系统有关问题的解决方案               | (156)        |
| 7.1.5      | 有效惯性常数                      | (156)        |
| § 7.2      | 暂态交流电压稳定性                   | (156)        |
| 7.2.1      | 暂态电压稳定性的概念                  | (156)        |
| 7.2.2      | 电压稳定性因子(VSF)                | (158)        |
| 7.2.3      | VSF 和 $P_d$ - $I_d$ 曲线之间的关系 | (159)        |
| 7.2.4      | 控制引起的电压振荡                   | (159)        |
| 7.2.5      | 暂态交流电压现象的总结                 | (160)        |
| § 7.3      | 动态过电压和控制设备                  | (160)        |
| 7.3.1      | 动态过电压判据                     | (161)        |
| 7.3.2      | 试验系统及其电压控制设备                | (161)        |
| 7.3.3      | 电压控制和故障恢复性能的比较              | (162)        |
| 7.3.4      | 经济比较                        | (164)        |

|                                    |              |
|------------------------------------|--------------|
| § 7.4 强迫换相和 GTO 电压源换流器 .....       | (164)        |
| 7.4.1 强迫换相的概念 .....                | (164)        |
| 7.4.2 GTO 电压源换流器分析 .....           | (165)        |
| § 7.5 谐波不稳定性及其缓解方法 .....           | (166)        |
| 7.5.1 谐波不稳定性的机制 .....              | (167)        |
| 7.5.2 谐波不稳定性的缓解方法 .....            | (167)        |
| § 7.6 弱背靠背直流联络线的稳定性和电压崩溃 .....     | (170)        |
| 7.6.1 概述 .....                     | (170)        |
| 7.6.2 无电压支撑的输电线 .....              | (170)        |
| 7.6.3 有满电压支撑的输电线 .....             | (173)        |
| 7.6.4 电压不稳定性 .....                 | (176)        |
| § 7.7 背靠背换流站的统一控制 .....            | (176)        |
| 7.7.1 联络线统一控制的原理 .....             | (176)        |
| 7.7.2 数字式统一控制器的实现 .....            | (178)        |
| 7.7.3 运行点控制的特性 .....               | (179)        |
| § 7.8 实际直流系统与弱交流系统连接的设计和性能特征 ..... | (184)        |
| 7.8.1 迈尔斯城换流站 .....                | (185)        |
| 7.8.2 舍得尼换流站 .....                 | (186)        |
| 7.8.3 海格特换流站 .....                 | (187)        |
| 7.8.4 查梯卡换流站 .....                 | (187)        |
| 7.8.5 黑水换流站 .....                  | (188)        |
| 7.8.6 横跨海峡 2000MW HVDC 联络线 .....   | (188)        |
| 7.8.7 温达加换流站 .....                 | (189)        |
| 7.8.8 哥特兰工程 .....                  | (189)        |
| 7.8.9 魁北克-新英格兰-戈默佛系统 .....         | (190)        |
| 7.8.10 依泰普 HVDC 输电 .....           | (190)        |
| <b>第八章 高压直流输电系统的故障和保护 .....</b>    | <b>(192)</b> |
| § 8.1 换流器的异常运行 .....               | (192)        |
| 8.1.1 失通、误通和逆弧 .....               | (192)        |
| 8.1.2 换相失败 .....                   | (193)        |
| 8.1.3 整流站内部短路 .....                | (194)        |
| § 8.2 交流和直流系统故障的响应 .....           | (194)        |
| 8.2.1 直流线路故障 .....                 | (194)        |
| 8.2.2 换流器故障 .....                  | (195)        |
| 8.2.3 交流系统故障 .....                 | (195)        |
| § 8.3 高压直流输电系统主要保护的配置 .....        | (197)        |
| 8.3.1 换流站交流部分的保护 .....             | (198)        |
| 8.3.2 换流桥及桥阀的保护 .....              | (199)        |
| 8.3.3 直流线路的保护 .....                | (200)        |
| 8.3.4 换流站保护配置实例与保护动作的处理方式 .....    | (200)        |
| <b>第九章 多端直流输电系统 .....</b>          | <b>(203)</b> |
| § 9.1 多端直流输电系统的结构和控制特性 .....       | (203)        |

|             |                           |              |
|-------------|---------------------------|--------------|
| 9.1.1       | 多端直流网络的结构 .....           | (203)        |
| 9.1.2       | 基本控制特性 .....              | (204)        |
| § 9.2       | 多端直流控制系统的组成 .....         | (207)        |
| 9.2.1       | 主控制 .....                 | (207)        |
| 9.2.2       | 极控制 .....                 | (208)        |
| § 9.3       | 多端直流输电系统的小功率分接逆变器 .....   | (209)        |
| 9.3.1       | 并联分接逆变器 .....             | (209)        |
| 9.3.2       | 串联分接逆变器 .....             | (211)        |
| <b>第十章</b>  | <b>多馈入直流输电系统</b> .....    | <b>(213)</b> |
| § 10.1      | 概述 .....                  | (213)        |
| 10.1.1      | 多馈入直流输电系统的分类 .....        | (213)        |
| 10.1.2      | 多馈入直流输电系统的相互作用 .....      | (214)        |
| § 10.2      | 多馈入直流输电系统的同步和阻尼转矩控制 ..... | (216)        |
| 10.2.1      | 振荡阻尼的分析 .....             | (216)        |
| 10.2.2      | 直流控制器的协调 .....            | (219)        |
| <b>第十一章</b> | <b>新的高压直流输电系统方案</b> ..... | <b>(223)</b> |
| § 11.1      | 发电机-换流器的直接联接 .....        | (223)        |
| 11.1.1      | 直流联接的基本概念 .....           | (223)        |
| 11.1.2      | 串联自励发电机与换流器的直接联接 .....    | (225)        |
| 11.1.3      | 单桥-单元联接的 18 脉波运行 .....    | (226)        |
| § 11.2      | 无换流变压器的直流输电系统 .....       | (226)        |
| 11.2.1      | 基本结构 .....                | (227)        |
| 11.2.2      | 混合结构 .....                | (230)        |
| § 11.3      | 高压直流输电系统的并联线路投切 .....     | (231)        |
| 11.3.1      | 并联线路运行的优点 .....           | (231)        |
| 11.3.2      | 线路结构 .....                | (232)        |
| 11.3.3      | 直流线路故障的切除 .....           | (234)        |
| 11.3.4      | 用于并联线路投切的直流断路器 .....      | (234)        |
| 11.3.5      | 直流线路故障的传感和线路解列 .....      | (235)        |
| 11.3.6      | 故障后线路的再并联 .....           | (236)        |
| 11.3.7      | 并联线路运行的控制 .....           | (237)        |
| <b>参考文献</b> | .....                     | <b>(238)</b> |

# 第一章 导 论

## § 1.1 高压直流输电概况

在特定条件下,高压直流(HVDC)输电的优点超过交流输电。1954年HVDC输电首次商业性成功地应用于瑞典大陆与哥特兰岛之间的输电线路。这套系统采用汞弧阀,通过90km的水下电缆供给20MW的功率。从此高压直流输电得到了稳步发展。

随着晶闸管阀的出现,高压直流输电更加具有吸引力。第一个采用晶闸管阀的HVDC系统是在1972年建立的依尔河系统,它是连接加拿大新不伦威克省和魁北克省的一个320MW背靠背直流输电系统。晶闸管阀已成为直流换流站的标准设备。换流设备的新发展,使其体积减小、成本降低,而可靠性得到了提高。这些发展使高压直流输电得以更广泛地应用。电力电子技术和计算机技术的迅速发展使直流输电技术日趋完善,多端直流输电技术也已取得运行经验。在1975年全世界已投运直流工程只有11项,输电容量为5GW;而到1996年已猛增到56项,输电容量达54.166GW,增长了近11倍。当前,不仅是新建电网采用直流输电,大区电网间也多采用直流隔离。

我国的葛州坝—上海直流输电工程于1989年投入运行。该直流系统采用500kV双极联络线,额定容量为1200MW,输电距离为1080km。天生桥—广州直流输电线路全长980km,额定输送功率1800MW,额定电流1800A,采用500kV、12脉波双极双桥,该工程将于1998年前后投产。此外,三峡—华东两回直流输电方案也已审定。我国已建成的华东、华北、东北、南方四省和西北六大电网,还有四川、山东等省级省网,随着时间的推移,电网的发展和电网之间联网已成为电网发展规划中的热门课题。采用交、直流输电已成为必然趋势。

以下是已采用的高压直流输电的类型:

(1) 超过30km左右的水下电缆。由于电缆的大电容需要中间补偿站,对这么长的距离来说,交流输电是不切实际的。瑞典FENNO—芬兰SKAN,横跨海峡,采用220km长的电缆。

(2) 两个交流系统之间的异步联接。由于直流系统稳定性问题或两系统的额定频率不同,在这种情况下也不适宜采用交流联接。另外,两大系统逐渐发展需要互联,它们虽有相同的频率,有时却不同步,采用直流互联也是常用手段。这两种情况在美国最多见,其它(印度、日本、欧洲等)地方也采用。

(3) 大容量远距离架空线输电。超过700km距离时,用高压直流输电替代交流输电,极具竞争力。美国BPA系统、加拿大纳尔逊河输电系统、我国的葛上直流工程 and 天广直流工程均属此类型。

高压直流输电系统具有快速控制传输功率的能力。因此,对于与交流电力系统有关的稳定性问题,HVDC系统有明显的影响。理解HVDC系统的特性,对于电力系统的运行和稳定控制都是极其重要的。尤为关键的是,HVDC控制的正确设计是使整个交、直流

系统具有满意运行性能的重要保证。

## § 1.2 高压直流输电运行特性及其与交流输电的比较

电力系统规划人员在对直流输电和交流输电两种方式进行比较时,应当考虑以下因素:

- (1) 技术性能;
- (2) 可靠性;
- (3) 经济性。

随着负荷增长而不断扩展是电力系统的主要特点之一。这就要求在建立一条特定的输电线路时,应当将其作为整个系统长期规划的一部分来考虑。

### 1.2.1 技术性能

高压直流输电系统具有下列运行特性:

(1) 功率传输特性。众所周知,随着输送容量不断增长,稳定问题越来越成为交流输电的制约因素。为了满足稳定问题,常需采取串补、静补、调相机、开关站等措施,有时甚至不得不提高输电电压。但是,这将增加很多电气设备,代价是昂贵的。

直流输电没有相位和功角,当然也就不存在稳定问题,只要电压降、网损等技术指标符合要求,就可达到传输的目的,无需考虑稳定问题,这是直流输电的重要特点,也是它的一大优势。

(2) 线路故障时的自防护能力。交流线路单相接地后,其消除过程一般约  $0.4 \sim 0.8\text{s}$ ,加上重合闸时间,约  $0.6 \sim 1\text{s}$  恢复。

直流线路单极接地,整流、逆变两侧晶闸管阀立即闭锁,电压降到零,迫使直流电流降到零,故障电弧熄灭不存在电流无法过零的困难,直流线路单极故障的恢复时间一般在  $0.2 \sim 0.35\text{s}$  内。

从自身恢复的能力看,交流线路采用单相重合闸,需要满足单相瞬时稳定,才能恢复供电,直流则不存在此限制条件。

若线路上发生的故障在重合(直流为再启动)中重燃,交流线路就三相跳闸了。直流线路则可用延长留待去游离时间及降压方式来进行第2、第3次再启动,创造线路消除故障、恢复正常运行条件。对于单片绝缘子损坏,交流必然三相切除,直流则可降压运行,且大都能取得成功。

因此,对于占线路故障  $80\% \sim 90\%$  的单相(或单极)瞬时接地而言,直流比之交流具有响应快、恢复时间短、不受稳定制约、可多次再启动和降压运行来创造消除故障恢复正常运行条件等多方面优点。

(3) 过负荷能力。通常,交流输电线路具有较高的持续运行能力,受发热条件限制的允许最大连续电流比正常输送功率大得多,其最大输送容量往往受稳定极限控制。

直流线路也有一定的过负荷能力,受制约的往往是换流站。通常分  $2\text{h}$  过负荷能力、 $10\text{s}$  过负荷能力和固有过负荷能力等。前两者葛上直流工程分别为  $10\%$  和  $25\%$ ,后者视环境温度而异。

总的来说,就过负荷能力而言,交流有更大的灵活性,直流如果需要具有更大的过负荷能力,则必须在设备选型时要预先考虑,此时需要增加投资。

(4)利用直流输电调节作用能提高交流系统的稳定性。如前所述,直流输电具有快速响应的特点,当交流系统发生故障时,利用直流输电的调节作用,能有效地提高交流系统的稳定性。著名的美国BPA 500kV交直流并列运行线路,2回长1521km交流线路共送2860MW,平均1回送电1430MW,直流的调节作用是重要措施之一。

(5)潮流和功率控制。交流输电取决于网络参数、发电机与负荷的运行方式,值班人员需要进行调度,但又难于控制,直流输电则可全部自动控制。

(6)短路容量。两个系统以交流互联时,将增加两侧系统的短路容量,有时会造成部分原有断路器不能满足遮断容量要求而需要更换设备。直流互联时,不论在哪里发生故障,在直流线路上增加的电流都是不大的,因此不增加交流系统的断路容量。

(7)调度管理。由于通过直流线路互联的两端交流系统可以有各自的频率,输送功率也可保持恒定(恒功率、恒电流等)。对送端而言,整流站相当于交流系统的一个负荷。对受端而言,逆变站则相当于交流系统的一个电源。互相之间的干扰和影响小,运行管理简单方便,深受电力管理、运行部门的欢迎。对我国当前发展的跨大区互联、合同售电、合资办电等形成的联合电力系统,尤为适宜。

(8)线路走廊。按同电压500kV考虑,1条500kV直流输电线路的走廊约40m,1条500kV交流线路走廊约为50m,但是1条同电压的直流线路输送容量约为交流线路的2倍,直流输电的线路走廊,其传输效率约为交流线路的2倍甚至更多一点。

然而下列因素限制了直流输电的应用范围:

- (1)直流断路器的费用高;
- (2)不能用变压器来改变电压等级;
- (3)换流设备的费用高;
- (4)由于产生谐波,需要交流和直流滤波器,从而增加了换流站的费用;
- (5)控制复杂。

近年来,直流技术已有了明显的进步,除了上述的第(2)条之外,其余缺点都可予以克服。这些技术如下:

- (1)直流断路器的进展;
- (2)晶闸管的模块化结构和额定值增加;
- (3)换流器采用12或24脉波运行;
- (4)采用氧化金属变阻器;
- (5)换流器控制采用数字和光纤技术;

上述技术已经改善了直流系统的可靠性和降低了换流站的费用。控制的复杂性已不成为一个问题,实际上已用来对正常和非正常运行提供可靠和快速的控制。此外,还可以采用控制来将两端直联络线中的直流电流降到零,而不需要直流断路器。甚至在多端直流系统中,还将直流断路器作为有效的控制手段。

### 1.2.2 可靠性

整个系统的可靠性可以从强迫停运率和电能不可用率两个方面进行衡量。

(1)强迫停运率. 根据我国500kV交流输电工程统计资料和国外ABB、北美和CIGRE等对交、直流工程的统计资料,交、直流工程的综合强迫停运率如表1.1所示。

表 1.1 交、直流工程的综合强迫停运率

| 名 称            | 交流    |       | 直流    |       | 交流   |       | 直流   |      |
|----------------|-------|-------|-------|-------|------|-------|------|------|
|                | 单回    | 双回    | 单极    | 双极    | 单回   | 双回    | 单极   | 双极   |
| 线路[次(百公里·年)]   | 0.299 | 0.054 | 0.126 | 0.055 | 0.29 | 0.054 | 0.14 | 0.01 |
| 两端变电(换流)站(次/年) | 0.560 | 0.120 | 4.80  | 0.20  | 0.6  | 0.06  | 1.4  | 0.25 |

(2)电能不可用率. 表 1.2 列出了 ABB 公司提供的交、直流输电电能不可用率的比较。

表 1.2 交直流输电线的电能不可用率

| 名 称     | 电能不可用率(%)  |      |             |       |
|---------|------------|------|-------------|-------|
|         | 输电容量损失 50% |      | 输电容量损失 100% |       |
|         | 交流         | 直流   | 交流          | 直流    |
| 线路      | 0.75       | 0.07 | 0.050       | 0.016 |
| 变电(换流)站 | 0.07       | 0.62 | 0.007       | 0.002 |
| 总计      | 0.82       | 0.69 | 0.057       | 0.018 |

总的来说,从可靠性和可用率两个指标来看,交、直流两种输电方式是相当的,都是可行的。

### 1.2.3 经济性

交、直流两种输电方式,就其造价而言,各具如下特色:

(1)输送容量确定后,直流换流站的规模随之确定,其投资也即固定下来,距离的增加,只与线路造价有关. 交流输电则不同,随着输电距离的增加,由于稳定、过电压等要求,需要设置中间开关站. 因此,对于交流输电方式,输电距离不单影响线路投资,同时也影响变电部分投资。

(2)就变电和线路两部分看,直流输电换流站投资占比重大,而交流输电的输电线路投资占主要成分。

(3)直流输电功率损失比交流输电小得多。

(4)当输送功率增大时,直流输电可以采取提高电压、加大导线截面的办法,交流输电则往往只好增加回路数。

综上所述,直流换流站的造价远高于交流输电的,而直流输电线路的造价则明显低于交流输电线路的。同时,直流输电的网损又比交流的小得多。因此,随着输电距离的改变,交、直流两种输电方式的造价和总费用将相应作增减变化。在某一输电距离下,两者总费用相等,这一距离称为等价距离。这是一个重要的工程初估数据。概括地说,超过这一距离时,采用直流有利;小于这一距离时,采用交流有利。根据国外经验,等价距离大约为 700~800km。

## § 1.3 高压直流输电系统的结构和元件

### 1.3.1 高压直流联络线的分类

高压直流联络线大致可分以下几类:

- (1)单极联络线;
- (2)双极联络线;
- (3)同极联络线。

单极联络线的基本结构如图 1.1 所示,通常采用一根负极性的导线,而由大地或水提供回路。出于对造价的考虑,常采用这类系统,对电缆传输来说尤其如此。这类结构也是建立双极系统的第一步。当大地电阻率过高,或不允许对地下(水下)金属结构产生干扰时,可用金属回路代替大地作回路,形成金属性回路的导体处于低电压。

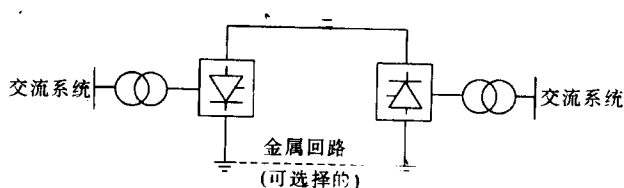


图 1.1 单极 HVDC 联络线。

双极联络线结构如图 1.2 所示,有两根导线,一正一负,每端有两个为额定电压的换流器串联在直流侧,两个换流器间的连接点接地。正常时,两极电流相等,无接地电流。两极可独立运行。若因一条线路故障而导致一极隔离,另一极可通过大地运行,能承担一半的额定负荷,或利用换流器及线路的过载能力,承担更多的负荷。

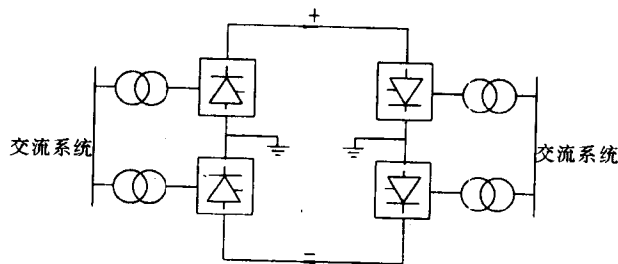


图 1.2 双极 HVDC 联络线。

从雷电性能方面看,一条双极 HVDC 线路能有效地等同于两回交流传输线路。正常情况下,它对邻近设备的谐波干扰远小于单极联络线。通过控制(不需要机械开关)改变两极的极性来实现潮流反向。

当接地电流不可接受时,或接地电阻高而接地电极不可行时,用第三根导线作为金属性中性点。在一极退出运行或双极运行失去平衡时,此导线充当回路。第三条导线的绝缘要求低,还可作为架空线的屏蔽线。如果它完全绝缘,可作为一条备用线路。

同极联络线结构如图 1.3 所示,导线数不少于两根,所有导线同极性。通常最好为负极性,因为它由电晕引起的无线电干扰较小。这样的系统采用大地作为回路。当一条线路发生故障时,换流器可为余下的线路供电,这些导线有一定的过载能力,能承受比正常情况更大的功率。相反,对双极系统来说,重新将整个换流器连接到线路的一极上要复杂得多,通常是不可行的。在考虑连续的地电流是可接受的情况下,同极联络线具有突出的优点。

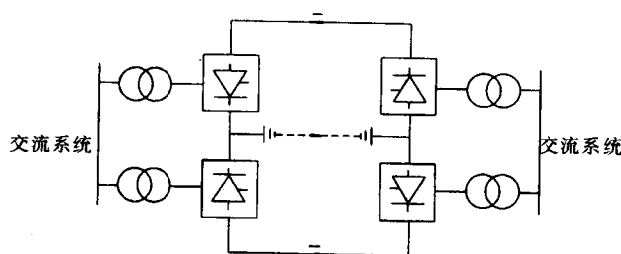


图 1.3 同极 HVDC 联络线。

接地电流对位于系统电极几千米范围内的油、气管道有附带的影响。这些管道充当地电流的导体会引起金属腐蚀。因此,使用大地作回路的结构并非总是可取的。

以上各种高压直流系统结构通常均有串联的换流器组,每个换流器有一组变压器和一组阀。换流器在交流侧(变压器侧)是并联的,在直流侧(阀侧)是串联的,在极对地之间给出期望的电压等级。

背靠背的高压直流系统(用于非同步联接)是无直流线路的直流系统。它可以设计成单极或双极运行,每极带有不同数目的阀组,其数目取决于互联的目的和要达到的可靠性。

大多数包括线路在内的点对点(两端)HVDC 联络线是双极的,仅在偶然事故时才采用单极运行。它们通常被设计成能提供极间最大独立性的系统,以避免双极闭锁。

将直流系统联接到交流电网上的节点多于两个时,就构成了多端高压直流系统。多端系统的结构将在 § 9.1 中讨论。

如果两个直流系统接到一个共同的交流系统上,并且两个直流系统之间的交流阻抗较小,就构成了多馈入直流系统,其结构在 § 10.1 中讨论。

### 1.3.2 高压直流输电系统的元件

HVDC 系统的主要元件如图 1.4 所示,以双极系统为例. 其它结构的元件与该图所示基本类同. 下面简述各元件.

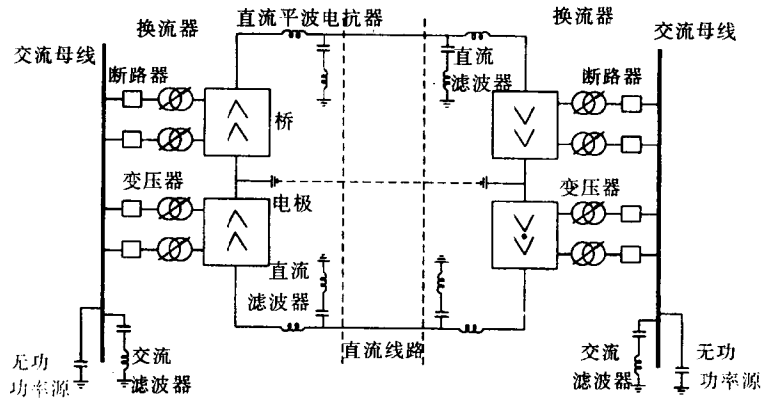


图 1.4 双极 HVDC 系统的主要元件.

(1)换流器. 它们完成交-直流和直-交流转换,由阀桥和有抽头切换器的变压器构成. 阀桥包含 6 脉波或 12 脉波安排的高压阀,如 § 2.2 的介绍. 换流变压器向阀桥提供适当等级的不接地三相电压源. 由于变压器阀侧不接地,直流系统能建立自己的对地参考点,通常将阀换流器的正端或负端接地.

(2)平波电抗器. 这些大电抗器具有高达 1.0H 的电感,在每个换流站与每极串联时,它们有以下作用:

1. 降低直流线路中的谐波电压和电流;
2. 防止逆变器换相失败;
3. 防止轻负荷电流不连续;
4. 限制直流线路短路期间整流器中的峰值电流.

(3)谐波滤波器. 换流器在交流和直流两侧均产生谐波电压和谐波电流. 这些谐波可能导致电容器和附近的电机过热,并且干扰远动通信系统. 因此,在交流侧和直流侧都装有滤波装置.

(4)无功功率支持. 正如我们将在 § 2.2 中看到的,直流换流器内部要吸收无功功率. 稳态条件下,所消耗的无功功率是传输功率的 50%左右. 在暂态情况下,无功功率的消耗更大. 因此,必须在换流器附近提供无功电源. 对于强交流系统,通常用并联电容补偿的形式. 根据直流联络线和交流系统的要求,部分无功电源可采用同步调相机或静止无功补偿器(SVC). 用作交流滤波的电容也可以提供部分无功功率.

(5)电极. 大多数的直流联络线设计采用大地作为中性导线,至少在较短的一段时间内是这样. 与大地相连接的导体需要有较大的表面积,以便使电流密度和表面电压梯度最小. 这个导体被称为电极. 如前所述,如果必须限制流经大地的电流,可以用金属性回路的导体作为直流线路的一部分.

(6)直流输电线. 它们可以是架空线,也可以是电缆. 除了导体数和间距的要求有差异外,直流线路与交流线路十分相似.

(7)交流断路器. 为了排除变压器故障和使直流联络线停运,在交流侧装有断路器. 它们不是用来排除直流故障的,因为直流故障可以通过换流器的控制更快地清除.

## 第二章 换流器理论及特性方程

换流器完成交-直流转换,并通过 HVDC 联络线来控制潮流.换流器的主要元件是阀桥和换流变压器.阀桥是一组高压开关或阀,它们依次地将三相交流电压连接到直流端,以便得到期望的变换和对功率的控制.换流变压器提供交流系统和直流系统之间的适当接口.

这一章我们将描述实际换流电路的结构和运行情况.另外,我们还将建立联系直流量和基频交流量的方程.

### § 2.1 阀 特 性

高压直流换流器中的阀是一个可控电子开关.它通常仅单向导通,正方向是从阳极到阴极.导通时阀上仅有一个小的压降.在相反方向,即施加在阀上的电压使阴极相对于阳极为正时,阀阻止电流通过.

早期的 HVDC 系统采用汞弧阀.额定电流等级在 1 000A 至 2 000A 之间,额定反向峰值电压为 50kV 到 150kV.汞弧阀的缺点是体积大,有逆向导通的可能.

从 70 年代中期开始,所有的 HVDC 系统均采用晶闸管阀.晶闸管阀的额定值已发展到 2 500A 至 3 000A 和 3kV 至 5kV.晶闸管串联起来以得到希望的系统电压,而用并联来满足正常和事故过流的要求.它可以有以下不同的设计:空气冷却,空气绝缘;油冷,油绝缘;水冷,空气绝缘;以及氟利昂(二氯二氟甲烷)冷却,六氟化硫(SF<sub>6</sub>)绝缘.可以分别按户内和户外安装来设计阀.

为了使阀导通,必要条件是阳极电压相对于阴极为正.在汞弧阀中,当控制栅极对阴极有足够的负电压时,虽然阳极电压可能是正的,也可避免阀导通,触发瞬间能通过栅极来控制.

晶闸管阀的电路符号及其伏安特性分别如图 2.1(a,b)所示.主电流从阳极(A)流到阴极(K).在断开状态,晶闸管能阻断正向电流而不导通,如图 2.1(b)的伏安特性的断开状态段.

当晶闸管处于正向闭锁状态时,通过向门极(G)施加瞬时的或持续的电流脉冲,能触发晶闸管导通.产生如图 2.1(b)的伏安特性的导通段.导通时的正向电压降只有几伏(典型值为 1~3V,取决于晶闸管闭锁电压的额定值).

一旦晶闸管开始导通,它就被钳住在导通状态,而此时门极电流可以取消.晶闸管不能被门极关断,像一个二极管一样导通.直到电流降至零和有反向偏置电压作用在晶闸管上时,它才会截止.当晶闸管再次进入正向阻断状态后,允许门极在某个可控的时刻将晶闸管再次触发导通.

在反向偏置电压低于反向击穿电压时,流过晶闸管的漏电流很小,几乎可以忽略[图 2.1(b)].通常,晶闸管的正向和反向阻断额定电压相同.用晶闸管允许通过的最大电流