

超(特)高压直流输电系统 可靠性评估、优化及应用

谢开贵 胡 博 南方电网科学研究院有限责任公司 著



科学出版社

超(特)高压直流输电系统 可靠性评估、优化及应用

谢开贵 胡 博 南方电网科学研究院有限责任公司 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书较系统地介绍了超(特)高压直流输电系统可靠性评估、可靠性优化及薄弱环节辨识的相关原理、方法和工程应用。内容包括:直流输电系统可靠性的研究现状,典型结构、系统接线和主要运行方式,涉及的数学和可靠性基础;超(特)高压直流输电系统可靠性评估和统计评价的内容、数据要求和指标体系;超(特)高压直流输电系统及子系统(换流变、阀组、交流滤波器)的可靠性评估模型、评估方法;超(特)高压直流输电系统可靠性跟踪模型和方法,以辨识直流输电工程的薄弱环节;高压直流输电系统设备最优选型方法和可靠性最优分解方法,为设备优选、招投标等提供依据。同时,书中给出多个工程实际算例实现模型、方法、指标的应用。本书最后介绍了超(特)高压直流输电系统可靠性综合分析系统软件的结构及功能。

本书可供从事电力系统可靠性、直流输电研究、规划、设计和运行的电力工程技术人员、管理干部及科研工作者使用,也适合作为大专院校教师、研究生、高年级本科生及研讨班的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

超(特)高压直流输电系统可靠性评估、优化及应用/谢开贵,胡博,南方电网科学研究院有限责任公司著. —北京:科学出版社,2014.5

ISBN 978-7-03-039667-9

I. ①超… II. ①谢… ②胡… ③南… III. ①超高压输电线路-直流输电线路-电路可靠性-研究 ②特高压输电-直流输电线路-电路可靠性-研究 IV. ①TM726②TM723

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 017804 号

责任编辑:耿建业 陈构洪 / 责任校对:宋玲玲

责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2014 年 5 月第 一 版 开本:720×1000 1/16

2014 年 5 月第一次印刷 印张:11 1/4

字数:212 000

定价:88.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)



序

作为中国电力工业高速发展的一部分,直流输电工程也正在经历前所未有的发展阶段。多个在运、在建及规划中的直流输电工程已经和即将在中国大电网中承担主要送电任务,并在未来全国联网中发挥重要作用。另一方面,随着直流输电电压等级和输送容量的不断提升,直流输电系统停运对电网冲击也越来越大,如何准确评估直流输电系统的可靠性,辨识其薄弱环节,协调好直流工程中的可靠性和经济性关系,为电力系统运行和规划人员提供有价值的量化决策信息变得极其重要。

自 1978 年以来,重庆大学电力可靠性研究团队,即现在正式命名的“重庆大学电力和能源可靠性研究中心”,对电力系统(包括直流系统)的可靠性理论、应用技术和数据分析进行了长期的系统性研究,是国内这一领域早期和著名的研究单位之一。该研究中心的谢开贵教授、胡博副教授与南方电网科学研究院的同行合著的《超(特)高压直流输电系统可靠性评估、优化及应用》一书,是他们近 10 年来在直流输电系统可靠性领域的研究成果和工程实践的总结。书中许多内容曾经在作者的研究生的教学和外出讲学中使用过。该书较系统地介绍了超(特)高压直流输电系统可靠性评估、可靠性优化及薄弱环节辨识的原理、方法和工程应用。书中涉及的理论模型和方法有普遍意义,适用于超高压和特高压直流输电系统、两端和多端直流输电系统以及柔性直流输电系统的可靠性评估。

该书不同于一般电力系统可靠性书籍的是,除了介绍电力系统可靠性评估基础知识、直流输电系统可靠性评估模型和方法外,还结合作者长期与直流工程规划、设计和运行人员的交流经验,探讨了工程人员普遍关注的直流系统可靠性问题。作者针对系统薄弱环节辨识、最优设备选型和可靠性指标分解等问题,不仅给出了建模思路和求解方法,还以实际直流输电工程为例进行叙述,既有理论开拓,又有实用价值。值得一提的是,针对系统薄弱环节辨识问题的可靠性跟踪概念和方法是作者首先提出的,具有原创性。

该书概念清楚,行笔流畅,立论实际,对关心该领域的读者,是很有吸引力的读物。该书的出版,将在直流输电系统可靠性评估理论和方法转化为应用技术方面发挥重要作用。

李文沅

加拿大工程院院士

2014 年 4 月 11 日于温哥华

前 言

自 20 世纪 80 年代以来,我国的高压直流输电研究及工程应用取得了突飞猛进的发展。目前,我国已投运多个直流输电工程。为实现“西电东送”战略规划,我国正在积极推进 $\pm 660\text{kV}$ 、 $\pm 800\text{kV}$ 等特高压直流输电工程的规划、建设和运行。云广、向上、糯扎渡、哈密—郑州、锦屏—苏南、溪洛渡—浙西等一批 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输电工程的建设,标志着我国直流输电技术、装备制造等在世界输变电领域占领了新的制高点。

随着我国高压直流输电技术的不断发展和实际工程的日益增多,高压直流输电系统的可靠性已成为影响整个电力系统可靠性的重要因素。由于高压直流输电技术主要运用于远距离大功率输电、大区联网和系统间非同步联络以及地下或海底电缆输电等场合,这就对高压直流输电系统的可靠性提出了很高的要求,而其可靠性的改善也将给整个电力系统的安全、可靠和经济运行带来巨大的效益。因此,准确评估各类超(特)高压直流输电工程的可靠性,并结合工程实际进行可靠性影响因素分析,辨识出直流工程的薄弱环节,可为直流工程设计、施工和运行提供量化决策依据,以适应我国高压直流输电快速发展的需要。

近年来,重庆大学电力和能源可靠性研究中心、南方电网科学研究院有限责任公司分别从我国直流输电技术快速发展过程中对可靠性评估工作的需求和超(特)高压直流输电工程建设过程中对可靠性的需求出发,合作率先组建直流输电系统可靠性研究小组,开展直流输电系统可靠性研究,围绕云广等直流输电工程、国家科技支撑项目等开展可靠性研究。南方电网科学研究院有限责任公司饶宏、黎小林、黄莹、金小明和邱伟参与了本书的编写工作。

当前,国内高压直流工程建设方兴未艾,很多电力工程师都在从事高压直流输电的规划、设计、运行和管理等相关工作,而工作中都将涉及高压直流可靠性评估方面的内容。本书通过对直流系统可靠性评估中涉及的理论知识、指标体系、数学模型及方法、工程算例等进行详细阐述,丰富了电力系统可靠性理论体系,希冀为对高压直流可靠性评估感兴趣的读者提供理论、技术和工程应用上的帮助,为广大读者解决直流输电可靠性方面的困惑。

本书是对国家科技支撑计划项目、国家自然科学基金项目、重庆市杰出青年基金项目以及 10 余个直流输电可靠性项目(包括贵广、云广、金中、溪洛渡和糯扎渡等)的理论成果和工程应用的总结。在编写过程中,得到了国家能源局电力可靠性管理中心等单位的大力支持;加拿大国家工程院、工程研究院院士李文沅教授和重

庆大学周家启教授等对书稿进行了审阅,并提出了许多建设性的修改意见;李文沅院士还在百忙中抽出时间为本书作序,在此表示感谢;感谢四川省电力公司刘洋博士的相关研究成果。作者的相关研究生参与了部分文字校订和图表绘制工作,在此表示感谢。同时,向书中涉及但未能一一列举的可靠性专家和工程师致谢。

本书的部分研究成果得到国家自然科学基金项目(编号:51307185)和“十一五”国家科技支撑计划重大项目(编号:2006BAA02A21)的资助,在此表示感谢。

限于作者水平且时间仓促,书中难免存在不妥之处,恳请广大读者批评指正。
联系方式:电话 023-65112729,电子信箱 kaiguixie@vip.163.com、hboy8361@163.com。

著 者

2014年4月

目 录

序

前言

第 1 章 概述	1
1.1 引言	1
1.2 直流输电系统的典型结构和基本原理	3
1.3 高压直流输电系统接线及运行方式	5
1.4 高压直流输电系统可靠性研究现状	8
1.5 本书的内容和结构关系	11
参考文献	12
第 2 章 可靠性统计、评估和优化的数学基础	14
2.1 可靠性统计方法	14
2.1.1 点估计	14
2.1.2 区间估计	15
2.1.3 异常数据的处理方法	16
2.2 简单系统的可靠性评估方法	19
2.2.1 串并联系统	20
2.2.2 r/n 系统	24
2.3 复杂系统的可靠性评估方法	25
2.3.1 故障树法	25
2.3.2 状态空间图法	28
2.3.3 频率-持续时间法	30
2.3.4 状态解析法	31
2.3.5 蒙特卡洛模拟法	33
2.4 可靠性优化方法	35
2.4.1 遗传算法	35
2.4.2 二分法	39
2.5 小结	40
参考文献	41
第 3 章 超(特)高压直流输电工程可靠性统计分析	42
3.1 国内外直流输电工程概况	42

3.2 直流输电工程可靠性统计评价指标体系·····	45
3.2.1 直流输电系统的元件可靠性参数·····	45
3.2.2 直流输电系统的主要可靠性统计指标·····	46
3.2.3 直流输电系统的可靠性统计内容·····	47
3.3 直流输电工程可靠性指标的统计分析·····	47
3.3.1 强迫停运指标的统计分析·····	47
3.3.2 系统能量可用率和能量利用率指标的统计分析·····	50
3.3.3 单双 12 脉波接线高压直流输电工程统计指标的对比分析·····	50
3.3.4 Itaipu±600kV 双 12 脉波接线特高压直流输电工程指标的统计分析·····	54
3.4 小结·····	57
参考文献·····	57
第 4 章 超(特)高压直流输电系统可靠性评估模型及指标体系·····	59
4.1 超(特)高压直流输电系统可靠性评估指标体系·····	59
4.1.1 可靠性评估指标·····	59
4.1.2 经济性指标与可靠性跟踪指标·····	60
4.2 超(特)高压直流系统可靠性评估的数据要求和计算条件·····	60
4.3 超(特)高压直流输电系统子系统划分·····	62
4.4 基于故障树法的超(特)高压直流输电系统可靠性评估·····	64
4.5 基于 FD 法的超(特)高压直流输电系统可靠性评估·····	67
4.6 基于状态解析法的超(特)高压直流输电系统可靠性评估·····	71
4.6.1 换流变压器子系统·····	71
4.6.2 交流滤波器子系统·····	72
4.6.3 直流输电线路子系统·····	74
4.6.4 平波电抗器子系统·····	75
4.6.5 全系统可靠性评估模型·····	75
4.7 小结·····	78
参考文献·····	79
第 5 章 超(特)高压直流输电系统设备最优选型·····	80
5.1 概述·····	80
5.2 直流输电系统设备最优选型的数学模型·····	81
5.2.1 投资费用·····	81
5.2.2 运行维护费用·····	81
5.2.3 停电损失费用·····	82
5.2.4 设备最优选型的数学模型·····	82
5.3 基于 GA 的直流输电系统设备最优选型求解算法·····	82

5.3.1 设备选型的编码	82
5.3.2 适应度函数	83
5.3.3 子系统可靠性保留技术	83
5.3.4 自适应交叉率和变异率	84
5.3.5 保留精英个体	85
5.3.6 求解算法流程	85
5.4 工程算例分析	86
5.4.1 算例系统简介	86
5.4.2 计及经济性、可靠性的设备最优选型	87
5.4.3 只计及可靠性的选型方案	87
5.4.4 只计及经济性的选型方案	88
5.4.5 算法收敛性与计算速度分析	89
5.5 小结	89
参考文献	90
第6章 超(特)高压直流输电系统可靠性最优分解	92
6.1 引言	92
6.2 高压直流输电系统可靠性的最优分解模型及求解算法	93
6.3 算例分析	94
6.3.1 单12脉波接线高压直流输电系统算例分析	94
6.3.2 双12脉波接线高压直流输电系统算例分析	98
6.3.3 可靠性最优分解的讨论	101
6.4 小结	101
参考文献	102
第7章 超(特)高压直流输电系统最优备用分析	104
7.1 概述	104
7.2 设备最优备用分析模型	105
7.2.1 高压直流输电系统备用的成本-效益分析曲线	105
7.2.2 计及经济性和可靠性的高压直流输电系统最优备用模型	105
7.3 设备最优备用求解算法	107
7.3.1 最优备用模型的特点	107
7.3.2 最优备用分析的基本步骤	107
7.4 工程算例分析	108
7.4.1 交流滤波器备用分析	108
7.4.2 换流变压器备用分析	110
7.4.3 晶闸管备用分析	110
7.4.4 平波电抗器备用分析	111

7.5 小结	112
参考文献	112
第8章 基于可靠性的超(特)高压直流输电系统薄弱环节辨识	114
8.1 概述	114
8.2 灵敏度分析法	114
8.2.1 灵敏度的定义	114
8.2.2 基于可靠性函数的灵敏度分析法	115
8.2.3 基于数值模拟的灵敏度分析法	117
8.3 可靠性跟踪法	118
8.3.1 不可靠性跟踪准则	118
8.3.2 系统失效事件概率和频率的可靠性跟踪方法	119
8.3.3 直流输电系统可靠性跟踪模型	121
8.3.4 直流输电系统可靠性跟踪算法	122
8.4 工程算例分析	124
8.4.1 灵敏度分析法的工程算例分析	124
8.4.2 可靠性跟踪法的工程算例分析	131
8.5 小结	135
参考文献	136
第9章 高压直流输电系统可靠性综合分析系统软件	138
9.1 概述	138
9.2 系统结构和功能设计	139
9.2.1 系统结构设计	139
9.2.2 系统功能设计	140
9.3 主要功能模块	141
9.3.1 可靠性评估	141
9.3.2 可靠性跟踪	142
9.3.3 灵敏度分析	143
9.3.4 经济性分析	143
9.3.5 设备最优选型	147
9.3.6 可靠性最优分解	149
9.4 小结	150
附录A 换流站主要设备可靠性参数(部分)	152
附录B 单12脉波接线高压直流输电系统各级故障树图(部分)	153
附录C 双12脉波接线高压直流输电系统各级故障树图(部分)	158
附录D 双12脉波接线高压直流输电系统各级状态空间图(部分)	162
附录E 正态分布和t分布的概率分布表	167

第 1 章 概 述

1.1 引 言

直流输电常用于远距离、大容量输电及跨区域电网间的互联,其将交流电通过换流器变换成直流电,然后通过直流输电线路送至受电端并通过换流器变成交流电,最终注入交流电网。相对于交流输电来说,直流输电具有输送灵活、损耗小、节约线路走廊、可实现快速控制等优点。

世界上最早的直流输电是用直流发电机直接向直流负荷供电。法国的物理学家德普勒在 1882 年用装设在米斯巴赫煤矿中的直流发电机把电力送到在慕尼黑举办的国际展览会,这是有史以来的第一次直流输电试验;1954 年,瑞典投运了世界上第一个商业运营的直流输电系统,换流阀首次采用汞弧阀,标志着直流输电进入了一个新的发展阶段;1972 年,加拿大的伊尔河直流输电工程首次采用可控硅(晶闸管),也使直流输电得到大力发展^[1]。截至 1975 年,全世界共有高压直流(high voltage direct current, HVDC)输电工程 11 项,输电容量达到 5GW。目前,世界上已有上百个高压直流输电工程投入运行^[2]。

20 世纪 80 年代,我国建成了 100kV 舟山直流海底电缆送电实验工程,额定输电容量为 50MW,输送距离达 13.5km;1990 年建成湖北葛洲坝至上海南桥的葛南双极直流输电工程,额定容量为 1200MW,额定电压为 ± 500 kV,输送距离为 1045km,这是我国第一个远距离、大容量高压直流输电工程,至此,我国电网进入了交直流混合输电时代^[3]。

当前,我国已形成了东北、华北、西北、华中、华东、南方及一些省区的区域电网。合理地互联这些电网可取得良好的水火互补、错峰填谷、减少备用容量、事故支援等经济效益,并减小大面积停电事故的发生概率,便于电网间协调发展,而高压直流输电技术特别适用于大容量、远距离输电,其在我国“西电东送”和全国联网等电力发展战略中发挥着越来越重要的作用。

相对于交流输电,直流输电主要有如下优点^[4]:

- (1) 输送容量大、造价低、损耗小、寿命长且输送距离不受限制;
- (2) 高压直流输电跟与其相联的两个交流系统的频率和相位无关,适于电网间互联;
- (3) 高压直流输电的传送功率(包括大小和方向)快速可控等。

相对于交流输电,直流输电也存在如下缺点^[4]:

- (1) 直流输电换流站比交流变电站的设备多、结构复杂、造价高、损耗大;
- (2) 基于晶闸管的换流阀在换流过程中需要吸收大量无功功率;
- (3) 对大功率直流输电系统而言,当发生双极闭锁故障时,将对交流系统造成巨大的冲击。

随着高压直流输电技术的不断发展和实际工程的日益增多,高压直流输电系统的可靠性已成为影响整个电力系统可靠性的重要因素。高压直流输电系统的故障将对整个电网造成较大的影响,如2008年8月13日,葛南直流输电工程峡葛Ⅰ线A相雷击跳闸,导致葛洲坝站极Ⅰ闭锁,损失直流功率507MW,少送电量160万kW·h,直接损失约9.6万元;2008年5月10日,500kV宜都换流站因GIS开关故障,造成宜华直流系统极Ⅰ停运;2008年12月21日南桥站极Ⅱ换流变压器C相套管故障引起换流差动保护动作导致单极闭锁,以及2008年12月28日葛洲坝换流站极Ⅱ换流阀Y桥差动保护动作导致单极闭锁等故障,均导致大量的功率损失和经济损失^[5,6]。

由于高压直流输电技术主要运用于远距离大功率输电、大区联网和系统间非同步联络以及地下或海底电缆输电等场合,这就对高压直流系统的可靠性提出了很高的要求,而其可靠性的改善也将给整个电力系统的安全、可靠和经济运行带来巨大的经济效益。因此,统计、评估高压直流输电系统的可靠性,分析各类因素对直流输电系统可靠性的影响,辨识直流输电系统的薄弱环节,结合工程实际需求进行可靠性优化研究,对直流工程的规划、设计及调度运行具有重要意义。

对可靠性研究而言,可靠性数据统计是最为基础的工作,其为可靠性评估、优化分析等提供了数据基础,直流输电系统也不例外。可靠性统计^[7]是指记录系统中设备(或元件)的故障并进行统计处理。从2000年起,我国对直流输电系统进行了更深入的统计评价工作,包括对交流及其辅助设备、阀设备、控制保护系统、直流一次设备以及整个直流输电系统可靠性等的统计评价^[8]。除了为可靠性研究提供基础数据外,直流输电系统可靠性统计还可达到如下目的:

- (1) 发现直流输电工程中需要增强或改造的薄弱环节和瓶颈;
- (2) 了解直流输电工程可靠性性能的逐年变化趋势;
- (3) 确定已投运直流工程的可靠性水平,指导规划工程的可靠性评估;
- (4) 不同运行方式下,直流输电工程可靠性的比较分析;
- (5) 不同直流工程设计方案的可靠性比较。

可靠性评估^[6,7]是指对电力元件、系统的静态或动态性能,或各种性能改进措施的效果是否满足规定的可靠性准则进行分析、预计和认定的系列工作。电力系统可靠性评估的层面包括发电系统、发输电组合系统、配电系统、电站电气主接线和高压直流输电系统等。

对直流输电系统而言,可靠性评估就是对直流系统不间断地提供电力和电量的能力进行度量的过程,比如,强迫能量不可用率、单极强迫停运率、双极强迫停运率等指标的度量。对直流输电系统进行可靠性评估可达到如下目的:

- (1) 分析直流输电系统固有的可靠性水平;
- (2) 开展直流输电系统可靠性优化分析,如可靠性最优分解、设备最优选型、检修策略优化、设备最优备用分析;
- (3) 辨识直流输电系统薄弱环节;
- (4) 提出基于可靠性的直流输电系统增强性方案,并进行可靠性成本效益分析。

可靠性优化^[6,7]就是以概率论、数学规划为基础,将可靠性与最优化技术融为一体,在保证合理可靠度的前提下,寻求最优的技术、经济方案。

可靠性优化在电力系统中的应用主要包括两个方面:可靠性优化规划和可靠性优化运行。其中,可靠性优化规划是确定在何时、何地投建何种类型的电力设备,以达到规划周期内所需要的电力供给能力,在满足电力系统可靠性等技术指标的前提下使电力系统的总费用最小;而可靠性优化运行则是指在满足技术指标的要求下,尽可能提高系统运行的经济性,即合理利用现有的资源和设备,确定合理的运行模式或方式,以总费用最小为目标,对用户进行连续可靠供电。

对于直流输电系统而言,可靠性优化同样包含两个层面:可靠性规划方面主要涉及可靠性最优分解、设备最优选型和设备最优备用分析等;优化运行方面主要涉及最优检修方案的制订等。

1.2 直流输电系统的典型结构和基本原理

在高压直流输电系统中,为了完成将交流电变换为直流电或者将直流电变换为交流电,并达到电力系统对安全稳定及电能质量的要求,换流站中应包括的主要设备或设施有换流阀、换流变压器、平波电抗器、交流开关设备、交流滤波器及无功补偿装置、直流开关设备、直流滤波器、控制与保护装置以及远程通信系统等^[9]。图 1.1 给出了高压直流换流站的典型结构图。

对各种类型的直流输电系统,无论是两端、多端系统还是背靠背系统,都具有相似的换流站设备。对于两端或多端系统,由于需通过直流线路进行长距离输电,需要更多的直流侧设备,如过电压保护装置及直流滤波器。对于背靠背直流输电系统,由于不通过直流输电线路进行直流功率的传输,而是在同一个换流站内实现 AC/DC/AC 的功率变换,所以其直流侧的设备比两端或多端直流系统的换流站更为简单。需要指出的是,限于篇幅,本书主要以两端直流为例进行论述,当中涉及的可靠性基础理论和优化方法同样适用于多端直流输电系统。

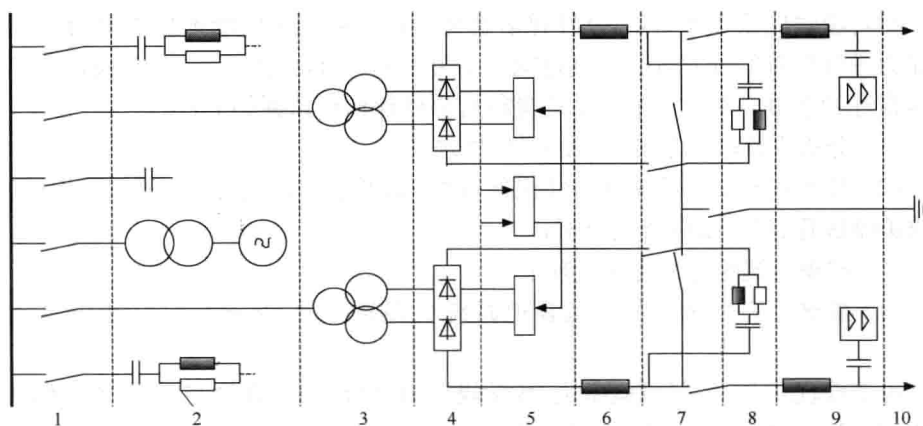


图 1.1 高压直流换流站典型结构图

1. 交流开关装置;2. 交流滤波器和无功补偿装置;3. 换流变压器;4. 换流阀;5. 控制与保护装置;
6. 平波电抗器;7. 直流开关装置;8. 直流滤波器;9. 电力线载波;10. 接地开关

由于晶闸管技术的发展和出于对滤波器设计的考虑,目前国内外高压直流输电系统一般采用双极双桥 12 脉波的接线方式^[4,10]。双极接线采用两根直流导线,一正一负,如一极故障,另一极可通过大地运行,承担一半的额定负荷。双桥接线采用双换流桥构成 12 脉波换流阀的接线方式。由于每极采用 12 脉波换流阀组个数有所不同,双极双桥 12 脉波换流阀的接线方式可分为单 12 脉波接线和双 12 脉波接线。对每极 12 脉波换流阀而言,传统超高压直流输电系统通常采用每极单 12 脉波阀组接线方式,如 $\pm 500\text{kV}$ 葛南、龙政、江城、天广和贵广等直流输电系统。特高压直流输电系统输送容量大,电压等级高,考虑运输及设备制造原因,通常采用的是双 12 脉波阀组接线方式,如 $\pm 800\text{kV}$ 云广、向上等特高压直流输电系统^[11]。

交流与直流的变换需要换流过程,换流包括整流和逆变。整流是指将交流电变换为直流电,逆变则是指将直流电变换为交流电。由于直流输电的传输容量大、输电电压高,要实现电力变换需要有高电压、大容量的换流设备,通常将其称为换流阀,目前在直流输电工程中常用晶闸管换流阀。

直流输电换流站由基本换流单元组成。基本换流单元是在换流站内允许独立运行、进行换流的系统,主要包括换流变压器、换流器、交流滤波器和直流滤波器以及控制保护装置等^[4]。目前,工程上采用的基本换流单元有两种:6 脉波和 12 脉波。它们的主要区别在于所采用的换流器不同,前者采用 6 脉波换流器(三相桥式换流回路),而后者采用 12 脉波换流器。由于 12 脉波换流器由两个 6 脉波换流器串联而成,因此可用 6 脉波换流器来进行原理分析。

6 脉波整流器原理接线如图 1.2 所示。整流器的工作原理是联系最高交流电压的可控硅阀将导通,电流由此流出,而联系最低交流电压的可控硅阀也会导通,

电流由此返回；通过按照一定次序的可控硅阀通断，将交流电压整流成脉动的直流电压^[4,10]。

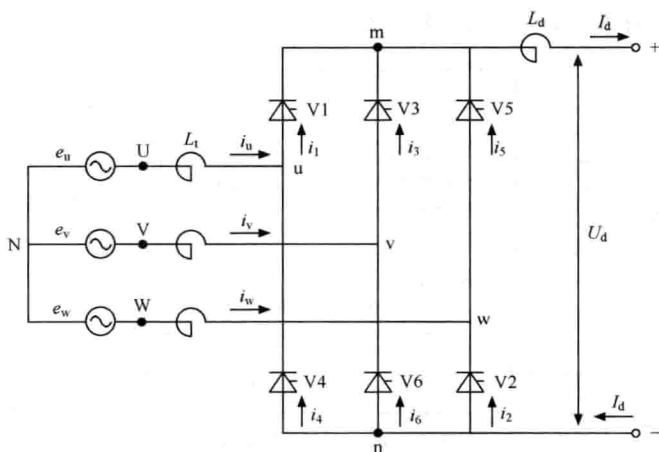


图 1.2 6 脉波整流器原理接线图

图 1.3 所示为 6 脉波逆变器原理接线图。逆变器的工作原理和整流器不同，它是利用加在阀上的交流电压处于负半周时，使阀触发导通，直流平均电压等于负值。所以，实质上它是起了一个反电势的作用。

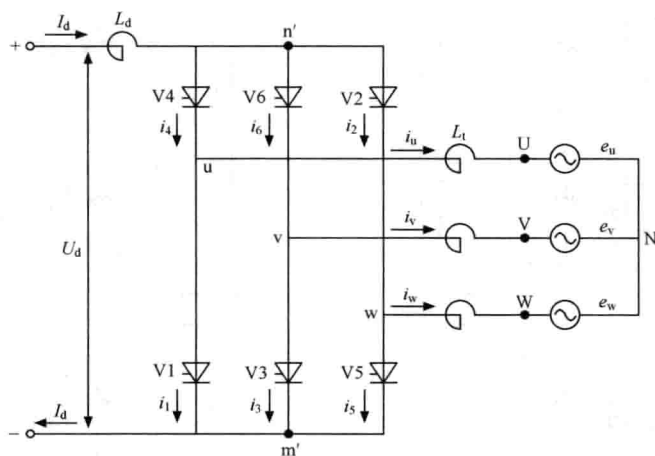
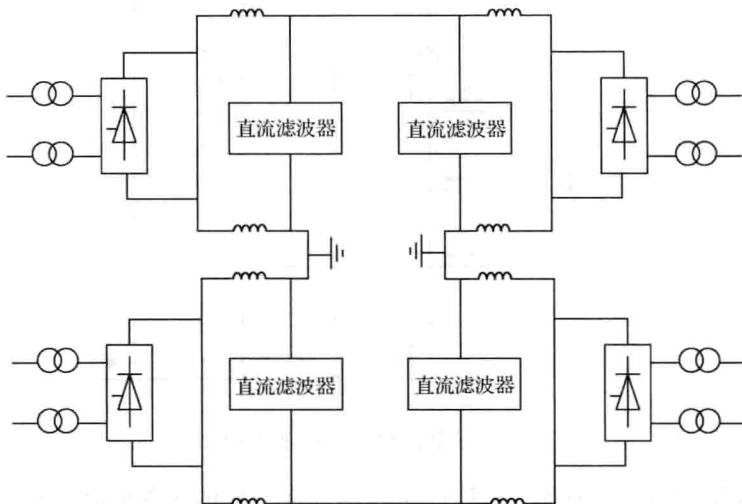


图 1.3 6 脉波逆变器原理接线图

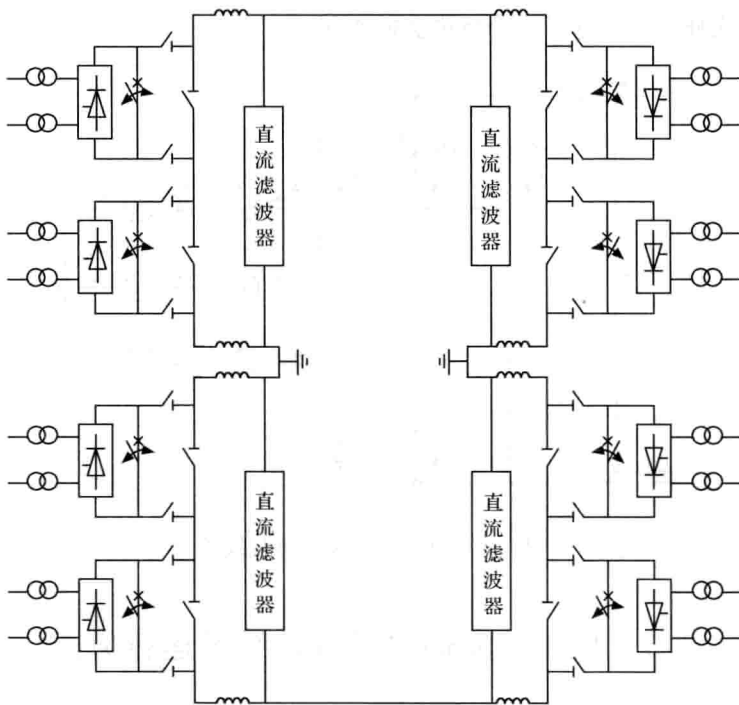
1.3 高压直流输电系统接线及运行方式

当前，高压直流输电系统换流站典型接线方式主要有：

- (1) 单 12 脉波接线, 每极一组 12 脉波换流器[图 1.4(a)];
- (2) 双 12 脉波串联接线, 每极两组 12 脉波换流器串联[图 1.4(b)];
- (3) 双 12 脉波并联接线, 每极两组 12 脉波换流器并联[图 1.4(c)]。



(a) 单12脉波接线



(b) 双12脉波串联接线

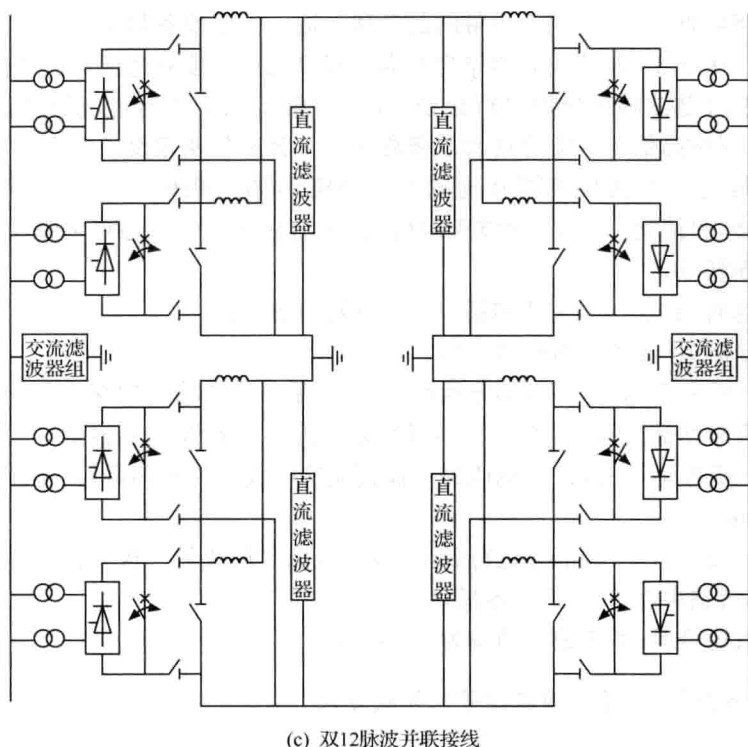


图 1.4 特高压直流输电接线方式

下面分别简要介绍上述三种接线方式的特点及其对应的典型运行方式^[4,10,11]。

1. 每极一组 12 脉波换流器接线方式

该方式具有结构简单、换流站设备数量少、造价低、损耗小等特点,是理想的接线方式。但其单台设备的容量大,制造难度大,运输也困难。由于每极仅有一个 12 脉波换流阀组,且不允许出现单个 6 脉波的运行方式,所以任一 12 脉波换流器故障均可导致单极停运(占系统额定容量的 1/2),对两端交流系统的冲击和影响较大。

单 12 脉波接线双极直流输电系统主要包括以下三种运行方式:

- (1) 双极运行:系统输电功率为 100% 容量;
- (2) 单极运行:系统输电功率为 50% 容量;
- (3) 双极停运:系统输电功率为 0% 容量。

2. 每极两组 12 脉波换流器串联接线方式

相对于单 12 脉波接线,该方式中换流器和换流变压器的数量将增加一倍,但