



国家电网公司
电力科技著作出版项目

HVDC Transmission
System Design

高压直流输电 系统设计

● 马为民 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS



国家电网公司
电力科技著作出版项目

HVDC Transmission System Design

高压直流输电 系统设计

● 马为民 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书完整地介绍了直流输电系统设计中常用的设计流程和工作内容、设计原理和计算方法、技术方案和经验数据等,力图使从事直流输电系统设计的技术人员能较快掌握直流输电系统设计的常规方法,对直流输电系统设计的各个技术环节有较为深入的了解。

本书共分十五章,具体包括概述、直流输电系统主回路及额定值、直流输电系统的运行控制、无功补偿和电压控制、交流滤波器、直流滤波器、直流偏磁、换流站过电压与绝缘配合、高频干扰的抑制、可听噪声、保证损耗、可靠性和可用率、换流站一次设备技术规范、换流站控制保护系统、辅助系统。

本书适用于从事直流输电系统设计和管理工作的人员使用,也可供大中专院校相关专业师生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

高压直流输电系统设计 / 马为民编著. —北京:中国电力出版社, 2015.7

ISBN 978-7-5123-6362-5

I. ①高… II. ①马… III. ①高压输电线路—直流输电线路—系统设计 IV. ①TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 189682 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

三河市万龙印装有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 7 月第一版 2015 年 7 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 16 开本 13.75 印张 284 千字
印数 0001—1500 册 定价 70.00 元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



前 言

自 1998 年葛洲坝—上海±500kV 直流输电工程投运至今，高压直流输电技术在我国的发展和已近 20 年，其间我国直流输电工程的建设经历了由国外供应商总承包到中外合作研究、建设再到完全自主国产化三个阶段。据不完全统计，目前我国直流输电的总容量已占世界直流输电总容量的 45%，并建成了世界上电压最高、电流最大、容量最大的直流输电工程，为直流输电技术的发展作出了巨大贡献。

目前的直流输电技术，电压高、容量大、运行方式灵活，应用于远距离、大容量的电能传输时线路造价低、走廊窄、损耗小，技术经济性能明显优于交流输电。我国是一个一次能源短缺的国家，并且一次能源和电力市场分布很不均匀，76%的煤炭资源分布在北部和西北部地区，80%的水利资源分布在西南部地区，陆地风能主要集中在西北、东北和华北北部地区，而 70%以上的电力需求来自东中部地区，大型能源基地与电力负荷中心之间的距离最远达 3000km。近年来东部发达地区环境压力不断加大，运输成本越来越高，土地资源日趋紧张，已不适宜再大规模建设燃煤电厂，客观上决定了我国能源和电力发展必须走远距离、大规模输电和全国范围优化资源的道路。高压直流输电技术成为高效利用一次能源资源以及新能源开发和消纳的首选，在我国有着最为广阔的市场需求。

直流输电系统设计是直流输电工程建设的核心环节。直流换流站设备众多、技术非常复杂，系统故障的几率要高于交流输电，而通常除了输送较大功率的电力，还经常用来对交流输电系统进行紧急事故支援，以及抑制系统可能发生的振荡等。因此，为了提高直流输电的可靠性，并很好地适应不同交流输电系统安全稳定运行要求，各个直流输电工程可能需要具有不同的功能和技术指标，这必须通过专门的系统设计来实现。同时，直流设备制造高，换流站投资大，为了取得最好的经济性，特别是早期的直流输电工程，系统设计往往是“量体裁衣”，难以实现标准化。

本书是在全面总结我国自三峡—常州±500kV 直流输电工程以来的众多直流输电系统设计实践经验的基础上编写的。编者较完整地介绍了最新的直

流输电工程系统设计的实用技术，包括常用的设计流程和工作内容、设计原理和计算方法、技术方案和经验数据等，力图使从事直流输电系统设计的技术人员能较快掌握设计的常规方法，对直流输电系统设计的各个技术环节有较为深入的了解。同时，随着直流输电技术的发展、工程实践的积累、装备制造工艺的改进，单个直流输电系统的功能越来越强大，对交流输电系统的适应性也更强，因此编者也希望通过本书将直流输电系统设计的标准化向前推进一步，加快直流输电技术的推广和应用。

本书收集了灵宝背靠背直流输电工程、三峡—上海±500kV 直流输电工程、向家坝—上海±800kV 直流输电工程等的系统设计成果，陶瑜、聂定珍、李亚男、蒋维勇、杨一鸣、张涛等同志为本书的编写提供了大量的基础资料和宝贵意见，在此对他们表示衷心的感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏及不足之处，敬请读者批评指正。

编 者

2014 年 12 月



目 录

前言

第一章 概述	1
第一节 设计范围	2
第二节 设计条件	4
第三节 等值交流输电系统	6
第二章 直流输电系统主回路及额定值	8
第一节 电气主接线	8
第二节 主回路参数计算	21
第三节 额定值的确定	28
第三章 直流输电系统的运行控制	35
第一节 基本运行控制策略	35
第二节 换流器控制特性	37
第三节 典型的换流器控制设计	42
第四节 直流附加控制	46
第五节 直流输电系统的动态性能	57
第四章 无功补偿和电压控制	65
第一节 总体设计要求	65
第二节 无功功率的提供和吸收	66
第三节 投切校验	68
第四节 电压及无功功率控制策略	69
第五节 暂时过电压控制	72
第五章 交流滤波器	74
第一节 换流器产生的交流谐波电流	74
第二节 交流滤波器设计	78
第三节 设计实例	85

第六章 直流滤波器	90
第一节 直流电压谐波	90
第二节 直流滤波器设计	93
第三节 设计实例	98
第七章 直流偏磁	100
第八章 换流站过电压与绝缘配合	103
第一节 过电压产生	104
第二节 过电压抑制	106
第三节 绝缘配合	108
第四节 空气间隙设计	113
第五节 污秽外绝缘设计	114
第六节 换流站雷电保护设计	117
第七节 设计实例	117
第九章 高频干扰的抑制	134
第十章 可听噪声	137
第一节 换流站声源	137
第二节 降噪措施	143
第三节 声级预测	146
第四节 设备声功率的确定	147
第十一章 保证损耗	152
第十二章 可靠性和可用率	155
第十三章 换流站一次设备技术规范	160
第一节 晶闸管换流阀	160
第二节 换流变压器	163
第三节 平波电抗器	166
第四节 直流测量装置	169
第五节 高速直流开关	170
第六节 典型直流输电工程的设备参数规范	172

第十四章 换流站控制保护系统	186
第一节 总体要求	186
第二节 运行人员控制系统	190
第三节 交/直流站控制系统	191
第四节 直流极控制/换流器控制系统	193
第五节 直流保护系统	194
第六节 远动通信系统	197
第七节 直流线路故障定位系统	197
第十五章 辅助系统	199
第一节 站用电系统	199
第二节 换流阀冷却系统	202
第三节 消防系统	203
第四节 采暖、通风和空气调节	204
参考文献	205
索引	207



第一章 概述

人们对电力的应用和认识,以及电力科学的发展都是从直流电开始的。1954年,瑞典在本土和哥特兰岛之间建成了世界上第一个高压直流输电系统。此后许多国家也积极开展高压直流输电技术的研究和工程建设。与交流输电相比,远距离大容量的直流输电不会受到稳定性的限制,而当两个交流输电系统通过直流互联时也不存在同步运行的问题,并且直流输电可以有效控制电流大小和方向,利用它的各种附加控制功能还可有效提高交流输电系统的稳定水平。同时,对于远距离输电,直流输电系统由于线路造价低、损耗小,其经济性要优于交流输电。此外,采用直流技术可以实现远距离的电缆输电。因此,直流输电技术,特别是当电力电子技术取得突破性进展后,在世界上得到越来越广泛的应用。

随着我国电力工业的蓬勃发展,天生桥—广州、三峡—常州、三峡—广东、三峡—上海、灵宝背靠背、贵州—广东(I、II)等一大批高压直流输电系统相继建成并投入运行。近年来,电力需求进一步扩大,德阳—宝鸡±500kV直流输电工程、宁夏—山东±660kV直流输电工程等也相继投运,同时配合西部水电的开发,我国又开始兴建并投运了±800kV特高压直流输电系统,如云南—广东、向家坝—上海等工程。我国已投运直流输电工程如表1-1所示。

表 1-1 我国已投运直流输电工程

序号	名称	电压等级(kV)	功率(MW)	长度(km)	投运时间
1	舟山直流输电工程	-100	50	54.1	1987年8月投运
2	葛洲坝—上海直流输电工程	±500	1200	1045	1990年8月双极投运
3	天生桥—广东直流输电工程	±500	1800	980	2001年6月双极投运
4	三峡—常州直流输电工程	±500	3000	861	2003年6月双极投运
5	嵊泗直流输电工程	±50	60	66.2	2003年投运
6	三峡—广东直流输电工程	±500	3000	975	2004年6月双极投运
7	贵州—广东(I)直流输电工程	±500	3000	882	2004年9月双极投运
8	西北—华中联网灵宝背靠背(I)工程	120	360	背靠背	2005年7月投运
9	三峡—上海直流输电工程	±500	3000	1048	2006年12月双极投运
10	贵州—广东(II)直流输电工程	±500	3000	1194	2007年12月双极投运
11	东北—华北联网高岭背靠背(I)工程	±125	2×750	背靠背	2008年11月投运
12	西北—华中联网灵宝背靠背(II)工程	166.7	750	背靠背	2009年12月投运

续表

序号	名称	电压等级 (kV)	功率 (MW)	长度 (km)	投运时间
13	西北—华中（四川）联网宝德直流输电工程	±500	3000	574	2009年12月双极投运
14	荆门—枫泾直流输电工程	±500	3000	970	2010年4月双极投运
15	云南—广东直流输电工程	±800	5000	1935	2010年5月双极投运
16	向家坝—上海直流输电工程	±800	6400	1907	2010年7月双极投运
17	呼伦贝尔—辽宁直流输电工程	±500	3000	913	2010年9月双极投运
18	宁东—山东直流输电工程	±660	4000	1335	2011年2月双极投运
19	格尔木—拉萨直流联网工程	±400	600	1039	2011年10月双极投运
20	中俄联网黑河背靠背工程	±125	750	背靠背	2012年1月投运
21	东北—华北联网高岭背靠背（II）工程	±125	2×750	背靠背	2012年11月投运
22	锦屏—苏南直流输电工程	±800	7200	2094	2012年12月双极投运
23	溪洛渡—广东直流输电工程	±500	2×3200	1251	2013年10月双回 双极投运
24	哈密—郑州直流输电工程	±800	8000	2192	2014年1月双极投运
25	溪洛渡—浙江直流输电工程	±800	8000	1680	2014年7月双极投运

葛洲坝—上海直流输电工程是我国第一个大型直流输电系统，于1989年9月单极投运，1990年8月双极投运。三峡—常州直流输电工程于2003年6月建成投运，是当时世界上电流最大的±500kV远距离直流输电系统。灵宝背靠背工程是我国第一个完全国产化的直流输电工程，首次实现了完全自主设计和自主制造。宁东—山东±660kV直流输电工程是迄今为止世界上单换流器电压最高、容量最大的直流输电系统。而云南—广东直流输电工程和向家坝—上海直流输电工程是世界上首批电压最高的直流输电系统。

相对交流输电系统而言，直流输电系统无论是技术上还是应用上都具有特殊性，同时，由于换流站设备价格远高于一般交流变电站电力设备，因此，在直流输电工程建设中，根据不同的交流输电系统条件和要求，优化直流输电系统设计，提高经济性，降低造价是一个需重点考虑的因素。直流输电系统设计是直流输电工程建设中的一个重要环节。为实现直流输电工程换流站设备成套，需首先根据站址条件、接入交流输电系统条件以及直流输电系统功能要求等，将直流输电系统作为一个整体，进行系统设计，以确定换流站设备的种类、数量、参数和运行接线方式及其控制策略，实现直流输电系统稳态、暂态和动态的整体性能。

第一节 设计范围

系统设计是根据给定的设计条件，在基本的直流输电系统方案的基础上，进行理论计算、仿真分析及试验验证的循环往复的过程。通过不断的验证和优化形成最终的直流

输电系统方案，并制定直流输电系统主设备和控制保护设备的技术规范。

直流输电系统方案主要包括主回路方案及主参数、无功补偿方案及控制策略、谐波及电磁干扰抑制方案、过电压抑制方案、直流控制和保护系统方案、各种稳态和动态运行控制策略及参数、保护定值等。

主回路设计是直流输电系统设计首先要完成的工作，并为直流输电系统的其他设计提供输入条件。主回路设计需根据接入交流输电系统的条件及直流输电系统的性能及功能要求，确定换流站交/直流输电系统的接线方式，制定直流输电系统基本运行控制策略并进行主回路参数计算。

无功补偿及控制设计是根据接入交流输电系统的无功平衡和电压控制的要求，以及换流器的无功消耗特性，制定换流站无功补偿方案和无功控制策略，例如确定交流滤波器无功补偿设备的总容量和分组容量等。

滤波器设计包括交流滤波器设计、直流滤波器设计以及各种高频通信干扰滤波器设计。根据电力系统谐波标准及各种通信干扰标准的要求，确定滤波器方案，并进行滤波器各元件稳态额定值计算，确定滤波器电容器、电感、电阻以及避雷器的稳态额定值，并为滤波器元件暂态定值的设计提供输入条件。

过电压及绝缘配合设计是根据换流站绝缘配合的相关标准和经验，制定换流站避雷器配置的初步方案，并根据主回路设计和其他稳态设计的结果，确定避雷器的额定电压，然后通过暂态过电压和谐振过电压仿真等计算，优化避雷器方案并最终提出换流站主设备的绝缘水平。

滤波器暂态额定值设计是根据各种型式滤波器的过电压分布情况，确定滤波器内的避雷器配置方案，并根据滤波器稳态设计的结果等条件，确定避雷器的额定电压，然后进行暂态仿真计算，确定滤波器内各元件的暂态额定值。

暂态电流评价须计算主回路关键点的故障电流，提出换流站设备的暂态电流要求。

各种动态控制设计是将交/直流输电系统作为一个整体，进行动态性能的仿真研究，优化直流输电系统的各种控制功能和参数。与此同时，进行换流站接入交流输电系统潮流、稳定特性的校核，制定各种附加控制功能，并进行控制参数的优化。

直流控制保护系统设计应对直流控制保护系统的结构进行评价，并重点开展直流保护分区研究和保护定值计算，以获得最佳的安全性、可靠性和可用率。

当直流输电系统的总体技术方案基本确定以后，还需对系统的可用率和可靠性、换流站损耗、换流站可听噪声等进行总体评价，进一步进行设计优化。

作为直流输电系统设计，另外一项重要工作就是在上述研究、设计的基础上制定相关设备或子系统技术规范。这些设备和子系统通常包括：① 晶闸管阀、换流变压器、平波电抗器、开关设备、测量设备、避雷器、滤波器元件、绝缘子、套管等；② 换流站控制保护系统，如换流站运行人员控制系统、直流极控制系统、交/直流站控系统、直流保护系统、暂态故障录波系统、电能量计费系统、直流线路故障定位系统、换流站主时钟系

统以及其他交流保护系统等；③ 换流站辅助设施及材料等。

第二节 设计条件

设计条件包括自然环境和电力系统条件。进行系统设计时，应尽可能取得换流站站址的详细环境资料或数据，以满足制定各种设备规范的需要。例如风速、覆冰、日照、温度、湿度、积污水率、地震裂度、海拔高度、水文地质条件，以及大件运输条件都是在设计中应考虑的问题。由于直流电压具有很强的吸污性，污闪是换流站发生较多的事故，极大地影响了直流输电系统的可靠性和可用率，因此，换流站的污秽条件是进行系统设计时应重点关注的问题之一。

换流站的污秽条件一般用等效的自然积污盐密水平（ESDD， mg/cm^2 ）来表示，对于承受直流电压的设备，应尽可能直接获得直流电压作用下设备外绝缘自然积污数据，无法直接获得上述数据时，可通过测量交流电压作用下设备外绝缘自然积污水平，推算直流电压下的积污水平，但要选择适当的交/直流积污比系数。当直流输电系统运行寿命期内，站址区域环境变化很大时，则需采取预测的方法确定换流站的污秽水平。

由于交流输电系统的强度、交/直流输电系统的运行方式等，都会影响直流输电系统的设计，因此设计前应明确直流输电工程的投产计划，和投产年、设计水平年及远景年的交流输电系统情况，主要包括换流站的接入系统方案以及换流站所在区域电网与主网的联系，包括出线规模、线路参数、与换流站相关的电站装机计划（机组出力、台数、投产年）等。

换流站交流母线稳态电压变化范围对直流输电系统设计有很大的影响，包括额定运行电压、正常连续运行电压范围、极端连续运行电压范围。例如正常运行电压及其范围将影响换流变压器有载调压开关主抽头位置和调压范围，以及并联无功补偿设备的容量等，极端连续运行电压将影响设备的绝缘水平等。

直流输电系统本身对交流输电系统频率的变化并不敏感，但交流输电系统频率的变化范围和时间对滤波器的性能及电容器的额定值有较大影响，因此，在交/直流滤波器的设计中要充分考虑交流系统频率变化，包括换流站母线频率的正常波动范围、事故时的频率变化范围和故障清除后的频率变化范围。换流母线的频率特性在设计中可用频率波动最大值的包络线表示，例如某一电网当系统发生大扰动时，系统频率迅速升至 50.5Hz 或迅速降至 49.0Hz，采取措施后，系统频率在 10min 内恢复至 49.7~50.3Hz，40min 内恢复至 (50 ± 0.2) Hz，系统的频率特性可用图 1-1 表示。

交流输电系统本身的背景（非接入直流输电系统产生的）谐波电压及负序工频电压对滤波器元件额定值的影响很大，而这些电压在不同的系统运行方式下变化很大，因此在设计时应合理选取电压值。换流站交流母线上的实际负序电压为交流输电系统背景负序工频电压同直流引起的负序工频电压的相量和。设计中交流输电系统背景负序工频电

压相对正序工频电压的相角选取，应使在换流站交流母线上的负序工频电压幅值达到最大。

交流输电系统背景谐波电压可通过实际测量后经系统谐波潮流计算得到。使用时 3 次谐波电压应认为全部是正序，其他各次谐波电压可认为是正序、负序或正负序组合，但算术和应相等。设计中交流输电系统背景谐波电压相对于正序工频电压的相角选取，应使在换流站交流母线上的谐波电压幅值达到最大。

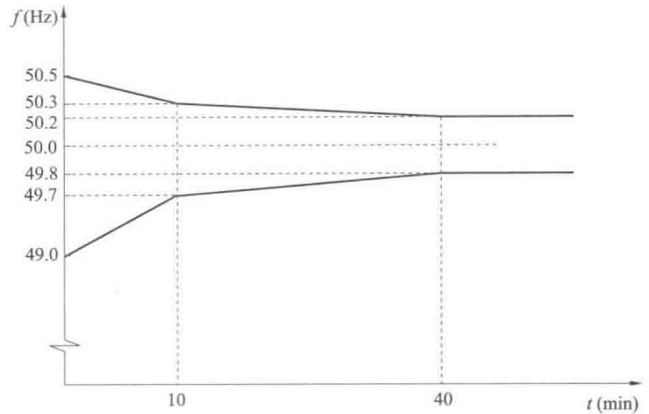


图 1-1 交流输电系统频率特性

换流母线短路电流水平直接影响直流输电系统的短路电流水平、过电压水平以及扰动后直流输电系统的恢复特性。设计时应合理确定和正确使用换流站交流母线短路电流水平，包括单相和三相最大短路电流（容量）、三相最小短路电流（容量），以及系统电抗和电阻的比值。由于交流输电系统的运行方式多种多样，为了获得最优的技术经济设计指标，短路电流最小值计算建议方式为：与直流输电系统输送额定功率或设计规定的其他功率水平相对应的小方式下，考虑对换流站短路电流贡献最大的一回出线检修，同时系统中与换流站相邻节点的一回出线检修。

设计中进行各种故障仿真计算需使用交流输电系统正常和后备（保护）清除故障时间和单相重合闸时序。考虑到直流输电系统应具有一定的适应性，我国电网的故障清除时间一般可按表 1-2 选取。

表 1-2 故障清除时间

项目	电压等级 (kV)	500	330	220
	正常清除故障时间 (ms)		100	100
后备清除故障时间 (ms)		500	500	500

单相重合闸时间一般可按表 1-3 选取。

表 1-3 单相重合闸时间

项目	电压等级 (kV)	500	330	220
	故障开始 (ms)		0	0
切除故障相 (ms)		100	100	120
故障相重合 (ms)		1100	1100	1120
重合不成功跳三相 (ms)		1200	1200	1240

上述故障清除时间及后备保护清除故障的时间用于过电压及绝缘配合等研究, 决定设备的额定值。进行暂态稳定研究时, 根据目前的实际情况, 如果必要, 交流输电系统故障清除时间一般可取 90ms, 如果硬件可做到, 还可适当缩短到 80ms, 后备保护清除故障时间为 300~350ms。

第三节 等值交流输电系统

系统设计是在大量的研究和计算的基础上完成的, 这些研究和计算可以借助数字仿真来进行。数字仿真往往会使用等值的交流输电系统, 例如过电压研究、交流滤波器设计以及直流输电系统动态性能研究等。等值交流输电系统通常只能保留部分系统特性, 因此应对等值系统的适用范围作出明确的界定, 每种等值系统仅用于指定的研究项目。

通常使用的等值网络主要有: ① 用于交/直流联合系统中直流输电系统动态性能仿真研究(简称直流输电系统动态性能仿真研究)的等值系统; ② 用于无功投切及工频过电压研究的等值系统; ③ 用于交/直流联合系统中直流输电系统电磁暂态过程仿真研究(简称直流输电系统电磁暂态过程仿真研究)的等值系统; ④ 用于交流滤波器设计的等值系统。

一、用于直流输电系统动态性能仿真研究的等值系统和模型

直流输电系统动态性能仿真研究用的等值系统通常使用电阻、电抗和电容元件组成的静态等值电路表示。等值电路的谐波阻抗应以等值前全系统 100%的发电机次暂态电抗和 100%的变压器漏抗为基础计算。等值系统的正序阻抗应能正确表示所选定的运行方式下系统的工频阻抗, 等值电路的谐波阻抗应能正确表示从指定的母线观察到的系统谐波阻抗, 包括幅值和相位, 其频率范围为 50~500Hz。

为了保证等值系统与原始网络在选定的换流站附近范围内具有相同或相近的特性, 应对等值系统与原始网络进行有功及无功潮流一致性校核和等值系统内保留节点的电压及短路水平一致性校核, 要求保留范围内各母线短路电流与原网误差不超过 10%, 以及换流站近区交流输电系统故障时, 换流母线动态电压恢复特性与原网基本一致。由于是静态等值, 等值系统将不能真实再现交流输电系统的摇摆过程。

直流输电系统动态性能仿真研究所考虑的运行方式应综合直流输电工程投产年、设计水平年的各种典型运行方式选取等值系统, 应准确描述每个典型方式下保留系统内发电机的开机方式、相关网络接线、直流输送功率水平及保留元件的参数等, 以及等值电压源的电动势及功角、等值系统的互阻支路正序及零序参数等。保留元件的参数具体包括发电机容量及次暂态电抗等参数, 发电机的励磁系统参数, 线路正序、零序参数及线路长度, 变压器参数, 直流输电系统参数及其无功配置组数、容量。

在这种等值模型上进行的直流输电系统动态性能仿真研究通常包括评价直流控制保护的功能和交/直流输电系统在不同控制模式下的总体性能, 例如评价直流侧发生故障(如

换流站闭锁、极闭锁、直流线路故障、阀侧绕组故障等)或交流侧发生严重故障并引起交流母线电压下降及发生畸变时的直流输电系统性能,验证直流输电系统的响应是否符合规定的要求,验证无功补偿大组和小组投切时直流输电系统的暂态响应,研究扰动时直流输电系统和当地发电机组之间的相互作用等。这种等值还可用于交流侧和直流侧操作过电压研究和铁磁谐振研究等。上述等值系统一般不用于交流滤波器研究、工频电压研究、交流输电系统静态电压调节原则验证等。

二、用于无功投切和工频过电压研究的等值系统

无功投切及工频过电压研究可采用等值系统进行。等值时可首先采用网络等值程序得到从各保留母线看进去的戴维南等值阻抗,然后通过比较采用等值系统和全系统的稳定模型计算得到的换流站母线电压变化来验证等值的有效性。换流站交流母线的电压可通过调整电压源的电压得到,但应保持在设计条件规定的极端连续运行电压范围内,其他保留节点的母线电压也应保持在极端连续运行电压范围内。

上述等值系统可用于计算滤波器分组或电容器分组在投切瞬间换流站交流母线的电压变化,以及验证与直流输电系统设计方案相关联的甩负荷过电压。但这类等值系统不适用于确定避雷器等过电压控制设备的热容量,因为静态等值不能再现整个系统的动态摇摆过程,使用等值模型计算 0.2s 或更长过程得到的电压值比使用全系统稳定计算模型得到的结果高得多。

三、用于交流滤波器性能计算的等值阻抗

从交流滤波器母线注入谐波电流进行谐波阻抗扫描,根据扫描结果,2~50 次各次谐波阻抗可采用扇形图或细分的扇形图表示。通常,对于含量较大的低次谐波(10 次以下)及换流器产生的特征谐波,对应的系统等值阻抗推荐用扇形图表示(如图 1-2 所示),其他谐波可用几个或统一的阻抗圆表示(如图 1-3 所示)。

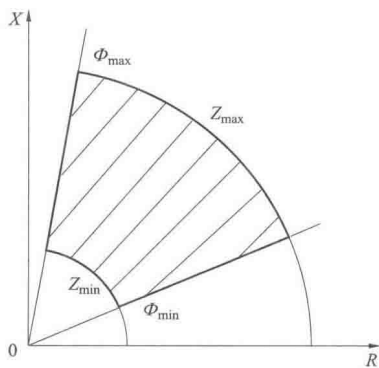


图 1-2 系统谐波阻抗扇形图

Φ —阻抗角; Z —阻抗幅值

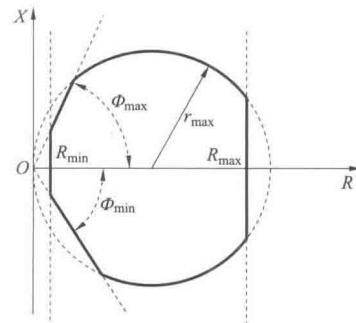


图 1-3 系统谐波阻抗圆形图

Φ —阻抗角; r —阻抗圆半径; R —电阻

第二章 直流输电系统主回路及额定值

第一节 电气主接线

高压直流输电系统主要包括远距离直流输电系统和背靠背直流输电系统两种型式，它们既可以是两端直流输电系统，也可以是多端直流输电系统，但多端直流输电系统的工程实践很少。本书仅介绍两端直流输电系统。远距离两端直流输电系统分为单极直流输电系统和双极直流输电系统。单极直流输电系统包括单极两线制系统（如图 2-1 所示）和单极一线一地制系统（如图 2-2 所示）。单极两线制直流输电系统只需一端有接地点，用低绝缘的导线作为电流 I_d 的回流电路，如北海道一本州（I 期）等工程。单极一线制直流输电系统利用大地或海水作为回流电路，两端都有接地极，如哥特兰岛、岗帝一斯堪、撒丁岛、温哥华岛（I 期）等工程。

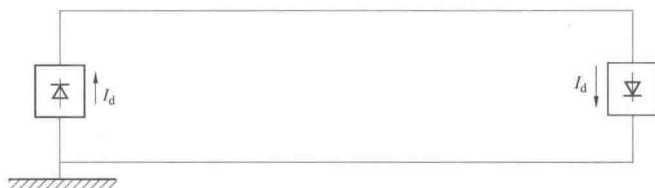


图 2-1 单极两线制直流输电系统



图 2-2 单极一线一地制直流输电系统

双极直流输电系统包括双极两线制系统（如图 2-3 所示）、双极三线制系统（如图 2-4 所示）和双极两线一地制系统（如图 2-5 所示），无特殊说明，以下章节中的双极直流输电系统均指后两种系统。双极两线制系统只需一端有接地点，如英法海峡工程等，这种结构的直流输电系统每极不能独立运行。双极三线制系统是在上述双极两线制系统的基础上再增加一条低绝缘导线作为回流电路，以实现每极的独立运行，如北海道一本州（终期）、温哥华岛（终期）等工程。双极两线一地制系统是将双极三线制直流输电系统的低

压绝缘导线取消，利用大地或海水作为回流电路，两端都有接地极，是目前使用最多，技术经济指标最优的远距离直流输电系统。

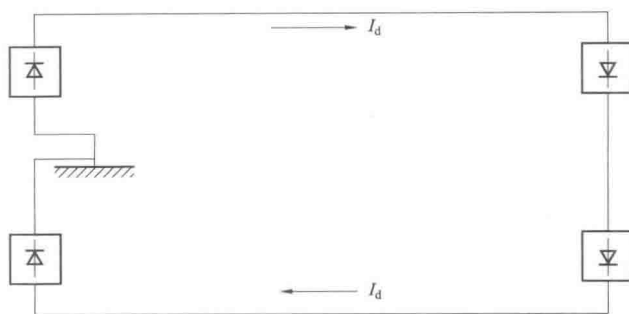


图 2-3 双极两线制直流输电系统

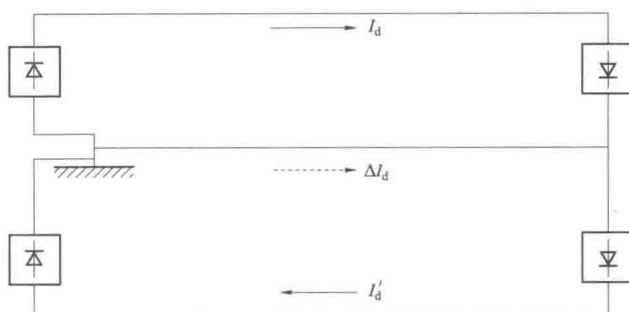


图 2-4 双极三线制直流输电系统

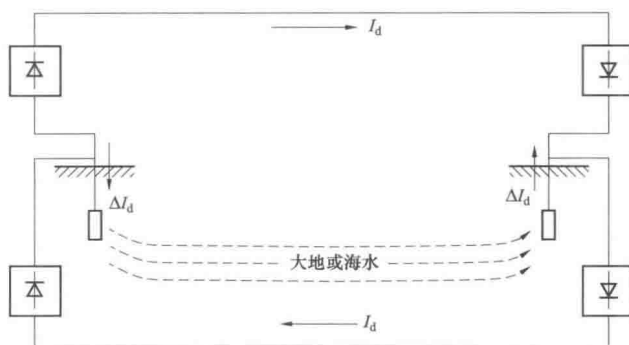


图 2-5 双极两线一地制直流输电系统

对于远距离直流输电系统，其直流电气主接线总是以极为基本单位，而对于背靠背直流输电系统则是以换流单元为基本单位。进行直流电气主接线设计时每极（换流单元）一般优先采用单 12 脉动换流器，如果由于设备制造或运输的限制，或分期建设的需要，可采用多个换流器串联或并联的接线方式。根据目前的直流输电系统规模和设备制造能力，采用 2 个以上换流器串联的系统和同时采用换流器串联和并联的高压直流输电系统不多见，因此本书暂不讨论，这些结构的系统可以根据本书介绍的内容类推得到。

直流电气主接线最基本的要求是实现所规定的各种运行方式。双极两线一地制远距离直