



高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材

高压直流输电系统

李兴源 编著



科学出版社
www.sciencep.com

高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材

高压直流输电系统

李兴源 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统地介绍高压直流输电系统的原理、性能和分析方法。

本书分为两大部分,共 11 章。第一部分是高压直流输电系统的基础,由第 1~6 章组成。第 1 章简要介绍高压直流输电系统概况;第 2 章阐述换流器理论及特性方程;第 3 章描述高压直流输电系统的基本控制原理及其特性;第 4 章介绍高压直流输电系统的谐波及其抑制;第 5 章阐述高压直流输电系统的故障和保护;第 6 章简要介绍多端和多馈入直流输电系统。第二部分是高压直流输电系统的理论分析和应用,由第 7~11 章组成。第 7 章描述高压交直流输电系统的数学模型;第 8 章进行高压交直流系统的潮流分析;第 9 章介绍交流系统和直流系统的交互作用;第 10 章深入讨论高压交直流系统的性能分析和控制;第 11 章较详细地阐述高压交直流输电系统的仿真。

本书可作为高等院校电气工程及其自动化专业高年级本科生和研究生的教材或参考书,也可供电力系统规划、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/李兴源编著.—北京:科学出版社,2010.2
(高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材)

ISBN 978-7-03-026715-3

I .①高… II .①李… III .①高电压-直流-输电-电力系统-高等学校-教材 IV .①TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 019439 号

责任编辑:余江 潘继敏 / 责任校对:赵桂芬
责任印制:张克忠 / 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

*

2010 年 2 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010 年 2 月第一次印刷 印张:15 1/4

印数:1—3 500 字数:305 000

定 价:28.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

光阴荏苒,《高压直流输电系统的运行和控制》(科学出版社,1998)一书出版迄今已10年有余了。当时曾指出“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”。在此期间,高压直流输电系统在我国发展十分迅猛,南方电网已形成大规模交直流互联电网,而且正在发展 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流的骨干网架。云广 $\pm 800\text{kV}$ 直流输电工程的额定输电容量为 5000MW ,该工程在2009年实现单极投运,2010年实现双极投运。金沙江一期工程溪洛渡、向家坝水电站至华中、华东三回 $\pm 800\text{kV}$ 特高压直流输变电工程也在规划和建设之中。我国已成为世界上直流输电线路最多、直流输送容量最大的国家。由此形成的大规模交直流电力系统,其运行的复杂性和难度在国际上是罕见的。由于高压直流输电系统具有十分重要的意义,所以有关的理论和技术研究已经成为近年来的热门课题,并且取得了许多新的进展和成果。但是,还有许多问题有待深入研究。如果说《高压直流输电系统的运行和控制》一书仅是我国高压直流输电系统发展高潮之初的抛砖引玉之作,尚有挂一漏万和许多不足之虞,那么希望本书能结合这些新的进展和成果以及作者近年的教学和科研成果,在高压直流输电系统的理论和方法的系统性及完整性上能有些许的补漏拾遗,对读者有所裨益。

本书分为两大部分,共11章。

第一部分是高压直流输电系统的基础,由第1~6章组成。第1章简要地介绍高压直流输电系统概况、高压直流输电运行特性及其与交流输电的比较、高压直流输电系统的结构和元件;第2章阐述换流器理论及特性方程;第3章描述高压直流输电系统的基本控制原理及其特性;第4章介绍高压直流输电系统的谐波及其抑制;第5章阐述高压直流输电系统的故障和保护;第6章简要介绍多端和多馈入直流输电系统。

第二部分是高压直流输电系统的理论分析和应用,由第7~11章组成。第7章主要描述高压交直流输电系统的数学模型、稳定性研究中高压直流输电系统模型选择的一般原则;第8章详细阐述高压交直流潮流的顺序解法和统一解法;第9章介绍交流系统强弱的评估方法、与弱交流系统相连的直流系统运行相关的问题等;第10章深入讨论有关交直流输电系统的性能分析及其控制方法;第11章较详细地阐述有关高压交直流输电系统仿真的有关理论和方法。

为了使读者更为全面和系统地学习掌握高压直流输电系统的原理、性能和分析方法,本书在《高压直流输电系统的运行和控制》一书的基础上作了较大的改动,并增添了新内容。与此同时,本书主要目的是作为教材使用,为了使全书脉络更为清晰、

系统性更为完整和压缩篇幅,也删除了一些不是非常必要的内容,如换流器触发脉冲控制系统、某些特定的附加控制器、新的高压直流输电系统方案等。

在第一部分中,鉴于高压直流输电系统保护的重要性,对各种保护的原则及其整定要求,如换流器控制的保护、传输线的行波保护、差动保护、过电流保护和其他特殊保护等,进行了改动和充实。

在第二部分中,首先,针对高压直流输电系统理论分析中的重要问题作了较大的改动和重写。高压交直流输电系统的数学模型是理论分析的基础,除了介绍换流器稳态模型之外,还较全面地阐述直流控制器模型、交流和直流网络模型及其接口。其次,实际的高压直流输电系统往往和交流系统相互连接,从而形成交直流系统之间的相互作用,尤其是与弱交流系统连接时,会带来电压不稳定性、暂态不稳定性、动态过电压和谐波不稳定等一系列问题,这些都给高压直流输电系统的分析和研究带来一系列有别于纯粹交流系统的问题和困难。因此,交直流系统的交互作用分析非常重要。此外,随着高压直流输电系统的发展,已形成了多端和多馈入直流系统。为此,增加了多馈入直流系统短路比、多馈入直流系统交互作用因子的介绍,并对换相失败及其预防、谐波不稳定性及其抑制、动态过电压和控制设备等进行了较详细的讨论。再次,高压交直流系统的性能分析和控制是极为关注的问题。因此,在介绍交流系统强弱和交互作用的评估方法、与弱交流系统相连的直流系统运行相关的问题之后,进一步深入讨论有关交直流输电系统的性能分析及其控制方法,如中点接入 HVDC 和 FACTS 的长输电线的功率传输能力,小信号分析方法,换流器的无功功率、电压控制和电压稳定性的分析方法,直流输电引起的次同步振荡及其控制等。最后,由于高压直流输电系统的暂态仿真对于系统的设计和分析起着重要的作用,因此较详细地阐述基于 EMTP/EMTDC 的 HVDC 电磁暂态仿真,并讨论多速率仿真技术、数字控制器与电力电子设备接口的实时仿真的有关理论和方法。

本书荣幸地被选为高等院校电气工程及其自动化专业系列精品教材之一,是在科学出版社的资助下出版的。此外,近 10 多年来,作者主要从事有关高压直流输电系统仿真、分析和控制方面的研究,得到了国家重点基础研究发展计划(973)、国家科技支撑计划、国家自然科学基金、国家电网公司和南方电网公司科技项目的大力资助。值本书出版之际,作者谨在此一并向有关单位表示由衷的感谢!

限于作者理论水平和实践经验有限,本书难免存在不足之处,恳请读者和学术同行不吝赐教。

李兴源

2009 年 8 月于四川大学

目 录

前言

第 1 章 绪论	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	3
1.2.2 可靠性	5
1.2.3 经济性	5
1.3 高压直流输电系统的结构和元件	6
1.3.1 高压直流联络线的分类	6
1.3.2 高压直流输电系统的元件	8
第 2 章 换流器理论及特性方程	10
2.1 阀特性.....	10
2.2 换流器电路分析.....	11
2.2.1 忽略电源电感的分析	13
2.2.2 包括换相叠弧的分析	18
2.3 整流器和逆变器的工作方式.....	22
2.4 交流量和直流量之间的关系.....	25
2.5 换流变压器的额定值.....	27
2.6 多桥换流器.....	27
第 3 章 高压直流输电系统的基本控制原理及其特性	30
3.1 基本控制的原理.....	30
3.1.1 基本控制方程及其选择	30
3.1.2 控制特性.....	32
3.1.3 基本控制原理的概括	38
3.2 控制系统的实现.....	39
3.3 启动、停运和潮流的逆转	40
3.3.1 阀的闭锁和旁路	40
3.3.2 启动、停运和潮流的逆转原理	41
第 4 章 高压直流输电系统的谐波及其抑制	43
4.1 高压直流输电系统的谐波.....	43
4.1.1 换流站交流侧特征谐波	43
4.1.2 换流站直流侧特征谐波	45

4.1.3	非特征谐波	45
4.2	谐波抑制装置的选择	46
4.2.1	滤波装置	46
4.2.2	平波电抗器	47
4.3	交流滤波器设计	48
4.3.1	设计的一般考虑	48
4.3.2	各种滤波器的设计	52
4.4	直流侧滤波器设计	56
第 5 章	高压直流输电系统的故障和保护	58
5.1	换流器的异常运行	58
5.1.1	失通、误通	58
5.1.2	换相失败	58
5.1.3	整流站内部短路	59
5.2	交流和直流系统故障的响应	60
5.2.1	直流线路故障	60
5.2.2	换流器故障	61
5.2.3	交流系统故障	61
5.3	高压直流输电系统主要保护的配置	63
5.3.1	故障及其影响	63
5.3.2	保护的原则	64
5.3.3	换流器控制的保护功能	65
5.3.4	传输线的行波保护	66
5.3.5	差动保护	66
5.3.6	过电流保护	68
5.3.7	其他特殊保护	68
5.3.8	装置保护	70
第 6 章	多端和多馈入直流输电系统	72
6.1	多端直流输电系统的结构和控制特性	73
6.1.1	多端直流网络的结构	73
6.1.2	基本控制特性	75
6.2	多端直流控制系统的组成	77
6.2.1	主控制	77
6.2.2	极控制	79
6.3	多馈入直流输电系统	80
6.3.1	多馈入直流输电系统的分类	80
6.3.2	多馈入直流输电系统的相关问题	82
第 7 章	高压交直流输电系统的数学模型	84
7.1	高压直流输电系统的元件模型	84

7.1.1	换流器的稳态模型	84
7.1.2	直流控制器的模型	85
7.1.3	直流网络的模型	87
7.1.4	交流网络的模型	88
7.1.5	交直流系统的接口	89
7.2	高压直流输电系统的线性状态空间模型	90
7.2.1	概述	90
7.2.2	直流网络和换流器模型	91
7.2.3	控制模型	92
7.3	稳定性研究中高压直流输电系统模型选择的一般原则	93
7.3.1	直流系统模型	93
7.3.2	建模细节选择的导则	95
第 8 章	高压交直流系统的潮流分析	97
8.1	交直流潮流问题和直流标么系统	98
8.1.1	交直流潮流问题的数学描述	98
8.1.2	直流系统标么方程	99
8.2	交直流潮流的顺序解法	99
8.2.1	换流器的稳态方程	99
8.2.2	在高压侧母线处交流和直流接口	100
8.2.3	在低压侧母线处交流和直流接口	103
8.2.4	计及换流站的损耗	105
8.3	交直流潮流的统一解法	105
8.3.1	交直流潮流	106
8.3.2	消除变量法	108
第 9 章	交流系统和直流系统的交互作用	116
9.1	交流系统强弱和交互作用的评估	116
9.1.1	短路比和有效短路比	116
9.1.2	多馈入交互作用因子	119
9.1.3	有效惯性常数	119
9.1.4	无功功率和交流系统的强度	120
9.2	与弱交流系统相关的问题及其分析	120
9.2.1	与弱交流系统相连的直流系统运行相关的问题	120
9.2.2	与弱交流系统相关问题的解决方案	122
9.3	换相失败及其预防	122
9.3.1	换相失败的机理	122
9.3.2	影响换相失败的因素	124
9.3.3	换相失败的预防控制	125
9.4	谐波不稳定性及其抑制	126

9.4.1	谐波不稳定性的机理	126
9.4.2	谐波不稳定的研究方法	128
9.4.3	谐波不稳定的抑制方法	129
9.5	动态过电压和控制设备	133
9.5.1	动态过电压判据	133
9.5.2	试验系统及其电压控制设备	134
9.5.3	电压控制和故障恢复性能的比较	136
第 10 章	高压交直流系统的性能分析和控制	138
10.1	中点接入 HVDC 和 FACTS 的长输电线的功率传输能力	138
10.1.1	简化模型分析	138
10.1.2	长输电线传输能力	139
10.1.3	换流变压器的影响	140
10.1.4	数字仿真测试	141
10.2	直流系统对功率振荡的阻尼作用	141
10.2.1	HVDC 联络线接于交流联络线中间的系统	141
10.2.2	交、直流联络线并行系统	147
10.2.3	高压直流系统约束的影响	148
10.3	交直流相互作用的小信号分析	151
10.3.1	交直流系统的小信号模型	151
10.3.2	交直流相互作用的分析	156
10.4	换流器的无功功率和电压控制	160
10.4.1	换流器常规控制下的无功功率需求	160
10.4.2	直流换流器的 $P-Q$ 图	161
10.4.3	直流换流器用于电压控制	163
10.4.4	用直流换流器和 SVC 进行电压控制的比较	164
10.4.5	无功功率调节的实例	165
10.5	基于电压稳定因子的电压稳定性分析	167
10.5.1	暂态电压稳定性的概念	167
10.5.2	电压稳定性因子	168
10.5.3	VSF 和 P_n-L_n 曲线之间的关系	170
10.5.4	控制引起的电压振荡	170
10.5.5	暂态交流电压现象的小结	171
10.6	电压稳定性的特征值分析	171
10.6.1	特征值分析方法	171
10.6.2	多馈入 HVDC 系统的电压稳定分析	173
10.7	扭矩相互作用和次同步振荡	177
10.7.1	概述	177
10.7.2	机组作用系数法	181

10.7.3	时域和频域相结合的次同步振荡分析	182
10.7.4	基于 Prony 辨识的次同步振荡分析和控制	184
第 11 章	高压交直流输电系统的仿真	190
11.1	概述	190
11.2	高压直流输电系统的电磁暂态仿真	193
11.2.1	EMTP 和换流器模块	193
11.2.2	网络模型和解法的选择	195
11.2.3	换流器模块的仿真方法	198
11.3	多速率仿真技术	202
11.3.1	概述	202
11.3.2	单速率积分	202
11.3.3	多速率方法	204
11.3.4	系统分割	207
11.3.5	算例研究	208
11.4	数字控制器与电力电子设备接口的实时仿真	209
11.4.1	问题的描述	210
11.4.2	实时数字仿真器与数字控制器的接口	212
11.4.3	算例研究	214
参考文献	218
附录	用于高压直流系统控制研究的标准模型	226
A.1	第一个 CIGRE HVDC 标准模型	226
A.2	修改的 CIGRE HVDC 标准模型	229

第 1 章 绪 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,首次将 HVDC 输电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 1972 年建立的依尔河系统,它是连接加拿大新不伦瑞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,且可靠性得到了提高。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,多端和多馈入直流输电技术也已取得运行经验^[1~11]。近年来,高压直流输电工程发展更为迅速,不仅是新建电网多采用直流输电,大区电网间也多采用直流隔离。在 1975 年,全世界投入运行的直流工程只有 11 项,输电容量为 5GW。而根据初步统计,截至 2003 年,国外投入运行的高压直流输电系统有 70 个,输电容量达到 53281MW,直流输电线路/电缆 19399km,其中背靠背工程有 28 个。代表性的工程有:巴西依泰普直流工程,额定电压 $\pm 600\text{kV}$,额定容量 $2\times 3150\text{MW}$,输电线路 796km(I 回 1986 年,II 回 1987 年);扎伊尔 Inga-Shaba 工程,输电线路 1700km, $\pm 500\text{kV}$,560MW(1982 年);印度 Chandrapur-Ramagundum 等 3 个背靠背直流工程,额定电压 $2\times 205\text{kV}$,额定容量 1000MW(分别为 1997 年、1998 年和 2002 年);魁北克-新英格兰多端(五端)直流工程,额定电压 $\pm 450\text{kV}$,额定容量 2250MW,输电线路 1507km(分别为 1986 年、1990 年、1992 年);英法海峡工程,两回海底电缆 72km,额定电压 $\pm 270\text{kV}$,输送容量 2000MW(1986 年)。

我国高压直流输电工程起步较晚,但发展非常迅速。舟山直流输电工程是我国全部靠自己力量建设的第一项直流输电工程,第一期为单极金属回线方式, -100kV ,500A,50MW,线路全长 54km,1989 年正式投入运行,工程最终规模为 $\pm 100\text{kV}$,500A,100MW。嵊泗直流输电工程(上海-嵊泗岛)是我国自行设计、制造、建设的两极海底电缆直流工程,工程为两极 $\pm 50\text{kV}$,600A,60MW,可双向供电,线路全长 66.2km,其中海底电缆 59.7km,2002 年全部建成。葛南(葛洲坝-上海南桥)高压直流输电系统是我国引进的第一个高压直流输电工程,1989 年单极、1990 年

双极投入运行,采用±500kV 双极联络线,额定容量 1200MW,输电距离 1080km。天生桥-广州直流输电线路全长 980km,额定输送容量 1800MW,额定电流 1800A,采用±500kV、12 脉波双极双桥,该直流输电工程双极于 2001 年 6 月投入运行。贵广 I 直流线路总长 936km,额定电压为±500kV,额定电流 3000A,额定容量 2700MW,于 2004 年 7 月双极投入运行。贵广 II 直流线路总长 1210km,额定电压±500kV,额定电流 3000A,额定输送容量 2700MW。三峡-广州、三峡-华东±500kV 直流输电工程也已投入运行。此外,为了适应我国经济的迅速增长和对电力的需求,正在发展特高压 1000kV 交流和±800kV 直流的骨干网架。云广±800kV 直流输电工程的额定输电容量 5000MW,在 2009 年实现单极投运,在 2010 年实现双极投运。金沙江一期工程溪洛渡、向家坝水电站至华中、华东三回±800kV 直流输变电工程也在规划和建设之中。电网的发展和火区之间联网已成为电网发展规划中的热门课题,采用交、直流混合输电已成为必然趋势^[12]。

以下是已采用的高压直流输电的类型:

(1) 超过 30km 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连接。由于交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连接。另外,两大系统逐渐发展需要互联,它们虽有相同的频率,有时却不同期,采用直流互联也是常用手段。这两种情况在美国最多见,其他地区(印度、日本、欧洲等)也有采用。

(3) 大容量远距离架空线输电。当距离超过 800km 时,用高压直流输电替代交流输电,极具竞争力。美国 BPA 系统、加拿大纳尔孙河输电系统及我国的葛上直流工程、天广直流工程和贵广直流工程等均属此类型。

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 设计的正确设计是整个交、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

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,通常需采取串补、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,无须考虑稳定问题,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,其消除过程一般为 $0.4\sim 0.8s$,加上重合闸时间, $0.6\sim 1s$ 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为 $0.2\sim 0.35s$ 。

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。直流线路则可用降压方式来进行第二、第三次再启动,创造线路消除故障、恢复正常运行的条件。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 2h 过负荷能力、10s 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。美国著名的 BPA 500kV 交直流并列运行线路,Ⅱ回长 1521km 交流线路共送 2860MW,平均Ⅰ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

按相同电压 500kV 考虑,一条 500kV 直流输电线路的走廊约为 40m,一条 500kV 交流线路走廊约为 50m,但是一条相同电压的直流线路输送容量约为交流线路的两倍,其传输效率约为交流线路的两倍甚至更多一点。

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;
- (5) 控制复杂。

近年来,直流技术有了明显的进步,除了上述的第二条外,其余缺点都可以克服。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) 光触发晶闸管;
- (4) 换流器采用 12 或 24 脉波运行;
- (5) 采用氧化金属变阻器;
- (6) 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且降低了换流站的费用。控制的复杂性已不成为问题,实际上已用来对正常和非正常运行提供可靠且快速的控制。此外,还

可以用控制将两端直联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、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 1.2.1 所示。

表 1.2.1 交、直流工程的综合强迫停运率

名称	交流		直流	
	单回	双回	单极	双极
线路(次/(10 ² km·年))	0.299	0.054	0.126	0.055
两端变电(换流)站/(次/年)	0.560	0.120	4.80	0.20

2) 电能不可用率

表 1.2.2 列出了 ABB 公司提供的交、直流输电线的电能不可用率的比较。

表 1.2.2 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,其投资也随即固定下来,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所占比重很大,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变电站,而直流输电线路的造价则明显低于交流输电线路。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。对于超高压输电系统,典型架空线路的等价距离约为 800km。尽管地下电缆或是海底电缆的造价比架空线路高了一个数量级,但其等价距离却只有 50km。

1.3 高压直流输电系统的结构和元件

1.3.1 高压直联络线的分类

高压直联络线大致可分以下几类:

- (1) 单极 HVDC 联络线;
- (2) 双极 HVDC 联络线;
- (3) 同极 HVDC 联络线。

单极 HVDC 联络线的基本结构如图 1.3.1 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。

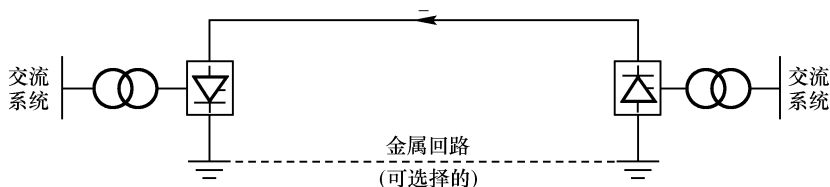


图 1.3.1 单极 HVDC 联络线

双极 HVDC 联络线的基本结构如图 1.3.2 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,则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。

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。在正常情况下,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。

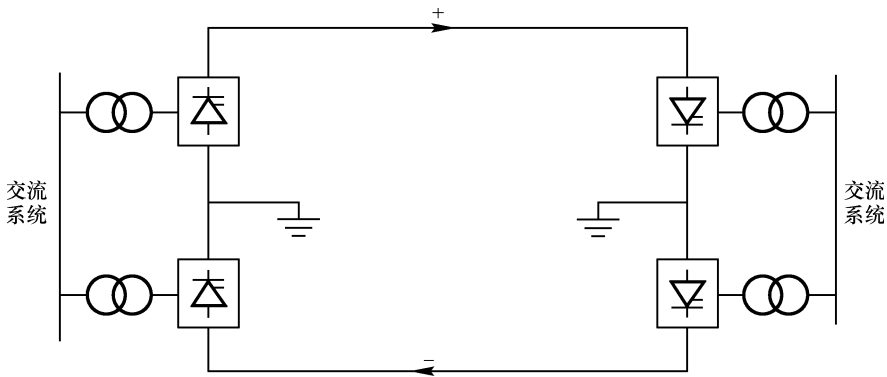


图 1.3.2 双极 HVDC 联络线

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,通常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 HVDC 联络线的基本结构如图 1.3.3 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。

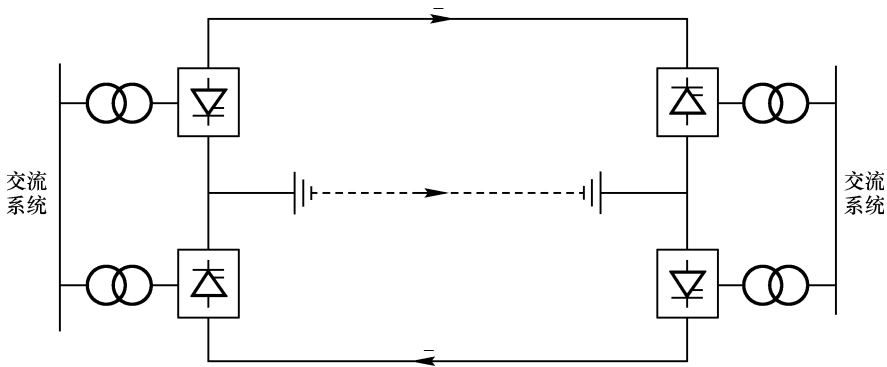


图 1.3.3 同极 HVDC 联络线

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(用于非同步连接)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。

将直流系统连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。

如果两个以上的直流系统接到一个共同的交流系统上,并且直流系统之间的交流阻抗较小,就构成了多馈入直流系统。

1.3.2 高压直流输电系统的元件

以双极系统为例,HVDC 系统的主要元件如图 1.3.4 所示。其他结构的元件与该图所示的结构基本类同。下面简述各元件。

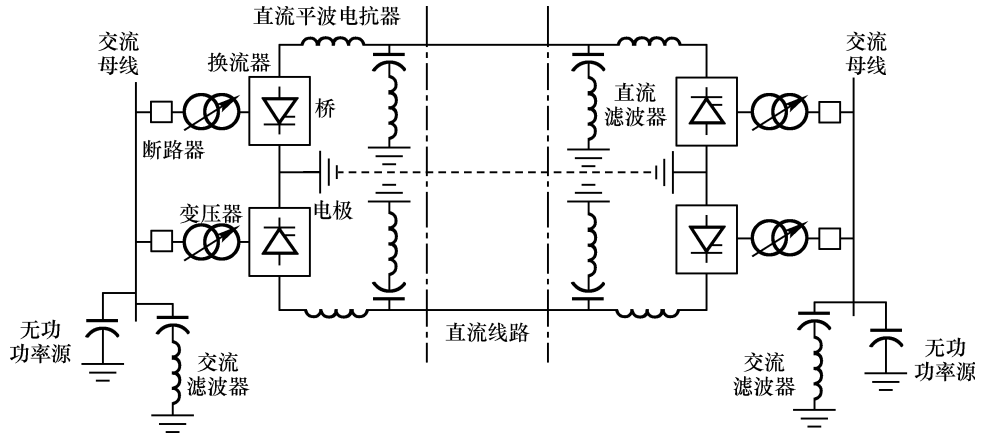


图 1.3.4 双极 HVDC 系统的主要元件

1) 换流器

它们完成交-直流和直-交流的转换,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。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,并且干扰运动通信系统。因此,在交流侧和直流侧都装有滤波装置。

4) 无功功率补偿

直流换流器内部要吸收无功功率。在稳态条件下,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 2 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。

这一章描述实际换流电路的结构和运行情况。另外,还将建立换流器等值电路、直流量和基频交流量的联系方程^[5,6]。

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。额定电流等级为 1000~2000A,额定反向峰值电压为 50~150kV。汞弧阀的缺点是体积大,有逆向导通的可能。

从 20 世纪 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 2500~3000A 和 3~5kV。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;油冷却,油绝缘;水冷却,空气绝缘;氟利昂(二氯二氟甲烷)冷却,六氟化硫(SF₆)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 2.1.1(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 2.1.1(b)所示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 2.1.1(b)所示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。

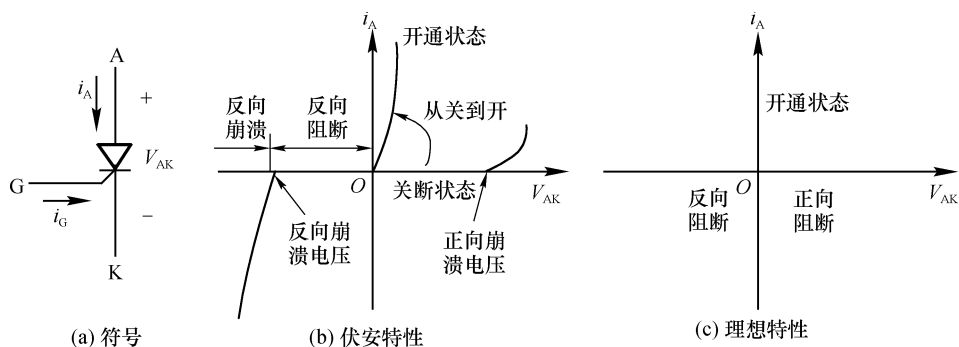


图 2.1.1 晶闸管

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,如图 2.1.1(b)所示。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有效值和平均值来规定电流额定值。

在分析换流器时,可以用如图 2.1.1(c)所示的理想特性来表示晶闸管。

在选用组成换流器的晶闸管元件时,一般要求各元件具有下列性能,即耐压强度高,过流能力强,开通、关闭时间短,并尽量一致,正向压降小,剩余载流子电荷差值小,有承受较大的导通电流变化率(di/dt)和关断电压变化率(dv/dt)的能力等。但是,由于制造工艺上的原因,这些要求不能同时满足。为此,要根据使用情况、制造能力等条件,有重点地进行选择。

多个晶闸管元件串联连接时,由于各元件的特性不一致,造成晶闸管间电压分布不均匀,因此需要加装均压装置来限制其不均匀程度。另外,晶闸管换相时,电压发生突变;由于阀的杂散电容和回路电感等的存在而产生振荡。为了抑制这个振荡过电压需要设置阻尼装置。这些均压、阻尼装置大都是由统一的 RLC 网络构成。应当指出的是,如果使用统一的 RLC 网络,则在选择网络参数时,需要同时满足均压参数与振荡阻尼两方面的要求,做到统筹兼顾,合理配置。

2.2 换流器电路分析

高压直流换流器的基本模块是三相全波桥式电路,如图 2.2.1 所示,该电路又称为格雷兹(Graetz)桥。尽管换流器电路存在几种可供选择的结构,但是由于格雷兹电路能够更好地利用换流变压器,并且当其截止时阀上反向峰值电压较低,所以该电路得到了广泛运用。

换流变压器的交流侧配有有载调压分接头。变压器的交流侧绕组通常采用星形接地(Y_0)连接,阀侧绕组通常采用三角形(Δ)或星形(Y)连接。

为便于分析,先做以下假设:

- (1) 含有换流变压器的交流系统可表示为一个电压和频率恒定的理想电压源与

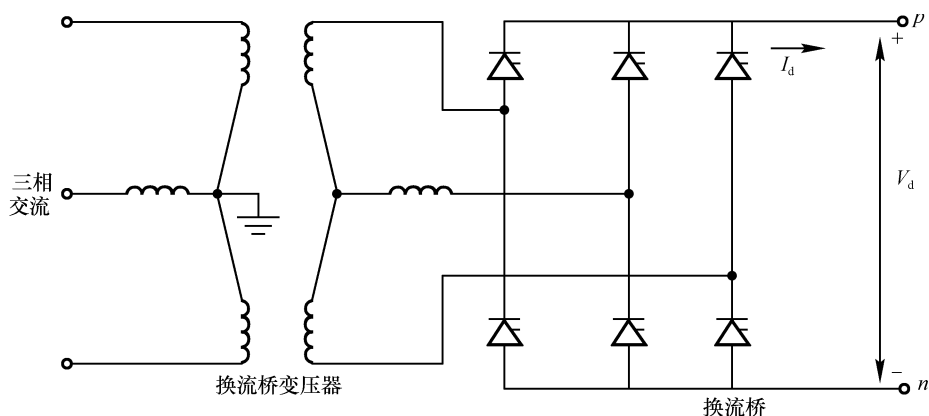


图 2.2.1 三相全波桥式电路

一个无损电感(主要代表变压器的漏电感)串联;

(2) 直流电流(I_d)保持恒定且无纹波,这是因为在直流侧采用了一个较大的平波电抗器(L_d);

(3) 阀具有理想的开关特性,导通时呈零电阻,截止时呈无穷大电阻。

基于上述假设,如图 2.2.1 所示的桥式换流电路可表示为如图 2.2.2 所示的等效电路。

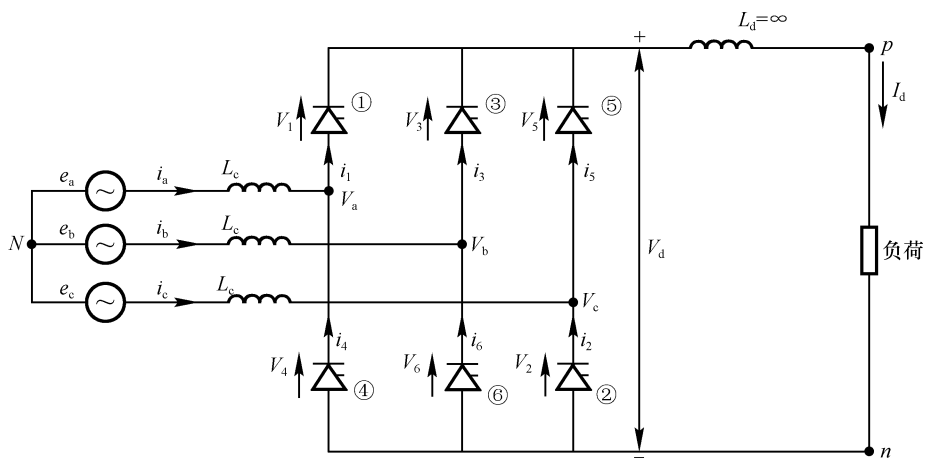


图 2.2.2 三相全波桥式换流器等效电路

注:图中各阀接触发顺序编号

令电源瞬时电压为

$$\begin{aligned}
 e_a &= E_m \cos(\omega t + 60^\circ) \\
 e_b &= E_m \cos(\omega t - 60^\circ) \\
 e_c &= E_m \cos(\omega t - 180^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{2.2.1}$$

则线电压为

$$\begin{aligned}
 e_{ac} &= e_a - e_c = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t + 30^\circ) \\
 e_{ba} &= e_b - e_a = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t - 90^\circ) \\
 e_{cb} &= e_c - e_b = \sqrt{3} E_m \cos(\omega t + 150^\circ)
 \end{aligned}
 \tag{2.2.2}$$

如图 2.2.3(a)所示的波形为对应于式(2.2.1)和式(2.2.2)的电压波形图。

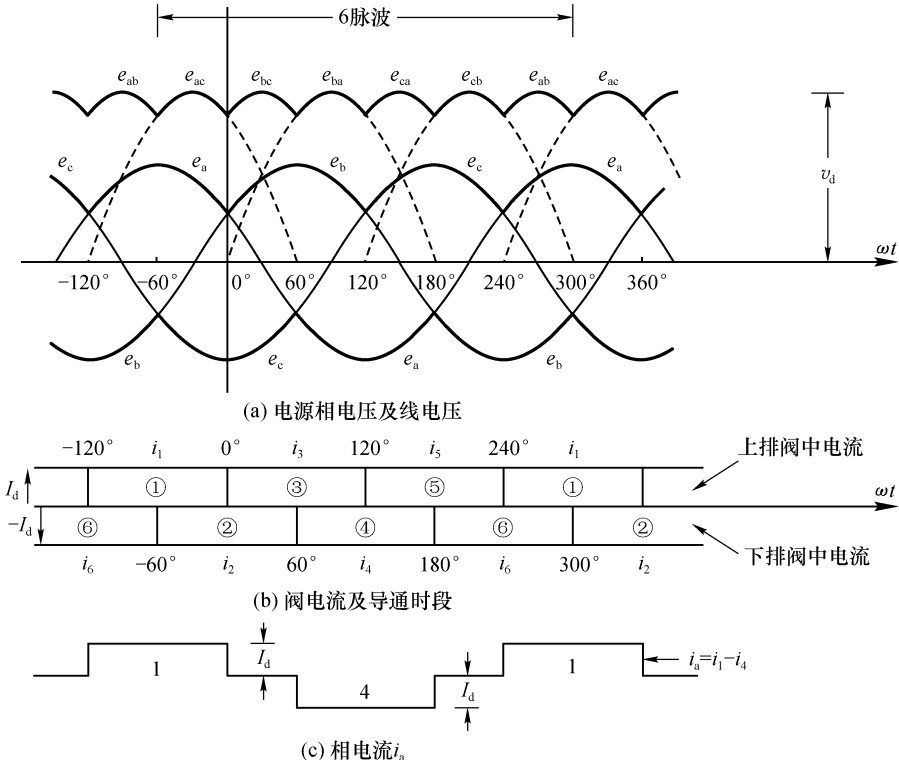


图 2.2.3 桥式电路(图 2.2.2)中的电压及电流波形

为简化分析和便于理解桥式整流器的工作原理,首先考虑忽略电源电感(即 $L_s = 0$),且无触发滞后的情况。对换流器的性能有了基本了解后,再考虑由阀的门极所控制的触发延迟的影响,继而加入电源电感的影响进行分析。

2.2.1 忽略电源电感的分析

1. 无触发延迟

1) 波形分析

在图 2.2.2 中,上面一排阀 1、3、5 的阴极连接在一起。因此,当 a 相的相电压高于其余两相的相电压时,阀 1 导通,于是这三个阀的阴极的共同电位就等于阀 1 的阳极电位。阀 3 和阀 5 的阴极电位高于其阳极电位,故不能导通。

下面一排阀 2、4 和 6 的阳极连接在一起。因此,当 c 相电压低于其余两相电压时,阀 2 导通。

从图 2.2.3(a)所示的波形中可看出,当 $-120^\circ < \omega t < 0^\circ$ 时, e_a 大于 e_b 和 e_c , 阀 1 导通;当 $-60^\circ < \omega t < 60^\circ$ 时, e_c 小于 e_a 和 e_b , 阀 2 导通。图 2.2.3(b)表明了各阀的导通时段及阀中电流的幅值和持续时间。由于已假定直流电流 I_d 保持恒定,所以导通时段中电流等于 I_d ,而截止时阀中电流为零。

现在来考察 $0^\circ < \omega t < 120^\circ$ 时的情况。在 $\omega t=0$ 的前一时刻, 阀 1 和 阀 2 处于导通状态。在 $\omega t=0$ 时刻之后, e_a 超过 e_c , 阀 3 触发导通。而此时阀 1 的阴极电位已高于阳极电位,故阀 1 截止。在 $0^\circ < \omega t < 60^\circ$ 时, 阀 2 和 阀 3 导通。当 $\omega t=60^\circ$ 时, e_c 将小于 e_b ,引起阀 4 导通, 阀 2 截止。

当 $\omega t=120^\circ$ 时, $e_a > e_b$, 阀 5 导通, 阀 3 截止。与此类似,当 $\omega t=180^\circ$ 时,下面一排(共阳极组)从阀 4 到 阀 6 依次触发导通。当 $\omega t=240^\circ$ 时,上排(共阴极组)从阀 5 到 阀 1 依次导通。至此完成了一个周期,此后将重复上述过程。

阀的触发顺序如图 2.2.4 所示,该图仅表示出一个周期的 6 个不同时段中处于导通状态的阀。

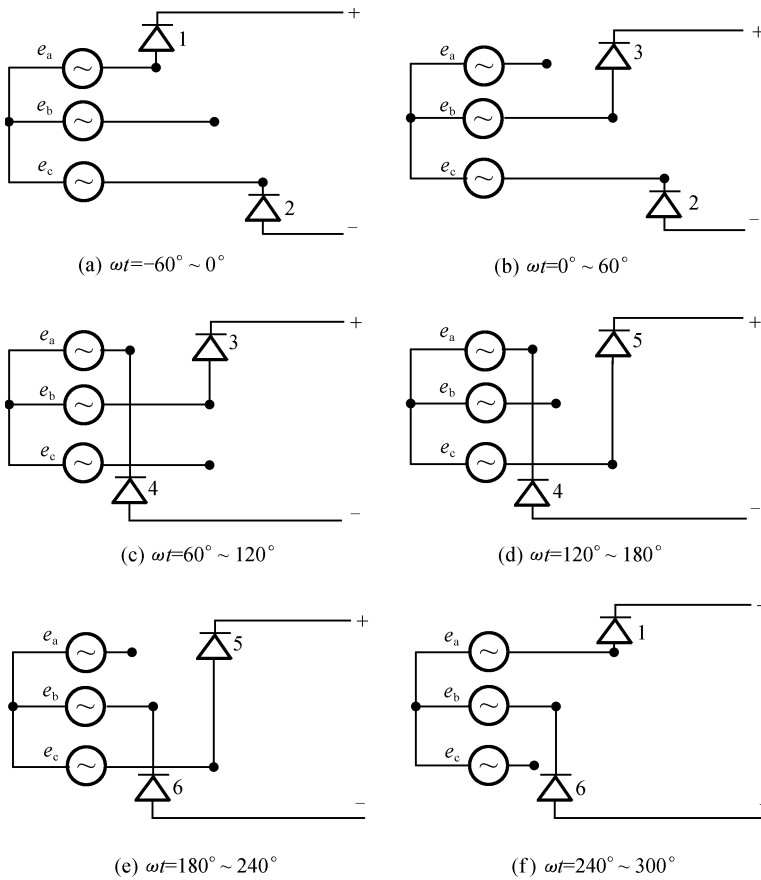


图 2.2.4 无触发延迟且无叠弧时阀的开关顺序

每个阀的导通角均为 120° 。当其导通时, 阀电流的幅值为 I_d , 上排阀中流通的电流为正, 而下排阀中电流为负(或称为返回电流)。

交流电源各相电流由与该相相连的两个阀中的电流合成。例如, a 相电流为 $i_a - i_c$, 如图 2.2.3(c) 所示。该电流表示图 2.2.1 中换流变压器的副边绕组电流。

电流从一个阀转移到同一组中另一个阀, 称为换相。在上述分析中, 假定忽略了电源电感 L_c , 所以换相是瞬时完成的, 也就是说没有叠弧现象。因此, 在任一时刻, 最多只有两个阀导通(一个共阴极阀和一个共阳极阀)。

从图 2.2.3(a) 中可看出, 交流电压的每个周期中 V_d 有 6 个脉波。因此, 如图 2.2.1 所示的桥式电路又称为 6 脉波桥式电路。

2) 平均直流电压

桥两端(共阴极阀的阴极和共阳极阀的阳极之间)的瞬时直流电压由线电压的 60° 时段组成。因此, 平均直流电压可由任一 60° 时段的瞬时电压积分求得。

将 ωt 表示为 θ , 考虑时段 $-60^\circ \leq \omega t \leq 0^\circ$, 则无触发延迟时平均直流电压为

$$V_{d0} = \frac{3}{\pi} \int_{-60^\circ}^0 e_{ac} d\theta$$

将式(2.2.2)中的 e_{ac} 代入上式, 得

$$\begin{aligned} V_{d0} &= \frac{3}{\pi} \int_{-60^\circ}^0 \sqrt{3} E_m \cos(\theta + 30^\circ) d\theta = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m \sin(\theta + 30^\circ) \Big|_{-60^\circ}^0 \\ &= \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m 2\sin 30^\circ = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m = 1.65 E_m \end{aligned} \quad (2.2.3a)$$

式中, E_m 为相电压峰值。

用相电压的有效值(E_{LN})和线电压有效值(E_{LL})来表示, 则 V_{d0} 为

$$V_{d0} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{LN} = 2.34 E_{LN} \quad (2.2.3b)$$

$$= \frac{3\sqrt{2}}{\pi} E_{LL} = 1.35 E_{LL} \quad (2.2.3c)$$

式中, V_{d0} 称为理想空载直流电压。

2. 有触发延迟

1) 波形分析

控制栅极或门极可延迟阀的触发, 用 α 表示触发延迟角, 它对应于延迟时间 α/ω 秒。

当有触发延迟时, 阀 3 在 $\omega t = \alpha$ (而不是 $\omega t = 0$) 时触发, 阀 4 在 $\omega t = \alpha + 60^\circ$ 时触发, 阀 5 在 $\omega t = \alpha + 120^\circ$ 时触发, 其余依次类推, 如图 2.2.5 所示。

触发延迟角限制在 180° 以内。如果 α 超过 180° , 阀将触发失败。例如, 考虑阀 3 的触发。当 $\alpha = 0$ 时, 阀 3 在 $\omega t = 0$ 时触发, 该触发可延迟到 $\omega t = 180^\circ$ 。超过 180° 时, e_a 不再大于 e_c , 因而阀 3 将无法触发导通。

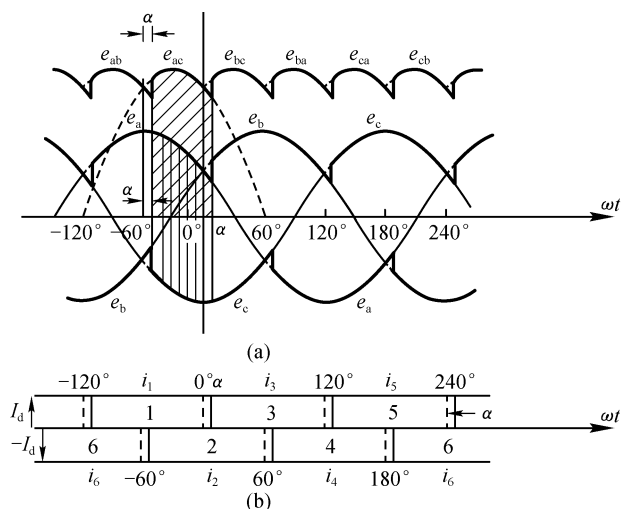


图 2.2.5 有触发延迟时电压的波形和阀电流

2) 平均直流电压

参见图 2.2.5, 当延迟角为 α 时, 平均直流电压为

$$\begin{aligned}
 V_d &= \frac{3}{\pi} \int_{-(60^\circ-\alpha)}^{\alpha} e_{ac} d\theta = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha-60^\circ}^{\alpha} \sqrt{3} E_m \cos(\theta + 30^\circ) d\theta \\
 &= V_{d0} \int_{\alpha-60^\circ}^{\alpha} \cos(\theta + 30^\circ) d\theta = V_{d0} \sin(\theta + 30^\circ) \Big|_{\alpha-60^\circ}^{\alpha} \\
 &= V_{d0} [\sin(\alpha + 30^\circ) - \sin(\alpha - 30^\circ)] \\
 &= V_{d0} (2\sin 30^\circ) \cos \alpha = V_{d0} \cos \alpha
 \end{aligned} \tag{2.2.4}$$

可见, 触发延迟的影响是使平均直流电压减小 $\cos \alpha$ 倍。

由于 α 的范围为 $0^\circ \sim 180^\circ$, $\cos \alpha$ 的范围为 $+1 \sim -1$ 。因此, V_d 在 $+V_{d0} \sim -V_{d0}$ 之间变化。如本章后面所述, 负的 V_d 表示与整流相反的逆变状态。

3) 电流与相角的关系

当触发延迟角 α 增大时, 供电相中交流电压和交流电流之间的相移也会改变。a 相的变化情况如图 2.2.6 所示。如图 2.2.3(c) 所示, a 相电流波形由阀 1 和阀 4 中的方波电流合成。

根据假设可知, 直流电流是恒定的(图 2.2.2 中的 L_d 阻止了 I_d 的变化)。由于每个阀导通 120° , 交流线电流就变成幅值为 I_d 、宽度为 120° 或 $2\pi/3$ 弧度的方波。假定无叠弧, 则交流线电流的波形与 α 无关, 只有相移随 α 而变化。

对如图 2.2.7 所示的电流波形进行傅里叶级数分析, 可以确定交流线电流的基频分量。

交流线电流的基频分量峰值为

$$I_{LM} = \frac{2}{\pi} \int_{-\pi/3}^{\pi/3} I_d \cos x dx = \frac{2}{\pi} I_d \sin x dx \Big|_{-\pi/3}^{\pi/3}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{2}{\pi} I_d [\sin 60^\circ - \sin(-60^\circ)] \\
 &= \frac{2}{\pi} \sqrt{3} I_d = 1.11 I_d \qquad (2.2.5a)
 \end{aligned}$$

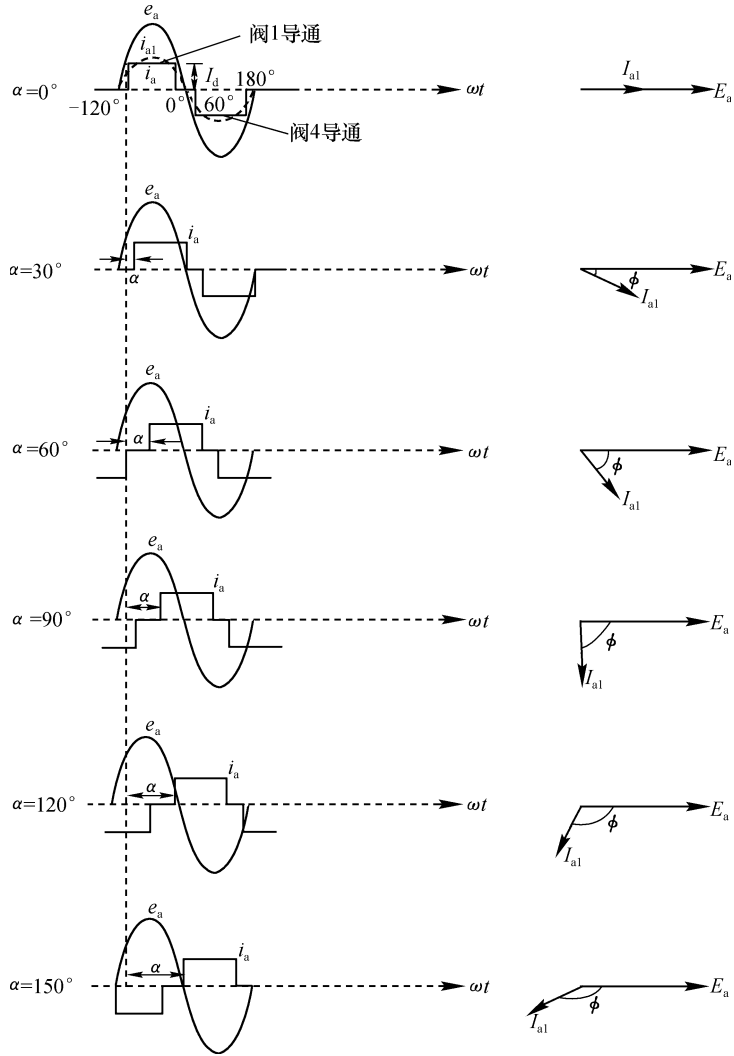


图 2.2.6 a 相电压和电流的相位随延迟角的变化
 e_a —a 相电压; E_a —电压相量; i_a —a 相线电流; I_{a1} —基频电流相量

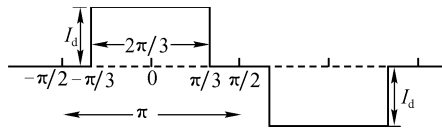


图 2.2.7 线电流波形

交流线电流基频分量的有效值为

$$I_{L1} = \frac{I_{LM}}{\sqrt{2}} = \frac{2\sqrt{3}}{\pi\sqrt{2}} I_d = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d = 0.78 I_d \quad (2.2.5b)$$

忽略换流器的损耗,交流功率一定等于直流功率。因此,

$$3E_{LN} I_{L1} \cos\phi = V_d I_d = (V_{d0} \cos\alpha) I_d$$

式中, E_{LN} 为相电压有效值; ϕ 为基频线电流滞后于电源相电压的角度(如图 2.2.6 所示)。

将式(2.2.3b)中的 V_{d0} 以及式(2.2.5b)中的 I_{L1} 代入上式,得

$$\left[3E_{LN} \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_d \right] \cos\phi = \left[\frac{3\sqrt{6}}{\pi} E_{LN} I_d \right] \cos\alpha$$

因此,基波的功率因数为

$$\cos\phi = \cos\alpha \quad (2.2.6)$$

这样,换流器就可以作为将交流转换为直流(或将直流转换为交流)的设备运行,使得电流的比值是固定的,而电压的比值随触发角的改变而变化,触发延迟可由栅极或门极控制。

触发延迟角 α 使电流波形及其基频分量移动一个角度 $\phi = \alpha$, 如图 2.2.6 所示。当 $\alpha = 0^\circ$ 时, 电流的基频分量 (i_{L1}) 与相电压 e_a 同相位; 有功功率 ($P_a = E_a I_{L1} \cos\phi$) 为正, 无功功率 ($Q_a = E_a I_{L1} \sin\phi$) 为零。当 α 从 0° 增大到 90° 时, P_a 减小, Q_a 增大。当 $\alpha = 90^\circ$ 时, P_a 为零, Q_a 达到最大。当 α 从 90° 增加到 180° 时, P_a 变为负值, 其绝对值增大, Q_a 仍为正, 且幅值减小。当 $\alpha = 180^\circ$ 时, P_a 达到负的最大值, Q_a 为零。由此可见, 无论是作为整流装置还是逆变装置, 换流器都将从交流系统中吸收无功功率。

2.2.2 包括换相叠弧的分析

1. 换相过程

由于交流电源电感 L_c (见图 2.2.2) 的影响, 相电流不可能瞬时改变。因此, 电流从一相转移到另一相需要一定的时间, 称为换相时间或叠弧时间。相应的“换相角”或“叠弧角”表示为 μ 。

正常运行状况下, 换相角小于 60° ; 典型的满负荷值在 $15^\circ \sim 25^\circ$ 范围内。当 $0^\circ < \mu < 60^\circ$ 时, 在换相过程中有三个阀同时导通。但是在两次换相之间则只有两个阀导通。每隔 60° 开始一次新的换相, 并持续角度为 μ 的一个时段。因此, 当无触发延迟 (即 $\alpha = 0$) 时, 两个阀同时导通的时段角度为 $60^\circ - \mu$, 如图 2.2.8 所示。在每次换相过程中, 加入阀中的电流从 0 增大到 I_d , 退出阀中的电流从 I_d 减小到 0。为简便起见, 图 2.2.8 中仅表示出阀的导通时段, 没有表示出阀电流。

如果 $0^\circ \leq \mu < 120^\circ$, 将产生三个阀和四个阀交替导通的异常运行方式。这里只考虑 $\mu < 60^\circ$ 的正常运行方式。

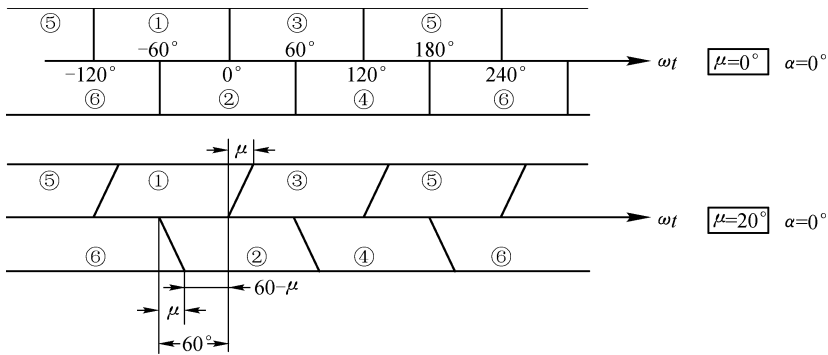


图 2.2.8 换相角对阀的导通时段的影响

现在讨论从阀 1 到阀 3 的换相过程来分析叠弧现象的影响。图 2.2.9 表明了考虑触发延迟时阀的导通时段。换相过程从 $\omega t = \alpha$ (触发延迟角) 时开始, 到 $\omega t = \alpha + \mu = \delta$ 时结束, 式中, δ 为“熄弧角”(等于触发延迟角 α 和换相角 μ 之和)。

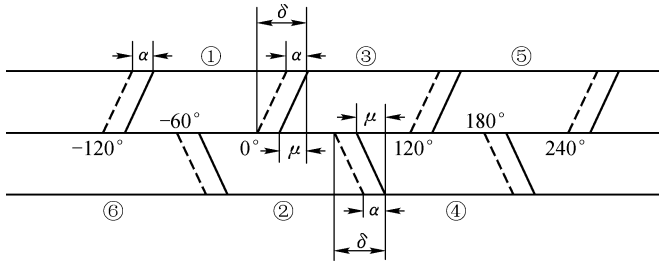


图 2.2.9 有触发延迟时的导通时段

- (1) 在换相开始时 ($\omega t = \alpha$), $i_1 = I_d$ 且 $i_3 = 0$;
- (2) 在换相结束时 ($\omega t = \alpha + \mu = \delta$), $i_1 = 0$ 且 $i_3 = I_d$ 。

在换相过程中, 阀 1、阀 2 和阀 3 均导通, 等效的换流器电路如图 2.2.10 所示。从图中可知, 对于阀 1 和阀 3 的回路, 有

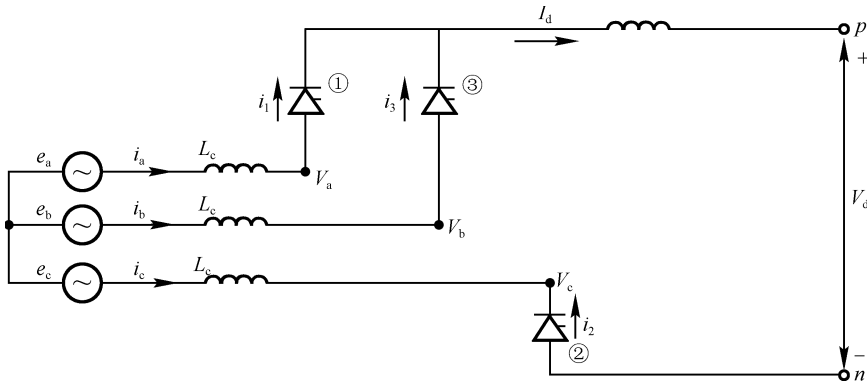


图 2.2.10 换相过程的等效电路

注: 处于截止状态的阀未标示在图中

$$e_b - e_a = L_c \frac{di_b}{dt} - L_c \frac{di_a}{dt}$$

电压 $e_b - e_a$ 称为“换相电压”。由式(2.2.2)可知,该电压等于 $\sqrt{3} E_m \sin \omega t$ 。因此

$$\sqrt{3} E_m \sin \omega t = L_c \frac{di_b}{dt} - L_c \frac{di_a}{dt}$$

由于 $i_i = I_d - i_b$, 有

$$\frac{di_i}{dt} = 0 - \frac{di_b}{dt}$$

因此

$$e_b - e_a = \sqrt{3} E_m \sin \omega t = 2 L_c \frac{di_b}{dt} \quad (2.2.7a)$$

或

$$\frac{di_b}{dt} = \frac{\sqrt{3} E_m}{2 L_c} \sin \omega t \quad (2.2.7b)$$

对上式两端作关于 t 的定积分, 下限为换流初始时刻 ($\omega t = \alpha$ 或 $t = \alpha / \omega$), 上限为变量 t , 于是

$$\int_0^{i_b} \frac{di_b}{dt} = \frac{\sqrt{3} E_m}{2 L_c} \int_{\alpha/\omega}^t \sin \omega t dt$$

积分后得

$$i_b = \frac{\sqrt{3} E_m}{2 \omega L_c} (\cos \alpha - \cos \omega t) = I_{s2} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (2.2.8a)$$

式中

$$I_{s2} = \frac{\sqrt{3} E_m}{2 \omega L_c} \quad (2.2.8b)$$

在换相过程中, 加入阀中的电流 i_b 包含一个恒定分量 ($I_{s2} \cos \alpha$) 和一个滞后于换流电压 90° 的正弦分量 ($-I_{s2} \cos \omega t$)。这是因为此刻分析的是通过电感 $2L_c$ 的线间短路情况。 i_b 的恒定分量取决于 α , 该分量使换相开始时 $i_b = 0$ 。

如图 2.2.11 所示, 换相过程中电流是峰值为 $I_{s2} = \sqrt{3} E_m / (2 \omega L_c)$ 的正弦电流的一部分。这部分波形是触发角 α 的函数。因此, 换相角取决于 I_d 、 L_c 和 α 。

在换相过程中, i_i 的波形满足 $i_i = I_d - i_b$, 当 α 接近 0° (或 180°) 时, 换相时间或叠弧时间最长。当 $\alpha = 90^\circ$ 时, 由于 i_b

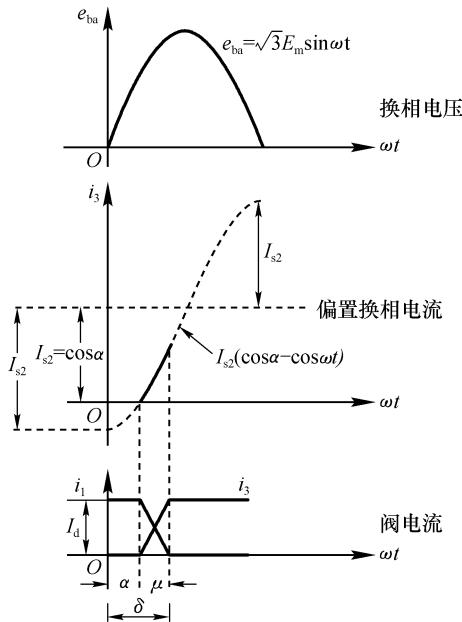


图 2.2.11 换相过程中与换相电压相关的阀电流