



国际电气工程先进技术译丛

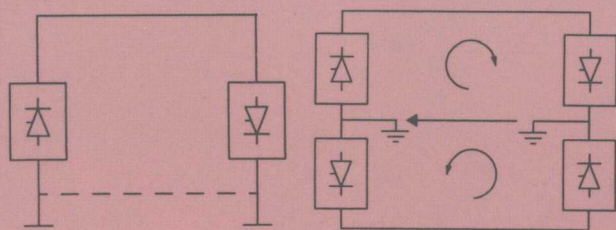
高压直流输电与柔性交流 输电控制装置—— 静止换流器在电力系统中的应用

**HVDC AND FACTS
CONTROLLERS
Applications of Static
Converters in Power
Systems**

(加拿大) Vijay K. Sood 著
徐 政 译



 **机械工业出版社**
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

高压直流输电与柔性 交流输电控制装置

——静止换流器在电力系统中的应用

(加拿大) Vijay K. Sood 著

徐政译

HVDC AND FACTS CONTROLLERS ——Applications of Static Converters in Power Systems



机械工业出版社

本书集中介绍了高压直流输电 (HVDC) 与柔性交流输电系统 (FACTS) 近十多年来所取得的技术进步和发展。内容包括电力换流器技术的新发展、电力换流器的同步技术、HVDC 和 FACTS 的控制和仿真技术、HVDC 和 FACTS 技术的发展趋势等。书中包含了世界主要制造商的工程实例。本书适合于从事 HVDC 与 FACTS 技术研究、开发、应用的技术人员和电力系统科研、规划、设计、运行的工程师以及高等学校电力系统专业的教师和研究生阅读。

Copyright © Kluwer Academic Publishers/Springer Science + Business Media, 2004 covering material copyrighted by the Licensor.

Chinese simplified character edition published by CHINA MACHINE PRESS, Copyright © 2006.

本书中文简体字版由 Springer Science + Business Media 授权机械工业出版社独家出版。

版权所有, 侵权必究。

本书版权登记号: 图字 01 - 2005 - 1607 号

图书在版编目 (CIP) 数据

高压直流输电与柔性交流输电控制装置: 静止换流器在电力系统中的应用 / (加) 苏德 (Sood, V.K.) 著; 徐政译. —北京: 机械工业出版社, 2006.2 (2008.5 重印)

(国际电气工程先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-24117-1

I. 高… II. ①苏…②徐… III. ①高电压 - 直流系统 - 输电线路 - 控制系统②交流 - 输电线路 - 控制系统 IV. TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 064254 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: 牛新国 责任编辑: 付承桂 版式设计: 张世琴
责任校对: 张 媛 封面设计: 马精明 责任印制: 杨 曦

北京机工印刷厂印刷

2008 年 5 月第 1 版第 2 次印刷

169mm × 239mm · 14.5 印张 · 279 千字

4 001—6 000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-24117-1

定价: 30.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换
销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379178

封面无防伪标均为盗版

译者的话

本书是近十多年来国际上不多见的系统介绍直流输电与柔性交流输电新技术和新进展的一部专著。对于希望学习和了解直流输电与柔性交流输电基础知识的读者，本书是一本内容很充分的教材；而对于希望深入研究直流输电与柔性交流输电的读者，本书可以起到一个极好的引导作用。

我国是目前世界上电力发展最快的国家。由于我国能源资源分布极不均衡，因此西电东送就成为我国电网发展的一个根本性特点。直流输电与交流输电相比在如下方面具有独特优势：1) 直流输电特别适合于大功率、远距离输电，对于输送距离超过 1000km、输送容量超大的西电东送工程，采用直流输电是最经济、合理的方案；2) 采用直流输电联网，不会影响被连的交流系统的短路电流水平；3) 采用直流输电联网，就从网络结构上彻底根除了联络线低频振荡产生的可能性；4) 采用直流输电联网，可以在网络结构上隔断交流故障的传递，避免发生连锁反应，是在网络结构上预防大面积停电事故的有效措施。因此，我国是世界上直流输电应用前景最广阔的国家之一。希望本书的翻译和出版能够对我国交直流大电网的快速、健康发展有所帮助。

原书中的部分符号不符合我国的使用习惯或国家标准，为保持与原书一致，翻译过程中没有加以改变。差别明显的符号有：国内常用 A、B、C 表示交流系统的三相，而原书采用 R、S、T 表示交流系统的三相；国内采用的电阻符号为 $\text{—}\square\text{—}$ ，而原书采用的电阻符号为 $\text{—}\sim\sim\sim\text{—}$ 。

本书的翻译得到了国家自然科学基金（项目批准号 50277034）的资助。翻译过程中，张帆、杨汾艳、潘武略、陈海荣、常勇、刁瑞盛、凌玲、卢睿、张静、朱金花、蔡亮、孙明洁、武诚、陈艺超、鲁浩东、杨文源、杨正兴等同学做了大量工作，在此深表谢意。

限于译者水平，书中难免存在错误和不妥之处，恳请广大读者批

评指正。译者联系方式：电话：0571-87952074，电子信箱：xufeng@hzcnc.com。

香 港 香 港

徐 政
于浙江大学求是园

本港自一九九七年七月一日回归祖国以来，在中央政府和香港特别行政区政府的共同努力下，香港保持了繁荣稳定，国际金融中心的地位得到进一步巩固。香港作为连接内地与世界的桥梁，在促进内地改革开放和经济发展中发挥了重要作用。

香港回归祖国后，在“一国两制”方针指引下，保持了原有的资本主义制度和生活方式，同时享有高度自治权。香港与内地的经济联系日益紧密，贸易往来频繁，投资合作不断深化。香港作为国际金融、贸易、航运和旅游中心，继续发挥着不可替代的作用。

香港回归祖国后，在中央政府和香港特别行政区政府的共同努力下，香港保持了繁荣稳定，国际金融中心的地位得到进一步巩固。香港作为连接内地与世界的桥梁，在促进内地改革开放和经济发展中发挥了重要作用。

香港回归祖国后，在“一国两制”方针指引下，保持了原有的资本主义制度和生活方式，同时享有高度自治权。香港与内地的经济联系日益紧密，贸易往来频繁，投资合作不断深化。香港作为国际金融、贸易、航运和旅游中心，继续发挥着不可替代的作用。

香港回归祖国后，在中央政府和香港特别行政区政府的共同努力下，香港保持了繁荣稳定，国际金融中心的地位得到进一步巩固。香港作为连接内地与世界的桥梁，在促进内地改革开放和经济发展中发挥了重要作用。

香港回归祖国后，在“一国两制”方针指引下，保持了原有的资本主义制度和生活方式，同时享有高度自治权。香港与内地的经济联系日益紧密，贸易往来频繁，投资合作不断深化。香港作为国际金融、贸易、航运和旅游中心，继续发挥着不可替代的作用。

香港回归祖国后，在中央政府和香港特别行政区政府的共同努力下，香港保持了繁荣稳定，国际金融中心的地位得到进一步巩固。香港作为连接内地与世界的桥梁，在促进内地改革开放和经济发展中发挥了重要作用。

香港回归祖国后，在“一国两制”方针指引下，保持了原有的资本主义制度和生活方式，同时享有高度自治权。香港与内地的经济联系日益紧密，贸易往来频繁，投资合作不断深化。香港作为国际金融、贸易、航运和旅游中心，继续发挥着不可替代的作用。

香港回归祖国后，在中央政府和香港特别行政区政府的共同努力下，香港保持了繁荣稳定，国际金融中心的地位得到进一步巩固。香港作为连接内地与世界的桥梁，在促进内地改革开放和经济发展中发挥了重要作用。

香港回归祖国后，在“一国两制”方针指引下，保持了原有的资本主义制度和生活方式，同时享有高度自治权。香港与内地的经济联系日益紧密，贸易往来频繁，投资合作不断深化。香港作为国际金融、贸易、航运和旅游中心，继续发挥着不可替代的作用。

原书前言

高压直流 (HVDC) 输电与柔性交流输电 (FACTS) 技术在过去十多年中取得了巨大的进步, 而近年来还没有一本简洁、易懂的书来阐述这方面的发展, 这些都促使了本书的写作。这些新的发展主要来自电力电子开关和微处理器的进步。这本新书试图填补学术著作领域中存在的这么一个小的空白。

对于本书的题目: 高压直流输电与柔性交流输电控制装置, 应当说明几句。根据现代的理解和术语用法规定, 高压直流输电应当是柔性交流输电控制装置的一部分。但是, 从这个领域的发展过程来看, 这项技术首先是在高压直流输电领域开始发展的, 柔性交流输电控制装置的出现则要晚得多, 因此我使用这个题目旨在反映这个事实。

HVDC 和 FACTS 领域的著名学者如 E. W. Kimbark、J. Arrillaga、K. R. Padiyar、N. G. Hingorani 和 L. Gyugyi 等撰写的开拓性的著作给了我极大的启发, 这在本书中会以某种形式清楚地反映出来。同时我也参考了 IEEE 资料库中的大量文献, 如果不对这些文献的来源表示感谢, 本前言就是不完整的。

写书是有计划进行的, 而且这是一件困难而费时的的工作。由于本人健康原因和其他事务, 本书比原定计划推迟了好几个月。为此, 终稿与原定写作大纲中的内容和范围已有所变化。在这里, 我要衷心感谢 Kluwer 学术出版社的 Alex Greene 和 Melissa Sullivan 在这段困难时期对我的信任及给予的支持和耐心。感谢 M. A. Pai 博士在本书可行性分析和评审过程中给予的学术上的支持和指导。

本书是为高年级本科生、研究生和从事实际工作的电力公司工程师而写的。因此, 数学和理论上的解释被控制在最小范围, 而将全书的重点放在实际应用上。

如果没有很多人的努力和贡献, 本书是不可能完成的。这些人可分为两组: 位于蒙特利尔 Concordia 大学的我以前和现在的学生; 我在魁北克水电局研究所 (IREQ) 中的同事。他们是真正的攻坚力量, 在我有幸与他们一起工作的很多年中, 他们给予了我很多的支持、友情和技能。在此, 我向他们表示感谢。

我加入 Concordia 大学电机系的时间可以追溯到 1984 年, 当时我是一个兼职助理教授。我以前一些学生的工作在本书中占有重要位置, 在这里我要感谢 Vijay Khatri、Krish Narendra、Rachit Arora 和 Anup Mazumder 的贡献。

我 28 年多的工作生涯中的大部分是在魁北克水电局研究所 (国际上称为 IREQ) 中度过的, 其中大部分时间是在电力系统仿真组, 最近在电气设备组。

我要感谢我的前同事 P.C.S. Krishnaya、Harbans Nakra、Lewis Vaughan、Ly Bui 和 David McCallum 等人。一一列举我在 IREQ 这些年来一起工作过的其他同事的姓名是不可能的，我在这里向这个集体表示感谢。此外，还有很多魁北克水电局和其他地方的个人，以他们自己的方式，对本书的主题做出了贡献。

这些年来间接给予过我精神上的支持和启发的其他相关人员有：英国伦敦城市大学的 Loi Lei Lai 教授，班加罗尔印度科学院的 H.S. Chandrasekhariah 教授（已故）。

在本书的撰写过程中，得到了制造商和其他公司的很多支持，他们的帮助主要表现在提供技术文献和照片。这些人员包括：ABB 公司的 Niclas Ottosson 和 Lewis Vaughan，西门子公司的 Peter Lips，阿尔斯通公司的 Michael Baker，加拿大 Manitoba 直流输电研究中心的 Paul Wilson，加拿大 RTDS 公司的员工，以及加拿大 TransÉnergie 公司的 Bahram Khodabakhchian。我对他们的支持表示衷心的感谢。

本书以简短介绍高压直流输电开始。第 2 章讨论两种类型的换流器，即电流源换流器和电压源换流器，它们构成了直流输电与柔性交流输电控制装置的核心部件。电流源换流器是 HVDC 输电系统中应用的传统装置，但近年来电压源换流器的发展已开拓出了新的应用领域。第 3 章讨论电力换流器与交流系统频率的同步技术。在以前的教科书中，对此专题没有给予足够的重视，但将来它会变得越来越重要。因为：1) 与弱交流系统的互连将变得越来越频繁；2) 交流—直流—交流系统之间的相互作用的关联性将越来越强。第 4 章讨论两端 HVDC 系统的控制策略，由于时间关系没有将此扩展到多端 HVDC 系统。第 5 章介绍强迫换相换流器的基本原理，列出了一些需要考虑的基本因素。随着新的开关器件的出现，其中的一些基本因素在将来会变得更加重要。第 6 章着重描述了电容器换相换流器在近年来取得的成功，这种旧结构的新应用展示了将思路发展到结果需要坚持不懈地努力研究。第 7 章描述了一种新型换流器结构和在 FACTS 方面的应用，它预示了这项技术令人激动的未来。坚持不懈的研究已使得电压源换流器应用于将来的直流输电成为可能，第 8 章着重阐述这个专题。在过去十年中开发出来的新的控制范式为有源交流和直流滤波器的应用打开了一扇大门，第 9 章描述了其中的一个应用，并展示了所需要的控制范式。这个领域的研究正在继续，将来会出现新的应用，并且换流器的成本会降低。第 10 章给出了基于 EMTP 对直流输电系统各种典型故障进行仿真的结果，表明了对控制器增益进行优化的必要性，描述了获取控制器最优参数需要做的研究细节。采用基于模糊逻辑、神经网络和智能技术的新的控制算法可能会减轻既存的 PI 控制器的负担，这是一个被大量研究过的主题，它在将来会突现出来。第 11 章讨论了一个简单的神经—模糊自适应控制器，它可以用来提高 HVDC 输电系统的性能。第 12 章简短介绍了与控制器相关的测量和监视方面的问题。第 13 章讨

论了作者曾经参与的某些研究工作，并提出了交流与直流系统及控制器的相互作用问题。从事实际工作的工程师必须进行大量的这种性质的研究工作，以验证系统的行为和稳定性。此章中没有加入任何数学推导，这方面的工作将留给将来的另一个项目。第 14 章描述了从事实际工作的工程师进行上述研究工作时所用到的部分工具。在最后一章中，考察了现代直流输电系统，并指出采用最新技术以减少成本是将来发展的重点。

最后，我要感谢我妻子 Vinay 在我撰写本书过程中所给予的信任、所付出的努力和对本书的贡献。她是我永远的支持者，为本书手稿的打字、画图、校样的校读和修正做出了十分有价值的贡献。她的耐心和我因撰写本书而忽视了她其他应做工作的宽容是最值得称赞的。

前章参考文献	Alternative Transmission Program	ATP
非交器	(A generic version of EMT) Back to Back Converter	BBC
非交器	Current Controller	CC
非交器	Explosion-Protected Converter	EX
非交器	Current Controlled Converter	CCO
非交器	Current Regulation	CR
非交器	Constant Extinction Angle	CEA
非交器	Commutation Failure	CF
非交器	Chain Link Converter	CLC
非交器	Current Source Converter	CSC
非交器	Controlled Series Converter Converter	CSCC
非交器	Continuously (Fast) Filter	CONF
非交器	DC Filter	DF
非交器	Development of Out-of-Phase (or EMT) DC Rectifier Transformer	DDC
非交器	Digital Signal Processor	DSP
非交器	Dual Quadrature Zero	DQZ
非交器	Power High Voltage	EHV
非交器	Effective gain Current Ratio	ESCR
非交器	Electric-Magnetic Transient Program	EATP
非交器	New version of EMT Rectifier Version	EMTV
非交器	Electric-Magnetic Transients for DC	EMTDC
非交器	Equivalent Pulse Control	EPC
非交器	Electric-Magnetic Interference	EMI
非交器	Power Calculation	PC
非交器	Flexible Alternating Current Transmission System	FACETS
非交器	Four-Phase	FP

Vijay K. Sood

Brossard, Québec.

本书所用的首字母缩略词汇总

ACF	AC Filter	交流滤波器
A/D Converter	Analog to Digital Converter	模/数转换器
AF	Active Filters	有源滤波器
ALPRET	Alpha Retard (at rectifier)	α 延迟 (整流器)
ATP	Alternative Transients Program (a freeware version of EMTP)	EMTP 程序的一个免费版本
BB	Back to Back (Converter)	背靠背换流站
CC	Circuit Commutation	电路换相
CC	Current Control	电流控制
CCC	Capacitor Commutated Converter	电容换相换流器
CCO	Current Controlled Oscillator	电流控制振荡器
CE	Current Extinction	电流中断
CEA	Constant Extinction Angle	定关断角
CF	Commutation Failure	换相失败
CLC	Chain Link Converter	链式换流器
CSC	Current Source Converter	电流源换流器
CSCC	Controlled Series Capacitor Converter	可控串联电容换流器
ConTune	Continuously Tuned (Filter)	连续调谐 (滤波器)
DCF	DC Filter	直流滤波器
DCG	Development Co-Ordination Group (of EMTP)	EMTP 开发协调小组
DCPT	DC Potential Transformer	直流电压互感器
DSP	Digital Signal Processor	数字信号处理器
DQ0	Direct Quadrature Zero	直轴—交轴—零轴
EHV	Extra High Voltage	超高压
ESCR	Effective Short Circuit Ratio	有效短路比
EMTP	Electro-Magnetics Transients Program	电磁暂态程序
EMTP Works RV	New version of EMTP Restructured Version	EMTP 的一个新的重构版本
EMTDC	Electro-Magnetic Transients for DC	用于直流输电的电磁暂态程序
EPC	Equi-Distant Pulse Control	等间隔脉冲控制
EMI	Electro-Magnetic Interference	电磁干扰
FC	Forced Commutation	强迫换相
FACTS	Flexible Alternating Current Transmission Systems	柔性交流输电系统
FR	Force-Retard	强迫延迟

GFU	Grid Firing Unit	门极触发单元
GTO	Gate Turn-Off (Thyristor)	门极关断 (晶闸管)
GUI	Graphical User Interface	用户图形界面
HB	Hysteresis Band	滞环
HVDC	High Voltage Direct Current	高压直流输电
HVDC Light	Trade mark of a version of HVDC converter for low powers	轻型高压直流输电
HYPERSIM	Trade mark of a version of digital simulator	一种数字仿真器
IGBT	Insulated Gate-Bipolar Transistor	绝缘栅双极型晶体管
IPC	Individual Phase Control	按相控制
IPP	Inter-Mountain Power Project	跨山电力工程
IOLIM	Current Order Limited	受限的电流指令值
IMIN	Current Order Minimum	最小电流指令值
LCC	Line Commutated Converter	电网换相换流器
LC	Line Commutation	电网换相
LPOF	Low Pressure Oil Filled	低压充油
LTT	Light-Triggered Thyristor	光触发晶闸管
LU	Lower Upper	下三角与上三角
MAP	Maximum Available Power	最大可送功率
MTDC	Multi-terminal Direct Current	多端直流
MVA	Mega Volt Amps	兆伏安
MCT	MOS Controlled Transistor	MOS 控制晶体管
MOSFET	MOS Field Effect Transistor	MOS 场效应晶体管
MP	Mid Point	中点
MISO	Multiple-Input Single-Output	多输入单输出
MODELS	New EMTP subroutine for controls	新的 EMTP 控制子程序
OCP	Over Current Protection	过电流保护
OOM	Object Oriented Method	面向对象的方法
OCT	Optical Current Transducer	光学电流传感器
PLL	Phase Locked Loop	锁相环
PWM	Pulse Width Modulation	脉(冲)宽(度)调制
PFC	Pulse Frequency Control	脉冲频率控制
PPC	Pulse Phase Control	脉冲相位控制
PS	Periodical Sampling	周期采样
PPCO	Pulse Phase Control Oscillator	脉冲相位控制振荡器
PDP	Pole Differential Protection	极差动保护
PT	Potential Transformer	电压互感器
PSCAD	Power System Computer Aided Design	电力系统计算机辅助设计 (软件名称)

RoW	Right of Way	线路走廊
RBF	Radial Basis Function	径向基函数
RBFNN	RBF Neural Network	径向基函数神经网络
RLC	Resistor, Inductor and Capacitor	电阻、电感和电容
RV	Restructured Version	重构的版本
SIL	Surge Impedance Loading	波阻抗负荷(自然功率)
SI	Static Induction Thyristor	静电感应晶闸管
SVC	Static Var Compensators	静止无功补偿器
SCR	Short Circuit Ratio	短路比
STATCOM	Static Compensator	静止同步补偿器
SLG	Single Line to Ground (Fault)	单相接地(故障)
THD	Total Harmonic Voltage Distortion	总谐波畸变率
TNA	Transient Network Analyzer	暂态网络分析仪
TC	Triangular Carrier	三角载波
UHV	Ultra Hight Voltage	特高压
VC	Voltage Control	电压控制
VH	Valve Hall	阀厅
VY	Valve Yard	阀场
VAR	Volt Amps reactive	乏
VCO	Voltage Controlled Oscillators	电压控制振荡器
VDCL	Voltage Dependent Current Limit	低压限流
VDCOL	Voltage Dependent Current Order limit	低压限流
VSC	Voltage Source Converter	电压源换流器
VGP	Valve Group Protection	阀组保护
XLPE	Cross Linked Poly-Ethylene	交联聚乙烯
HVDC ^{PLUS}	HVDC Power Link Universal System from Siemens	西门子的通用高压电力连接系统
NF	Neuro-Fuzzy	神经—模糊

本书所用的机构缩略词汇总

CEPEL	Name of research organization (of Brazil)	巴西的一个研究机构
CESI	Name of research organization (of Italy)	意大利的一个研究机构
CPRI	Central Power Research Institute (of India)	印度的中央电力研究院
ABB	Manufacturer of electrical equipment	电气设备制造商 ABB
Siemens	Manufacturer of electrical equipment	电气设备制造商西门子
CIGRÉ	<i>Conseil International des Grands Réseaux Électriques</i>	国际大电网会议
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers	电气与电子工程师学会 (美国)
BPA	Bonneville Power Administration	美国邦维尔电管局
IREQ	Institute of research of Hydro-Québec, Varenes, Québec.	魁北克水电局研究所
RTDS	Real Time Digital Simulator Technologies Inc.	实时数字仿真器技术公司

目 录

译者的话	2.5 参考文献	29
原书前言	第3章 电力换流器的同步技术	30
本书所用的首字母缩略词汇总	3.1 引言	30
本书所用的机构缩略词汇总	3.2 关于 GFU 的评述	31
第1章 高压直流输电概述	3.2.1 按相控制(IPC)单元	31
1.1 引言	3.2.2 等间隔脉冲控制(EPC)单元	31
1.2 交流输电与直流输电的技术比较	3.3 GFU 的设计与分析	32
1.2.1 输电成本评估	3.3.1 传统型 GFU	32
1.2.2 技术特性评估	3.3.2 DQO 型 GFU	34
1.2.3 可靠性和可用率的评估	3.3.3 两者的比较	36
1.2.4 直流输电的应用	3.4 对两种 GFU 的测试	37
1.3 高压直流输电系统的类型	3.4.1 失去同步电压	37
1.3.1 单极结构	3.4.2 谐波畸变测试	39
1.3.2 双极结构	3.5 对一个测试系统的 EMTP 仿真	40
1.3.3 同极结构	3.5.1 系统模型的启动	41
1.4 参考文献	3.5.2 电流指令值作 10% 的阶跃变化	43
第2章 换流器的类型	3.5.3 单相故障	43
2.1 引言	3.5.4 直流线路故障	46
2.2 电流源换流器(CSC)	3.6 结论	47
2.2.1 无换相交叠期的情况	3.7 致谢	47
2.2.2 换相交叠期小于 60° 时的情况	3.8 参考文献	47
2.3 电压源换流器(VSC)	第4章 HVDC 的控制	49
2.3.1 引言	4.1 历史背景	49
2.3.2 控制交流电流的 VSC	4.2 HVDC 的控制功能	50
2.3.3 控制交流电压的 VSC	4.3 两端直流输电系统的基本控制原理	51
2.4 结束语		

4.4 电流裕度控制方法	54	6.3 CCC 与 CSCC 的比较	87
4.4.1 整流器运行模式	54	6.3.1 稳态特性	87
4.4.2 逆变器运行模式	55	6.3.2 暂态特性	90
4.5 整流器的电流控制	57	6.4 阿根廷-巴西之间的 Garabi	
4.6 逆变器的关断角控制	58	背靠背联网工程	93
4.6.1 γ 角的测量方法	59	6.4.1 阀应力	94
4.6.2 γ 角的预估方法	59	6.4.2 交流开关装置	94
4.7 分层控制	62	6.4.3 交流滤波器	94
4.7.1 双极控制器	62	6.4.4 晶闸管阀模块	96
4.7.2 极控制器	62	6.4.5 模块化设计的好处	97
4.7.3 阀组 (VG) 控制器	63	6.5 结束语	98
4.8 扰动之后的控制行为	65	6.6 致谢	98
4.9 参考文献	66	6.7 参考文献	98
第 5 章 强迫换相的 HVDC		第 7 章 静止同步补偿器——	
换流器	68	基于链式换流器的	
5.1 引言	68	STATCOM	100
5.2 用于 HVDC 换流器的换		7.1 引言	100
相技术	68	7.2 链式换流器	102
5.2.1 换相的定义	68	7.2.1 单级的额定值	103
5.2.2 电网换相	70	7.2.2 损耗	104
5.2.3 电路换相	70	7.3 链式 STATCOM 的优点	105
5.2.4 自换相	72	7.4 产品设计	106
5.2.5 换流器的运行区域	75	7.5 致谢	107
5.3 用于高压直流输电的强迫		7.6 参考文献	107
换相换流器的例子	77	第 8 章 采用电压源换流器的	
5.3.1 电路换相换流器	77	HVDC 系统	109
5.3.2 自换相换流器	80	8.1 引言	109
5.4 参考文献	81	8.2 基于 VSC 的 HVDC 的	
第 6 章 用于 HVDC 系统的电容		基本元件	110
换相换流器	84	8.2.1 电压源换流器	110
6.1 电容换相换流器	84	8.2.2 XLPE 电缆	110
6.1.1 无功功率管理	85	8.3 电压源换流器	111
6.1.2 晶闸管阀模块	85	8.3.1 VSC 的运行原理	111
6.2 可控串联电容换流器		8.3.2 设计应考虑的因素	114
(CSCC)	86	8.4 应用	116

XIV 目 录

8.4.1 在环境敏感区域(如城市中心)的应用	116	9.4 结束语	137
8.4.2 小规模再生能源的馈入	117	9.5 致谢	137
8.4.3 风力发电场接入系统	118	9.6 参考文献	138
8.4.4 现有输电走廊的增容	119	第 10 章 高压直流输电系统中的典型扰动	140
8.4.5 改善城市中心的供电可靠性	119	10.1 引言	140
8.5 丹麦 Tjaereborg 风力发电工程	120	10.2 用于 HVDC 控制研究的 CIGRE 标准测试系统模型	140
8.5.1 工程说明	120	10.3 所用控制系统的详细模型	143
8.5.2 主要数据	121	10.3.1 整流器控制单元	143
8.5.3 电压源换流器的运行状态	121	10.3.2 逆变器控制单元	145
8.5.4 电能质量	121	10.4 试验结果	146
8.5.5 控制系统	121	10.4.1 控制器优化试验	146
8.5.6 直流电缆	122	10.4.2 模式转换	149
8.5.7 建筑物	122	10.4.3 逆变侧 1 个周波单相故障(单次换相失败)	150
8.5.8 现场所做的试验	122	10.4.4 逆变侧 5 个周波单相故障(多次换相失败)	150
8.5.9 优点	122	10.4.5 逆变侧 5 个周波三相故障	151
8.6 向远方(如岛屿等)供电	122	10.4.6 整流侧 5 个周波单相故障	151
8.7 非同步互连	124	10.4.7 整流侧 5 个周波三相故障	152
8.7.1 澳大利亚新南威尔士和昆士兰之间的 Directlink 工程	124	10.4.8 整流侧直流线路故障	152
8.7.2 系统的主要部件	124	10.4.9 逆变侧直流线路故障	152
8.7.3 控制系统	126	10.5 结束语	155
8.8 结束语	126	10.6 致谢	155
8.9 致谢	126	10.7 参考文献	155
8.10 参考文献	126	第 11 章 先进控制器	156
第 9 章 有源滤波器	127	11.1 引言	156
9.1 引言	127	11.2 一个先进 VDCL 单元的应用	156
9.2 直流滤波器	130		
9.3 交流滤波器	130		
9.3.1 测试系统	130		
9.3.2 控制原理	131		
9.3.3 试验结果	135		

11.2.1 引言	156	14.1 引言	186
11.2.2 模糊推理	157	14.2 IREQ 的混合仿真器	186
11.2.3 RBF NN 的结构	158	14.3 离线数字仿真软件包	191
11.2.4 方法学	159	14.3.1 EMTTP	191
11.2.5 用于本项研究的 HVDC 系统	161	14.3.2 EMTDC/PSCAD	192
11.2.6 结果和讨论	162	14.4 实时数字仿真器	195
11.3 结论	167	14.4.1 方法学	197
11.4 致谢	167	14.4.2 硬件方面的考虑	198
11.5 参考文献	167	14.4.3 软件方面的考虑	198
第 12 章 测量与监视	169	14.4.4 用户图形界面 (GUI)	199
12.1 引言	169	14.4.5 实时数字仿真器的有效 性验证	199
12.2 监视的信号	169	14.4.6 硬件实现	200
12.3 过电流保护	170	14.5 目前情况和发展趋势	200
12.4 过电压保护	172	14.6 致谢	201
12.5 致谢	173	14.7 参考文献	201
12.6 参考文献	173	第 15 章 现代高压直流输电 技术的发展水平	203
第 13 章 交直流系统相互作用 的实例研究	174	15.1 引言	203
13.1 引言	174	15.2 过去 10 年的情况	203
13.2 交直流系统的相互作 用	174	15.3 未来 10 年的情况	203
13.2.1 系统特性	174	15.3.1 晶闸管阀	203
13.2.2 直流控制器特性	175	15.3.2 自换相阀	206
13.3 多端 HVDC 系统	176	15.3.3 有源滤波器	206
13.3.1 整流器 1 的远方三相故 障	178	15.3.4 可调谐的交流滤波器	209
13.3.2 容量较小的逆变器 2 的 换相失败	179	15.3.5 交流量和直流量的检 测	210
13.4 印度 Chandrapur HVDC 换流站谐波相互作用	182	15.3.6 基于数字信号处理器 (DSP) 的控制器	211
13.5 结论	184	15.3.7 紧凑型换流站设计	211
13.6 致谢	185	15.3.8 深井接地极	212
13.7 参考文献	185	15.4 结束语	213
第 14 章 电力系统分析的仿真 工具	186	15.5 致谢	213
		15.6 参考文献	214
		作者介绍	215

第 1 章 高压直流输电概述

1.1 引言

尽管早期关于高压直流 (HVDC) 输电的书中已对高压直流输电技术作了充分的介绍^[1-3], 但是为了本书的完整性, 这里有必要对高压直流输电技术作一简短概述。由于直流输电技术目前已被认为是一项成熟技术, 因此本章的内容可能被认为是已有材料的重复。基于这个考虑, 本书的侧重点将在直流输电的控制方面, 而本章的内容将比较简略。

高压直流输电技术首先被应用于海底电缆输电, 早期的工程有瑞典哥特兰岛 (Gotland, 1954 年) 输电工程和意大利撒丁岛 (Sardinia, 1967 年) 输电工程; 然后被应用于长距离输电, 相应的工程有美国太平洋岸南北联络线 (Pacific Intertie, 1970 年) 工程和加拿大纳尔逊河直流输电工程 (Nelson River, 1973 年); 这个时期直流输电的换流器件是汞弧阀。直流输电技术进步的一个重大里程碑出现在 1972 年, 将魁北克 (Québec) 和新布伦兹维克 (New Brunswick) 非同步连接起来的伊尔河 (Eel River) 背靠背 (BB) 直流输电工程首次采用了晶闸管阀作为直流输电的换流器件, 标志着晶闸管阀开始取代早期的汞弧阀。

高压直流输电技术发展的第一个 25 年, 是由汞弧阀换流器技术支撑的, 这个时期到 70 年代中为止; 第二个 25 年到 2000 年为止, 这个时期高压直流输电技术是由基于晶闸管阀的电网换相换流器技术支撑的; 可以预计, 在接下来的 25 年里, 强迫换相换流器技术将占主导地位^[4]。这个新的强迫换相时代首先是由电容换相换流器 (CCC) 开创的, 但由于具有更好性能的大功率开关器件成本的不断降低, 电容换相换流器最终将被自换相换流器所取代。

根据 IEEE 输配电委员会编撰的 HVDC 工程汇总表, 可以清楚地看出高压直流输电的发展情况^[5], 如表 1-1 所示。

表 1-1 高压直流输电工程列表

HVDC 工程名		制造商	投运年份	容量 /MW	直流电压 /kV	架空线路与/或电缆长度 /km	地点
英文名	中文译名						
Gotland I #	哥特兰岛 I #	ASEA	1954	20	± 100	96	瑞典