



全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材

高压直流输电 原理与应用

张勇军 主编
陈碧云 副主编

<http://www.tup.com.cn>

清华大学出版社

清华大学出版社数字出版网站

WQBook  
www.wqbook.com

ISBN 978-7-302-30090-8



9 787302 300908 >

定价：48.00元

内 容 简 介

本书介绍高压直流输电基本原理和工程应用,内容共 11 章,涉及直流输电的基本概念和原理、换流电路工作原理、换流站及主设备、直流输电线路、谐波与滤波器、直流系统的控制和保护、直流系统的功率损耗及可靠性评估、特高压直流输电以及直流输电新技术。

本书主要供电气工程专业硕士研究生、工学硕士研究生,以及电气工程及其自动化等相关专业的本科生教学和科研使用,并可供直流输电工程的设计与运行人员参考。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13701121933

图书在版编目(CIP)数据

高压直流输电原理与应用/张勇军主编.--北京:清华大学出版社,2012. 8

(全国工程硕士专业学位教育指导委员会推荐教材)

ISBN 978-7-302-30090-8

I. ①高… II. ①张… III. ①高电压—直流—输电技术—研究生—教材 IV. ①TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 214277 号

责任编辑:张占奎

封面设计:何凤霞

责任校对:赵丽敏

责任印制:沈 露

出版发行:清华大学出版社

网 址: <http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座 邮 编:100084

社 总 机:010-62770175 邮 购:010-62786544

投稿与读者服务:010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185mm×230mm 印 张:19.5 字 数:423 千字

版 次:2012 年 8 月第 1 版 印 次:2012 年 8 月第 1 次印刷

印 数:1~3000

定 价:48.00 元

产品编号:047632-01

| | |
|------------------------------|----|
| 第 1 章 绪论 | 1 |
| 1.1 直流输电的发展历史 | 1 |
| 1.1.1 早期电力传输技术回顾 | 1 |
| 1.1.2 高压直流输电技术的发展 | 2 |
| 1.1.3 高压直流输电的基本概念 | 6 |
| 1.1.4 国外高压直流输电工程代表性案例 | 7 |
| 1.1.5 高压直流输电在中国的发展 | 9 |
| 1.2 高压直流输电的基本接线方式 | 11 |
| 1.2.1 单极线路方式 | 11 |
| 1.2.2 双极线路方式 | 12 |
| 1.2.3 背靠背换流方式 | 14 |
| 1.2.4 多端方式 | 15 |
| 1.3 直流输电的优缺点 | 17 |
| 1.3.1 直流输电的优势 | 17 |
| 1.3.2 直流输电的不足 | 20 |
| 1.3.3 直流输电的应用场合 | 22 |
| 习题 1 | 23 |
| 第 2 章 换流电路的工作原理 | 24 |
| 2.1 晶闸管与相控换流 | 24 |
| 2.1.1 晶闸管的特性 | 24 |
| 2.1.2 换流电路 | 25 |
| 2.1.3 多桥换流器 | 26 |
| 2.2 整流器的工作原理 | 27 |
| 2.2.1 理想情况下的工作原理 | 29 |

| | | |
|-----------------------------|-------------------------|-----------|
| 2.2.2 | 考虑触发延迟角的情况 | 31 |
| 2.2.3 | 同时考虑触发延迟角和换相电感的情况 | 32 |
| 2.2.4 | 换流装置的功率因数 | 36 |
| 2.3 | 逆变器的工作原理 | 39 |
| 2.3.1 | 触发延迟角与直流电压的关系 | 39 |
| 2.3.2 | 逆变器的运行 | 41 |
| 2.3.3 | 换相失败的概念 | 43 |
| 2.3.4 | 换相失败的影响因素 | 44 |
| 2.3.5 | 换相失败的预防措施 | 47 |
| 2.4 | 直流输电的运行方式及其稳态特性 | 49 |
| 2.4.1 | 直流输电工程的额定值 | 49 |
| 2.4.2 | 直流输电的运行方式 | 50 |
| 2.4.3 | 稳态工况的计算 | 52 |
| 2.4.4 | 换流器的功率特性 | 54 |
| 2.4.5 | 换流器的无功功率特性 | 54 |
| | 习题 2 | 55 |
| 第 3 章 换流站及其主设备 | | 56 |
| 3.1 | 换流站概况 | 56 |
| 3.1.1 | 主设备及其功能 | 56 |
| 3.1.2 | 换流站的平面布置 | 58 |
| 3.2 | 晶闸管换流器 | 59 |
| 3.2.1 | 性能要求 | 60 |
| 3.2.2 | 晶闸管阀的结构 | 60 |
| 3.2.3 | 晶闸管的触发方式 | 62 |
| 3.3 | 换流变压器 | 64 |
| 3.3.1 | 换流变压器的特点 | 64 |
| 3.3.2 | 换流变压器的选择 | 65 |
| 3.3.3 | 换流变压器的选型方案 | 67 |
| 3.4 | 平波电抗器 | 69 |
| 3.4.1 | 平波电抗器的结构和功能 | 69 |
| 3.4.2 | 平波电抗器的选择 | 70 |
| 3.5 | 无功补偿装置 | 71 |
| 3.5.1 | 静态无功补偿装置 | 72 |
| 3.5.2 | 动态无功补偿装置 | 73 |

| | |
|----------------------------------|-----------|
| 3.6 换流站的工程实例 | 75 |
| 习题 3 | 80 |
| 第 4 章 高压直流输电线路 | 81 |
| 4.1 概况 | 81 |
| 4.1.1 杆塔 | 81 |
| 4.1.2 直流线路绝缘子 | 82 |
| 4.1.3 直流电缆线路 | 83 |
| 4.2 架空线路的运行特性 | 84 |
| 4.2.1 电晕效应 | 84 |
| 4.2.2 电场效应 | 85 |
| 4.2.3 电晕损耗 | 86 |
| 4.2.4 屏蔽效应与派生效应 | 87 |
| 4.2.5 无线电干扰 | 87 |
| 4.2.6 可听噪声 | 88 |
| 4.3 架空线路的参数选择 | 89 |
| 4.3.1 额定电压 | 89 |
| 4.3.2 导体截面 | 90 |
| 4.3.3 分裂导线数 | 91 |
| 4.3.4 直流输电线路工程实例 | 91 |
| 4.4 大地回路 | 92 |
| 4.4.1 电磁效应 | 93 |
| 4.4.2 热力效应 | 93 |
| 4.4.3 电化效应 | 94 |
| 4.4.4 陆地接地电极 | 94 |
| 4.4.5 海岸电极和海水电极 | 95 |
| 4.4.6 接地极线路工程实例 | 97 |
| 习题 4 | 98 |
| 第 5 章 高压直流系统的谐波和滤波器 | 99 |
| 5.1 谐波的基本概念 | 99 |
| 5.1.1 谐波源与谐波 | 99 |
| 5.1.2 谐波的指标 | 100 |
| 5.1.3 直流输电的谐波 | 101 |
| 5.2 换流装置交流侧的特征谐波 | 102 |

| | | |
|--------------|---------------------------|------------|
| 5.2.1 | 换流变压器阀侧线电流 | 102 |
| 5.2.2 | 换流变压器交流侧线电流 | 103 |
| 5.2.3 | 双桥 12 脉动换流变压器交流侧线电流 | 104 |
| 5.3 | 换流装置直流侧的特征谐波 | 104 |
| 5.3.1 | 换流器直流侧的谐波电压 | 105 |
| 5.3.2 | 换流器直流侧的谐波电流 | 106 |
| 5.4 | 交流滤波器 | 106 |
| 5.4.1 | 并联交流滤波器的阻抗特性 | 106 |
| 5.4.2 | 交流滤波器的选择设计 | 110 |
| 5.4.3 | 交流滤波器的配置 | 111 |
| 5.4.4 | 交流滤波器的工程实例 | 112 |
| 5.5 | 直流滤波器 | 114 |
| 5.5.1 | 直流滤波器的配置 | 114 |
| 5.5.2 | 直流滤波器的工程实例 | 116 |
| 5.6 | 有源滤波器 | 117 |
| 5.6.1 | 基本构成与原理 | 119 |
| 5.6.2 | 接线方式的选择 | 120 |
| 5.6.3 | 混合有源直流滤波系统 | 121 |
| 5.6.4 | 直流有源滤波器的工程实例 | 123 |
| 习题 5 | | 124 |
| 第 6 章 | 高压直流系统的控制 | 125 |
| 6.1 | 概述 | 125 |
| 6.1.1 | 分层控制模式 | 125 |
| 6.1.2 | 基本控制要求 | 126 |
| 6.2 | 基本控制方式 | 127 |
| 6.2.1 | 定电流控制 | 128 |
| 6.2.2 | 定电压控制 | 130 |
| 6.2.3 | 定触发角控制 | 130 |
| 6.2.4 | 定熄弧角控制 | 131 |
| 6.3 | 功率控制和频率控制 | 133 |
| 6.3.1 | 定功率控制 | 133 |
| 6.3.2 | 定频率控制与功率/频率控制 | 135 |
| 6.4 | 两侧换流器控制的配合特性 | 136 |
| 6.4.1 | 理想控制特性 | 136 |

| | | |
|-------|----------------------|-----|
| 6.4.2 | 控制特性不稳定的对策 | 138 |
| 6.4.3 | 低压限流与触发角限制 | 139 |
| 6.4.4 | 换流站的控制特性 | 140 |
| 6.4.5 | 潮流翻转控制 | 142 |
| 6.4.6 | 直流系统的启停控制 | 143 |
| 6.4.7 | 换流变压器分接头切换控制 | 144 |
| 6.5 | 基本的脉冲触发控制方式 | 145 |
| 6.5.1 | 分相控制方式 | 146 |
| 6.5.2 | 等距离脉冲相位控制方式 | 147 |
| 6.6 | 极控系统 | 149 |
| 6.6.1 | 极控系统设备配置及其主要功能 | 152 |
| 6.6.2 | 换流器动作顺序 | 154 |
| 6.6.3 | 非正常闭锁的控制 | 156 |
| 6.7 | 直流站控系统 | 157 |
| 6.7.1 | 直流站控系统的主要功能 | 157 |
| 6.7.2 | 系统无功功率控制 | 158 |
| 6.7.3 | 直流系统控制级别 | 159 |
| 6.8 | 交流站控系统 | 159 |
| 6.8.1 | 交流站控系统的主要功能 | 159 |
| 6.8.2 | 交流场设备其他功能的实现方式 | 160 |
| 习题 6 | | 160 |

第 7 章 高压直流输电的保护

| | | |
|-------|----------------------------|-----|
| 7.1 | 高压直流输电系统保护的配置原则与动作策略 | 161 |
| 7.1.1 | 高压直流输电系统故障种类 | 161 |
| 7.1.2 | 直流输电系统保护配置原则 | 162 |
| 7.1.3 | 直流系统保护动作策略 | 164 |
| 7.2 | 换流站保护的配置 | 165 |
| 7.2.1 | 主要保护配置 | 166 |
| 7.2.2 | 其他辅助保护 | 169 |
| 7.2.3 | 极控保护 | 170 |
| 7.3 | 换流器的保护 | 172 |
| 7.3.1 | 换流器的故障分析 | 172 |
| 7.3.2 | 换流器的保护配置 | 175 |
| 7.4 | 高压直流输电线路的保护 | 179 |

| | | |
|--------------------------------|------------------------|------------|
| 7.4.1 | 直流线路故障类型 | 179 |
| 7.4.2 | 直流线路故障过程 | 180 |
| 7.4.3 | 高压直流线路保护的要求与配置 | 181 |
| 7.4.4 | 直流线路行波保护 | 183 |
| 7.4.5 | 直流线路的主要后备保护 | 186 |
| 7.4.6 | 直流线路故障恢复顺序 | 188 |
| 7.5 | 换流站的过电压与防护 | 189 |
| 7.5.1 | 换流站交流侧过电压 | 189 |
| 7.5.2 | 换流站直流侧过电压 | 191 |
| 7.5.3 | 换流站过电压保护 | 192 |
| 7.5.4 | 换流站过电压保护和绝缘配合 | 193 |
| 7.5.5 | 换流站防雷保护 | 193 |
| 7.6 | 直流输电线路的过电压与防雷保护 | 196 |
| 7.6.1 | 直流线路过电压 | 196 |
| 7.6.2 | 直流输电线路的耐雷性能 | 196 |
| 7.6.3 | 高压直流线路的防雷保护措施 | 198 |
| 7.7 | 直流输电系统过电压保护和绝缘配合 | 198 |
| 7.7.1 | 过电压保护和绝缘配合 | 198 |
| 7.7.2 | 过电压保护和绝缘配合的工程实例 | 199 |
| | 习题 7 | 201 |
| 第 8 章 直流输电系统的损耗计算 | | 202 |
| 8.1 | 概述 | 202 |
| 8.1.1 | 直流输电线路的损耗 | 202 |
| 8.1.2 | 接地极系统的损耗 | 202 |
| 8.1.3 | 直流换流站的损耗 | 203 |
| 8.2 | 晶闸管阀的损耗 | 205 |
| 8.2.1 | 阀损耗分量 | 206 |
| 8.2.2 | 阀的总损耗 | 208 |
| 8.3 | 其他设备的损耗 | 208 |
| 8.3.1 | 换流变压器的损耗 | 208 |
| 8.3.2 | 并联电容器组的损耗 | 210 |
| 8.3.3 | 交流滤波器的损耗 | 210 |
| 8.3.4 | 直流滤波器的损耗 | 211 |
| 8.3.5 | 平波电抗器的损耗 | 211 |

| | | |
|---------------|-----------------------|------------|
| 8.3.6 | 辅助设备和站用电的损耗 | 212 |
| 8.3.7 | PLC 滤波器的损耗 | 212 |
| 8.4 | 功率损耗计算的工程实例 | 212 |
| 8.4.1 | 贵广一回/二回直流系统的损耗计算 | 212 |
| 8.4.2 | 计算结果分析 | 213 |
| 习题 8 | | 214 |
| 第 9 章 | 高压直流输电的可靠性评估 | 215 |
| 9.1 | 基本概念 | 215 |
| 9.1.1 | 目标、任务和评估手段 | 216 |
| 9.1.2 | 可靠性准则 | 217 |
| 9.1.3 | 高压直流输电系统的可靠性指标 | 218 |
| 9.1.4 | 提高高压直流输电系统的可靠性措施 | 220 |
| 9.2 | 可靠性评估的数学基础 | 220 |
| 9.2.1 | 马尔可夫方程 | 220 |
| 9.2.2 | 频率-持续时间法 | 222 |
| 9.3 | 等值模型法 | 224 |
| 9.3.1 | 子系统及等值模型 | 224 |
| 9.3.2 | 子系统状态空间图的建立及等效模型 | 226 |
| 9.3.3 | 组合模型和整个高压直流输电系统的状态空间图 | 229 |
| 9.4 | 交直流并联输电系统的可靠性评估 | 231 |
| 9.4.1 | 运算条件 | 232 |
| 9.4.2 | 交直流并联输电系统的可靠性指标 | 236 |
| 9.4.3 | 交直流并联输电系统可靠性的蒙特卡洛模拟 | 237 |
| 9.4.4 | 计算实例 | 241 |
| 习题 9 | | 242 |
| 第 10 章 | 特高压直流输电 | 243 |
| 10.1 | 概况 | 243 |
| 10.1.1 | 特高压输电的定义 | 243 |
| 10.1.2 | 推动特高压输电发展的因素 | 244 |
| 10.1.3 | 特高压直流输电在中国的发展 | 247 |
| 10.1.4 | 特高压直流输电的技术难点 | 250 |
| 10.2 | 特高压直流系统的工程实例 | 252 |
| 10.2.1 | 主回路接线方式 | 252 |

| | | |
|---------------|--------------------|------------|
| 10.2.2 | 换流阀 | 253 |
| 10.2.3 | 换流变压器 | 256 |
| 10.2.4 | 滤波器 | 257 |
| 10.2.5 | 接地极 | 258 |
| 10.2.6 | 控制系统与保护 | 259 |
| 10.3 | 特高压直流对受端系统电压稳定的影响 | 260 |
| 10.3.1 | 电压稳定的概念 | 260 |
| 10.3.2 | 电压稳定与无功补偿 | 261 |
| 10.3.3 | 大型受端电网的电压稳定问题 | 262 |
| 10.3.4 | 特高压直流对受端系统电压稳定性的影响 | 264 |
| 10.4 | 特高压直流输电的过电压与绝缘配合 | 266 |
| 10.4.1 | 直流输电系统过电压保护 | 267 |
| 10.4.2 | 换流站电气设备的绝缘配合 | 268 |
| 习题 10 | | 269 |
| 第 11 章 | 现代高压直流输电新技术 | 270 |
| 11.1 | 电压源换流器的换流原理与柔性直流输电 | 270 |
| 11.1.1 | 电压源换流器与 IGBT | 271 |
| 11.1.2 | 柔性直流输电与传统直流输电的差异 | 273 |
| 11.1.3 | 柔性直流输电的应用 | 274 |
| 11.2 | 多端直流输电 | 277 |
| 11.2.1 | 多端直流输电的发展现状 | 278 |
| 11.2.2 | 多端直流输电的关键技术 | 279 |
| 11.2.3 | 新型多端直流输电技术的发展趋势 | 281 |
| 11.3 | 电容换相换流器 | 281 |
| 11.3.1 | 工作机理 | 282 |
| 11.3.2 | 运行特性 | 283 |
| 11.3.3 | 无功功率特性 | 285 |
| 11.3.4 | 串、并联电容器组的基波无功功率 | 288 |
| 11.3.5 | CCC 的经济补偿度 | 289 |
| 习题 11 | | 289 |
| 附录 | 部分专业词汇对照表 | 290 |
| 参考文献 | | 295 |