



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电气工程基础 上册

(第二版)

刘 笙 主编



科学出版社
www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

电气工程基础 上册

(第二版)

刘 笙 主编

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是为适应教育部 1998 年颁布的“普通高校工科专业目录以及引导性专业目录”中“电气工程及其自动化”和“电气工程与自动化”专业所编写的专业基础课教材。内容包括引论与基本概念、电力设备的理论与模型、网络分析与运行控制、暂态分析与控制以及电力系统现代技术等 5 篇,共 18 章。全书分上、下两册,上册包括第一至十章,下册包括第十一至十八章。

本教材对原有的“电力系统稳态分析”、“发电厂电气部分”、“电力工程”以及“高电压技术”等课程教材进行了有机整合,并更新了体系,增加了抽水蓄能、电压稳定、直流输电与柔性交流输电及分布式电源等新章节,反映了电力工业技术的整体性、综合性以及时代发展的趋势,构思新颖,循序渐进。

本书主要作为“电气工程及其自动化”与“电气工程与自动化”专业的基础课程教材,亦适合电力系统工程技术人员作为参考读物。

图书在版编目(CIP)数据

电气工程基础(上、下册)/刘笙主编. —2 版. —北京:科学出版社,2008
(普通高等教育“十一五”国家级规划教材)

ISBN 978-7-03-021503-1

I. 电… II. 刘… III. 电气工程-高等学校-教材 IV. TM

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 041553 号

责任编辑:巴建芬 潘继敏/责任校对:宋玲玲

责任印制:张克忠/封面设计:陈 敬

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>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2002 年 8 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2008 年 8 月第 二 版 印张: 19 3/4

2008 年 8 月第五次印刷 字数: 369 000

印数: 9 001—12 500

定价: 58.00 元(上、下册)

(如有印装质量问题, 我社负责调换〈双青〉)

编委会名单

主 编 刘 笙

编 委 朱子述 艾 芊

顾 洁 金之俭

宋依群 杨镜非

第二版前言

本书自 2002 年 8 月问世以来,已经过“电气工程及其自动化”和“电气工程与自动化”专业五年多的教学实践,为这两个专业填补了专业教材方面的空白,为电气工程专业的师生提供了比较系统的专业理论基础。在 2006 年被教育部批准为普通高等教育“十一五”国家级规划教材,故进行再版。

新版教材调整为 5 篇,共 18 章。第一篇为引论与基本概念,包括第一、二章;第二篇为电力设备的理论与模型,包括第三至六章;第三篇为网络分析与运行控制,包括第七至十章;第四篇为暂态分析与控制,包括第十一至十六章;第五篇为电力系统现代技术,包括第十七、十八章。全书分为上、下两册,上册由第一至十章组成,下册由第十一至十八章组成。

新版教材仍保持了原版的一些特点(详见第一版前言),并着重在以下方面进行了修订:(1)基础与专业结合更紧密,加强物理概念,减少过多的数学推演,更侧重于工程应用。如将输电线及变压器参数及模型合并为一章,减少了基于电磁场及电机学的参数导出过程;又如减少了过电压中的波过程叙述,将电力系统绝缘与过电压由原版的五章精简为两章,其中的中性点接地方式则列入引论。(2)理论叙述与工程实际结合更紧密。如将机电暂态与稳定性的论述与国内外的大面积停电事故联系起来;又如将直流输电应用于大区电网互联的优越性突显出来。(3)与时俱进,注入新鲜内容。如在引论中增补了我国电力工业在新世纪的发展数据。在电力设备部分增加了短路电流限制器,在直流输电部分增加了基于电压源换流器的输电方式。在有功功率与频率调整一章联系到自动发电控制。此外,增加了分布式电源一章等。

新版教材由编写组集体创作。其中第十五、十六章由朱子述编写,第六、七、十三章由顾洁编写,第四、十一、十二章由杨镜非编写,第三、十八章由艾芊编写,第一、二、五、八、九、十、十四及十七章由刘笙编写。宋依群修订了第九章并组织了全书的修订过程。刘笙任主编。上海交通大学电子电气学院张焰教授、赖晓阳副教授曾给予支持与指导,原媛同学打印了部分章节,在此一并致以衷心的感谢。

由于修订时间仓促,加之编者学术水平及教学经验不足,书中不妥之处在所难免,希望使用本书的师生、工程技术工作者提出宝贵意见。

编 者

2008 年 2 月

第一版前言

“中共中央国务院关于深入教育改革全面推进素质教育的决定(1999. 6. 13)”中指出:“调整 and 改革课程体系、结构、内容,建立新的基础教育课程体系……。改变课程过分强调学科体系,脱离时代和社会发展以及学生的实际情况,抓紧建立更新教学内容的机制,加强课程的综合性和实践性,重视实验课教学,培养学生实际操作能力。”《电气工程基础》一书就是为了贯彻“决定”的指导精神,为适应专业调整后而成立的“电气工程及其自动化”和“电气工程与自动化”专业教学需要而编写的一部专业基础教材。本书是对原有的四门专业课程内容(《电力系统稳态分析》、《发电厂电气及计算机监控》、《电力工程》、《高电压技术》)进行有机整合并更新体系的一种尝试。

本书包括6篇,共22章。第一篇为引论及基本概念,包括第一、二章;第二篇为电力设备的理论及模型,包括第三至七章;第三篇为网络分析与运行控制,包括第八至十一章;第四篇为暂态分析与控制,包括第十二至十六章;第五篇为电力系统的绝缘与过电压,包括第十七至二十章;第六篇为计算机监控及输电系统新技术,包括第二十一、二十二章。全书分为上、下两册,上册由第一至十一章组成,下册由第十二至二十二章组成。

本书具有以下特点:(1)通过新旧中国电力工业的发展对比,体现德育和智育的统一。旧中国电力工业历尽坎坷,步履蹒跚。新中国电力工业蓬勃向上,发展迅速。改革开放使电力工业腾飞。书中所列举的事实是进行爱国主义教育的生动素材。(2)知识结构反映电力工业技术的整体性及综合性。教材改革前,稳态与暂态、短过程动态与长过程动态(暂态稳定与频率变化过程)、过电压与过电流、电气设备、发电机运行等内容分割在多本教材中,既没有整体概念,又有重复现象。本教材对上述内容进行了整合。(3)知识结构反映了电力工业的时代发展趋势。本教材含抽水蓄能、电压稳定、直流输电、柔性交流输电等新内容。(4)教材配套建设。本教材与即将出版的习题集、CAI 教学辅导软件配套建设,用以提高教学效率。

本书主要作为电气工程及其自动化专业和电气工程与自动化专业的专业基础课教材。其中一些章节可因材施教,供自学用。本书亦可作为电气工程研究和技術人员的参考读物。

本教材由编写组集体创作。其中第三、四、五章由岑文辉编写,第十六、十八章由朱子述编写,第十七、十九、二十章由金之俭编写,第七、八、十四章由顾洁编写,

第十二、十三章由杨镜非编写,第二十一章由谢宁编写。第一、二、六、九、十、十一、十五、二十二章由刘笙编写。刘笙任主编。吴际舜教授审阅了全书,并提出了许多宝贵的修改意见。在编写过程中得到了我校(上海交通大学)电力学院教学改革指导委员会、李福寿教授以及陈章潮教授的热心指导。张焰教授做了大量的组织工作。上海市电力公司钱重耀高级工程师提供了有关电力工业发展的素材。在此一并向指导和帮助本书编写的各位领导、专家致以衷心的感谢。

由于编写时间仓促,加之编者学术水平及教学经验有限,书中不妥之处在所难免,诚挚希望使用本书的师生、工程技术人员提出宝贵意见。

编 者

2001年12月

目 录

第二版前言

第一版前言

第一篇 引论与基本概念

第一章 引论	1
第一节 电气技术的发展与电力系统的形成	1
一、电磁学的发展与电气技术的形成	1
二、近代电力系统的发展历程 ^[1]	3
三、电力系统的构成及其基本参量	6
第二节 我国电力工业及电力系统的发展	7
一、我国电力工业的发展	7
二、21 世纪电力发展的目标与策略	11
三、我国电力系统的发展	13
第三节 电力系统的电压等级与接线图	16
一、电力系统的电压等级及其适用范围	16
二、电力系统的接线方式	19
三、电力系统中性点的接地方式	19
第四节 发电厂及变电所的类型	20
一、发电厂的类型 ^[5]	20
二、变电所的类型 ^[5]	25
第五节 电力负荷	25
第六节 电力系统运行的特点和要求	26
参考文献	28
第二章 基本概念	29
第一节 电力与电能系统	29
一、电力系统中的能量形式	29
二、旋转电机中的能量转换	31
第二节 直流传输	32
第三节 交流传输	33
一、单相系统	33

二、交流传输与功率方向	36
三、对称三相系统	39
四、 Δ 连接的三相负载	43
五、单相分析法	45
参考文献	46

第二篇 电力设备的理论与模型

第三章 电力系统负荷的运行特性及数学模型	47
第一节 电力系统负荷与负荷曲线	47
一、电力系统负荷	47
二、负荷曲线	47
第二节 电力系统负荷模型结构与辨识方法简介	50
一、电力系统负荷模型结构	50
二、电力系统负荷模型的辨识算法简介	52
参考文献	54
第四章 输变电元件的参数及模型	55
第一节 电力线路及结构	55
一、架空线路的导线和避雷线	56
二、架空线路的杆塔	57
三、绝缘子和金具	57
四、电缆	58
第二节 三相电力线路的参数计算	58
一、输电线路的电阻	58
二、输电线路电抗	59
三、输电线路的电纳	64
四、输电线路的电导	67
第三节 三相输电线模型	68
一、输电线路方程和等值电路	69
二、输电线路常数及传输矩阵	73
三、均匀长线特性概念	75
第四节 三相变压器的参数及等值电路	77
一、单相变压器基本原理及等值电路	77
二、变压器两侧相量关系	80
三、双绕组变压器参数计算	82
四、三绕组变压器参数计算	85

五、自耦变压器参数和等值电路	89
第五节 变压器非标准变比时的等值电路	94
第六节 电力系统的标幺制	98
一、基准值的选择和标幺值计算	98
二、统一基准值的选定和标幺值换算	101
三、多电压级系统	102
参考文献	106
第五章 同步发电机的数学模型与运行特性	107
第一节 发电机的稳态数学模型及运行特性	107
一、同步发电机的功率特性	107
二、原动机调节效应	111
三、励磁调节效应	112
四、同步发电机接入系统	114
五、发电机组的运行限额	116
第二节 发电机的暂态参数与行为	119
一、同步发电机的暂态电抗与暂态电势(略去转子漏磁)	119
二、同步发电机的暂态电抗与暂态电势(计入转子漏磁)	121
三、暂态衰减率	124
四、用暂态电势和暂态电抗表示发电机	125
参考文献	127
第六章 开关电器	128
第一节 灭弧原理	128
一、电弧中带电质点的产生	128
二、电弧间隙的去游离	130
三、电弧的熄灭	131
四、交流电弧的特性及熄灭	131
五、熄灭交流电弧的基本方法	133
第二节 高压断路器	134
一、电力系统对高压断路器的要求	135
二、高压断路器的基本类型	135
三、高压断路器的基本技术参数	136
四、断路器的型号	137
第三节 隔离开关	138
一、隔离开关的用途与要求	138
二、隔离开关的典型结构	139

第四节 高压负荷开关	141
一、负荷开关的用途及要求	141
二、负荷开关的类型及其应用	142
第五节 高压熔断器	144
一、熔断器作用	145
二、熔断器特性	145
三、高压熔断器的典型结构和工作原理	146
第六节 全封闭组合电器	147
一、GIS的优越性	148
二、全封闭组合电器的缺陷和不足	148
三、全封闭组合电器实例	149
参考文献	150

第三篇 网络分析与运行控制

第七章 电力系统接线	151
第一节 发电厂和变电所的电气主接线基本要求	151
一、主接线的概念及其基本要求	151
二、主接线设计的原则	155
三、主接线设计步骤	156
第二节 发电厂、变电所主变压器选择	156
一、主变压器容量的确定	156
二、发电厂、变电所主变台数的确定	157
三、变压器负载率	158
四、主变压器型式选择	159
第三节 发电厂及变电所主接线基本形式	161
一、有汇流母线的主接线	161
二、无汇流母线主接线	171
三、国外部分大城市电网常用和推荐的变电所主接线形式	175
第四节 厂用电接线	176
一、厂用电率	176
二、厂用负荷分类	177
三、厂用电接线方式	177
四、发电厂厂用电接线形式	180
五、变电所所用电接线	181
第五节 电力网络接线	181

一、输电网接线基本要求	182
二、输电网结构	183
三、国外部分大城市的电网接线方式	184
第六节 配电网接线	186
一、配电系统构成	186
二、配电网的基本要求	186
三、配电网接线方式	187
第七节 短路电流的限制	190
一、概述	190
二、限制短路电流	190
三、限制短路电流的措施	191
参考文献	194
第八章 电力网络稳态行为特性计算	195
第一节 网络计算目的	195
第二节 电力线路的电压降落、功率损耗及电能损耗	196
一、电力线路上的电压降落	196
二、电力线路上的功率损耗	201
三、电力线路上的电能损耗	202
第三节 高压电力线路的输送能力	204
一、按导线允许持续发热条件决定输送能力	204
二、按线路允许电压损失条件决定输送能力	205
三、按线路允许功率损耗和电能损耗决定输送能力	206
第四节 简单电力网络中的潮流分布	206
一、开式电力网的潮流分布	207
二、闭式电力网的潮流分布	211
第五节 复杂电力系统潮流分布的计算机解法	221
一、电力网络方程	221
二、结点导纳矩阵的形成与修改	225
三、功率方程和变量与结点的分类	230
四、非线性代数方程组的迭代计算方法	234
五、牛顿-拉弗森法潮流计算(极坐标)	240
六、潮流计算的引申	246
参考文献	247
第九章 电力系统的有功功率与频率调整	248
第一节 负荷频率机制	248

一、负荷频率机制	248
二、频率偏移的影响	249
三、有功功率负荷的变动及其分类控制	249
第二节 电力系统的频率特性	250
一、电力系统负荷的频率特性	250
二、发电机组的频率特性	251
三、电力系统的频率特性	253
第三节 电力系统的频率调整	254
一、系统频率的一次调整	254
二、系统频率的二次调整	256
三、互联系统的频率调整	258
四、调频厂的选择	259
五、自动发电控制	260
第四节 有功功率平衡与发电厂间负荷的最优分配	261
一、有功功率平衡与备用容量	261
二、有功功率电源的最优组合	262
三、发电厂间负荷的经济分配	263
四、抽水蓄能水电厂调峰	270
参考文献	272
第十章 无功功率补偿与电压调整	273
第一节 无功功率负荷-电压机制	273
一、无功功率负荷-电压机制	273
二、电压偏移的影响	277
三、负荷分类及其对电压影响的控制	278
第二节 电力系统中无功功率的平衡与补偿	279
一、电力系统中的无功负荷与无功损耗	279
二、电力系统中的无功电源	280
三、电力系统的无功平衡与补偿	284
第三节 电力系统中的电压管理与调压方法	287
一、中枢点电压管理	288
二、电压调整方法	289
三、组合调压	298
参考文献	301

第一篇 引论与基本概念

第一章 引 论

本章主要论述近代电力系统发展中的基本规律、我国电力工业近 50 年发展的辉煌成就及新世纪发展的目标与策略;阐述“电力系统”的概念,包括它的基本参量、接线图、电压等级以及运行的基本要求。

第一节 电气技术的发展与电力系统的形成

一、电磁学的发展与电气技术的形成

19 世纪上半叶电磁学的蓬勃发展为电气技术的兴起奠定了理论基础,而电能的应用则促进了工业化国家生产力的飞速发展。

1820 年奥斯特通过实验证实了电流的磁效应,1831 年法拉第发现了电磁感应定律,这些发现很快促成了电动机与发电机的发明。电机制造与电力输送技术的发展首先是从直流开始的。为了照明的目的,原始的直流发电机连接到电力线路上采用 110~220V 直流电供给串联的弧光路灯,供电距离为 1~2km。

1882 年法国人德波里首先实现了较高电压的直流输电。他将密士巴赫小水电站 3 马力(1 马力=735.5 瓦)直流发电机的电能经过长 57km、直径为 4.5mm 的钢线敷设的架空线送至慕尼黑国际博览会,用以驱动水泵运转。送端电压为 1300V,受端约为 850V,输送功率 1.5kW,效率为 60%。

随着生产的发展,要求增大输送功率与输电距离,提高输电效率,这就要求提高输电电压,而发电机电压因避免出现电晕不可能提得很高,且直流高压输电与用户低压用电之间存在着难以克服的矛盾,使得当时的直流输电制遇到很大的挑战。经法国工程师芳建与瑞典工程师塞雷提出直流电机串联制(图 1-1),从而使得输送电压有所提高,后终因价格昂贵及运行复杂难以为继。而交流制却可使用变压器,从而简单、经济、可靠地解决了提高输电电压的问题,使得塞雷制的直流输电系统逐渐被新兴的三相交流输电制所代替。

1885 年匈牙利工程师吉里等研究出封闭磁路的单相变压器,由此实现了单相交流输电。但由于单相交流电动机启动困难,不能保证增加发电厂的容量和扩大电网的伸展长度。1889 年俄国工程师多里沃-多勃罗沃耳斯基先后发明了三相异

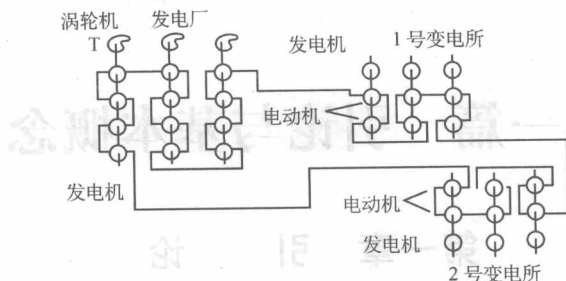


图 1-1 塞雷制的直流输电接线图

步电动机、三相变压器和三相交流制。1891年德国工程师奥斯卡·冯·密勒主持建立了最早的三相交流输电系统(图 1-2)。由鲁芬镇输电至法兰克福,输送距离是 175km,输送功率约为 130kW,输送效率为 75.2%。设在鲁芬镇的水轮发电机组转速为 150r/min,频率为 40Hz,电压为 95V,功率为 230kV·A。经升压变压器将电压升高至 15200V,经直径为 4mm 的裸铜线输电。在法兰克福的降压站,用两台变压器将电压降至 112V,其中一台供给白炽灯,另一台供电给异步电动机用以驱动一台 75kW 的水泵。上述工程的建成标志着历史上输电技术的重大突破,由此奠定了现代电力系统的输电模式。

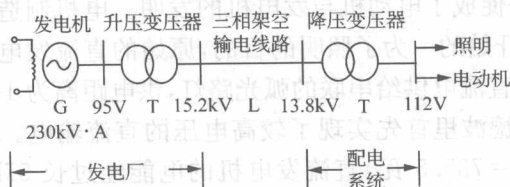


图 1-2 密勒制三相交流输电系统

电能较之其他形式的能量有许多突出的优点。电能可以集中生产分散使用、便于传输和分配、便于和其他形式的能量相互转化,可以满足生产及生活多方面的需要。电力电能技术的发展,带来了一系列技术进步:以发电、输电、配电为主要内容的电力工业发展起来了;以发电机、电动机、变压器、断路器、电线电缆等为主要内容的电机电器制造业发展起来了;以锅炉、汽轮机、水轮机为主要内容的动力机械工业发展起来了;电力的应用还促进了冶金、电镀等工业的发展。这些重大技术极大地促进了各工业国家生产力的发展。到 19 世纪最后 20 年,世界工业总产值增加了 2 倍。电气技术改变了社会的生产方式,也改变了人们的生活方式。其显著特点是电能的应用是在麦克斯韦电磁学理论直接指导下创造出来的。科学技术

对生产力的巨大指导作用开始显示出来。

二、近代电力系统的发展历程^[1]

当电源(如水电厂、坑口火电厂)远离负荷中心,要求输送容量与输电效率进一步提高时,仍然受到当时设备的制约。输电技术发展的初期特点是努力减少输电线路损耗,以提高设备的经济性。三相导线中的损耗可以表示为

$$\Delta P = 3I^2 R_L = 3 \left(\frac{P}{\sqrt{3} U_N \cos \varphi} \right)^2 \rho \frac{l}{S} = \frac{P^2 \rho \cdot l}{U_N^2 \cos^2 \varphi \cdot S}$$

式中, I 为线路电流, A; R_L 为单回线电阻, Ω ; ΔP 为三相线路的功率损耗, MW; P 为三相线路的输送功率, MW; ρ 为导线电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{km}$; l 为导线长度, km; S 为导线截面积, mm^2 ; $\cos \varphi$ 为负载功率因数; U_N 为三相线路的线电压, kV。

假定 P 、 l 、 $\cos \varphi$ 及 ρ 已经确定,那么线损就由截面积和线电压决定。也就是说,要减少线损只有增加导线截面积和提高线电压。增加导线截面积势必增加导线材料及其成本,而提高线路电压使线路费用增加较小。因而最合理的减少线损的途径就是提高电压。输电技术全部发展史的特征便是继续不断地提高线路电压。随着电压的提高,输送功率和输送距离便不断增大。

提高线路电压与线路的绝缘有着密切的关系。随后线路的绝缘成为输电发展的制约因素。针式绝缘子所能达到的极限电压为 80kV。1906 年悬式绝缘子的发明使线路电压提高到 110~120kV。这样高的电压当导线截面不够大时会剧烈增加电晕损耗,从而导致钢芯铝线的采用。在电晕损耗问题得到解决以后,线电压可以提高到 150kV。

在 110~150kV 的电压下,输送距离加大了(150~200km)。同时输送功率也增大。随着线路上的感应电压降的恶性增加,使受端电压剧烈降低,从而受端负载难以承受。但在受端用装设同步补偿机的方法就地满足感应负载的需求,基本上克服了这一困难。

在 20 世纪 20 年代,输送容量的发展要求把电压提高到 200~220kV。这使得悬式绝缘子串上的电压分布不均,靠近导线的一个绝缘子上的电压超出电晕临界电压,从而出现电晕。采用均压环削平电压可以得到圆满的线路绝缘。从而线路电压可以提高到更高的电压,如 330~500kV。

随着输送功率、输送距离、供电区域的不断扩大以及远方电源(水力发电厂、坑口火电厂)的建立,电厂不再孤立运行,而是通过传输线互联在电力网上成为电力系统。从 20 世纪 20 年代就开始了的电厂互联,方兴未艾。发展到今天区域电网之间的互联仍然前景广阔。这是由于电站并联运转及电网互联可以带来显著的技术经济效益:包括提高供电可靠性和电能质量,实现水火电资源互补,获得错峰效益,从而提高了运行经济性。以至电网互联成为电力工业发展的一大趋势。但也

带来交流输电的技术困难。这些困难使中间用大电感相连接的同步电机的并联运转成为不稳定的因素,即电厂并联运转的稳定性问题。当输电长度在 200~300km 以下的电力网中一旦发生短路或大负载冲击时,就足以使电机失步,即所谓暂态不稳定,从而发生大面积停电事故。主要方法是用继电保护装置快速切断故障段。当输电距离增大到 750~1000km 时,优先考虑的是系统的静态稳定度,即在正常运行情况下的小扰动稳定度。线路参数(电感和电容)补偿是解决这一问题的有力措施。当今世界上交流输电电压已超过 1000kV,输送距离已超过 1000km,输送功率已超过 5000MW,跨国电网中的总装机容量已超过 400GW。

为彻底解决交流输电中同步发电机并联运行的稳定性问题,工程师的思想又转向直流输电。当今的直流输电系统已经不同于当年的塞雷制,而是一种矫正直流输电系统(图 1-3),即由交流发电机经整流器、高压直流输电线及逆变器后接入受端交流系统。当今的直流输电电压已超过 ± 600 kV,输送距离已超过 1000km,输送功率已超过 3000MW。概而言之,一部输电发展史大致经历了直流传输—交流传输—交直流传输的发展过程。

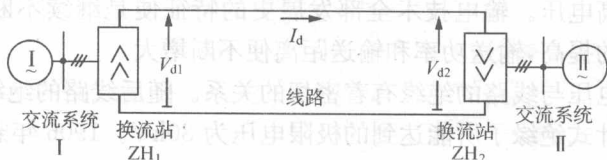


图 1-3 矫正直流输电系统

自 19 世纪 80 年代开始有了输电工程以来,已有 100 多年的历史。但电力系统的面貌已今非昔比,旧貌换新颜。从 20 世纪 60 年代以来,以电子技术(控制、通信和计算机技术)引入电力系统为标志,国内外正努力建设现代电力系统,提出了更加可靠、更加有效及更加开放的目标。

21 世纪的电力系统会有哪些发展趋势? 这要从未来社会的需求、经济、科技发展规律的大格局中来考察。大体上有以下一些趋势:

1. 能源开发与环境保护的协调

现代电力系统具有一次能源的多样性,必须因地制宜地进行开发。在具有煤矿资源的地方宜于开发燃煤电厂。传统的燃煤电厂排放 SO_2 ,致使有些地方会造成酸雨。控制燃煤电厂产生的严重污染已成为迫切的任务。现代电力系统呼唤高效清洁的能源。应用于火电厂的洁净煤技术成为当务之急。在有水力资源的地方开发水电是实现可再生能源技术最现实的措施。而在缺少资源的地域开发核电是一种清洁的发电方式,在严格的科学管理下能够保证运行的安全性。此外,近年来高效发电技术及节能技术提供了大幅度降低能耗的可能性。