

清华大学电气工程系列教材

柔性交流输电系统的原理与应用

Flexible AC Transmission Systems:
Principles and Applications

谢小荣 姜齐荣 编著

Xie Xiaorong Jiang Qirong

清华大学出版社

清华大学电气工程系列教材

柔性交流输电系统的原理与应用

Flexible AC Transmission Systems:
Principles and Applications

谢小荣 姜齐荣 编著

Xie Xiaorong Jiang Qirong

清华大学出版社

北 京

版权所有,翻印必究。举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

柔性交流输电系统的原理与应用/谢小荣,姜齐荣编著. —北京:清华大学出版社,2006.9
(清华大学电气工程系列教材)

ISBN 7-302-13500-2

I. 柔… II. ①谢… ②姜… III. 交流—输电—电力系统—高等学校—教材 IV. TM721.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 085032 号

出版者:清华大学出版社 地 址:北京清华大学学研大厦
<http://www.tup.com.cn> 邮 编:100084
社 总 机:010-62770175 客户服务:010-62776969

责任编辑:张占奎

印 刷 者:北京密云胶印厂

装 订 者:北京市密云县京文制本装订厂

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:185×260 印张:31 字数:733 千字

版 次:2006 年 9 月第 1 版 2006 年 9 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-13500-2/TM·86

印 数:1~3000

定 价:48.00 元

清华大学电气工程系列教材编委会

主 任 王赞基

编 委	邱阿瑞	梁曦东	夏 清
	袁建生	周双喜	谈克雄
	王祥珩		

序

“电气工程”一词源自英文的“Electrical Engineering”。在汉语中,“电工程”念起来不顺口,因而便有“电机工程”、“电气工程”、“电力工程”或“电工”这样的名称。20 世纪 60 年代以前多用“电机工程”这个词。现在国家学科目录上已经先后使用“电工”和“电气工程”作为一级学科名称。

大致是第二次世界大战之后出现了“电子工程”(Electronic Engineering)这个词。之后,随着科学技术的迅速发展,从原来的“电(机)工程”范畴里先后分出去了“无线电电子学(电子工程)”、“自动控制(自动化)”等专业,“电(机)工程”的含义变窄了。虽然“电(机、气)工程”的专业含义缩小到“电力工程”和“电工制造”的范围,但是科学技术的发展使得学科之间的交叉、融合更加密切,学科之间的界限更加模糊。“你中有我,我中有你”是当今学科或专业的重要特点。因此,虽然高等院校“电气工程”专业的教学主要定位于培养与电能的生产、输送、应用、测量、控制等相关科学和工程技术的专业人才,但是教学内容却应该有更宽广的范围。

清华大学电机系在 1932 年建系时,课程设置基本上仿效美国麻省理工学院电机工程学系的模式。一年级学习工学院共同必修课,如普通物理、微积分、英文、国文、画法几何、工程画、经济学概论等课程;二年级学习电工原理、电磁测量、静动力学、机件学、热力学、金工实习、微分方程及化学等课程;从三年级开始专业分组,电力组除继续学习电工原理、电工实验、测量外,还学习交流电路、交流电机、电照学、工程材料、热力工程、电力传输、配电工程、发电所、电机设计与制造以及动力厂设计等选修课程。西南联大时期加强了数学课程,更新了电工原理教材,增加了电磁学、应用电子学等主干课程和电声学、运算微积分等选修课程。抗战胜利之后又增设了一批如电子学及其实验、开关设备、电工材料、高压工程、电工数学、对称分量、汞弧整流器等选修课程。

1952 年院系调整之后,开始了学习前苏联教育模式的教学改革。电机系以莫斯科动力学院和列宁格勒工业大学为模式,按专业制定和修改教学计划及教学大纲。这段时期教学计划比较注重数学、物理、化学等基础课,注重电工基础、电机学、工业电子学、调节原

理等技术基础课,同时还加强了实践环节,包括实验、实习和“真刀真枪”的毕业设计等。但是这个时期存在专业划分过细、工科内容过重等问题。

改革开放之后,教学改革进入一个新的时期。为了适应科学技术的发展和人才市场从计划分配到自主择业转变的需要,清华大学电机系在20世纪80年代末把原来的电力系统及其自动化、高电压与绝缘技术、电机及其控制等专业合并成“宽口径”的“电气工程及其自动化”专业,并且开始了更深刻的课程体系的改革。首先,技术基础课的课程设置和内容得到大大的拓展。不但像电工基础、电子学、电机学这些传统的技术基础课的教学内容得到更新,课时有所压缩,而且像计算机系列课、控制理论、信号与系统等信息科学的基础课程以及电力电子技术系列课已经规定为本专业必修课程。此外,网络和通信基础、数字信号处理、现代电磁测量等也列入了选修课程。其次,专业课程设置分为专业基础课和专业课两类,初步完成了从“拼盘”到“重组”的改革,覆盖了比原先3个专业更宽广的领域。电力系统分析、高电压工程和电力传动与控制等成为专业基础课,另外,在专业课之外还有一组以扩大专业知识和介绍新技术、新进展为主的任选课程。

虽然在电气工程学科基础上新产生的一些研究方向先后形成独立的学科或专业,但是曾经作为第三次工业革命三大动力之一的电气工程,其内涵和外延都会随着科学技术和社会经济的发展而发展。大功率电力电子器件、高温超导线材、大规模互联电网、混沌动力学、生物电磁学等新事物的出现和发展等,正在为电气工程学科的发展开辟新的空间。教学计划既要有相对的稳定,又要与时俱进,不断有所改革。相比之下,教材的建设往往相对滞后。因此,清华大学电机系决定分批出版电气工程系列教材,这些教材既反映近10多年来广大教师积极进行教学改革已经取得的丰硕成果,也表明我们在教材建设上还要不断努力,为本专业和相关专业的教学提供优秀教材和教学参考书的决心。

这是一套关于电气工程学科的基本理论和应用技术的高等学校教材。主要读者对象为电气工程专业的本科生、研究生以及在本专业领域工作的科学工作者和工程技术人员。欢迎广大读者提出宝贵意见。

清华大学电气工程系列教材编委会

2003年8月于清华园

前言

电力输电系统已进入大系统、超高压远距离输电、跨区域联网的新阶段,社会经济的发展促使现代输电网的管理和运营模式发生变革,对其安全、稳定、高效、灵活运行控制的要求日益提高,从而急需发展新的调节手段,提高其可控性;另一方面,控制理论、大功率电力电子、计算机信息处理等技术的蓬勃发展又为输电控制手段的改善和升级换代不断提供新的可能。在这种情形下,美国 N. G. Hingorani 博士首先较完整地提出了柔性交流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)的概念。FACTS 自诞生始就受到各国电力科研院所、高等院校、电力公司和制造厂家的重视,得到了广泛的研究和迅速的推广应用,成为电力工业近 20 年来发展最快和影响最广的新兴技术领域之一。目前已发明了近 20 种 FACTS 控制器,部分已经商业化并取得良好的成效,成为解决现代电网诸多挑战的重要手段之一。从长远来看,FACTS 技术的作用将更为深远,正如 IEEE/PES 的“DC 与 FACTS 分委会”所指出的:“FACTS 与先进控制中心和整体自动化等技术所带来的非常长远的优越性已经被世人广泛认可,它们预示着电力传输系统一个新时代的到来。”

FACTS 的基本内涵是:基于采用现代大功率电力电子技术构成的各种 FACTS 控制器,结合先进的控制理论和计算机信息处理技术等,实现对交流输电网运行参数和变量(如电压、相角、阻抗、潮流等)更加快速、连续和频繁的调节,即所谓柔性(或灵活)输电控制,进而达到提高输电系统运行效率、稳定性和可靠性的目的。因此,FACTS 的基石是大功率电力电子技术,核心是 FACTS 控制器,关键是对输电网参数和变量的柔性化控制。FACTS 技术通过适当的改造,还可应用于配电和用电网络,以改善电能质量和提供用户定制电力。

笔者长期从事 FACTS 技术领域的研究工作,曾参与研制了国内首台大容量(20Mvar)STATCOM 装置,2003 年开始在清华大学开设研究生课程“柔性输配电系统(FACTS/DFACTS)的原理及应用”,本书即是在该课程讲授过程中逐渐成稿的。

全书共分 14 章。第 1 章概述 FACTS 和用户电力技术,并讨论 FACTS 和 HVDC 的

关系。第2章、第3章和第4章简要介绍作为 FACTS 和用户电力技术基石的电力电子技术,其中第2章介绍电力电子器件,第3章介绍电压型变换器,第4章介绍电流型变换器。第5章先概述并联无功补偿的作用、历史与现状以及补偿器的分类,然后重点介绍 SVC 的原理、特性、控制和应用。第6章论述 STATCOM 的基本原理、数学建模、特性分析、控制设计及应用情况。第7章对 SVC 和 STATCOM 的基本特性进行比较,研究它们的系统级控制策略共性,并讨论综合并联补偿系统。第8章介绍将 STATCOM 与蓄电池和超导磁体结合起来构成的电池储能系统和超导储能系统。第9章介绍变阻抗型串联 FACTS 控制器,重点讨论晶闸管控制串联电容补偿器(TCSC)的原理、特性、控制和应用。第10章介绍静止同步串联补偿器(SSSC)。第11章介绍静止电压/相角调节器。第12章介绍统一潮流控制器及其他复合补偿器。第13章主要介绍三类有特殊用途的 FACTS 控制器,即 NGH 次同步谐振阻尼器、晶闸管控制的制动电阻和短路电流限制器。第14章概述了用户电力技术,并重点介绍两类典型的用户电力控制器,即并联型有源电力滤波器和串联型动态电压调节器。

本书的第2章到第9章由谢小荣编写,第10章到第14章由姜齐荣编写,第1章为二人合写。本书力求体现 FACTS 领域中研究开发和工程技术人员的科研成果,它应该属于在该领域中奋力开拓的国内外科技工作者。

在本书编写过程中,选修编者所开设课程的研究生在文献检索、资料汇编和图文整理等方面给予了大量的帮助,严干贵博士阅读全书并提出了宝贵意见,同时得到了韩英铎院士、王仲鸿、陈建业、崔文进、童陆园和刘文华等教授的指导,清华大学电机工程系与柔性输配电系统研究所也给予了支持,在此一并表示诚挚的感谢。

本书可供高年级本科生和研究生使用,也可供 FACTS 领域的广大科研和工程技术人员参考。

由于作者水平有限,书中不妥和错误之处恳请广大读者批评指正。

作 者

2006年5月于清华园

目录

第 1 章 柔性交流输电系统概述	1
1.1 现代电力系统概述	1
1.1.1 输电技术的发展历史	1
1.1.2 现代电力系统的主要特点	3
1.2 输电网互联带来的挑战	5
1.2.1 电网互联带来的好处和挑战	5
1.2.2 输电网的潮流控制	5
1.2.3 提高传输容量	9
1.3 传统解决方法及其局限性	15
1.4 新的解决方法——FACTS 的诞生	15
1.4.1 FACTS 出现的背景及其必然性	15
1.4.2 FACTS 的历史、现状与前景	16
1.5 FACTS 及其控制器概述	17
1.5.1 FACTS 基本概念	17
1.5.2 FACTS 控制器的基本类型	18
1.5.3 主要 FACTS 控制器的定义	21
1.5.4 FACTS 的优越性	32
1.6 FACTS 与 HVDC	36
1.6.1 HVDC 的发展历史回顾	36
1.6.2 HVDC 的基本原理及其特点	38
1.6.3 HVDC 的特点和等价距离概念	40
1.6.4 HVDC 的传统应用领域和 FACTS 技术的影响	42
1.6.5 HVDC 与 FACTS 的关系	44
1.7 电能质量与用户电力	47

1.7.1 电能质量问题概述	47
1.7.2 用户电力及其控制器	56
参考文献	62
第2章 电力电子器件	67
2.1 概述	67
2.2 发展历史与现状	67
2.3 分类	70
2.4 特性参数	71
2.5 主要器件简述	72
2.5.1 整流器/电力二极管	72
2.5.2 双极型晶体管	73
2.5.3 功率场效应管	74
2.5.4 绝缘栅双极型晶体管	74
2.5.5 晶闸管	76
2.5.6 门极关断晶闸管	77
2.5.7 改进门极关断晶闸管	79
2.5.8 MOS 栅控晶闸管	80
2.6 FACTS 控制器中的电力电子器件	81
2.7 国内的电力电子器件发展水平	85
参考文献	86
第3章 电压型变换器	88
3.1 电力电子变换器及其分类	88
3.2 电压/电流型变换器的一些基本概念	89
3.3 电压型变换器的基本原理	90
3.4 单相变换器	91
3.4.1 单相全波变换器	91
3.4.2 单相桥变换器	93
3.5 三相二电平变换器	94
3.5.1 三相全桥变换器	94
3.5.2 变压器耦合的多脉波变换器	97
3.6 三相多电平变换器	101
3.6.1 多电平变换器的基本概念	101
3.6.2 三相三电平变换器	101
3.6.3 多电平变换器的主电路结构	105
3.7 脉宽调制技术	109
3.7.1 正弦脉宽调制	110

3.7.2 空间矢量 PWM	112
3.7.3 优化 PWM	116
3.8 多电平变换器和 PWM 技术在 FACTS 中的应用	117
3.9 如何增大变换器容量	118
参考文献	119
第 4 章 电流型变换器	121
4.1 基本原理	121
4.2 三相全波二极管整流器	122
4.3 三相全波晶闸管变换器	126
4.3.1 整流模式	127
4.3.2 逆变模式	128
4.3.3 交流电流和直流电压的谐波分析	132
4.3.4 大容量晶闸管变换器	137
4.4 基于可关断器件的电流型变换器	139
4.5 电压型变换器与电流型变换器的比较与综合	141
4.5.1 VSC 和 CSC 的比较	141
4.5.2 混合变换器概念	143
4.5.3 阻抗型变换器概念	144
参考文献	144
第 5 章 并联补偿与静止无功补偿器	146
5.1 并联补偿概述	146
5.2 并联补偿的作用	146
5.2.1 输电系统并联补偿和动态性能控制	147
5.2.2 输电线路分段和中点并联补偿	148
5.2.3 并联补偿提高系统电压稳定性	150
5.2.4 并联补偿提高输电系统暂态稳定性	152
5.2.5 并联补偿提高输电系统振荡稳定性	155
5.2.6 负荷的三相不平衡补偿	156
5.2.7 电力系统谐波的并联补偿	157
5.3 电力系统并联补偿技术的历史与现状	158
5.4 并联补偿器的种类	159
5.5 静止无功补偿器	160
5.5.1 并联饱和电抗器	160
5.5.2 晶闸管控制/投切电抗器	161
5.5.3 晶闸管控制的高阻抗变压器	167
5.5.4 晶闸管投切电容器	168

5.5.5	组合式 SVC 概述	173
5.5.6	固定电容-晶闸管控制电抗型 SVC	174
5.5.7	晶闸管投切电容-晶闸管控制电抗型 SVC	177
5.5.8	机械式投切电容-晶闸管控制电抗型 SVC	179
5.6	SVC 的控制策略简介	179
5.6.1	面向电力系统的对称控制策略	180
5.6.2	面向负荷的控制策略	183
5.7	SVC 的应用概述与工程举例	184
5.7.1	SVC 应用概述	184
5.7.2	美国 Eddy 变电站高压直流联络线的并联无功补偿	186
5.7.3	武钢硅钢厂 SVC 工程	189
	参考文献	192
第 6 章	静止同步补偿器 STATCOM	193
6.1	概述	193
6.2	STATCOM 工作原理简述	193
6.3	国产 $\pm 20\text{Mvar}$ STATCOM 的建模、分析与控制	194
6.3.1	$\pm 20\text{Mvar}$ STATCOM 简介	194
6.3.2	主电路结构	196
6.3.3	主电路建模	197
6.3.4	特性分析	207
6.3.5	控制系统	211
6.3.6	保护系统	219
6.3.7	运行与测试	220
6.3.8	关键技术创新总结	223
6.4	国内外 STATCOM 应用工程概述及实例	224
6.4.1	国内外 STATCOM 应用工程概述	224
6.4.2	日本关西电力系统 Inuyama 开关站 $\pm 80\text{Mvar}$ STATCOM	229
6.4.3	TVA 电网 Sullivan 变电站的 $\pm 100\text{Mvar}$ STATCOM 工程	235
6.4.4	NGC-ALSTOM 的 $\pm 75\text{Mvar}$ 链式 STATCOM	243
	参考文献	251
第 7 章	综合并联无功补偿系统	256
7.1	概述	256
7.2	SVC 与 STATCOM 的基本特性比较	256
7.2.1	输出特性比较	257
7.2.2	响应速度比较	258
7.2.3	损耗特性比较	259

7.2.4 有功功率调节能力	260
7.2.5 交流系统不对称时的运行特性	260
7.2.6 其他方面的比较	261
7.3 SVG 的系统控制	261
7.3.1 SVG 的一般控制策略	262
7.3.2 电压控制策略及其闭环动态模型	262
7.3.3 STATCOM 和 SVC 提高电压稳定性的比较	265
7.3.4 恒电压控制模式下 STATCOM 和 SVC 对提高传输 容量的比较	267
7.3.5 暂态稳定控制	268
7.3.6 阻尼控制	271
7.3.7 无功储备控制	273
7.3.8 多目标控制策略	274
7.3.9 SVG 控制系统构成	275
7.4 综合并联无功补偿	276
参考文献	279
第 8 章 并联储能系统	281
8.1 概述	281
8.2 电池储能系统	282
8.2.1 概述	282
8.2.2 基本原理与模型	283
8.2.3 控制系统	285
8.2.4 应用情况	287
8.3 SMES	288
8.3.1 概述	288
8.3.2 基本结构	289
8.3.3 运行特性与控制简述	291
8.3.4 在电力系统中的应用	291
8.3.5 国内外研究与应用状况	292
8.3.6 应用前景展望	295
参考文献	296
第 9 章 变阻抗型串联补偿器	300
9.1 电力系统串联补偿概述	300
9.1.1 基本概念	300
9.1.2 串联补偿的工作原理	301
9.2 串联补偿的作用	302

9.2.1	串联补偿与潮流控制	302
9.2.2	串联补偿提高系统电压稳定性	303
9.2.3	串联补偿提高输电系统暂态稳定性	304
9.2.4	串联补偿提高输电系统振荡稳定性	305
9.2.5	串联补偿抑制次同步振荡	306
9.3	电力系统串联补偿技术的历史与现状	308
9.4	可控串联补偿的方法和串联补偿器的种类	309
9.5	GTO 控制串联电容器	310
9.6	晶闸管投切串联电容器	315
9.7	晶闸管控制串联电容器	316
9.7.1	基本原理	316
9.7.2	TCSC 的电路分析	318
9.7.3	稳态基波阻抗模型	320
9.7.4	TCSC 的动态特性	322
9.7.5	U-I 工作区与损耗特性	323
9.7.6	谐波特性	325
9.7.7	同步信号	326
9.7.8	实用的 TCSC 电路结构及其参数选择	326
9.8	GCSC, TSSC 和 TCSC 次同步谐振特性	329
9.9	GCSC, TSSC 和 TCSC 的控制	331
9.9.1	控制系统概述	331
9.9.2	GCSC 的内环控制原理	331
9.9.3	TCSC 的内环控制原理	333
9.9.4	TCSC 的系统级控制概述	337
9.10	TCSC 的应用工程概述及实例	338
9.10.1	国内外 TCSC 应用工程概述	338
9.10.2	美国西部电力局 Kayenta 变电站的先进串联补偿工程	341
9.10.3	美国 BPA Slatt 变电站的 TCSC 工程	349
9.10.4	中国南方电网平果变电站 TCSC 工程	358
	参考文献	369
第 10 章	静止同步串联补偿器	376
10.1	工作原理	376
10.2	SSSC 装置对系统功角特性的影响	376
10.3	SSSC 装置的主电路	379
10.4	SSSC 装置的控制	384
10.5	SSSC 与 TCSC 的比较	386
10.6	混合静止同步串联补偿器	389

参考文献	389
第 11 章 静止电压/相角调节器	391
11.1 电压/相角调节的作用	391
11.2 电压/相角调节的方法	393
11.3 TCVR/TCPAR 的工作原理、控制方法	395
参考文献	404
第 12 章 统一潮流控制器及其他复合补偿器	406
12.1 概述	406
12.2 统一潮流控制器	407
12.2.1 工作原理	407
12.2.2 UPFC 对输电系统功率特性的影响	409
12.2.3 控制方法及其改善电力系统稳定性和传输能力的分析	412
12.2.4 示范工程	419
12.3 线间潮流控制器	422
12.4 通用型多功能 FACTS 控制器	428
参考文献	429
第 13 章 其他 FACTS 控制器	431
13.1 NGH 次同步谐振阻尼器	431
13.2 晶闸管控制的制动电阻	436
13.3 短路电流限制器	439
参考文献	444
第 14 章 DFACTS 与用户电力技术	446
14.1 有源电力滤波器	446
14.1.1 有源滤波器主电路拓扑结构	448
14.1.2 有源滤波器的控制策略	451
14.1.3 功率电路的设计	459
14.1.4 有源滤波器的技术要求	460
14.1.5 工程实例	460
14.2 动态电压调节器	463
14.2.1 动态电压调节器的结构分析	464
14.2.2 动态电压调节器的控制	467
14.2.3 DVR 设计实例	471
参考文献	475
缩略词表	477

第 1 章

柔性交流输电系统概述

1.1 现代电力系统概述

1.1.1 输电技术的发展历史

自从 1831 年法拉第发现电磁感应定律以来,电能成为主要的二次能源,至今已有 170 多年的历史。其间,电力工业多次经历革命性的发展。

1882 年,托马斯·爱迪生(Thomas Edison)在美国纽约建成了世界上第一个完整的电力系统。这是一个直流系统,由一台直流发电机通过 110V 地下电缆供给半径约为 1.5km 范围内的 59 个用户,负荷全部是白炽灯。但是,直流系统的局限性很快显露出来,由于缺少适当的直流变压技术以及直流损耗大等原因,初期的直流输电只能采用较低的电压,在较小的范围内供电。

在托马斯·爱迪生开发直流输电系统的同时,卢西恩·高拉德(L. Gaulard)和约翰·吉布斯(J. D. Gibbs)开发了交流变压器和交流输电技术。后来,乔治·西屋(George Westinghouse)获得了这些新设备在美国应用的权利,并以此为基础,于 1886 年研制出交流发电机和变压器,并在马萨诸塞州大巴灵顿(Great Barrington, Massachusetts)建立了一个由 150 个电灯构成的交流配电试验系统。1889 年,北美洲第一条单相交流输电线路在俄勒冈州(Oregon)的威拉姆特瀑布(Willamette Fall)和波特兰(Potland)之间建成并投入运行,输电电压为 4kV,距离为 21km。

1888 年,尼古拉·特斯拉(Nikola Tesla)获得了交流电动机、发电机、变压器和输电系统的若干专利。1891 年,德国劳芬电厂安装了世界上第一台三相交流发电机,并在劳芬电厂至法兰克福之间建成了世界上第一条三相交流输电线路,总长 175km,电压 15.2kV,输送功率为 200kW。

在 19 世纪 90 年代,关于采用直流输电还是交流输电的问题,曾有过激烈的辩论,但交流输电的诸多优势(如变压灵活,损耗低,交流电机简单、经济等)使其很快取得绝对优势。

输电距离和容量的增大推动了交流输电电压的不断增高。早期交流系统采用

12.44kV 和 60kV 的电压等级,1922 年增加到 165kV,1923 年增加到 220kV,1935 年增加到 287kV,1953 年提高到 330kV,1965 年提高到 500kV。1966 年,加拿大魁北克水电局(Hydro Quebec)的第一条 765kV 线路投入运行。

为规范应用,工业界已将高压交流(high voltage alternative current, HVAC)输电的电压等级标准化,西方国家规定高电压(HV)等级有 115kV、138kV、161kV 和 230kV,超高压(EHV)等级有 345kV、500kV 和 765kV。我国的高电压等级为 110kV、220kV 和 330kV,超高压等级为 500kV 和 750kV。

从 20 世纪 60 年代中期始,前苏联、美国、日本和欧洲一些国家着手研究特高压(UHV,不低于 1000kV 的交流和 800kV 的直流)输电技术。前苏联曾建成了从西伯利亚(Siberia)经哈萨克斯坦(Kazakhstan)到乌拉尔(Ura)的 1150kV 输电工程;日本东京电力公司(Tokyo electric power company, TEPCO)也曾试建了两条 1000kV 输电线路;美国 AEP 公司则在其 765kV 输电线路研究 1500kV 特高压输电技术。但由于各种原因,这些国家先后放弃或搁置了特高压交流输电技术的研究,已建成的特高压输电线路也多降压至 500kV 或更低运行。

20 世纪 80 年代末期,随着电力电子技术、信息技术和控制理论的进一步发展和综合应用,出现了柔性交流输电系统(flexible AC transmission system, FACTS)的概念。它旨在提高交流电网的可控性,实现灵活的潮流控制和最大化电网的传输能力,它将推动交流输电系统向一个更高级的阶段发展。

虽然在电力工业发展初期,直流输电不敌交流输电而在很长一段时间内默默无闻,但对其技术的研究一直在进行,特别是自 20 世纪 50 年代开始,随着汞弧阀换流技术的逐步成熟和应用,使得高压直流(high voltage direct current, HVDC)输电重新进入人们的视野,并与 HVAC 输电并肩发展。第一个现代商用的 HVDC 输电工程于 1954 年在瑞典建成,在随后的 20 多年里,共投运了 10 多个基于汞弧阀换流的 HVDC 输电工程。20 世纪 60 年代中后期发展起来的晶闸管及其换流技术为 HVDC 的发展注入了新的更大的活力。1970 年前后,第一个采用晶闸管的变换器组成功应用于瑞典 Gotland 直流输电系统的扩展工程;1972 年,首个采用晶闸管的全固态商业化 HVDC 系统,即伊尔河(Eel river)背靠背(back to back, B2B)工程投入商业运行。随着直流环流设备价格的降低、尺寸的缩小以及可靠性的提高, HVDC 输电的应用逐步扩大,因在大容量远距离架空线和水下/地下输电以及异步联网等领域具有独特优势而受到青睐。到 2004 年, HVDC 诞生 50 年之际,世界上已成功投运 95 项商业 HVDC 工程,总传输容量达到 70GW,最高电压等级达到 $\pm 600\text{kV}$ 。随着更新电力电子器件和输电材料的产生,加上制造和控制等技术的发展, HVDC 技术也处于快速变革之中,如对更高电压等级($\pm 800\text{kV}$ 、 $\pm 1000\text{kV}$ 和 $\pm 1200\text{kV}$)的 HVDC 输电技术的研究,以及较近发展的轻型 HVDC(HVDC light/plus)输电技术,将不断提高 HVDC 的输电能力,使其具有更好的性能和更高的可靠性。

FACTS 和 HVDC 都是基于电力电子技术而发展起来的,它们之间既有共同点,又有区别,是现代电力工业中重要的两种互补性支撑技术,它们与新兴的信息技术、通信技术以及先进的控制理论相结合,将不断推动输电技术的完善和发展。