

国家电网公司建设运行部
中国电力科学研究院

组编

灵活交流输电技术

在国家骨干电网中的
工程应用



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

灵活交流输电技术

在国家骨干电网中的 工程应用

国家电网公司建设运行部 组编
中国电力科学研究院



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书根据灵活交流输电技术研究和应用的特点,结合典型 FACTS 技术研究和工程应用的实例,通过总结这些工程在科研、设计、工程管理、设备选型与制造、建设施工、试验调试和生产运行等方面积累的宝贵经验,全面、系统、客观、准确的反映工程建设情况,对于今后国产化灵活交流输电技术研究和应用具有指导意义。本书分为技术篇和工程篇两大部分,技术篇主要介绍灵活交流输电技术的理论、不同技术原理和系统研究等内容。工程篇主要结合具体 FACTS 技术的典型应用工程,介绍工程应用相关的系统研究、工程设计、试验技术、调试技术以及系统运行和维护等内容。

本书可供输变电工程技术人员、现场运行和维护人员工作中学习参考,也可供高等院校相关专业的教师及研究生学习参考。

图书在版编目(CIP)数据

灵活交流输电技术在国家骨干电网中的工程应用/国家电网公司建设运行部,中国电力科学研究院组编. —北京:中国电力出版社, 2008

ISBN 978 - 7 - 5083 - 7397 - 3

I. 灵… II. ①国…②中… III. 交流-输电技术-研究
IV. TM721.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 091844 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 http://www.cepp.com.cn)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008 年 10 月第一版 2008 年 10 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 19 印张 458 千字

印数 0001—3000 册 定价 50.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究

编写组及专家组名单

编 写 组

组 长 喻新强

副组长 梁旭明 邱宇峰

成 员 丁燕生 于坤山 武守远 汤广福 文卫兵 郭 强
荆 平 任丕德 张国威 张 皎 班连庚 王祖力
但 刚 王宇红 邓占锋 滕乐天 权白露 贾跟卯
汪 权 张福生 崔虎宝 王 轩 周 飞 贺之渊
赵 刚 吴小颖 任孟干 周胜军 徐桂芝 申 红
戴朝波 项祖涛 孙华东 张正凯 雷 晰

专 家 组

组 长 周孝信

成 员 刘泽洪 丁 扬 沈 江 李 秦 张会平 徐 政
赵 贺 林海雪 林集明 朱家骝

序

电能是当今社会最重要的能源形式，电网是电能传输的唯一途径，是电能生产者（发电站）和电能消费者（用电负荷）之间的桥梁。随着计算机的普遍应用和信息化社会的到来，整个社会对电能的依赖程度日益增高，电力工业已经成为世界各国经济和社会发展的基础，是其现代化水平的重要标志之一。

自 20 世纪 80 年代美国电力科学研究院的 N. G. Hingorani 博士提出灵活交流输电系统（FACTS）的概念后，受到世界各国电力科研工作者的重视，并积极投入相关技术的研发，先后开发和投运了 TCSC、STATCOM、UPFC、SSSC 等多种不同类型的 FACTS 装置，在各国的电力系统中发挥了重要的作用，推动了大功率电力电子技术在电力系统中应用的发展。

FACTS 技术已经成为电力工业 20 多年来发展最快、影响最广的新兴技术领域，它促进了电网的跨区域、跨国界互联，促进了电力资源在最大地理范围内的优化配置，使传统的电力系统开始进入现代电力系统的时代。

《灵活交流输电技术在国家骨干电网中的工程应用》一书选择了近年来在我国电网陆续投运的几种 FACTS 装置，包括静止无功补偿器、晶闸管控制串联电容器、可控并联电抗器和静止同步补偿器等，分别对它们的原理、系统分析、工程设计、装置集成、系统调试等进行了介绍和经验总结。本书编者在第一时间、花费大量心血，把工作中的心得和体会融汇在字里行间，它是我国第一本系统介绍 FACTS 原理、系统分析、试验和结合实际工程应用的书籍。相信本书将为我国电力科研工作者和工程技术人员从事 FACTS 技术研究和应用起到积极作用，将为更多电力新技术在电网中的应用打下基础。

祝愿更多有志于投身电力新技术研究和产品开发的科技工作者，能从本书中吸取营养，共同为推动电力科技进步作出贡献！

中国科学院院士、中国电力科学研究院总工程师 周孝信

前 言

为提高我国电网的科技水平,解决输配电网输电功率瓶颈问题,提高我国输配电网的暂态和静态稳定能力,促进跨流域的水火互济和更大范围的资源优化配置,满足“西电东送”和区域电网异步互联等迫切工程技术需求,为解决可再生能源并网、分布式发电并网、孤岛供电、城市电网供电等难题,走中国特色的电力发展之路,必须把建设坚强、灵活、可控的电网放在重要的位置。研究和实施灵活交流输电技术及其工程应用,符合中国国情和中国经济发展规律,符合市场需求,符合电力工业发展规律和电网技术发展方向。

近年来,在国家电网公司的积极倡导和支持下,实施了一系列灵活交流输电技术工程,这些工程极大地推动了国内电力电子技术的发展,并为国内科研、企业的自主创新提供了良好的平台。甘肃成碧 220kV 可控串补工程、鞍山红一变 100Mvar 以及川电东输 SVC 工程、忻都开关站和江陵换流站 500kV 可控并联电抗器工程等多项国产化示范工程的相继建成和投入运行,对于推动灵活交流输电技术在我国电网中的应用,提高我国现有电网的输送能力,改善电网结构都具有重要意义。

灵活交流输电技术的概念是 20 世纪 80 年代由美国电力专家提出,随后由具有实力的专业制造公司进行工程示范和推广应用。进入 21 世纪,灵活交流输电技术开始在国内电力系统中应用。国内外近 30 年的研究和工程应用,使相关技术得到不断的发展和完善。其中,控制技术由集成电路控制走向全数字控制,电力电子功率器件也从低电压、小电流向高电压、大电流,半控到全控的发展过程。新型基于 DSP 的控制、保护系统,高电压、大电流半控和全控器件的采用,紧凑化和采用水冷等高效冷却方式的电力电子阀,使 FACTS 技术在实际应用中可以进行不同方案的优化设计或优化组合。电网的发展,特别是用户侧对电网可靠性和供电质量的更高要求,更加速了电力系统对灵活交流输电技术的需求。

总结国内 FACTS 技术从研发到工程应用的过程,归纳为以下几个方面:

一、自主创新在灵活交流输电技术研究和工程示范中得到充分体现

1. 自主完成关键技术研究、系统分析研究和成套设计

目前所实施的灵活交流输电技术和工程,是在国家电网公司统一规划和领导下进行的,技术上以中国电力学科研究院为主,相关设备制造厂商、工程设计、工程施工、工程调试等单位密切配合,保证了项目从研究到实施的有序进行。

在所有国产化的灵活交流输电工程中,积极开展相关技术的基础理论研究、关键技术研究 and 示范工程工作,开展了大量的专题研究,编制工程订货技术规范 and 工程调试大纲。

2. 自主设计制造了完全自主知识产权的晶闸管阀及控制保护系统

依靠国内的力量和多年积累的工程经验,从满足灵活交流输电设备(包括可控串补、静止无功补偿器、可控并联电抗器等)对性能、可靠性的特殊需求,开发了具有配置灵活、运行可靠和适应电网运行要求的控制保护和阀系统。在研发和应用中,成功解决了大功率晶闸管串联、触发、保护和冷却,在复杂系统运行条件下的保护与控制等关键技术难题。

3. 独立自主完成灵活交流输电工程设计

国内的几大电力设计院分别承担了可控串补、静止无功补偿器、可控并联电抗器等工程的设计工作。工程的顺利建成并投入运行，达到了设计的各项技术指标，证明了工程设计是成功的，也标志着我国已具备自主独立设计灵活交流输电工程的能力。

4. 敢于创新和敢于迎接挑战

为了满足我国电网建设对可控并联电抗器的需要，自主设计制造了磁控式可控并联电抗器和分级式可控并联电抗器等两种不同技术原理的可控并联电抗器本体及其控制和保护系统。

5. 在充分研究和分析的基础上精心准备进行系统调试

系统调试是全面检验灵活交流输电装置工程的设计、设备制造和施工质量、发现和解决遗留问题的重要环节。在国家电网公司相关部门的直接领导下，从调试方案的制订到调试过程都有严格的质量控制。通过组织分系统调试和系统调试，为工程的顺利投入运行创造了良好的条件。

在系统调试中，一次系统设备经受了系统不同稳态负荷条件的考核，也经受了各种操作和交流系统人工短路试验的考核。

二、“基础理论研究、关键技术研究 and 示范工程”三步走策略加上研发与工程的紧密结合创造了电力尖端技术走向实用的新模式

在灵活交流输电技术自主研发的过程中，以科技项目为契机，项目承担单位及时启动相关技术的基础理论研究和关键技术研究，结合示范工程，开展工程化的系统研究、标准和功能规范制订、系统集成技术和装置的设计制造等工作。“基础理论研究、关键技术研究和示范工程”三个方面有机结合的“三步走策略”，清晰地将从研发到工程应用的过程划分为三个阶段，根据不同的具体项目和工程的特点，统一协调三个阶段的关系。对于工程比较紧急的项目，则采取阶段重叠的方式，以最大限度地缩短项目周期。在这一研发思路的指导下，许多重要 FACTS 装置从立项到工程投运的时间不到两年，最短时间为一年。

三、面向工程的应用技术开发

解决灵活交流输电技术的工程化应用是应用技术开发的主要内容。以坚实的理论研究、关键技术研究为基础，总结国内外工程应用中经验，结合电网对可靠性的特殊要求和电网应用的特点，进行面向工程的应用技术开发，主要包括设备的选型规范、土建和电气安装设计、运行维护规程等工作。

本书根据灵活交流输电技术研究和应用的特点，结合典型 FACTS 技术研究和工程应用的实例，通过总结这些工程在科研、设计、工程管理、设备选型与制造、建设施工、试验调试和生产运行等方面积累的宝贵经验，全面、系统、客观、准确地反映工程建设情况，对于今后国产化灵活交流输电技术研究和应用具有指导意义。本书分为技术篇和工程篇两大部分，技术篇主要介绍灵活交流输电技术的理论、不同技术原理和系统研究等内容；工程篇主要结合具体 FACTS 技术的典型应用工程，介绍工程应用相关的系统研究、工程设计、试验技术、调试技术以及系统运行和维护等内容。

本书技术篇首先是对灵活交流输电技术进行概括和论述、介绍不同类型灵活交流输电技术及设备和灵活交流输电技术应用的系统研究；工程篇则结合国内典型灵活交流输电技术的实际应用工程，进行相关系统、装置参数、系统控制策略、试验、调试等的论述。全书共两

篇 8 章, 分别为:

第一章为灵活交流输电概论, 论述现代电力系统发展所面临的挑战和对灵活交流输电技术的需求、灵活交流输电技术在电网中的作用、国内外相关技术的发展现状等。同时还对灵活交流输电技术中广泛采用的电力电子器件及其最新进展进行了论述。

第二章为灵活交流输电技术, 对到目前为止国内外比较典型的几种灵活交流输电技术及装置的原理、结构、主要技术参数和应用情况进行了阐述。

第三章为系统应用研究, 主要论述不同类型 FACTS 技术在电网中应用、所需进行的系统研究内容, 包括系统和 FACTS 装置的仿真建模、系统分析、暂态分析和控制策略等。

第四章详细分析和论述晶闸管控制串联电容补偿装置 (TCSC) 在伊冯工程中的应用, 包括系统分析、工程设计、装置试验、工程现场调试和系统试验、系统运行维护等内容。

第五章介绍静止无功补偿器 (SVC) 装置在川电东输工程中的典型应用, 重点介绍四个工程中的万县 SVC 应用案例, 主要包括系统分析、工程设计、装置试验、工程现场调试和系统试验、系统运行维护等内容。

第六章介绍磁控式可控并联电抗器 (MCSR) 在三峡送出工程中江陵换流站的应用。重点结合该典型工程中, MCSR 作为线路安装可控并联电抗器运行所面临的特殊问题展开论述, 主要包括系统分析、工程设计、装置试验、工程现场调试和系统试验、系统运行维护等内容。

第七章介绍分级式可控并联电抗器 (SCSR) 在忻都开关站工程中的应用。结合该工程 SCSR 作为母线安装可控并联电抗器运行、在系统调试期间作为线路电抗器进行人工接地试验等特殊问题展开论述, 主要包括系统分析、工程设计、装置试验、工程现场调试和系统试验、系统运行维护等内容。

第八章介绍静止同步补偿器 (STATCOM) 在上海黄渡变电站的应用。结合该工程采用链式 STATCOM 的特点, 对该工程中涉及的系统分析、工程设计、装置试验、工程现场调试和系统试验、系统运行维护等内容进行论述。

本书的第一章由丁燕生、汤广福、王祖力等人编写, 第二章由武守远、文卫兵、张国威等人编写, 第三章由班连庚、郭强、申红等人编写, 第四章由荆平、王宇红、崔虎宝等人编写, 第五章由张皎、任丕德、周胜军等人编写, 第六张由王轩、周飞、但刚等人编写, 第七章由于坤山、徐桂芝、贾跟卯、张福生等人编写, 第八章由贺之渊、邓占锋、滕乐天等人编写。在本书编写过程中, 喻新强、梁旭明、邱宇峰三位组长给予了高度的重视与支持, 先后四次组织编写组、专家组成员集中审稿, 对本书的结构、内容、各章节的篇幅等进行了详细、认真地讨论, 阅读了全书并作出了重要指导。

由于编者水平有限, 书中难免存在不妥和错误之处, 欢迎广大读者批评指正。

编 者

2008 年 10 月

本书常见文字符号

电压符号

$U、u$	电压的通用符号
E_q	电源电动势、发电机电动势
U_{dc}	逆变器直流侧电容电压

电流符号

$I、i$	电流的通用符号
I_A	阳极电流
I_K	阴极电流
I_C	电容电流、集电极电流
$I_Q、i_Q$	无功电流

阻抗符号

R	电阻、电阻器
C	电容、电容器
L	电感、电感器、电抗器
Z	阻抗
Z_C	输电线路特性阻抗
X	电抗
B	电纳
G	电导

功率符号

S	视在功率
P	有功功率
P_0	线路自然功率
Q	无功功率
Q_C	线路电容充电功率

其他符号

δ	功角、阻抗角
α	晶闸管触发角
θ	晶闸管导通角
γ	电气长度
β	相位常数
ω	角速度
φ	正弦波形初始相位角
K	串补补偿度
T_b	并联电抗器补偿度
p. u.	标么值
M	调制比

目 录

序

前言

本书常见文字符号

第一篇 技 术 篇

第一章 灵活交流输电概论	2
第一节 现代电力系统面临的挑战	2
第二节 灵活交流输电技术概述	3
第三节 灵活交流输电技术可以解决的系统问题	12
第四节 国外灵活交流输电技术的发展情况	14
第五节 我国灵活交流输电技术的发展及趋势	15
参考文献	17
第二章 灵活交流输电技术	18
第一节 概述	18
第二节 静止无功补偿器 (SVC)	19
第三节 晶闸管控制串联电容器 (TCSC)	28
第四节 可控并联电抗器 (CSR)	35
第五节 故障电流限制器 (FCL)	41
第六节 静止同步补偿器 (STATCOM)	46
第七节 静止同步串联补偿器 (SSSC)	49
第八节 统一潮流控制器 (UPFC)	51
参考文献	55
第三章 系统应用研究	56
第一节 概述	56
第二节 晶闸管控制串联电容器 (TCSC)	57
第三节 静止无功补偿器 (SVC)	66
第四节 可控并联电抗器 (CSR)	71
第五节 故障电流限制器 (FCL)	74
第六节 静止同步补偿器 (STATCOM)	80
第七节 静止同步串联补偿器 (SSSC)	85
第八节 统一潮流控制器 (UPFC)	91
参考文献	97

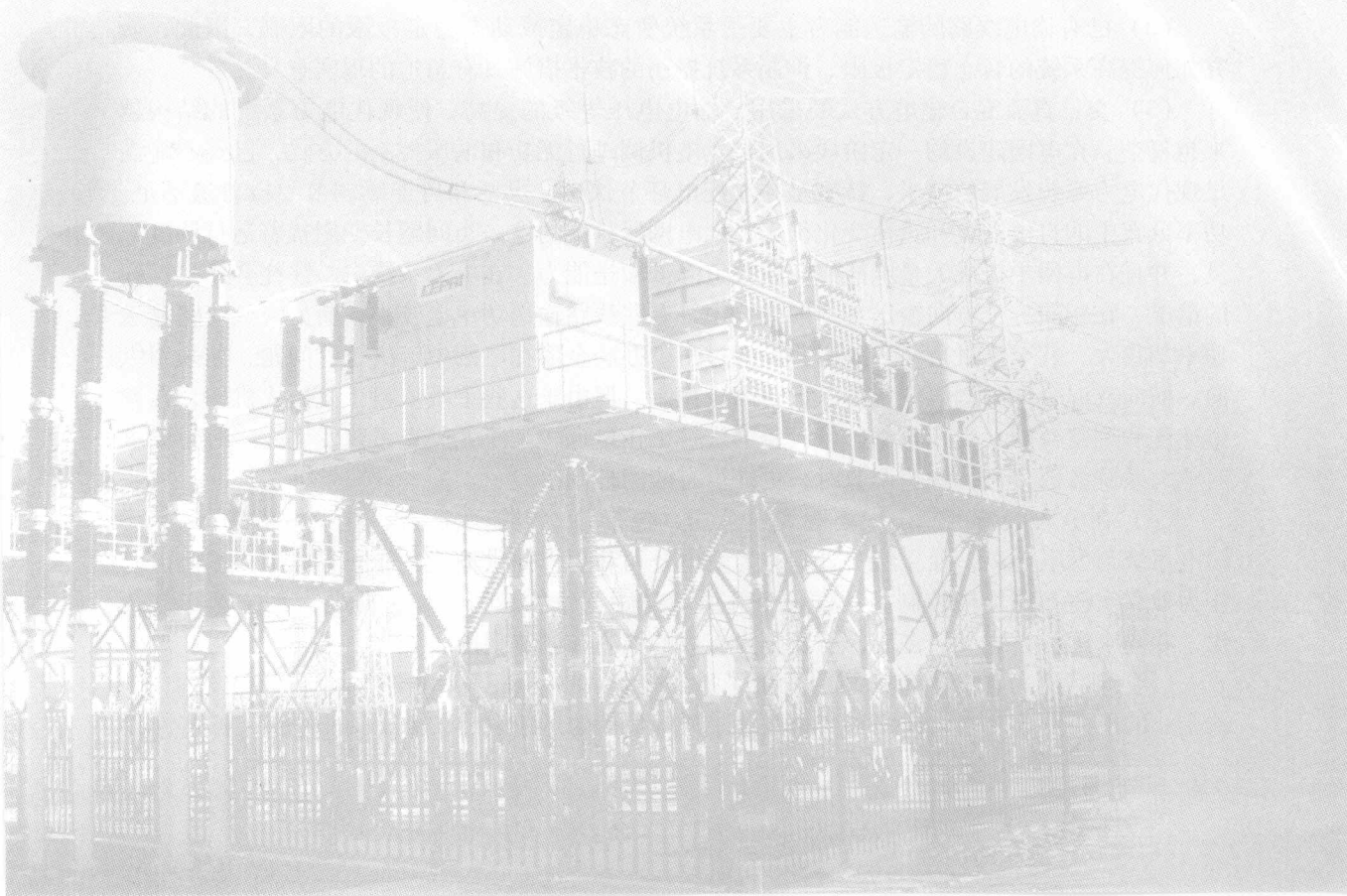
第二篇 工 程 篇

第四章 晶闸管控制串联电容器 (TCSC)	100
第一节 伊冯可控串补工程简介	100
第二节 TCSC 系统设计	101
第三节 伊冯 TCSC 工程设计	103
第四节 TCSC 装置试验技术	118
第五节 伊冯 TCSC 的 RTDS 仿真试验	124
第六节 TCSC 工程调试	132
第七节 TCSC 系统运行维护	142
第八节 TCSC 系统运行性能监测与经济性评估	151
第五章 静止无功补偿器 (SVC)	152
第一节 川渝电网加装 SVC 工程概述	152
第二节 川渝电网加装 SVC 系统研究	153
第三节 万县 180Mvar SVC 工程设计	161
第四节 SVC 试验技术	165
第五节 SVC 系统的运行维护	171
第六节 数字动模试验	174
第七节 SVC 接入系统性能检验	180
第八节 社会及经济效益分析	186
第六章 磁控式并联电抗器 (MCSR)	189
第一节 MCSR 工程简介	189
第二节 MCSR 系统设计	190
第三节 MCSR 工程设计	193
第四节 MCSR 本体结构及工艺	204
第五节 MCSR 试验技术	205
第六节 工程调试	210
第七节 MCSR 系统运行与维护	217
第八节 经济及社会效益分析	229
第七章 分级式可控并联电抗器 (SCSR)	232
第一节 忻都分级式 SCSR 系统概况	232
第二节 分级式 SCSR 系统	233
第三节 忻都 SCSR 工程设计	237
第四节 忻都 SCSR 试验	249
第五节 忻都 SCSR 工程调试	253
第六节 忻都 SCSR 系统运行维护	258
第八章 链式静止同步补偿器 (STATCOM)	262
第一节 工程概况	262

第二节	工程设计	264
第三节	STATCOM 试验技术	277
第四节	系统调试和性能测试	283
第五节	系统运行与维护	285
附录	灵活交流输电技术主要名词术语	287

在国家骨干电网中的工程应用
灵活交流输电技术

第一篇 技术篇



第一章 灵活交流输电概论

第一节 现代电力系统面临的挑战

现代电力系统是迄今为止最大和最复杂的人造系统之一，它由发电厂、变电站、输电系统、配电系统和各种用电负荷等组成。现代电力系统的主要特点是：超大容量机组、超高压甚至特高压输电电压等级、远距离输电、大规模交直流互联电网、极高的自动化运行水平、市场化运营机制等。在全球范围内，能源和经济发展的不平衡以及电力市场的发展，促进了大区电网的互联，电网通过互联形成了越来越大的现代电力系统。经济上，电力系统互联可以实现最大地理范围内电力资源的优化配置，发挥大电网互联的错峰调峰、水火互济、跨流域补偿调节、互为备用和调节余缺等联网效益，实现网间功率交换，在更大范围内优化能源配置方式。同时，大型互联电网还能提高供电可靠性。

随着电力系统规模的不断增大、输电电压等级的提高、非线性负荷和对电能质量敏感负荷的增长，电力系统面临新的挑战，表现在以下方面：

(1) 由于城市化建设速度加快，用电需求增加而输电线路走廊受限；公众和社会对环境问题日益关注，获得新建线路走廊更加困难。现有输电线路输送能力不足和新建线路走廊困难的矛盾日益突出。

(2) 已有输电线路的输送能力主要受系统暂态稳定或动态稳定极限的限制，因此，研究如何提高系统的暂态稳定极限、抑制系统振荡的技术措施具有急迫的现实意义。

(3) 交、直流混合输电方式的采用，输电电压等级的提高，使现代电力系统的结构越来越复杂。在电网建设的一定阶段采用在发电机侧进行无功和电压控制的方式，已经不能满足现代电力系统发展的需求，特别是在输配电环节快速、灵活和可连续调节手段普遍不足。功率分布中的自由潮流和负荷变化很大，大电网运行中的这一类问题长期困扰着运行调度人员，并且在电网中造成大量电能损耗或被迫降低输送能力。在电力系统中，往往会发生这样的情况，在相同一个方向输送功率的线路中，有些线路输送功率比较小，而另一些线路输送功率却很大，甚至已过负荷。人们曾设想不少办法企图在电网中解决这些问题，如采用纵向、横向或混合型的调压变压器以进行潮流控制。但由于这些手段依赖于机械式机构，在调整速度和调整额度上受到限制，且设备的维护工作量也较大。尤其当系统发生故障时，要求对电力系统各部分进行快速调节时，更缺少有效的控制手段。

(4) 在电力市场机制下，不同发电公司，包括独立电能生产者，在发电侧实行竞争，输电系统与发电分离，独立经营管理，为发电公司和用户提供输送电能服务，用户侧也可以作为独立实体参加价格控制。这样一个开放和鼓励竞争的运行环境，使电力系统运行复杂化，并要求运行方式灵活多变，需要更为有效的控制和调节手段。

(5) 现代电力系统中负荷结构发生了重大变化。一方面，诸如超高功率变流设备、钢铁企业的电弧炉、电气化铁路和变频调速装置等负荷的迅速发展，由于其非线性、冲击性以

及不平衡等用电特性，使电网的电压波形发生畸变，或引起电压波动和闪变及三相不平衡，甚至引起系统频率波动等，对供电电能质量造成严重的“污染”或干扰；另一方面，近代的科技进步又促进生产过程的自动化和智能化，对供电质量提出更高更严格的要求。属于保证主电网可靠性和电能质量的技术措施必然要在主网的设计和运行中解决。当然，对配电网中发生的异常或因主网受干扰而影响配电网向用户供电中产生的异常，则应在配电网或用户侧采用新技术措施加以解决。

（6）随着电力系统快速发展，特高压技术应运而生。交流特高压存在充电功率有效灵活控制、有功功率长距离输送以及潜供电流限制措施等诸多技术问题需要解决。

我国的一次能源分布不平衡，水利资源主要集中在长江、黄河上游及西南；煤炭资源主要集中在内蒙古、山西、陕西，而主要的负荷集中在华北京津地区、华东以上海为龙头的长江三角洲及华南珠江三角洲一带。这种情况下，国家作出了“西电东送”的战略决策。至2020年我国西电东送的总容量将超过1.2亿kW，主要体现在远距离（1500~2000km）交直流混合输电上。目前已经形成华北、华中和华东三个特大型的同步电网。电力系统是一个国家的关键基础设施，是最重要的能源供应系统。国家对电力系统建设的投入巨大，而输电网的投资占电力投资的一半。如何在保证电网安全稳定运行的同时，大幅度提高电网资源的利用效率，克服输电瓶颈，实现电力系统资源的优化配置，将成为亟待解决的战略性关键技术问题。

综上所述，我国电网目前面临的挑战性的问题是：西电东送由于距离遥远和线路走廊的限制，要实现大规模的输电面临诸多技术困难；大区电网强互联的格局尚未形成，因而全局的电力资源优化配置、优化调度还难以实施，南北互供的电量还很少；电网建设滞后，电网中输电瓶颈增多，电能质量问题不容乐观，威胁电网安全；土地已成为稀缺资源，取得线路走廊和变电站站址日益困难。我国电网面临的主要技术问题如表1-1所示。这些问题依靠传统电力技术是无法有效解决的，超高压大功率灵活交流输电技术的快速发展为解决这些挑战性问题创造了有利条件。

表 1-1 我国电网面临的主要技术问题

电力系统现状	研究领域
大容量、远距离输电： ◆ 提高线路输电能力 ◆ 保证电网安全稳定	电网安全 供需平衡 大容量输电
满足用户对电能质量的要求： ◆ 供电可靠性 ◆ 电能质量	电能质量
节能降耗的要求： ◆ 降低网损 ◆ 提高电力驱动设备效率	节能降耗

第二节 灵活交流输电技术概述

灵活交流输电技术（FACTS）这一概念是20世纪80年代由美国电力科学研究院

(EPRI) 的 Narain G. Hingorani 博士提出, 并于 1988 年和 1994 年的 CIGRE 会议上对 FACTS 概念及其包含的 FACTS 装置概念进行重新定义。1997 年, IEEE PES 学会正式公布的 FACTS 定义是^[1]: 装有电力电子型和其他静止型控制装置以加强可控性和增大电力传输能力的交流输电系统。FACTS 装置的目的是通过利用大功率电力电子器件的快速响应能力, 实现对电压、有功潮流、无功潮流等的平滑控制, 从而在不影响系统稳定性的前提下, 提高系统传输功率能力, 改善电压质量, 达到最大可用性、最小损耗、最小环境压力、最小投资和最短的建设周期的目标。

电力电子技术及元器件是在半导体问世后才发展起来的, 它沿着两个方向发展: 一个是集成电路, 发展成为电子技术, 以信息处理为主要对象; 另一个是大功率器件, 发展成电力电子技术, 以能量处理为主要对象。20 世纪 70 年代以后, 这两种技术又逐渐互相结合, 形成新型全控型电力电子器件。80 年代出现智能化功率集成电路, 使功率和信息的处理合二为一, 从而促进了“第二次电子革命”, 在科技发展中产生了巨大的技术作用和经济效益。性能不断改进的电力电子元件的快速发展为在电力系统中应用创造了可依靠的支持条件。反过来, FACTS 技术又对电力电子器件提出了更高的要求, 成为推动电力电子器件不断创新的动力之一。

一、电力电子器件

与电路中处理信息的电子器件相比, 电力电子器件最大的特点就是功率大, 它工作时的处理对象是电能, 工作环境是高电压、大电流。电力电子器件一般只工作在开关状态, 它要求导通时近似于短路, 管压降接近于零; 阻断时近似于开路, 电流几乎为零。器件两端电压由外电路决定, 就像普通晶体管的饱和与截止状态一样。

经过几十年的发展, 电力电子器件已经形成几大门类, 各门类下的器件经过几代产品交替更新后, 产品的耐压越来越高, 通流能力越来越强, 开关速度也越来越快。根据可控程度可以把电力电子器件分成如下两类:

(1) 半控型器件。20 世纪 50 年代, 美国通用电气公司发明的硅基晶闸管的问世, 标志着电力电子技术的开端。此后, 晶闸管的派生器件越来越多, 到了 70 年代, 已经派生了快速晶闸管、逆导晶闸管、双向晶闸管、不对称晶闸管等半控型器件, 功率越来越大, 性能日益完善。但是由于晶闸管本身工作频率较低 (一般低于 400Hz), 大大限制了它的应用。此外, 关断这些器件需要强迫换相电路, 使电力电子装置的整体重量和体积增大, 效率和可靠性降低。

(2) 全控型器件。随着关键技术的突破以及需求的发展, 早期的小功率、低频、半控型器件发展到现在的超大功率、高频、全控型器件。由于全控型器件可以控制开通和关断, 大大提高了开关控制的灵活性。自 20 世纪 70 年代后期以来, 可关断晶闸管 (GTO)、电力晶体管 (giant transistor, GTR) 及其模块相继实用化。此后, 各种高频全控型器件不断问世, 并得到迅速发展。这些器件主要有电力场效应晶体管 (metaloxide semiconductor field transistor, MOSFET)、绝缘栅双极晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT)、MOS 控制晶闸管 (MCT)、集成门极换流晶闸管 (IGCT)、注入增强栅晶体管 (injection enhanced gate transistor, IEGT) 等。

下面简要介绍在 FACTS 领域应用或研究较多的几种大功率电力电子器件, 然后对功率集成电路和基于新材料的电力电子器件进行简要介绍。

(一) 晶闸管

晶闸管管芯是个 PNPN 四层半导体, 形成 3 个 PN 结 J1、J2、J3, 如图 1-1 (a) 所示。外部有阳极 A、阴极 K 和门极 G 3 个接线端子, 符号如图 1-1 (b) 所示。

当晶闸管的阳极与阴极之间加上正向电压时, 若在其门极和阴极之间施加电触发脉冲产生一定的门极电流时, 即可开通晶闸管; 晶闸管刚从断态转入通态并移除触发信号后, 只要流过的电流达到擎住电流值, 仍能自动维持导通 (即所谓的擎住效应, latching effect); 如果晶闸管导通电流下降到维持电流以下, 将自行关断, 通常擎住电流比维持电流大 2~3 倍, 此类晶闸管为电触发晶闸管 (electric trigger thyristor, ETT)。如果驱动晶闸管的门极信号采用光脉冲则称之为光触发晶闸管 (light trigger thyristor, LTT), 光触发晶闸管使器件具备较好的动态性能, 并集成了击穿二极管 (breakover diode, BOD) 保护器件, 可以有效简化晶闸管驱动电路, 提高系统可靠性。

晶闸管的主要特点是开通可控、耐高电压、导通电流大、通态压降低、过负荷能力强等。自问世以来, 晶闸管的容量提高了近 3000 倍, 现在许多国家已能稳定生产 8kV/4kA 的晶闸管, 并在高压直流输电 (HVDC)、SVC、TCSC、大功率直流电源及超大功率高压变频调速应用方面占有十分重要的地位。预计在今后若干年内, 晶闸管仍将在高电压、大电流应用场合得到继续发展。国内制造企业已完全具备生产基于 5in 的 ETT 和 LTT 的能力, 当前正在瞄准特高压直流输电工程应用, 研发基于 6in 的 ETT 元件。

(二) 门极可关断晶闸管

门极可关断晶闸管 (gate-turn-off thyristor, GTO) 是晶闸管的一种派生器件, 但可以通过在门极施加负的脉冲电流使其关断, 因而属于全控型器件。GTO 的电压、电流容量较大, 与普通晶闸管接近, 因而在兆瓦级以上的大功率场合有较多的应用, 并直接促使了 FACTS 概念的诞生和发展。

GTO 与普通晶闸管一样, 是 PNPN 四层半导体结构, 外部引出阳极、阴极和门极。但和普通晶闸管不同的是, GTO 是一种多元的功率集成器件, 内部包含数十个甚至数百个共阳极的小 GTO 元, 这些 GTO 元的阴极和门极则在器件内部并联在一起。这种特殊结构是为了便于实现门极控制关断而设计的, 它的结构、等效电路和符号如图 1-2 所示。

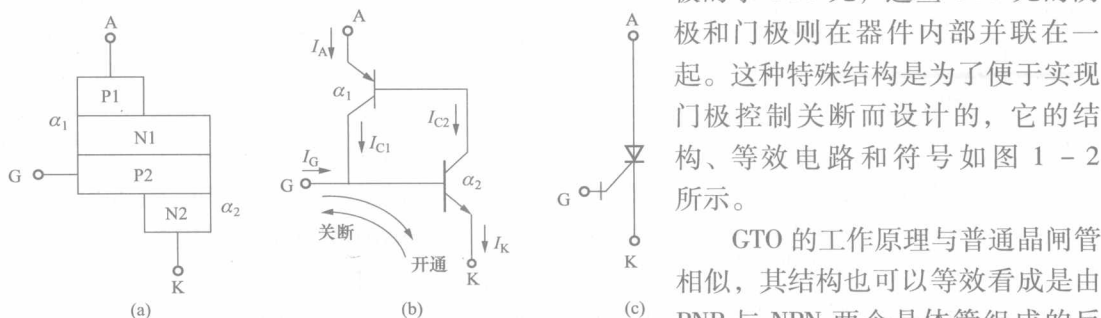


图 1-2 GTO 的结构、等效电路、符号

(a) 结构; (b) 等效电路; (c) 符号

GTO 的工作原理与普通晶闸管相似, 其结构也可以等效看成是由 PNP 与 NPN 两个晶体管组成的反馈电路, 如图 1-2 (b) 所示。两个等效晶体管的电流放大倍数分别