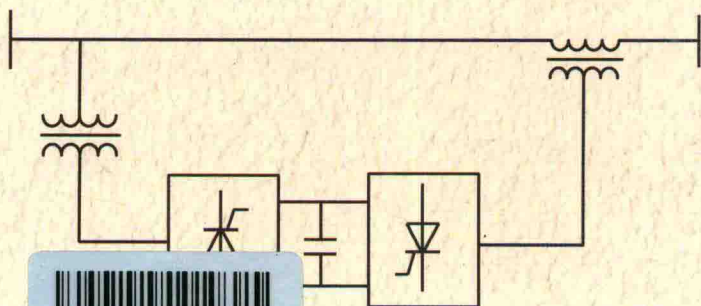


Unified Power Flow Controller
Technology and Application

统一潮流控制器 技术及应用

(第二版)

国网江苏省电力公司 © 编著



SEU 3066195



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

Unified Power
Technology

Control
System

统一潮流控制器 技术及应用

(第二版)

国网江苏省电力公司 © 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书依托统一潮流控制器在电网中应用相关项目的研究成果,以统一潮流控制器技术及模块化多电平(MMC)技术为主线,阐述了统一潮流控制器的原理和作用、关键设备、控制保护系统、建模与仿真技术、过电压与绝缘配合、调试试验技术、国内外的统一潮流控制器工程的运行方式 and 应用效果,在国内工程介绍的基础上,结合工程实际,重点补充了南京 220kV 西环网 UPFC 工程的调试和运行情况,以及苏州南部电网 500kV UPFC 工程的实施方案。

本书可为从事 FACTS 装置研究、工程设计、建设、调试、运行维护的技术人员提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

统一潮流控制器技术及应用 / 国网江苏省电力公司编著. —2 版. —北京: 中国电力出版社, 2016.12

ISBN 978-7-5198-0201-1

I. ①统… II. ①国… III. ①统一潮流控制器
IV. ①TM712

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 320660 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京九天众诚印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015 年 12 月第一版

2016 年 12 月第二版 2016 年 12 月北京第二次印刷

787 毫米×1092 毫米 16 开本 14.75 印张 312 千字

印数 2001—4000 册 定价 60.00 元



敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪

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 委 会

- 编委会主任 尹积军
- 编委会副主任 张 龙 黄志高 陈 庆 陈 刚
- 编委会成员 王海林 陈宏钟 许 扬 凌 峰 朱 斌
陆 晓 黄 清 蔡 榕 张 强 吴 争
吴浩然 沈红宇 许海清 薛 祥 李九虎
李 群 杨晓梅 杨志新 罗建裕 魏 旭
王 旭 王建明 李 杰 黄 强 陈松林
黄俊辉 吴 峻
- 编写组组长 陈 刚
- 编写组副组长 许海清 李 群
- 编写组成员 刘建坤 费益军 袁宇波 周志成 陶风波
田 杰 袁晓冬 刘 洋 张小易 高 磊
周 前 陈 静 李 鹏 史明明 谢天喜
张宁宇 朱鑫要 马 勇 林金娇 卫 鹏
孔祥平 吴 鹏 李建生 赵 科 王 业
董云龙 潘 磊 祁万春 臧海祥 黄浩声
赵静波 陈 亮 吴益明 刘 琦



前言

《统一潮流控制器技术及应用》是全面系统地介绍统一潮流控制器运行原理、关键设备、建模仿真、工程调试等方面的专业书籍，自2015年第一版问世以来，受到了广大电力工作者和高校科研人员的欢迎和认可。

2016年以来，统一潮流控制器技术及应用又有了很大的发展，尤其是自南京西环网统一潮流控制器（UPFC）示范工程投运以来，国网江苏省电力公司在UPFC实际运行方面积累了较为丰富的经验，并且在充分借鉴南京西环网UPFC示范工程相关经验的基础上，又开展了苏州南部电网500kV UPFC示范工程的建设工作，并计划于2017年底投运。为继续分享UPFC建设和运行方面的经验，国网江苏省电力公司组织了对本书的修编再版工作。

第二版基本保留了原版的体系架构，以增补为主，共设9个章节，在第一版的基础上，将第8章“统一潮流控制的工程应用”拆分为第8章“国外统一潮流控制器的工程应用”和第9章“统一潮流控制器在国内的工程应用”，新的第8章保留了原章节国外工程介绍的部分内容，并具体阐述了各工程的运行方式和应用效果。第9章则在国内工程介绍的基础上，结合工程实际，重点补充了南京220kV西环网UPFC工程的调试和运行情况，以及苏州南部电网500kV UPFC工程的实施方案，对先进技术在实际生产中的推广应用具有较大的参考价值。

本书在修编的过程中，得到了社会各界的广泛关注，在此，我们还要向所有关心、支持和参与本书编著的领导、专家、学者、编辑出版人员表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促，编者水平有限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请阅读此书的广大读者继续给予批评指正。

编者

2016年12月



第一版前言

安全可靠的电网不仅对于能源安全有着重要的作用，更是社会经济平稳、有序发展的重要保障。随着电网负荷的不断增长和电网规模的不断增大，电网运行特性日益复杂，对电网提高控制能力的需求逐渐增加，通过新技术、新设备的应用提高电网运行控制水平，从而充分提升已有电网供电能力，成为未来电网发展的必经之路。

灵活交流输电技术（FACTS）作为电力系统控制和电力电子技术相融合的产物，由于其先进的电网控制特性、显著提高输电能力和改善电力系统静态特性的能力，以及对电网不同运行方式的广泛适应性，在电网中的实际应用日益增多，该领域成为电力行业近 20 年来发展最快和影响最广的新兴技术领域之一。统一潮流控制器（UPFC）是当前灵活交流输电技术的制高点，具有灵活控制系统潮流、提高电网传输能力及改善系统稳定性等多种功能，其概念在 1992 年首次提出之后，迅速成为学术界的研究热点。国内外学者围绕统一潮流控制器进行了全方位的研究和探索。

我国在统一潮流控制器工程应用方面起步较晚，但近年来在 UPFC 的理论研究、设备制造、运行控制等方面也取得了一系列技术突破。从 2010 年开始，国网江苏省电力公司专业技术人员依托相关国家电网公司实验室和科技攻关团队，开始了统一潮流控制器在电网应用方面的探索，为后续应用奠定了基础。2013 年，为解决南京 220kV 城市电网中关键输电断面输电能力不足、输电通道难以建设的难题，国网江苏省电力公司在充分开展前期科研和技术论证的基础上，提出建设南京西环网统一潮流控制器（UPFC）示范工程，此工程是世界上首座基于模块化多电平（MMC）技术的 UPFC 工程，代表了当今世界灵活交流输电技术的最高水平，该工程由我国自主设计、研发和建设，是我国在灵活交流输电技术领域取得的又一世界级创新成果。

由于此前统一潮流控制器在我国应用尚属空白，目前国内缺乏全面系统地介绍统一潮流控制器运行原理、关键设备、建模仿真、工程调试等方面的

专业书籍，因此迫切需要一本关于其技术和应用的专著，系统介绍其工作原理、技术发展及应用情况，以促进先进技术在实际生产中的推广应用，为此，国网江苏省电力公司组织相关技术人员在 2015 年撰写并出版了本书第一版。

自 2015 年底南京西环网统一潮流控制器（UPFC）示范工程投运以来，国网江苏省电力公司在 UPFC 实际运行方面积累了较为丰富的经验，并且在充分借鉴南京西环网 UPFC 示范工程相关经验的基础上，又开展了苏州南部电网 500 千伏 UPFC 示范工程的建设工作，并计划于 2017 年底投运。为继续分享 UPFC 建设和运行方面的绝验，国网江苏省电力公司组织了对本书的修编再版工作。

本书基本保留了原版书的体系架构，以统一潮流控制器技术及 MMC 技术为主线，通过对现有研究和实践成果的总结，系统阐述了统一潮流控制器的原理和作用、关键设备、控制保护系统、建模与仿真技术、过电压与绝缘配合、调试试验技术等内容，同时增加了一个章节，重点对统一潮流控制器的工程实践和运行情况进行了介绍。

在本书编写过程中，得到了南京南瑞继保电气有限公司的大力支持与帮助，本书初稿得到了浙江大学徐政教授，东南大学赵剑峰、蒋平教授、河海大学卫志农、潘文霞教授和陈谦副教授，湖南大学孙秋芹副教授等专家的审阅，专家们提出了很多宝贵的修改意见，在此表示衷心的感谢。

由于编写时间仓促，编者水平有限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请读者批平指正。

编 者

2015 年 11 月



目录

前言

第一版前言

第一章 概述	1
第一节 灵活交流输电系统技术发展历程	1
第二节 统一潮流控制器研究现状	8
参考文献	11
第二章 统一潮流控制器的原理和作用	14
第一节 统一潮流控制器的技术原理	14
第二节 统一潮流控制器的控制功能分析	19
第三节 统一潮流控制器在电网中的优化配置	22
参考文献	28
第三章 统一潮流控制器的关键设备	30
第一节 换流器	30
第二节 桥臂电抗器	40
第三节 并联侧启动电阻	42
第四节 串联变压器	44
第五节 并联变压器	47
第六节 直流场设备	49
第七节 晶闸管旁路开关	52
第八节 换流阀冷却系统	55
参考文献	56
第四章 统一潮流控制器的控制保护系统	58
第一节 控制策略	58
第二节 保护策略	74
第三节 控制保护系统	89
第四节 统一潮流控制器改善系统稳定性的控制策略	100
参考文献	103
第五章 统一潮流控制器的建模与仿真技术	106
第一节 统一潮流控制器的稳态建模方法	106

第二节	统一潮流控制器的机电暂态建模方法	112
第三节	统一潮流控制器电磁暂态建模与仿真技术	116
第四节	统一潮流控制器混合仿真技术	143
	参考文献	147
第六章	统一潮流控制器的过电压与绝缘配合	150
第一节	统一潮流控制器过电压	150
第二节	统一潮流控制器避雷器配置及绝缘配合	162
	参考文献	168
第七章	统一潮流控制器系统的调试试验技术	170
第一节	统一潮流控制器的主设备试验技术	170
第二节	统一潮流控制器控制保护系统闭环试验技术	177
第三节	统一潮流控制器工程现场系统调试技术	181
第八章	国外统一潮流控制器的工程应用	185
第一节	美国 Inez 变电站 UPFC 工程	185
第二节	美国 Marcy 变电站 CSC 工程	188
第三节	韩国 Kangjin 变电站 UPFC 工程	192
第四节	国外工程应用小结	197
	参考文献	197
第九章	统一潮流控制器在国内的工程应用	199
第一节	南京西环网 220kV UPFC 示范工程	199
第二节	苏州南部电网 500kV UPFC 示范工程	213
附录	基于 RTDS 的电力电子小步长仿真模型	219
	缩略语表	224

概 述

第一节 灵活交流输电系统技术发展历程

灵活交流输电系统 (flexible alternative current transmission systems, FACTS) 自被美国电力科学研究所 (electric power research institute, EPRI) 的 Hingorani N G^[1] 作为一个整体网络控制理念的概念提出以来, 已在电力系统中被广泛应用于提高系统稳定性、控制功率流、校正功率因数、降低网损。灵活是指在电力传输系统变化或运行条件不同时系统的自适应能力及在变化下维持足够稳态和瞬态稳定裕量的能力。而 FACTS 装置是基于高速电力电子器件的一个大家族, 能够通过吸收或发出有功、无功功率显著提高电网运行性能。

一、FACTS 技术出现的背景

FACTS 技术的良好发展势头来自于良好的背景条件, 这些条件可概括为电网运行控制的客观需求及电力电子技术发展的必然趋势两个方面。

(一) 电网运行控制的客观需求

现代电力系统已经发展成为大规模的交直流互联电网, 区域内发电和负荷分布不均衡、输变电设备潮流分布不均匀问题日益突出, 设备重载和轻载问题并存, 而受制于重载设备的承受能力, 电网供电能力难以得到充分利用。此外, 由于城市规划的限制, 线路改造和电网扩建难度日益增大, 而受系统结构复杂、运行任务繁重、电能质量要求高以及市场和环保等多种条件制约, 对输电网的可靠经济运行的要求越来越高。传统的控制手段缺乏且自动化水平较低, 是限制电力传输的重要因素, 也是可能发生电力系统崩溃的潜在隐患^[2]。

FACTS 作为一种新的解决方法, 在控制电网潮流、提高系统稳定性以及传输容量方面带来了前所未有的契机, 且 FACTS 装置是逐渐加入现有交流输电系统, 与现行的交流输电系统并行发展。FACTS 装置可以在现有设备不做重大改动的前提下, 针对局部电网的具体问题, 采用经济有效的大功率电力电子技术, 以渐进的方式改变电力系统的面貌, 因而得到广泛认可和迅速发展。

(二) 电力电子技术发展的必然趋势

从历史上看, 每一代新型电力电子器件的出现都会带来一场电力电子技术的革命, 而将电力电子器件用于高压输电系统则被称为继微电子技术之后“硅片引起的第二次革

命”，在科技发展中产生了巨大的技术作用和经济效益。

作为 FACTS 技术的核心，电力电子技术在 20 世纪 40 年代末期曾沿着两个方向发展：其一是集成电路，发展成微电子技术，以信息处理为主要对象；其二是大功率器件，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，这两种技术又逐渐融合，形成新型的全控型电力电子器件。

FACTS 是在归纳已有电力电子技术产品的研制和运行经验的基础上自然形成的概念。早在 FACTS 概念形成以前，已有多种后来也属于 FACTS 控制器的装置处于研制或应用中，典型的如静止无功补偿器 (static var compensator, SVC)、静止同步补偿器 (static synchronous compensator, STATCOM) 及次同步谐振阻尼器 (NGH-subynchronous resonance damper, NGH-SSR damper) 等，积累了大量的技术经验。FACTS 概念的提出，不仅归纳了这些新型装置共同的技术基础和可能的电网控制功能，而且推广了其技术思路，进一步预见和指导多种新 FACTS 控制器的研制和应用，推动 FACTS 成为一个崭新的电力技术领域。

二、FACTS 中的电力电子器件

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。根据可控制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，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。自 20 世纪 70 年代后期以来，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，可关断晶闸管 (gate-turn-off thyristor, 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 (metal oxide semiconductor field transistor, MOSFET)、绝缘栅双极晶体管 (insulated gate bipolar transistor, IGBT)、MOS 控制晶闸管 (MOS controlled thyristor, MCT)、集成门极换流晶闸管 (intergrated gate commutated thyristor, IGCT)、注入增强栅晶体管 (injection enhanced gate transistor, IEGT) 等。典型电力电子器件的分类及用途如表 1-1 所示，国内外电力电子器件的功率等级如表 1-2 所示。

表 1-1 典型电力电子器件的分类及用途

器件名称	英文名称	用途
普通晶闸管	thyristor	整流、逆变
门极可关断晶闸管	gate-turn-off thyristor (GTO)	大容量逆变

续表

器件名称	英文名称	用途
功率场效应晶体管	metaloxide semiconductor field transistor (MOSFET)	DC/DC 变换
绝缘栅双极晶体管	insulated gate bipolar transistor (IGBT)	整流、逆变、DC/DC 变换
集成门极换相晶闸管	intergrated gate commutated thyristors (IGCT)	大容量逆变

表 1-2 国内外电力电子器件的功率等级

器件名称	国外器件功率等级	国内器件功率等级
普通晶闸管	12kV/1kA, 8kV/6kA	6.5kV/3.5kA
门极可关断晶闸管	9kV/2.5kA, 6kV/6kA	4.5kV/2.5kA
功率晶体管	模块: 1.8kV/1kA	模块: 1.2kV/400A
功率场效应晶体管	200V/60A (2MHz) 500V/50A (400MHz)	1kV/35A
绝缘栅双极晶体管	单管: 4.5kV/1kA 模块: 3.5kV/1.2kA	单管: 1kV/50A 模块: 1.2kV/200A
集成门极换相晶闸管	单管: 6kV/6kA	

三、典型 FACTS 装置分类及原理

FACTS 技术是一种利用大功率半导体开关器件完成能量变换、传输和控制的技术。它是随着高压、大电流电子开关器件的研制成功和现代控制技术的进步而迅速发展起来的高技术领域。FACTS 技术面向电力系统, 实现了大功率电力电子开关器件的制造技术、现代控制技术和传统电网技术有机的融合, 已经成为灵活交流输电技术的核心。这项技术的进一步发展将导致电力系统发生革命性的变化, 大幅度提高输电线路的输送能力和电力系统的安全稳定水平, 大大提高系统的可靠性和运行灵活性, 甚至可以用大功率的电子开关取代传统的机械断路器, 使传统的电力系统变得像电子线路一样便于控制。FACTS 装置按照结构型式可分为并联型、串联型和串并联混合型。

(1) 并联型 FACTS 包括静止无功补偿器 (SVC)、静止同步补偿器 (STATCOM)、磁控式并联电抗器 (MCR)、分级式可控并联电抗器 (SCSR)、晶闸管控制电抗器 (TCR)、晶闸管投切电容器 (TSC)、晶闸管投切电抗器 (TSR) 等, 下面以 SVC、STATCOM 为例介绍其基本原理。

1) SVC 通过调节输出容性或感性电流控制电力系统的特定参数。SVC 已成功应用于同步电机暂态稳定性的提高, 是解决我国电网输电瓶颈的一个重要技术手段。SVC 适用于各级电网, 可改善电网的输电能力及电能输送效率, 提高电网稳定性及电能质量。但当电压降低时, SVC 会出现补偿容量严重不足、晶闸管控制电抗器 (TCR) 产生谐波干扰等问题 (在 STATCOM 中得到有效解决)。晶闸管控制的 SVC 结构型式如图 1-1 所示。

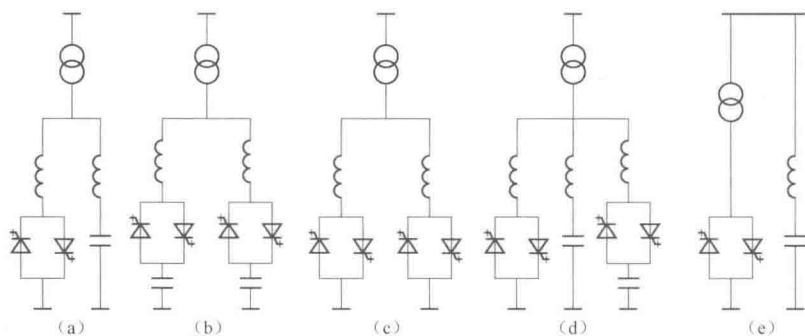


图 1-1 晶闸管控制 SVC 的结构型式

(a) TCR; (b) TSC; (c) TSR; (d) TCR/TSC; (e) TCT

2) STATCOM 是并联于系统上一种静止同步发生器，通过控制容性或感性输出电流，提高电力系统的安全稳定性，是 FACTS 家族的核心装置，与传统的补偿装置相比，其体积小、低电压特性好、响应速度快，因而成为目前无功功率控制领域的研究热点。基于 STATCOM 阻尼特性，可通过不同的方法设计 STATCOM 的阻尼控制器，如极点配置、多变量反馈线性化、 H_∞ 控制（具有很好鲁棒性的设计方法）和智能控制等。2006 年，我国第一套 50Mvar 链式 STATCOM 在上海投运。STATCOM 基本结构如图 1-2 所示。

(2) 串联型 FACTS 包括晶闸管控制串联电容器 (TCSC)、晶闸管投切串联电容器 (TSSC)、静止同步串联补偿器 (static series synchronous compensator, SSSC)、故障电流限制器 (FCL)、晶闸管控制调相器 (TCPAR) 等，下面以 TCSC、SSSC、FCL 为例介绍其基本原理。

1) TCSC 是基于常规串补技术发展的 FACTS 装置，用晶闸管控制电抗器 (TCR) 部分抵消串联电容的容抗值以获得连续可控的感性和容性阻抗，在提高系统稳定性、线路输送能力的同时，还可以有效抑制次同步谐振、阻尼系统低频振荡，减少线路损耗。我国于 20 世纪 90 年代开始研究 TCSC 技术，并于 2004 年底顺利投运第一个国产化 TCSC 工程——甘肃碧成 220kV 工程。迄今为止，我国自主研发并应用于国内外输电线路上的 TCSC 装置已逾 33 套，总容量高于 10.87Gvar。TCSC 基本机构如图 1-3 所示。

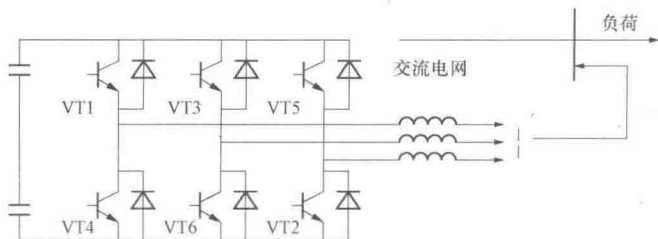


图 1-2 STATCOM 基本结构图

2) SSSC 无外部电源支撑，其输出电压与线路电流矢量正交，且电压控制与电流无关，通过增减线路阻抗上的感性电压降以控制传输功率。SSSC 还可包括瞬态额定储能设备，通过补偿附加瞬时有功来增强系统动态性能，同时使传输线路阻性电压降会发生

短时的增减。目前世界上还没有单独的 SSSC 装置,但其已广泛应用于电力系统阻尼功率振荡、潮流控制等研究。SSSC 结构如图 1-4 所示。

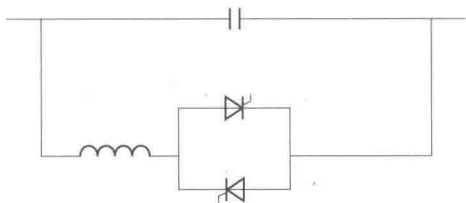


图 1-3 TCSC 基本结构图

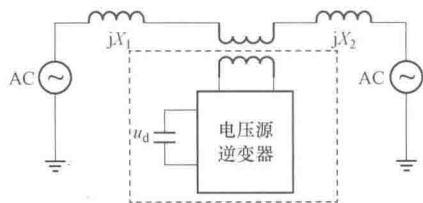


图 1-4 SSSC 结构示意图

3) FCL 的基本原理是在串联电抗器限流的基础上发展起来的,克服了传统串联电抗器限流的缺点,在系统正常运行时,开关装置处于闭合状态,FCL 无电抗投入,而只在系统故障时开关快速断开投入电抗器进行限流。从近十年发展来看,FCL 分机械开关型、电力电子型和新型材料型三大类。2009 年 12 月,由中国电力科学研究院和国网华东分部联合研制的基于晶闸管保护型串联补偿装置(thyristor protected series compensation, TPSC)技术的短路电流限制器在华东电网 500kV 瓶窑变电站顺利投运,将短路点的总短路电流限制到 47kA 以下,此装置的投运可改善超高压系统的暂态稳定性、减小发电机的最大摇摆角、抑制系统的电压波动。FCL 原理如图 1-5 所示。

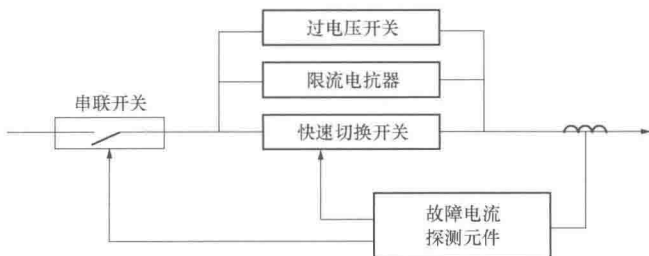


图 1-5 FCL 原理图

(3) 串并联混合型 FACTS 包括统一潮流控制器 (UPFC)、线间潮流控制器 (IPFC)、可转换静止补偿器 (CSC) 等,以 UPFC、IPFC 为例介绍其基本原理如下:

1) UPFC 是将 STATCOM 和 SSSC 的直流侧连接组合,实现了在 SSSC 串联输出端与 STATCOM 并联输出端之间有功功率的双向流动,基本结构如图 1-6 所示。在无外部储能的条件下,能提供串联线路有功和无功电流补偿。通过注入相角无限制的串联电压,UPFC 可独立控制传输线路的电压、阻抗和传输角,还可以有选择地控制线路上的有功和无功功率潮流,UPFC 也可独立提供可控并联无功补偿,因而 UPFC 是最有发展前景的 FACTS 控制器。目前,世界上已成功投运了 4 套 UPFC 装置,分别为美国 Inez 变电站 UPFC 工程、美国 Marcy 变电站 CSC 工程、韩国 Kangjin 变电站 UPFC 工程和中国南京西环网 UPFC 工程。

2) IPFC 是应用电力电子技术的最新发展成果,基本结构如图 1-7 所示,它由多个 DC/AC 换流器组成,换流器的直流侧连接在一起,每个换流器都可以通过连接的线路向

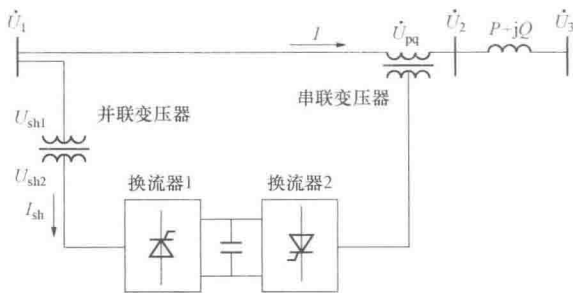


图 1-6 UPFC 基本结构

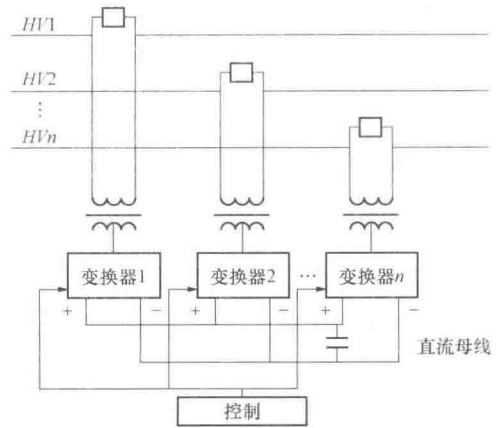


图 1-7 IPFC 基本结构图

直流链路的电容提供有功。在这种结构中，每个换流器为连接的线路提供 SSSC 串联补偿的同时，还可以实现在补偿线路之间传输有功，以达到灵活控制电网潮流的目的，从而大幅度提高输电线路的输送能力和电力系统的稳定性和可靠性。

四、FACTS 在电力系统中的作用

FACTS 控制技术具有响应速度快、无机械运动部件并可以综合系统广泛的信息等优点，明显优于传统的电力系统潮流和稳定控制措施。它可以充分利用现有电网资源和实现电能的高效利用，实现对电力系统电压、线路阻抗、相位角、功率潮流的连续调节控制，从而大幅度提高输电线路输送能力和电力系统稳定水平，降低输电成本。FACTS 对电力系统的作用具体表现在以下四个方面。

(1) 提高线路的输送能力。采用 FACTS 技术可使输电线路克服系统稳定性的限制要求，将线路的输送功率极限大幅度提高至接近导线的热极限，这样可减缓新建输电线路的需要和提高已有输电线路的利用，不仅节约输电成本和占地，而且有利于环境保护。

(2) 提供无功电压支撑。在电力系统的电压稳定中，若无功功率不足，就需要进行无功功率的分层、分区就地补偿。SVC、STATCOM、UPFC 等 FACTS 装置比传统的固定电容器、同步调相机等更快速、连续、灵活地补偿电力系统的无功功率。同时还能进行无功优化管理，达到最优分布。对于提高系统电压质量，减少电能损耗，保证系统安全可靠运行具有重要的意义。

(3) 提高暂态稳定水平。暂态失稳是由于电力系统受到电气设备开断等大的干扰所引起的，FACTS 装置可以在电网发生或即将发生故障时提供快速、平滑的调整来进行动态潮流控制和电压支持，有助于防止连锁性事故的扩大，减少事故恢复时间及停电损失，在减轻或避免电网潜在故障、防止电压崩溃等方面作用明显，大大提高了系统的暂态运行性能。

(4) 助力现代大电网互联。现代电网的发展方向是全国联结成一个大电网，甚至跨国互联。互联最主要的目的就是 will 低成本的电力输送到各级用户，FACTS 技术带来的灵

活控制潮流和提高稳定性的能力为大型电网的运行提供了技术保障,从而实现能源的优化配置,降低了整个电力系统的热备用容量,提高了电力设备的使用效率,降低了发电成本。因此,FACTS技术在电网中的广泛应用,可以解决的主要技术问题就是解决互联大电网的稳定、我国西电东送瓶颈和负荷中心动态无功支撑等问题。各种FACTS装置相对于传统办法可以解决系统发生具体问题的对应关系如表1-3所示。

表 1-3 FACTS 技术可以解决的系统问题

应用	系统中的问题	解决原理	传统解决方法	FACTS 解决方法	
系统 稳态 应用	电压 控制	负荷变化时 电压波动	无功功率调节	投切并联电容器、电抗器; 投退串联电容器、电抗器	SSSC、SVC、TCSC、 STATCOM、UPFC、CSR
		故障后产生 低电压	提供无功功率;防 止过负荷	投切并联电容器、电抗器; 投退串联电容器、电抗器	SSSC、SVC、STATCOM、 TCPAR、CSR
	潮流 分布控制	线路或变压器 过负荷	降低过负荷	增加线路或变压器、串联 电抗器	SSSC、TCSC、 TCPAR、UPFC
		潮流调整	调整串联电抗;调 整相角	串联电容器、电抗器	SSSC、UPFC、TCSC、 TCPAR
		故障后 负荷分配	网络重构; 使用发热限制	串联电容器、电抗器	TCPAR、UPFC、SSSC、 TCSC、STATCOM、CSC
	短路水平	故障电流超限	限制短路电流	串联电抗器; 更换开关、断路器	FCL、UPFC、SSSC、TCSC
次同步 谐振	汽轮机或 发电机轴损坏	阻尼振荡	投退串联电容器	SSSC、TCSC	
系统 动态 应用	暂态 稳定性	松散网状网络	增加同步扭矩;吸收 能量;动态潮流控制	快速响应励磁、串联电容器、 制动电阻、快速汽门调节	SSSC、TCSC、UPFC、 TCPAR、HVDC
	阻尼振荡	远方发电机、 放射状线路	阻尼低频振荡	快速响应励磁、电力系统 稳定器	SVC、STATCOM、SSSC、 TCSC、UPFC、TCPAR
	事故后 电压控制	松散网状网络	动态电压支持; 动态潮流控制; 减小故障冲击	并联线路	SSSC、SVC、 STATCOM、UPFC
	电压稳定	区域互联;紧 密网状网络; 松散网状网络	无功支持; 网络控制; 发电机控制; 负荷控制	并联电容器、电抗器、重 合闸、快速响应励磁、低电 压甩负荷、需求侧管理	SVC、STATCOM、UPFC、 TCPAR、CSR

五、统一潮流控制器技术的提出

由前述 FACTS 装置的分类及原理可知,并联型补偿器可以有效地产生无功电流,补偿系统的无功功率,维持节点电压,但对于线路电压的补偿能力较弱。而基于换流器的串联型补偿器则可以有效地补偿输电系统线路的电压,控制线路的潮流,但对于无功电流的补偿能力不强。统一潮流控制器则将串联型与并联型综合成一种补偿装置,兼具上述两种装置的功能,由图 1-8 可知,UPFC 可以方便地控制输电系统的电压、阻抗及相

角参数，功能最为全面。

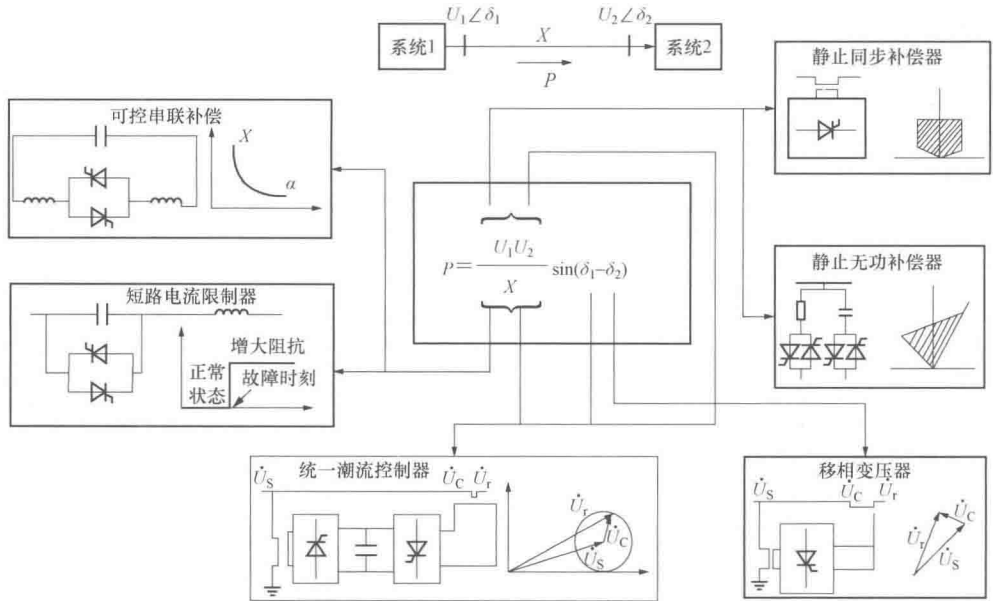


图 1-8 FACTS 装置改变系统参数的示意图

第二节 统一潮流控制器研究现状

UPFC 是最早出现的串并联型 FACTS 装置，从诞生伊始就受到电力科研人员的广泛关注。美国电力 (AEP)、西屋公司 (Westing House) 以及美国电力科学研究院 (EPRI) 共同研制了第一台 UPFC 装置，并安装在 Kentucky 东部 Inez 变电站的 138kV 线路上。我国在 1995 年开始对 UPFC 进行研究，主要是开发实验室规模的 UPFC，用于研究控制规律以及在电力系统中的特性^[3]。目前，国内外对 UPFC 的研究主要有以下几个方面：

一、UPFC 换流器拓扑

受限于电力电子器件的耐压通流能力，国外已投运的 3 套 UPFC 工程均采用 GTO 器件串联、三电平换流器、变压器多重化拓扑技术等措施并举，以提高换流器的功率处理能力。现有 UPFC 工程拓扑及主要参数如表 1-4 所示。

(1) GTO 器件串联技术。虽然 GTO 器件的最高水平已达 9kV/10kA，但对处理电力系统需求的百兆瓦以上功率等级仍显不足，同时，由于 GTO 器件个体参数间的差异，串联器件的数量也受到限制。器件串联技术的核心是均压和开关一致性。

(2) 三电平换流器。三电平电路拓扑最早是由日本学者 A. Nabae 于 1980 年在 IEEE 工业应用年会上提出来，具有输出电压高、谐波含量低、电压变化率小、功率开关器件电压应力小的优点，同时避免了器件串联，为大容量换流器的发展提供了一种新的思路。

(3) 多重化拓扑技术。多重化拓扑技术为大幅提高装置总容量的最有效的办法，采