

国家重点基础研究发展计划资助  
(2004CB217100)

大型互联电网运行可靠性研究系列图书



# 提高电网可靠性的 大功率电力电子技术基础理论

汤广福 刘文华

清华大学出版社

# 提高电网可靠性的大功率 电力电子技术基础理论

汤广福 刘文华

清华大学出版社  
北 京

## 内 容 简 介

本书围绕如何提高提高大功率电力电子装置自身可靠性以及其接入电网可靠性两个主题,全面分析和总结了大功率电力电子装置在提高大型互联电网运行可靠性方面的机理、作用、问题和解决方案,为大功率电力电子装置在电力系统中的大规模推广和广泛应用提供了理论支撑。本书主要包括:大功率电力电子装置及其接入电网可靠性评估算法,灵活交流输电装置在电网中接入点、容量及类型选择方法,大功率电力电子装置的纳秒-微秒级动态过程的建模与机理分析,系统异常情况下电力电子装置与系统的交互作用及装置的控制、保护共性技术及大功率电力电子装置等效试验方法等。

本书可供电力系统科研、规划、设计、运行与和输变电工程技术人员参考,也可作为高等院校相关专业的教师及研究生的参考书。

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

提高电网可靠性的大功率电力电子技术基础理论/汤广福,刘文华著. —北京:清华大学出版社, 2010.12

(大型互联电网运行可靠性研究系列图书/周孝信主编)

ISBN 978-7-302-24050-1

I. ①提… II. ①汤… ②刘… III. ①电子系统运行—可靠性—研究报告 ②大功率—电力电子学—研究报告 IV. ①TM732 ②TM1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 200042 号

责任编辑:张占奎

责任校对:王淑云

责任印制:李红英

出版发行:清华大学出版社

地 址:北京清华大学学研大厦 A 座

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

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](mailto:c-service@tup.tsinghua.edu.cn)

质 量 反 馈:010-62772015, [zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn](mailto:zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn)

印 刷 者:

装 订 者:

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:21.75

字 数:521 千字

版 次:2010 年 12 月第 1 版

印 次:2010 年 12 月第 1 次印刷

印 数:1~1500

定 价:0.00 元

---

产品编号:-

# 大型互联电网运行可靠性研究系列图书

## 编辑委员会

主 编 周孝信

副 主 编 郭剑波 孙元章

编 委(按姓氏笔画排序)

王锡凡 白晓民 刘文华 孙元章

汤 涌 汤广福 张伯明 李亚楼

沈 沉 周孝信 周家启 郭剑波

曹一家 梁曦东 程时杰 薛禹胜

编委会办公室 刘应梅

## 序 言

20 世纪 90 年代以来,国内外相继发生了多次大规模的停电事故,造成了严重损失。这些事故大多是在大型互联电网内发生的。其显著特点是由单一故障引发多重故障,由局部地区小范围扩展到广大地区的大范围,并最终导致大面积停电甚至全网崩溃。造成电网大面积停电的原因已不再是单一的暂态稳定性、电压稳定性或小干扰稳定性破坏,而是在故障持续过程中电网内发生大范围电力负荷转移,发、输变电设备和线路过负荷或低电压效应跳闸、局部电网电压稳定性或暂态稳定性破坏、负阻尼低频振荡、电网解列、频率异常升高或降低等现象相互交织,呈现连锁反应的演化过程。

本世纪初期,国内外已有的电网调度和安全稳定技术还难以正确应对类似于这种连锁反应式的故障。继电保护装置作为电网安全稳定的第一道防线起着十分重要的作用,然而多起大停电事故表明,即使保护装置正确动作,对那种过负荷连锁反应式的故障的演化也无能为力;此外,保护装置可能存在的“隐性失效”又会起着推波助澜的作用,使连锁反应事故扩大;电网中装设的安全稳定控制装置也缺乏应对连锁故障的能力。当时的电网调度自动化系统,基本上只能实现基于稳态状态监测的调度功能;在电网在线安全监控方面,防止过负荷采用的是  $N-1$  静态安全分析;对暂态稳定破坏的防范,则是采用基于典型运行方式的离线计算给出稳定极限在线应用的简单方式,也就是通过电网离线分析,针对预期出现的故障,检验电网能否承受,然后将分析结果用于实际运行的在线指导。几次大事故的教训表明,在连锁故障过程中的运行和故障模式是离线分析所未能预计到的,而实际故障发生后对系统的状况又缺乏全面掌握和分析的手段,未能作出正确的判断和处理,从而导致事故的扩大。

长期以来,为了解决电网运行的安全稳定性问题,国内外学术界和工业界进行了大量的研究和实践。尤其是国内,多年来在电网分析方法和软件、安全稳定控制理论、继电保护和安全稳定装置等领域做了大量研究、开发工作,并在实际系统中得到广泛应用。20 世纪 80 年代中期开始,我国电力主管部门针对国内电网实际相继制订和修订了《电力系统安全稳定导则》和《电力系统技术导则》,用以指导电网的规划设计和运行,大大提高了电网的安全运行水平,使电网稳定性破坏事故发生的频率大幅度降低。然而在针对上述互联电网的安全稳定运行新情况、新问题的解决方面,既无充分的理论基础,又无相应关键技术,也缺乏在线应用的平台和工具支持。

在此背景下,我们于 2004—2009 年承担了国家重点基础研究发展计划(“973”计划)“提高大型互联电网运行可靠性的基础研究”项目的研究工作。针对当时和未来我国电网大规模互联出现的问题,以及电网一次设备和二次系统技术进步的现状和前景,对电网的安全稳定性问题进行了新的基础性和前瞻性的研究,以便为解决新形势下电网的安全稳定性运行问题奠定理论和关键技术的基础。根据项目批准的计划,研究工作主要围绕四个方面的科学问题展开:①大规模电力网络特性和大面积停电机理;②大型互联电网的仿真计算方法;③大型互联电网在线运行可靠性评估、预警及决策理论;④提高电网的输电能力和输变电设备可靠性的关键技术基础。基于以上四方面的科学问题,立项时设置了七个课题。

项目中期评估时,根据专家意见将原来分散在多个课题中的关于运行可靠性理论的研究内容集中起来,调整为第8课题。其中第1课题“电力受端系统的动态特性及安全性评价的基础研究”,由中国电力科学研究院、华北电力大学、河海大学和四川大学共同完成;第2课题“大电网安全性评估的系统复杂性理论研究”,由浙江大学、中国电力科学研究院和清华港大深圳电力系统研究所共同完成;第3课题“大型互联电网分布式计算理论和方法研究”,由清华大学和中国电力科学研究院共同完成;第4课题“大型互联电网在线运行可靠性评估、预警和决策支持系统”,由中国电力科学研究院、清华大学和天津大学共同完成;第5课题“电力市场对电力系统运行可靠性的影响研究”,由国网电力科学研究院(原国网南京自动化研究院)和西安交通大学共同完成;第6课题“提高超高压交流输电线路输送能力的研究”,由清华大学、华中科技大学和上海电缆研究所共同完成;第7课题“提高电网可靠性的大功率电力电子技术基础理论研究”,由中国电力科学研究院和清华大学共同完成;第8课题“大型互联电网在线运行可靠性的基础理论研究”,由清华大学、重庆大学和合肥工业大学共同完成。

通过五年的研究,本项目在基础性理论研究、前瞻性关键技术研究 and 基础性应用平台建设三方面取得了较大的进展。

(1) 在基础性理论研究方面,提出并建立了电力系统运行可靠性理论和分析方法;发展完善了电力受端系统建模分析的理论和方法;将系统复杂性理论应用于大电网安全评估分析;提出了大功率电力电子装置的等效试验理论和方法;提出了研究电力市场与电网安全运行相互影响的理论方法。

(2) 在前瞻性关键技术研究方面,研究建立了大型互联电网分布式计算理论、方法和技术;大型互联电网在线运行可靠性评估、预警和决策支持系统的理论、方法和技术;提高电网运行可靠性的大功率电力电子技术;提高超特高压交流输电线路输送能力的柔性紧凑型输电技术。

(3) 在基础性应用平台建设方面,研究建立了互联电网分布式计算试验平台;互联电网在线运行可靠性评估、预警和决策支持系统平台;电力市场与电力系统安全运行仿真试验平台;大功率电力电子装置和系统仿真试验平台。

本项目的研究成果既能满足国家提高大型互联电网运行可靠性的重大需求,也为未来国家骨干电网建设、新能源电力接入、智能电网建设提供重要的技术储备。项目取得的部分成果已应用于实际工程。如在电力系统在线分析、预警及决策支持方面,解决了联网在线仿真计算面临的资源分散、数据异构的矛盾,实现了运行电网的在线安全分析从静态分析到动态分析的跨越;基于等效试验理论和方法所研制的大功率电力电子试验平台已成功地用于我国自主研发的特高压直流输电换流阀试验。部分成果还有待进一步完善后,在未来电网运行和发展中发挥作用,还有一部分前瞻性创新成果将为本领域技术的进一步发展奠定基础 and 提供支撑。

本系列图书是在项目各课题研究报告基础上对成果的进一步总结和深化。本系列图书共分十册,第1课题、第2课题、第3课题、第4课题、第7课题、第8课题各有一册,第5课题、第6课题分别有两册。第1册《电力受端系统的动态特性及安全性评价》由汤涌教授级高工主编,第2册《大电网安全性评估的系统复杂性理论》由曹一家教授和郭剑波教授级高工主编,第3册《大型互联电网分布式计算理论与方法》由沈沉教授和李亚楼博士主编,

第4册《大型互联电网在线运行可靠性评估、预警和决策支持系统》由白晓民教授级高工和张伯明教授主编,第5册《电力市场对电力系统运行可靠性的影响(一)》由薛禹胜院士主编,第6册《电力市场对电力系统运行可靠性的影响(二)》由王锡凡院士主编,第7册《提高超高压交流输电线路的输送能力(一)》由梁曦东教授主编,第8册《提高超高压交流输电线路的输送能力(二)》由程时杰院士主编,第9册《提高电网可靠性的大功率电力电子技术基础理论》由汤广福教授级高工和刘文华教授主编,第10册《大型互联电网在线运行可靠性的基础理论》由孙元章教授和周家启教授主编。周孝信院士作为本项目的首席科学家负责系列图书的总编和统稿。刘应梅博士在本项目的科学管理和系列图书的出版中做出很大贡献。在本系列图书出版之际,对项目的首席科学家助理郭剑波教授级高工和孙元章教授,对项目专家组成员韩祯祥院士、孙才新院士、赵遵廉教授级高工、孙嘉平教授级高工,对参与项目的所有研究人员和工作人员做出的贡献表示衷心感谢!对科技部和电力科学研究院、清华大学等项目承担单位的大力支持表示衷心感谢!对清华大学出版社张占奎编辑为本系列图书的出版所做出的努力表示衷心感谢!

周孝信

2010年11月于北京

## 前 言

为了促进跨大区的水火共济和电网大范围资源优化配置能力,解决可再生能源接入、分布式发电并网、孤岛和大型城市供电等难题,加快建设坚强智能的大型互联电网、提高我国电网的运行稳定性和可靠性、满足绿色可持续发展的需求,已成为当前我国电力系统面临的基础性、关键性和迫切性问题,也是世界电网技术发展所面临的共性问题。

先进电力电子技术是半导体器件技术、现代控制技术和传统电网技术的有机融合。从20世纪50年代高压直流输电(HVDC)技术的研究与初步应用,到八九十年代灵活交流输电(FACTS)技术和柔性直流输电(VSC-HVDC)技术的提出,电力电子技术在电力系统的发电、输电、变电、配电、用电等各个领域都发挥出越来越重要的作用。

但是,在电力系统中应用电力电子技术来提高电网的运行可靠性,还需要解决两方面的问题。一方面是电力电子装置对电网的可靠性存在何种影响,如何应用电力电子技术来提高电网运行可靠性;另一方面是如何评估、保证和提高电力电子装置自身的可靠性问题。

为了解决上述问题,在国家重点基础研究发展计划(973)项目“提高大型互联电网运行可靠性的基础理论研究”的资助下,结合第七课题“提高电网可靠性的大功率电力电子技术基础理论研究”,本书从应用大功率电力电子技术提高大型互联电网可靠性、大功率电力电子装置的微秒-纳秒级动态过程的建模与机理分析、系统异常情况下电力电子装置与系统的相互作用及装置的控制保护共性技术、大功率电力电子装置试验方法等四个方面开展了基础理论的研究工作,得出了保证电力电子装置自身可靠性和应用电力电子装置提高大型互联电网运行可靠性的基础理论和方法。对于推动灵活交流输电技术和高压直流输电技术在我国电网中的应用、提高我国电网的输送能力和稳定性水平、改善和增强电网网架结构,都具有重要的意义。

在本书成果形成过程中,在汤广福博士和刘文华博士的带领下,来自中国电力科学研究院、清华大学、合肥工业大学等科研院所和高等院校的科研人员针对本课题开展了大量的基础性研究工作。课题组通过对当前电力系统发展情况的分析,深刻的揭示了大型互联电网对于大功率电力电子技术的重大需求,研究了典型电力电子装置在电力系统中的重要作用以及目前电力电子技术发展及应用中所存在的问题,从而得出在电网中大规模应用电力电子装置必须首先要解决装置自身的可靠性问题,继而是如何应用大功率电力电子技术来提高大型互联电网的可靠性,得出本课题研究的思路和重点方向。全体课题组成员为本书中的成果做出了较为突出的贡献,主要研究人员的贡献如下:

鲁宗相博士和李生虎博士针对大功率电力电子装置可靠性的评估方法开展了研究,提出了大功率电力电子设备可用率的计算方法,并对典型 FACTS 设备自身以及包含可控串补(TCSC)等 FACTS 装置的电力系统可靠性进行了评估;陆超博士针对我国电网中交直流混合互联系统的日益增加,提出了交直流混合系统中 HVDC 的阻尼控制、基于广域测量系统(WAMS)的多直流自适应协调控制等控制方法,为提高交直流电网的稳定性提供了较好的手段;钱峰博士针对目前电力系统中 FACTS 装置的快速发展和广泛应用,提出了 FACTS 装置在电网中接入点、容量确定及多目标协调优化配置的类型选择方法,为



FACTS 装置在电网中的应用提供了理论依据。宋强博士和范子超博士提出了基于时间平均法的电磁暂态过程建模、基于器件实时化的开关暂态过程建模、基于 RC 网络热模型的热动态过程建模的混合实时仿真的理论体系和混合实时数字仿真平台,实现了链式 STATCOM 的混合实时数字仿真平台,可有效缩短电力电子装置的开发、设计和工程建设周期。袁志昌博士提出了一种改进的软锁相环同步算法、基于反馈线性化控制方法及瞬时电流控制方法的动态无功控制,解决了链式 STATCOM 在系统电压不平衡时的稳定运行问题。刘隽博士针对在系统异常情况下,单个 FACTS 装置控制器的不同功能之间以及多个 FACTS 装置控制器之间可能发生相互作用的产生机理、相互影响效果等问题进行了研究,提出了控制器之间的协调控制方法和控制器设计原则,为电力电子装置的可靠控制与应用提供了理论基础;谢敏华硕士针对大功率电力电子装置控制和保护的共性技术开展了研究,建立了标准、开放、高可靠性的控制保护平台体系结构及相应的通信体系,为电力电子装置控制保护平台的软硬件设计提供了参考;贺之渊博士针对大功率电力电子装置试验等效机理和试验方法论进行了研究,提出了试验等效机理的数学模型和分析方法以及两个层次“效”的等效性问题,为试验方法的研究提供了理论基础,并提出了用于晶闸管阀过电流试验的新型拓扑电路;查鲲鹏博士针对半控器件晶闸管阀在 HVDC 及 FACTS 装置运行工况下的应力进行了分析研究,提出了用于晶闸管阀和直流换流阀运行试验的新型合成拓扑电路,为大功率电力电子等效试验平台的建立奠定了基础;杨杰博士研究了两电平 VSC-HVDC 中 IGBT 阀的运行工况,详细分析了 IGBT 阀在系统中所承受的电气应力;罗湘博士基于工况分析提出了全控器件 IGBT 阀的绝缘试验及运行试验方法,以及针对 IGBT 阀运行试验的电路拓扑。

本书共分 5 章。汤广福博士拟定了本书的大纲,并编写了第 1 章和第 5 章。第 2 章由刘文华博士编写,第 3 章由宋强博士编写,第 4 章由贺之渊博士编写。全书由汤广福博士和刘文华博士共同修改并统稿。中国电力科学研究院的赵贺教授对本书进行了认真的审阅,提出了许多宝贵意见。同时,中国电力科学研究院的钱峰博士、罗湘博士、庞辉博士、查鲲鹏博士,清华大学的宋强博士、鲁宗相博士、袁志昌博士、陆超博士,合肥工业大学的李生虎博士等人认真细致地承担了本书的文字材料整理和编校工作,他们的聪明才智和付出加快了书稿完成,在此一并致谢。作者还要对书中所列参考文献的作者表示深深的谢意。感谢国家科技部“973”项目的大力支持,感谢参与该课题的全体研究人员对本书研究成果所做出的贡献。

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。

# 目 录

|                                        |     |
|----------------------------------------|-----|
| <b>第 1 章 概论</b>                        | 1   |
| 1.1 我国电网发展概况                           | 1   |
| 1.2 电力系统电力电子技术的重大需求                    | 1   |
| 1.2.1 提高电网支撑大范围优化资源配置能力                | 1   |
| 1.2.2 提高电网接纳大规模间歇式电源能力                 | 2   |
| 1.2.3 保障大电网安全稳定运行                      | 2   |
| 1.2.4 满足电网发展对关键技术和装备的要求                | 3   |
| 1.2.5 提升我国在世界电力领域的技术引领作用               | 3   |
| 1.3 应用电力电子技术提高大型互联电网可靠性                | 3   |
| 1.3.1 电力系统中的电力电子技术                     | 3   |
| 1.3.2 电力电子装置应用中存在的问题                   | 9   |
| 1.3.3 主要研究内容                           | 10  |
| <b>第 2 章 应用大功率电力电子技术提高大型互联电网可靠性的研究</b> | 12  |
| 2.1 大功率电力电子装置可靠性评估方法研究                 | 12  |
| 2.1.1 电力系统设备可靠性评估理论基础                  | 12  |
| 2.1.2 大功率电力电子装置可靠性评估                   | 16  |
| 2.2 大功率电力电子装置对电力系统可靠性的影响               | 43  |
| 2.2.1 发输电设备可靠性建模                       | 43  |
| 2.2.2 组合电力系统可靠性算法和指标体系                 | 45  |
| 2.2.3 FACTS 设备的控制模型                    | 48  |
| 2.2.4 含可控并补电力系统可靠性评估                   | 50  |
| 2.2.5 含可控串补电力系统可靠性评估                   | 53  |
| 2.3 提高 HVDC 在交直流混合系统中的动态稳定性控制理论与方法     | 58  |
| 2.3.1 交直流混合系统中的 HVDC 阻尼控制原理            | 58  |
| 2.3.2 HVDC 广域动态稳定控制反馈信号选择方法            | 62  |
| 2.3.3 基于 WAMS 的多直流自适应协调控制              | 70  |
| 2.3.4 广域闭环控制中通信延时的影响                   | 82  |
| 2.4 FACTS 装置在电网中接入点、容量及优化配置方法研究        | 84  |
| 2.4.1 典型 FACTS 装置的功能特点和比较分析            | 84  |
| 2.4.2 FACTS 装置接入点选择方法                  | 88  |
| 2.4.3 FACTS 装置容量确定方法                   | 97  |
| 2.4.4 多目标优化配置方法研究                      | 103 |
| 2.4.5 FACTS 装置在电网中优化配置方法小结             | 106 |
| 2.5 本章小结                               | 107 |

|                                                      |     |
|------------------------------------------------------|-----|
| <b>第3章 大功率电力电子装置的纳秒-微秒级动态过程的建模与机理分析</b>              | 109 |
| 3.1 大功率电力电子装置的数字混合仿真系统研究                             | 109 |
| 3.1.1 大功率电力电子装置的物理测试手段                               | 110 |
| 3.1.2 大功率电力电子装置实时数字仿真研究现状                            | 111 |
| 3.1.3 大功率电力电子装置的混合仿真                                 | 112 |
| 3.2 大功率电力电子装置的混合仿真方案                                 | 113 |
| 3.2.1 装置级模型                                          | 114 |
| 3.2.2 器件级模型                                          | 114 |
| 3.2.3 热模型                                            | 115 |
| 3.2.4 各过程间的接口交互                                      | 115 |
| 3.2.5 混合仿真的总体实现方案                                    | 116 |
| 3.3 典型开关器件的功能模型                                      | 117 |
| 3.3.1 多器件功能模型的基本原理                                   | 118 |
| 3.3.2 IGCT 工作原理及开关电压电流的确定                            | 121 |
| 3.3.3 功率二极管的开关电压电流确定                                 | 123 |
| 3.3.4 IGBT 的开关电压电流确定                                 | 126 |
| 3.3.5 全控器件/二极管综合模型                                   | 127 |
| 3.3.6 开关器件功能模型的验证                                    | 128 |
| 3.3.7 开关器件功能模型应用                                     | 135 |
| 3.4 开关器件功能模型的实时化实现                                   | 140 |
| 3.4.1 递推法实时模型                                        | 140 |
| 3.4.2 分段插值法实时模型                                      | 144 |
| 3.4.3 完整桥臂模型                                         | 149 |
| 3.5 混合实时数字仿真平台的实现                                    | 152 |
| 3.5.1 链式 STATCOM 装置级模型及其实时化实现                        | 152 |
| 3.5.2 热模型及实时化的实现                                     | 154 |
| 3.5.3 混合数字仿真平台                                       | 156 |
| 3.5.4 对器件模型实时化方法的验证                                  | 158 |
| 3.5.5 实时数字混合仿真方案验证                                   | 163 |
| 3.6 本章小结                                             | 171 |
| <b>第4章 系统异常情况下电力电子装置与系统的交互作用及装置的控制、保护共性技术研究</b>      | 173 |
| 4.1 系统异常情况下电力电子装置动态特性及快速控制与保护策略的研究                   | 173 |
| 4.1.1 基于反馈线性化控制方法的动态无功控制                             | 174 |
| 4.1.2 基于分相瞬时电流控制方法的动态无功控制                            | 181 |
| 4.1.3 系统异常情况下电力电子装置的控制与保护                            | 195 |
| 4.2 系统异常情况下多个 FACTS 控制器之间或单个 FACTS 控制器的不同功能之间相互作用的研究 | 209 |
| 4.2.1 单个 FACTS 控制器的不同功能之间相互作用                        | 209 |

---

|                                             |            |
|---------------------------------------------|------------|
| 4.2.2 多个 FACTS 控制器之间的相互作用 .....             | 216        |
| 4.3 高可靠性的大功率电力电子装置的控制、保护共性技术研究 .....        | 227        |
| 4.3.1 控制保护系统分层分布式结构的研究 .....                | 228        |
| 4.3.2 柔性交流输电装置控制保护系统通信网络的研究 .....           | 232        |
| 4.3.3 基于通用性的控制保护系统平台化设计 .....               | 235        |
| 4.4 本章小结 .....                              | 255        |
| <b>第 5 章 大功率电力电子装置试验方法的研究 .....</b>         | <b>256</b> |
| 5.1 大功率电力电子装置试验等效机理和试验方法理论 .....            | 256        |
| 5.1.1 大功率电力电子装置试验方法论 .....                  | 256        |
| 5.1.2 大功率电力电子装置一般试验方法 .....                 | 262        |
| 5.1.3 等效机理的数学模型及分析方法 .....                  | 266        |
| 5.1.4 等效机理的“效”的分析 .....                     | 271        |
| 5.2 半控器件阀试验方法研究 .....                       | 279        |
| 5.2.1 阀实际运行工况的强度分析 .....                    | 279        |
| 5.2.2 运行试验的等效性研究 .....                      | 288        |
| 5.2.3 合成全工况试验装置的研制 .....                    | 292        |
| 5.2.4 过电流试验装置的研究 <sup>[282-284]</sup> ..... | 296        |
| 5.3 全控型器件阀试验方法研究 .....                      | 299        |
| 5.3.1 两电平 VSC-HVDC 中 IGBT 阀的工况分析 .....      | 299        |
| 5.3.2 IGBT 阀的试验方法 .....                     | 310        |
| 5.4 大功率电力电子装置试验平台 .....                     | 314        |
| 5.4.1 MIST 电路的描述 .....                      | 315        |
| 5.4.2 验证试验 .....                            | 315        |
| 5.5 本章小结 .....                              | 318        |
| <b>参考文献 .....</b>                           | <b>319</b> |

# 第 1 章 概 论

## 1.1 我国电网发展概况

电力工业是国民经济发展的基础性产业,电力工业的发展水平是衡量一个国家经济发展程度、人民生活水平的重要标志之一。在世界范围内,社会、能源和经济发以及电力市场的发展,促进了大区电网的互联,电网通过互联形成越来越大的电力系统,现代电力系统已成为迄今为止最大的和最复杂的人造系统。随着电力系统和电网结构的日益扩大,保证电力系统运行的可靠性也面临着越来越严峻的挑战,而电力系统的可靠运行对于社会生活的方方面面都将产生极大的影响。

随着当前能源资源紧张、环境污染严重逐渐成为经济社会可持续发展的重大制约因素,越来越多的国家积极推动能源发展战略转型和电网结构调整。为紧密结合我国能源供应的新形势和用电服务的新需求,需要立足自主创新,建设以特高压电网为骨干网架,各级电网协调发展,具有“信息化、自动化、互动化”特征的坚强智能电网,使电网成为能源创新发展与变革的引擎。因此,提高我国大型互联电网运行的可靠性,建设坚强智能的电网,对于保障能源安全、优化能源结构、提高能源效率、促进节能减排、应对气候变化等方面的都可能起到重要的推动作用。

坚强智能电网是通过对发电、输电、变电、配电、用电、调度、信息与通信等智能电网各环节的关键技术攻关与集成创新,构建多类电源互补的、智能输变电与智能配用电承载的现代电网模式,覆盖所有电压等级,最终实现电力流、信息流、业务流的高度一体化融合使我国的电网规划建设与运行管理达到国际领先水平,引领国际电网技术发展方向,极大地提升我国电力行业的国际竞争力与影响力。

## 1.2 电力系统电力电子技术的重大需求

### 1.2.1 提高电网支撑大范围优化资源配置能力

我国能源资源与用电需求呈逆向分布,需要通过远距离、大规模输电在全国范围内优化配置电力资源。而随着我国能源开发重心逐步西移和北移,大型能源基地与能源消费地之间的输送距离将可能达到 2500 km 以上,锡盟、准东等大型能源基地外送电容量将达到 1500 万~2700 万 kW。到 2015 年和 2020 年,特高压及跨区、跨国电网输送容量将分别达到 1.9 亿 kW 和 4.1 亿 kW。随着能源输送距离越来越远、规模越来越大,西南、新疆、西藏电力外送及跨国输电等战略布局对超远距离、超大容量的电力输送提出新的要求,亟需发展

特高压直流输电(UHVDC)等新型输电技术来支撑这一需求。

另外,随着经济社会快速发展,我国输电通道走廊资源也日益紧缺。因此如何采用更为紧凑的输电方式,或者提高现有输电走廊的输送容量和利用率,提高输电效益,需要广泛采用灵活交流输电(FACTS)和高压直流输电(HVDC)技术,使电能输送更加经济、环保。

因此,为满足大煤电、大水电、大核电、大型可再生能源基地的集约化开发和利用,迫切需要采用 HVDC 和 FACTS 等适用于大规模、远距离、高效率的电力输送技术,来构建适应多种类型大规模能源消纳的坚强电力网架,显著提高电网的输送能力和运行控制的灵活性,最大限度发挥电网优化配置资源的作用。

### 1.2.2 提高电网接纳大规模间歇式电源能力

新能源的开发与利用已成为当前国际上应对环境和气候的重要手段之一。我国陆地风能资源理论储量在 40 亿 kW 以上,理论技术可开发量约为 6 亿~10 亿 kW。近年来风电发展迅猛,连续 4 年增长率超过 100%,截至 2009 年底,已建成风电场装机容量达 2510 万 kW,其中已并网发电的风电机组装机容量达 1613 万 kW。预计“十二五”期间将建成若干千万千瓦级风电基地,到 2020 年风电装机容量将达到 1 亿~1.5 亿 kW。我国太阳能资源理论储量达每年 17 000 亿 t 标准煤,全国 2/3 的国土面积年日照小时数在 2200 h 以上,西部太阳能资源尤为丰富。截至 2009 年底,我国光伏发电总装机容量约 300 MW,并网容量约 160 MW,预计 2020 年太阳能发电装机容量将达到 2 万 MW。

我国的可再生能源发展整体上呈现大规模、远距离、高电压、集中接入的特点。随着风电和光伏等间歇式可再生能源在电网中比重的加大,其长时间、高频度、大尺度的随机出力波动将给电网安全运行带来很大风险。因此,需要从电源并网方式、电网运行控制和规划调度等多方面来缓解可再生能源发电对电网安全可靠运行带来的巨大挑战。

采用基于大功率电力电子器件的风机变流器及柔性直流输电(VSC-HVDC)等技术方式,来将风机或者风电场接入电网,是一个有效改善风机频率变化对电网影响的手段。尤其是对于百兆瓦和千兆瓦级的偏远陆地及海上风电场来说,使用柔性直流输电并网可以满足风场并网运行时的故障穿越及稳态和暂态性能的要求,具有非常显著的技术竞争力。

### 1.2.3 保障大电网安全稳定运行

从世界电网发展历程来看,大电网互联是未来电网发展的必然趋势。未来我国将建成世界上电压等级最高、系统规模最大、资源配置能力最强的特大型电网,实现电力远距离、大规模输送,满足经济快速发展对电力的需求,交直流互联的大电网结构必将日趋复杂,运行控制难度也逐渐加大。此外,我国极端自然灾害频发,极端外部灾害事件会对大电网安全可靠运行造成灾难性损害。

在电网中使用智能化的大功率电力电子装备,可以显著提升线路输送水平、改进潮流分配、增强电网控制灵活性、供电可靠性、供电质量及电网安全防御能力,从而提高大型互联电网的安全可靠性,为形成坚强网架结构、构建智能电网奠定必要的基础。这也是提高电网应对灾变能力,进一步提升驾驭大电网的能力的重要手段。

### 1.2.4 满足电网发展对关键技术和装备的要求

随着电网技术的快速发展,我国电网正朝着坚强、智能化的目标迈进。在此情况下,首先需要电力装备自身能够满足更大容量、更低损耗、更加智能、更安全可靠、更绿色环保的要求,这些都对电力设备的关键技术研究和装置开发提出了更高的目标。

因此,需要大力发展超/特高压、大容量的灵活交流输电技术,以提升系统的运行调控能力和电网的灵活运行能力;研制智能化的特高压直流输电技术,以提高电能输送的智能化水平;开发灵活、可控的柔性直流输电技术,以满足电网接纳大规模间歇式可再生能源发电的需要。与此同时,为了保证这些装置能够切实提高电网的运行可靠性,首先需要保证这些装置自身的可靠运行,而试验技术的研究和试验装置的开发及应用则是保证大功率电力电子装备可靠运行的关键性环节。因此要实现坚强智能电网,需要完备的高压大功率电力电子试验能力提供有力的技术支撑。

### 1.2.5 提升我国在世界电力领域的技术引领作用

加强智能电网技术的自主创新,是保证我国电网长远发展的重要战略任务,也将带来未来电网发展的再次飞跃,占领国际电力科技制高点。先进电力电子技术作为战略性新兴产业,属高端装备制造业范畴,也是电力系统最有生命力的技术之一,从根本上全面提升电力系统电力电子技术水准,是提升我国在世界电力领域的技术引领作用的重要手段。

通过对高压/特高压直流输电技术、柔性直流输电技术及灵活交流输电技术的研究,并完成相关示范工程建设,对促进我国电力电子技术的发展、提升我国电力技术的自主创新水平、增强我国在电力电子及相关技术领域的国际竞争力,都具有重要的意义。

## 1.3 应用电力电子技术提高大型互联电网可靠性

### 1.3.1 电力系统中的电力电子技术

电力系统电力电子技术通常包括输电、配电、用电等多种领域的电力电子技术,如灵活交流输电、高压直流输电、柔性直流输电、用户电力技术、能量转换、电机变频拖动等。而目前在电力系统的输电网络中所使用的高压大功率电力电子技术则主要包括灵活交流输电技术、高压直流输电技术和柔性直流输电技术。

#### 1. 灵活交流输电技术

FACTS技术是指以电力电子设备为基础,结合现代控制技术来实现对原有交流输电系统参数及网络结构的快速灵活控制,从而达到大幅提高线路的输送能力和增强系统稳定性、可靠性的目的。FACTS技术是20世纪80年代末美国电力研究院(EPRI)的Narain G. Hingorani博士提出,在1997年IEEE PES学会正式公布的FACTS定义是: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装置的目的都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。

灵活交流输电装置按照结构形式可分为并联型、串联型和串并联混合型<sup>[1]</sup>。

(1) 并联型 FACTS 装置,如静止无功补偿器(SVC)、静止同步补偿器(STATCOM)、磁阀式并联电抗器(MCSR)、分级式可控并联电抗器(CCSR)、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。

(2) 串联型 FACTS 装置,如晶闸管控制串联补偿器(TCSC)、晶闸管保护串联电容器(TPSC)、晶闸管投切串联补偿电容器(TSSC)、静态同步串联补偿器(SSSC)、电网故障电流限制器(FCL)、晶闸管控制调相器(TCPAR)等。

(3) 串并联混合型 FACTS 装置,如统一潮流控制器(UPFC)、可变静态补偿器(CSC)等。

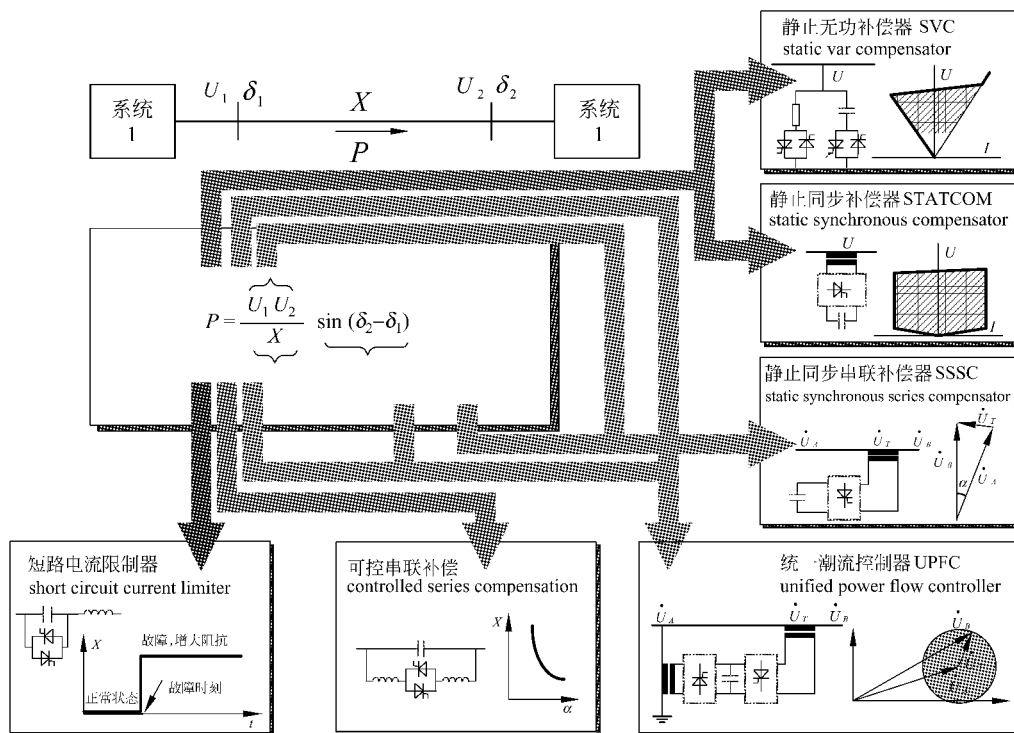


图 1-1 典型 FACTS 装置原理

FACTS 技术与装置在大型互联电网中所能起到的作用主要体现在以下几方面<sup>[1]</sup>：

#### (1) 提高输电线路的输送容量

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率,不仅节约输电成本和占地,而且有利于环境保护。

#### (2) 优化输电网络的运行条件

FACTS 装置有助于减少和消除环流或振荡等大电网痼疾,有助于解决输电网中“瓶颈”环节的问题;有助于在电网中建立输送通道,为电力市场创造电力定向输送的条件;有助于提高现有输电网的稳定性、可靠性和供电质量;可以保证更合理的最小网损并可以减少系



统热备用容量;还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。通过对 FACTS 装置的快速、平滑的调整,可以方便、迅速地改变系统潮流分布。这对于正常运行条件方式下控制功率走向以充分挖掘现有网络的传输能力以及在事故情况下防止因某些线路过负荷而引起的连锁跳闸是十分有利的。

### (3) 扩展了电网的运行控制技术

FACTS 装置一方面可对已有常规稳定或反事故措施(如调速器附加控制、汽门快并控制、自动重合闸装置等)的功能起到补充、扩大和改进的作用。另一方面,电网的 EMS 系统必然要将 FACTS 装置的作用综合进去,使得能量管理系统(energy management system, EMS)中的自动增益控制(automatic gain control, AGC)、经济调度控制(economic dispatch control, EDC)和最优潮流(optimal power flow, OPF)等功能的效益得到提高。有助于建设全网统一的实时控制中心,从而使系统的安全性和经济性有一个大的提高。

### (4) 改变了交流输电的传统应用范围

由于高压直流输电的控制手段快速灵活,当输送容量与稳定的矛盾难以调和时,有时可能通过建设直流线路来解决,但是换流站的一次投资很高。而应用 FACTS 装置的方案比新建一条线路或换流站方案的投资要少。整套应用并协调控制的 FACTS 装置组将使常规交流电灵活化,改变交流输电的功能范围,使其在更多方面发挥作用,甚至扩大到原属于 HVDC 专有的那部分应用范围,如定向传输电力、功率调制、延长水下或地下交流输电距离等。

### (5) 现代大电网的互联

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降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互联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。

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 1-1 所示。

表 1-1 FACTS 技术可以解决的系统问题

|        |        | 系统发生的问题   | 正确方法         | 传统解决办法                  | 采用 FACTS 技术的解决办法                     |
|--------|--------|-----------|--------------|-------------------------|--------------------------------------|
| 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、串联电容器       | SSSC、SVC、TCSC、STATCOM、UPFC、MCSR、CCSR |
|        |        | 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,串联电容器、串联电抗器 | SSSC、SVC、STATCOM、TCPR、MCSR、CCSR      |
|        | 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;增加串联电抗器        | SSSC、TCSC、TCPAR、UPFC                 |
|        |        | 潮流调整      | 调整串联电抗;调整相角  | 增加串联电容、电抗;增加 PAR        | SSSC、UPFC、TCSC、TCPAR                 |
|        |        | 故障后负荷分配   | 网络重构,使用发热限制  | PAR、串联电容、电抗             | TCPAR、UPFC、SSSC、TCSC、STATCOM、CSC     |