

国家重点基础研究发展计划资助
(2004CB217900)

大型互联电网运行可靠性研究系列图书



提高超高压交流输电线路 的输送能力(一)

梁曦东 姜齐荣 曾嵘 董新洲 毛庆传

清华大学出版社

国家重点基础研究发展计划资助

内 容 简 介

为解决远距离、大容量的电能输送问题,本研究提出了柔性紧凑型输电方式。研究中将柔性技术与紧凑型技术有机结合,利用柔性技术缩短线路电气距离,并抑制紧凑型技术带来的过电压及潜供电流问题;利用紧凑型技术提高线路自然功率,有效地规避了高串补度带来的次同步振荡风险,并可节省走廊;针对柔性紧凑型线路特有的线路参数特性,给出了可行的继电保护方案。通过上述关键问题的研究及各环节的全方面论证,给出了可直接应用的典型配置,使 500~1000 km 线路的输送容量达到常规线路的 1.5~1.8 倍。

为提高短线路的输送能力,研制了可长期运行于 150℃ 的高强度耐热铝合金导线,其综合指标高于国内研发的同型耐热导线;研制了国内第一条 900 mm² 的大截面导线,且该导线作为国内主干线路第一次使用四层铝股绞制技术,减小了导线交直流电阻比。此外,对复合加强芯导线在国内的应用前景进行了经济与技术分析。

本书可供高等院校电力系统专业的研究生以及从事电力系统运行、规划设计和科学研究的人员参考。

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

提高超高压交流输电线路的输送能力(一)/梁曦东等著. --北京:清华大学出版社,2010.12
(大型互联网运行可靠性研究系列图书/周孝信主编)

ISBN 978-7-302-24051-8

I. ①提… II. ①梁… III. ①超高压—交流—输电线路—研究报告 IV. ①TM726.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 200041 号

责任编辑:张占奎

责任校对:赵丽敏

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

质 量 反 馈:010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者:三河市春园印刷有限公司

经 销:全国新华书店

开 本:185×260 印 张:19

字 数:441 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:75.00 元

产品编号:037669-01

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 and 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、前瞻性关键技术和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!对科技部和中国电力科学研究院、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

经济的繁荣与社会的进步,与充足的能源供应息息相关,而电能更是国家安全、稳定与高速发展必不可少的重要因素。近年来,我国的电力需求日益增长,电力工业发展迅速,发电装机容量每年都以超过 10% 的速度增加,预计到 2020 年,我国电力装机容量将达到 16 亿千瓦。

我国幅员辽阔,能源与负荷分布不均匀。我国水力资源主要分布在西南各省,煤炭资源主要分布在山西、陕西、内蒙古等西北省份。而负荷中心主要分布在以京、沪、穗为中心的东部及东南沿海。根据相关规划,我国以北、中、南三条通道实现西电东送。因此,大容量、远距离的电能输送是很有必要的。

对于不同输送距离与输送容量的目标,具有与之对应的输电模式,如图 0-1 所示。

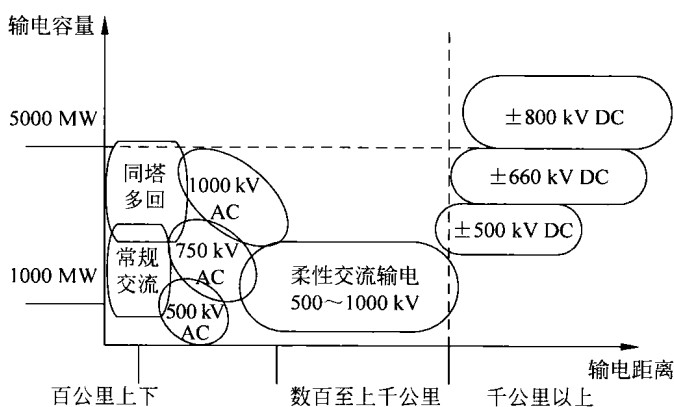


图 0-1 不同输送距离与容量下适用的输电模式

由图 0-1 可见,千公里以上的输送距离,一般使用超、特高压直流输电;较短的输送距离(百公里上下),可以使用常规交流输电;若在短距离输送更大的电能,可以使用同塔双回或多回输电方式;而随着输电电压等级的提高,输送距离与容量均随之增加。

为进一步提高输送距离,满足数百到千公里的电能输送需求,需要使用串联电容补偿,否则输电线路将面临稳定、过电压等重重问题。但受制于串补投资、串补带来的 SSR 问题等,难以在远距离的前提下满足大容量的要求。由图 0-1 可见,在数百到千公里的输送距离下输送较高的容量这个区域,还是一片空白,此前没有成熟的输电模式。

国家重点基础研究计划(“973”计划)“提高大型互联电网运行可靠性的基础研究”设置了子课题“提高超高压交流输电线路输送能力的研究”,通过研究工作探索适合于大容量远距离的输电模式,即研究目标为在 500~1000 km 的输送距离条件下,提高交流线路输送容量为常规交流线路的 1.5~1.8 倍。考虑到这种输电模式在提升输送能力的同时,要满足资源节约、环境友好的技术要求,研究提出了“柔性紧凑型”输电模式,即采用自然功率高且节省走廊占地的紧凑型输电线路,并进行电磁环境方面的优化设计;以串联补偿设备缩短线路电气距离保证静态稳定输送能力和部分提高暂态稳定下的输送能力。并且通过其他多种先进的柔性设备、大截面导线等措施,实现综合性目标最优。如图 0-2 所示,柔性紧凑型输电

技术的提出,填补了 500~1000 km 大容量输电技术的空白。

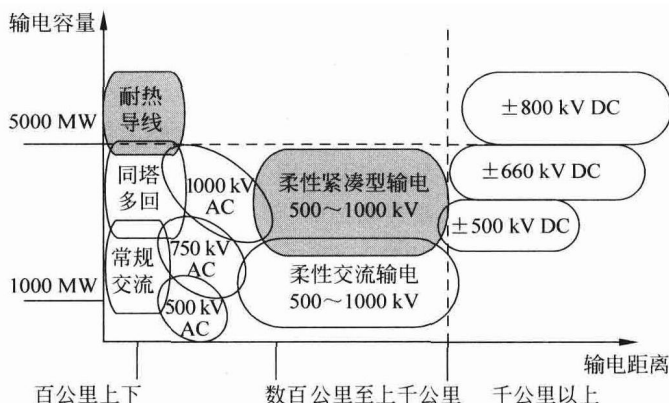


图 0-2 柔性紧凑型输电线路的定位

同时,本课题针对进一步提高短线路输送容量进行了研究。由于限制短线路输送容量的瓶颈是热稳定,所以在百公里或更短的线路上,可以使用耐热导线,但由于其电阻损耗较高,不适用于长线路,如图 0-2 所示,它可以显著提高短距离送电容量。复合加强芯导线由于具有更好的机械性能、大截面导线允许较高的电流通流量,也可提高短线路热稳定极限,但如果将其应用于长线路,则要对其经济成本进行核算。此外,对改善线路电磁环境的扩径导线进行了研究。

本课题的研究结构如图 0-3 所示,整体上从两方面展开,即在 500~1000 km 的输送距

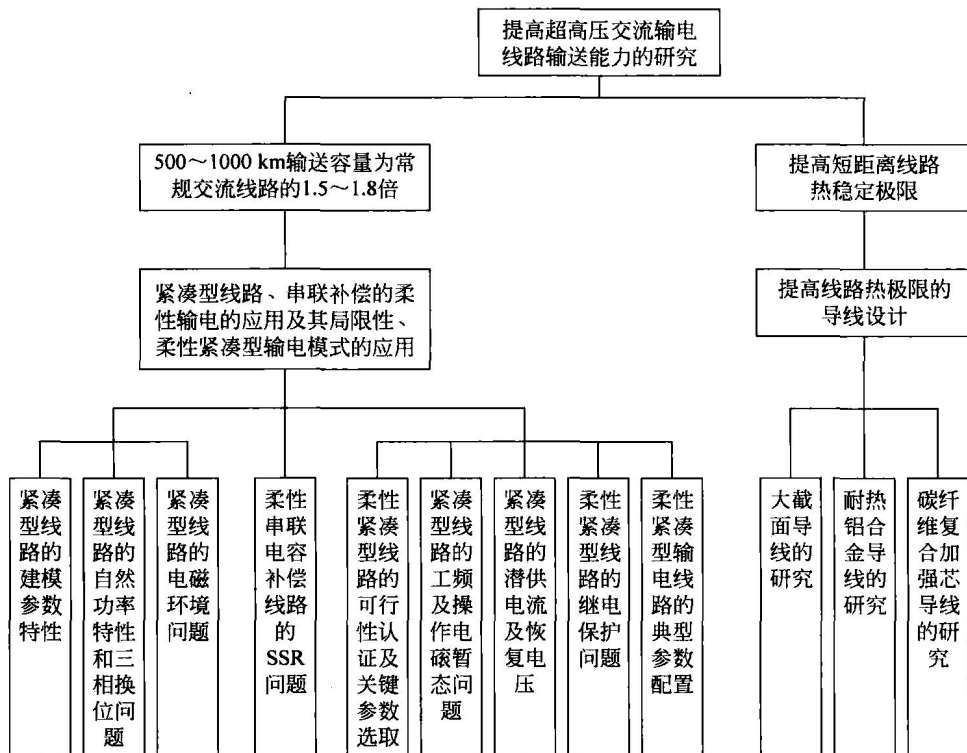


图 0-3 本课题研究内容结构

离下提高交流线路输送容量为常规交流线路的 1.5~1.8 倍,以及提高短距离输电线路热稳定极限。

在本课题的研究过程中,李岩博士生、柴旭峥博士、刘世宇博士、黄国飞工程师、张波博士、丁磊博士、田旭博士生、徐睿工程师、张赞博士、孔玮博士、季世泽工程师、唐剑博士等为课题的理论、试验研究及本书撰写做了大量工作,在此表示感谢!

限于编者水平,文中难免不当之处,恳请广大读者批评指正!

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 紧凑型输电技术	1
1.1.1 国外研究现状	1
1.1.2 我国研究现状	3
1.1.3 紧凑型输电线路提高线路输送能力的优势与局限	5
1.2 串联电容补偿的柔性输电技术	5
1.2.1 串联电容补偿技术的发展	6
1.2.2 串联电容补偿提高线路输送能力的局限	6
1.3 柔性紧凑型输电技术	6
第 2 章 紧凑型输电线路建模参数特性研究	8
2.1 紧凑型输电线路电气参数的工频特性	9
2.2 紧凑型输电线路电气参数的频变特性	10
2.3 地线与接地方式对紧凑型电气参数的影响	11
2.4 大地电阻率对紧凑型输电线路电气参数的影响	11
2.5 本章小结	12
第 3 章 紧凑型输电线路自然功率特性研究	13
3.1 影响线路自然功率的主要因素	13
3.2 紧凑型输电线路相间距离的研究	16
3.2.1 操作过电压限制的最小相间距离分析	16
3.2.2 工频过电压限制的最小相间距离分析	17
3.2.3 导线不同步运动的最小相间距离	18
3.2.4 国内外架空线路设计规程中对相间距的要求	19
3.2.5 电磁环境指标对紧凑型线路相间距离的限制	21
3.2.6 V 型绝缘子串对特高压紧凑型线路相间距的限制	21
3.2.7 紧凑型输电线路相间距离结论	22
3.3 远距离紧凑型输电线路的相参数平衡问题	23
3.3.1 线路相参数平衡问题计算方法	24
3.3.2 线路相参数平衡问题计算结果	25
3.3.3 远距离紧凑型线路相参数平衡问题结论	27
第 4 章 紧凑型输电线路的电磁环境	28
4.1 电磁环境限值	28
4.1.1 工频电场	28
4.1.2 工频磁场	29
4.1.3 无线电干扰	30

4.1.4	可听噪声	31
4.2	电磁环境计算方法与计算条件	31
4.2.1	无线电干扰	31
4.2.2	可听噪声	32
4.2.3	电晕损失	33
4.2.4	电磁环境计算条件	39
4.3	紧凑型输电线路参数对电磁环境的影响	40
4.3.1	分裂间距对紧凑型线路导线表面电场强度的影响	40
4.3.2	导线外径对紧凑型线路电磁环境的影响	41
4.3.3	导线分裂数对紧凑型线路电磁环境的影响	41
4.3.4	导线高度对紧凑型线路电磁环境的影响	42
4.3.5	相序对同塔双回紧凑型线路电磁环境的影响	43
4.4	紧凑型输电线路子导线排列的优化	45
4.4.1	紧凑型线路子导线表面电场强度均匀性分析	45
4.4.2	紧凑型线路子导线不均匀排列优化方法	45
4.4.3	紧凑型线路子导线的优化方案	46
4.5	海拔高度对输电线路电磁环境影响的试验研究	49
4.5.1	高海拔电晕效应试验	49
4.5.2	海拔高度对导线电晕可听噪声的影响	52
4.5.3	海拔高度对导线电晕无线电干扰的影响	55
4.5.4	海拔对电磁环境影响小结	59
4.6	本章小结(基于大输送容量目标和电磁环境限制的柔性紧凑型输电线路推荐 导线方案)	59
第 5 章	串联电容补偿的输电线路次同步振荡(SSR)问题	61
5.1	概述	61
5.1.1	SSR 问题的提出及我国的多模态 SSR 问题	61
5.1.2	SSR 的形成机理	62
5.1.3	SSR 的危害	63
5.2	SSR 问题的研究方法	64
5.2.1	频域分析法	64
5.2.2	时域仿真法	64
5.2.3	多机多模态 SSR 特征值分析方法	65
5.3	抑制 SSR 问题的研究与应用现状	68
5.3.1	SSR 的典型抑制措施	68
5.3.2	附加励磁阻尼控制的研究现状及问题	70
5.3.3	静止无功补偿器抑制 SSR 的研究现状	72
5.4	本章小结	72
第 6 章	附加励磁阻尼控制抵制 SSR 的研究	73
6.1	基于遗传-模拟退火算法的 SEDC 优化设计	73

6.1.1	SEDC 控制器设计的现状和问题	73
6.1.2	基于独立模态空间控制思想的 SEDC 控制器结构设计	76
6.1.3	基于 GASA 的 SEDC 控制参数优化设计	82
6.1.4	SEDC 控制参数优化设计的验证	87
6.2	SEDC 与励磁系统的配合	93
6.2.1	SEDC 控制信号对励磁系统的通过性要求	94
6.2.2	SEDC 对励磁系统主要常规功能的影响	95
6.2.3	硬件测试试验	101
6.3	SEDC 工业装置研制和现场试验分析	112
6.3.1	应用 SEDC 抑制上都电厂多模态 SSR 的工程应用情况	113
6.3.2	现场试验主要结果分析	114
6.3.3	现场试验结果与仿真计算的对比研究	118
6.4	本章小结	121
第 7 章	静止无功补偿器抑制 SSR 的研究	123
7.1	SVC 抑制 SSR 的机理研究	123
7.1.1	SVC 主电路	123
7.1.2	SVC 滤波器设计	124
7.1.3	SVC 容量设计	126
7.1.4	SVC 抑制 SSR 机理研究	127
7.2	SVC 次同步阻尼控制器的优化设计	129
7.2.1	SVC SSDC 总体设计	129
7.2.2	SVC SSDC 的特点	129
7.2.3	SVC SSDC 的设计目标	130
7.2.4	SVC SSDC 的结构设计	130
7.2.5	SVC SSDC 的参数设计	132
7.3	优化 SVC SSDC 效果验证	133
7.3.1	GASA 优化 SVC SSDC 参数	133
7.3.2	优化后 SVC SSDC 效果验证	133
7.3.3	SVC 控制对系统的影响分析	136
7.4	本章小结	141
第 8 章	柔性紧凑型线路的工频电磁暂态特性	142
8.1	柔性紧凑型输电系统接地系数的特点及其对工频过电压的影响	142
8.1.1	接地系数对工频过电压特性的影响	142
8.1.2	柔性紧凑型输电系统接地系数特点	144
8.1.3	柔性紧凑型输电系统不对称接地电压升高的限制措施	146
8.2	柔性紧凑型输电系统并联电抗器及其中性点小电抗的选择	149
8.2.1	紧凑型线路高抗中性点小电抗选择的困难	149
8.2.2	柔性紧凑型输电系统对高抗及其中性点小电抗选择的考虑	150
8.3	本章小结	151

第 9 章 柔性紧凑型线路的操作电磁暂态问题	153
9.1 柔性紧凑型输电系统的正常和故障操作过电压及防护方法研究	153
9.1.1 空载线路合闸过电压特性的建模分析与仿真验证	154
9.1.2 单相重合闸过电压特性的建模分析与仿真验证	159
9.1.3 甩负荷操作过电压特性的建模分析与仿真验证	164
9.1.4 综合优化限制措施的研究	167
9.2 柔性紧凑型输电系统的故障清除过电压对带电作业的影响	168
9.2.1 紧凑型线路的带电作业问题	168
9.2.2 柔性紧凑型输电的故障清除过电压特性	169
9.3 本章小结	170
第 10 章 柔性紧凑型输电系统的潜供电流与恢复电压	171
10.1 柔性紧凑型输电系统电气参数特点对潜供电弧特性的影响	171
10.1.1 输电线路的潜供电弧参数	171
10.1.2 紧凑型线路参数特性对潜供电弧参数的影响	172
10.1.3 串联补偿装置对潜供电弧参数的影响	172
10.2 线路长度增加对串补输电系统潜供电弧参数的改变	173
10.2.1 远距离长线路输电的仿真试验	173
10.2.2 仿真结果的电路参数解析分析	176
10.3 设置开关站的远距离柔性紧凑型输电系统潜供电弧参数特性	177
10.3.1 设置开关站的远距离柔性紧凑型输电系统仿真试验	178
10.3.2 仿真结果的电路参数解析分析	179
10.4 柔性紧凑型输电系统潜供电流和恢复电压参数优化探讨	181
10.5 本章小结	182
第 11 章 柔性紧凑型输电系统的继电保护	183
11.1 柔性紧凑型线路模型分析	183
11.1.1 基于分布参数线路和集中补偿元件的两端口网络	183
11.1.2 线路参数及典型仿真系统	185
11.2 传统继电保护应用于柔性紧凑型输电系统的分析与改进	187
11.2.1 分相差动保护	187
11.2.2 距离保护	193
11.2.3 方向保护	201
11.2.4 相差高频保护	206
11.2.5 故障测距	208
11.3 行波故障检测在柔性紧凑型线路中的应用	211
11.3.1 基于波阻抗继电器的行波方向保护	212
11.3.2 基于初始行波的故障识别与选相	217
11.4 本章小结	227
第 12 章 柔性紧凑型输电的关键参数选取及典型配置	230
12.1 各种措施对提高暂态稳定条件下极限输送能力的理论分析与计算	230

12.1.1	各电压等级常规及紧凑型线路输电能力计算曲线·····	231
12.1.2	增加输电线路回数对长距离传输线传输极限提高的作用·····	231
12.1.3	减少故障切除时间对传输极限提高的作用·····	232
12.1.4	减少切除线路长度对传输极限提高的作用·····	233
12.1.5	固定串联补偿(FSC)与晶闸管控制的串联电容补偿(TCSC)对传 输极限的作用·····	234
12.1.6	SVC 与静止同步补偿器(STATCOM)对传输极限影响的分析 ····	235
12.2	柔性紧凑型输电技术提高远距离输送能力的效果及论证分析·····	237
12.2.1	柔性紧凑型输电系统静态稳定条件下输送能力分析比较·····	237
12.2.2	柔性紧凑型输电系统面对的综合性问题·····	237
12.3	柔性紧凑型输电系统暂稳条件下的仿真和参数选取·····	238
12.3.1	EPRI(China)—7 节点系统送、受端系统背景下的仿真 ·····	238
12.3.2	鲤鱼江水电厂 2015 年送出工程背景仿真 ·····	239
12.3.3	暂态稳定条件下的仿真结论·····	241
12.4	远距离大容量的柔性紧凑型输电线路典型配置·····	241
第 13 章	大截面导线研究 ·····	244
13.1	圆线同心绞大截面导线研究·····	244
13.1.1	国内大截面导线开发历史·····	244
13.1.2	圆线同心绞大截面导线的结构及设计思路·····	244
13.1.3	大截面导线生产工艺研究·····	244
13.1.4	圆线同心绞大截面导线截面等级研究·····	245
13.2	新型型线同心绞架空导线研究·····	245
13.2.1	新型型线同心绞大截面导线特点研究·····	245
13.2.2	型线同心绞架空导线的结构及性能研究·····	246
13.2.3	型线同心绞导线国内外发展现状·····	247
13.3	大截面导线试制·····	247
13.4	本章小结·····	251
第 14 章	耐热铝合金导线的研究 ·····	252
14.1	耐热铝合金的耐热机理研究·····	252
14.1.1	耐热铝合金长期运行温度研究·····	253
14.1.2	导电率 60%IACS 耐热铝合金技术改进研究 ·····	255
14.2	高强度耐热铝合金研究开发·····	256
14.2.1	高强度耐热铝合金的生产工艺研究·····	256
14.2.2	高强度耐热铝合金试制·····	257
14.2.3	耐热铝合金导线截面等级研究·····	258
14.3	本章小结·····	259
第 15 章	碳纤维复合加强芯材料及导线研究 ·····	261
15.1	碳纤维复合加强芯导线特性及国内外应用情况·····	261
15.1.1	碳纤维复合加强芯导线特性·····	261

15.1.2	国内外使用情况·····	264
15.2	碳纤维复合芯铝导线试验研究·····	265
15.2.1	导线常规试验·····	265
15.2.2	导线型式试验·····	269
15.2.3	工程应用性研究试验·····	273
15.3	碳纤维复合芯导线经济比较分析·····	274
15.3.1	工程概况·····	274
15.3.2	导线选型比较方案·····	274
15.3.3	经济比较分析·····	275
15.4	本章小结·····	278
参考文献 ·····		279

第1章 绪 论

为了实现在 500~1000 km 距离将线路输送容量提高到常规线路的 1.5~1.8 倍这一研究目标,本课题研究了能大幅度提高线路输送距离和输送容量的柔性紧凑型线路,即采用高自然功率的紧凑型输电线路提高线路容量,采用串联电容补偿缩短线路的电气距离,实现远距离、大容量的电能输送。

紧凑型输电技术与串联补偿技术各自单独使用时,在不同的国家已得到了一定程度的应用。但单独使用这两种技术,都有一定的局限性,难以实现远距离、大容量的输送目标。柔性紧凑型输电结合了这两种技术,作为一种新的输电模式,它也具有一些新的特性,比如在继电保护方面对常规的保护方式提出了挑战等。

1.1 紧凑型输电技术

20 世纪以来,伴随着世界经济的发展和人类文明的进步,人类对电力能源的需求与日俱增,同时越来越清醒地认识到土地、资源和环境等因素对人类进一步发展的重要性,从而开始探索资源节约、环境友好、输送能力强的高效输电模式。紧凑型输电技术是指从交流输电原理出发,在保证安全运行的前提下,通过缩小导线的相间距离,增加相导线分裂根数和相导线等效半径,优化相导线的结构和布置从而减小线路波阻抗,达到大幅度提高自然功率,有效压缩输电线路走廊宽度的新型输电技术。正是由于它能够显著提高输电线路输送能力并压缩走廊宽度,这一输电线路技术已被俄罗斯、巴西、美国等国家较为广泛地研究和应用,我国也做了相关的工作,取得了明显的经济效益和社会效益^[1]。

1.1.1 国外研究现状

前苏联对高自然功率的紧凑型输电线路进行了大量研究。阿历克山德罗夫教授的研究中指出,采用适当的导线排列,使每相的各根子导线表面场强在不发生电晕的条件下尽可能大,提高每根子导线的“利用率”,可以明显的提高线路的自然功率。图 1-1 为其研究中提出的提高线路自然功率的导线排列。

20 世纪 90 年代初,苏联建成 330 kV 紧凑型线路,自然功率是同电压等级常规线路的 1.7 倍。该线路所采用的塔型和导线排列如图 1-2 所示^[2]。中相和边相采用的导线结构有着细微的差别,以改善导线表面场强的平衡程度。考虑到杆塔和横担对场强的影响,在杆塔附近应使子导线的间距相应缩小,如空心圆点所示,而挡距中间部分的子导线距离则维持不变,如实心圆点所示。

巴西在紧凑型输电线路研究与应用方面,在国际上处于领先地位^[3-7]。其研究目的主要在于提高远距离输电线路的输送能力,满足能源中心与负荷中心之间的电能输送要求。巴