



国际电气工程先进技术译丛

 Springer

未来输电网 的先进技术

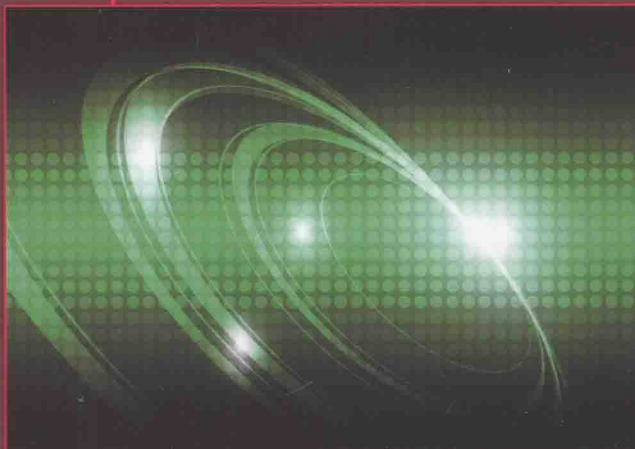
Advanced Technologies for Future Transmission Grids

[意] 吉安路易吉·米格里瓦卡 (Gianluigi Migliavacca) 等著

朱革兰 刘杨华 张勇军 等译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

未来电网的先进技术

[意] 吉安路易吉·米格里瓦卡 (Gianluigi Migliavacca) 等著
朱革兰 刘杨华 张勇军 等译



机械工业出版社

本书作者基于欧盟委员会分布式发电能源组织 REALISEGRID 项目的研究成果,对输电网先进技术进行了全面阐释,描绘了它们集成发展的中期路线图,涉及新型电缆、实时热容评定系统、柔性交流输电、高压直流输电、潮流控制协调和电能存储等技术,深入分析了它们的利弊和作用,并给出了对其进行技术经济评估时所需的数据和专家知识。

本书不仅给出了通用性的指南,还结合了许多工程应用案例,展示了大量的实用信息和图表。

本书可供从事电力系统输电技术的科学研究、规划设计、工程建设、运行检修的专业技术人员使用,也可作为相关专业的本科生和研究生的参考书。

Translation from English language edition:

Advanced Technologies for Future Transmission Grids

by Gianluigi Migliavacca

Copyright © 2013 Springer London

Springer London is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved.

本书中文简体字版由 Springer 授权机械工业出版社出版,未经出版者书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。版权所有,翻印必究。

北京市版权局著作权合同登记 图字:01-2013-6800 号。

图书在版编目(CIP)数据

未来输电网的先进技术/(意)米格里瓦卡(Migliavacca, G.)等著;朱革兰等译. —北京:机械工业出版社,2015.10

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Advanced Technologies for Future Transmission Grids

ISBN 978-7-111-51749-8

I. ①未… II. ①米… ②朱… III. ①电力系统结构 IV. ①TM727

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 239916 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:刘星宁 责任编辑:王欢

版式设计:赵颖喆 责任校对:张征

封面设计:马精明 责任印制:李洋

北京圣夫亚美印刷有限公司印刷

2016 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·21 印张·397 千字

0001—2500 册

标准书号:ISBN 978-7-111-51749-8

定价:88.00 元



凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

网络服务

服务咨询热线:010-88361066

机工官网:www.cmpbook.com

读者购书热线:010-68326294

机工官博:weibo.com/cmp1952

010-88379203

金书网:www.golden-book.com

封面防伪标均为盗版

教育服务网:www.cmpedu.com

译者序

进入 21 世纪以来,新一轮能源革命的序幕已经拉开。随着经济的发展、社会的进步、科技和信息化水平的提高及全球资源与环境问题的日益突出,能源的合理开发利用、电网的协调发展面临着新的课题和新的挑战。尤其是近年来,绿色能源、低碳变革已经在世界范围内成为一种发展趋势,水力发电、风力发电、太阳能发电等可再生能源发电得到了国家政策的扶持,我国可再生能源发电产业处于迅速发展的阶段。在能源结构调整的大背景下,我国电网的发展已步入一个全新的智能电网阶段。建设智能电网,是开发利用清洁能源、建设科学合理的能源利用体系的迫切要求,是满足经济社会可持续发展要求的重大选择,更是时代赋予我国电力工业的历史性重任,关系到经济社会发展和国计民生。

而智能化的输电网无疑是智能电网建设的重中之重。

全国联网的逐步增强,智能电网建设步伐加快,以及新能源产业日渐兴旺,这一切使得电力系统对安全、高效、稳定运行等条件的要求越来越高,电力行业的多种变革无不对输电网智能化的创新技术和先进设备的应用产生强烈的需求。

本书作者亲自参与了由欧盟委员会分布式发电能源组织出资的研究项目——REALISEGRID,在历时三年研究中发现,虽然有关输电网的各项新技术的一些细节已发表过大量研究成果,但缺乏对它们的全面阐述,更缺乏对输电网各种新技术一体化集成发展的未来愿景的研究,以及对各种新技术进行成本效益评估时所必需的信息和专家知识。作者全面介绍了 REALISEGRID 项目对于未来输电网先进技术发展的中期路线图,阐明了每项技术在达到成熟水平之前面临的关键问题。依据输电网目前的研究热点,选取了具有代表性的可预期成果的六项新设备技术,包括新型输电电缆、电缆的实时热容评定系统、柔性交流输电、高压直流输电、电力系统潮流控制协调技术和储能技术,论述了每种技术的特征、利弊,概述它们在电力系统规划阶段的指南,给出了它们接入系统后在经济和环境方面影响的宝贵的数据,并介绍了一些工程实例或样机。

全书取材于工程实际项目的研究成果,又进行了全面深化和完善,内容层次分明,数据丰富,信息充沛。每种技术各自独立成章,方便读者各取所需。本书是一本反映现代电力系统输电网先进技术、学术水平较高的专著。

在新一轮能源和信息技术创新蓬勃发展的今天,抢占输电网相关先进技术领域和产业制高点无疑是我国电力工业发展的重要机遇。本书恰恰为我们展示了欧

IV 未来输电网的先进技术

盟各国电力运营商们在这方面的努力和研究成果。它山之石，可以攻玉。我国电力行业及相关行业专业技术人员，不仅可以从本书借鉴欧洲输电网先进技术发展的理念，还可以找到许多感兴趣的技术细节。

本书译者来自几所高校的电力系统及其自动化专业。其中，前言、第1、5、6章及部分附录由朱革兰翻译，第2~4章及部分附录由刘杨华翻译，第7章由韩新莹翻译，并由朱革兰进行统稿，同时张勇军参加了部分内容的翻译并对全书进行审校，另外刘泽槐、刘伦、李钦豪、孙舒逸、杨雨瑶、胡鑫、张锡填、刘宇新、盛建兰等研究生也参与了本书的翻译工作。

翻译工作难以完美，由于译者水平有限，书中难免存在错误不妥之处，深望读者批评指正。

译 者

2015年9月于华南理工大学

原 书 前 言

欧洲电力系统近几年的发展速度非常快，主要是因为受到两方面重要力量的联合作用：可再生能源（Renewable Energy Sources, RES）的快速增长，尤其是风能和太阳能电站；能源跨境贸易的发展。前一个使北欧到南欧轴线（见图 0.1）上的潮流持续增长，使得 RES 潜力大的地区（特别是北海海上风场和南欧的太阳能）和 RES 潜力较低但负载大的中欧地区联系起来。然而，由于风力发电和太阳能发电自身特有多变的运行状况，它们可能连续几小时发电过剩，而在另一些时段可能发电不足。在发电过剩的情况下，多余的电量必须输送到几个储能装置（在当前主要限于抽水蓄能电站）；而在发电不足的情况下，为了补偿发电“缺口”，储能装置中存储的能量必须释放出来。为了缓解风电场由于储能资源的不足、负载和发电量必须实时严格匹配的困境，应不断推动储能装置的应用。

另一方面，电能在不同国家的电力市场间寻找套利机会，这种跨境贸易的不断发展给现有的跨境骨干网络带来了压力，因为跨境联网最初的目的是提供电源的相互支撑而不是转运大量商业性质的潮流。从理论上来说，在新的局面下，为实现汇流系统的跨境联网功能，所有限制功率传输的瓶颈都应该从网络中移除。相比之下，欧洲大量的输电基础设施资产已经老化，不得不更换。

但是，由于强烈反对的民意和一个国家内部及不同国家之间的所有复杂、不和谐的授权生效程序，新建输电线路正变得越发困难。这是建成新发电厂所需时间（几年）和建设新的电气联络所需时间（十年以上）之间存在巨大差距的主要原因之一。

除了上述输电系统的演变，配电系统也发生着关键性的变化。相对于输电系统，传统配电系统使用的先进技术较少。就这一点而言，为保证电网发展的优化和经济，输电系统运营商（Transmission System Operator, TSO）和配电系统运营商（Distribution System Operator, DSO）之间有必要进行密切的互动。

为了解决上述问题，创新型输电技术的应用将起到关键作用。创新型输电技术的目标在于使现有的系统“更加智能”，如更加灵活、对突然的条件变化反应更灵敏，且有能力处理大量的间歇性电源。

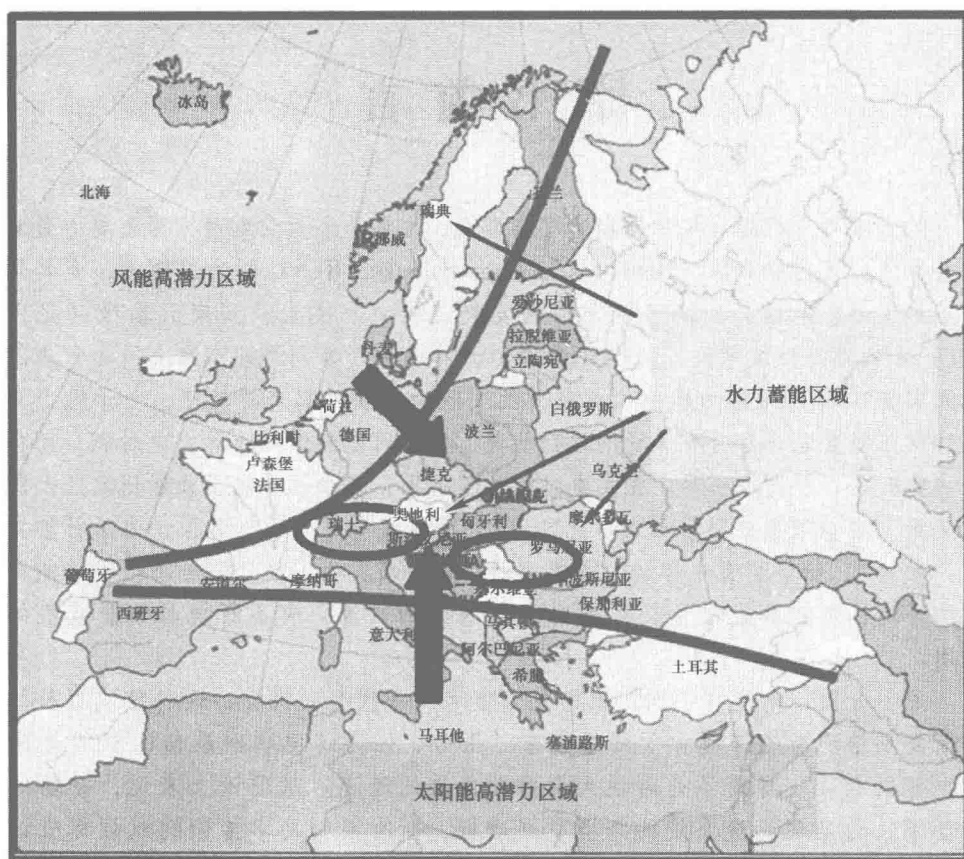


图 0.1 欧洲可再生能源潜力

所有这些趋势和问题促成了欧洲研究项目“REALISEGRID” (<http://realise-grid.rse-web.it>)。该项目的目的在于开发出一套标准、指标、方法和工具，来评估输电基础设施的发展方案，从而支撑欧盟（European Union, EU）实现可靠的、有竞争力的和可持续发展的电力供应。“REALISEGRID”项目由欧盟委员会分布式发电能源组织共同组建，其最重要的主题如下：

- 对输电新技术的使用进行评估，来辅助电网规划；
- 对能处理强易变性系统的新规划方法论进行研究；
- 对建立输电主干网优先扩展路径进行综合分析与验证；
- 对管理规定进行分析，从而在处理公众舆论问题中能帮助实现更为快速、有效的决策过程；
- 对 TSO 构建有效激励的报酬机制。

在协调“REALISEGRID”项目的三年中，我发现，尽管围绕电力系统的新

技术这个主题已经出版了大量的书籍和论文,但是在电力系统相关利益各方的期望和现状之间还存在显著的分歧。事实上,虽然对单项技术(如 FACTS[⊖]、HVDC[⊗]或 WAMS[⊕])的技术细节已不需要做更多介绍,但现有的科学文献实际上在以下几方面没能提供有效的内容:

- 对比不同的技术,突出各自的利与弊;
- 解释每项技术在系统内所能扮演的最佳角色;
- 概述每项技术在电力系统的规划阶段能从哪些方面起辅助作用;
- 提供成本和效益的定性和定量(可能的话)的评估依据,以帮助建立商业案例和比较不同的投资可选方案(如新建架空线、电缆和提升现有设施利用率的新技术之间的比较)。

这些思考促使我和其他作者整理了“REALISEGRID”项目的成果,并用更多的数据和更深入的分析完善它们。这样做也是为了使地理视野从欧洲扩大到全世界。

本书按以下章节组织:

- 第1章输电网前沿技术集成的中期路线图。首先介绍了推动输电系统不断变化的关键趋势和先进输电技术带来的机遇。接着给出了一个案例分析——集合进入泛欧洲电力系统的有前景的先进输电技术的中期路线图,这是欧盟资助项目“REALISEGRID”(2008—2011)的框架。绘制该技术集合路线图考虑了基于输电网及其特征、发展的系统性的方法。分析过程从并行的技术视角来完善,该技术视角聚焦于有前景的技术方案当前和预期的进展。路线图由连续的层级组成,包括从 TSO 角度出发的泛欧洲输电系统的未来中期愿景、推动该愿景实现的过程中输电系统面对的严峻挑战、引入候选技术方案预期总体效益及引入关键技术面对的挑战。

- 第2章新型电缆。第2章研究了与新型地下电缆的技术性能及其对输电系统的影响相关的各个方面。海底电缆适用于地区之间穿过海洋利用岛屿时的互连,也适用于海上工厂(风电场或石油平台)的互连。电缆是实现海底项目唯一技术可行的方案。地下电缆和海底电缆从输电网初级阶段就一直在使用。传统中,电缆的应用局限于输电连接中架空线无法使用或难以使用的那些线路部分,如城市、工厂及海底这样的情况。输电系统运营商们更加偏向于使用架空线的原因主要是经济方面(架空线更便宜)。但是,不管怎样也有一些技术层面的原

⊖ FACTS: Flexible Alternative Current Transmission System, 柔性交流输电系统。

⊗ HVDC: High-Voltage Direct Current, 高压直流输电。

⊕ WAMS: Wide Area Measurement System, 广域监测系统。

因,也就是第2章将涉及的情况,仍然需要使用电缆。电力电缆技术的发展是一个十分缓慢的过程。由于减少投资成本和风险的需要,相关人员通常偏向于成熟的技术。现在有一种基于XLPE (Crosslinked Polyethylene, 交联聚乙烯) 的商用固体绝缘技术,简单而且对处理和维护的工艺要求较低,这主要是因为可利用预制配件(连接头和终端)。在不久的将来,“智能电缆”的采用将会有力地推动HVAC和HVDC地下输电线成为现实。另外,针对采用新型HVDC电缆技术实现大型输电基础设施或能源通道的可行性,第2章将会做特别的研究。

- 第3章实时热容评定[⊙]系统。第3章描述了动态增容系统,即现在称为实时热温度监测系统的技术,并特地描述了其性能。这类系统允许实时监测关键线路的热环境,识别出变化的趋势和处于危险的条件,以在达到真正的热极限之前做出反应。在对主要元件和系统特征的描述之后,第3章列举了一个用于测试这种现场控制应用的全比例的实验室样机系统。对实时测量结果和基于数学模型的理论预测进行了比较,以同时论证RTTR应用在可靠性和提升输电容量两方面的可行性和固有优势。第3章也突出说明了在高压和超高压系统中的现场应用的例子。

- 第4章柔性交流输电系统设备。第4章的目的是阐述FACTS的主要特征。这些基于电力电子的设备有可能在有限的环境影响下提高输电网容量及系统的灵活性、安全性和可控性。FACTS可能给输电网规划者提供有效的方法,去解决当前在规划电网时遇到的一些问题。在阐述各种FACTS技术的特征之后,第4章给出了经济和环境方面极其重要的数据。在评估此类设备接入系统后对经济和环境的影响时这些要素是必需的。另外,第4章不仅提供通用的规划指南,还提供了某些特定的应用实例。第4章最终的目标是提出FACTS的关键要素并提供指南,以支持在可选的加强设备中包含FACTS时选择最合理的扩展方案的决策。

- 第5章高压直流输电。第5章的目的是阐述HVDC技术的主要特征。近五十年以来,HVDC技术不仅在特定的长距离和海底输电中已广泛地使用,也广泛用于非同步系统中以防止大扰动的传播。然而不管怎样,在接下来的几年时间里,基于新型电压源换流器的技术将带来显著的优势,包括在网状系统中配置多端系统以连接不同的海上风场。在阐述各种HVDC技术的特征之后,第5章给出了经济和环境方面极其重要的数据。在评估此类设备接入系统后对经济和环境的影响时这些要素是必需的。第5章不仅描述了通用的规划指南,也描述了一些特定的应用实例。第5章最终的目标是提出HVDC的关键要素并支持即用来在可

⊙ Real-Time Thermal Rating, RTTR。

选的加强设备中包含 HVDC 时选择最合理的扩展方案的决策。

● 第6章电力潮流控制设备的协调方法。第6章的目的是说明欧洲协调潮流控制设备的现有的方法,并综述未来有前景的用于协调控制的方法。为了展示现有的 TSO 间协调程序可能的进一步的改进,第6章提供了新发展的潮流控制设备协调方法,并通过评估不同种类的应用的优缺点进行了比较。最后,第6章给出了在未来以提升输电总体容量为目标时应如何改进电力潮流控制设备协调方法的建议。

● 第7章电能存储:提高未来电力系统灵活性的新选择。第7章提出了影响输电网规划和运行的电力储能的关键技术。在对由输电系统内的储能元件的调度引起的问题做出综述之后,第7章提出了不同电力储能技术的技术特征,并提供了经济和环境方面的数据,对此类技术的技术经济和环境评估而言这些数据是必需的。

本书还给出了一份附录,解释了输电技术家族一系列具体的技术术语。每一节都简短介绍相关技术的关键功能、应用和改进方法。该附录可提供有用的参考。

包含的技术如下:

- 高温超导 (High Temperature Superconducting, HTS) 电缆
- 气体绝缘线路 (Gas-Insulated Line, GIL)
- 高温 (High-Temperature, HT) 导体
- 移相变压器 (Phase-Shifting Transformer, PST)
- 基于 RTTR 的电缆/线路
- WAMS/相量测量单元 (Phasor Measurement Unit, PMU)
- HVDC
- FACTS
- 抽水蓄能与风力发电结合的特征
- 压缩空气储能 (Compressed Air Energy Storage, CAES; A-CAES)
- 飞轮储能 (Flywheel Energy Storage, FES)
- 超导磁储能 (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES)
- 钠硫 (Na-S) 电池
- 液流电池 (电力/能量存储)
- 超级电容 (储能)
- 锂离子电池
- 限流器
- 新型输电塔

为了方便阅读，每一章都是独立构成的。这将为那些有特定兴趣的读者提供便利。

总之，我和本书的其他作者都希望，本书能对电力系统新技术进行系统性的阐述以弥补一个重大的信息空白，并帮助读者获取关于这些技术在输电系统中最重要的应用的信息。

一方面，学术界将会发现若没有那些电力系统中有日常管理经验的人的支持，数据和“实用”的信息很难得到。顺便说一下，很多欧洲输电系统运营商和电力系统主要的制造商，已经在“REALISEGRID”项目中提供了它们的专家知识，而且这些经验在本书已经被充分地利用。

另一方面，电气领域的利益相关方尤其是系统规划方，可以发现本书很多宝贵的数据和专家知识，在日常的工作中也是很有价值的。

Ricerca sul Sistema Energetico-RSE S. p. A. Gianluigi Migliavacca[Ⓒ]

意大利米兰

Ⓒ Gianluigi. Migliavacca@rse-web.it。

目 录

译者序

原书前言

第 1 章 输电网前沿技术集成的中期路线图	1
1.1 输电系统的演化	1
1.1.1 欧洲 (或欧盟)	1
1.1.2 美国	5
1.1.3 全球电力系统未来的焦点	6
1.1.4 欧洲案例: 泛欧地区输电网络面对的重大挑战	7
1.1.5 对 2030 年泛欧洲输电系统的展望	9
1.2 针对 TSO 的欧洲中期技术路线图	12
1.2.1 技术集成路线图的适用范围	12
1.2.2 支持输电系统的既定创新技术	15
1.2.3 技术集成路线图的概述	18
1.2.4 无源设备集成技术路线图	21
1.2.5 有源设备技术集成路线图	24
1.2.6 实时监控设备的技术集成路线图	25
1.3 结论	28
参考文献	30
第 2 章 新型电缆	32
2.1 输电电缆的发展简史	32
2.2 技术综述	33
2.2.1 电缆的基本组成	33
2.2.2 挤包绝缘电缆系统	34
2.2.3 自容式充油电缆系统	36
2.2.4 其他类型的电缆	37
2.2.5 电气参数	38
2.3 挤包绝缘电缆交流输电的可靠性及运行历史	41
2.3.1 输电电缆的运行	41
2.3.2 电缆安装	42
2.4 长距离输电	44

XII 未来输电网的先进技术

2.4.1 特高压交流电缆的最大输电距离	44
2.4.2 对网络的影响及并联补偿	45
2.5 高压直流输电电缆	48
2.5.1 粘性浸渍纸绝缘高压直流电缆系统	51
2.5.2 高压直流挤包绝缘电缆	52
2.5.3 其他类型的高压直流输电电缆	54
2.5.4 陆地输电用高压直流电缆	54
2.5.5 高压直流输电电缆的主要特性	55
2.6 输电电缆的电气应力	55
2.6.1 交流电缆的电气应力	56
2.6.2 直流电缆的电气应力	57
2.6.3 高压直流电缆工程	57
2.7 电缆对环境的影响	59
2.8 电磁场	60
2.9 电缆系统的投资成本	62
2.10 其他革新技术	63
2.10.1 超导电缆	64
2.10.2 高温超导电缆的设计	64
2.10.3 高温超导电缆的特点	64
2.11 气体绝缘线路	66
参考文献	67
第3章 实时热容评定系统	69
3.1 实时热容评定系统的背景	69
3.2 技术综述	69
3.2.1 建立实时热容评定系统的目的	69
3.3 实时热容评定系统与输电系统运营商的运营	70
3.4 高压输电线路中设置实时热容评定系统的益处	71
3.5 有关实时热容评定系统的说明	72
3.5.1 分布式温度传感器的设计原则	72
3.6 实时热容评定系统中分布式温度传感器系统的应用	74
3.7 动态实时热容评定系统与仅采用分布式温度传感器的系统的比较	75
3.8 实时热容评定系统的实现	76
3.9 系统检验的专用检测电路	77
3.9.1 电缆设计	77
3.9.2 测试电路的供电	78
3.9.3 测试电路的特性	81

3.9.4	估算地面热阻率	82
3.9.5	电阻测量值的确定	82
3.9.6	额定电流的计算	82
3.9.7	参数监测及传感器	83
3.10	系统功能	83
3.10.1	系统描述数据库	84
3.10.2	数学模型	84
3.10.3	人机界面	85
3.10.4	硬件要求	85
3.10.5	现场输入	86
3.10.6	输出	87
3.10.7	用户的数据采集与监控设备直接输入/输出	87
3.11	分布式温度传感器的测量方法	88
3.11.1	未受干扰的地面温度	88
3.12	实时数据库	88
3.13	数学计算	88
3.14	图形用户界面的特点	89
3.14.1	图形用户界面	89
3.14.2	警报窗口	89
3.14.3	数据的历史变化趋势	90
3.15	测试结果	90
3.15.1	电缆发热	91
3.16	运行经验	92
3.17	结论	93
	参考文献	93
第4章	柔性交流输电系统设备	95
4.1	历史和技术背景	95
4.2	技术回顾	97
4.2.1	并联控制器	98
4.2.2	串联控制器	101
4.2.3	复合控制器	103
4.2.4	FACTS 设备的可靠性和可用性	107
4.3	FACTS 设备的主要技术特征总结	109
4.4	经济性和环境方面	109
4.4.1	简介	109
4.4.2	FACTS 的经济层面分析	110

4.4.3	FACTS 对环境的影响	113
4.5	FACTS 在网状电网中的整合规划	113
4.5.1	FACTS 在现代电力系统发展中的潜力	114
4.5.2	传输拥塞缓解和提高容量	118
4.5.3	FACTS 应用实例	119
4.5.4	未来趋势	122
4.6	总结	123
	参考文献	124
第 5 章	高压直流输电	128
5.1	简要历史背景和展望	128
5.2	技术综述	129
5.2.1	电网换相 CSC HVDC	132
5.2.2	自换相 VSC HVDC	134
5.2.3	可靠性和可用性	137
5.2.4	VSC HVDC 嵌入同步电网的影响	139
5.2.5	多端 HVDC 输电	141
5.2.6	远距离电力传输	144
5.3	经济和环境方面	150
5.3.1	HVDC 输电设备的成本要素	150
5.3.2	HVDC 输电线路的环境影响	152
5.4	精选至今仍在运行中的 HVDC 输电项目	154
5.4.1	欧洲的 HVDC 输电项目	154
5.4.2	美洲的 HVDC 输电项目	158
5.4.3	非洲的 HVDC 输电项目	161
5.4.4	亚洲的 HVDC 输电项目	162
5.4.5	总结和经验教训	164
5.5	输电网络集成 HVDC 系统的规划	165
5.5.1	HVDC 面向现代电力系统发展的潜力	166
5.5.2	输电阻塞的减轻和容量的增加	168
5.5.3	异步运行的电网间的耦合	170
5.5.4	海上风电场的连接	171
5.6	结论	171
	参考文献	173
第 6 章	电力潮流控制设备的协调方法	176
	引言	176

6.1 为什么需要进行电力潮流设备的协调	176
6.2 协调 PST 的现行技术途径	178
6.2.1 容量分配过程中 PST 的协调	180
6.2.2 在 TSO 日前操作安全规划中 PST 的协调性	181
6.2.3 实时操作中 PST 的协调	182
6.2.4 PST 设备在北美的实时操作	183
6.3 PFC 设备协调控制的新方法	183
6.3.1 关于 PFC 协调系统以前的工作	184
6.3.2 对最新方法的分析	186
6.3.3 未来协调方法的一般性讨论	197
6.4 总结	198
6.4.1 容量分配	198
6.4.2 日前安全计划	198
6.4.3 实时协调	199
参考文献	199
第 7 章 电能存储：提高未来电力系统灵活性的新选择	202
7.1 未来的电力系统需要提高灵活性	202
7.2 电能存储的定义	203
7.3 电能存储在电网运行中的作用	204
7.3.1 电能存储在输电系统中的作用	205
7.3.2 电能存储在配电系统中的作用	209
7.4 欧洲未来储能技术发展的推动力	210
7.5 储能技术在欧洲的应用及发展前景	211
7.5.1 物理储能	213
7.5.2 电磁储能和静电储能	223
7.5.3 化学储能	224
7.5.4 蓄热	225
7.6 储能在美国和日本的应用前景	225
7.6.1 储能在美国的应用前景	225
7.6.2 储能在日本的应用前景	227
7.7 储能技术的技术成熟度及成本	227
7.8 储能商业应用的效益前景	230
7.8.1 孤岛电力系统储能	232
7.8.2 英国苏格兰奥克尼群岛的电力储能站	232
7.9 结论	233
参考文献	234

附录	237
附录 A 先进传输技术的术语解释	237
A.1 高温超导 (HTS) 电缆	237
A.2 气体绝缘线路 (GIL)	240
A.3 高温导线 (HTC)	244
A.4 移相变压器 (PST)	250
A.5 基于实时热评定 (RTTR) 的电缆/线路	254
A.6 广域监测系统 (WAMS)/同步相量测量单元 (PMU)	257
A.7 高压直流输电 (HVDC)	260
A.8 柔性交流输电系统 (FACTS)	265
A.9 风力抽水蓄能及风机快速停机状况下的电能供应	272
A.10 压缩空气储能 (CAES)	275
A.11 飞轮储能 (FES)	277
A.12 超导磁储能 (SMES)	280
A.13 钠硫 (Na-S) 电池	282
A.14 液流体电池 (功率/能量存储)	284
A.15 超级电容器 (储能)	288
A.16 锂离子电池	292
A.17 故障限流器 (FCL)	296
A.18 新型输电塔	302
附录 B 参考文献	305
B.1 背景	305
B.2 路线图和相关规范	306
B.3 超导电缆	307
B.4 PST	308
B.5 基于 RTTR 的电缆和线路	308
B.6 GIL	309
B.7 HTC	309
B.8 WAMS/PMU	310
B.9 HVDC	311
B.10 FACTS	313
B.11 储能技术	314
B.12 限流器	316
B.13 新型输电塔	316
关于作者	317