

中国工程科技论坛

全球能源互联网 关键技术与发展展望

● 中國工程院

高等教育出版社

中国工程科技论坛

全球能源互联网关键技术与 发展展望

Quanqiu Nengyuan Hulianwang Guanjian Jishu
Yu Fazhan Zhanwang

高等教育出版社·北京

内容提要

本书是中国工程院“中国工程科技论坛”系列丛书之一。2017年4月18—19日,由中国工程院主办、中国工程院能源与矿业工程学部承办、全球能源互联网研究院协办的第246场中国工程科技论坛在北京召开。本次论坛是中国工程院贯彻落实习近平总书记提出的“探讨构建全球能源互联网,推动以清洁和绿色方式满足全球电力需求”中国倡议精神,首次围绕全球能源互联网主题召开的一次高端专题学术研讨会。与会院士和专家围绕事关全球能源互联网发展的基础性、前瞻性问题,深入研讨了全球能源转型、可再生能源发展、化石能源清洁化、现代能源系统建设等战略问题,特高压输电、柔性直流输电、智能电网、储能、电动汽车等关键技术,以及能源、交通、信息等网络融合发展有关重大理论问题。论坛期间同时召开了主题分别为“全球能源互联网关键技术研究与应用”“全球能源互联网和我们”的两个分论坛,针对跨洲跨国电网互联、智能电网技术、清洁能源新技术及应用、新型储能与电能替代、新材料与器件、先进输电装备与系统、智能电网与信息通信、能源政策与标准等专业方向展开热烈讨论。发展全球能源互联网是实施全球基础设施互联互通、打造人类命运共同体的重要举措,将引领中国工程科技实现创新,为促进世界能源转型实现可持续发展做出积极贡献。

本书适合能源领域的科技工作者、管理人员以及高等院校的师生阅读。

图书在版编目(CIP)数据

全球能源互联网关键技术与发展展望 / 中国工程院
编著. -- 北京: 高等教育出版社, 2018.1

(中国工程科技论坛)

ISBN 978-7-04-049039-8

I. ①全… II. ①中… III. ①互连网络-应用-能源
发展-研究-世界 IV. ①F407.2-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 292670 号

总策划 樊代明

策划编辑 黄慧靖

封面设计 顾斌

责任编辑 张冉

责任印制 刘思涵

出版发行 高等教育出版社

社址 北京市西城区德外大街4号

邮政编码 100120

印刷 河北鹏盛贤印刷有限公司

开本 787mm×1092mm 1/16

印张 13

字数 255千字

购书热线 010-58581118

咨询电话 400-810-0598

网 址 <http://www.hep.edu.cn>

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

网上订购 <http://www.hepmall.com.cn>

<http://www.hepmall.com>

<http://www.hepmall.cn>

版 次 2018年1月第1版

印 次 2018年1月第1次印刷

定 价 60.00元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换

版权所有 侵权必究

物料号 49039-00

编辑委员会

主 任

黄其励

副 主 任

滕乐天

委 员

谢 开 汤广福 柴高峰 邱忠涛

目 录

第一部分 综 述

综述	3
----------	---

第二部分 主旨报告及报告人简介

支撑全球能源互联网发展的若干电力新技术	滕乐天	7
---------------------------	-----	---

第三部分 专家报告及报告人简介

我国先进输电技术创新与实践	汤广福	33
柔性直流输电技术在南方电网的发展与实践	周保荣	44
能源互联网——信息能源基础设施一体化	曹军威	54
全球能源互联网关键输变电设备运行状态评估	廖瑞金等	78
大规模可再生能源并网系统动态稳定问题	袁小明	90
新能源发电虚拟同步机关键技术及示范应用	姚为正等	95
可再生能源电解制氢与氢能综合利用	俞红梅	110
能源转型背景下全球能源互联网发展评估与政策建议	邱忠涛	115
智能电网用磁性材料国产化发展及应用	孟 利	128
国产 IGBT 发展现状以及在全球能源互联网中的应用展望	金 锐等	134
多端柔性直流输电技术在南方电网中的应用及展望	黄 莹等	140
半波长交流输电技术	秦晓辉等	156
支持全球能源互联的直流核心装备研发与工程化	查鲲鹏	164
信息技术助力能源互联网构建	路兆铭等	177
跨国电力互联和电力贸易的政策框架	邢 璐等	188
附录 参会人员名单		198
后记		201

第一部分

综 述

综 述

2017年4月18—19日,由中国工程院主办、中国工程院能源与矿业工程学部承办、全球能源互联网研究院协办的第246场中国工程科技论坛在北京召开。论坛围绕“全球能源互联网关键技术与发展展望”的主题,聚焦战略问题、交流学术思想、谋划未来发展,是在全球能源变革转型的关键时期召开的一次高端、务实、令人难忘的盛会。23位院士以及来自国内相关行业组织、研究机构、高等院校、能源电力与设备制造企业等单位的专家和代表出席了会议。各位院士和专家以前瞻性的思维、多层次的视角,围绕能源互联网建设、电力前沿技术、可再生能源发展、电动汽车等重点问题,进行了精彩、生动、深刻的演讲,气氛热烈、讨论深入、成果丰硕。

一是聚焦战略重点问题,凝聚广泛发展共识。本次论坛紧密围绕习近平总书记提出的全球能源互联网中国倡议,紧紧把握工程科技发展前沿问题,进一步明确了全球能源互联网发展战略方向和科技创新重点领域,在广大院士和专家中间达成了广泛共识。大家一致认为,全球能源互联网是贯彻落实五大发展理念、从我国国情和世界能源电力发展规律出发提出的重大战略,是深化能源供给侧改革、推动基础设施互联互通、促进“一带一路”建设的重要抓手,将带动特高压、智能电网、清洁能源等技术走出去,为新能源、装备制造和金融产业发展带来革命性的契机,对于实现世界能源与经济、社会、环境协调可持续发展具有重大而深远的意义。

二是推动理论和技术创新,形成丰硕学术成果。本次论坛深刻把握世界科技发展方向,适应国家发展重大需求,聚焦事关全球能源互联网发展的基础性、前瞻性问题,在能源、交通、信息等网络融合发展有关重大理论问题和特高压输电、柔性直流输电、智能电网、储能等关键技术领域,提出了一系列新理念、新思想、新战略,形成了具有很强学术性、创新性的研究成果,进一步开拓了工程科技界科学研究、技术创新、产业发展的新境界。

三是深化思想交流碰撞,搭建高端合作平台。本次论坛围绕全球能源互联网这一事关人类可持续发展的重大战略,通过高层次、高水平、高质量的深度思想交流和多学科互动,进一步提升了中国工程科技论坛的高端学术品牌影响力,将有力促进多学科交叉融合和重大工程科技问题创新,吸引国内外更多的一流科技专家参加进来,为我国工程科技界交流学术成果、分享学术思想搭建重要平

台。

构建全球能源互联网,是一项重大的世纪工程,对于加快绿色低碳发展、推动全球能源生产和消费革命、促进人类命运共同体建设具有重要意义,需要各方面形成合力、共同推动。全球能源互联网发展也为世界能源和电力技术创新发展提供了巨大空间和历史机遇。

按照习近平总书记重要讲话精神,以此次论坛为契机,发挥各学科、各领域优势,加强交流、密切合作,共同开展理念传播、技术创新、标准制定、项目推进等工作,积极参与和推动全球能源互联网创新发展。各位院士和专家充分发挥科技领军作用,聚焦全球能源互联网重大技术和工程问题,共享前沿信息、研究理论、科研成果,在特高压输电、智能电网、清洁能源、储能电池、大电网运行控制等重点领域取得创新突破,推动一大批科技和工程学科建设,带动一大批新兴产业跨越发展,发现和培养一大批中青年科技人才,为全球能源互联网发展提供技术、工程、产业和人才支撑。

中国工程科技论坛作为聚焦战略问题、研讨前沿科技、凝聚集体智慧的重要平台,对建设国家工程科学技术思想库、推动我国工程技术水平提高以及培养优秀青年创新人才成长起到了重要作用,是中国工程院最富学术影响力的品牌活动之一。此次论坛的胜利召开,有力提升了全球能源互联网发展的新境界,实现了工程科技论坛的又一次新突破。未来,全球能源互联网事业一定能够实现大发展,引领中国工程科技实现大创新,为促进世界能源转型、实现可持续发展做出积极贡献!

第二部分

主旨报告及报告人简介

支撑全球能源互联网发展的若干电力新技术*

滕乐天

全球能源互联网研究院,北京

一、构建全球能源互联网面临的技术挑战

全球能源互联网可提高电网对大规模清洁能源发电和并网的间歇性、波动性的兼容能力,实现全球能源的时差互补、季节互补及地域互补,是全球能源需求、环境污染、气候变化等问题的根本解决方案。

全球能源互联网建设面临众多全新挑战,必须依靠原始创新,突破新材料、新器件、新装备、新系统等关键性技术,探索新型储能与能源转化等前瞻技术,加速推进电网与互联网、物联网、移动终端的深度融合。

当前,国家电网公司作为能源电力行业的龙头企业,坚持贯彻创新驱动发展战略,积极推动全球能源互联网建设,科技创新正处于从“技术赶超”转向“技术引领”、从“单项突破”转向“整体突破”的关键时期,诸多领域已经进入电力世界的“无人区”,必须依靠原始创新破解发展难题。

为有效支撑全球能源互联网构建,需全方位提升电网技术与装备水平,持续提高电工新材料和大功率电力电子器件性能,深入探索大容量新型储能与能源转化等战略前瞻技术,进一步发展特高压直流、柔性直流及直流电网等先进输电技术,加快推进信息通信、人工智能与电网深度融合,构建涵盖材料、器件、装备、系统各层级的基础支撑技术创新体系,不断提升原始创新能力,突破制约全球能源互联网发展的新材料、新器件、新装备、新系统等战略性关键技术,以重大工程带动关键设备突破和应用。

二、支撑全球能源互联网构建的重点技术

(一) 先进直流输电技术

加快发展特高压直流、柔性直流及直流电网等先进直流输电技术,支撑大规

* “特高压直流换流阀、柔性直流技术”是全球能源互联网研究院整体科研攻关的一部分,故与后文介绍有重复。

模可再生能源接入和送出,实现超远距离、超大容量、绿色环保的电能传输。

1. 特高压直流输电技术

(1) 重大需求

高压直流输电在远距离大容量输电、异步联网等方面具有无可比拟的优势,得到广泛应用。而特高压直流输电更可以有效节省输电走廊,降低系统损耗,提高送电经济性,为我国解决能源分布不均、优化资源配置提供了有效途径。截至2016年,我国已建成投运5个特高压直流输电工程,输送容量近4000万kW,线路总长度和输送容量均居世界第一。预计到2020年,我国将规划建设27回 ± 800 kV级以上等级特高压直流工程,总输电容量近300 GW,占“西电东送”工程新增输电量的80%,成为实现大规模电力输送的最主要技术手段。

特高压直流输电技术成功在我国推广应用表明,特高压直流输电技术已经发展成熟,完全具备推广到全球能源互联网应用的条件,是当前唯一可实现将万兆瓦级电能高效率输送至2000 km以外的输电技术,是实现电网跨洲、跨国互联的主要手段。

(2) 技术现状

早期,我国直流输电的核心装备包括直流换流阀、换流变压器、直流场设备等,大都被国外跨国公司所垄断。其中,实现交直流电能转换核心的换流阀装备此前只有ABB、SIEMENS和ALSTOM三家跨国公司具备研发能力,被垄断近50年。换流阀的研发制造具有以下难题:① 阀塔及部件整体设计优化困难,缺乏代表性特征;② 规模化串联晶闸管电位分布不均,极易击穿;③ 强电磁环境下高电位电子电路误动率高;④ 换流阀工况复杂,试验等效复现困难。

经过十多年的自主攻关,我国已经全面掌握 ± 1100 kV及以下直流换流阀、换流变压器、直流场设备等特高压直流输电装备核心技术,取得的创新性成果如下。

1) 提出了换流阀多物理场矩阵式调控方法,以电场、热场为主要调控对象,兼顾磁场、力场,通过矩阵式循环迭代,实现了多物理场综合调控。发明了系列新型零部件和换流阀模块,通过铁芯差异化匹配、双电阻同腔冷却、应力锥均匀载荷等方法,提高功率密度,降低电磁振动和温升。

2) 建立了换流阀的宽频域电路模型,揭示了杂散电容对晶闸管规模化串联瞬态电压分布和开通电流的影响规律。发明了多点金属增强耦合电压均衡技术,通过增加纵向杂散电容削弱了对地杂散电容的负面影响,使串联晶闸管电压分布更加均衡。

3) 提出了间隔识别和脉宽标识的双脉冲触发方法,通过对控制信号脉冲宽度、序列间隔和时间窗的复合编解码,有效阻断受干扰的畸变信号。发明了阈值

自适应过电压保护技术,当保护电路受干扰误动作时,自动调低晶闸管的过电压应力水平,延长晶闸管寿命。

4) 发明了多应力源微秒级复合注入运行试验电路。实现了换流阀持续周期性开关过程中产生的电压、电流、热、 di/dt 、 dv/dt 等多种微秒级应力等效。发明了非周期触发试验电路,可模拟换流阀在极端故障工况下,数十万伏电压开通出现的微秒级万安培冲击电流应力。

(3) 创新实践

通过多年自主技术攻关,提出了换流阀分布参数提取、多物理场数值分析、非线性组件协调配合等方法,解决了换流阀运行特性分析及优化设计难题,成功研制了世界首个 ± 800 kV/5000 A 特高压直流换流阀,突破了 ± 800 kV 换流阀电压、容量提升带来的重大技术挑战,并打破了直流换流阀 20 年“国内组装,国外试验”的被动局面。该装备应用于锦屏—苏南(图 1)、哈密—郑州、溪洛渡—浙西、灵州—绍兴、酒泉—湖南、上海庙—山东、扎鲁特—青州等 ± 800 kV 特高压直流工程,同时成功中标巴西美丽山二期 ± 800 kV 特高压直流输电工程,实现了换流阀装备从引进到出口的转变,提升了我国在国际电工装备领域的国际地位和话语权。所研制的试验平台承担了 SIEMENS 公司在德国生产的特高压换流阀的型式试验,这是我国首次为国外换流阀产品提供试验服务。

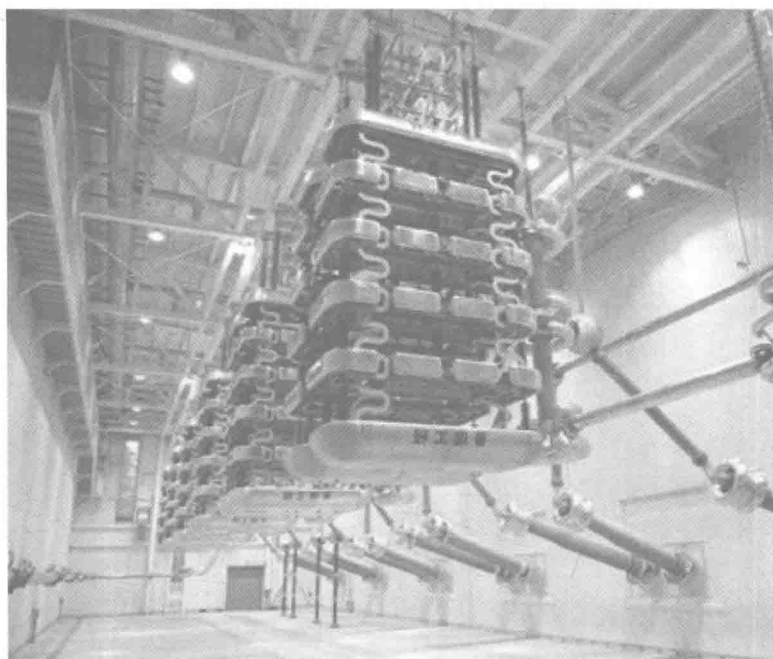


图 1 ± 800 kV/7200 MW 锦屏—苏南工程

(4) 未来发展

未来,特高压直流将继续得到快速发展,电压等级超过 ± 1100 kV、容量超过15 GW、输电距离超过3000 km,成为支撑大容量远距离跨国、跨洲电网互联的重要技术手段。预计到2020年,我国将形成“西电东送”“北电南送”的能源配置格局;预计到2025年,将开展洲内电网互联可行性研究以及东亚、中亚地区电网互联前期研究;预计到2030年,中俄、中蒙等东北亚电网互联工程和中哈、中巴等中亚电网互联工程将开工建设。

2. 柔性直流及直流电网技术

(1) 重大需求

柔性直流输电是继交流输电、常规直流输电后的一种新型直流输电方式,是目前世界上可控性最高、适应性最好的输电技术。柔性直流输电在我国西部地区大规模可再生能源并网、多馈入常规直流受端换流站改造、大型城市和沿海岛屿供电等领域具有显著的技术优势,为电网升级提供了一种有效的技术手段。由其构成的直流电网可以在大范围内实现风、光、水等间歇性、波动性可再生能源发电的广域互补,是构成全球能源互联网的重要基础支撑。

目前,欧洲正大力推进能源转型,计划将北海和大西洋的远海风电、芬兰和挪威的水电、非洲北部的太阳能接入电网,迫切需要新型的输电技术。为此,规划了一个基于柔性直流的全新输电网,用来实现可再生能源的大范围接纳和配置。我国西部和东部沿海地区风力资源丰富,未来局部地区可再生能源发电比例将超过50%,需要更加灵活的并网技术。东部和南部沿海岛屿众多,供电可靠性和质量无法满足人民生活水平提升要求,需要更加高效、可控的输电技术。

(2) 技术现状

截至2017年,世界上已投运的柔性直流输电工程共有15条,在建工程11条,在建工程总容量超过10 GW,相当于前十年投运工程总容量的4倍。从容量上来看,世界上第一条柔性直流输电试验工程的容量仅仅为3 MW,通过几年的发展后就迅速增加到数百兆瓦级。到2011年,已投运的工程最大容量为400 MW,在建工程最大输送容量达到 2×1000 MW。从地域分布来看,现有工程(含正在建设的工程)中有18条在欧洲,占的比例最大;其他的地区中,北美洲有4条,大洋洲有2条,非洲有1条,亚洲有1条(上海南汇)。从应用领域来看,现有工程(含正在建设的工程)中用于风电场并网的有9个、用于电网互联的有8个、用于电力交易的有5个、用于大型城市供电的有2个、用于海上平台的有2个。

目前,欧美发达国家已充分认识到柔性直流输电在可再生能源和智能电网建设中的重要作用。北欧地区计划到2030年通过多端柔性直流实现海上风电接入,预计投资规模为300亿欧元。英国、美国也均已规划在未来20年建设五六十条柔

性直流输电工程,以满足其国内可再生能源发展和智能电网建设的需求。

目前,国家电网公司已经构建了完整的柔性直流输电技术体系,自主开发了 ± 30 kV、 ± 200 kV、 ± 320 kV等柔性直流换流阀核心装备,支撑了系列工程建设;开展了直流电网基础理论、关键技术、核心装备研究,研制出世界首个200 kV高压直流断路器,并针对直流变压器、直流限流器等新型直流电网装备开展了前期技术探索。

(3) 创新实践

建成了 ± 30 kV 上海南汇风电场并网工程、 ± 200 kV 浙江舟山五端柔性直流工程、 ± 320 kV 福建厦门柔性直流工程等柔性直流输电工程,完成了世界首个200 kV 高压直流断路器在电网中的应用,正在建设 ± 420 kV 渝鄂背靠背和张北 ± 500 kV 世界首个直流电网示范工程。

1) 上海南汇风电场并网工程。2011年7月,亚洲首条柔性直流示范工程(上海南汇)建成投运,该工程为世界首个用于风电并网的模块化多电平工程,额定输送功率20 MW,额定电压 ± 30 kV,是我国在大功率电力电子领域取得的重大创新成果,作为首个风电并网 MMC(modular multilevel converter,模块化多电平换流器)工程,被作为典型案例列入 CIGRE 导则。

2) 浙江舟山五端柔性直流工程。2014年6月,浙江舟山五端柔性直流工程投入运行,作为世界上端数最多的柔性直流工程,换流站额定容量为(400/300/100/100/100 MW),直流额定电压为 ± 200 kV,提高了舟山电网的运行可靠性。

3) 福建厦门柔性直流工程。2015年12月,世界上输电容量最大的直流工程(福建厦门)建成投运,该工程直流额定电压 ± 320 kV,输送容量1000 MW,是世界首个双极柔性直流输电工程,为厦门的经济发展提供了坚强可靠的电力保障(图2)。



图2 厦门柔性直流输电示范工程换流阀厅

4) 研制出世界首个 200 kV 级联全桥混合式直流断路器,并成功在舟山工程中示范运行,正在张北建设世界首个直流电网示范工程。

(4) 未来发展

柔性直流和直流电网未来将向更多端数、更大容量、多电压等级互联方向发展,以实现规模化可再生能源接纳和电力灵活调控的能力。预计到 2020 年完成 ± 500 kV 柔性直流换流阀和直流断路器和 ± 500 kV 直流电网工程的建设;到 2025 年完成 ± 800 kV/8000 MW 柔性直流核心装备研制和试验 ± 800 kV 直流断路器样机;到 2030 年完成 ± 800 kV 柔性直流工程示范应用陆上/远海多电压等级直流电网示范工程。

(二) 高压直流电缆与电力电子器件

研制高压直流电缆以及更高电压、更大容量、更高效率的新型电力电子器件,支撑先进交直流输电核心装备研制。

1. 高压直流电缆技术

(1) 重大需求

高压柔性直流输电已成为远距离大容量输电和新能源电力规模化利用的大电网柔性互联的重点发展方向。高压直流电缆作为柔性直流输电技术的关键装备,具有实现长距离、大容量、低损耗电力传输的优势,可解决新能源规模化利用与区域联网电力输送中的电能传输难题、提升城市化进程中输电网络增容的电缆化改造安全性与环保性、增强电网抵抗自然灾害危害的能力与安全运行可靠性。研制高压直流电缆,支撑先进交直流输电核心装备研制,对于保障电力能源安全和可持续发展具有十分重大的战略意义。

国产 ± 500 kV 直流电缆计划在张北工程应用,德国-挪威将建设 ± 525 kV 直流电缆输电工程,英国也将建设 ± 600 kV 直流电缆输电工程。随着跨国、跨洲直流联网工程的增加,开发更高电压等级的直流电缆已成为必然。

(2) 技术现状

国外开发出了 ± 700 kV 改性油纸直流电缆和 ± 640 kV 交联聚乙烯(XLPE)直流电缆,并已成功研制 ± 320 kV 直流电缆,目前正开展 ± 500 kV 交联聚乙烯直流电缆样机和 ± 800 kV 直流电缆前期技术研究。

近年来,挤包绝缘高压直流电缆的发展已成为国际直流输电领域的研究热点,先后建成 10 多条 XLPE 绝缘高压直流电缆示范工程,线路长度超过 3000 km,最高电压等级和传输容量达到 ± 320 kV/800 MW。2015 年,ABB 公司又与北欧化工合作推出新一代直流电缆绝缘料,制造出 ± 525 kV/2.6 GW 直流电缆系统产品,并通过了试验验证;随后意大利 Prysmian 集团也开发出 ± 525 kV 直流电