

现代电网前沿科技研究 与示范工程

葛维春 著



科学出版社

现代电网前沿科技研究 与示范工程

葛维春 著

北京

内 容 简 介

本书系统介绍了现代电网前沿科技关键技术研究及其在某些地区的示范工程。全书共9章,分别介绍了现代电网前沿科技发展与研究历程、基于CC-2000支撑平台的EMS高级应用系统研发及其示范工程、基于小波变换技术的输电线路故障测距关键技术研究及示范工程、风电场储能关键技术研究及示范工程、高集成度智能变电站关键技术研究及示范工程、无功补偿关键技术研究及其国产化示范工程、增容导线关键技术及其示范工程、提高配电网故障处理能力关键技术研究及示范工程,以及电力物联网关键技术研究及示范工程。

本书可供电气技术专业人员、电气专业在校师生、电力系统工作人员阅读参考。

图书在版编目(CIP)数据

现代电网前沿科技研究与示范工程/葛维春著. —北京:科学出版社, 2018.3

ISBN 978-7-03-056015-5

I. ①现… II. ①葛… III. ①电网-研究 IV. ①TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2017)第312857号

责任编辑:张海娜 姚庆爽 / 责任校对:何艳萍

责任印制:张 伟 / 封面设计:蓝正设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京京华虎彩印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年3月第 一 版 开本:720×1000 B5

2018年3月第一次印刷 印张:18 1/4

字数:360 000

定价:130.00元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

现代电网是融合了信息、数学等多种前沿技术的输配电系统,现代电网的发展目标是建设节能、环保、高效、可靠、稳定的电网。现代电网前沿科技的发展与研究历程说明现代电网关键技术不仅仅是理论,在研发和设备发展上也取得了突破,并且已经应用到实际生产和生活。本书分别从研究现状、工程需求、关键技术的原理、应用情况以及总结和展望等五个方面对 8 种现代电网的关键技术进行介绍,明确了这些关键技术在国内研究和应用情况、示范工程情况以及国外的推广应用情况,着重介绍了关键技术的原理以及应用情况,突出了创新技术,介绍了应用情况的效果以及应用范围和效益产值情况。这些技术的创新使得现代电网更加稳定、可靠、环保、高效,并且为这些技术的进一步发展和应用起到了示范性的作用。

第 1 章介绍现代电网前沿科技发展与研究历程,重点介绍现代电网网架结构的发展历程、现代电网关键技术及设备的发展历程以及现代电网示范工程建设的发展历程。

第 2 章介绍基于 CC-2000 支撑平台的 EMS 高级应用系统研发及其示范工程,主要通过总体设计阶段、实验室开发阶段、现场调试阶段、现场试运行阶段等方面介绍软件的开发过程,并重点介绍此款软件的应用情况。

第 3 章介绍基于小波变换技术的输电线路故障测距关键技术研究及其在辽宁电网的示范工程,重点介绍小波变换技术的关键技术原理,包括行波故障测距基本原理、小波变换技术、时钟同步技术、网络式双端测距主站算法等,并通过对对应技术的示范工程更加具体地阐述小波变换技术。

第 4 章介绍风电场储能关键技术研究及其在卧牛石乡的示范工程,首先介绍大规模风电 SCADA 和 AGC 协调控制系,然后讨论清洁能源与储能联合发电计划,最后记录卧牛石风电储能示范工程。

第 5 章介绍高集成度智能变电站关键技术研究及其在辽宁电网的示范工程,包括过程层三网合一技术、SV 网络流量分析、GOOSE 网络流量分析等,介绍时钟源无缝切换策略、集中式保护控制硬软件平台技术以及变压器油色谱检测“一拖二”技术等先进技术。

第 6 章介绍无功补偿关键技术研究及其在辽宁受端电网的国产化示范工程,重点分析链式 SVG 关键技术原理,包括 SVG 功率单元拓扑结构的研究、连接形式、多控制策略、控制系统以及控制模式选择模块,并通过典型应用分析做进一步的说明。

第7章介绍增容导线关键技术及其在辽宁输电线路应用的示范工程,包括间隙性软铝线的研究现状、导线的设计原理及结构以及导线材料的选用原则等,通过实际的应用情况从经济效益和社会效益两方面分析在实际应用中增容导线的优势。

第8章介绍提高配电网故障处理能力关键技术研究及其在沈阳市的示范工程,首先介绍配电网故障风险评估及安全预警技术的研究,然后提出基于开关层-馈线层-变电站层动态调整故障分析方法以及基于等级偏好优序法的配电网故障恢复。

第9章介绍电力物联网关键技术研究及其在沈阳市的示范工程,首先介绍电力物联网的内涵,然后介绍信息感知技术、信息通信网络、专用芯片技术、状态检测技术等,最后介绍用电信息采集系统、基于电力线载波技术的电表集抄,以及大规模模集中抄表自组传感器关键技术原理。

本书是作者及其课题组在该领域十多年的研究成果总结,是现代电网前沿科技的研究。除了署名作者之外,参与相关研究的还有东北大学的孙秋野、刘鑫蕊,国家电网辽宁省电力有限公司的张宏宇、金鹏、韩月、杨长龙、刘君、杨飞、于同伟、葛延峰、张艳军、王顺江和高强等,在此表示感谢。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请广大读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 现代电网前沿科技发展与研究历程	1
1.1 现代电网网架结构发展历程	1
1.2 现代电网关键技术及设备发展历程	4
1.3 现代电网示范工程建设发展历程	6
1.3.1 特高压示范工程建设	6
1.3.2 微电网示范工程建设	15
1.3.3 智能电网示范工程建设	16
参考文献	20
第 2 章 基于 CC-2000 支撑平台的 EMS 高级应用系统研发及其示范工程	21
2.1 研究现状	21
2.2 工程需求	21
2.3 基于 CC-2000 支撑平台的 EMS 高级应用系统关键技术原理	22
2.3.1 EMS 数据库设计	22
2.3.2 EMS 应用功能概述	23
2.3.3 状态估计	24
2.3.4 潮流分析	25
2.3.5 安全分析与调度	28
2.3.6 稳定分析	29
2.3.7 调度员培训模拟	31
2.3.8 调度发电计划	32
2.3.9 技术创新点	35
2.4 应用情况	37
2.4.1 基于 CC-2000 支撑平台的 EMS 高级应用系统示范工程	37
2.4.2 基于 CC-2000 支撑平台的 EMS 高级应用系统效益分析	43
2.5 小结	44
第 3 章 基于小波变换技术的输电线路故障测距关键技术研究及其在辽宁电网的示范工程	46
3.1 研究现状	46
3.1.1 输电线路故障测距技术的发展现状	46

3.1.2 技术推广应用现状	48
3.2 工程需求	49
3.2.1 研究目的及意义	49
3.2.2 示范工程背景	51
3.2.3 技术背景	51
3.3 基于小波变换技术的输电线路故障测距关键技术原理	52
3.3.1 行波故障测距基本原理	52
3.3.2 基于小波变换的行波故障测距技术	52
3.3.3 时钟同步技术	55
3.3.4 网络式双端测距主站算法	56
3.3.5 集中式、网络化测距系统组成原理	56
3.3.6 技术创新点	59
3.4 应用情况	60
3.4.1 基于小波变换技术的输电线路故障测距关键技术 在辽宁电网的示范工程	60
3.4.2 基于小波变换技术的输电线路故障测距关键技术 在辽宁电网的效益分析	71
3.5 小结	71
参考文献	73
第4章 风电场储能关键技术研究及其在卧牛石乡的示范工程	75
4.1 研究现状	75
4.1.1 风电研究现状	75
4.1.2 风电场储能研究现状	75
4.2 工程需求	79
4.2.1 研究的目的及意义	79
4.2.2 技术背景	80
4.3 风电场储能关键技术原理	86
4.3.1 风电和储能系统接入对电力调度的影响	86
4.3.2 储能系统的特性和影响	89
4.3.3 大规模风电系统接入的发电计划建模	90
4.3.4 储能系统接入的大规模风电发电计划建模	92
4.3.5 基于智能调度平台的发电计划调度系统	93
4.3.6 技术创新点	100
4.4 应用情况	100
4.5 小结	109

参考文献	110
第 5 章 高集成度智能变电站关键技术研究及其在辽宁电网的示范工程	111
5.1 研究现状	111
5.1.1 智能变电站研究现状	111
5.1.2 研究成果及工程应用现状	112
5.2 工程需求	114
5.2.1 研究目的及意义	114
5.2.2 示范工程背景	115
5.2.3 技术背景	116
5.3 高集成度智能变电站关键技术原理	117
5.3.1 过程层三网合一技术	119
5.3.2 时钟源无缝切换策略	121
5.3.3 合并单元与对侧差动保护同步方案	123
5.3.4 集中式保护控制软硬件平台技术	127
5.3.5 集中式保护控制系统功能分解	131
5.3.6 HGIS 外卡式光学电流互感器	134
5.3.7 变压器油色谱检测“一拖二”技术	134
5.3.8 全无线式在线监测系统	135
5.3.9 技术创新点	138
5.4 应用情况	139
5.4.1 高集成度智能变电站关键技术 in 辽宁电网的示范工程	140
5.4.2 高集成度智能变电站关键技术 in 辽宁电网的效益分析	146
5.5 小结	148
参考文献	149
第 6 章 无功补偿关键技术研究及其在辽宁受端电网的国产化示范工程	150
6.1 研究现状	150
6.1.1 动态无功技术在辽宁电网的应用	150
6.1.2 静止无功补偿器	152
6.1.3 静止无功发生器	153
6.2 工程需求	158
6.2.1 辽宁电网网架结构介绍	158
6.2.2 辽宁电网无功电压运行情况及存在的问题	158
6.3 无功补偿关键技术原理	159
6.3.1 66kV 直挂 SVC 关键技术原理	159
6.3.2 链式 SVG 关键技术原理	163

6.3.3 技术创新点	169
6.4 应用情况	174
6.4.1 SVC 示范工程 1-直挂 66kV 母线光控 SVC 关键技术研究及示范应用工程	174
6.4.2 SVG 示范工程-受端电网无功补偿技术综合应用研究	182
6.4.3 无功补偿关键技术在辽宁的效益分析	187
6.5 小结	190
参考文献	191
第 7 章 增容导线关键技术及其在辽宁输电线路应用的示范工程	192
7.1 研究现状	192
7.1.1 碳纤维复合芯增容导线	192
7.1.2 间隙型增容导线	194
7.2 工程需求	200
7.3 增容导线关键技术原理	201
7.3.1 碳纤维复合芯增容导线	201
7.3.2 间隙型增容导线	202
7.3.3 增容导线的设计原理	207
7.3.4 技术创新点	210
7.4 应用情况	211
7.4.1 增容导线关键技术在辽宁输电线路的示范工程	211
7.4.2 增容导线关键技术在辽宁输电线路应用的效益分析	216
7.5 小结	217
参考文献	218
第 8 章 提高配电网故障处理能力关键技术研究及其在沈阳市的示范工程	219
8.1 研究现状	219
8.2 工程需求	222
8.3 提高配电网故障处理能力关键技术原理	225
8.3.1 配电网故障风险评估及安全预警技术研究	225
8.3.2 配电网多源信息的粗糙集约简及其在故障分析中的应用	229
8.3.3 基于开关层-馈线层-变电站层的动态调整故障分析方法	232
8.3.4 基于等级偏好优序法的配电网故障恢复	240
8.3.5 技术创新点	246
8.4 应用情况	246
8.4.1 提高配电网故障处理能力关键技术在沈阳市的示范工程	246
8.4.2 提高配电网故障处理能力关键技术在沈阳市的效益分析	252

8.5 小结	253
参考文献.....	254
第9章 电力物联网关键技术研究及其在沈阳市的示范工程.....	256
9.1 研究现状	256
9.1.1 电力物联网的内涵	256
9.1.2 电力物联网架构	257
9.2 工程需求	258
9.2.1 用电信息采集系统简介	258
9.2.2 电表集抄方法	260
9.3 电力物联网关键技术原理	261
9.3.1 自组传感网关键技术	261
9.3.2 无线网络协议栈设计	266
9.3.3 协议栈模型	267
9.3.4 协议栈设计模式选择	268
9.3.5 邻居交换及冲突避免机制的建立	271
9.3.6 技术创新点	273
9.4 应用情况	274
9.4.1 电力物联网关键技术沈阳市的示范工程.....	274
9.4.2 电力物联网关键技术沈阳市的效益分析.....	280
9.5 小结	281
参考文献.....	282

第1章 现代电网前沿科技发展与研究历程

1.1 现代电网网架结构发展历程

电力已逐步成为当今社会、经济发展的重要动力,电力工业的持续健康发展是电力系统规划的一个关键部分,电网规划既要满足电网所供地区经济、社会发展的基本要求,也是电网公司持久发展的重要依托,它的目标是使电网的发展满足或者适度超前所在区域的发展,同时指导并决定着电力供应的安全、电网建设以及电网运行的方方面面。长期以来,电网网架结构不合理,突出表现在网架结构薄弱、主次网架不清晰、多分段多互联的网络连接未形成,造成了用户电压不稳定、网络损耗过大、故障发生频繁等问题^[1]。

电网的长远发展要建立一个合理的网架结构基础之上。合理的网架结构不仅是关系到电能质量和供电可靠性的主要因素,也是庞大的电力系统安全、稳定、经济运行的基础。我国电网网架结构的发展历程分为以下三个阶段。

(1) 1882~1936年。从1882年7月26日上海第一台12机组发电到1936年,全国共有461个发电厂,发电装机总容量为630MW,年发电量为17亿kW·h,初步形成北京、天津、上海、南京、武汉、广州、南通等大、中城市的配电系统。

(2) 1937~1949年。1937年后,江苏、浙江等沿海城市的发电厂被毁坏或拆迁到后方;西南地区的电力工业出于战争的需要,有序地发展。1949年中华人民共和国成立时,全国发电装机容量为1848.6kW,年发电量约43亿kW·h,居世界第25位。当时中国已形成的电力系统网架有:①东北中部电力系统,以丰满水电厂为中心,采用154kV输电线路,连接沈阳、抚顺、长春、吉林和哈尔滨等地区;②东北南部电力系统,以水丰水电厂为中心,采用220kV和154kV输电线路,连接大连、鞍山、丹东、营口等供电区;③东北东部电力系统,以镜泊湖水电厂为中心,采用了110kV输电线路,连接鸡西、牡丹江、延边等供电区;④冀北电力系统,以77kV输电线路,连接北京、天津、唐山等供电区和发电厂。

(3) 1949年以来,中国的电力工业有了很大的发展。1996年中国大陆部分的发电装机容量达2.5亿kW,年发电量为11350亿kW·h,居世界第2位。从1993年起,发电量每年平均以6.2%的速度增长。目前,我国大部分以220kV输电线路为主,还在研发高压直流输电。

近年来伴随着电力需求的强劲增长和大量电源投入,电网建设力度是空前的,

特别是 500kV 电网作为各区域电网的主网架(西北电网除外),得到了长足发展,在电力跨供电区、跨省、跨大区汇集、输送、交换和疏散等方面发挥了应有的功能和作用,输电效能稳步提高,电网的可靠性、经济性和灵活性达到了新水平。区域电网是全国互联电网的基础。展望未来,如何在全国联网规划的指导下构筑各区域电网的主网架,科学地把握区域电网主网架结构特点和发展趋势,使区域电网能适应更大范围内的资源优化配置,成为电网规划工作者必须要解决的重大课题。

坚持电网的统一规划,特别是在当前加快推进“西电东送、南北互供、全国联网”战略的过程中,只有对互联大电网从整体上开展中长期规划,远近结合、滚动优化,才能为建立良好的电网结构打牢基础^[2]。

1) 东北电网

东北电网负荷中心基本集中在哈大铁路沿线的大中型城市。黑龙江省分成东部、中部和西部,哈尔滨和大庆是重要的负荷中心;吉林省以长春、吉林市为中心;辽宁省以沈阳、抚顺、本溪、鞍山、辽阳、营口、盘锦及大连为中心,上述城市负荷水平占东北全区的 60% 以上。2003 年辽宁省、吉林省、黑龙江省负荷及用电量比例大约为 5 : 2 : 3.3,省用电量占东北全区的 96%,内蒙古东部仅占 3.7%。预计 2020 年之前各省的用电比例不会发生大的变化。从发电能源和未来电源布局上看,东北电网仍依靠煤电。东北电网在黑龙江东部和蒙东两大能源基地建设大型坑口电站,以及利用关内的煤资源建设部分港口和路口电站,给受端电网提供了必要的动态无功和电压支撑,结合热电联产建设一些负荷中心电站。根据东北电网电源发展布局和负荷分布,其未来电力流向仍然是西电东送、北电南送,规模逐步加大。电力输出地区位于黑龙江东部、呼伦贝尔、霍林河及周围,黑龙江东部的市场定位是满足本省用电需求,富余电力参与北电南送,主送吉林;呼伦贝尔煤电基地主送辽宁;霍林河及周围电站分供辽宁和吉林。

2) 华北电网

华北电网在山东电网并入后规模显著扩大,2003 年装机容量达到 80.72GW。华北电网目前与东北、华中均有交流联系,未来规划与西北、华东互联,在全国互联电网中占据重要地位。京津唐电网是华北电网最重要的负荷中心,目前约占全网负荷的 30%,接受外来电力约占京津唐负荷的 18%。山西和蒙西是能源输出地区,在向京津冀送电的同时,还要向华中和华东送电。山东电力目前基本自我平衡,今后要接收一定容量的外来电力。华北电网在山西、蒙西、陕北大力开发坑口电站,保证了电网安全并且有效地节约了水资源,在东部沿海地区利用海水冷却建设一批港口电厂,在锡林郭勒盟建设坑口电厂向京津唐送电,因地制宜发展燃气和热电联产机组,适当安装了一定容量的抽水蓄能机组。

3) 华东电网

华东电网是我国规模最大的区域电网,负荷增长明显高于全国平均水平,发展

空间巨大。区域内一次能源严重不足,应立足国内,少量从国外进口,实施多元化战略,优先吸纳三峡和西南水电,并接受一定容量的“三西”煤电,加快发展核电,优化发展煤电,适度发展抽水蓄能电站,积极发展天然气和液化天然气(liquefied natural gas, LNG)发电。

4) 华中电网

华中电网一次能源的特点是西水、北煤,水电比重较大,远期必须从区外输入能源。电力流向是西部水电东送和南水北调。以三峡电站建设为契机加强500kV网架,并推进全国联网,现已列入实施计划。川渝电网并入华中后给电网发展带来了新的动力。

5) 西北电网

西北陕甘宁青四省区地域辽阔,经济欠发达,具有丰富的可用于发电的煤炭、水电、天然气、风能资源。西北电网已决策在330kV电网之上引入750kV电压等级。“西水东火”的能源格局与负荷分布特点决定了甘青与陕宁之间需要水火电互剂运行,电源与负荷之间、负荷与负荷之间送电距离长,电力交换规模大,电网较为松散,成本也高^[3]。

目前电源领域存在着无序建设、急功近利的现象。尽管在电网规划中考虑了电源的布局和顺序问题,电网规划的基本方案是在电网公司认为较合理的电源开发方案基础上得出的,电源方案在行业规划中也论证过,但不可否认的是,电源实际发展带有很大的不确定性。主网架受端的电网结构与负荷分布更密切些,受端电源的改变对受端电网影响相对较小。电源对送端电网如何构建影响很大。因此电网公司应就送端主力电源的变化对中长期目标网架的影响作敏感性分析,同时更重要的是建立电网规划设计滚动机制,及时对电网规划进行必要的调整。

我国能源资源与负荷分布的严重不均衡性,决定了我国电网发展不能完全遵循西方发达国家的轨迹。西部大水电开发、“三西”煤电基地的建设,实现了远距离大容量输电,长三角、珠三角走廊500kV电网短路电流超标问题,都要求超前研究建设交流百万伏级电网。经论证一旦决策在华东、华北及华中电网中引入交流百万伏级电压等级,实现技术跨越,需要对相关的区域电网目标网架进行校核调整。

在电网发展中,作为重要指标,要积极推广使用先进技术,促进技术升级。如采用同塔双回或多回输电技术、紧凑型输电技术;远距离输电采用串补技术;在重要输电通道和受端环网中采用大截面或耐热导线技术;在负荷密度大的受端电网采用大容量降压变压器;为解决动态无功不足和电压稳定问题,装设交换虚拟电路(SVC)或其他类型动态无功补偿设备;为解决短路电流超标问题加装限流电抗器;从整体上不断提升电网调度、通信、自动化水平等。我国电网发展的装备、技术水平应与综合国力、科技进步水平相一致^[4]。

1.2 现代电网关键技术及设备发展历程

国家发展和改革委员会以及国家能源局发布了现代电网关键技术战略方向规划目标。三个战略目标如下^[5]。

(1) 基础设施和装备。重点在柔性直流输配电、无线电能传输、大容量高压电力电子器件和高压海底电力电缆等先进输变电装备技术,以及用于电力设备的新型绝缘介质与传感材料、高温超导材料等方面开展研发与攻关。

(2) 信息通信。重点在电力系统量子通信技术应用、电力设备在线监测先进传感技术、高效电力线载波通信、推动电力系统与信息系统深度融合等方面开展研发与攻关。

(3) 智能调控。重点在可再生能源并网、主动配电网技术、大电网自适应/自恢复安全稳定技术、适应可再生能源接入的智能调度运行、电力市场运营、复杂大电网系统安全稳定等方面开展研发与攻关。

三个创新目标如下。

(1) 2020 年目标。突破柔性直流输配电、电动汽车无线充电技术,掌握大容量高压电力电子器件和高压海底电力电缆等先进输变电装备关键技术,实现工业化、低成本制造及示范推广,相关技术及装备走向国际市场。突破信息通信安全技术和电力线载波技术,形成宽带电力线通信标准;形成适合电网运行要求的低成本、量子级的通信安全技术。研究大规模可再生能源和分布式发电并网关键技术并开展示范;突破电力系统全局协调调控技术,实现示范应用。完成现代复杂大电网安全稳定技术研究,实现现代复杂大电网安全稳定运行。

(2) 2030 年目标。柔性直流输配电技术、新型大容量高压电力电子器件和高压海底电力电缆等先进输变电装备达到国际先进水平。突破高温超导材料关键技术和工艺。形成适合电网运行要求的低成本、量子级的通信安全工程应用技术解决方案,实现规模化应用。微电网/局域网与大电网相互协调技术、源-网-荷协调智能调控技术获得充分应用。

(3) 2050 年展望。无线输电技术得到应用,电网的系统、设备、通信、控制等技术引领国际先进水平,完全掌握材料、核心器件、装备和系统成套技术。完全解决可再生能源和分布式电源并网消纳问题。建成世界领先的、安全高效的、绿色环保的现代电网。

十项创新行动如下。

(1) 先进输变电装备技术。研发高可靠性、环保安全(难燃、低噪声)、低损耗、智能化及紧凑化的变压器;研制高电压、大电流、高可靠性和选相控制的替代 SF₆ 的新型气体介质断路器及真空和固态断路器,并开展示范应用;研制安全高效的新

型限流器;突破高压海底电力电缆的制造和敷设技术,研发新型电缆材料、先进附件;研发高质量在线监测/检测装备和系统。

(2) 直流电网技术。研究直流电网架构及运行控制技术,建立直流电网技术装备标准体系;开展新型电压源型换流器、直流断路器、直流变压器、直流电缆、直流电网控制保护等核心设备研发和工程化;建设包含大规模负载群、集中/分布式新能源、大规模储能在内的直流电网示范工程。

(3) 电动汽车无线充电技术。以电动汽车无线充电为突破点和应用对象,研发高效率、低成本的无线电能传输系统,实现即停即充,甚至在行驶中充电。形成电动汽车无线充电技术标准体系,研究电动汽车无线充电场站的负荷管理,建设电动汽车无线充电场站示范工程。

(4) 新型大容量高压电力电子元器件及系统集成。研究先进电力电子元器件及应用;开展新一代大容量、高电压电力电子元器件的材料研发和关键工艺技术研究;研发用于高电压、大容量直流断路器和断路保护器的高性能电力电子元器件;建设高水平生产线,提高质量、降低成本,推进国产化。研究高压大容量固态电力电子变压器、大容量双向/多向换流器、多功能并网逆变器、智能开关固态断路器、固态电源切换开关、软常开开关设备。

(5) 高温超导材料。研究高温超导基础理论、各系材料配方及制备工艺;开展面向超导电力装备的应用型超导材料研究;推动高温超导材料的实用化,并研究其成套工程技术;开展高温超导在超导电缆、变压器、限流器、超导电机等领域的示范和应用。

(6) 信息通信安全技术。研究电力线频谱资源动态、高效地感知与使用;研究降低对已有通信业务干扰的关键技术,形成宽带电力线通信技术标准体系。建设能源互联网量子安全通信技术与常规网络融合应用示范,提出电网量子安全通信加密理论、量子通信协议及量子安全通信与经典网络通信融合的模式。形成适合我国电网量子安全通信要求的低成本、量子级安全可靠的通信技术解决方案。采用低功耗通用无线通信技术,实现电网末端海量信息的采集和传输。

(7) 高效电力线载波通信技术。研究进一步提高电力线载波通信频谱效率的通信方式,提高工作带宽并充分考虑利用电力线三相之间形成的多输入多输出构架,使电力线载波通信系统物理层的传输速率达到 Gbps;使电力线通信应用范围扩展到包括互联网接入、家庭联网、家庭智能控制、新能源监控及电力安全生产等众多领域。

(8) 可再生能源并网与消纳技术。制定大规模清洁能源发电系统并网接入技术标准和规范;研究并实现基于天气数据的可再生能源发电精确预测;研发并推广增强可再生能源并网能力的储能、多能源互补运行与控制、微电网、可再生能源热电联产等技术;发挥电力大数据和电力交易平台在促进可再生能源并网和消纳中

的作用;实现电网和可再生能源电源之间的高度融合,促进可再生能源高效、大容量的分布式接入及消纳。

(9) 现代复杂大电网安全稳定技术。研究交直流混合电网、智能电网、微电网构成的复杂大电网稳定机理分析技术,在线/实时分析技术和协调控制技术;建立能源大数据条件下的现代复杂大电网仿真中心,研究满足大规模间歇性能源/分布式能源/智能交互/大规模电力电子设备应用的、高效精确的电力系统仿真技术;加强电网大面积停电的在线/实时预警和评估技术研究。

(10) 全局协调调控技术。研究大规模风电/光伏接入的输电网与含高比例分布式可再生能源的配电网之间协调互动的建模分析、安全评估、优化调度与运行控制技术,建立多种特性发电资源并存模式下的输配协同运行控制模式;针对未来电网中多决策主体、多电网形态特点,构建具有高度适应性的调度运行控制体系,开展“分布自律-互动协调”的源-网-荷协同的能量管理技术研发与示范应用。

1.3 现代电网示范工程建设发展历程

1.3.1 特高压示范工程建设

特高压电网的建设大大提高了远距离、大容量输电的效率,减少了输电损耗,降低了输电成本,促进大煤电基地、大火电基地、大核电基地建设,实现了更大范围的资源优化配置,促进经济和社会的可持续发展。同时,特高压输变电工程的建设也促使我国电力设计、制造、施工水平实现飞跃。交流特高压输电技术属于国际前沿技术,苏联、日本均是结合本国实际制定自身的特高压技术路线。我国发展交流特高压需要引进和消化吸收国外的先进技术,结合我国国情和电网特点,走自主创新之路。发展特高压电网,不仅应充分利用国内外已有的技术和研究成果,还要结合我国电网特点,抢占特高压技术的制高点,达到全电压、大负荷的试验要求,并以大负荷带电考核为重点。

根据交流特高压试验示范工程建设的原则和技术路线,结合我国未来交流特高压技术的工程应用,提出三个交流特高压工程初步方案供比选研究。

(1) 晋东南—南阳—荆门交流特高压输电工程。该工程起点山西晋东南,落点湖北荆门,中间经河南南阳开关站,线路全长 654km,拟全压运行。该输电工程连接华北和华中两大电网,有利于水火调剂,可实现南北互供、双向输送,最大输送潮流可达 300 万 kW,有利于考核设备承受大负荷、过电压能力等。该工程已取得部分站址和路径协议;大件设备运输采用公路、铁路、水路等运输方案,均是可行的。工程建设条件均不存在难以克服的技术困难。工程线路较长且负荷重,接近

过电压限制的线路允许最大长度,需要在线路上安装大容量高压并联电抗器、高性能避雷器,采用带合闸电阻的断路器,与我国未来特高压输电的技术路线是一致的。可对特高压工程的线路、变压器、高压电抗器、断路器、GIS设备、避雷器、电压互感器、电流互感器、绝缘子等特高压设备在工频过电压、操作过电压、谐振过电压、雷电过电压、甩负荷过电压、短路电流、投切低压电容器、投切低压电抗器和投切空载线路等条件下的技术性能进行全面充分的考核。此外,该试验示范工程有2个变电站和1个开关站,可采用GIS、AIS和HGIS等多个方案,对各类设备进行全面的考核,有利于充分发挥试验示范工程的作用。该工程的两端都通过500kV线路与当地500kV电网相连。因此,若该工程投运初期不能完全正常运行,晋东南电源可以通过与华北电网的联系就地消纳;湖北电网可通过启动备用容量,避免出现缺电情况,对华北和华中两大电网的影响较小。如工程投入运行时晋东南电源尚未投运,也可以通过与华北电网的联系,组织华北电网的电源,通过特高压输电系统向华中送电,从而达到试验示范的目的。因此,晋东南—南阳—荆门交流特高压输变电工程风险较小。工程包含晋东南、荆门2座变电站和南阳1座开关站,是1000kV级变电站主要设计原则研究的依托工程。1000kV配电装置电气一次设备采用SF₆气体绝缘金属封闭型组合电器(GIS);1000kV高压并联电抗器回路电气一次设备、1000kV线路出口及主变压器1000kV侧避雷器和电压互感器采用常规敞开式设备。南阳开关站、荆门变电站1000kV配电装置电气一次设备采用母线敞开型SF₆气体绝缘金属封闭型组合电器(HGIS);1000kV母线设备1000kV高压并联电抗器回路电气一次设备、1000kV线路出口及主变压器1000kV侧避雷器和电压互感器采用常规敞开式设备(AIS)。通过对1000kV级交流输电系统变电站工程设计技术原则研究,逐步完善变电站的一次设计方案,供其他科研项目开展进一步的科研工作,为制订交流特高压变电站设计规范创造条件。

(2) 淮南—上海交流特高压输电工程。该工程起点安徽淮南,落点上海,中间经芜湖、浙北2变电站,线路全长 2×655 km,拟全线全压或部分线路全压运行。该工程运行方式与淮南煤电开发进度密切相关。工程全压运行的情况下,输电能力较大,可达580万kW,但淮南地区难以建成足够的新增电源与其协调。如淮南—芜湖单回1000kV线路全压运行,其余线路降压500kV运行,当采用点对网方式,最大输送能力仅有180万kW;当电磁环网运行时,特高压线路上的潮流较小,最大仅有160万kW。该工程还存在潮流只能单方向输送、潮流大小不易调节等不利情况。由于系统运行条件不如晋东南—南阳—荆门试验示范工程苛刻,且4个1000kV变电站受土地资源限制均推荐采用GIS方案,因此,对设备考核不如晋东南—南阳—荆门工程,同杆并架线路也增加了试验示范工程的技术难度。该工程在电网中替代的是华东电网原规划的皖电东送500kV大通道,工程建设规模