

DIANWANG YUNXING
YOUHUA YU KONGZHI JISHU

电网运行 优化与控制技术

王正风 董 存 编著
王 斌 李瑞超



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

DIANWANG YUNXING
YOUHUA YU KONGZHI JISHU

电网运行 优化与控制技术

王正风 董 存 编著
王 斌 李瑞超



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书主要介绍电网运行与优化控制技术。全书共分为九章加以阐述,分别是电网运行与控制;电网稳定运行理论及计算方法;电网经济运行与优化理论;面向多级调度的发电调度计划优化;电网运行方式在线分析与优化技术;电网在线安全稳定计算分析与优化控制;电网实时自动控制与优化技术;燃煤火电机组环保设施优化改进及在线监测;基于北斗通信技术的电力信息传输系统。

本书的读者对象主要为电网公司以及发电厂电气工程、电力系统运行管理人员及相关技术人员,同时也可以作为电气工程专业和电力系统专业的研究生、本科生以及电力专业的教师参考书。

图书在版编目(CIP)数据

电网运行优化与控制技术/王正风等编著. —北京:中国电力出版社, 2017.5
ISBN 978-7-5198-0393-3

I. ①电… II. ①王… III. ①电力系统运行 IV. ①TM732

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 028644 号

出版发行:中国电力出版社

地 址:北京市东城区北京站西街 19 号(邮政编码 100005)

网 址: <http://www.cepp.sgcc.com.cn>

责任编辑:杨 扬 (y-y@sgcc.com.cn)

责任校对:闫秀英

装帧设计:王英磊 张 娟

责任印制:蔺义舟

印 刷:北京市同江印刷厂

版 次:2017 年 5 月第一版

印 次:2017 年 5 月北京第一次印刷

开 本:787 毫米×1092 毫米 16 开本

印 张:15.5

字 数:389 千字

印 数:0001—2000 册

定 价:49.00 元

版 权 专 有 侵 权 必 究

本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

前言

现代大电网的互联、电力市场化的推进以及电力监管的进一步加强,给电网运行管理带来了新的挑战。提高电网运行安全稳定水平和经济运行水平是电网调度运行部门永恒的追求,为此国家电力调度控制中心积极开展智能调度技术支持系统 D5000 建设,并开展了多项前瞻性研究。各级省级调度部门也基于国调的总体要求,并结合自身电网的特点,相继在电网运行与优化控制领域开展了新技术开发及应用,进一步提高电网运行与控制水平。

本书以电力生产运行为主线,首先介绍了电网运行部门的基础理论知识,包括电网稳定运行理论及计算方法、电网经济运行与优化理论;接着在此基础上,以电网调度生产运行为逻辑,从电网发电计划安排、电网运行方式安排、电网运行监测及在线分析控制、电网实时自动优化控制技术的电网全过程生产调度运行等方面进行了介绍;最后还介绍了燃煤火电机组环保设施优化改进及在线监测、基于北斗通信技术的电力信息传输系统。

本书的撰写是针对电网生产运行进行撰写,在介绍过程中,努力将理论与电力实际生产相结合,将大学课堂的理论知识与电力生产部门的实际生产运行实践相连接,既能为大学和研究机构提供电力实际生产运行的需求,又能为电力生产运行人员提供工程实践的理论基础,从而遵循科学发展的基本规律,一切知识来自生产实践,并在生产实践中升华,再去指导实际生产实践。

本书共分九章,包括电网运行与控制;电网稳定运行理论及计算方法;电网经济运行与优化理论;面向多级调度的发电调度计划优化;电网运行方式在线分析与优化技术;电网在线安全稳定计算分析与优化控制;电网实时自动控制与优化技术;燃煤火电机组环保设施优化改进及在线监测;基于北斗通信技术的电力信息传输系统。

本书内容丰富,可供电网公司以及发电厂电气工程、电力系统运行管理人员及相关技术人员的参考,同时也可以作为电气工程专业和电力系统专业研究生和本科生的参考资料,也可作为电力工程专业老师的参考书。

本书由杜贵和高级工程师、王正风博士、董存博士、王斌博士、李端超高级工程师、邓勇高级工程师、王松高级工程师以及吴旭博士共同编写，此外丁超高级工程师也参与了本书的纠正工作。

由于编者水平有限，因此本书不完善、不正确的地方在所难免，如有缺点和不足之处，敬请读者见谅，并恳请读者给予批评指正。

编 者

目录

前言

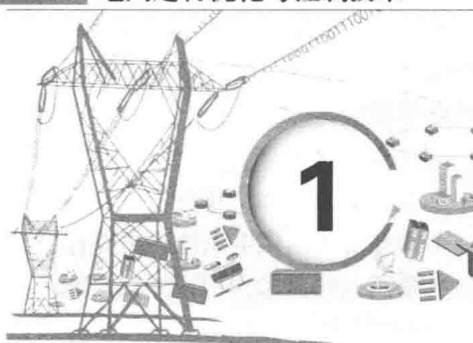
1 电网运行与控制	1
1.1 现代电力系统	1
1.1.1 现代电力系统简介	1
1.1.2 现代电力系统的发展	2
1.2 电网运行优化与控制	5
1.2.1 智能电网调度技术支持系统	5
1.2.2 电网运行优化及控制	7
2 电网稳定运行理论及计算方法	11
2.1 概述	11
2.2 电力系统潮流计算方法	11
2.2.1 常规潮流算法	11
2.2.2 牛顿—拉夫逊方法	12
2.2.3 P-Q 分解法	14
2.2.4 带有最优乘子的牛顿—拉夫逊法	14
2.2.5 带有最优乘子的快速解耦法	16
2.3 电力系统静态稳定	16
2.3.1 静态功角稳定	17
2.3.2 静态电压稳定	18
2.4 电力系统暂态稳定	19
2.4.1 暂态功角稳定	19
2.4.2 暂态功角稳定分析方法	22
2.5 电力系统暂态电压安全	27
2.5.1 暂态电压安全	27
2.5.2 暂态电压稳定	28
2.5.3 暂态电压跌落	28
2.6 电力系统低频振荡	29
2.6.1 电力系统低频振荡	30

2.6.2	低频振荡频域分析 IRAM 法	32
3	电网经济运行与优化理论	34
3.1	电力系统经济运行	34
3.2	有功功率与电力系统经济运行	34
3.2.1	输电线路的有功损耗与经济负载系数	34
3.2.2	双绕组变压器的有功损耗与经济负载率	38
3.2.3	三绕组变压器的损耗与经济负载率	42
3.2.4	电动机损耗及经济运行指标	44
3.2.5	电力系统元件经济运行指标的统一	45
3.3	电力系统中有功功率的最优分布	45
3.3.1	有功功率电源的最优组合	45
3.3.2	有功功率负荷的最优分配	46
3.3.3	最优潮流	46
3.4	无功功率与电力系统经济运行	49
3.5	电力系统中无功功率的最优分布	50
3.5.1	无功功率电源的最优分布	50
3.5.2	无功功率负荷的最优补偿	52
3.5.3	无功优化和补偿的原则和类型	53
3.6	开式网无功负荷的最优补偿容量及约束补偿容量	53
3.6.1	开式网的相关特点	53
3.6.2	开式网最佳补偿容量	54
3.6.3	开式网无功负荷的约束补偿容量	57
3.6.4	配电线路上的无功补偿	59
3.7	电力系统无功功率优化——闭式网	60
3.7.1	无功优化模型	60
3.7.2	优化算法	60
3.8	电力系统经济运行理论的统一	62
3.8.1	无功功率经典调度理论与无功优化	62
3.8.2	最优潮流和无功优化的关系	63
4	面向多级调度的发电调度计划优化	64
4.1	概述	64
4.2	基于数值气象信息的负荷分析及预测技术	65
4.2.1	基于数值天气预报的负荷预测架构	65
4.2.2	基于数值天气预报的负荷特征分析	67
4.2.3	考虑天气因子的母线负荷特性分析	71

4.3	大电网多周期安全约束机组组合	75
4.3.1	机组组合优化策略	75
4.3.2	电力电量平衡的场景生成及提取	78
4.3.3	多周期机组组合优化模型	80
4.4	省地协同的精细化调度计划技术	92
4.4.1	地区调度计划对电网安全性和经济性的影响	92
4.4.2	省地协同的调度计划编制策略	94
4.4.3	省地协同调度计划框架和流程	94
4.4.4	安全经济协同发电计划模型	96
5	电网运行方式在线分析与优化技术	102
5.1	前言	102
5.1.1	电网运行方式安排	102
5.1.2	国内电网运行方式现状	102
5.2	电网运行方式在线分析	103
5.2.1	提高潮流仿真计算精度	103
5.2.2	扩大计算覆盖面	104
5.2.3	实现由离线分析向在线分析跨越	105
5.2.4	历史/实时运行数据统计分析	105
5.3	电网运行方式在线分析技术支持系统结构	106
5.4	电网运行方式在线分析技术支持系统功能及其应用	109
5.4.1	运行数据管理与可视化计算控制	109
5.4.2	多维度潮流图浏览与历史数据统计查询	113
5.4.3	基于实测数据的在线计算功能及应用分析	117
5.4.4	系统维护与内外网用户访问管理	123
5.5	电网供电能力评估	123
5.5.1	供电能力评估	123
5.5.2	电网网架供电能力评估	124
5.5.3	电网运行方式安排供电能力评估	125
6	电网在线安全稳定计算分析与优化控制	128
6.1	前言	128
6.2	电力系统在线静态安全分析及控制	129
6.2.1	在线静态安全分析及计算方法	129
6.2.2	静态安全分析指标及控制	130
6.3	电力系统静态稳定在线分析及控制	132
6.3.1	静态功角稳定在线计算分析及控制	132

6.3.2	静态电压稳定在线计算分析及控制	134
6.4	电力系统在线暂态稳定及控制	136
6.4.1	暂态功角稳定在线分析及控制	136
6.4.2	暂态电压安全在线计算分析及控制	140
6.4.3	暂态频率稳定在线计算分析及控制	141
6.4.4	暂态稳定控制的协调统一	142
6.5	电力系统在线小干扰分析	145
6.5.1	基于 IRAM 法在线小干扰分析方法	145
6.5.2	低频振荡在线监测与控制	147
6.6	在线断面极限功率稳定裕度评估	151
6.6.1	断面极限功率稳定裕度及计算方法	151
6.6.2	断面极限功率稳定裕度指标及算例	152
6.7	在线短路电流计算与分析	152
6.7.1	在线短路电流计算方法	153
6.7.2	在线短路电流计算指标及算例	155
7	电网实时自动控制与优化技术	157
7.1	前言	157
7.2	自动发电控制技术原理及应用	159
7.2.1	电力系统频率调整	159
7.2.2	AGC 系统的构成	165
7.3	自动电压控制技术原理及应用	178
7.3.1	自动电压控制技术原理	178
7.3.2	基于人工智能技术的电压自动控制系统	179
7.3.3	基于多智能体协调的电网自动电压控制	181
8	燃煤火电机组环保设施优化改进及在线监测	197
8.1	引言	197
8.2	环保在线监测系统总体框架	198
8.2.1	总体架构	198
8.2.2	主站总体架构	198
8.2.3	电厂侧架构及通信方式	200
8.3	脱硫子站	201
8.3.1	脱硫模块架构	201
8.3.2	脱硫采集参数比对方法	205
8.4	脱硝子站	206
8.4.1	脱硝模块框架	206

8.4.2	脱硝设备运行改进优化	209
8.4.3	电厂侧子站 CEMS 监测及优化	212
8.5	除尘子站	215
8.5.1	除尘模块框架	215
8.5.2	除尘设备运行改进优化	216
8.6	燃煤火电机组环保在线监测与应用系统功能	217
8.6.1	信息数据管理	217
8.6.2	信息数据分析与统计	219
9	基于北斗通信技术的电力信息传输系统	224
9.1	概述	224
9.2	系统结构	224
9.2.1	全球卫星通信系统及北斗技术参数分析	224
9.2.2	系统总体结构	225
9.2.3	系统软硬件结构	225
9.3	系统功能及关键技术	228
9.3.1	系统功能结构	228
9.3.2	系统关键技术	229
9.3.3	系统应用情况	231
	参考文献	234



电网运行与控制

1.1 现代电力系统

1.1.1 现代电力系统简介

电力系统是由发电、变电、输电、配电和用电等环节组成的电能生产与消费系统。它是将自然界的一次能源通过发电动力装置（主要包括锅炉、汽轮机、发电机及电厂辅助生产系统等）转化成电能，再经输、变电系统及配电系统将电能供应到各负荷中心，通过各种设备再转换成动力、热、光等不同形式的能量，为地区经济和人民生活服务。

电力系统在结构上可分为电源、变电所、输电线路、配电线路、负荷中心（用户）以及各种一、二次信息及控制系统等。其中，电源是指各类发电厂和发电站，在发电环节中将一次能源转换成电能；输电线路与变电所等构成的电力网络，通常由电源的升压变电所、输电线路、负荷中心变电所（降压）以及配电线路等构成；电力系统的信息与控制系统由各种检测设备、通信设备、安全保护装置、自动控制装置、监控自动化以及调度自动化系统组成。

目前的电力系统已基本形成大电网、大机组、高电压输电和大区互联的格局。东北电网、华北电网、华中电网、华东电网、西北电网和南方电网已实现互联，形成了全国的统一电网。这种地理分布广阔、规模巨大的现代电力系统，在经济性和稳定性方面带来如下显著优势：

（1）各地区不同特性的资源可以互相补充，提高运行的经济性。例如，丰水季由水电区向火电区送电；枯水季由火电区向水电区送电。

（2）利用各地区的时间差，可以平抑峰谷差，减少总装机容量。

（3）可以减少总的备用容量，事故下可互相增援，提高系统运行的可靠性。

（4）各区域负荷随机波动可以互相抵消，使频率、电压更加稳定。

（5）便于安装大机组，提高电力系统效率。

但这也带来了诸多弊端：

（1）系统规模大给调度提出了更高的要求，发生大规模连锁故障的风险增大，安全分析更加困难，稳定问题较突出。

（2）各子系统之间如何协调，全局和局部的利益如何统筹考虑，水火电如何配合等问题都具有挑战性。

电能的生产和消费是同时的，不能储存或者储存非常困难，一处的故障可能会引起波及系统的连锁事故。如2003年北美的8·14大停电、瑞典和丹麦的9·23大停电以及意大利的9·28全国大停电都是在大型互联电网中发生的由单重故障引起系统连锁事故进而导致最终系统崩溃的典型事故。因此，保证规模庞大的电力系统——这个一次系统（或称能量系统）的安全、经

济运行，需要建设一套高度信息化、自动化和可靠的调度自动化系统——二次系统（或称信息系统），实现对电力系统在线计算机监控与调度决策。调度自动化系统实时监视电力系统各部分的电压、潮流、频率和部分相角，并通过各种调节手段和装置自动（或手动）地连续调节有功或无功电源，或者通过网络结构的变化和负荷切换来保证供电质量。

1.1.2 现代电力系统的发展

1. 世界电力系统发展历史

在电能应用初期，由小容量发电机单独向灯塔、轮船、车间等照明的供电系统，可看作是简单的住户式供电系统。白炽灯发明后，出现了中心电站式供电系统，如 1882 年 T. A. 托马斯·阿尔瓦·爱迪生在纽约主持建造的珍珠街电站。它装有 6 台直流发电机（总容量约 670kW），用 110V 电压供 1300 盏电灯照明。19 世纪 90 年代，三相交流输电系统研制成功，并很快取代了直流输电，成为电力系统大发展的里程碑。中国是世界上有电较早的国家之一。1882 年，上海外滩亮起的 15 盏电灯，照亮了中国电力发展的道路。1887 年，上海建成了供路灯用的 5 条输电线路，到 1900 年线路全长 18km，输电电压最高 2500V。

二战前，电力系统就已经开始蓬勃发展，并逐步形成了以 230kV 电压为代表的高压同步电网。美国自 1923 年出现第一条 230kV 输电线路以来，到 20 世纪 20 年代已形成除德克萨斯州电网外的全美互联同步大电网；1936 年，鲍尔德水电站到洛杉矶的 287kV 输电线路建成，输电距离（430km）和输电容量（3MW）创当时世界最高纪录；1945 年，最大火电机容量达到 100MW。

二战后，随着经济的发展和技术的进步，电网发展进入快速发展阶段，进入超高压、大电网时代。截至目前，世界电网运行最高交流电压等级达到 1000kV、直流电压等级达到±800kV，输电距离达到上千公里。

表 1-1 二战后电力发展重要事件

时间	事 件
1952 年	瑞典建成世界第一条 380kV 超高压输电线路，长 954km
1959 年	前苏联古比雪夫水电站至莫斯科建成世界上第一条 500kV 超高压输电线，输电距离达到 1000km
1970 年	太平洋±500kV 直流工程投运，输送容量为 3100MW，输电距离达到 1362km
1973 年	单机最大容量达到 1300MW
1986 年	巴西伊泰普±600kV 直流工程单极投运，输送容量 3150MW，输送距离 785km
2009 年	1000kV 长治—南阳—荆门特高压交流线路建成投运，标志着中国率先实现了交流特高压技术在电网实际运行中的成功应用
2010 年	±800kV 楚雄—穗东特高压直流输电工程投运，标志着中国率先掌握了直流特高压输电技术

20 世纪以后，人们普遍认识到扩大电力系统的规模可以在能源开发、工业布局、负荷调整、系统安全与经济运行等方面带来显著的社会经济效益。于是，电力系统的规模迅速增长。世界上覆盖面积最大的电力系统是前苏联的统一电力系统。它东西横越 7000km，南北纵贯 3000km，覆盖了约 1000 万平方千米的土地。

在一些大电网无法覆盖的地区，分布式供电为电能使用提供了新途径。分布式供电是相对于传统的集中式供电方式而言的，将发电系统以小规模（数千瓦至 50MW 的小型模块式）、分散式的方式布置在用户附近。如今分布式供电方式主要是用液体或气体燃料的内燃机、微型燃气轮机和各种工程用的燃料电池，因其具有良好的环保性能，分布式供电电源与“小机组”已不是同一概念。

2. 我国电力系统发展历史

中国的电力工业于 1882 年诞生在上海,至新中国解放的 1949 年,我国的发电装机容量与发电量仅为 185 万 kW 和 43 亿 kW/h。解放后我国电力工业得到了迅速发展,特别是改革开放后,我国电力工业迎来了新的春天,至 2011 年 8 月,我国的装机容量和电网规模已超过美国、法国、英国、日本、加拿大等发达国家,位于世界第一位。

在电力系统中,电力网是电力系统的一个重要组成部分,承担了将电力由发电厂发出来之后供给用户的工作,即担负着输电、变电与配电的任务。电力网按其在电力系统中的作用,分为输电网和配电网。输电网是以输电为目的,采用高压或超高压将发电厂、变电所或变电所之间连接起来的送电网络,它是电力网中的主网架。直接将电能送到用户去的网络称为配电网或配电系统,它是以配电为目的。

我国的输电网电压等级主要有 750kV、500kV、330kV 和 220kV。随着我国经济的发展和科技的发展,国家电网公司近些年投入了大量的人力与物力,研究和投资建设特高压。近年已建设完成了 1000kV 的交流特高压输电线路和 ± 800 kV 直流输电线路。

2008 年“晋东南—南阳—荆门”特高压试验示范工程投产,实现华北~华中为核心的特高压交流联网。该工程包括建设完成 1000kV 晋东南和荆门变电站,各安装一组 300 万 kW 安主变,建设 1000kV 南阳开关站,晋东南至南阳 1000kV 线路 362km,南阳至荆门 1000kV 线路 283km,最高运行电压等级 1100kV,自然输送功率 500 万 kW。

2010 年云南至广东 ± 800 kV 直流输电工程投产运行,该工程是国家“十一五”建设的重点工程及直流特高压输电自主化示范工程,也是世界上第一个投入商业化运营的特高压直流输电工程。工程西起云南省楚雄州禄丰县,东至广东省广州增城市,途径云南、广西、广东三省区,输电距离 1373km。工程额定电压 ± 800 kV,额定容量 500 万 kW,由楚雄换流站、穗东换流站、直流线路、两侧接地极和接地极线路五大部分组成。该工程的竣工投产,大大增强了云南水电输送广东的能力,对加快我国西南地区乃至大湄公河次区域水电资源的开发利用具有重要意义。

2012 年 12 月 12 日,由我国自主研发、设计、建设的四川锦屏—江苏苏南 ± 800 kV 特高压直流输电工程全面完成系统调试和试运行,正式投入商业运行。锦苏工程途经四川、云南、重庆、湖南、湖北、浙江、安徽、江苏 8 省市,承担着雅砻江流域官地,锦屏一、二级水电站和四川丰水期富余水电的送出任务,线路全长 2059km,直流输送容量 720 万 kW。

2013 年 9 月 25 日,世界首个商业化运行的同塔双回路特高压交流输电工程——皖电东送淮南至上海特高压交流工程投入运行。工程包括四站三线,起于安徽淮南变电站,经安徽皖南变电站、浙江浙北变电站,止于上海沪西变电站,变电容量 2100 万 kVA,线路全长 2×648.7 km,途径安徽、浙江、江苏、上海四省市,先后跨越淮河和长江。该工程连接安徽“两淮”煤电基地和华东电网负荷中心,可显著提升华东电网接受区外电力的能力和电网安全稳定水平,同时有利于解决华东 500kV 电网短路电流超标难题,提高电网运行灵活性和适应性。

2014 年 1 月 27 日哈密南—郑州 ± 800 kV 特高压直流输电工程正式投入运行。工程起于新疆哈密南换流站,止于河南郑州换流站,途经新疆、甘肃、宁夏、陕西、山西、河南 6 省(区),线路全长 2192km(含黄河大跨越 3.9km),额定输送功率 800 万 kW。

2014 年 6 月 25 日, ± 800 kV 宜宾—金华直流输变电工程是我国第二大水电站溪洛渡电站的配套送出工程,西起四川省宜宾市双龙镇宜宾换流站,东至浙江省金华市武义县金华换流站,途经四川、贵州、湖南、江西和浙江五省,送电距离 1679.9km,额定输送容量为 800 万 kW,是世界单条输送功率最大的直流电力输电线路。

2014 年 12 月 26 日，浙北—福州 1000kV 特高压交流输变电工程正式投运。工程包括四站三线，起于浙江的浙北变电站（扩建），经浙中、浙南变电站，止于福建的福州变电站，变电容量 1800 万 kVA，全线双回路架设，全长 2×603km。浙北—福州 1000kV 特高压交流输变电工程开辟了浙闽电网间新通道，大幅提升华东电网的网内交换能力，可以充分发挥特高压电网优化资源配置作用，能进一步加强华东电网接受区外输电的能力，增强华东电网安全稳定水平和抵御严重故障的能力。

3. 未来我国电网发展趋势

未来我国电网发展需要在科学规划的基础上，以解决特高压和配电网“两头薄弱”问题为重点，加快发展特高压骨干电网，统筹各级电网发展，加强配电网建设，完善城市和农村电网，形成网架结构合理、资源配置能力强大的坚强智能电网。

预计 2020 年前，我国将形成“三华”特高压同步电网主网架，东北、西北、南方电网通过直流与“三华”同步电网实现异步连接，如图 1-1 所示。特高压交直流并举、相辅相成，北方煤电和西南水电通过多回特高压交、直流输电通道分散送入受端电网，可满足大煤电、大水电、大核电和可再生能源发电基地的电力输送，为东中部负荷中心大规模接受电力构筑坚强的网络平台。配电网得到较快发展，电网结构增强，供电能力和供电可靠性得到大幅度提高。各电压等级电网功能定位更加明确，结构坚强、发展协调，智能化关键技术和设备得到广泛应用，电网各环节基本实现智能化，各项技术经济指标和装备质量全面达到或领先于国际水平。

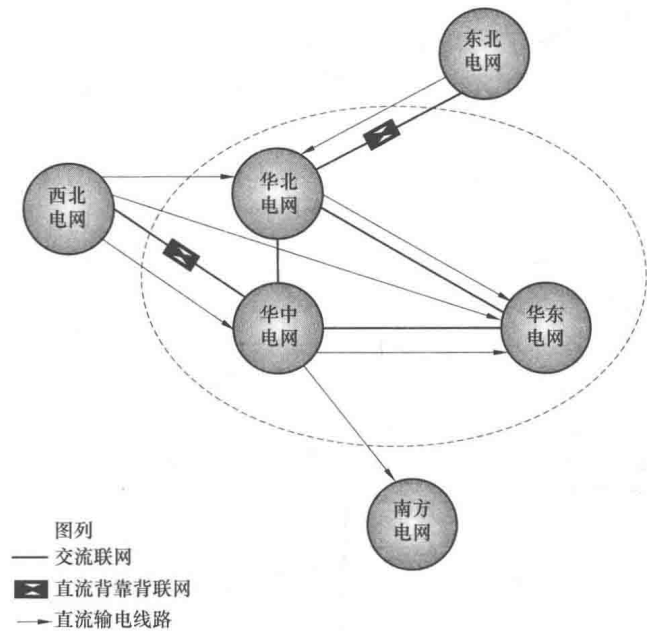


图 1-1 未来我国电网发展格局

预计到 2030 年前，特高压网架将形成更为坚强的“三华”受端电网和坚强的东北、西北送端电网，特高压电网承载能力强，能够实现电力大容量、远距离输送和消纳，保证系统安全稳定。新疆煤电和西藏水电可以通过特高压直流大规模外送。超导输电技术得到应用，分布式能源系统成为大电网集中供电的重要补充。全国输配电网在各大型电源基地、分布式电源及用户与负荷中心之间形成紧密连接，具备无阻塞输送能力，可以为电力交易提供畅通、高效、安全、稳定的基础和平台，能源资源在全国范围内得以充分的优化配置。城乡配电网结构得到进一步加

强, 电网结构合理, 供电能力和供电可靠性提高到一个新高度, 具备向终端用户提供安全、可靠、清洁、经济电能的能力。通过特高压电网建设, 我国电网将实现西电东送、南北互供、全国联网, 在全国范围内实现电力供需平衡和互济, 全国联网效益将得到充分展现。

1.2 电网运行优化与控制

1.2.1 智能电网调度技术支持系统

由于电能的特点决定了电能必须实时平衡, 即发电和用电必须实时平衡, 目前电网的运行与控制由电网调度部门负责。为了保证电网安全稳定运行, 各级调度机构必须实时获得电网的相关运行数据并进行合理的电网运行方式安排和事故处理以确保电网的安全稳定运行。具体的来说, 电网调度的功能主要包括: ①预测用电负荷和新能源发电预测; ②安排发电任务和电网输变电设备检修, 确定电网运行方式; ③对全系统进行安全监测和安全分析; ④指挥操作以及处理事故等。

智能电网调度技术支持系统由基础平台和实时监控与预警、调度计划、安全校核、调度管理四类应用组成, 系统围绕分布式一体化共享的信息支撑、多维协调的安全防御、精细优化的调度计划和规范的流程化高效管理这四条主线, 提供完整的智能电网调度技术支持手段, 实现敏锐的全景化前瞻预警、优化的自适应自动调整、多维的全局观协调控制、统筹的精细化调度计划和规范的流程化高效管理。

智能电网调度技术支持系统的总体架构如图 1-2 所示。

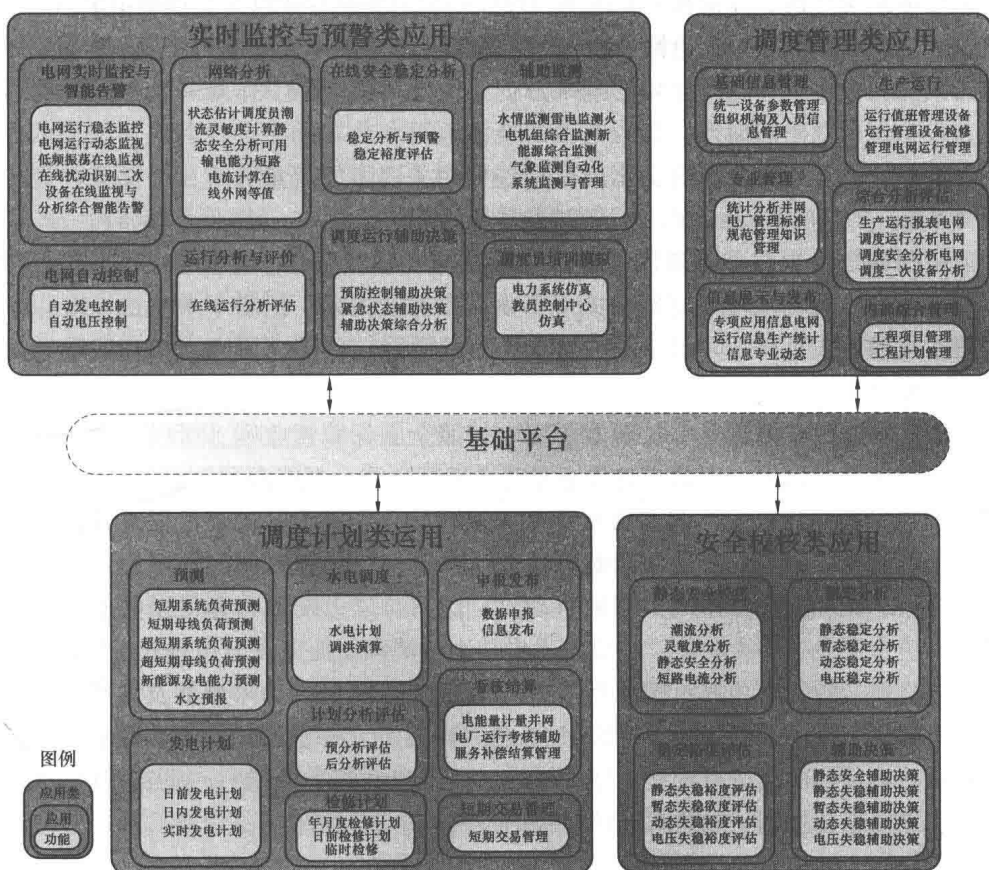


图 1-2 智能电网调度技术支持系统



智能电网调度技术支持系统突破了传统安全分区的约束,功能按照业务特性,可分为实时监控与预警、调度计划、安全校核和调度管理四类应用。系统整体框架分为应用类、应用、功能、服务四个层次。应用类是由一组业务需求性质相似或者相近的应用构成,用于完成某一类的业务工作;应用是由一组互相紧密关联的功能模块组成,用于完成某一方面的业务工作;功能是由一个或者多个服务组成,用于完成一个特定业务需求。最小化的功能可以没有服务。服务是组成功能的最小颗粒的可被重用的程序。

技术支持系统四类应用建立在统一的基础平台之上,基础平台为各类应用提供统一的模型、数据、CASE、网络通信、人机界面、系统管理等服务,包括系统管理、数据存储与管理、消息总线和服务总线、公共服务、平台功能和安全防护等基本功能。应用之间的数据交换通过平台提供的数据服务进行,还通过平台调用和提供分析计算服务。

(1) 电网实时监控与智能告警应用。指的是利用电网运行信息、二次设备状态信息及气象、水情等辅助监测信息进行全方位监视,对电网运行的稳态、动态、暂态过程进行多层次监视,实现电网运行状况监视全景化。通过综合性分析,提供在线故障分析和智能告警功能。电网实时监控与智能告警应用主要包括:电网运行稳态监控、电网运行动态监视、二次设备在线监视与分析、在线扰动识别、低频振荡在线监视和综合智能告警等功能模块。

变电站集中监控功能能够实现面向无人值班变电站的集中监视与控制的基本功能,主要实现数据处理、责任区与信息分流、间隔建模与显示、光字牌、操作与控制、防误闭锁及操作预演等功能。

(2) 调度计划类应用。负荷预测系统是合理安排机组发电方式以及合理制定电力系统运行方式的重要依据。负荷预测是根据电网长期运行的基础上,预测未来的电力需求和电量需求。负荷预测是电力系统生产运行与生产计划的基础数据。做好负荷预测工作是降低电网公司运行成本和提高电力设备运行效率的前提;也为电网的经济运行和公司的生产经营决策提供依据。系统负荷预测功能模块通过对历史负荷变化规律和各种相关因素的定量分析,提供多种分析预测方法,实现对 5min~1h 和次日至未来多日各时段系统负荷的预测。

母线负荷预测是分析和预测电网各节点电力需求的系统功能,能提供多种分析预测方法,深入分析母线负荷变化与气象及运行方式等影响因素间的关系,预测未来 5min~1h 以及次日至未来多日每时段的母线负荷,其预测范围至少涵盖调度管辖范围内所有 220kV 变电站主变高压侧、电厂升压变中压侧。

由于国家的新能源政策,要求对新能源发电按照全额保障性收购,所以为了合理安排火电机组的开机方式和发电出力,还需要对新能源功率进行预测。新能源预测系统以数值天气预报、输入场站(风电场、光伏电站)观测资料和基础地理信息资料为基础,根据统计预测模型实现包括场站功率、测风塔信息、光伏气象站信息、气象信息(风速风向、辐照度、温湿压)等一系列数据的分析、处理和输出预测数据的自动化,达到对风力发电和光伏发电进行智能分析预测的功能。系统主要包括两大功能:新能源发电功率预测和新能源发电预测分析管理。前者包括三类功能:一是新能源发电功率短期预测,能实现次日 96 点有功功率预测及曲线展示;二是新能源发电功率超短期滚动预测,能实现未来 15min~4h 有功功率滚动预测及曲线展示;三是能对短期、超短期功率预测曲线进行误差估计和统计。后者包括两类功能:一是实现历史数据统计、相关性检验、预报综合查询;二是对场站上报的预测数据进行考核。

发电计划:安全约束发电计划优化是考虑在系统平衡约束、机组运行约束,以及指定的电网安全等各类约束条件的基础上,编制目标函数最小且满足电网安全约束的发电计划,包括机组

开停方式和各时段的发电出力。

日前发电计划：日前发电计划功能根据日检修计划、交换计划、负荷预测、网络拓扑、机组发电能力和电厂申报等信息，综合考虑系统平衡约束、电网安全约束和机组运行约束，采用考虑安全约束的优化算法，编制满足“三公”调度、节能发电调度和电力市场等多种调度模式需求的日前机组组合计划、出力计划。日前发电计划编制范围为次日至未来多日每日 96 个时段（00：15~24：00）的机组组合计划和出力计划。

检修计划：检修计划功能模块接收设备检修申请，对周、日、临时各周期检修计划进行静态安全校核分析和充裕度评估，并根据安全校核和充裕度评估分析结果，对检修计划进行优化编制，合理、科学地安排周、日、临时检修计划，统筹设备检修管理，降低设备检修对电网安全、经济运行的不利影响，提高电网安全供电水平和资源优化配置能力。

(3) 安全校核类应用。安全校核类应用包含静态安全校核、稳定计算校核及辅助决策等。

1) 静态安全校核功能是在计划方式下，对指定时间段内电网运行在静态安全方面的综合分析，包括校核断面智能生成、基态潮流分析、静态安全分析、灵敏度分析、短路电流分析。

2) 稳定计算校核功能涉及静态稳定、暂态稳定、动态稳定、电压稳定和频率稳定，一期工程实施了暂态稳定校核和动态稳定中的小扰动稳定性校核。针对安全校核类应用的智能断面生成功能形成的校核断面潮流，分析暂态稳定性、动态稳定性，分析确定校核断面潮流的稳定计算校核结论，为后续辅助决策提供稳定计算校核结果。

3) 辅助决策应用功能基于静态安全校核功能和稳定校核功能，在满足静态安全、暂态稳定、动态稳定等安全稳定约束的条件下，计算调度计划和调度操作的校正措施，协助消除或缓解各类越限、失稳等情况，为电网调度计划和调度操作提供辅助决策支持。主要包括静态安全辅助决策、静态失稳辅助决策、暂态失稳辅助决策、动态失稳辅助决策、电压失稳辅助决策五方面的功能。

(4) 调度管理类应用。调度管理类应用主要包括生产运行、专业管理、综合分析与评估、信息展示与发布、内部综合管理五个应用。调度管理类应用是实现电网调度规范化、流程化和一体化管理的技术保障。主要实现电网调度基础信息的统一维护和管理、主要生产业务的规范化和流程化管理、调度专业和并网电厂的综合管理、调度机构内部综合管理，以及电网安全、运行、计划、二次设备等信息的综合分析评估和多视角展示与发布，实现与 SG-ERP 信息系统的信息交换和共享。

1.2.2 电网运行优化及控制

本书在介绍电力系统安全稳定运行与优化理论、电网经济运行与优化理论的基础上，以电力生产运行时间为序，分别对面向多级调度的发电调度计划优化、电网运行方式在线分析与优化、电网在线安全稳定计算分析与优化控制、电网实时优化控制技术进行了介绍；最后还对燃煤火电机组环保设施优化改进及在线监测、基于北斗通信技术的电力信息传输系统进行了介绍。

1. 电力系统安全稳定运行与优化理论

电网安全稳定运行是电网运行的最基本要求，指的是电力系统在给定的初始运行方式下，受到物理扰动后，能恢复到初始运行状态或到达另一个运行状态的平衡点，且在平衡点系统大部分状态变量未越限，从而保证电网完整运行。

从物理特性来看，电力系统研究者们将电力系统的安全稳定划分为功角稳定、电压稳定和频率稳定。从扰动大小来看，电力系统安全稳定可分为大扰动稳定和小扰动稳定。从系统响应时段来划分，电力系统安全稳定可分为暂态稳定、动态稳定和中长期稳定。为了保证电网安全稳定