

(第二版)

# 电网调度运行 新技术

DIANWANG DIAODU YUNXING XINJISHU

王正风 董 存 王理金 黄太贵 编著

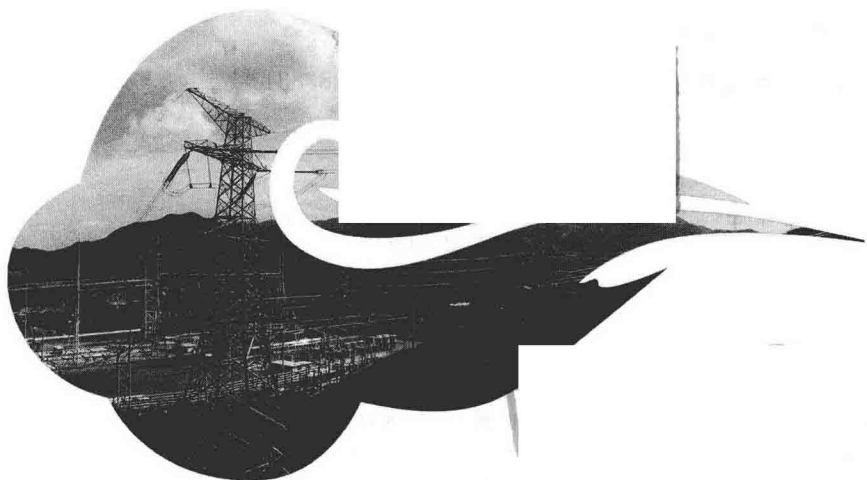


中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

(第二版)

# 电网调度运行 新技术

王正风 董 存 王理金 黄太贵 编著



中国电力出版社  
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

## 内 容 提 要

本书主要介绍电网调度运行方面的新技术及其在实际生产运行中的应用。全书共分为十章,包括电力系统与电力调度;电网实时动态监测技术;电网动态安全监测预警与辅助决策技术;大规模新能源调度运行技术;基于 SCADA/EMS 系统的负荷实测与电网网损在线计算技术;基于 FCL 的短路电流控制技术;电网稳定防线实时监测与分析技术;电能量计量系统;常规变电站智能化改造以及智能电网继电保护动态整定技术。

本书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使用,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师生的参考书。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

电网调度运行新技术/王正风等编著. —2 版. —北京:中国电力出版社, 2016. 4

ISBN 978 - 7 - 5123 - 8588 - 7

I. ①电… II. ①王… III. ①电力系统调度②电力系统运行 IV. ①TM73

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2015) 第 283831 号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街 19 号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

\*

2012 年 3 月第一版

2016 年 4 月第二版 2016 年 4 月北京第三次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 22.75 印张 460 千字

印数 4501~6500 册 定价 58.00 元

### 敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪  
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

# 前言

电网调度运行新技术（第二版）

电力系统调度部门是电力系统运行的直接生产单位，实时保障着电能生产与消费的平衡，保障着电网的安全经济运行。随着科技的发展和智能电网的建设，新的技术不断应用在电力调度部门，提高了电网运行的安全稳定水平和经济运行水平。《电网调度运行新技术》一书出版以来，受到了读者的欢迎。为了更好地适应读者的需求，本书在第一版基础上，结合目前国内大规模新能源并网给电网调度运行带来的挑战，以及电网规模扩大带来的短路电流超标问题，增加了大规模新能源运行控制技术和基于 FCL 的短路电流控制技术两章内容。

本书以电力生产调度运行为基础，以电网调度生产运行的相关新技术为线索，介绍了调度运行新技术及其在实际生产运行中的应用，是基于近些年国内完成的有特色的科技项目提炼汇总而成的。本书系统的介绍了电力系统与电力调度；电网实时动态监测技术；电网动态安全监测预警与辅助决策技术；大规模新能源调度运行技术；基于 SCADA/EMS 系统的负荷实测与电网网损在线计算技术；基于 FCL 的短路电流控制技术；电网稳定防线实时监测与分析技术；电能量计量系统；常规变电站智能化改造以及智能电网继电保护动态整定技术。

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，以及电力工程专业老师的参考书。

本书由国家电网公司运行专业领军人才王正风博士、董存博士，国家电网公司王理金高级工程师，安徽电力调度控制中心副主任黄太贵高级工程师，安徽省电力公司技术专家黄少雄高级工程师，上海电力科学研究院鲍伟高级工程师，安徽电力调度控制中心王栋高级工程师共同编写，全书由王正风博士统稿。

由于编者水平有限，本书不完善、不正确的地方在所难免，敬请广大读者给予批评指正。

编者

# 目 录

电网调度运行新技术（第二版）

前言

<b>1</b>	<b>电力系统与电力调度</b> .....	1
1.1	电力系统 .....	1
1.1.1	电力系统简介 .....	1
1.1.2	电力系统发展 .....	5
1.2	电网调度运行新技术 .....	8
1.2.1	电网调度运行技术 .....	8
1.2.2	电网调度运行新技术的发展与应用 .....	12
<b>2</b>	<b>电网实时动态监测技术</b> .....	20
2.1	电网实时动态监测技术 .....	20
2.1.1	国外研究与应用 .....	20
2.1.2	国内研究与应用 .....	22
2.1.3	电网实时动态监测系统的构成 .....	24
2.2	PMU 子站 .....	25
2.2.1	相量测量的原理 .....	25
2.2.2	PMU 子站结构 .....	32
2.2.3	同步相量测量装置功能 .....	38
2.3	WAMS 主站系统 .....	41
2.3.1	WAMS 主站硬件 .....	41
2.3.2	WAMS 主站系统软件 .....	43
2.4	动态数据库的使用 .....	44
2.4.1	PI 数据库 .....	44
2.4.2	eDNA 数据库 .....	48
2.5	电网实时动态监测技术在电力系统动态监测中的应用 .....	51
2.5.1	电网动态信息监视 .....	52
2.5.2	越限监视 .....	54
2.5.3	相角参考点处理 .....	55
2.5.4	电网扰动识别 .....	56
2.5.5	基于 PMU 的状态估计 .....	59

2.5.6	辅助服务	62
2.6	电网实时动态监测系统的通信规约	65
2.6.1	数据类型及报文格式	66
2.6.2	实时数据通信流程	67
2.6.3	离线数据通信流程	69
2.6.4	PMU 子站通信带宽计算	69
<b>3</b>	<b>电网动态安全监测预警与辅助决策技术</b>	<b>71</b>
3.1	概述	71
3.2	电力系统静态稳定在线分析及控制	72
3.2.1	静态功角稳定在线计算分析及控制	72
3.2.2	静态电压稳定在线计算分析及控制	73
3.2.3	热稳定在线计算分析及控制	76
3.3	电力系统在线暂态功角稳定及控制	78
3.3.1	暂态功角稳定	78
3.3.2	暂态功角稳定分析方法	81
3.3.3	暂态功角稳定在线计算分析及控制	87
3.4	电力系统暂态电压安全在线计算分析及控制	92
3.4.1	暂态电压安全	92
3.4.2	暂态电压稳定	93
3.4.3	暂态电压跌落	93
3.4.4	暂态电压稳定在线控制辅助决策	95
3.5	暂态稳定控制的协调统一	96
3.5.1	预防控制的协调统一	96
3.5.2	紧急控制的协调统一	98
3.6	电力系统低频振荡在线分析	100
3.6.1	电力系统低频振荡	100
3.6.2	低频振荡在线频域分析法	103
3.6.3	低频振荡常用在线监测方法	104
3.6.4	低频振荡在线监测与控制	108
3.7	WAMS 在线计算分析对电网输送能力的提高	108
3.8	电网供电能力评估	111
3.8.1	供电能力评估	111
3.8.2	电网网架供电能力评估	111
3.8.3	电网运行方式安排供电能力评估	113

<b>4</b>	<b>大规模新能源调度运行技术</b>	115
4.1	前言	115
4.1.1	中国风力和太阳能发电的发展现状	115
4.1.2	中国新能源发展面临的主要问题	116
4.2	新能源并网检测技术	119
4.2.1	风电并网检测	119
4.2.2	无功补偿装置检测	125
4.2.3	光伏发电并网检测	130
4.3	新能源预测技术	136
4.3.1	风电功率预测	136
4.3.2	光伏发电功率预测	144
4.4	新能源调度运行控制技术	146
<b>5</b>	<b>基于 SCADA/EMS 系统的负荷实测与电网网损在线计算技术</b>	156
5.1	概述	156
5.2	日负荷实测与网损理论计算	157
5.3	基于 SCADA/EMS 的负荷实测与网损在线计算系统	162
5.3.1	基于 SCADA/EMS 的负荷实测与网损在线系统结构	162
5.3.2	负荷实测	164
5.3.3	网损在线计算	168
5.3.4	基础管理与分析管理	172
5.3.5	基于 SCADA/EMS 的负荷实测与网损在线系统应用及述评	175
5.4	输电线路与变压器设备经济运行指标	178
5.4.1	输电线路的有功损耗与经济负载系数	178
5.4.2	双绕组变压器的有功损耗与经济负载率	182
5.4.3	三绕组变压器的损耗与经济负载率	186
<b>6</b>	<b>基于 FCL 的短路电流控制技术</b>	189
6.1	前言	189
6.2	短路电流常见控制措施	190
6.2.1	合理的电网结构	190
6.2.2	优化电网运行方式	195
6.2.3	采用高阻抗设备	197
6.3	故障电流限制器	198
6.3.1	驱动型限流器	199

6.3.2	静止型限流器	202
6.3.3	材料型限流器	206
6.3.4	工程实际应用	211

## 7 电网稳定防线实时监测与分析技术 215

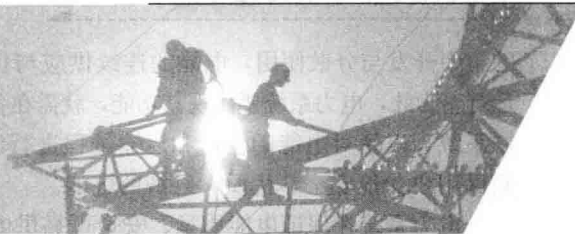
7.1	概述	215
7.2	频率电压紧急控制装置	216
7.2.1	频率电压紧急控制装置(以下简称装置)的主要功能	217
7.2.2	装置工作原理	217
7.3	稳定控制装置	222
7.3.1	装置的主要功能	222
7.3.2	装置工作原理	223
7.4	备用电源自投装置	228
7.4.1	装置的主要功能	228
7.4.2	装置工作原理	229
7.4.3	例题	230
7.5	失步解列装置	235
7.5.1	装置的主要功能	235
7.5.2	装置工作原理	236
7.6	电网稳定防线实时监测与分析系统	242
7.6.1	电网稳定防线实时监测与分析系统结构	242
7.6.2	电网稳定防线实时监测与分析系统功能	245

## 8 电能量计量系统 262

8.1	概述	262
8.1.1	电能量计量系统现状	262
8.1.2	电能量计量系统发展趋势	263
8.2	电能量计量系统总体结构	264
8.2.1	电能量计量系统构成	264
8.2.2	电能量计量系统硬件结构	265
8.2.3	基于 IEC 61970 标准的系统软件结构	266
8.2.4	电能量计量系统通信	270
8.3	电能量计量系统基本功能	275
8.3.1	数据采集功能	275
8.3.2	数据处理及应用功能	277



8.3.3	Web 展示及报表功能 .....	280
8.3.4	系统管理功能 .....	281
8.4	电能量计量系统高级应用功能 .....	282
8.4.1	智能旁路代分析判断 .....	283
8.4.2	基于 E 语言的省地电量信息交互 .....	285
<b>9</b>	<b>常规变电站智能化改造 .....</b>	<b>290</b>
9.1	概述 .....	290
9.1.1	智能变电站简介 .....	290
9.1.2	变电站智能化发展趋势 .....	293
9.2	智能变电站技术特点 .....	295
9.2.1	电子式互感器技术的应用 .....	295
9.2.2	基于统一信息平台的一体化监控系统 .....	298
9.2.3	智能变电站站内时钟同步技术 .....	300
9.2.4	智能分析决策控制技术 .....	301
9.2.5	智能变电站环境下的五防技术 .....	302
9.3	常规变电站智能化改造需求 .....	305
9.3.1	数据采集改造需求 .....	305
9.3.2	网络改造需求 .....	307
9.3.3	站控层系统改造需求 .....	310
9.3.4	改造过程中运行安全需求 .....	311
9.4	常规变电站智能化改造 .....	311
9.4.1	分阶段智能化改造 .....	311
9.4.2	智能化改造过程中新老系统并轨运行实施 .....	313
9.4.3	智能化改造方案设计及实施实例 .....	313
<b>10</b>	<b>智能电网继电保护动态整定技术 .....</b>	<b>324</b>
10.1	概述 .....	324
10.2	智能电网继电保护动态整定基本技术 .....	327
10.2.1	智能电网继电保护装置特点 .....	327
10.2.2	智能电网继电保护运行技术 .....	330
10.2.3	智能电网继电保护整定计算 .....	333
10.3	智能电网继电保护动态整定基本技术 .....	335
10.3.1	智能电网继电保护动态整定基本技术原则 .....	335
10.3.2	继电保护动态整定计算应用技术 .....	336



# 电力系统与电力调度

## 1.1 电力系统

### 1.1.1 电力系统简介

#### 一、电力系统结构

电力系统是由发电、输电、变电、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。

电力系统的出现使高效、无污染、使用方便、易于调控的电能得到广泛应用，推动了社会生产各个领域的变化，开创了电力时代。电力系统的规模和技术水准已成为一个国家经济发展水平的标志之一，同时电力系统的安全稳定运行及控制水平也成为反映一个国家自动化水平的标志之一。

电力系统由电源、变电站、输电、配电线路、负荷中心（用户）以及各种一二次信息及控制系统构成。电源指各类发电厂和发电站，它将一次能源转换成电能。输电线路与变电站构成的网络通常称电力网络，由电源的升压变电站、输电线路、负荷中心变电站（降压）以及配电线路等构成。它的功能是将电源发出的电能升压到一定等级后输送到负荷中心变电站，再降压至一定等级后，经配电线路与用户相连。电力网络既能输送大量电能，创造巨大财富，也能在瞬间造成重大的灾难性事故，影响到社会的发展和人民的生活。为保证系统安全、稳定、经济地运行，必须在不同电压等级配置各类自动控制装置与通信系统，组成信息与控制系统。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。信息与控制系统是实现电力系统信息传递的神经网络，使电力系统具有可观测性与可控性，从而保证电能生产与消费过程的正常进行以及事故状态下的紧急处理。

由于电源点与负荷中心多数处于不同地区，也无法大量储存，故其生产、输送、分配和消费都在同一时间内完成，即电能生产必须时刻保持与消费平衡。因此，电能

的集中开发与分散使用，电能的连续供应与负荷的随机变化制约了电力系统的结构和运行。为此，电力系统要实现其功能，就需在各个环节和不同层次设置相应的信息与控制系统，以便对电能的生产和运输过程进行测量、调节、控制、保护、通信和调度，确保用户获得安全、优质、经济的电能。

电力系统在保证电能质量、安全可靠供电的前提下，还应实现经济运行，即努力调整负荷曲线，提高设备利用率；合理利用各种动力资源，降低煤耗；合理的电网规划和电网运行方式优化可以降低网络损耗，以取得最佳经济效益。合理的大型电力系统不仅便于电能生产与消费的集中管理、统一调度和分配，减少总装机容量，节省动力设施投资，且有利于地区能源资源的合理开发利用，更大限度地满足地区国民经济日益增长的用电需要。因此，电力系统建设往往是国家及地区国民经济发展规划的重要组成部分。

根据电力系统中装机容量与用电负荷的大小，以及电源点与负荷中心的相对位置，电力系统常采用不同电压等级输电，如高压输电或超高压输电等，以求得最佳的技术经济效益。

根据电流的特征，电力系统的输电方式还分为交流输电和直流输电。交流输电应用最广。直流输电是将交流发电机发出的电能经过整流后采用直流电传输。

电力系统的基本要求是保证安全可靠地向用户供应质量合格、价格便宜的电能。所谓质量合格，就是指电压、频率、正弦波形这 3 个主要参量都必须处于规定的范围内。电力系统的规划、设计和工程实施虽为实现上述要求提供了必要的物质条件，但最终的实现则决定于电力系统的调度运行。

## 二、发电厂类型

按能量转换的方式不同，发电厂主要有三种类型。

(1) 水力发电厂。水力发电厂简称水电厂或水电站，它是利用水流的位能来生产电能。当控制水流的闸门打开时，水流从进水管引入水轮机蜗壳室，冲动水轮机，带动发电机发电，如图 1-1 所示。其能量转换过程是：水流位能→机械能→电能。

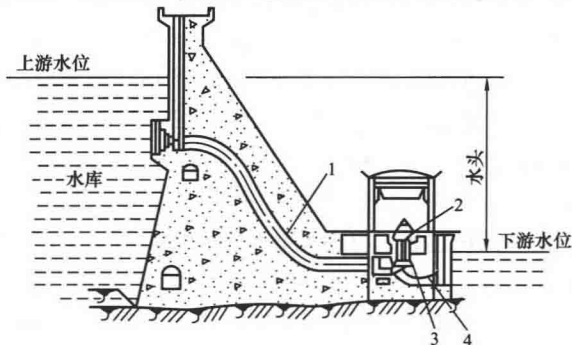


图 1-1 水力发电示意图

1—引水管；2—发电机；3—水轮机；4—尾水管

水力发电厂的容量大小决定于上下游的水位差（简称水头）和流量的大小。因此，水力发电厂往往需要修建拦河大坝等水工建筑物以形成集中的水位差，并依靠大坝形成具有一定容积的水库以调节河水流量。根据地形、地质、水能资源特点的不同，水力发电厂可分为坝式水电站、引水式水电站、混合式水电站。坝式水电站的水头是由挡水大坝抬高上游水位而形成的。若厂房布置在坝后，称之为坝后式水电站。若厂房起挡水坝的作用，承受上游水的压力，称之为河床式水电站。引水式水电站的水头由引水道形成。这类水电站的特点是具有较长的引水道。混合式水电站的水头由坝和引水道共同形成。这类水电站除坝具有一定高度外，其余与引水式水电站相同。目前我国的水电站的建设规模逐渐扩大，由于水电站不仅清洁环境，而且其综合价值很高，因而是我国大力发展的电厂之一。

(2) 火力发电厂。火力发电厂简称火电厂，它是利用燃料的化学能来生产电能。我国的火电厂以燃煤为主，如图 1-2 所示。其能量的转换过程是：燃料的化学能→热能→机械能→电能。

火力发电厂按其作用可分为单纯发电的和既发电又兼供热的两种类型。前者指一般的火力发电厂，后者指供热式火力发电厂，或称热电厂。一般

火力发电厂应尽量建设在燃料基地或矿区附近。将发出的电用高压或超高压线路送往用电负荷中心。通常把这种火力发电厂称为“坑口电厂”。坑口电厂是当前和今后建设大型火力发电厂的主要发展方向。热电厂的建设是为了提高热能的利用效率。由于它要兼供热，所以必须建设在大城市或工业区的附近。为保护环境，火力发电厂一般要考虑“三废”（废水、废汽、废渣）的综合利用，这样既保护了环境，又节约了资源。

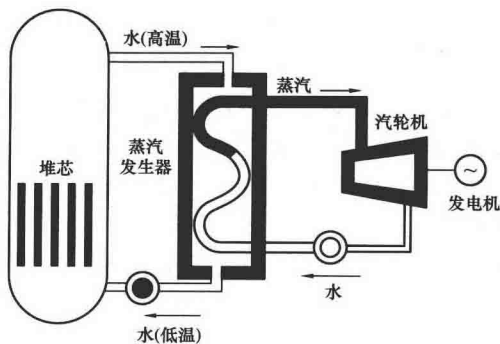


图 1-3 压水堆型核电站发电示意图

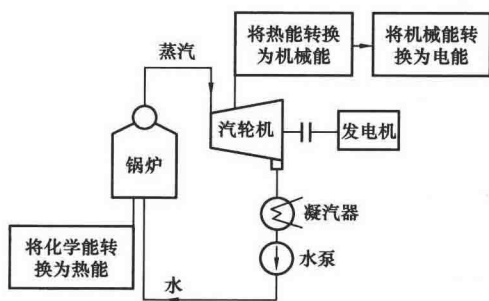


图 1-2 火力发电示意图

(3) 核能发电厂。又称核电站，它是利用原子核的裂变来生产电能。其生产过程与火电厂基本相同，只是以核反应堆代替了燃煤锅炉，以少量的核燃料代替了大量的燃煤，如图 1-3 所示。能量转换过程是：核裂变能→热能→机械能→电能。

核电站具有节省燃料，燃烧时不

需要空气助燃，无污染，缓解交通等一系列优点。所以，目前世界上许多国家都很重视核能发电厂的建设。我国已建成浙江秦山核电站和广东大亚湾核电站。尚有许多在建以及计划建设的核电站，随着日本福岛核电站的核泄漏事件，我国对核电站的建设提出了多条改进要求，力求建成新一代的核电系统。

此外，还有太阳能发电厂、风力发电厂、地热发电厂、潮汐发电厂等，它们不仅清洁，而且潜力巨大，随着科技的发展和社会的进步，其利用前景广阔。在传统能源日益短缺的今天，更具现实意义。

### 三、电力系统运行状态

电力系统的运行一般可分为四种状态：安全正常状态、不安全正常状态（警戒状态）、紧急状态和恢复状态。电力系统的正常运行状态可用方程组来表示

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x) \\ g(x) = 0 \\ h(x) \leq 0 \end{cases} \quad (1-1)$$

式（1-1）中第一式为系统的动态微分方程；第二式为系统正常运行时应该满足的等约束条件，包括系统有功平衡约束和无功平衡约束；第三式为系统正常运行时应该满足的不等式约束，包括系统每个节点正常运行的电压上下限，每条线路应该满足的传输功率极限和各电厂发电机的运行极限。

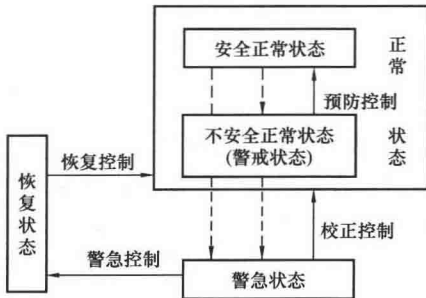


图 1-4 电力系统运行状态转化图

--> 故障；-> 控制

电力系统四种状态间的相互转化如图 1-4 所示。

各种运行状态之间的转移，需通过控制手段来实现，如预防控制、校正控制、稳定控制、紧急控制以及恢复控制等。这些控制统称为安全控制。

电力系统安全状态指电力系统的频率、各点的电压、各元件的负荷均处于规定的允许值范围，并且当系统由于负荷变动或出现故障而引起扰动时，仍不致脱离正常运行状态。由于电能发、输、用在任何瞬间都必须保证平衡，而用电负荷又是随时变化的，因此，安全状态实际上是一种动态平衡，必须通过正常的调整控制（包括频率和电压——即有功和无功调整）才能得以保持。

电力系统警戒状态（不安全正常状态）指电力系统整体仍处于安全规定的范围，但个别元件或局部网络的运行参数已临近安全范围的阈值。一旦发生扰动，就会使系统脱离正常状态而进入紧急状态。处于警戒状态时，应采取预防控制措施使之返回安全状态。

电力系统紧急状态指正常状态的电力系统受到扰动后,一些快速的保护和控制已经起作用,但系统中某些枢纽点的电压仍偏移,超过了允许范围。或某些元件的负荷超过了安全限制,使系统处于危机状况。紧急状态下的电力系统,应尽快采用各种校正控制和稳定控制措施,使系统恢复到正常状态。

电力系统恢复状态指采用各种校正控制和稳定控制措施,使系统仍不能恢复到正常状态,按照对用户影响最小的原则,采取紧急控制措施,使系统进入恢复状态。这类措施包括使系统解列(即整个系统分解为若干局部系统,其中某些局部系统不能正常供电)和切除部分负荷(此时系统尚未解列,但不能满足全部负荷要求,只得去掉部分负荷)。在这种情况下再采取恢复控制措施,使系统返回正常运行状态。

### 1.1.2 电力系统发展

在电能应用的初期,由小容量发电机单独向灯塔、轮船、车间等的照明供电系统,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。

20世纪以后,随着工农业生产和城市的发展,电能的需求量迅速增加,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。同时,为了提高供电的可靠性和资源综合利用的经济性,就必须将许多分散的各种形式的发电厂,通过输电线路及变电站联系起来,这种由发电厂、升降压变电站、各种输配电线路及电力用户构成的统一整体,称为电力系统。电力系统加上发电机的原动机(如汽轮机、水轮机)和原动机的动力部分(如燃煤锅炉、水库和反应堆)则称动力系统,如图1-5所示。

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km<sup>2</sup>的土地。

中国的电力工业于1882年诞生在上海,到新中国解放的1949年,我国的发电装机容量与发电量仅为185万kW和43亿kWh。新中国成立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,到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

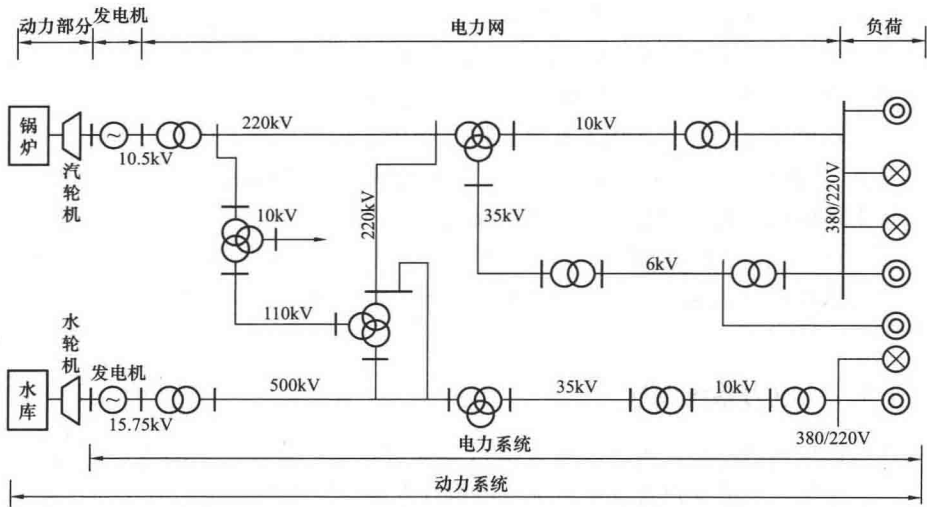


图 1-5 动力系统、电力系统及电力网示意图

发电厂、变电站或变电站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 750、500、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在特高压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 ±800kV 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，实现华北至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 kVA 主变压器，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。

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 2×648.7km，途经安徽、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 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  $2 \times 603$  km。浙北—福州 1000 kV 特高压交流输变电工程这个浙闽电网间新通道，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。

2010 年云南至广东  $\pm 800$  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，途经云南、广西、广东三省（区），输电距离 1373 km。工程额定电压  $\pm 800$  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  $\pm 800$  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 2059 km，直流输送容量 720 万 kW。

2014 年 1 月 27 日哈密南—郑州  $\pm 800$  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 2192 km（含黄河大跨越 3.9 km），额定输送功率 800 万 kW。

2014 年 6 月 25 日， $\pm 800$  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 1679.9 km，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。

截至 2014 年底，国网调度口径装机容量达 10.02 亿 kW，其中，火电 71351 万 kW，占 71.24%；水电 14283 万 kW，占 14.26%；抽水蓄能 1693 万 kW，占 1.69%；核电 1302 万 kW，占 1.30%；风电 8790 万 kW，占 8.78%；其他 2743 万 kW，占 2.74%。清洁能源（含水电、风电、光伏、核电、生物质能、分布式电源，下同）迅猛发展，在全网发电总装机中的占比迅速提高。国网系统 220 kV 以上统调线路总长度 466128 km，变电容量 24.28744 亿 kVA；直流系统 500 kV 以上线路总长度 16539 km，直流换流变容量 1.36680 亿 kVA。



## 1.2 电网调度运行新技术

### 1.2.1 电网调度运行技术

#### 一、电网调度功能

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，因此作为电网安全稳定的直接生产单位，各网省调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。具体来说，电网调度的功能主要包括：①预测用电负荷；②安排发电任务，确定运行方式；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。

基于调度机构的基本职能，其通常包括以下几个主要职能部门：

(1) 调度运行。主要实时监测系统中的发电厂、变电站以及各种电气设备运行情况，保持电网频率、电压、稳定限额等在正常范围内；指挥电网设备调度倒闸操作，保证调度倒闸操作指令的正确性；针对系统中出现问题及时采取措施，避免事故扩大，控制系统的运行，是电网运行的执行环节，是管理电网生产运行的指挥系统。

(2) 调度计划。根据电网运行及负荷预测结果，安排发电机组的开机方式，同时实现对电网运行方式安排的潮流进行安全校核，满足电网电力平衡和电量平衡。

(3) 运行方式。根据电网运行设备的停电检修对整个电网进行分析计算，为电网调度机构的指挥决策提供技术支持，是整个调度系统的参谋部，同时也为电网公司其他职能部门提供有关电网运行、规划等方面的需求信息和相关技术支持，对电网的安全稳定运行提供技术支持。

(4) 继电保护。负责电网中继电保护及安全自动装置的整定计算工作，对全网二次装置进行技术管理，为电网的安全稳定运行提供技术支持。

(5) 通信自动化。主要负责电网数据采集、传送及显示，为调度机构发布正确系统操作指令提供相应技术支持，也是确保各种二次设备顺利动作的基础，保证系统的安全稳定运行。

#### 二、电网调度技术支持系统

电力系统调度为了实现电力系统的安全稳定运行，其必须要有相应的技术支持系统来实现其功能。

(1) EMS系统。能量管理系统（Energy Management System, EMS）是电力调度部门的基本应用系统，是实现电力系统安全经济调度运行诸多功能的最重要系统，包括SCADA、AGC、AVC、PAS以及DTS等诸多应用子系统。

1) SCADA。SCADA（Supervisory Control And Data Acquisition）是EMS系统的最基本应用，主要用于实现完整的、高性能的实时数据采集和监控功能，满足电力系