国家出版基金项目
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

“十二五”“十三五”国家重点图书出版规划项目

新能源发电并网技术丛书

New Energy Dispatching and Management

裴哲义　丁杰　孙荣富　孙勇　万筱钟 等　编著

新能源调度技术与并网管理

中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

“十二五”“十三五”国家重点图书出版规划项目

新能源发电并网技术丛书

裴哲义　丁杰　孙荣富　孙勇　万筱钟 等　编著

新能源调度技术与并网管理

RFID



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn
·北京·

内 容 提 要

本书为《新能源发电并网技术丛书》之一，从电力系统运行的基本概念和新能源发电的特点入手，结合我国电网调度的工作实践，较全面地论述了新能源调度运行和并网管理的基本工作内容和技术要求。全书共分 10 章，包括电力系统运行的基本概念、新能源发电技术、新能源发电并网运行特点及影响、新能源资源监测与发电预测、新能源发电运行信息管理、新能源发电并网管理、新能源发电计划、新能源发电运行控制技术、新能源发电运行评估、新能源与电力市场等。

本书可作为电网企业新能源调度运行和并网管理人员岗位培训教材，也可作为高等院校相关专业学生的学习参考材料。对发电企业运行管理人员和相关领域的研究人员也具有一定的参考价值。

图书在版编目（CIP）数据

新能源调度技术与并网管理 / 裴哲义等编著. -- 北京 : 中国水利水电出版社, 2018.12
（新能源发电并网技术丛书）
ISBN 978-7-5170-7267-6

Ⅰ. ①新… Ⅱ. ①裴… Ⅲ. ①电力系统一储能一研究 Ⅳ. ①TM7

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第297674号

书　　名	新能源发电并网技术丛书 **新能源调度技术与并网管理** XIN NENGYUAN DIAODU JISHU YU BINGWANG GUANLI
作　　者	裴哲义　丁　杰　孙荣富　孙　勇　万筱钟　等 编著
出版发行	中国水利水电出版社 （北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座　100038） 网址：www. waterpub. com. cn E - mail：sales@waterpub. com. cn 电话：（010）68367658（营销中心）
经　　售	北京科水图书销售中心（零售） 电话：（010）88383994、63202643、68545874 全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排　　版	中国水利水电出版社微机排版中心
印　　刷	北京瑞斯通印务发展有限公司
规　　格	184mm×260mm　16 开本　17 印张　397 千字
版　　次	2018 年 12 月第 1 版　2018 年 12 月第 1 次印刷
定　　价	**66.00** 元

凡购买我社图书，如有缺页、倒页、脱页的，本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

丛书编委会

主　任　丁　杰

副主任　朱凌志　吴福保

委　员（按姓氏拼音排序）

陈　宁　崔　方　赫卫国　秦筱迪

陶以彬　许晓慧　杨　波　叶季蕾

张军军　周　海　周邺飞

本书编委会

主　　编　裴哲义　丁　杰

副 主 编　孙荣富　孙　勇　万筱钟

参编人员（按姓氏拼音排序）

曹　政　陈卫东　程　林　丁华杰

丁　煌　董　存　郝思鹏　胡超凡

黄　磊　金　鑫　阚建飞　雷　震

李宝聚　李明节　李振元　刘海涛

陆　晓　南桂林　宁文元　施贵荣

施　涛　王会超　王靖然　王　尧

徐海翔　叶荣波　张健康　张　力

张小奇　周　海

序
XU

随着全球应对气候变化呼声的日益高涨以及能源短缺、能源供应安全形势的日趋严峻，风能、太阳能、生物质能、海洋能等新能源以其清洁、安全、可再生的特点，在各国能源战略中的地位不断提高。其中风能、太阳能相对而言成本较低、技术较成熟、可靠性较高，近年来发展迅猛，并开始在能源供应中发挥重要作用。我国于2006年颁布了《中华人民共和国可再生能源法》，政府部门通过特许权招标，制定风电、光伏分区上网电价，出台光伏电价补贴机制等一系列措施，逐步建立了支持新能源开发利用的补贴和政策体系。至此，我国风电进入快速发展阶段，连续5年实现增长率超100%，并于2012年6月装机容量超过美国，成为世界第一风电大国。截至2014年年底，全国光伏发电装机容量达到2805万kW，成为仅次于德国的世界光伏装机第二大国。

根据国家规划，我国风电装机容量2020年将达到2亿kW。华北、东北、西北等“三北”地区以及江苏、山东沿海地区的风电主要以大规模集中开发为主，装机规模约占全国风电开发规模的70%，将建成9个千万千瓦级风电基地；中部地区则以分散式开发为主。光伏发电装机容量预计2020年将达到1亿kW。与风电开发不同，我国光伏发电呈现“大规模开发，集中远距离输送”与“分散式开发，就地利用”并举的模式，太阳能资源丰富的西北、华北等地区适宜建设大型地面光伏电站，中东部发达地区则以分布式光伏为主，我国新能源在未来一段时间仍将保持快速发展的态势。

然而，在快速发展的同时，我国新能源也遇到了一系列亟待解决的问题，其中新能源的并网问题已经成为社会各界关注的焦点，如新能源并网接入问题、包含大规模新能源的系统安全稳定问题、新能源的消纳问题以及新能源分布式并网带来的配电网技术和管理问题等。

新能源并网技术已经得到了国家、地方、行业、企业以及全社会的广泛关注。自“十一五”以来，国家科技部在新能源并网技术方面设立了多个“973”“863”以及科技支撑计划等重大科技项目，行业中诸多企业也在新能

源并网技术方面开展了大量研究和实践，在新能源并网技术方面取得了丰硕的成果，有力地促进了新能源发电产业的发展。

中国电力科学研究院作为国家电网公司直属科研单位，在新能源并网等方面主持和参与了多项国家“973”“863”以及科技支撑计划和国家电网公司科技项目，开展了大量与生产实践相关的针对性研究，主要涉及新能源并网的建模、仿真、分析、规划等基础理论和方法，新能源并网的实验、检测、评估、验证及装备研制等方面的技术研究和相关标准制定，风电、光伏发电功率预测及资源评估等气象技术研发应用，新能源并网的智能控制和调度运行技术研发应用，分布式电源、微电网以及储能的系统集成及运行控制技术研发应用等。这些研发所形成的科研成果与现场应用，在我国新能源发电产业高速发展中起到了重要的作用。

本次编著的《新能源发电并网技术丛书》内容包括电力系统储能应用技术、风力发电和光伏发电预测技术、光伏发电并网试验检测技术、微电网运行与控制、新能源发电建模与仿真技术、数值天气预报产品在新能源功率预测中的应用技术、光伏发电认证及实证技术、新能源调度技术与并网管理、分布式电源并网运行控制技术、电力电子技术在智能配电网中的应用等多个方面。该丛书是中国电力科学研究院等单位在新能源发电并网领域的探索、实践以及在大量现场应用基础上的总结，是我国首套从多个角度系统化阐述大规模及分布式新能源并网技术研究与实践的著作。希望该丛书的出版，能够吸引更多国内外专家、学者以及有志从事新能源行业的专业人士，进一步深化开展新能源并网技术的研究及应用，为促进我国新能源发电产业的技术进步发挥更大的作用！

中国科学院院士、中国电力科学研究院名誉院长 周孝信

前言

QIANYAN

发展低碳经济，建设生态文明，实现可持续发展已成为人类社会发展的共识。在我国相关政策的指导下，新能源产业得到快速发展，已成为世界上装机容量最多的国家。截至2017年年底，我国新能源装机容量达2.93亿kW，占总装机容量的17%，新能源发电量达4238亿kW·h。这为应对气候变化，实现能源转型起到了积极作用。但随着我国新能源并网规模的不断增大，新能源并网发电对电网安全稳定的影响日益突出，特别是在新能源装机容量占比较高的华北、东北和西北电网，新能源调度运行和并网管理已成为电网调度运行管理的重要工作内容，且日益受到社会各界的关注。

新能源调度运行和并网技术涉及电网调度、新能源发电、预报预测、信息采集、自动控制、计划管理等多个学科，本书从电力系统运行和新能源发电技术和特点的基本概念出发，由浅入深、突出重点、实例丰富，力求做到简明、严谨、科学、务实。

当前，我国新能源仍处在快速发展过程中，电力体制和市场化改革不断推进，国家相关政策法规逐步完善，大规模高比例新能源接入电网将给电网运行带来新的挑战，随着智能电网、人工智能、互联网等技术的进步，新能源调度运行和并网技术也将不断改进，仍需我们密切关注和深入研究。

本书共10章，其中第1章由施涛、陈卫东和阚建飞编写，第2章由施涛、王会超和黄磊编写，第3章由万筱钟、叶荣波编写，第4章由周海、丁煌编写，第5章由孙荣富、徐海翔和金鑫编写，第6章由万筱钟、张小奇编写，第7章、第8章由孙勇、李宝聚编写，第9章由王靖然编写，第10章由丁华杰编写。在本书编写过程中得到了李明节、陆晓、南桂林、施贵荣、胡超凡、宁文元、董存的相关指导，以及程林、张健康、张力、李振元、曹政、王尧、郝思鹏、刘海涛、雷震等人员的大力协助，全书由裴哲义、丁杰、孙荣富、孙勇和万筱钟主要审稿，裴哲义和丁杰统稿完成。

本书在编写过程中参阅了很多已有的工作经验和研究成果，在此对中国电力科学研究院有限公司、国家电网西北分公司、国家电网冀北电力公司、国家电网吉林省电力公司、国家电网江苏省电力公司等单位表示特别感谢。本书在编写过程中听取了顾锦汶、王伟胜和周双喜教授的中肯意见并采纳了相关建议，在此表示衷心感谢！

限于作者的学术水平和实践经历，书中难免有不足之处，恳请读者批评指正。

作者

2018 年 11 月

目 录

MULU

序

前言

第 1 章　电力系统运行的基本概念 …… 1

1.1　电力系统的基本结构 …… 1

1.2　电力系统运行的特点与要求 …… 2

1.3　电力系统运行的基本工作 …… 4

1.4　电网调度的基本概念和要求 …… 7

1.5　电网调度的基本工作 …… 9

1.6　本章小结 …… 14

参考文献 …… 14

第 2 章　新能源发电技术 …… 16

2.1　风力发电技术 …… 16

2.2　太阳能光伏发电技术 …… 21

2.3　太阳能热发电技术 …… 25

2.4　典型储能技术 …… 29

2.5　新能源发电接入电网方式 …… 33

2.6　本章小结 …… 36

参考文献 …… 37

第 3 章　新能源发电并网运行特点及影响 …… 38

3.1　新能源发电运行特点 …… 38

3.2　新能源集中式接入对电网运行的影响 …… 44

3.3　分布式新能源接入对配电网运行的影响 …… 50

3.4　本章小结 …… 57

参考文献 …… 58

第 4 章　新能源资源监测与发电预测 …… 59

4.1　风能资源监测与评估 …… 59

4.2 太阳能资源监测与评估 …… 71
4.3 新能源发电预测 …… 82
4.4 预测误差评价 …… 91
4.5 本章小结 …… 97
参考文献 …… 97
第5章 新能源发电运行信息管理 …… 98
5.1 新能源发电运行信息 …… 98
5.2 新能源发电运行信息采集传输方案 …… 109
5.3 新能源发电运行异常数据辨识与重构 …… 110
5.4 新能源发电运行数据典型应用 …… 112
5.5 分布式电源运行信息 …… 117
5.6 信息安全要求 …… 119
5.7 本章小结 …… 121
参考文献 …… 121
第6章 新能源发电并网管理 …… 122
6.1 新能源发电建模技术要求 …… 122
6.2 并网技术要求 …… 131
6.3 并网检测要求 …… 142
6.4 新能源发电事故典型案例 …… 145
6.5 本章小结 …… 152
参考文献 …… 153
第7章 新能源发电计划 …… 154
7.1 新能源接纳能力评估 …… 154
7.2 新能源中长期电量计划 …… 167
7.3 新能源日前发电计划 …… 169
7.4 新能源日内滚动发电计划 …… 177
7.5 本章小结 …… 178
参考文献 …… 178
第8章 新能源发电运行控制技术 …… 179
8.1 新能源场站有功功率自动控制技术 …… 179
8.2 新能源场站无功电压优化控制技术 …… 187
8.3 有功—无功协同优化控制技术 …… 195
8.4 消纳新能源的热—电联合调度控制技术 …… 196
8.5 本章小结 …… 200
参考文献 …… 201

第 9 章　新能源发电运行评估 …… 202
9.1　新能源场站涉网性能评估 …… 202
9.2　新能源涉网性能评估方法 …… 205
9.3　新能源发电能力评估 …… 210
9.4　新能源消纳约束分析 …… 220
9.5　本章小结 …… 226
参考文献 …… 226
第 10 章　新能源与电力市场 …… 227
10.1　电力市场概述 …… 227
10.2　国外典型电力市场介绍 …… 228
10.3　电力电量市场 …… 236
10.4　新能源辅助服务市场 …… 244
10.5　我国市场化新能源消纳实践 …… 248
10.6　本章小结 …… 257
参考文献 …… 258

第1章　电力系统运行的基本概念

电力工业是国民经济的重要组成部分，电能的生产与供应涉及社会生产和生活的各个方面。电力系统是由发电、输电、变电、配电和用电设施以及为保障其正常运行的继电保护、安全自动装置、调度自动化等二次设施构成的统一整体，随着电力工业的发展而逐步形成的。电力系统的安全稳定和优质经济运行不仅涉及系统自身的安全，也与国民经济发展和人民日常生活密切相关。本章阐述了电力系统的基本结构，电力系统运行的特点和要求，电力系统运行的基本工作，电网调度的基本概念和要求，以及电网调度的基本工作。

1.1　电力系统的基本结构

电力系统通常包含发电机、变压器（升压变压器和降压变压器）、电力线路和用户等。发电机把其他形式的能量（包括机械能、太阳能、风能等）转换为电能，升压变压器把低压电能变换为高压电能，电力线路输送高压电能，降压变压器把高压电能变换为低压电能，用户再使用电能。图1-1为一个简单电力系统示意图，图1-2为一个相对复杂的电力系统示意图。

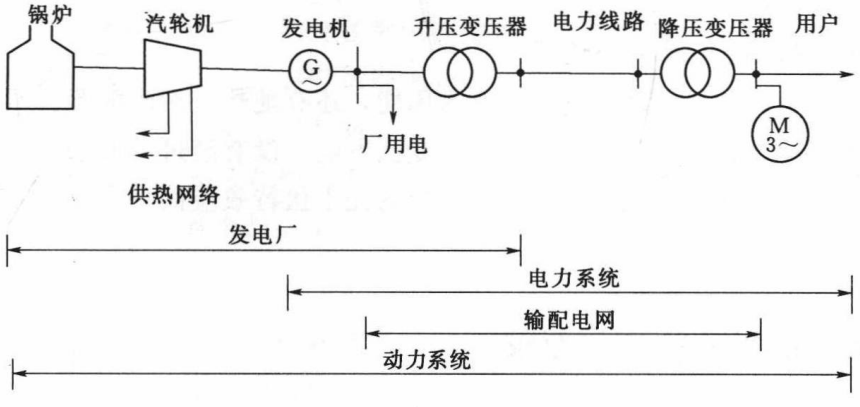


图1-1　简单电力系统示意图

在图1-1所示的简单电力系统中，电力线路和它两边连接的变压器构成输配电网，简称电网，由各种电压等级的输、配电线路以及由它们所联系起来的各类变电设备所组成。电网与连接的发电机和用户构成简单电力系统，电力系统与发电厂的动力部分构成整个动力系统。

就传统的电源而言，其动力部分随电厂类型不同而不同，如图1-2所示，主要有

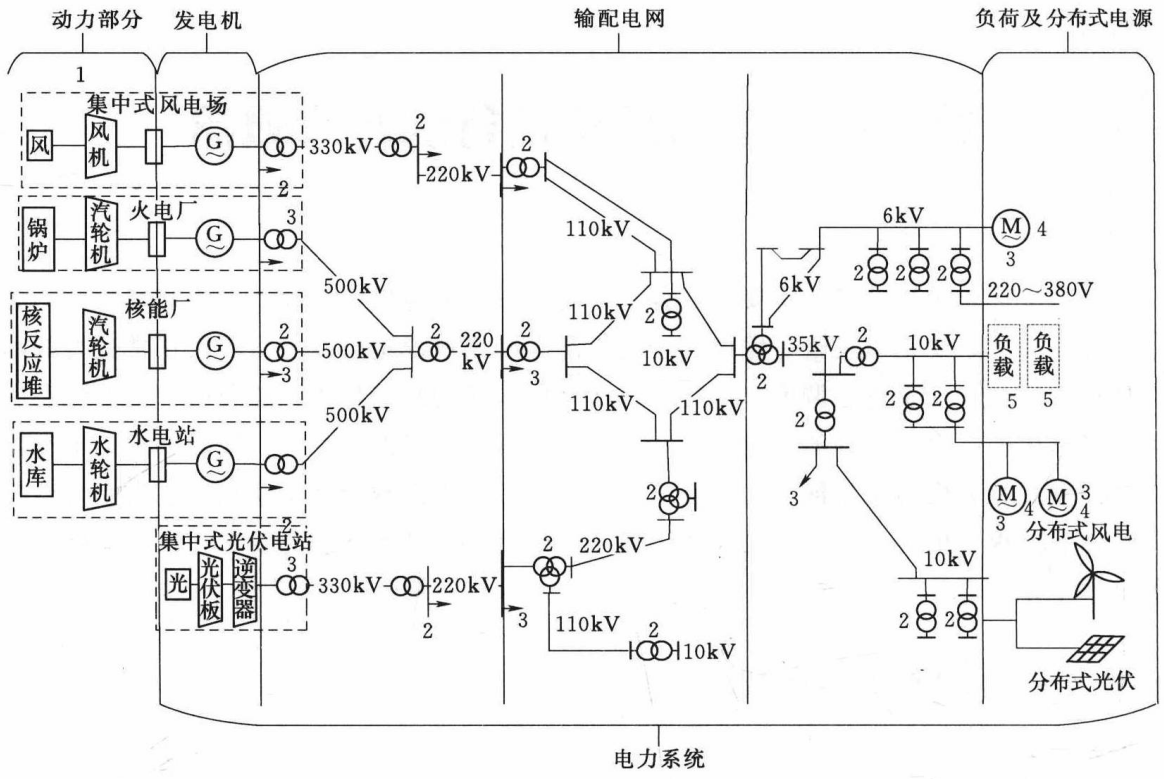


图 1-2　相对复杂的电力系统示意图

1—动力部分；2—变压器；3—负荷；4—电动机；5—低压负载

以下几种：

（1）火力发电厂的锅炉、汽轮机。

（2）水力发电厂的水库、水轮机。

（3）核能发电厂的反应堆、汽轮机。

在新能源发电中，利用较多的是风能和太阳能，还有地热、潮汐能等。风电是风能经风轮转换为机械能，再驱动发电机发电。而光伏发电，没有经过类似于汽轮机、水轮机等动力部分的中间环节，直接利用半导体材料的光生伏特效应而将太阳能直接转换成电能。

1.2　电力系统运行的特点与要求

电力系统运行与国家经济和社会活动密切相关，其最大特点是电能传输速度快、不易大规模存储，且发、输、配、用同时完成。现代电力系统运行需要满足“安全、可靠、经济、绿色”的要求。

1.2.1　电力系统运行的特点

电力系统运行与其他工业系统运行相比，具有以下明显的特点：



1. 与国民经济各部门、各行业和人民生活密切相关

现代工业、农业、国防、交通运输业等都广泛使用电能，此外在人民日常生活中也广泛使用着各种电器，而且各部门的电气化程度越来越高。

2. 过渡过程非常迅速

电能的发、输、配、用都是瞬间完成的，“快”是它的一个突出特点。电能的传输近似于光速，以电磁波的形式传播，传播速度为 30 万 km/s，因此电力系统从一种运行状态过渡到另一种运行状态的过渡过程也非常快。

3. 电能难以大规模储存

电能的生产、输送、分配、消费等实际上是同时进行的，即发电厂任何时刻生产的电能都等于该时刻用电设备消费与输送、分配过程中电能损耗之和。目前虽然对于电能的大规模存储在进行着一系列的研究，但是仍未解决大规模存储的问题。因此，电能难以大规模存储也是电力系统运行的一个突出特点。

1.2.2 电力系统运行的要求

现代电力系统运行具有严格的要求，可简洁概括为“安全、可靠、经济、绿色”。

1. 安全性

电力系统运行的安全性是指电力系统在运行中承受故障扰动（例如突然失去电力系统的元件或短路故障等）的能力。通过两个特点表征：

（1）电力系统能承受住故障扰动引起的暂态过程并过渡到一个可接受的运行工况。

（2）在新的运行工况下，各种约束条件得到满足。

换言之，安全性是指电力系统在发生突发扰动后能不间断地向用户提供电力和电量的能力，可通过安全分析（分为静态安全分析和动态安全分析）进行研究。其中，静态安全分析是假设电力系统从事故前的静态直接转移到事故后的另一静态，不考虑中间的暂态过程，用于检验事故后各种约束条件是否得到满足；动态安全分析是研究电力系统在从事故前的静态过渡到事故后的另一静态暂态过程中保持稳定的能力。

2. 可靠性

电力系统运行的可靠性是指系统对用户连续供电的能力，通常由供电可靠性指标来量度，它不仅反映了电力系统对国民经济电能需求的满足程度，也已成为衡量一个国家经济发达程度的标准之一，是对电力系统运行的基本要求。可靠性不仅包含了电力系统在发生设备故障之后减小故障影响，保持系统稳定的问题，也包含了为防止故障发生，减小故障影响而进行的相关操作，以及电力系统自身检修维护停电作业对用户造成的影响等问题。

3. 经济性

电力系统运行的经济性是指电力系统在供电成本率低或发电能源消耗率及网损率最

小的条件下运行，即在保证技术安全、经济合理的条件下，充分利用现有的设备、元件，不新增投资或较少投资。通过相关技术论证，选取最佳运行方式、调整负荷、提高功率因数、调整或更换变压器、电网改造等措施，使得在传输相同电量的条件下，减少系统损耗，达到提高经济效益的目的。在现代电力系统运行中，还可以通过对整个系统实施最佳经济调度，实现火电厂、水电站、核电站、风电场和光伏电站等各类电源负荷的合理分配，提高整个系统的管理技术水平。

4. 绿色性

电力系统的绿色性是指通过优化电网运行方式和技术革新等手段，充分利用水能、风能、太阳能、地热能等可再生资源，降低化石资源的消耗，提高清洁电能在终端能源消费中的比重，促使电力生产向低碳高效转变。保障电力系统运行绿色性的根本目的是有效地解决我国能源安全问题，和因过量使用化石能源造成的环境污染问题。

1.3　电力系统运行的基本工作

电力系统运行的基本工作包括调峰、调频、调压和稳定控制等，是保证电力系统的安全、稳定和经济运行的重要手段与措施。

1.3.1　调峰

电力系统调峰是指电网用电负荷高峰或低谷时段，为了保证电力电量的供需平衡，对发电机组进行的有功出力调整，与备用服务并列为电力系统的两大辅助服务。不同的是，备用服务是指电网中电源容量大于负荷需求的部分，保证电力系统在发输配电设备定期检修以及电网发生故障时进行调峰、调频操作，保证对用户的电力供应。

在我国将备用服务与调峰服务分开考虑的运行背景下，备用服务更多的表现为静态的容量特性，调峰服务则表现为动态的调节特性。调峰机组选择的原则为首先选择启停灵活快捷，调节速度快的燃气轮机组、抽水蓄能机组和常规水电机组，然后再选用具有调节能力的燃煤机组和核电机组等。另外，通过需求侧管理机制的引导，将部分柔性负荷列为系统调峰对象，可进一步提高电力系统的调峰能力。不同类型机组的调峰能力如下：

（1）抽水蓄能电厂改发电机状态为电动机状态，调峰能力接近 200%。

（2）水电机组减出力调峰或停机，调峰依最小出力（考虑震动区）接近 100%。

（3）燃油（气）机组减出力，调峰能力在 50%以上。

（4）燃煤机组减出力、启停调峰、少蒸汽运行、滑参数运行，调峰能力分别为 50%（若投油或加装助燃器可增加至 60%）、100%、100%、40%。

1.3.2　调频

电力系统调频是指为保障电力系统频率稳定而对发电机组有功出力进行的调整，实

现发电和用电的能量平衡。电力系统调频主要包括一次调频、二次调频、三次调频。其中一次调频是依靠电力系统运行惯性进行的电力系统频率调节，但只能做到有差调节；二次调频是依靠调频机组进行电力系统频率调节，可做到无差调节；三次调频是指为使负荷分配经济合理，达到运行成本最小的目标，按最优化准则将区域所需的有功功率分配于受控机组的调频方式。

在进行二次调频时，为避免在电网频率调整过程中出现过调或频率长时间不稳定的现象，需要对电网参与二次调频的电厂进行分工和分级调整，即将电网中所有电厂分为主调频厂、辅助调频厂和非调频厂。对于调频厂的选择，一般遵循如下原则：

(1) 调频厂应有足够的调整容量和调整范围，以满足电网最大的负荷增、减变量需要。

(2) 调频机组具有与负荷变化速度相适应的较快调整速度，以适应电网负荷增、减最快的速度需求。

(3) 机组具有实现自动调频的条件。

(4) 调整机组的有功功率时，应符合安全和经济运行的原则。

(5) 某些中枢点的电压波动不得超出允许范围。

(6) 对联合电网，还要考虑由于调频而引起联络线上交换功率的波动是否超过允许范围的问题。

在实际运行时，由于常规机组的发电计划出力根据系统负荷和风电、光伏等新能源发电功率超短期预测结果而定，故在大规模新能源接入条件下，电力系统自动发电控制(automatic generation control，AGC) 调节容量需同时考虑负荷预测和新能源发电功率预测偏差造成的系统功率缺额，即净负荷预测误差导致的功率不平衡量。

自动发电控制是电力系统调度自动化的主要内容之一。它利用调度监控计算机、通道、远方终端、执行（分配）装置、发电机组自动化装置等组成的闭环控制系统，监测电力系统的频率，调整发电机出力。自动发电控制着重解决电力系统在运行中的频率调节和负荷分配，以及与相邻电力系统间按计划进行功率交换等问题，其基本功能有负荷频率控制（load frequency control，LFC)，经济调度控制（economic dispatch control，EDC)，备用容量监视（reserve capacity monitor，RM)，AGC 性能监视（automatic generation control performance monitor，AGC PM)，联络线偏差控制（tie line bias control，TBC）等。

1.3.3 调压

电力系统调压是指为保障电力系统电压稳定而对电力系统无功出力进行调整，实现无功功率平衡。无功电源的安排应有规划，并留有适当裕度，以保证系统中各中枢点电压在正常和事故后均能满足规定的要求，电网无功补偿遵循分层分区，就地平衡原则。

电压调整有逆调压、恒调压和顺调压三种方式，其中逆调压方式指系统在高峰负荷时通过增大中枢点电压的方式防止负荷点电压过低，系统在低谷负荷时通过降低中枢点