新一代
电力系统导论

XINYIDAI
DIANLI XITONG DAOLUN

徐 林 主编

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

新一代
电力系统导论

XINYIDAI
DIANLI XITONG DAOLUN

徐 林 主编

中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

新一代电力系统是我国电力行业落实国家创新驱动发展战略的重要目标，是能源生产与消费革命背景下的重大战略举措。本书是多年来开展相关培训、教学、科研的研究成果之一，结合我国电力行业最新的技术发展态势和科学研究进展，介绍了新一代电力系统的理念和形态，阐述了建设新一代电力系统所需的关键技术，并从多个视角描述了新一代电力系统的形态架构。

本书可供电力科技行业的工作人员、研究人员学习借鉴，也可以作为高等院校和培训机构开展新一代电力系统培训教学的参考书。

图书在版编目（CIP）数据

新一代电力系统导论 / 徐林主编. —北京：中国电力出版社，2019.6
ISBN 978-7-5198-3303-9

Ⅰ. ①新… Ⅱ. ①徐… Ⅲ. ①电力系统 Ⅳ. ①TM7

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 118454 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：刘丽平（010-63412342）
责任校对：黄　蓓　李　楠
装帧设计：左　铭
责任印制：石　雷

印　　刷：三河市百盛印装有限公司
版　　次：2019 年 7 月第一版
印　　次：2019 年 7 月北京第一次印刷
开　　本：787 毫米×1092 毫米　16 开本
印　　张：13.75
字　　数：312 千字
印　　数：0001—1500 册
定　　价：60.00 元

版 权 专 有　侵 权 必 究

本书如有印装质量问题，我社营销中心负责退换

编 写 组

主　　编　徐　林

副 主 编　江全元　李　伟　耿光超

编写人员　顾建明　宋　勤　张　媛　严红滨

张　静　叶丽雅　曹诗侯　完泾平

叶　碧　赵能能　庞　正　李　亚

李　晋　刘文灿　王璐琦　王晓玲

罗　勇　刘华蕾　汤陈芳　五佳培

前 言

实施新一代电力系统研究和建设工作，是深入贯彻党的十九大精神，落实国家创新驱动发展战略，应对能源生产和消费革命的重大战略举措，也是当前和今后一段时期电力行业发展的行动纲领和战略方向。

2018 年，国家电网有限公司科技部组织相关科研单位编制完成《新一代电力系统技术研究框架》，提炼总结了新一代电力系统技术特征、技术发展方向、重点研发任务和科技示范工程，布局了电网互联及大电网安全稳定、高比例新能源友好接入、智能配电及用户互动、电力市场化机制与商业模式、基础性支撑技术 5 个研究方向 20 个技术领域，以及百万千瓦级可再生能源友好并网示范工程等 13 项科技示范工程，明确了今后一段时期新一代电力系统研究和工程示范的重点。

本书依据近年来改变电力系统的关键技术的发展及电网形态演变的规律，分为上、下两篇，上篇主要介绍新一代电力系统的关键技术，包括新型电力关键设备、新型数据获取途径、新型决策范式等；下篇主要阐述新一代电力系统的形态架构，包括新型能源获取、传输、消费模式，新型监管和标准化模式，新型商业模式等。

鉴于以数据驱动智能电网、泛在电力物联网等为代表的电力系统新技术快速发展，以及电力市场化进程地不断加快，对电力工作者的综合素质提出了更高、更新的要求，电力系统内广泛应用高新技术设备，使电力工作者必须紧随新设备、新知识的更新步伐。本书结合新一代电力系统出现的新技术，以新一代电力系统的关键技术和形态结构为核心，展现电力系统发展新趋势。本书可为从事电力系统工作者提供一个新知识学习的平台，促进大家转变发展观念，积极从事电力行业工作以迎接电力事业的新发展。

本书由国网浙江省电力有限公司培训中心联合浙江大学高性能计算实验室完成编写，编写组成员对全书的资料收集、整理等做了大量的工作，在此谨对他们表示衷心的感谢。

限于编者时间和精力，书中不妥之处在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

2019 年 5 月

目 录

前言

第 1 章 新一代电力系统的概述 ····· 1

1.1 面向未来的新一代电力系统 ····· 1
1.2 新一代电力系统关键技术 ····· 2
1.3 新一代电力系统形态架构 ····· 5
1.4 新一代电力系统展望 ····· 7

上 篇 关键技术 ····· 11

第 2 章 新一代电力装备技术 ····· 13

2.1 新型电力电子器件 ····· 13
2.2 可再生能源发电技术 ····· 19
2.3 新型输配电技术 ····· 27
2.4 新型储能装备技术 ····· 32

第 3 章 新一代电力物联网技术 ····· 40

3.1 电力物联网技术 ····· 40
3.2 电力云计算技术 ····· 48
3.3 电力区块链技术 ····· 51
3.4 电力信息安全技术 ····· 58

第 4 章 新一代高性能计算及人工智能技术 ····· 66

4.1 高性能计算技术 ····· 66
4.2 人工智能技术 ····· 73

下 篇 形态架构……79

第 5 章 高渗透率可再生能源发电并网……81

5.1 可再生能源发电的发展评估……81
5.2 可再生能源发电基地并网技术……85
5.3 分布式可再生能源发电并网技术……92
5.4 可再生能源发电的新型商业模式……98

第 6 章 基于源－网－荷协调自愈的韧性输电网……105

6.1 智能变电站……105
6.2 韧性电网态势感知技术……112
6.3 源－网－荷协调自愈技术……117
6.4 柔性交直流输电系统……123

第 7 章 以用户为中心的主动配电网技术……133

7.1 主动配电网……133
7.2 柔性多状态开关技术……139
7.3 直流配电网技术……147
7.4 微电网能量管理与灵活并网技术……156

第 8 章 基于电力物联网的智慧用电技术……166

8.1 云端物联用户采集系统……166
8.2 用电安全、用电管理与能效优化……176
8.3 综合能源服务……179
8.4 智慧用电实践……184

第 9 章 新一代电力调度控制系统……187

9.1 高精度源荷预测……187
9.2 全时空优化调度……190
9.3 全过程控制决策……195
9.4 多模式市场交易……200

缩略语表……206

参考文献……208

第1章

新一代电力系统的概述

1.1 面向未来的新一代电力系统

21 世纪以来，随着我国经济的迅速发展和能源需求的大幅增长，能源发展面临资源和环境的巨大挑战。新形势下，习近平总书记于 2014 年 6 月提出推动能源消费革命、能源供给革命、能源技术革命和全方位加强国际合作的重大战略思想；在党的十九大报告中进一步提出推进能源生产和消费革命，构建清洁低碳、安全高效能源体系，为我国能源发展改革指明了方向。出于环境保护和可持续发展的要求，在世界范围内与能源生产、消费密切相关的温室气体排放也受到高度关注。2016 年 9 月 3 日全国人大常委会批准我国加入《巴黎气候变化协定》，在该协定框架之下，我国提出了有雄心、有力度的国家自主贡献四大目标：① 到 2030 年中国单位 GDP 的二氧化碳排放，同比 2005 年下降 60%～65%；② 到 2030 年非化石能源在一次能源消费中的比重要提升到 20%左右；③ 到 2030 年左右，中国二氧化碳排放达到峰值，并且争取早日达到峰值；④ 增加森林蓄积量和增加碳汇，到 2030 年中国的森林蓄积量要比 2005 年增加 45 亿 m^3。这四大目标既是我国对世界的承诺，也是我国实现能源生产和消费转型的重要依据。其中非化石能源（主要包括水电、风电、太阳能发电等可再生能源以及核能）在一次能源消费中比重是能源转型的核心指标。

基于上述情况，我国能源革命的主要目标是以可再生能源逐步替代化石能源，实现清洁能源在一次能源生产和消费中占更大份额，推动能源转型，建设清洁低碳、安全高效的新一代能源系统。由于电力系统与可再生能源的生产、输送和消费密切相关，在保证能源转型核心指标的实现方面具有关键作用，因此，必须在技术发展和创新的基础上，大力推动电力系统转型，建设作为新一代能源系统核心的新一代电力系统。

电力系统的发展可以分为三代：第一代电力系统的特点是小机组、低电压、小电网，是初级阶段的电网发展模式。第二代电力系统的特点是大机组、超高压、大电网，优势在于大机组、大电网的规模经济性，大范围的资源优化配置能力，以及开展电力市场的潜力；其缺点是高度依赖化石能源，是不可持续的发展模式。第三代电力系统的特点是基于可再生能源和清洁能源、骨干电网与分布式电源结合、主干电网与区域网和微网结合，是可持续的综合能源电力发展模式。

第三代电力系统即新一代电力系统，是百年来第一、二代电力系统的传承和发展。从第一代电力系统到第三代电力系统发展的内在动力是电能供需的变化，对于第三代电力系

统而言，其主要驱动力是电源结构的变化。这种变化是伴随着能源转型发生的，原因在于化石能源的有限资源、环境保护的要求日益严格，以及在信息通信技术高速发展的推动下，对系统运行和用户服务自动化、智能化水平的更高要求。因此，清洁能源的大规模利用和智能化将是新一代电力系统的主要发展方向。近十年来电力系统的发展，特别是风电、光伏发电的快速发展，特高压直流输电的大规模建设，用户端分布式能源多能互补、综合能源和能源互联网的兴起。电力系统中高比例可再生能源，高比例电力电子装备，多能互补综合能源，物理信息深度融合的智能电网和能源互联网，更加开放的电力市场化成为新一代电力系统的主要技术特征。

1.2 新一代电力系统关键技术

1.2.1 新型电力关键技术

随着新能源发电、智能电网、特高压交直流输电的迅速发展，我国电网正成为一个全国范围内互联性逐渐增强的超大规模电网，一些传统的电力设备已经无法满足当前电网快速发展的需求，因此一些新型的电力设备应运而生，如新型电力电子器件、新型发电设备技术、新型输电配电设备技术和新型储能设备等。

1. 新型电力电子器件

由于新能源发电的不断接入，各种电力电子器件广泛使用于电网中，现在的电力电子器件大多为硅器件，然而硅器件的性能已接近其由材料特性决定的理论极限，依靠硅器件继续完善和提高电力电子装置与系统性能的潜力已十分有限。因此，出现了新型的基于宽禁带半导体材料（第三代半导体材料）的电力电子器件。宽禁带电力电子器件具有热导率高、电子饱和速度高、击穿电压高、介电常数低等特点。从目前宽禁带半导体材料和器件的研究情况来看，研究重点多集中于碳化硅和氮化镓技术，其中碳化硅技术最为成熟，研究进展也较快；而氮化镓技术应用广泛，尤其在光电器件应用方面研究比较深入。现有的宽禁带电力电子器件主要包括碳化硅功率二极管、碳化硅功率开关、氮化镓功率二极管、氮化镓功率开关等。

2. 新型发电设备技术

现阶段的新型发电设备还是以风力发电设备和太阳能发电设备为主。风力发电一直保持着世界范围内增长最快能源的地位，风力发电将会迎来一个高速发展的时期，预计到2020 年和 2050 年，中国风电装机容量将分别达到 200GW 和 1000GW；而太阳能发电则延伸到了各个应用领域，小至自动停车计费器的供能、屋顶太阳能板，大至面积广阔的太阳能发电中心，其在发电领域的应用已经遍及全球。截至 2017 年其发电量已达 442 618GWh，占全球发电量的 1.73%。其他可再生能源发电技术也在蓬勃发展中，如生物质能、洋流能、地热能等，但由于某些技术不够完善，仍没有大规模应用到电网中。

3. 新型输电配电技术

电网中应用较多的为柔性交流输电技术、柔性直流输电技术和柔性配电技术。柔性交流输电系统是一种将微机处理技术、电力电子技术、先进控制技术等应用于高压输电系统，

从而获得大量的节能效益，提高系统电能质量、可靠性、运行性能和可控性的新型综合技术；柔性直流输电技术即基于电压源换流器的高压直流输电，它是一种新型的输电技术，其优点有不会出现换相失败、易于构成多端直流系统、可向无源网络供电和换流站间无需通信等；柔性配电技术是柔性交流输电技术在配电网的延伸，主要应用领域有解决电能质量控制问题、解决分布式电源并网问题。应用上述三种技术的主要设备有固态开关、静态无功补偿装置、静止同步补偿器、动态不间断电源、动态电压恢复器、智能通用变压器等。特高压交流输变电技术是指 1000kV 及以上电压等级的大容量、远距离交流输变电技术；特高压直流输电是指±800kV 及以上电压等级的直流输电，可有效减少输电线路回数，极大提高线路走廊利用效率，提高电力输送的效率，降低运行费用；分频输电技术利用电力电子元件门极可关断晶闸管变换频率，可用较低的电压等级输送较远的距离，且有利于可再生能源并网和形成分布式电力系统；超导输电技术可为未来电网提供一种全新的低损耗、大容量、远距离电力传输方式。

4. 新型储能设备技术

储能技术具有爬坡灵活和响应快速的特点，同时具备对功率和能量的时间迁移能力和对有功、无功解耦的控制能力，能够为电力系统提供不同类型辅助服务。因而，将储能装备接入电网有利于增强可再生能源消纳能力和提高电力系统运行稳定性。近年来，储能技术得到快速发展，除了传统的抽水蓄能，以锂电池、铅碳电池、超级电容等为代表的新型储能技术发展成熟，并在电网中得到广泛应用。同时，储能设备的监控和调控技术使得电力系统灵活调控和协调控制等功能更加完备。

1.2.2　新型数据获取途径

随着无线传感技术、物联网技术的快速发展及相互融合，电网发展迎来了新的机遇。2009 年起，国家电网有限公司启动智能电网规划建设，并计划于 2020 年年前初步建成世界上最大的智能电网。近年来，智能电网被列为物联网十大应用领域之一，电力物联网的发展受到了社会各界的关注。2012 年年初，国网电科院物联网技术中心结合物联网定义及电网的应用特点，制定了电力物联网的定义，即在电力生产、输送、消费、管理各环节，广泛部署具有一定感知能力、计算能力和执行能力的各种智能感知设备，采用基于 IP 的标准协议，通过电力信息通信网络，实现信息安全可靠传输、协同处理、统一服务及应用集成，从而实现电网运行及企业管理全过程的全景全息感知、互联互通及无缝整合。在电力物联网中两个重要的技术即为无线传感技术和物联网技术，新型无线传感器网络为电网提供了多种数据获取途径，而物联网等新兴通信方式则使得廉价获取这些数据成为可能。

物联网传感器技术在电力设备监控、设备运行状态监测等方面的应用越来越广泛，传感器对设备运行状态进行实时监控，并为电网公司电力设备的管理、运维提供了极大的数据支撑和便利。本书详细介绍的新型电力传感技术有：基于电磁感应原理的非侵入式传感技术，它可用于测量中低压等级的多芯电缆所流过的电流大小，而传统的电流传感器通常只能测量单根导体通过的电流大小，或者需要破坏电缆实现侵入式测量。新型的非侵入式多芯电缆传感器具有易于安装、不破坏电缆的优点；电子式互感器具有绝缘简单、无磁饱和、动态范围宽、输出数字化、体积小易集成等特点，受到普遍关注，并逐步在工程中试

点应用。经过国家电网有限公司十余年来的不断发展与积累，物联网已具有一定规模。鉴于此，国家电网有限公司于2019年两会期间，围绕“三型两网、世界一流”的建设目标，部署加快电力物联网的建设，计划通过三年到2021年初步建成电力物联网；再通过三年全面应用，全面建成物联网。

物联网无线通信技术将传感器相互连接，形成整体网络，实现信息互联，同时将数据传输到云端服务中。相关章节详细介绍了各种无线通信技术，从传输距离上区分，可以分为两类：一类是短距离通信技术，也称局域自组网通信，典型的应用场景（如智能家居），代表技术有ZigBee、蓝牙等；另一类是广域网通信技术，业界一般定义为低功耗广域网，典型的应用场景（如智能抄表），常用的包括LoRa、NB－IoT等。

随着可再生能源等分布式发电资源数量不断增加以及电气设备自动化程度不断提高，电气设备与控制中心之间、电网企业与电力用户之间会产生大量的数据流，这使数据的采集和分析面临着巨大的考验，云计算集中式处理的方式已无法满足此类大规模、高频次的数据处理；而边缘计算技术能够很好地解决这一问题，在边缘计算当中，数据不需要被传送到云端，直接在边缘侧进行处理，数据处理的实时性和安全性远优于云计算。将边缘计算应用在供需领域中，可以有效地提高数据的存储和处理效率，减少传输数据所占用的带宽，使电力需求响应更加有效和快速地进行。相关章节详细介绍了边缘计算中的一些关键问题（如异构数据融合问题），简述了一些电力物联网边缘计算的应用实例。

电力物联网边缘计算体系中，各种支撑边缘计算的设备（如监控终端、边缘计算节点、物联网网关等）也至关重要。传感监控终端在提高整个电网的智能高效的管理中起着重要的作用，使突发的紧急事故得到及时有效的处理。电力系统中的边缘计算节点主要为智能台区，智能台区对配电变压器（含公用变压器、专用变压器）信息进行采集、控制、处理和实时监控，具有本地化信息监测、集中抄表、电能质量监控、漏电保护监测管理、低压线损分析、台区异常进行报警和台区信息互动等功能。而物联网网关则是将监控终端、边缘计算节点传输的数据进行中转整合的重要设备，可以实现感知网络与通信网络之间以及不同类型感知网络之间的协议转换，既可以实现广域互联，又可以实现局域互联。

1.2.3 新型智能决策模式

人工智能技术从发展之初就一直受到电力领域学者的高度关注，专家系统、人工神经网络、模糊理论以及启发式搜索等传统人工智能方法在电力系统中早已广泛应用。随着分布式电源、电动汽车、分布式储能元件等具有能源生产、存储、消费多种特性的新型能源终端高比例接入电网，现代电力系统呈现出复杂非线性、不确定性、时空差异性等特点。以高级机器学习理论、大数据、云计算为主要代表的新一代高性能计算及人工智能技术，具有应对高维、时变、非线性问题的强优化处理能力和强大学习能力，将为突破上述技术瓶颈提供有效解决途径。

电网智能化的实现需要对各环节产生的实时、准实时数据进行集中管理、分析、挖掘、反馈，需要支持大规模数据访问和高效数据处理的信息技术支撑，通过引入云计算技术，实现智能电网的云计算平台是解决该问题的核心。其中，电力调度云平台是电力云计算中建设的重点，相关章节详细介绍了调度云平台的架构和技术；电力区块链技术可实现电动

汽车充电桩的运营商统一交易平台等，给能源互联网引入新的商业模式，可通过大力推动光伏电站众筹、资产证券化等模式实施。

本书还详细介绍了人工智能（AI）技术的发展、特点、架构等，人工智能在电力系统调度中已实现初步应用，基于 AI 的电网调度决策将成为新一代电力系统安全运行的保障，借助 AI 调度员对配网报警信息的瞬间判断、瞬时处理能力，大幅减少了调度员的信息判定时间。在 AI 的配合下，配网故障倒闸等复杂业务平均耗时将大幅降低，工作效能的极大释放让电力员工从枯燥的重复劳动中解放出来。此外，电网安全运行通过与人工智能决策技术的结合，在应用层面，进一步提升电力系统深度智能感知技术；在技术层面，形成“云端训练、边缘推断”的新型人工智能应用架构；在研究层面，能够通过电网海量数据的积累、分析、学习，逐步建成能实现自主发现知识、规律、自主控制的智慧能源系统。

1.3　新一代电力系统形态架构

1.3.1　新型能源结构

目前，传统的发输配用模式已无法适应新一代电力系统的发展需求，因此各种新型能源获取、传输、消费模式不断提出，逐渐运用到电力系统的各个环节中。本书分别从高渗透率可再生能源发电并网、以柔性输电系统为核心的韧性电网、以用户为中心的主动配电网技术、基于电力物联网的智慧用电技术等方面进行了阐述。

可再生能源发电并网技术包括可再生能源发电基地并网技术和分布式可再生能源发电系统并网技术。可再生能源发电基地并网技术从统筹规划的角度出发，同时考虑新能源发电基地接入系统规划与新能源发电并网区域网架规划，研究两者协调规划的有效方法，以寻求两者整体经济效益最优的规划方案，从而提高规划工作的统筹性和全局观；分布式可再生能源发电系统并网技术不需要现存的基础设施，而且与大型的中央电站及发电设施相比总投资较少，因此在电力竞争性市场建立后分布式发电的作用将会日益明显和突出，从而可与现有电力系统结合形成一个高效、灵活的电力系统，提高整个社会的能源利用率，提高整个供电系统的稳定性、可靠性和电力质量。

对于以柔性输电系统为核心的韧性电网，本书分析了基于高压直流输电系统（HVDC）的稳定控制、基于柔性交流输电系统（FACTS）的稳定控制和多 HVDC 与 FACTS 协同的稳定控制。韧性是衡量系统在出现严重扰动或故障情况下，是否可以改变自身状态以减少故障过程系统损失，并在故障结束后尽快恢复到原有正常状态的能力。从广义上讲，在电力系统韧性的定义中，电网所遭受的冲击可能包括极端自然灾害、系统严重故障、人为破坏与恐怖袭击，甚至误操作等发生概率较小而影响很大的事件。

以用户为中心的主动配电网技术主要解决当前配电网建设滞后、结构不合理、调控手段有限，造成的馈线负荷不均衡、供电恢复时间长等问题。柔性多状态开关采用电力电子新技术，与常规开关相比，不但具备通闭和断开两种状态，而且增加了功率连续可控状态，兼具运行模式柔性切换、控制方式灵活多样等特点，可避免常规开关倒闸操作引起的供电中断、合环冲击等问题，为未来智能配电网的实施提供关键技术与设备支撑。直流配电网

技术和主动配电网综合控制分布式能源的配电网，使用灵活的网络技术实现潮流的有效管理，分布式能源在其合理的监管环境和接入准则基础上承担系统一定的支撑作用。

基于电力物联网的智慧用电技术在云端进行物联用户数据采集，使用数据仓库技术进行数据存储，在云端进行数据挖掘并分析出用户画像，采用智能配电台区进行变压器基本监测、电能质量监测控制、用户用电信息监测等。进一步实现用电安全监控、智能用电管理、用户侧能效优化，最后实现综合能源服务，使用的合理性和科学性及系统的集成性，提高能源使用的协同性及能源效率。

1.3.2 新型市场体系

电力市场是指整体电力在供应、需求、售卖和购买的影响下，对电力价格产生改变的一个机制。从经济学的角度来看，电是可供购买、销售并进行交易的商品。电力市场是一个能够出价购买、开价销售的系统，通常以财务或凭证交换的方式进行采购与短期交易，依循供需法则决定价格。长期交易合约则类似购电合约，普遍被认为是私人间的双边交易。电力市场包括广义和狭义两种含义。广义的电力市场是指电力生产、传输、使用和销售关系的总和。狭义的电力市场指竞争性的电力市场，是电能生产者和使用者通过协商、竞价等方式就电能及其相关产品进行交易，通过市场竞争确定价格和数量的机制。

2015 年 3 月，国务院正式下发了《关于进一步深化电力体制改革的若干意见》（中发〔2015〕9 号），这宣告着中国开始了新一轮电力体制改革。9 号文提出了电价机制改革和售电侧放开，而售电侧改革在中国是一个放大和复杂的命题，涉及多方的利益。此后，中共中央、国务院、发展和改革委、国家能源局等部门陆续发布了新电改相关政策和配套文件，稳步推进新一轮电力体制改革。中国电力市场售电侧改革只对 35kV 以上的工商业用户放开，而随着售电侧市场的日益完善，居民用户在日后必将成为电力零售商在售电侧市场服务的对象。

能源体系包含多种电力市场交易模式，英国、北欧、德国等欧洲国家普遍采用分散式电力现货市场模式，美国、澳大利亚和新西兰主要采用集中式电力现货市场模式。此外，在大用户直购电交易中，大用户与发电商之间通过签订长期合同约定未来交易的电量及价格，称为点对点双边/多边交易。调峰调频、无功调节等服务也可形成辅助服务市场，以维持电力系统的安全稳定运行或恢复系统安全，满足电能供应，以及电压、频率质量等要求。

1.3.3 新型调控模式

随着特高压交直流线路的大量投运、新能源大量接入电力系统以及电力市场化改革推进，电网特性发生深刻变化，对电网调度控制技术的支撑能力提出了新的要求。以风能和太阳能为主的可再生能源在供应侧电源结构中的比例持续增长，具有时空分布双重不确定性的新型负荷不断增加，电力系统供需双侧呈现出的随机性特征将更加明显，势必给电力系统的安全稳定和经济运行带来新的挑战。新一代电力调度系统应具备“源荷高精度预测、全时空优化调度、全过程控制决策”的特点，全面支撑大电网安全运行、清洁能源消纳和电力市场化运作。

新型调控模式通过多时间尺度概率预测技术提高源荷功率预测精度，充分发挥风光水火全时空互补特性，全面感知分布式电源、储能、电动汽车等可调节负荷的时空特性、响应特性，构建全周期滚动、跨区域统筹、源网荷协调的电力电量平衡体系，挖掘系统整体调节能力，实现全时空优化调度。同时需构建安全可靠的电力系统综合调控防御体系主要包括电力系统扰动前的预防控制、电力系统扰动后的紧急控制和系统崩溃后的恢复控制。

1.4　新一代电力系统展望

随着再电气化进程加快推进，新能源高比例接入、新型用能设备广泛应用，“大云物移智”与电网深度融合，传统电网的物理特性、运行模式、市场形态发生了根本改变。

中国是迅速崛起的能源消费大国，按照目前的能源消费模式和能源供应能力，难以支撑经济社会可持续发展。有关机构的研究报告认为，现在到 20 世纪中叶将是中国实现现代化的关键时期，也是中国能源发展的重要过渡期和转型期。中国要从现在比较低效、粗放、污染的能源体系，逐步转变为洁净、高效、节约、多元、安全的现代化能源体系。2008 年，国家电网有限公司提出打造广泛互联、智能互动、灵活柔性、安全可控、开放共享的新一代电力系统。

（1）广泛互联。新一代电力系统规模大、接入主体多，电网成为资源大范围优化配置平台。基于我国能源资源禀赋和负荷特性，建设新一代电力系统，支撑西部、北部大型能源基地开发和远距离输送，支撑东中部地区核电和海上风电并网，支撑分布式电源、微电网、储能、电动汽车等接入，充分利用可再生能源、柔性负荷的时空互补性，在全网实现发供用多能互补、时空互济、友好包容。继续加强电网互联互通，实现陆上和远海高比例新能源多能互补、时空互济、高效输送和全网消纳；通过泛在电力物联网实现所有设备的实时在线连接，实现能源生产和消费全业务云上运行、全时空通信覆盖、全方位数据应用；构建以电为中心，冷－热－电－气储多能融合的综合能源互联网，实现电力网与燃气网、热力网、交通网的柔性互联和联合调控，综合能源效率超过 85%。

（2）智能互动。新一代电力系统具备高度智慧化和交互性，电力生产消费与互联网深度融合广泛应用“大云物移”和人工智能技术，提高发、输、变、配、用和调度全环节智能感知能力、实时监测能力和智能决策水平。引导用户优化用能特性，主动响应系统调节需求，提高用户侧深度参与调节的能力。关注智能开放的新能源预测技术、灵活安全的控制消纳技术，推动能源转型，促进清洁能源大规模开发利用研究。电网与互联网实现深度融合，具备高度智慧化和交互性，人工智能技术在各领域实现广泛应用，支撑电网新业态发展；50%居民用户、80%工商用户参与供需互动，形成占年度最大用电负荷 5%的需求侧机动调峰能力；新型车联网互动系统满足 8000 万辆电动汽车充放电管理需求，削减峰值充电负荷 30%以上。

（3）灵活柔性。新一代电力系统具有强大的适应性和抗干扰能力，新能源消纳水平显著提升。突破大功率电力电子器件制备技术，广泛应用储能、新能源虚拟一次调节、柔性输电等新技术、新装备，显著提高系统的灵活性和适应性。通过源网荷互动运行控制，实现源随荷动、荷随网动，显著增强电网运行的弹性。关注灵活、安全的智能配电与用户互

动技术，支撑配电网安全可靠与用户广泛参与研究。全面实现新能源友好接入和对电网的主动智能支撑；基于碳化硅器件的新一代电力电子装置广泛应用，全面实现电网潮流灵活控制、电力品质柔性定制；输电/输送燃料一体化超导能源管道实现小规模商业运行；各级电网广泛采用储能技术，大容量新型储能成为系统灵活调节资源重要组成部分，电动汽车形成 20 亿～30 亿 kWh 储能资源，支撑高比例可再生能源并网高效综合利用。

（4）安全可控。新一代电力系统应具有高度稳定性和可靠性，电网安全可控、能控。以建设本质安全电网为核心，提升电网内在的预防和抵御事故风险的能力。遵循大电网运行规律和安全机理，科学规划建设合理的网架结构，加强送受端电网建设，实现交流与直流、各电压等级协调发展，提升电网效率效益和供电可靠性。显著提升信息安全监测、安全态势感知和主动防御能力。加强对新一代电力系统市场化机制与商业模式，支撑电力系统互联互动和开放共享，提高资源配置与服务能力研究。交流与直流、各电压等级电网协调发展，大电网实现自动调度，实现控制保护三道防线统一模拟运行和主动协同防御，配电网自愈控制实现全覆盖，电网效率效益和供电可靠性双提升；攻克工业级 CPU 核心技术，实现电力物联网生态系统的全面自主可控；构建主动免疫的网络空间安全防护体系，具备抵御网络战争攻击能力；建成覆盖国家电网有限公司范围的“天－地－网”电力气象监测网络，电网气象灾害实现预报全覆盖。

（5）开放共享。新一代电力系统应具有高度开放性和共享性，电网成为综合能源服务平台。为各类发电企业提供实时的电网运行信息和负荷预测信息，为用电客户提供及时、透明的电网运行和实时电价等供电服务信息，推动电力市场建设。成为综合能源服务平台，促进电力、燃气、热力、储能等资源互联互通，实现多种能源综合效率的优化和提升，推动新业态、新产业的发展。成为电能替代的支撑平台，推广以电代煤、以电代油等用能方式。重点部署信息通信、人工智能、新材料、储能、电力气象等基础与先导研究，构建适应新一代电力系统的基础支撑技术创新体系。各类主体在电力市场中广泛参与、充分竞争，形成统一开放、竞争有序的能源市场体制机制和运营技术支撑体系；建成支持百万用户的能源区块链，促进碳资产、能效等衍生品交易；各类用户可以生产能源、分享能源、控制能源、定制能源。

针对新一代电力系统的发展目标，以下 6 个方面技术的发展将会对未来电力系统的形态、运行调度和市场交易模式产生重大影响。当然，这些技术的发展和应用与市场需求密不可分，必须考虑经济性，只有具备充分市场竞争力的技术和装备才能得到广泛应用和发展。

（1）电网互联及大电网安全稳定。构建未来电力系统认知技术体系和未来电力系统稳态控制技术体系。研究智能调度自动化平台及网络安全关键技术：电力电子化电力系统宽频广域同步测量、调控云及大数据平台关键技术，开放智能型调控支撑关键技术，基于大数据的负荷、新能源特性分析技术，柔性负荷参与电网交易与调控技术。研究针对输变电装备的新技术：新型拓扑广义直流电网成套设计技术，基于深度自主学习的输变电工程设计技术，基于物理信息融合的智能变电站设计技术，特高压交直流互联大电网建设线路工程智慧工地系统、高压大容量电力电子系统的电磁兼容技术。对于电网未来形态的研究与规划：局域能源互联网/微网协同规划技术，支撑再电气化变革的交直流混联输电系统规

划技术。

（2）高比例新能源友好接入与多能互补。研制分布式新能源资源监测装置、资源观测网络优化选址软件，优化资源观测网络布局；建立基于大数据挖掘的新能源数据分析及功率预测平台，实现全国范围新能源中长期/短期/超短期一体化功率预测，日前、日内预测精度分别在 95%、97%以上；建立新能源发电主动支撑技术的标准、实证及测试平台，研发多种类型能源的互补优化调度系统、跨区域送受端源荷灵活协同控制系统、分布式光伏云调度控制系统及终端，有效提高新能源消纳水平。

（3）智能配电技术。开发能源互联配电系统柔性自愈系统及配套装置，掌握交直流混合灵活配电关键装备及组网运行、多能互补综合能源优化技术，建成配电系统数模混合仿真系统、配电业务系统安全管控平台、分布式发电运营互动服务与运行管理平台，实现多电压等级灵活配电技术的工程应用，核心区域供电可靠率达到 99.999 9%；建成数百个新型城镇微电网、若干多层级协同自治微电网（群），新型城镇微网电 – 气 – 热能量转换效率不低于 85%。

（4）智能量测技术。建成电力能源计量大数据服务平台，研制新一代用电信息采集系统和智能电能表，构建新一代量值溯源体系、计量设备全过程管理的质量评价与基础设施体系；构建公司反窃电稽查监控平台，研制反窃电智能监测装置，实现窃电行为精准定位和主动预警；突破直流电流传感技术，制定 GB/T 26217《高压直流输电系统直流电压测量装置》，研发国际首套±1100kV 特高压直流电能计量装置；研发精度 0.5%的新型隧道磁阻电流传感芯片，实现规模化交流、直流电测量应用。

（5）电力市场化机制与商业模式。形成支撑能源绿色低碳转型的分阶段电力现货市场建设方案，掌握电能现货市场和辅助服务市场竞价出清模型和方法，提出电力现货市场运营分析与监测方法，建立支持多品种交易、多时序市场协调运作的电力现货市场交易平台；提出促进能源绿色低碳转型的电力市场模式和实施路径，形成市场模拟分析与监测评估的模型工具，建立能源电力价格决策支撑平台。建立适应公司建设能源互联网企业的组织变革与集团管控方法，建立电网企业“平台＋生态”业务与组织目标模式，提出数字化电网企业建设模式与路径，建立世界一流企业对标体系，建立能源互联网商业生态分析预测模型，提出电网企业基于能源大数据的增值服务创新模式，在电动汽车、储能、综合能源服务发展中的商业模式创新，支撑公司加快建设世界一流企业，提升公司在能源电力转型发展中商业生态预测与商业模式创新的能力。

（6）新一代人工智能技术。以无处不在的传感器和先进 ICT 技术为基础，以物联网、大数据、云计算、深度学习、区块链等为核心，人工智能技术正在迅速发展。具有应用于电力系统设备管理、系统控制、能量管理和交易等领域的潜力，可能会颠覆传统方式，开启一种全新的自动、自主新模式，有助于新一代电力系统的安全、经济和可靠性的提高。例如，未来分布式光伏、电能替代出力不确定性和电动汽车的时空不确定性将引入更多变量，传统分析方法在系统调度、交易方式、能量管理等方面将面临诸多挑战，人工智能将是解决这一类问题的有力措施。

新一代电力系统的发展将会是一个长期过程，因此除了上述技术外，还可能在此期间出现新的、具有重大意义的技术方向。这就要求在构建新一代电力系统时必须充分考虑潜

在的技术创新领域，保持对新技术的接纳能力并适时调整系统的相关环节。

迎接新一代电网的挑战需要理论突破和真正意义的技术创新，当前电力系统研究和实践为此提供了前所未有的条件和机遇。超前部署面向21世纪第三代电网的前瞻技术（大容量储能技术、新型电力电子材料和器件、新一代储能技术、电力物联网技术、高性能计算和人工智能技术、量子计算技术、主动配电网技术、高渗透率间歇式能源电力接入电网的系统运行、分布式电源与微网广泛应用等）的研究。紧紧围绕电力系统新时代战略目标，准确把握世界能源技术演进趋势，持续深化基础前瞻性技术研究，切实增强自主创新能力，重点推进核心领域关键技术攻关和装备研制，梯次开展重大工程示范，加快推进能源生产和消费“再电气化”进程，推动传统电力系统向“广泛互联、智能互动、灵活柔性、安全可控、开放共享”的新一代电力系统演进，实现源网荷储协调发展和友好互动，支撑清洁能源大规模开发利用，能源利用新模式、新业态、新产品日益丰富，用能效率进一步提升，增强电力发展给广大人民群众带来的幸福感、获得感和满足感。