



安全经济运行 实用技术

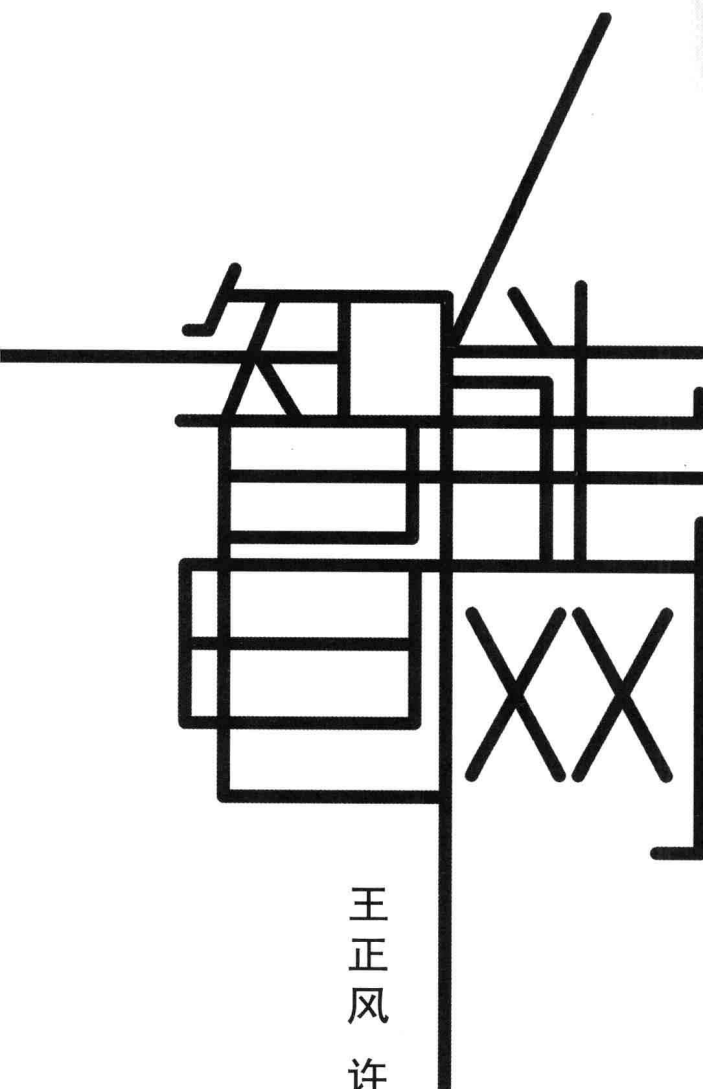
ZHINENG DIANWANG

ANQUAN JINGJI YUNXING SHIYONG JISHU

王正风
许勇
鲍伟
编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn



安全经济运行 实用技术

王正风
许勇
鲍伟
编著



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

内 容 提 要

本书主要介绍智能电网运行方面的新技术。全书共分为十章加以阐述。分别为智能电网简介、电网实时动态监测技术、电网动态监测预警与辅助决策技术、电网运行方式在线分析技术、短路电流控制技术、电力系统元件在线参数辨识技术、智能电网有功功率优化与经济运行、智能电网无功功率优化与经济运行、基于广域网的输电线路故障测距技术和智能变电站。

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,也可以供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。

图书在版编目(CIP)数据

智能电网安全经济运行实用技术 / 王正风, 许勇,
鲍伟编著. — 北京: 中国水利水电出版社, 2011.8
ISBN 978-7-5084-8922-3

I. ①智… II. ①王… ②许… ③鲍… III. ①智能控制—电力系统运行 IV. ①TM76

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第168460号

书 名	智能电网安全经济运行实用技术
作 者	王正风 许勇 鲍伟 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 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	北京纪元彩艺印刷有限公司
规 格	184mm×260mm 16开本 19.75印张 468千字
版 次	2011年8月第1版 2011年8月第1次印刷
印 数	0001—3000册
定 价	68.00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



前言

进入 21 世纪以来,节约能源、降低损耗和低碳排放,建立可持续发展的机制是当今世界各国发展面临的重要问题和关注的重要焦点,欧美发达国家相继开展了智能电网建设。智能电网建设将是电力工业的一场巨大变革,将引起电力工业在各个领域的革新。面对新形式,国家电网公司明确提出了以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强电网为基础,利用先进的通信、信息和控制等技术,构建以信息化、自动化、数字化、互动化为特征的国际领先、自主创新、中国特色的坚强智能电网的目标。安徽省电力公司紧密围绕国家电网公司智能电网建设目标和“一强三优”现代公司的建设目标,在智能电网生产运行方面积极开展新技术的研究与应用。

本书是在借鉴国内外智能电网建设的基础上,着重介绍了国内以及安徽省电力公司智能电网生产运行方面的新技术及应用。本书以电网生产运行的安全性和经济性的相关新技术为线索,系统地介绍了智能电网、电网实时动态监测技术及应用、电网动态监测预警与辅助决策技术及应用、电网运行方式在线分析技术及应用、短路电流控制技术、电力系统元件在线参数辨识技术及应用、智能电网有功功率优化与经济运行、智能电网无功功率优化与经济运行、基于广域网的输电线路故障测距技术及应用和智能变电站。

本书是针对智能电网生产运行技术及应用工程实际情况进行编写,在介绍过程中,努力将理论与电力实际生产相结合,试图友好连接“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”,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际的理论基础,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,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,也可供电力工程专业教师参考。

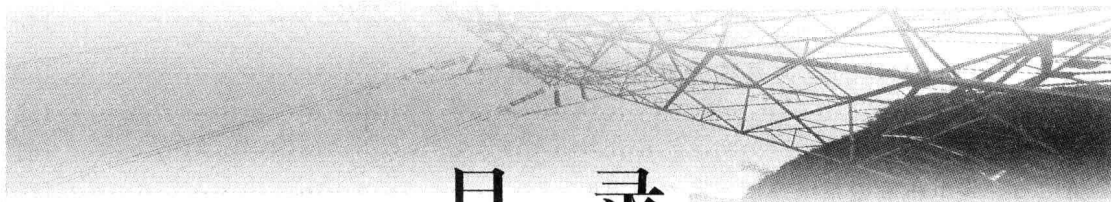
本书在编写过程中,借鉴了国内外智能电网运行领域相关人员的研究成

果以及安徽电力调度通信中心的部分科技成果，在此表示衷心的感谢。中国电力科学研究院许勇高级工程师编写了本书第九章，并主要参与编写了第二章和第十章，华东电力科学研究院鲍伟高级工程师编写了本书第五章，安徽电力调度通信中心黄少雄工程师、陈伟工程师也参加了本书的编写工作和校正工作，其他部分由王正风编写并统稿。国家电力公司技术专家李端超高级工程师、谢大为工程师为本书提供了无私的支持和协助，在此表示感谢！

由于作者水平有限，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。

作者

2011年2月



目 录

前言

第一章 智能电网	1
第一节 智能电网简介	1
第二节 智能电网运行技术	13
第二章 电网实时动态监测技术	19
第一节 电网实时动态监测技术	19
第二节 PMU 子站	24
第三节 WAMS 主站系统	40
第四节 动态数据库的使用	44
第五节 电网实时动态监测技术在电力系统动态监测中的应用	51
第六节 电网实时动态监测系统的通信规约	62
第三章 电网动态安全监测预警与辅助决策技术	68
第一节 前言	68
第二节 电力系统静态稳定在线分析及控制	69
第三节 电力系统在线暂态功角稳定及控制	73
第四节 电力系统暂态电压安全在线计算分析及控制	86
第五节 暂态稳定控制的协调统一	89
第六节 电力系统低频振荡在线分析	92
第七节 WAMS 在线计算分析对电网输送能力提高的研究	100
第四章 电网运行方式在线分析技术	103
第一节 概述	103
第二节 电网运行方式在线分析	105
第三节 电网运行方式在线分析技术支持系统结构	108
第四节 电网运行方式在线分析技术支持系统功能及其应用	110
第五节 基于 WAMS 系统的电网运行方式安排	127
第六节 电网供电能力评估	128
第七节 送端电网规划	132
第五章 短路电流控制技术	137
第一节 概述	137

第二节	短路电流常见控制措施	138
第三节	故障电流限制器	145
第六章	基于 PMU 的电力系统元件在线参数辨识	159
第一节	概述	159
第二节	发电机参数辨识	161
第三节	发电机励磁系统及调速器参数辨识	170
第四节	负荷建模及参数辨识	181
第五节	输电线路参数测量及辨识	187
第七章	智能电网有功功率优化与经济运行	190
第一节	电力系统经济运行	190
第二节	有功功率与电力系统经济运行	190
第三节	电力系统中有功功率的最优分布	202
第四节	电网网损在线计算与辅助分析	206
第五节	AGC 的经济调控	211
第八章	智能电网无功功率经济运行与优化	217
第一节	无功功率与电力系统经济运行	217
第二节	电力系统中无功功率的最优分布	218
第三节	开式网无功负荷的最优补偿容量及约束补偿容量	222
第四节	电力系统无功功率优化——闭式网	229
第五节	无功电压的自动控制	231
第六节	电力系统经济运行理论的统一	243
第七节	电网经济运行评估	245
第九章	基于广域网的输电线路故障测距技术	247
第一节	概述	247
第二节	行波测距法原理	248
第三节	基于广域网的输电线路故障测距系统	252
第四节	基于广域网的行波测距系统的主要功能及性能	258
第十章	智能变电站	262
第一节	概述	262
第二节	智能变电站简介	264
第三节	智能变电站技术特点	268
第四节	常规变电站智能化改造	280
第五节	智能变电站的优点	292
第六节	智能变电站发展中的问题探讨	293
附录一	发电机 7 阶模型与 5 阶模型	295
附录二	异步电动机 5 阶模型与 3 阶模型	299
参考文献		302

第一章 智能电网

第一节 智能电网简介

一、智能电网

(一) 智能电网

进入 21 世纪以来,节约能源、降低损耗和低碳排放,建立可持续发展的机制是当今世界各国发展面临的重要问题和关注的重要焦点。以可再生能源和绿色能源逐步替代化石能源和煤炭能源,建造新的能源使用体系,同时以信息技术改造现有的能源利用体系,采用先进的控制技术提高电网的能源效率是智能电网理念产生的源泉。目前国内外对智能电网还没有一个明确的概念,世界各国对智能电网的理解也不一样。以下是一些国家、企业及专家对智能电网的理解和看法。

美国电科院 EPRI 在 2000 年前后提出了 Intelligrid 的电网发展的概念,该英文术语译成中文的“智能电网”,而美国能源部 DOE 当时称为 Grid-Wise,叫法有些不同,但含义和目的等大同小异。美国的智能电网侧重的是电力网络基础架构的升级更新,同时最大限度地利用信息技术,实现系统智能对人工的替代。

欧洲则采用 Smart Grid 的称呼,在我国也译成“智能电网”,欧洲在 2006 年推出了研究报告,全面阐述了智能电网的发展理念和思路。欧洲则重点关注可再生能源和分布式能源的发展,并带动整个行业发展模式的转变。目前智能电网(Smart Grid)这个称谓已被全世界普遍采用。

IEEE 认为智能电网具有 6 个主要功能:遭受扰动和故障时能够自愈;激励用户主动参与;确保遭受自然和计算机攻击能够迅速恢复;为数字经济提供要求的电能质量;能够满足各种发电和储能需要;能够优化物资利用。

PJM 认为智能电网是通过提高整个电力供应体系的自动化水平来提高电网的可靠性及效率,对于从发电厂到最终用户的每一个接入者,电网结构将是开放式的,满足即插即用的技术标准。简而言之,智能电网就是要实现在适当的时间,把适当的信息交给适当的人。此外,PJM 认为广域测量技术是保证大电网安全的重要手段,也是实现智能电网的基础。

IBM 中国公司高级电力专家 Martin Hauske 对智能电网的解释包含有 3 个层面的含义:首先是利用传感器对发电、输电、配电、供电等关键设备的运行状况进行实时监控;然后把获得的数据通过网络系统进行收集、整合;最后通过对数据的分析、挖掘,达到对整个电力系统运行的优化管理。

西门子(SIEMENS)公司认为智能电网需要涵盖发电、输电、配电、调度、变电、



用电等各个环节，是一个完整的体系，其特性包括：①柔性的，满足用户需要；②易接入的，保证所有用户的连接畅通，尤其对于可再生能源和高效、零或低二氧化碳排放的本地发电；③可靠的，保障和提高供电的安全性和质量；④经济的，通过改革及竞争调节实现最有效的能源管理。

埃森哲（Accenture）公司认为智能电网是利用传感、嵌入式处理、数字化通信和 IT 技术，将电网信息集成到电力公司的流程和系统，使电网可观测（能够监测电网所有元件的状态）、可控制（能够控制电网所有元件的状态）和自动化（可自适应并实现自愈），从而打造更加清洁、高效、安全、可靠的电力系统。

天津大学余贻鑫院士对智能电网的定义是：智能电网是一个完全自动化的供电网络，其中的每一个用户和节点都得到实时监控，并保证从发电厂到用户端电器之间的每一点上的电流和信息的双向流动。智能电网通过广泛应用的分布式智能和宽带通信，以及自动控制系统的集成，能保证市场交易的实时进行和电网上各成员之间的无缝连接及实时互动。

中国能源专家武建东提出了互动电网的概念，将智能电网的含义涵盖其中。并将互动电网定义为：在开放和互联的信息模式基础上，通过加载系统数字设备和升级电网网络管理系统，实现发电、输电、供电、用电、客户售电、电网分级调度、综合服务等电力产业全流程的智能化、信息化、分级化互动管理，是集合了产业革命、技术革命和管理革命的综合性的效率变革。它将再造电网的信息回路，构建用户新型的反馈方式，推动电网整体转型为节能基础设施，提高能源效率，降低客户成本，减少温室气体排放，创造电网价值的最大化。

虽然世界各国以及相关国际知名的企业都从各自的特点出发，分别对智能电网进行了定义，但都存在着自身的“局限性”。概括起来，智能电网可这样描述，即以一个数字化信息网络系统将绿色能源和新能源开发、输送、存储、转换（发电）、输电、配电、供电、售电、服务以及蓄能与能源终端用户的各种电气设备和其他用能设施连接在一起，通过智能化控制实现电网的安全稳定运行、提供高效优质清洁的电力供应。

（二）智能电网目标

建设智能电网，主要实现以下目标：

（1）实现电网运行的可靠。智能电网必须更加可靠，即除非遇到特别大的灾难，否则智能电网应不管用户在何时何地，都能提供可靠的电力供应。它应能对电网可能出现的问题提出充分的告警，并能忍受大多数的电网扰动而不会断电。它在用户受到断电影响之前就能采取有效的校正措施，以使电网用户免受供电中断的影响。

（2）实现电网运行的安全。智能电网能够经受物理的和网络的攻击而不会出现大面积停电或者不会付出高昂的恢复费用，智能电网更不容易受到自然灾害的影响。

（3）实现电网经济运行。智能电网运行在供求平衡的基本规律之下，价格公平且供应充足。智能电网必须更加高效的利用投资，控制成本，减少电力输送和分配的损耗，电力生产和资产利用更加高效。通过控制潮流的方法，提高电网运行经济性并减少输送功率拥堵。智能电网应激励低成本的电源包括可再生能源的接入。

（4）环境友好。智能电网通过在发电、输电、配电、储能和消费过程中的创新来减少对环境的影响。智能电网应进一步扩大可再生能源的接入；在可能的情况下，智能电网的



资产将占用更少的土地，减少对环境的影响。

国家电网公司在对我国能源资源格局、负荷分布特点以及未来电网新技术发展趋势等开展了大量研究分析的基础上，结合世界电网发展新趋势以及我国电网发展改革的实际，提出了规划建设以特高压电网为骨干网架、各级电网协调发展的坚强电网为基础，利用先进的通信、信息和控制技术，构建以信息化、自动化、数字化、互动化为特征的国际领先、自主创新、中国特色的坚强智能电网的战略发展目标。

（三）智能电网主要功能

一般来说，智能电网具有以下功能特点：

（1）自愈—稳定可靠。自愈是实现电网安全稳定运行及可靠供电的主要功能，它指的是无需或仅需少量人为干预，实现电力网络中存在问题元器件的隔离或使其恢复正常运行，最小化或避免用户的供电中断。通过实时的评估自测，智能电网可以检测、分析、响应甚至恢复电力元件或局部网络的异常运行。从本质上讲，自愈就是智能电网的“免疫系统”，这是智能电网最重要的特征。高速双向通信系统的建成和先进的信息技术是智能电网连续不断地自我监测和校正，实现其最重要的特征——自愈特征的基础。智能电网进行连续不断的在线自我评估以预测电网可能出现的问题，发现已经存在的或正在发展的问题，并立即采取措施加以控制或纠正。智能电网经常应用连接多个电源的网络设计方式，当出现故障或发生其他问题时，在电网设备中的先进的传感器确定故障并和附近的设备进行通信，以切除故障元件或将用户迅速地切换到另外的可靠的电源上，同时传感器还有检测故障前兆的能力，在故障实际发生前，将设备状况告知系统，系统就会及时地提出预警信息。

（2）安全—抵御攻击。它指的是无论是电力系统的物理系统还是计算机遭到外部攻击，智能电网能保证人身、设备和电网的安全。智能电网将展示被攻击后快速恢复的能力，智能电网的设计和运行都将阻止攻击，最大限度地降低其后果和快速恢复供电服务。智能电网也能同时承受对电力系统的几个部分的攻击和在一段时间内多重协调的攻击。智能电网的安全策略将包含威慑、预防、检测、反应，以尽量减少和减轻对电网和经济发展的影响。不管是物理攻击还是网络攻击，智能电网要通过加强电力企业与政府之间重大威胁信息的密切沟通，在电网规划中强调安全风险，加强网络安全等手段，提高智能电网抵御风险的能力。

（3）兼容—发电资源。适应各种电源的接入，包括各种大电源的集中接入、分布式发电方式的接入以及可再生能源的大规模接入，满足电力与自然环境、社会经济和谐发展的要求。智能电网将安全、无缝地容许各种不同类型的发电和储能系统接入系统，简化联网的过程，类似于“即插即用”。即从小到各种不同容量的发电和储能所有的电压等级上都可以互联，包括分布式电源如光伏发电、风电、先进的电池系统、即插式混合动力汽车和燃料电池。商业用户可以安装自己的发电设备（包括高效热电联产装置）和电力储能设施将更加容易和更加有利可图。在智能电网中，大型集中式发电厂包括环境友好型电源，如风电和大型太阳能电厂以及先进的核电厂将继续发挥重要的作用；同时各种各样的分布式电源的接入一方面减少对外来能源的依赖，另一方面提高供电可靠性和电能质量，特别是对应战争和恐怖袭击具有重要的意义。



(4) 交互—电力用户。实现与客户的智能互动，以最佳的电能质量和供电可靠性满足客户需求。系统通过市场交易更好地激励电力市场主体参与电网安全管理，从而提升电力系统的安全运行水平。

在智能电网中，用户将是电力系统不可分割的一部分。鼓励和促进用户参与电力系统的运行和管理是智能电网的另一重要特征。从智能电网的角度来看，用户的需求完全是另一种可管理的资源，它将有助于平衡供求关系，确保系统的可靠性；从用户的角度来看，电力消费是一种经济的选择，通过参与电网的运行和管理，修正其使用和购买电力的方式，从而节省支出。在智能电网中，用户将根据其电力需求和电力系统满足其需求的能力的平衡来调整其消费；电力公司的需求响应计划将满足用户在能源购买中有更多选择的基本需求，减少或转移高峰电力需求的能力，使电力公司尽量减少资本开支和营运开支；并通过降低线损和减少效率低下的调峰电厂的运营，提高环境效益。在智能电网中，电力公司和用户建立的双向实时的通信系统是实现鼓励和促进用户积极参与电力系统运行和管理的基础，电力公司实时通知用户其电力消费的成本、实时电价、电网目前的状况、计划停电信息以及其他一些服务的信息，用户可以根据这些信息制定自己的电力使用方案。

(5) 高效—资产优化。智能电网应实现优化资源配置，提高设备传输容量和利用率；实现电力系统的经济调度和经济运行，提高电网的运行经济性。智能电网能有效地管理资产，实现每个资产和所有其他资产的良好整合，以最大限度地发挥其功能，同时降低成本。智能电网将应用最新技术以优化其资产的应用。例如，通过动态评估技术以使电网资产发挥其最佳的能力，通过连续不断地监测和评价其能力使电网资产能够在更大的负荷下使用。

(6) 优质—电能质量。电能质量指标包括电压偏移、频率偏移、三相不平衡、谐波、闪变、电压骤降和突升等。由于用电设备的数字化对电能质量越来越敏感，电能质量问题可能导致生产线的停产，对社会经济发展具有重大的损失，因此提供能满足 21 世纪用户需求的电能质量是智能电网的又一重要特征。但是电能质量问题又不是电力公司一家的问题，因此需要制定新的电能质量标准，对电能质量进行分级，并以不同的价格水平提供不同等级的电能质量，以满足用户对不同电能质量水平的需求，同时需要将优质优价写入电力服务的合同中。

智能电网将减轻来自输电和配电系统中的电能质量事件。通过其先进的控制方法监测电网的基本元件，从而快速诊断并准确地提出解决任何电能质量事件的方案。智能电网将应用超导、材料、储能以及改善电能质量的电力电子技术的最新研究成果来解决电能质量的问题，从而减少由于闪电、开关涌流、线路故障和谐波源引起的电能质量的扰动；采取技术和管理手段，使电网免受由于用户的电子负载所造成的电能质量影响；通过监测和执行相关的标准，限制用户负荷产生的谐波电流注入电网；采用适当的滤波器，以防止谐波污染送入电网，恶化电网的电能质量。

(7) 集成—信息系统。实现包括监视、控制、维护、能量管理 (EMS)、实时动态监测系统 (WAMS)、配电管理 (DMS)、市场运营 (MOS)、企业资源规划 (ERP) 等和其他各类信息系统之间的综合集成，并实现在此基础上的各种业务集成。

目前国际上已经启动智能电网的标准化研究工作。国际电工委员会 (International E-



lectro-technical Commission, IEC) 标准化管理委员会 (Standardization Management Board, SMB) 组织成立的第三战略工作组——智能电网国际战略工作组, 于 2009 年 4 月 29~30 日在法国巴黎召开了首次会议。会议的目的是系统研究现有标准, 提出智能电网的标准研究框架。会后战略工作组已开始与 IEC 各专业委员会联系, 提出了与智能电网有关的标准列表, 准备建立智能电网标准框架。

(8) 智能电网将使电力市场蓬勃发展。在智能电网中, 先进的设备和广泛的通信系统在每个时间段内支持市场的运作, 并为市场参与者提供了充分的数据, 因此电力市场的基础设施及其技术支持系统是电力市场蓬勃发展的关键因素。智能电网通过市场上供给和需求的互动, 可以最有效地管理如能源、容量、容量变化率、潮流阻塞等参量, 降低潮流阻塞, 扩大市场, 汇集更多的买家和卖家。用户通过实时报价来感受到价格的增长, 从而将降低电力需求, 推动成本更低的解决方案, 并促进新技术的开发, 新型洁净的能源产品也将给市场提供更多选择的机会。

智能电网是电力工业的一场巨大变革, 将引起电力工业在各个领域的革新。

(四) 智能电网的关键技术

1. 通信技术

建立高速、双向、实时、集成的通信系统是实现智能电网的基础, 智能电网的数据获取、保护和控制都需要这样的通信系统支持, 因此建立这样的通信系统是迈向智能电网的第一步。通信系统要和电网一样深入到千家万户, 从而形成两张紧密联系的网络——电网和通信网络, 只有这样才能实现智能电网的目标和主要特征。高速双向通信系统将实现各种不同的智能电子设备、智能表计、控制中心、电力电子控制器、保护系统以及用户进行网络化的通信, 提高电网运行管理者对电网的驾驭能力和优质服务的水平。

2. 量测技术

参数量测技术是实现智能电网的重要组成部分, 通过先进的参数量测技术获得数据并将反映电网运行的实时数据转换成数据信息以供智能电网的各个方面使用。参数量测技术能评估电网设备的健康状况和电网的完整性, 此外还能实现表计的读取、消除电费估计、缓减电网阻塞以及与用户的沟通。

未来的智能电网将取消所有的电磁表计及其读取系统, 取而代之的是可以使电力公司与用户进行双向通信的智能固态表计。基于微处理器的智能表计将有更多的功能, 除了可以计量每天不同时段电力的使用和电费外, 还有储存电力公司下达的高峰电力价格信号及电费费率, 并通知用户实施什么样的费率政策。更高级的功能有用户自行根据费率政策、编制时间表, 自动控制用户内部电力使用的策略。

3. 设备技术

智能电网要广泛应用先进的设备技术, 大幅度提高输配电系统的性能。未来智能电网中的设备将充分应用在材料、超导、储能、电力电子和微电子技术方面的最新研究成果, 从而提高功率密度、供电可靠性和电能质量以及电力生产的效率。

未来智能电网将主要应用三个方面的先进技术: 电力电子技术、超导技术以及大容量储能技术。通过采用新技术在电网和负荷特性之间寻求最佳的平衡点来提高电能质量。通过应用和改造各种各样的先进设备, 如应用电力电子技术和新型导体技术的设备来提高电



网输送容量和可靠性；将超导技术应用于短路电流限制器、储能、低损耗的旋转设备以及低损耗电缆中；新型的储能技术将应用于分布式能源或大型的集中式电厂。

4. 控制技术

先进的控制技术是智能电网建设的关键。先进的控制技术指的是智能电网中分析、诊断、预测状态并确定和采取适当的措施以消除、减轻和防止供电中断和电能质量扰动的装置和控制技术。这些技术将提供对输电、配电和用户侧的控制方法，并且可以管理整个电网的有功和无功。先进控制技术主要包括先进数据采集、动态监测技术、数据分析和快速计算技术、快速诊断和辅助决策技术以及闭环自动控制技术等。

(1) 数据采集和动态监测技术。先进控制技术将使用同步向量测量装置、智能传感器、智能电子设备以及其他先进的测量系统监测电网元件的状态情况，对整个系统的状态进行评估，这些数据都是实时数据，能实时反映电网整体的运行状况。

(2) 数据分析和快速计算技术。实时数据以及强大的计算机处理能力为电网实时分析计算提供了快速扩展和进步的能力。状态估计和电网稳定计算分析将在秒级水平上完成分析；专家系统将数据转化成信息用于快速决策；负荷预测将应用这些准实时数据以及改进的天气预报技术来准确预测负荷；概率风险分析将成为例行工作，确定电网在设备检修期间、系统压力较大期间以及不希望的供电中断时的风险水平。

(3) 快速诊断和辅助决策技术。由高速计算机处理的实时数据帮助专家诊断并确定电网现有的、正在发展的和潜在的问题，提出解决方案，再提交给电网运行管理人员进行判断。

(4) 闭环自动控制技术。智能电网通过实时通信系统和高级分析技术的结合使执行问题检测和响应的自动控制行动成为可能，并最终能实现对电网安全经济运行的闭环控制。

二、国外发展概况

1. 美国

智能“自愈”电网的概念发源于美国电力基础设施战略防护系统，该系统采用 3 层 Multi-Agent 结构：底层为反应层（包括发电和保护）；中层为协作层（包括事件/警报过滤、模型更新、故障隔离、频率稳定、命令翻译）；高层为认知层（事件预测、脆弱性评估、隐藏故障监视、网络重构、恢复、规划、通信）。电力基础设施战略防护系统主要功能有脆弱性评估、故障分析、自愈战略，信息和传感等，用以防护来自自然灾害、人为错误、电力市场竞争、信息和通信系统故障、蓄意破坏等对电力设施的威胁。电力基础设施战略防护系统是由美国国防部牵头，EPRI 和华盛顿大学等单位参与，从 1999 年开始历时 5 年完成的一项前期工作，是美国就电力、电信、金融、交通等对国民经济影响巨大的复杂系统所开展的政府—工业—大学协同研究项目之一。

2002 年美国电科院（EPRI）开展能源和通信系统框架整合项目研究，18 个月后，项目正式命名为智能电网框架，这是世界上第一个智能电网框架研究。美国电科院智能电网框架研究初衷是将先进的自动化系统和信息系统技术与现有的工业系统进行整合，已开展了一些具体应用研究：包括高级量测、配电自动化、需求侧响应和广域量测系统应用等；提供一个独立、公正的产品和技术测试平台；为世界范围内的相关研究机构提供研究交流



平台；通过项目成果应用提供直接技术支持；提供和支持相关通信框架研发。美国电科院智能电网框架目前确立了三个关键研究领域：广域量测和控制、高级配电自动化和用户能源服务应用。

2003 年 4 月，美国 65 位来自电力公司、电力设备制造商、联邦和州政府官员、大学和国家实验室的高级专家汇聚一堂，讨论美国未来的电力系统。会后，于 2003 年 6 月以美国能源部输配电办公室的名义发布了一份名为“Grid 2030——电力的下一个 100 年的国家设想”的报告。这份报告描绘了美国未来电力系统的设想，并确定了美国各阶段各项研发和试验工作目标。

2005 年美国能源部的电力传输、能源可靠办公室和国家能源技术实验室成立了现代电网项目（Modern Grid Initiative, MGI）以促进美国输配电网络的现代化，其中对未来电网特征进行了总结，包括：主动智能防御；用户主动参与的需求侧响应；自恢复的抗攻击和自然灾害能力；不同价格水平的供电质量；适应分布式发电、储能的“即插即用”系统接入，方便可再生能源的接入；更充分的安全可靠电力市场运行；更广泛地电网运行量测，以及通过与资产管理更紧密联系的电网技术实现更有效的资产和费用管理；方便简单的维护。

2006 年，美国 IBM 公司与全球电力专业研究机构、电力企业合作开发了“智能电网”解决方案。电力公司可以通过使用传感器、计量表、数字控件和分析工具，自动监控电网，优化电网性能、防止断电、更快地恢复供电，消费者对电力使用的管理也可细化到每个联网的装置。

2008 年美国科罗拉多州的波尔得（Boulder）已经成为了全美第一个智能电网城市，每户家庭都安排了智能电表，人们可以很直观地了解当时的电价，从而把一些事情，比如洗衣服、熨衣服等安排在电价低的时间段，同时变电站可以收集到每家每户的用电情况。此外电表还可以帮助人们优先使用风电和太阳能等清洁能源，一旦有问题出现，可以重新配备电力。

2008 年 9 月，谷歌（Google）与通用电气对外宣布共同开发清洁能源业务，核心是为美国打造国家智能电网，同时强调：“21 世纪的电力系统必须结合先进的能源和信息技术”，而这正是通用电气和谷歌的优势领域。2009 年 2 月 10 日，谷歌已开始测试名为谷歌电表（PowerMeter）的用电监测软件。谷歌还向美国议会进言，要求在建设智能电网时采用非垄断性标准。

2009 年 1 月 25 日，美国白宫最新发布的《复苏计划尺度报告》宣布：将铺设或更新 3000 英里输电线路，并为 4000 万美国家庭安装智能电表。美国还将集中对落后的电网系统进行升级换代，建立美国横跨四个时区的统一电网，逐步实现太阳能、风能、地热能的统一入网管理。

美国能源部西北太平洋国家实验室正在协助建立电网智能化联盟并进行实地示范，如近期完成的高级需求响应网络太平洋西北电网智能化试验台。在该项目中，通过英维思控制器将家庭网关设备连接到装有 IBM 软件的新型高级仪表和可编程恒温器上，将 112 个家庭与实时电力价格信息联系起来。最终结果表明，参与者节约了约 10% 的能源费用，并且需求响应良好。



2009 年美国总统奥巴马上任伊始, 针对美国全国范围内存在多个交流输电网, 人员年龄老化, 投入不足, 技术陈旧, 事故较为频繁, 为了防止大停电, 提出了以智能电网为核心的美国能源战略。奥巴马政府把减少碳排放作为国家战略, 逐步建立碳排放交易体系, 实施温室气体总量控制: 一是大力发展可再生能源, 加强用户侧管理, 减少能源进口总量, 保障国家能源安全; 二是以建设智能电网为载体, 实施新能源产业战略, 实现美国经济振兴, 积极应对全球气候变暖和国际金融危机; 三是通过联邦经济刺激计划等手段, 对符合国家智能电网发展目标的企业给予资金支持和补贴, 引导企业在国家战略目标框架内开展智能电网研究与实践。2009 年 4 月 16 日美国政府公布智能电网技术投资计划, 希望推动智能电网的开发。

《纽约时报》刊文称, 美国能源部西北太平洋国家实验室的研究结果表明, 仅使用数字工具设定家庭温度及融入价格信息, 能源消耗每年可缩减 15%。若推广使用需求侧监控系统 20 年, 则在建设、维护、运营电厂、变电站和电网方面将节省 700 亿美元, 这其中 40% 的费用节省于发电。

2009 年 2 月, IBM 与地中海岛国马耳他签署协议——双方将建立一个“智能公用系统”, 实现该国电网和供水系统数字化。IBM 及其合作伙伴将会把马耳他 2 万个普通电表替换成互动式电表, 这样马耳他的电厂就能实时监控用电, 并制定不同的电价来奖励节约用电的用户。这个工程价值高达 9100 万美元 (合 7000 万欧元), 其中包括在电网中建立一个传感器网络。这种传感器网络和输电线、各发电站以及其他的基础设施一起提供相关数据, 让电厂能更有效地进行电力分配并检测到潜在问题。IBM 将会提供搜集分析数据的软件, 帮助电厂发现机会, 降低成本以及该国碳密集型发电厂的排放量, 以实现该国电网和供水系统的数字化。

加尼福利亚洲已完成第一阶段试验性 200 万户小区先进电表系统的安装, 初步分析显示, 节省电力可达 16%~30%。

2. 欧洲

欧洲各国电网运行模式不同, 节能减排、环保统筹和低碳经济是欧洲智能电网的主要动因, 因此欧洲对智能电网的研究重点是可再生能源和分布式能源的发展, 并带动整个行业发展模式的转变。2005 年智能电网欧洲技术论坛成立。欧盟第 5 次框架计划 (1998~2002 年) 中的“欧洲电网中的可再生能源和分布式发电整合”专题下包含了 50 多个项目, 包括分布式发电、输电、储能、高温超导体和其他整合项目 5 大类, 其中绝大多数项目于 2001 年开始实施并基本达到了预期目的。

2006 年欧盟理事会的能源绿皮书《欧洲可持续的、竞争的和安全的电能策略》明确指出, 智能电网技术是保证欧盟电网电能质量的一个关键技术和发展方向。目前英国、法国、意大利等欧洲国家都在加快推动智能电网的应用和变革。

意大利的部分电网已与 2001 年率先实现电网智能化。意大利电力公司是意大利国内最大的电力公司和第二大天然气运营商, 为了满足电动汽车、太阳能等分布式能源接入的要求, 意大利电力公司在智能电网方面开展了互动式配电能源网络及自动抄表管理系统的研究和应用工作。2008 年 7 月 1 日启动了由意大利电力公司牵头负责, 欧盟 11 个国家的 25 个合作伙伴联合承担的 ADRESS 项目, 该项目总预算 1600 万欧元, 其中欧盟资助 900



万欧元，项目计划于 2012 年结束。该项目的目的就是开发互动式配电能源网络，实现主动式需求，即居民及小商业用户主动参与到电力市场及电力服务中。自动抄表管理系统从 2001 年开始实施，至 2008 年累计安装了 3180 万块智能电表，覆盖面已达 95%，其余部分 2011 年前完成。该系统 2008 年进行了几亿次远程抄表和千瓦次的远程管理操作。该项目投入 21 亿欧元。安装该系统后，每年节约 5 亿欧元，实际管理线损由 3% 降低到 1%。

法国电网公司在智能电网方面也开始了研究及实施工作。法国计划将风电装机容量由目前的 2.5GW 提升到 2010 年的 5GW，提高 100%，到 2020 年达到 20GW，比目前提高 300%。法国电网公司选择和阿海珐（AREVA）旗下的输配电公司 T&D 合作发展智能型风力发电网络。根据法国能源监管条例要求，用户可每周或每月向法国电网公司了解用电数量，也可通过远程访问的方式直接读取计量数据。为此，法国电网公司开展了广泛的表计及相关业务处理工作，开发了 T2000 系统，设立了 7 个远程读表中心，主要包括表计、结算及出单等功能。远程读表中心将数据汇总到总部表计及结算系统，进行相关结算以及出单处理。随着 T2000 的应用，错误率逐年下降，实时出单的比例逐年上升，提高了效率，减少了纠纷。2008 年法国电网公司实时出单率已经达到 99.0%。

法国电网输送公司在智能电网方面的工作主要集中在自动抄表管理系统。2008~2017 年，法国电网输送公司将逐步把居民目前使用的普通电表全部更换成智能电表，这种节能型的智能电表能使用户跟踪自己的用电情况，并能远程控制电能消耗量。预计该更换工程的总投资将达到 40 亿欧元。

西班牙电力公司在智能电网开展的工作包括智能城市和自动抄表工作两个方面，主要是为了满足太阳能等分布式能源接入，以及适应西班牙政府在 2007 年 8 月出台的相关法律要求：到 2014 年，所有的配网运营商都必须有自动抄表管理系统运行；截至到 2018 年，所有机电式电表都要更换为智能电表。西班牙电力公司总计有 1550 万户电表，目前已经有 1 万只智能电表进行示范安装，电表更换计划已启动。由西班牙电力公司牵头，与当地政府合作在西班牙南部城市 Puerto Real 开展了智能城市项目试点，主要包含分布式发电、智能化电力交易、智能化电网、智能化计量、智能化家庭。该试点于 2009 年 4 月启动，计划用 4 年的时间完成智能城市建设。该项目涉及的范围包括 9000 个用户、1 个变电站以及 5 条中压线路、65 个传输线中心。

2009 年 6 月 8 日，荷兰首都阿姆斯特丹宣布选择埃森哲公司帮助其完成第一个欧洲“智能城市（Smart City）”计划。该项“智能城市”计划包括可再生能源使用、下一代节能设备、消减 CO₂ 的排放量等内容。与其他城市需要花费数十年来升级其基础设施不同，阿姆斯特丹计划在 2012 年即完成第一轮投资，成为率先且被最广泛接受“智能城市”概念的地区之一。

德国法律规定，从 2010 年起，新建、改建房屋必须加装智能电表；到 2010 年，可再生能源比例达到 20%。

奥地利、瑞士 AMI 试点刚刚开始，由于以水电为主，已实现了 20% 的减排指标。瑞典已经 100% 完成了智能电表的安装。

西门子（Siemens）公司对智能电网的研究将整合分布式电源和各种储能元件，实现厂站自动化、表计智能化、负荷可控化和储能设备自动化，并通过 IP/以太网实现电网各



成员间的通信网络，具有自适应、自优化和自愈功能，为用户提供安全可持续和高效率的电力供应。2004 年，西门子收购了丹麦 Bonus 公司后进入了风电市场，并持续不断扩大其生产能力。西门子公司在丹麦投入运行的风电接入控制系统可以使风电接入得到有效控制，并参与电网的调频，对电网的影响从负面转向正面。将风电由不可控、不可调节调节成可控、可调节的电力，实现了将风电按照电网的需求来发电，不仅考虑风电机组的最大效益，而且实现了机网的最大程度协调。

3. 亚洲

日本政府为了实现低碳社会，于 2009 年 3 月公布了包括推动普及可再生资源、次世代汽车等政策在内的政府发展战略原案。该原案主要是由太阳能发电世界第一节能计划、快速普及生态汽车、低碳物流社会、实现资源大国计划等 3 大部分构成。其中太阳能发电计划将向学校等公共设施以及工厂、住宅、写字楼等集中引进太阳能发电和节能设备。为了进一步加快太阳能发电的普及速度，日本电力公司还推出新的政策来收购家庭等处利用太阳能发电所产生的电力。其中还包括被称为智能电网的次世代电力网络的实证试验，为电动汽车配备快速充电器等。

目前，日本东京电力公司的电网被认为是世界上唯一接近于智能电网的系统。日本东京电力公司通过光纤通信网络，正在逐步实现对系统范围内 6kV 中压馈线的实时量测和自动控制（每分钟采样 1 次）。

2009 年 3 月 27 日韩国政府宣布，韩国计划在 2011 年前建立一个智能电网综合性试点项目。韩国知识经济部认为这种电网能将普通电线和 IT 技术以及卫星通信系统结合起来，可实时监控电力需求和输出。韩国知识经济部将大力推进利用 IT 技术将电力网智能化的商用化。韩国知识经济部决定，2009~2012 年，投入 2547 亿韩元开发商用化技术，并将名称定为“绿色电力 IT”。绿色电力 IT 是在发电站、送电塔、电线杆、家电产品上安装传感器，生产、流通各种电力信息的技术。电力 IT 的主要技术包括智能型能源管理系统、基于 IT 的大容量电力输送控制系统、智能型送电网络监视及运营系统、能动型远程信息处理和电力设备状态监视系统、电线通信普及技术等。

三、国内发展情况

国内开展智能电网研究虽然稍晚，但在智能电网相关技术领域已经开展了大量的研究和实践，其中在特高压及输电领域，多项研究应用达到国际先进水平，在配用电领域，智能化应用研究也正在积极探索。结合国际智能电网技术发展方向和我国电网发展特点，国家电网公司重点组织开展了新型能源接入、特高压输电、大电网运行控制、智能变电站与数字化电网、灵活交直流输电及储能、电网防灾减灾与城乡电网安全可靠供电、电网环保与节能等方面的研究。其中，在特高压输电技术、电网广域测量分析与保护控制技术、电网频率质量控制技术、稳态/暂态/动态三位一体安全防御技术和自动电压控制技术等方面的研究及应用已处于国际领先地位。

自主研发的能量管理系统（EMS）等在省级以上调度机构得到了广泛应用，全部地区级以上电力调度机构均配置了电网调度自动化系统。无人值班变电站已实现，地理信息系统（GIS）已开始应用于输电、变电和配电管理等业务。