

智能电网技术国际发展态势分析

张军 陈伟 李桂菊 金波

(中国科学院武汉文献情报中心情报研究部, 湖北武汉, 430071)

摘要: 智能电网是以包括各种发电设备、输配电网络、用电设备和储能设备的物理电网为基础, 将现代先进的传感测量技术、网络技术、通信技术、计算技术、自动化与智能控制技术等与物理电网高度集成而形成的新型电网。

智能电网本质上并不是一个全新的概念, 从诞生时起, 电网一直在根据发电侧、供电侧和需求侧的变化和需要而在不断进步。上世纪 80 年代以来, 诸如电子控制、数字计量和监控等新兴逐渐引入电网, 加快了电网的智能化趋势。

2008 年以来, 在全球性经济危机背景下, 为刺激经济复苏并适应未来清洁能源发展要求, 美国、欧盟等将能源基础设施建设放到优先地位。智能电网因此得到了大力提倡和积极发展, 使得 2009 年成为“智能电网年”。

我国的智能电网建设不应简单沿袭国外的模式, 更不宜热炒概念, 而是应当根据国情加强前瞻性理论探索和规划研究, 提升大电网规划的统一优化能力, 加强特高压骨干电网建设和地区配电网的结构优化及升级, 使其能够适应未来大规模可再生电力并网、分布式电源、微网的柔性连接, 实现电源电网协调, 以实现资源的优化配置和效益最大化。

关键词: 智能电网; 输电; 配电; 电力电子; 通信技术; 信息技术; 计量; 传感; 网络

1 智能电网概述

智能电网本质上并不是一个全新的概念。自 19 世纪末以来, 电网一直在根据发电侧、供电侧和需求侧的变化和需要而不断取得技术进步。上世纪 80 年代以来, 电子控制、数字化计量和实时监控等开始得到应用, 电网已在逐渐走向智能化。随着对电网安全性、可靠性的要求越来越高以及可再生能源、分布式供能、电气化交通的兴起, 电网必须利用先进的数字化、自动化技术以适应新的电源格局。20 世纪 90 年代中后期, 适应未来需要的现代化电网作为一个整体开始得到全面系统的研究, 这个过程中出现了如“Intelligrid”、“Interactive Grid”、“Modern Grid”、“Smart Grid”等众多概念, 对其定义、特征、功能、构成和相关技术方面的讨论也走向深入。

1.1 智能电网的定义

智能电网的发展在全世界还处于起步阶段, 还没有一个共同的精确定义。但发展智能电网已经逐渐成为世界电力行业的共识。以下列举的是国内外一些权威机构和学者给出的定义:

美国能源部: 一个完全自动化的电力传输网络, 能够监视和控制每个用户和电网节点, 保证从电厂到终端用户整个输配电过程中所有节点之间的信息和电能的双向流动 (DOE, 2003)。

美国电力科学研究院: 一个由众多自动化输电和配电系统构成的电力系统, 以协调、有效和可靠的方式实现所有的电网运作。具有自愈功能; 快速响应电力市场和企业业务需求; 具有智能化的通信架构, 实现实时、安全和灵活的信息流, 为用户提供可靠、经济的电力服务 (EPRI, 2005)。

美国 IBM 公司: 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 (IBM, 2008)。

美国埃森哲公司: 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(Accenture, 2009)。

欧洲智能电网技术平台:一个可整合所有连接到电网用户所有行为的电力传输网络,以有效提供持续、经济和安全的电力(ETP, 2006)。

中国科学院电工研究所:智能电网是以包括各种发电设备、输配电网络、用电设备和储能设备的物理电网为基础,将现代先进的传感测量技术、网络技术、通信技术、计算技术、自动化与智能控制技术 etc 与物理电网高度集成而形成的新型电网,它能够实现可观测(能够监测电网所有设备的状态)、可控制(能够控制电网所有设备的状态)、完全自动化(可自适应并实现自愈)和系统综合优化平衡(发电、输配电和用电之间的优化平衡),从而使电力系统更加清洁、高效、安全、可靠(肖立业, 2009)。

国家电网公司中国电力科学研究院:以物理电网为基础,将现代先进的传感测量技术、通信技术、信息技术、计算机技术和控制技术与物理电网高度集成而形成的新型电网。它以充分满足用户对电力的需求和优化资源配置、确保电力供应的安全性、可靠性和经济性、满足环保约束、保证电能质量、适应电力市场化发展等为目的,实现对用户可靠、经济、清洁、互动的电力供应和增值服务(胡学浩, 2009)。

天津大学余贻鑫院士: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(余贻鑫, 2009)。

1.2 智能电网的特征

智能电网的特征可以归纳为以下七个方面:

(1) 自愈。对电网的运行状态进行连续的在线自我评估,并采取预防性的控制手段,及时发现、快速诊断和消除故障隐患,故障发生时,在没有或少量人工干预下,能够快速隔离故障、自我恢复,避免大面积停电的发生,减少经济损失。

(2) 用户交互。智能电网系统运行与批发、零售电力市场实现无缝衔接,支持电力交易的有效开展,实现资源的优化配置;同时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。在现代化电网中,商业、工业和居民等能源消费者可以看到电费价格、有能力选择最合适自己的供电方案和电价。

(3) 抗攻击。有效抵御人为或自然因素对电网的侵害,实时隔离受损区域并重新调度电力。

(4) 高品质电能。提供适应 21 世纪需求的电能质量:现代化的电网不会有电压跌落、电压尖刺、扰动和中断等电能质量问题,适应数据中心、计算机、电子和自动化生产线的需求。

(5) 多元电源。智能电网能够同时适应集中发电与分布式发电模式,允许即插即用连接任何电源,实现与负荷侧的交互,支持风电等可再生能源的接入,扩大系统运行调节的可选资源范围,满足电网与自然环境的和谐发展。

(6) 市场协调。与上、下游电力市场实现无缝衔接。有效的市场设计可以提高电力系统的规划、运行和可靠性管理水平:电力系统管理能力的提升促进电力市场竞争效率的提高。

(7) 资产优化。通过引入先进 IT 和监控技术优化电力设备和资源的使用效益,使运行和维护成本最小化,提高资产利用效率,从整体上实现网络运行和扩容的优化,降低运行维护成本和投资。

1.3 智能电网的效益

建设智能电网为调整优化电力和能源结构、提高电网运行效率及可靠性、降低成本提供了有利条件和机遇。

对电网企业而言,综合采用智能电表与分时电价等方式,可抑制电力高峰负荷需求增长,减少和延缓电网固定资产投资。美国能源部西北太平洋国家实验室的研究结果表明(PNNL, 2007),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，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%的节省费用来自于发电端，相当于少建 30 个大型燃煤电厂。此外，通过设备状态、用户负荷的自动化监测，可实现对设备更好的管理和维护，延长设备寿命，延缓设备投资，可提高电网投资和改造的针对性、合理性。自动计量管理则有助于电网企业缩短电费回收时间，减少窃电损失。通过网络实时重构，可以减少停电发生的机率，并且在故障发生时快速检测、定位和隔离故障，进而指导作业人员快速确定停电原因，恢复供电，缩短停电时间，提高了供电可靠性。通过精确规划实施智能电网，可以梳理和完善业务流程，加强需求侧管理，提高资产运行维护和管理水平。

对终端用户而言，智能电网除了能够更灵活有效地调配电力供需，还能够通过利用智能电表所提供的实时用电信息来改变用户的用电行为模式，引导用户节约用电。通过智能电网，消费者可以根据自身用电需求，有效平衡用电成本。从长远来看，通过充分整合电力系统与配电技术，可以降低居民用电高峰需求和用电量，优化配电损失，提高养护水平，从而达到减少潜在的碳排放；并且通过远程自动化切断连接和重新连接实现潜在效用成本节省，通过家庭自动化消除不必要的和高收费的用电成本。

对产业而言，智能电网建设对相关产业的拉动作用是巨大的。据爱迪生电力研究所估计，为了改造智能电网，对基础设施的改造将花费数千亿美元，包括计算机、传感器和网络系统，这对 IT 和网络公司来说是个巨大的新市场。根据研究报告《智能电网技术》(Pike, 2009 年)的估算，2015 年全球政府和公用事业机构对智能电网的投资额将达到 2000 亿美元。其中电网自动化相关技术将占 84%，高级量测体系将占 14%，电动汽车管理系统将占剩余的 2%。智能电表目前虽然是智能电网最抢眼的部分，但还只是冰山一角。分析显示，公用事业机构为获得最大投资回报，将会把资金主要投放在电网基础设施项目上，诸如输电网升级、变电站自动化和配电自动化。未来电网投资的关键目标有四个：提高可靠性和安全性；提高运行效率和降低成本；平衡电力供需；减少电力系统对气候变化的总体影响。

2 智能电网的构成与关键技术

2.1 智能电网的构成

美国能源部国家能源技术实验室 (NETL) 提出了现代智能电网的五个重要组成部分 (NETL, 2006):

(1) 参数量测：各种先进的传感器、表计与监视系统，用以监视设备健康状态与网络状态、支持继电保护、计量电能。

(2) 集成通信：能实现即插即用的开放式架构，全面集成的高速双向通信技术。

(3) 电力设备：基于最新的材料、超导、储能、电力电子与微电子学科研究成果而制造出的各种新型电力系统设施。

(4) 先进应用：基于各种先进理论和算法的电力系统分布式智能、高级应用软件，用以监视关键设备、支持各类事件的快速诊断与及时响应，促进资产管理、系统与市场运行效率的提高。

(5) 决策支持：先进的可视化展示、电力系统仿真与培训工具，增强各级运行人员的决策能力。

IBM 公司则更多的从信息技术视角将智能电网划分为数据采集、数据传输、信息集成、分析优化和信息展现五个方面：

(1) 数据采集：智能电网的实时数据主要包括三类：电网运行数据、设备状态数据和客户计量数据。智能电网大大扩展了监视控制与数据采集系统 (Supervisory Control and Data Acquisition, SCADA) 的数据采集范围和数量，提高了电网的“可视化”程度，为企业提供了更多有价值的信息和更有力的决策支持。

(2) 数据传输：设备状态数据和客户计量数据的特点是数据量大、采集点多且分散；对实时性的要求比电网实时运行数据低；数据需要被多个系统和业务部门使用。智能电网中对这些数据的

采集采用基于开放标准的数字通信网络，以实现实时数据的共享。

(3) 信息集成：智能电网中需要集成的信息包括自动化系统的实时数据、电网公司内部管理应用系统产生的管理数据、外部应用系统数据。为了实现企业级的信息集成，需要建立企业信息集成总线，实现应用系统之间的数据流动，各应用系统的数据集成到统一的分析数据仓库。企业信息集成总线中信息交换以及数据中心数据模型参照/遵循公共信息模型（Common Information Model, CIM）标准。

(4) 分析优化：分析优化是智能电网的核心内容，是电网智能化的根本体现，有利于支持电网企业的业务改进与创新。分析优化可分为四个层次：①实时事件、阈值、通知、屏幕显示、邮件、传呼；②指标计算、趋势分析；③数据分析、事件的实时或事后诊断处理、数据挖掘；④高级优化、业务建模和规划、决策支持。智能电网解决方案中，针对电网企业不同的业务主题，建立了完整的分析结构层次，指导对数据的深度利用。

(5) 信息展现：通过门户系统，能够从多个数据源获取数据，将经过分析优化处理后的信息，以用户定制方式呈现给用户。门户系统为用户提供一站式信息访问，不同层次的用户获得自己关注的信息，用户能够配置需要显示的信息和表现方式，还能够实现对分析结果的企业级分发。

总的来看，智能电网是以先进电力电子设备和器件为基础，引入传感、通信、自动控制等现代信息技术，实现对整个电力网络的升级改造，最终达到电力网络运行更加可靠、经济、环保的目标。

2.2 智能电网的关键技术

智能电网可以分为以下四大类技术领域：高级量测体系（advanced metering infrastructure, AMI）、高级配电运行（advanced distribution operation, ADO）、高级输电运行（advanced transmission operation, ATO）和高级资产管理（advanced asset management, AAM），如图 1 所示（余贻鑫，2009）。

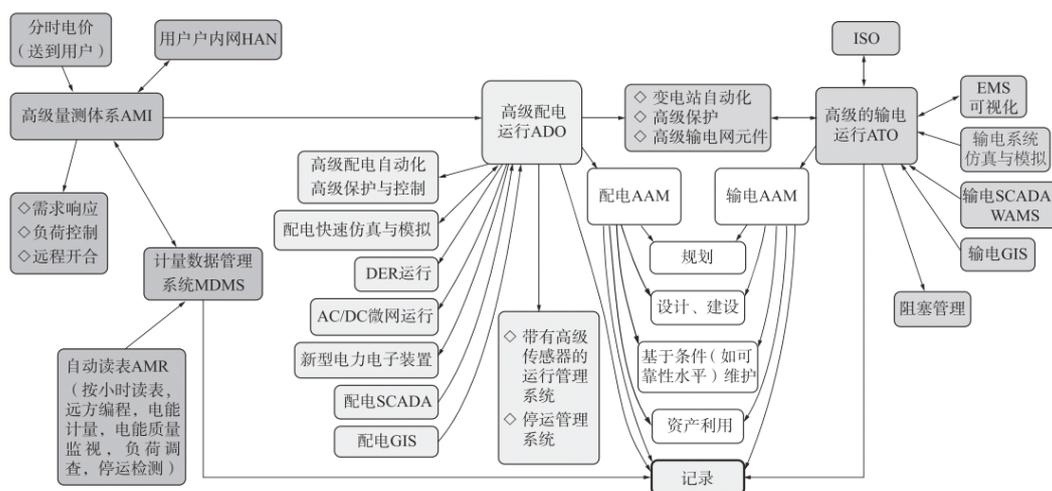


图 1 智能电网的技术组成

资料来源：余贻鑫，2009

2.2.1 高级量测体系

高级量测体系是智能电网的基石，主要作用是授权给用户，使系统同负荷建立起联系，使用户能够支持电网的运行。智能电网需要具有实时监视和分析系统目前状态的能力：既包括识别故障早期征兆的预测能力，也包括对已经发生的扰动做出响应的能力。智能电网也需要不断整合和集成企业资产管理和电网生产运行管理平台，从而为电网规划、建设、运行管理提供全方位的信息服务（图-1）。因此，宽带通信网，包括电缆、光纤、电力线载波和无线通信，将在智能电网中扮演重要角色。

高级量测体系的监控和测量功能包括：①设备的运行参数：电压、电流、相位、功率、频率等。

②设备的状态参数：温度、应力、压力、绝缘和污闪、工质和介质性能参数及老化程度、线路覆冰状况和弧垂度等。③环境参数：温度、湿度、气压、植被生长情况、污染指数等。④故障定位测量：主要是指线路故障精确定位。⑤智能电表：双向潮流计量、显示实时电价与电网状态信息、显示各种电气设备功率和用电情况、电能质量分析、防偷电检测、自备电源检测、作为家用电器和自备电源的控制中心并实现与外界双向信息交换等。⑥发电厂测量：设备工作状态、出力、煤耗、能效和排放。⑦电网测量：同步相位测量、广域测量（WAMS）、系统安全稳定监测、动态设备（如柔性交流输电系统（FACTS）、电力系统稳定器（PSS）、继电保护等）监测。随着技术的发展，智能电表还可能作为 Internet 路由器，推动电力部门以其终端用户为基础，整合通讯、宽带数据业务或电视传输信号。

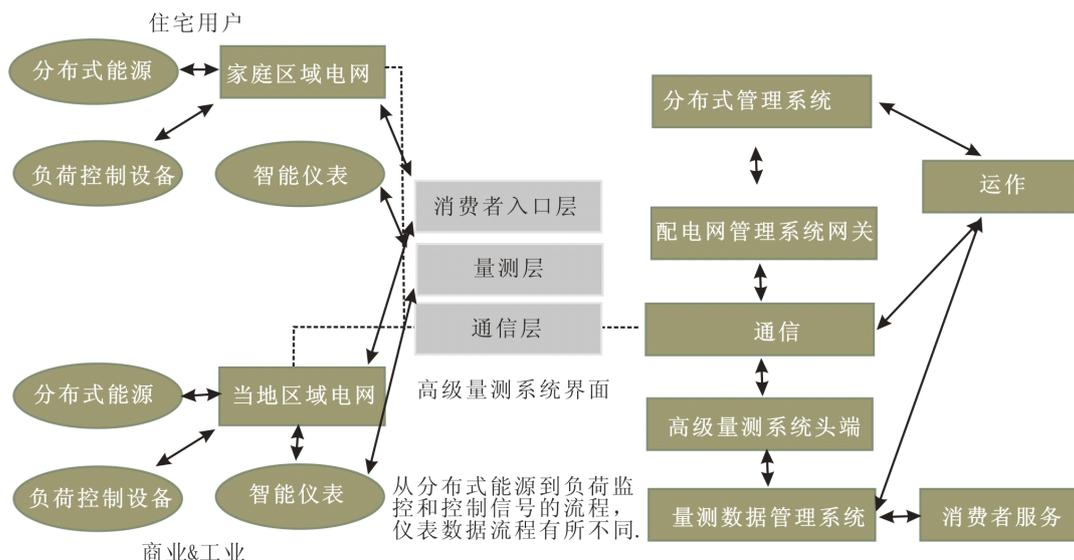


图2 高级量测体系的系统结构

资料来源：NETL，2009

高级量测体系的实现需要多种技术和应用集成的解决方案，主要包括：

(1) 智能电表。电网的智能化需要电力供应机构精确得知用户的用电规律，从而对需求和供应有一个更好的平衡。传统的感应式机械电表只是单向读取，不是双方互动的交流。由智能电表以及连接它们的通信系统组成的先进计量系统能够实现对诸如远程监测、分时电价和用户侧管理等的更快和准确的系统响应。智能电表主要由电子元器件构成，其工作原理是对用户供电电压和电流进行实时采样，采样结果由专门设计的集成电路芯片进行处理，并转换成与电能成正比的脉冲输出，最后通过单片机进行处理、控制，把脉冲显示为用电量并输出。智能电表可以定时或即时取得用户带有时标的分时段或实时(或准实时)的多种计量值，如用电量、用电功率、电压、电流和其他信息，是电网的传感器体系的基础。

智能电表在很宽的电流动态范围内具有更高精度和更低功耗，在高可靠性和稳定性方面，可以经受十年、甚至几十年的考验，同时也可耐受-40~80℃的温度范围，无需机械电表的加工精度，可以实现多费率计费、防窃电和预付费等功能，也可以通过电话、RF 射频、GPRS、电力线载波进行联网，通过软件实现对硬件的控制管理，实现电表设计和使用智能化，电子公司也可以由此实现自动抄表系统，以及对电力网进行更有效控制。因此智能电表能够实现远传控制（远程抄表、远程断送电）、复费率、识别恶性负载、反窃电、预付费用电等功能，而且可以通过对控制软件中不同参数的修改，来满足对控制功能的不同要求，这些功能对于传统的感应式电表来说都是很难或不可能实现的。

(2) 通信网络。智能电网中的通信网络是局域网与广域网的有机结合。局域网（LAN）连接

智能电表和数据集中器，能把表计信息（包括故障报警和装置干扰报警）接近于实时地从电表传到数据中心，是全部高级应用的基础。数据集中器则通过广域网（WAN）和数据中心相连。数据集中器通常在杆塔上、在变电站里或在其他的一些设施上，它们是局域网和广域网的交汇点。在局域网中，数据集中器即时或按照预先设定的时间收集或接收附近电表的计量值或信息，再利用广域网把数据传到数据中心。数据集中器可以中继数据中心发给下游电表和用户的命令和信息。

广域网是一个高速的、全面集成的高速双向通信技术架构，使电网变成一个动态的、交互的，用于实时信息和功率交换的网络。广域网采用开放式架构，可以对网络传感器和控制装置、控制中心、保护系统和用户建立一个安全的“即插即用”的应用环境；可以在广泛的范围实现信息和应用系统的连接和集成，使数据在整个电力系统的不同主体及不同的应用系统之间传递，以满足电网对通信的要求。广域网可以采用不同的媒介来向数据中心实施广域通信，如电力线载波（PLC）、Internet（IPv4 和 IPv6）、光纤以太网、电力线宽带（BPL）、第四代（4G）WiMax、第三代（3G）无线语音和数据通信、Zigbee/WiMedia/WiFi 无线通信等。

(3) 计量数据管理系统（MDMS）。这是一个带有分析工具的数据库，通过与高级量测体系自动数据收集系统的配合使用，处理和储存电表的计量值。分布式网络结构。一个典型的计量数据管理系统由数据库服务器、通信前置机、工作站和网络服务器组成。用户可以通过不同的数据采集装置和连接方法，将电能表数据通过各种通信信道传给系统主站，实现电能数据的查询、维护、统计分析和各种考核等功能。

(4) 用户室内网（HAN）。通过网关或用户入口把智能电表和用户户内可控的电器或装置（如可编程的温控器）连接起来，使得用户能根据电力公司的需要，积极参与需求侧响应或电力市场。用户室内网还可以通过智能电表将家电的启停授权给电力公司，通过启停或调整某些家电设备使用户参与电网的调频。

高级量测体系能够提供多种用户服务（如分时或实时电价等）和远程接通或断开等功能，对高级量测体系的要求体现在低能耗、高精度、数据处理速度快、可以与通信系统整合（含有通信接口与通信协议）、传感器或传感器网络应具备依靠就地环境获取能源的能力（杂散能发电等，不需要外部供电）。

2.2.2 高级配电运行

高级配电运行即调度的智能化，是对现有调度控制中心功能的重大扩展，是未来电网发展的必然趋势。调度智能化的最终目标是建立一个基于广域同步信息的网络保护和紧急控制一体化的新理论与新技术，协调电力系统元件保护和控制、区域稳定控制系统、紧急控制系统、解列控制系统和恢复控制系统等具有多道安全防线的综合防御体系。智能化调度的核心是在线实时决策指挥，目标是灾变防治，实现大面积连锁故障的预防。高级配电运行的系统构成如图 3 所示。

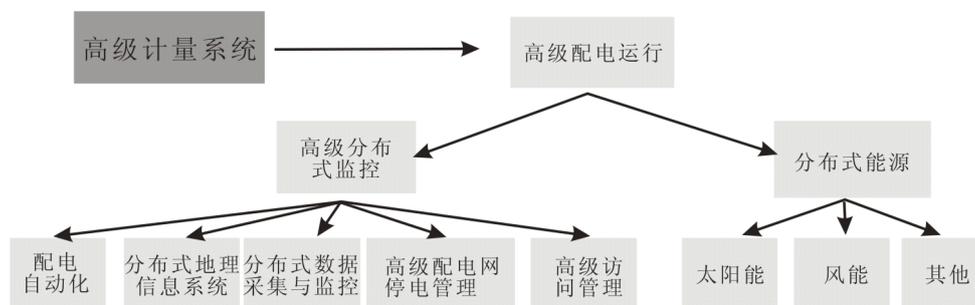


图 3 高级配电运行的系统构成

资料来源：DOE，2008

高级配电运行的关键技术包括：快速仿真与模拟；高级配电自动化、智能预警技术；优化调度技术；预防控制技术；事故处理和事故恢复技术（如电网故障智能化辨识及其恢复）；智能数据挖掘

技术；调度决策可视化技术、AC / DC 微网运行和运行管理系统（带有高级传感器）、新型电力电子装置、可再生能源资源运营等。

高级配电运行的主要功能是使系统可自愈。为了实现自愈，电网应具有灵活的可重构的配电网网络拓扑和实时监控、分析系统目前状态的能力。后者既包括识别故障早期征兆的预测能力，也包括对已经发生的扰动做出响应的能力。而在系统中安放大量的监视传感器并把它们连接到一个安全的通信网上去，是做出快速预测和响应的关键。

快速仿真与模拟（fast simulation and modeling, FSM）是高级配电运行的核心，其中包括风险评估、自愈控制与优化等高级软件系统，为智能电网提供数学支持和预测能力，以期达到改善电网的稳定性、安全性、可靠性和运行效率的目的。配电快速仿真与模拟（DFSM）通过高性能传感、测量、通信系统得到拓扑结构、潮流分布、频率、电流、电压等运行参数和设备的状态参数及实时动态模型等，然后据此进行在线实时状态评估和建模分析、最后确定当前系统的安全稳定性及最优运行方式的解，主要涉及：快速安全计算方法、判据和控制策略；高性能计算方法和设备，包括分布式计算、云计算、网络计算、海量存储、系统容错；快速仿真建模和超短期潮流分析；人工智能技术，如分布式智能代理（Agent）、自组织网络技术、虚拟现实技术；人机交互界面及其内核，融合多媒体、计算机图形学、数据库设计等。

快速仿真与模拟需要支持四个主要的自愈功能：网络重构；电压与无功控制；故障定位、隔离和恢复供电；当系统拓扑结构发生变化再整定。这些主要功能相互联系，致使配电快速仿真与模拟变得很复杂。

高级配电运行中的高级配电自动化（ADA）是智能电网实现自愈的基础。与传统配电自动化相比，高级配电自动化是革命性的。因为它是用于电力交换系统的（由于分布式电源上网运行，而使配电网支路上的潮流可能是双向的），其中将使用电力电子、信息、分布式计算与仿真方面的新技术；同时，高级配电自动化可为用户提供新的服务。

2.2.3 高级输电运行

高级输电运行强调阻塞管理和降低大规模停运的风险，高级输电运行同高级量测体系、高级配电运行和高级资产管理的密切配合实现输电系统的运行和资产管理优化。

输电网是电网的骨干，其技术组成和功能如下：①变电站自动化。②输电的地理信息系统。③广域量测系统。④高速信息处理。⑤高级保护与控制。⑥模拟、仿真和可视化工具。⑦高级的输电网络元件，如电力电子（灵活交流输电，固态开关等）、先进的导体和超导装置。⑧先进的区域电网运行，如提高系统安全性，适应市场化和改善电力规划和设计的规范与标准（特别注意电网模型的改进，如集中式的发电模型以及受配电网和有源电力用户影响的负荷模型）。

2.2.4 高级资产管理

高级资产管理是在系统中安装大量可以提供系统参数和设备（资产）“健康”状况的高级传感器，并把所收集到的实时信息同资产优化运行、输、配电网规划、工程设计建造与维护、客户服务、工作与资源管理、模拟与仿真等过程集成。高级资产管理与高级量测体系、高级配电运行和高级输电运行的集成将大大改进电网的运行和效率。

远程资产监视和控制系统通过传感装置，监测电力设备状态数据，掌握电力设施是否在最佳工况运行、是否超出了额定运行范围以及电力网络的潮流是否最优；根据监测数据，对设备状态进行评估，判断可能出现的故障（比如通过对变压器油温、油色谱监测，判断是否出现绝缘裂化）；根据传感装置采集的数据，控制中心调整网络结构和运行方式，减少问题设备的负荷，并提示运维人员设备可能存在的不安全因素；依据设备状态，帮助运维人员优化设备检修和设备更换时机，减少维修成本和停电时间。

此外，在输电线路路上安装传感器，监视线路走廊附近的树木和植被与电力线路的距离，这些数据有助于预测可能发生的故障和调度作业人员到可能发生事故的地点。同样的，在终端用户处安装智能表计，能够帮助故障快速定位，缩短停电时间，提高供电服务水平。远程资产监控与资产管理

系统之间进行信息集成，能够实现设备监视、分析、维修等全过程管理。

3 国外智能电网研究与发展

智能电网是利用新技术对传统电网的升级改造乃至重构。早在上世纪 80 年代，属于智能电网技术范畴的一些技术已经逐渐被引入到实践之中，电子控制、计量和监控已经开始得到应用，例如针对大型用电客户的自动化读表，到上世纪 90 年代逐渐发展成为高级量测体系。此后，不断有更新的技术被引入到电网建设中来。因此，智能电网作为一个概念虽然是最近一年多来才受到极大的关注，但与之相关的众多技术则是早已得到发展并在不同的层面上陆续得到应用。21 世纪以来，一些发达国家开始注意到传统电网存在的问题，将以智能化为特征的电网建设纳入到国家能源发展规划之中。而随着 2008 年全球经济危机的爆发，为刺激经济、提高就业率，同时以此为契机加快能源基础设施更新改造，美、欧、韩、日等国纷纷加大了智能电网建设的力度，并投入大量公共资金予以扶持，使得智能电网研发与产业呈现出繁荣景象。

3.1 智能电网理论与规划

电网的智能化是一个多种新技术、新方案、新规划不断融合演进的过程，在这个过程中，国家的社会经济结构、能源供应与消费结构以及现有电力网络都对智能电网的建设提出了不同的要求。例如美国和欧洲的电网就存在着本质上的不同。这就需要在前期做好理论上的系统探索和规划，为未来电网的建设提出最佳的实现路径。

3.1.1 美国：技术先导下的国家大电网

美国是智能电网准备最为充分、计划最为系统、推动最为有力的国家。从理论研究到实践探索都积累了丰富的经验。

(1) EPRI 的“Intelligrid”概念

美国电力科学研究院（EPRI）是智能电网研究的先行者之一，早在 1998~2002 年间，EPRI 即启动了“复杂交互式网络/系统”（CN/SI）研究，试图为电网开发一个中央神经系统，提高调度员对电网事故的预判能力。2001 年，EPRI 系统地开始了对智能电网的研究，并将其称为“Intelligrid”（智慧电网）。这个项目的目的是创建一个将电力与通信、计算机控制系统集成起来的架构的技术基础，2004 年 EPRI 公布了《Intelligrid 用户指南与建议》、《Intelligrid 功能需求》、《Intelligrid 模型》以及《Intelligrid 技术分析》等一系列文档，并提出了公开的智慧电网架构（Intelligrid Architecture），为公用事业机构提供了参照实施的方法、工具和与标准和技术相关的建议（图 4）。此外，EPRI 也开展了对快速仿真与模拟、分布能源资源通信协议、消费者门户相关的研究。

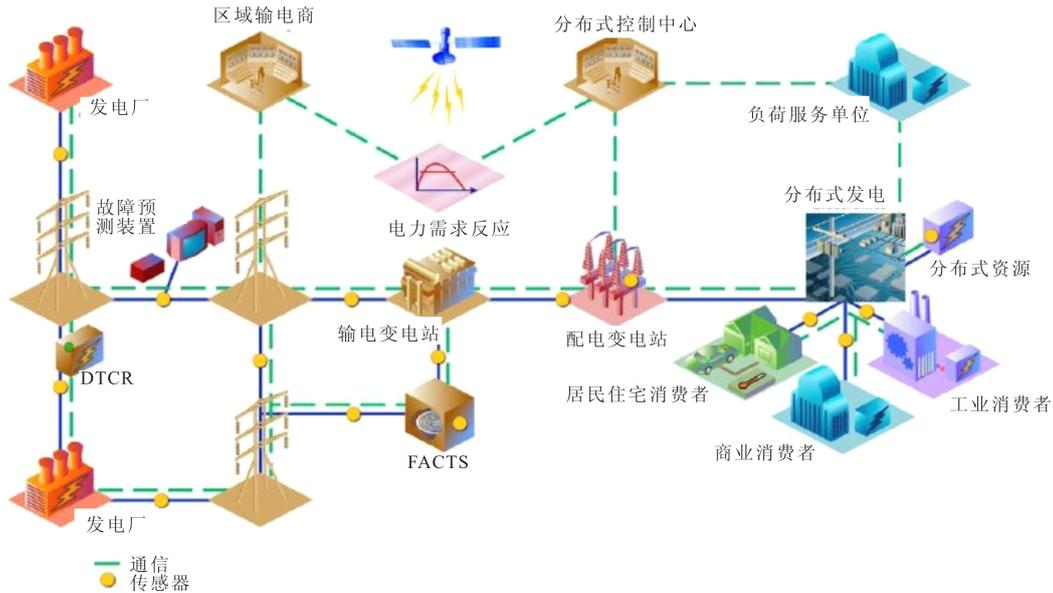


图4 EPRI 的智慧电网架构

资料来源:EPRI, 2004

(2) GRID 2030

2003年初,美国政府根据前两年对能源和电力问题研究的一系列成果,包括国家能源政策发展组报告(2001年5月)、《国家传输电网研究》(2002年5月)和电力咨询委员会部长报告(2002年9月),感到有必要对国家电力传输系统进行现代化改造,以保障国家经济安全和国家整体安全,并于2003年4月由能源部召集了来自电力企业、设备制造商、信息技术厂商、联邦政府有关部门、大学和国家实验室的65名资深人士,共同探讨美国电网的未来,并归纳形成了题为《Grid 2030》的报告,其副标题是“电力第二个百年的国家愿景”,报告指出要建设现代化电力系统,以确保经济安全,同时促进电力系统自身的安全运行。其要点包括:为所有用户提供高度安全、可靠、数字化的供电服务;在全国实现成本合理、生产过程无污染、低碳排放的供电;经济实用的储能设备;建成基于超导材料的骨干网架。

《Grid 2030》中提出要将美国电网建设成为由全国性骨干网、区域电网、地方配电网和分布式微型电网构成的综合性电网。骨干电网由许多新技术构成,它包括运行于交流同步电网可控的、特低阻抗的超导电缆及变压器,形成区域间互联的高压直流输电设备,以及支持实时运行和国家电力信息网。

新型电网确保对每个用户及每一网络节点的监视和控制,形成从电厂到用电器之间双向的电力潮流及信息流。通过分布智能、宽带通信、监视和控制以及自动响应,使楼宇、工业过程与电力网络之间实现无缝连接,可进行实时的市场交易。传感器和控制系统将大楼或工厂内的电气设备与配电系统连在一起。

现代化的国家电网将信息技术与电力技术的高度整合,将使信息安全保护得到加强。对电气设备跳闸的快速检测及自动响应和快速的系统恢复,将改善电网的安全性,使电网具有抵御恐怖活动物理攻击的能力。同时还将推动可再生能源技术的应用,如风力发电、水电、地热发电的输送。

《Grid 2030》是一份具有里程碑意义的重要文献,它首次从国家战略的高度对电网的远景进行了全面系统地规划和阐述,之后美国智能电网的建设部署实际上都源自于此。

(3) 国家输电技术路线图

为实现《Grid 2030》的目标作好战略部署,美国能源部于2003年7月再次组织电力行业的利益相关方集会讨论,探讨如何实现美国电力传输系统的现代化。这次会议讨论的结果体现在2004年发布的《国家输电技术路线图》(National Electricity Delivery Roadmap)中,总结了实现电网现

代化的主要问题和挑战，以及为打造美国未来电力传输系统，政府和电力行业所应采取的实现路径。

路线图中提出通过五种关键途径来实现《Grid 2030》愿景，包括：设计“Grid 2030”体系结构；开发关键技术；加速市场接受度；加强电力市场运作；建立更强有力的公共和私营之间的合作关系。具体实施路径见图 5：

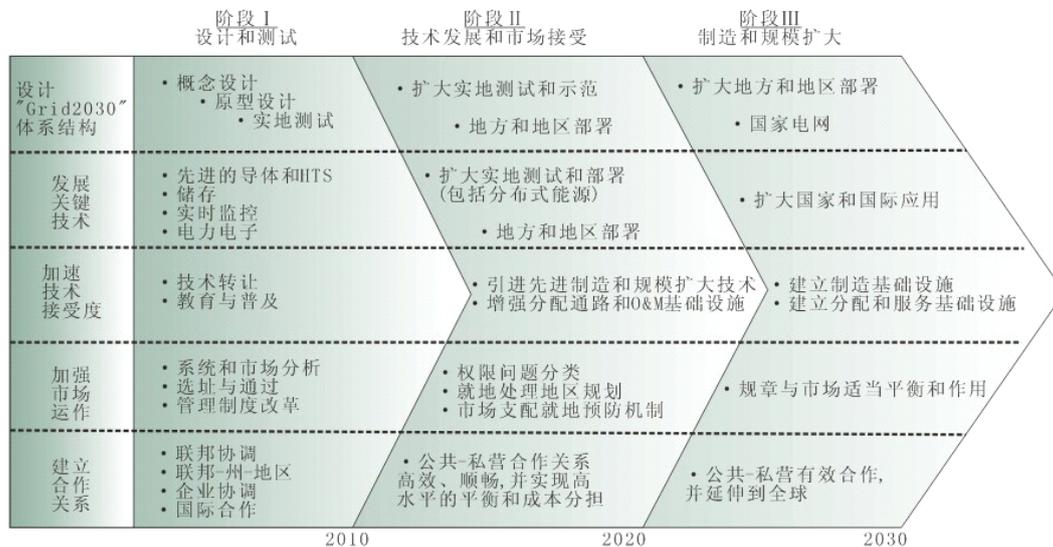


图 5 美国国家输电技术路线图实施途径

资料来源：DOE, 2004

《国家输电技术路线图》中详细介绍了实现国家电网现代化需要开展的一系列活动，但还有一些问题没有涉及到，比如，保障这些活动能顺利完成的具体细节、截止日期以及所需要的资源等。

(4) 智能电网系统报告

随着 2009 年美国政府对大规模开展智能电网研发和建设，能源部于当年 7 月公布了《智能电网系统报告》(Smart Grid System Report)，全面检视了全国智能电网部署状况以及部署过程中存在的监管或政府方面的阻碍。报告指出许多智能电网的功能还只是刚刚呈现，各种技术如智能量测、自动化变电控制和分布式发电增长迅速。报告还指出智能电网是一种社会化转型，如同 Internet 或移动通信，具有极大改变当前电力现状的潜力。但物质和信息安全及信息隐私需要消费者、制造商和公用事业机构紧紧跟随电网的变化。

3.1.2 欧洲：分散化的区域大电网

欧盟国家一贯重视环境保护和绿色可再生能源，其能源政策对电网发展方向具有重大影响。欧盟理事会在 2006 年的绿皮书《欧洲可持续、富竞争力和安全的能源战略》(A European Strategy for Sustainable, Competitive and Secure Energy) 中指出欧洲已经进入一个新能源时代。欧洲能源政策最重要的目标之一是保障供电的可持续性、竞争性和安全性，并需要通过制定一系列政策来实现。欧洲电力市场和电网必须面对这些新的挑战，未来整个欧洲电网必须向所有用户提供高度可靠、经济有效的电能，充分开发利用大型集中发电机和小型分布电源。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。

由于欧盟的能源政策重视发展风能、水电、太阳能和生物质能等可再生能源。在其引导下，欧洲的电力发展模式是向分布式发电、交互式供电的智能电网过渡。这种结构的电网管理必须建立在电网信息化系统之上，特别是低压供电电网的信息化控制、流量平衡控制、网内分布式能源智能管理与控制系统、智能保护系统等，因此其电网的发展目标是可靠、高效和灵活。

(1) 智能电网技术平台

为促进智能电网的规划与发展，欧盟 2005 年成立了智能电网技术平台 (SmartGrids European

Technology Platform), 先后发布了《欧洲未来电网愿景与战略》(2006)、《欧洲未来电网战略研究议程》(2007)、《欧洲未来电网战略部署方案》(2008) 三份重要文件。从中可以看出, 欧洲智能电网研究主要体现在网络资产、电网运行、需求侧和计量、发电和电能存储四个方面, 主要涉及智能配电结构、智能运行、电能和用户适应性、智能电网管理、欧洲智能电网的互用性、智能电网的断面潮流问题等。

欧洲的智能电网具有以下特性:

一是柔性 (Flexible), 满足用户需要; 二是易接入 (Accessible), 保证所有用户的连接通畅, 尤其对于可再生能源和高效、零碳或低碳排放的本地发电; 三是可靠 (Reliable), 保障和提高供电的安全性和质量; 四是经济 (Economic), 通过改革及竞争调节实现最有效的能源管理。

欧洲未来电网的发展依托自然、分散的电源, 电厂自主发电或进行高度集中的网络管理。在欧洲未来电网中, 有大的发电厂, 同时还有大量分散的、太阳能的或家庭用的冷热电联产 (CHP) 装置。在这种电网结构下, 储能和电能质量控制技术的发展显得非常重要。

欧洲未来智能电网结构如图 6 所示。

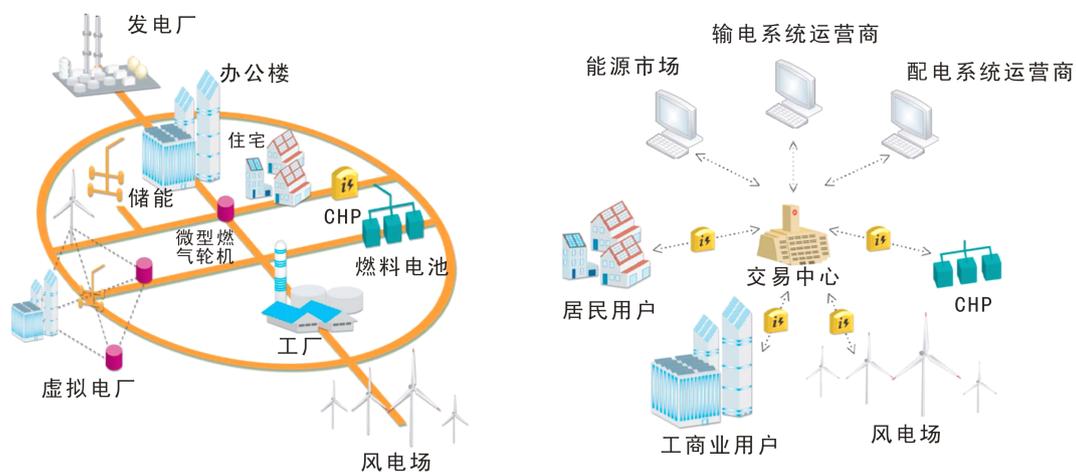


图 6 欧洲智能电网示意图

资料来源: European Technology Platform SmartGrids, 2006

(2) 欧洲智能电网技术路线图

2009 年 10 月, 欧盟公布了战略能源技术计划 (SET-Plan) 的技术路线图, 以加速低碳技术的发展和大规模应用, 其中将智能电网作为第一批启动的六个重点研发投资方向之一, 并以 HVDC 为中心, 从电网的技术、规划架构、需求侧参与和市场设计四个方面提出了 2010 至 2020 年的技术发展路线。其战略目标是: 到 2020 年实现 35% 的电力输配来自于分散的和集中的可再生电力, 到 2050 年实现完全的除碳化; 将国家电网纳入一个基于市场的泛欧大电网中; 保障为所有消费者提供高质量电力并使其主动参与提高能源效率; 发展电气化交通等新领域。为此, 公共和私营部门应投入经费 20 亿欧元。

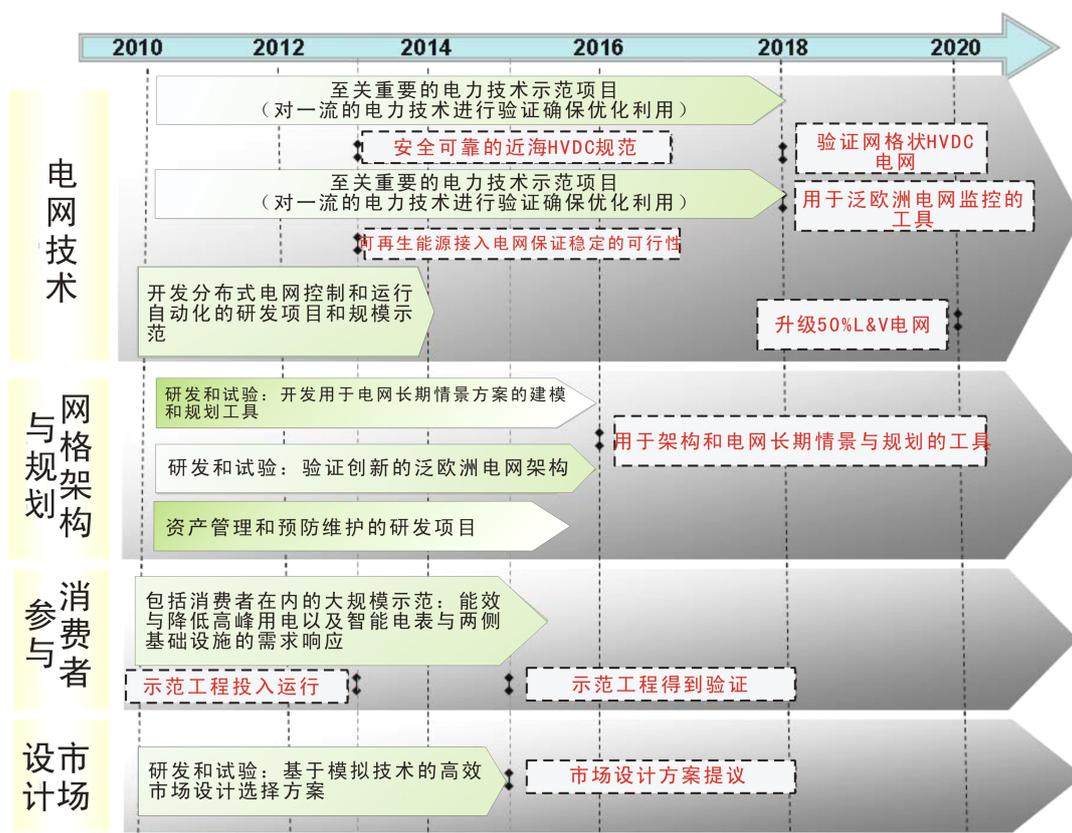


图7 欧洲智能电网技术路线图

资料来源：Strategic Energy Technology Plan, 2009

(3) 欧洲“超级智能电网”

2009年7月，欧盟联合研究中心（JRC）提出了发展欧洲“超级智能电网”（SuperSmart Grid）的设想，目标是支撑远距离输电和供电的去中央化，到2050年最终实现全面的可再生能源系统。这个电网分为两个部分：建设可使可再生能源电力远距离传输的大规模电网，即“超级电网”（Super Grid）；建设整合从分布式和小型装置产生的去中央化的可再生能源的“智能电网”（Smart Grid）。这两者相结合即产生了“超级智能电网”。这种电网具有在广阔区域输送电力并与小型、分布式发电装置联接的能力，能够抵消大范围内的任何电网波动。

研究人员认为，欧洲要实现到2050年削减60%~80%温室气体排放的目标，就需要建成完全由可再生能源构成的电力系统。在北非沙漠地区建设太阳能热发电站并输送到欧洲大陆是一种可行的方法，除该地区的条件对太阳能热发电来说具有更好的成本效益之外，还可以使能源进口更加多元化，增强能源安全。

由于交流线路需要增加绝缘且难以控制，超级电网的主干将采取高压直流技术（HVDC），可以最小的损耗进行远距离输电。

3.2 智能电网的早期实践

目前，系统、完整地将智能电网技术用于实践的范例尚不多见，且大多应用于中小城市，验证示范的性质较为明显。

意大利Enel电力公司实施的Telegestore项目是世界上最早也是至今规模最大的智能电网，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2.6亿次远程抄表、1200万次远程管理操作。每块智能电表费用70欧元（包含相关后台系统和安装调试费用）。该项目投入21亿欧元。安装该系统后，每年可实现节约管理成本5亿欧元，实际管理线损由3%降低到1%，客户服务成本降低40%以

上。

美国 Xcel Energy 公司从 2008 年起在科罗拉多州的一个 9 万人的小镇 Boulder 建设全美第一个“智能电网”城市，先进的智能电网将通过一个应用更广的自动化系统提供更多技术服务，在操作、环保和财务等方面给消费者更多便利。其主要技术路线是：构建配电网实时高速双向通信网络；建设能够远程监控、准实时数据采集和通信，以及优化性能的“智能”变电站；安装可编程居家控制装置和全面自动化居家能源使用所必需的系统；并整合基础设施，支持小型风电和太阳能发电、混合电力汽车、电池系统等分布式发电储能技术。第一阶段的智能电网建造将持续到 2009 年。经过对试验结果和技术的评估，智能电网技术将被推广到 Xcel 服务的其他 8 个州。这是当前国际上最为系统的“智能配用电”实践。

美国德克萨斯州 Austin Energy 公司从 2003 年开始在本地部署智能量测装置，到 2009 年 8 月已安装智能电表 41 万个。2007 年实现了将原来的单向自动抄表网络升级为双向高级量测体系。2008 年相继部署测量数据管理系统（MDM）和配电管理系统（DMS），2009 年对 SCADA/EMS 和计费系统进行了升级，并开始筹划电动汽车试点项目。

美国德克萨斯州 Oncor 公司 2008 年 8 月制定先进量测系统（AMS）计划，到 2012 年之前在该公司服务地区内安装 300 万个智能电表，并部署室内显示装置，同时开展消费者教育项目。这一计划得到了德克萨斯州公用事业委员会的批准。Oncor 公司还安装了世界上规模最大的静止无功补偿器群（SVCs），这种仪器能够提供更大的电流负载，可提供高速电压支持并显著增加传输容量和效率，有助于对电网的控制和快速反应。

美国南加州爱迪生公司于 2007 年在 Inland Empire 地区设计并安装了智能化的地区电路，称为“未来电路”（Future Circuit），为该地区的 1420 户居民和商用客户提供电力。美国能源部为这一项目提供了约 100 万美元的研发经费。“未来电路”项目的核心是数字系统控制器，能够识别、分析并隔离电路问题。先进光纤通信系统能够使电网的运营商能够更快速地响应电路环境的变化。项目还在美国首次应用了故障电流限流器。南加州爱迪生公司并于 2008 年 9 月启动“SmartConnect”计划，准备在 2009-2012 年间为本地居民和小企业用户安装 530 万个智能电表。这一计划获得加州公用事业委员会 16.3 亿美元支持，由地方税中拨付。该公司还计划实验并网电气交通技术，包括机场、港口、汽车站和 Plug-in 电动汽车。

3.3 智能电网研发计划与项目

尽管 2003 年以来对智能电网系统理论探讨的逐步深入，实践活动也逐渐展开，但 2009 年以前，智能电网的发展仍处于相对平缓的阶段，美国和欧盟分别部署了一批相关的研发性工作，但投资额度并不大，对其未来发展的推动作用也并不明显。但 2008 年下半年以来，美国次贷危机引发的全球性经济危机迅速发展，导致全球经济衰退。作为实体经济组成部分的能源行业也深受影响，主要体现在全球能源需求减少、油价大幅下跌、可持续能源投资锐减等。为刺激经济复苏，美国、欧盟、日本和中国等世界主要经济体都希望通过绿色产业革命来带动经济恢复，使全球经济走上低碳可持续发展的轨道。许多国家不约而同地都在经济刺激方案中将清洁能源放在重要地位，希望藉此主导未来社会发展模式。对此，能源基础设施的建设被放到优先地位，智能电网得到了大力提倡和积极发展，一些国家将其提升到国家能源、环境与经济可持续发展战略的高度来全力推行。美国更是在政府主导下，率先投入巨资支持相关技术的研发、示范和部署。因此，2009 年可称为“智能电网年”。

3.3.1 美国

（1）电力基础设施战略防护系统

为了使美国电网达到现代化，保证经济安全和国家安全，从 1999 年起，由美国国防部牵头，组织了 EPRI 和华盛顿大学等机构参与，投资 3000 万美元开发电力基础设施战略防护系统（strategic power infrastructure defense system, SPID）。该系统采用 AO 技术的 3 层 Multi-Agent 结构：底层为反应层（包括发电、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)。主要功能有脆弱性评估(电力和通信系统的快速在线评估)，故障分析(隐藏故障监视)，自愈战略(自适应卸负荷、发电、解列和保护)，信息和传感(卫星、Internet、通信系统监视和控制)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。项目前期工作历时5年，整个项目将于2025年完成，最终达到具有承受、应对各种意外及快速恢复的自愈能力。

(2) GRIDWISE 与 GRIDWORKS

在《Grid 2030》和《国家输电技术路线图》的指导下，自2003年起，由能源部牵头组织开展了一系列工作，主要包括：

①创立美国智能电网联盟(GridWise Alliance)，推动并优化政府与企业之间就电网系统发展进行互动。美国智能电网联盟最初由7家电力公司组成，目前已经发展成为拥有一百多家会员，涵盖整个能源供应链的行业组织，这使得该组织在智能电网领域有了举足轻重的发言权，从而成为现今北美地区最具影响力的智能电网行业联盟。联盟成员类别包括：监管部门、公用事业单位、电网运营商、发电集团、电力设备供应商、智能控制供应商、通信设备供应商、软件咨询企业、大学院校、研究机构以及投资基金等。其中大型科技公司如思科、谷歌、通用电气等占24%，小型科技公司与软件公司分别占会员比例的21%与11%，而传统的电力公司只占19%。会员的分布和组成充分概括了目前智能电网发展的行业趋势，科技公司以及软件企业是智能电网发展的最大最积极的幕后推手，也将是最大的受益者之一，因为它们出售的不仅仅只是输电设备或者智能电表，而是系统的解决方案。联盟日常工作主要有两个方面，一是与联邦与州政府的决策层以及行业监管机构沟通与互动，为智能电网政策层面的发展提供建议和反馈意见；二是教育宣传，提高公众对智能电网的认知，使其了解并接受智能电网可带来的多重益处。

②启动GridWise和GridWorks研发项目。2004年，能源部和智能电网联盟签订了《GridWise行动计划》(GridWise™ Action Plan)，并在2005财年预算中对GridWise和GridWorks研发项目予以拨款支持。

GridWise项目由美国能源部和电网智能化联盟(GridWise Alliance)主导，通过向现有的电力基础设施中安装远程通信设备、传感器和计算机装置来改进国家电网的工程，以减少电费开支，减轻电网负荷。该项目包括两个部分：一个是让消费者自主设定电器设备的使用功率和时间，从而节省电费；另一个是监控一个地区电网的使用情况，实现用电自动化。

GridWorks项目则主要关注使实验室原型技术开发能够顺利地向电力工业应用转移，从整个电力系统的全局来实现技术的商用化。GridWorks项目着重于发展以下技术：(1)先进的导体和线缆，包括直流-直流(DC-DC)技术；(2)低成本、可靠的传感器，以监测整个电力系统的电流、电压和相角；(3)更为小巧、轻便、高效率的变压器；(4)通过先进的电力电子和储能技术为电网提供更快速的保护。

简单来说，GridWise主要针对“软件”，指的是信息系统集成技术和数字技术等电力系统中的应用；GridWorks项目主要针对“硬件”，包括电缆导线、变电站、保护系统和电力电子等领域。自2007财年开始，这两个项目经费列入“可视化和控制”(Visualization and Controls)项目经费中，不单独拨款。可视化和控制研发项目旨在开发通信和控制系统，支持自适应、智能化、集成分布式能源设备的电网运行。这些技术进步将提高电力输送系统的可靠性和效率，并增强输配电设施的利用率。

③建立美国电网智能化架构委员会(GridWise Architecture Council, GWAC)，致力于促进和提升全美电力系统相关实体间的协同工作能力。

美国电网智能化架构委员会是一个独立机构，其研究范围涉及一系列相关的工作，包括能源部的电网智能化项目和EPRI推动的“智慧电网”项目，由能源部向GWAC提供有限的资助。GWAC

虽然不是能源部正式的咨询部门，但在它之下集合了一系列的专家，为未来电网架构各利益相关方协同工作提出指导原则。

(3) “现代电网计划”

2005年由美国能源部国家能源技术实验室发起了“现代电网计划”(Modern Grid Initiative, MGI)，任务是对电网现代化愿景进行细化，并力争在全国范围内达成共识。

“现代电网计划”旨在分析性能和技术差距，提出现代电网的国家定义，鼓励电力行业达成共识和调整地区技术集成项目；通过电力行业与能源部之间达成共识，加速美国向现代化电网发展。

“现代电网计划”的特点主要体现在：开展项目示范先进技术，形成一套完整的技术和工艺来加速电网的现代化发展；项目参与者设计范围很广，包括国家和地区相关利益方和多个资助单位；每个项目产生的成果和经验将在地区合作者之间共享；计划从2006-2012年开展10-15个项目，并最终产出一套国家现代化电网设计规范。

项目的规划流程包括：制定现代电网的定义和愿景；分析技术和研究差距；确定技术和工艺需要；引导先进的技术项目；评估项目结果；激励部署。

“现代电网计划”的发展路线如图8。

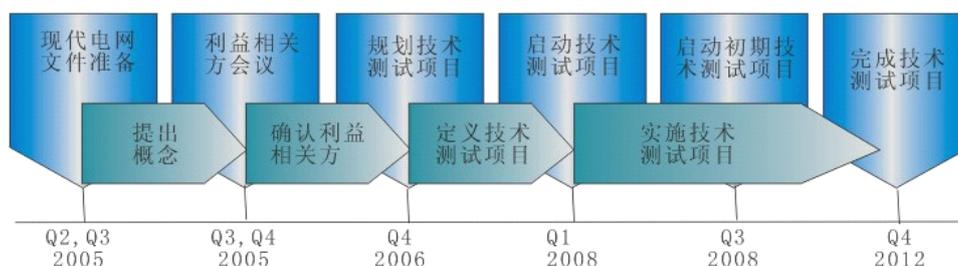


图8 “现代电网计划”发展路线

资料来源：NETL, 2006

(4) 《能源自主与安全法案 2007》

为有效促进智能电网建设，美国国会于2007年12月通过了《能源自主与安全法案2007》(Energy Independency and Security Act 2007，以下简称《法案》)，其中专设第13章《智能电网》，首次从法律上确立了国家的电网现代化政策并提出了多项措施，法案要求美国能源部在全国范围内加快智能电网技术、服务与实践的开发、示范与部署并起到核心作用。

《法案》试图解决阻碍智能电网发展和全国范围内部署的根本问题。首先是分析影响智能电网发展的法规或者政策方面的壁垒；其次通过建立全国行业标准促进智能电网在全国范围内的互操作性，第三是提供资金支持智能电网的部署。

《法案》认为各州政府和联邦政府的法规框架在智能电网部署方面存在着很多潜在的障碍。为了解决这些障碍，国会要求能源部长必须在该法案颁布一年后向国会进行汇报智能电网在全国的部署情况，并以后每两年汇报一次（即上面提到的《智能电网系统报告》），以消除法规及政府方面在智能电网发展中存在的障碍。为了协助能源部长，国会还专门设立了一个智能电网咨询委员会和一个智能电网工作组（Task Force）。

《法案》要求政府可以考虑允许在收回智能电网的投资成本的同时考虑回收淘汰的原有设备。此外，根据1307节的要求，责成各州考虑要求电力部门在计划智能电网投资时首先考虑智能电网解决方案和潜在的“社会效益”，并鼓励各州允许电力部门收回智能电网的投资成本。

《法案》中要求美国国家标准与技术研究院（NIST）研究建立一个草案和标准，保证智能电网

各个组成部分的互操作性，并指出美国国会有权在州际电力传输时使用这些标准。

《法案》中提出建立智能电网区域示范项目，以促进智能电网示范项目进行，特别是在电网测量、通信、分析和电量流量控制等先进技术的应用。联邦政府将为执行智能电网投资建设的公用事业机构提供最多 50% 的资金支持。

《法案》中还提出设立智能电网匹配拨款计划，规定对于合格的智能电网投资项目将补贴 20%。

总的来看，《能源自主与安全法案 2007》美国智能电网建设从探索到实施过程中具有重要的承上启下的意义，在加快智能电网技术的推广和电网现代化中体现了政府强有力的引领作用；首次解决了全国范围内推广智能电网的法规壁垒和互操作性标准的问题，并且提供了资金支持。2009 年美国的智能电网研发和建设热潮在相当程度是建立在这一法案的基础上。

(5) 经济刺激计划中的智能电网研发计划

美国总统奥巴马就职后，其新政目标中的一个重要组成部分就是发展智能电网产业。在总额高达 7870 亿美元的经济刺激计划中，能源被列为优先投资的第一个领域，总额为 405.5 亿美元，其中投入 110 亿美元用于“智能电网投资计划”的研究与发展以及前沿项目，计划升级电网以发挥国内可再生资源的优势，例如中西部地区的风能和西南部的太阳能，最终从降低用电成本、减少石油依赖并创造就业机会中获得最大回报。

2009 年 4 月 16 日，美国公布了能源部发展智能电网的详细规划。能源部将设立两个专项计划，分别为“智能电网投资拨款项目”（Smart Grid Investment Grant Program）和“智能电网示范项目”（Smart Grid Demonstration Projects），投资额分别为 33.75 亿美元和 6.15 亿美元。

“智能电网投资拨款项目”是为智能电网技术开发项目提供 50 万至 2000 万美元不等的资助，并为智能监控仪器开发提供 10 万至 500 万美元不等的资助。该项目为电力公用事业和其他机构实施智能电网技术的投资计划提供最高 50% 的资金匹配。项目评审在竞争性和择优基础上进行。合格的申请人包括但不限于：电力公用事业机构，输配电企业，协调或控制电网运行的机构，电器设备制造商，计划应用智能电网技术的公司。

“智能电网示范项目”主要资助以下三个领域的示范性项目：①智能电网地区示范。对智能电网成本和收益进行量化，验证技术可行性和新的商业模式。②公用事业规模储能示范。包括与先进蓄电池系统、超级电容器、飞轮和压缩空气储能系统相关的技术，风电和光伏发电集成和电网阻塞疏导的应用。③电网监控示范。支持高分辨率同步相量测量单元（PMU）的安装和联网。

每个示范项目必须与拥有电网设施的电力公用事业机构合作开展，鼓励由产品和服务供应者、终端用户、州和市级政府组成联合团队，同时项目承担方须分担至少 50% 非联邦资金。

2009 年 5 月 18 日，朱棣文宣布加强对智能电网研发项目的支持力度，单个智能电网投资项目资助最高额可达 2 亿美元，是原来的 10 倍，旨在让承担智能电网项目的公司和政府能够在比较高的起点进行；智能电网示范项目资助最高额从 4000 万美元提高到 1 亿美元。能源部的资助计划将确保多元性，包括小型项目以及端到端的大型项目。

2009 年 10 月 27 日，美国总统奥巴马宣布从经济刺激计划资金中拨出为 34 亿美元用于“智能电网投资拨款项目”，获得拨款的包括私营企业、公用事业机构、城市和制造商等。加上项目承担方的匹配资金，投资额将达到 80 亿美元，主要用于：①用户端基础设施建设，扩大智能电表的安装及相关系统（10 亿美元）。消费者可根据动态电价信息灵活管理智能家电和设施，一方面可降低电费，一方面可抑制电力峰值，降低对昂贵的备用电站的需求。②优化输配电网，资助数个电网现代化改造项目（4 亿美元）。通过安装数字监控设备，增强自动化水平，提高电网的效率、可靠性和安全性，加强可再生电力的并网能力。③智能电网组成部分的系统集成（20 亿美元），包括智能电表、智能变压器、智能调温器和电器、同步移相器、自动化变电站、电动汽车、可再生能源等。④智能电网制造工业，扩大智能电网相关设备制造业基础（2500 万美元）。

预计此次投资产生的效益包括：①创造数万个就业机会，包括智能电表制造工人、工程技术人

员、电工和设备安装工、IT 系统设计师、信息安全专家、数据采集员、数据库管理员、事务和电力系统分析员等。②安装可覆盖全美电网的 850 个同步相量传感装置，增强电网监控和调节能力以及间歇性可再生电力并网能力。安装 20 万个智能变压器和 700 个自动化变电站(占变电站总数的 5%)。③安装 4000 万个智能电表、100 万个用显示装置、170 万个智能调温器、17.5 万个负荷控制仪器，并可带动智能家电市场的增长。④降低峰值电力需求 1400 MW 以上，节省备用电站建设资金 15 亿美元。⑤带动 47 亿美元私营部门匹配投资，并有助于实现可再生能源占能源供应 20%的目标。

2009 年 11 月 24 日，美国能源部长朱棣文宣布投资 6.2 亿美元资助先进智能电网技术示范项目和综合系统，共资助 32 个示范项目，包括大规模的储能、智能电表、输配电系统监控设备及一系列其他智能化技术，这些将会成为在更广的范围部署综合智能电网的范例。资金来自《美国经济恢复和再投资法案》，私营部门将匹配 10 亿美元，总计超过 16 亿美元，资助方向分为两个领域：

第一个领域共资助 16 个项目，投资 4.35 亿美元，主要支持 21 个州的全集成、区域性智能电网。参与方包括 50 余家公用事业公司和电力企业。项目包括可以允许电网的不同部分实现实时“对话”的现代通信技术；帮助电网管理人员监控的传感器和控制设备；智能电表和室内系统；多种形式的储能技术；可再生能源并网等。

第二个领域共资助 16 个项目，投资 1.85 亿美元，主要资助实用规模的储能项目，以加强电网的可靠性和效率，同时减少对新建电厂的需求。这些储能技术有助于扩大可再生能源的整合规模，包括先进电池系统（包括液流电池）、飞轮储能、压缩空气储能系统等。

此外，美国 2010 财年预算案中规定投资智能、高效、可靠的配电基础设施，支持能源部电力传输与能源可靠局来实现国家电网的现代化，包括：能量储存；网络安全和智能电网技术的研发与示范，以加速国家能源传输和分配系统的转型；增强能源基础设施的安全和可靠性；提高电力供应中断的恢复能力。

3.3.2 欧洲

(1) 欧盟

欧盟在第五、第六和第七框架计划中支持了一系列与电力电网技术有关的研究项目。第五框架计划（FP5）（1998-2002）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，分为分布式发电、输电、储能、高温超导体和其他整合项目 5 大类，主要项目有 Dispower、CRISP 和 Microgrids。第六框架计划（2002~2006）中有一百多家机构（包括电力公司，设备制造商，高校和研究机构等）参与了这些项目，其间总预算达 3400 万欧元。这些研究项目之间既各有侧重又相互联系，内容涵盖了从理论研究、技术应用到市场开发的各个层面，构成了一个相对完整的体系结构。第七框架计划下的部分项目已经在智能电网的框架下开展了一些初步的研究工作，包括主动的配电系统、微网、虚拟的能源市场等（王成山，2008）。

表 1 欧盟框架计划中与可再生能源和分布式发电相关的主要研究项目

项目名称	起止时间	项目状态	经费预算(万欧元)	所属框架计划
SUSTELNET	2002—2003	完成	170	5th
DISPOWER	2001—2005	完成	1680	5th
MICROGRIDS	2003—2005	完成	440	5th
MORE MICROGRIDS	2006—2009	在研	780	6th
CRISP	2002—2006	完成	300	5th
DG FACTS	2003—2005	完成	360	5th
ENIRDGnet	2001—2004	完成	240	5th

INVESTIRE	2001—2003	完成	80	5th
EU-DEEP	2004—2009	在研	1500	6th
SOLID-DER	2005—2008	在研	150	6th
FENIX	2005—2009	在研	780	6th
DER Lab	2005—2011	在研	410	6th

资料来源：王成山，2008

这些项目分别从不同角度和不同层面对可再生能源利用和分布式发电技术进行了研究。从技术上讲，这些项目主要涉及以下方面的工作：①分布式发电系统本身的各种技术问题；②分布式电源并网的相关技术，包括接入标准和规范的制定，分布式发电系统对大电网的相互影响；③分布式电源及其所属网络的控制与保护策略；④分布式发电系统的能量管理与优化运行。虽然其各自的研究内容有所区分，但这些项目具有同一个目标：将可再生能源和分布式电源接入未来的欧洲电网。

(2) 丹麦

丹麦是世界上可再生能源发展最快的国家之一，可再生能源的比例已经从 1980 年 3% 的比例跃升到如今的 70%，其中风力发电占全国总发电量的近百分之二十。根据丹麦政府制定的新“丹麦能源战略”，到 2025 年风电将在全国电力系统中占 50% 的份额，并相应地将电网打造成为世界最先进的能够适应大规模可再生能源的电网。为此丹麦通过国内和国际合作积极开展研发活动，并设立了 EcoGrid.dk 项目进行协调。

丹麦电力公司 SEAS-NVE 公司从 2009 年 5 月开始为洛兰岛的家庭安装智能电表，并计划到 2011 年为该岛所有家庭（约 35 万户）安装电表。2009 年 12 月，SEAS-NVE 与松下和松下电工共同启动了旨在实现智能电网的实证实验（图 9）。计划使用 SEAS-NVE 的智能电表，可实现用电量“可视化”及住宅内照明设备远程控制等的 HEMS（家庭能源管理系统）。实验时，将采用松下集团的住宅网络系统“Lifinity”。实验分两个阶段进行。计划在第 1 阶段实现用电量的“可视化”及照明器具的远程控制。在第 2 阶段对暖气设备进行控制，并使用燃料电池及蓄电池等。

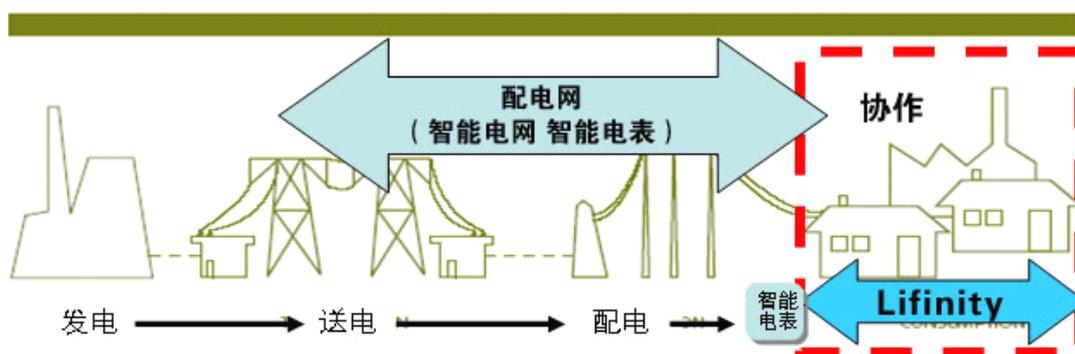


图 9 丹麦智能电网的实证实验

资料来源：清水直茂，2009

考虑到未来几年丹麦电动或混合动力汽车比例将超过 10%，电动汽车需要智能技术以控制充电与计费，并保障整个能源系统的稳定。为此 DONG 能源公司（丹麦最大的能源公司）、地区能源公司 Oestkraft、丹麦技术大学、西门子、Eurisco 和丹麦能源协会共同发起成立了 EDISON 研究集团，以发展大规模电动汽车智能基础设施，其部分经费由丹麦政府资助。

EDISON 集团计划第一步研发智能技术并在丹麦博恩霍尔姆岛（Bornholm）运行。该岛上有 4 万居民，能源结构的特点是风能占很大比例。通过试点将研究当电动车辆数量增加时能源系统如何

发挥作用。该研究以模拟为基础，不会影响岛上的供应安全。

IBM 丹麦公司和 IBM 苏黎世研究实验室的研究人员将研发智能技术，以实现电动车辆在可用的风能电网内同步充电。IBM 还将为丹麦技术大学提供一个硬件平台用于能源系统和电动车大规模实时模拟。

此外，丹麦很多公司已提出了相关的计划，这将有助于电动汽车系统的全面采用，EDISON 集团将为系统的运行解决整个端到端的过程，包括保证整个电网的稳定和支持增加可再生能源利用。EDISON 集团研发的智能技术也可应用于电网中其他种类的分布电源。

(3) 英国

2009 年 12 月初，英国能源与气候变化部 (DECC) 宣布为了构筑低碳未来，政府决定将开始智能能源系统的部署，首次提出要大力推进智能电网的建设，同期发布《智能电网：机遇》报告。2010 年初还将出台详细的智能电网建设计划。这也是英国政府旨在落实 2009 年中出台的《英国低碳转型计划》国家战略的举措之一。在报告中，英国政府指出了未来需要重点投资的领域，包括：①兼顾地理范围和实用深度的大规模示范项目，并在不同地区开展示范；②优化新发电装置与输配电网之间的连接；③了解地区需求和现有基础设施受到的影响；④收集信息以建立一个不同技术和方法成本与利益的详尽分析。

英国政府计划首先从智能电表入手。据英国能源和气候变化部透露，2020 年前，英国家庭正在使用的 4700 万个普通电表将被智能电表全面替代，这一升级工程预计耗资 86 亿英镑，在未来 20 年或可因此受益 146 亿英镑。

智能电表能够为消费者提供实时的用电和用气信息，使用者可随时了解能源的消耗量，从而主动节约能源，电力公司也可免去入户抄表的成本。而这些信息也将为智能电网提供不可或缺的数据支持，电力运营商可根据这些数据全面掌控英国的能源供需情况，及时做出调整，避免不必要的电力浪费。

英国还组建了智能电网示范基金，将在 2009/10 和 2010/11 年度为智能电表技术投入 600 万英镑科研资金，资助比例最高可达项目总成本的 25%，目前正在进行首轮项目招标。在此期间，英国煤气电力市场办公室 (Ofgem) 还将提供 5 亿英镑协助相关机构开展智能电网试点工作。智能电网将由政府全权负责，智能电表则按市场化经营，但所有供应商必须取得政府颁发的营业执照。

由能源与气候变化部和煤气电力市场办公室共同领导、包括各利益相关方代表在内的政策咨询机构——电网战略小组 (ENSG) 同期发布了《智能电网愿景报告》，揭示了智能电网如何能直接或间接地维持或增强电力供应的质量和可靠性；促进新的从工业规模到家用规模的低碳或零碳发电厂联网；使得创新的需求侧技术与战略成为可能；推动新的系列能源产品和关税制度实现以降低消费者的能源消耗和碳排放；形成整体通信系统以使整个电力系统协调运行等。报告还给出了英国直到 2050 年智能电网发展的初步路线图 (图 10)。



注: *-IFI计划指创新资金激励计划 (Innovation Funding Incentive)
RPZ计划指注册电力区域计划 (Registered Power Zones)

图 10 英国至 2050 年智能电网发展的初步路线图

资料来源: ENSG, 2009

(4) 德国

2008 年德国经济与技术部会同德国环境部制定了“E-Energy”计划, 提出利用信息与通信技术打造一个新型能源网络, 在整个能源供应体系中实现综合数字化互联以及行计算机控制和监测, 并在全国六个地区进行示范, 总投资 1.4 亿欧元。这个计划涵盖了智能发电、智能电网、智能消费和智能储能四个方面。2009 年至 2012 年进行智能电网实证实验。同时还进行风力发电和电动汽车实证实验, 并对 Internet 管理电力消费进行检测。

2009 年 4 月联邦德国环境部公布了《新思维, 新能源——2020 年能源政策路线图》, 阐述了到 2020 年德国应实现的可持续能源结构以及需采取的政策措施。其提出的整体方案的核心是进一步提高能源效率、稳步扩大可再生能源利用以及加大下一代清洁能源技术研发。路线图计划到 2015 年投资 60 亿欧元对 60 000 km 的国家电网进行智能化升级改造, 并新建 850 km 输电线路, 采用高压直流方式 (HVDC), 到 2030 年与欧洲电网实现互联。

德国联邦政府于 8 月 19 日正式通过了“国家电动汽车发展计划”(National Electromobility Development Plan), 将投资 5 亿欧元 (约合 7.051 亿美元) 建设充电站网络并大力发展电池技术, 争取到 2020 年电动汽车保有量达到 100 万辆, 使德国在日趋激烈的国际竞争中处于电动汽车产业创新的前沿。这项计划是由德国交通部 (BMVBS)、经济与技术部 (BMWi)、环境部 (BMU)、教育与研究部 (BMBF) 共同制定的。

这项计划中提出了未来十年有关电池技术、电网集成、市场准备以及市场启动的诸项措施。同时还提出了加强研发工作、增强相关工程培训能力以及在电网中将汽车电池作为移动储能单元加以集成的潜力。

(5) 法国

法国在智能电网方面的工作刚刚起步。法国计划将风电装机容量由目前的 2.5 GW 提升到 2010 年的 5 GW, 提高 100%, 到 2020 年达到 20 GW, 比目前提高 300%。法国电力公司 (RTE) 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力公司了解用电数量, 也可通过远程访问的方式直接读取计量数据。为此, 法国电力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（发票）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 RTE 公司实时出单率已经达到 99.0%。

法国配电公司（ERDF）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，法国配电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。更换工程的总投资为 40 亿欧元。

法国电力公司在美国诺福克试验一种特动态能源储存系统，使电网能够容纳北海的间歇性风电，应用 ABB 公司 SVCLight 的智能电网技术，该系统使用先进锂离子电池和超导体电力晶体管均衡连接风电场的配电网负荷，将储存风电多余电力在高峰时期使用。该项目是个协作研究、发展和示范项目，于 2009 年末投入使用。

（6）西班牙

西班牙政府于 2007 年 8 月出台相关法律，要求到 2014 年所有配电网运营商都必须安装自动抄表管理系统；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（ENDESA）在西班牙南部城市 Puerto Real 开展了智能城市项目试点，主要包含智能发电（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，共投资 3150 万欧元，由当地政府出资 25%，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 9000 个用户、1 个变电站以及 5 条中压线路、65 个传输线中心。

3.3.3 日本

与欧美等国不同，日本的电网基础设施相对完善，从发电到输配电网已建起了现代化的传感器网络与通信网络。因此日本更多的是将注意力放在以太阳光能、风能、核能发电为主的大规模新能源并网系统以及与之相适应的输电网和储能系统（图 11）。日本经济产业部副部长望月晴文指出，日本将根据自身国情，主要围绕大规模开发太阳能等新能源，确保电网系统稳定，构建智能电网。

根据 2009 年 7 月日本电气事业联合会发布的“日本版智能电网开发计划”，日本将重点研究太阳能发电预测系统、高性能蓄电池系统、火力发电与蓄电池相组合的供需控制系统。日本电力中央研究所并设立了“智能电网研究会”，主要研究太阳能发电接入电力系统的影响及对策问题以及“日本版智能电网”的整体状况。

日本经济产业省在 2010 年度预算申请中列入 55 亿日元（约合 4 亿元人民币）作为新一代电网系统的开发援助费用，以支持研发智能电表和蓄电池技术，并进行新一代电网系统的实证试验。此外还设立了“智能电网国际标准学习会”，探讨相关的标准问题。

在经济产业省的支持下，九州电力与冲绳电力两家企业将在九州及冲绳的岛屿地区开展“岛屿微电网”试验项目。该项目将利用资源能源厅的“岛屿独立型系统新能源导入验证事业费补助金”，安装太阳能发电装置以及锂离子电池蓄电设备，对电力系统与可再生能源的联动进行验证，调查分析光伏发电并网后对输电系统负荷的影响，并计划在东京近郊开展类似的试验。

3.3.4 韩国

韩国政府计划在未来 20 年内将绿色能源的比例由 2.4%提高到 11%，智能电网将是这项工作的一部分。韩国知识经济部决定 2009~2012 年将投入 2547 亿韩元开发商用化技术，在发电站、输电设备和家电产品上安装传感器，称为“绿色电力 IT”。其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、智能型输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、电缆通信技术等。2009 年 3 月韩国宣布计划到 2011 年完成一个智能电网综合性试点项目，并与韩电 KDN 公司签署了绿色电力信息商用化技术开发协议。

2010 年 1 月，韩国知识经济部宣布了一项 27.5 万亿韩元的智能电网最终计划，在主要城市中推广低碳基础设施建设，建立智能、可靠、绿色的能源网络。政府在研发、市场开拓和公共基础设施建设方面初期将投入 2.7 万亿韩元，其余 24.8 万亿由公用事业机构和私营部门提供。作为试验工程，

韩国政府还计划到 2011 年建设 200 个 PLUG IN 电动汽车充电站。

3.3.5 澳大利亚

澳大利亚由国家电力委员会从 2007 年开始在全国范围内推行高级量测体系项目，引入分时电价（基于时间间隔计量）。澳大利亚政府推行电力市场的改革不仅仅是为了提高供电效率，而且通过改善电价制度，提高对能耗的控制以及减少温室气体排放，此项目正在进行中。

澳大利亚政府在 2009 年预算案中划拨 1 亿澳元（约合 7600 万美元）用于智能电网建设。这项针对“国家能源效率提案”的拨款将提供给由联邦政府、各州当地政府、公立或私营的能源公司、以及私人投资团体共同组建的联合机构旨在将宽带技术与智能电网网络及居民家中的智能表计结合起来，在澳大利亚全国范围内发展创新型的、以智能电网为基础的能源网络。

3.4 智能电网标准的制定

开放、统一、互操作标准是智能电网发展的关键因素。智能电网将对能源利用带来革命性变化，但需要制定统一的标准保证新技术在信息空间安全层次上的兼容性和可操作性。互操作标准是使不同开发商的软硬件无缝共同工作所必须的；信息安全标准则是保护多样化的系统网络免受自然或人类活动引起的破坏。目前，以国际电气和电子工程师协会（IEEE）、国际电工委员会（IEC）和美国国家标准与技术研究院（NIST）等组织机构都在加紧制定与智能电网相关的国际标准。

IEC 已制定了 IEC 60870-6、IEC 61850、IEC 61968、IEC 61970 和 IEC 62351 part1-8 等与信息安全和电力系统控制相关的标准，根据智能电网发展的需要，IEC 启动了“智能电网框架计划”，并成立了国际智能电网标准战略工作组（IEC SMB SG3），于 2009 年 5 月发布了初步的智能电网标准清单（框架 1），目前正在讨论分析阶段。2009 年 5 月 IEC 在巴黎召开由包括中国在内的 13 个国家专家参加的会议，讨论了 IEC 在智能电网标准中应起的作用，并正在开发一个门户网站，拟建立包括 IEC 制定的所有智能电网相关标准的数据库，方便用户使用。

IEEE 同样在致力于为智能电网制订一套完备的标准。IEEE 已制定的智能电网相关标准有 66 项，正在制定中的有 35 项。2009 年 5 月 4 日，国际电气与电子工程师协会宣布了《IEEE P2030 指南：能源技术及信息技术与电力系统（EPS）、最终应用及负载的智能电网互操作性》项目。通过开放标准进程，IEEE P2030 指南将为理解和定义智能电网互操作性提供一个知识基础，帮助电力系统与最终应用及设备协同工作，为未来与智能电网相关的标准制定建立基础。

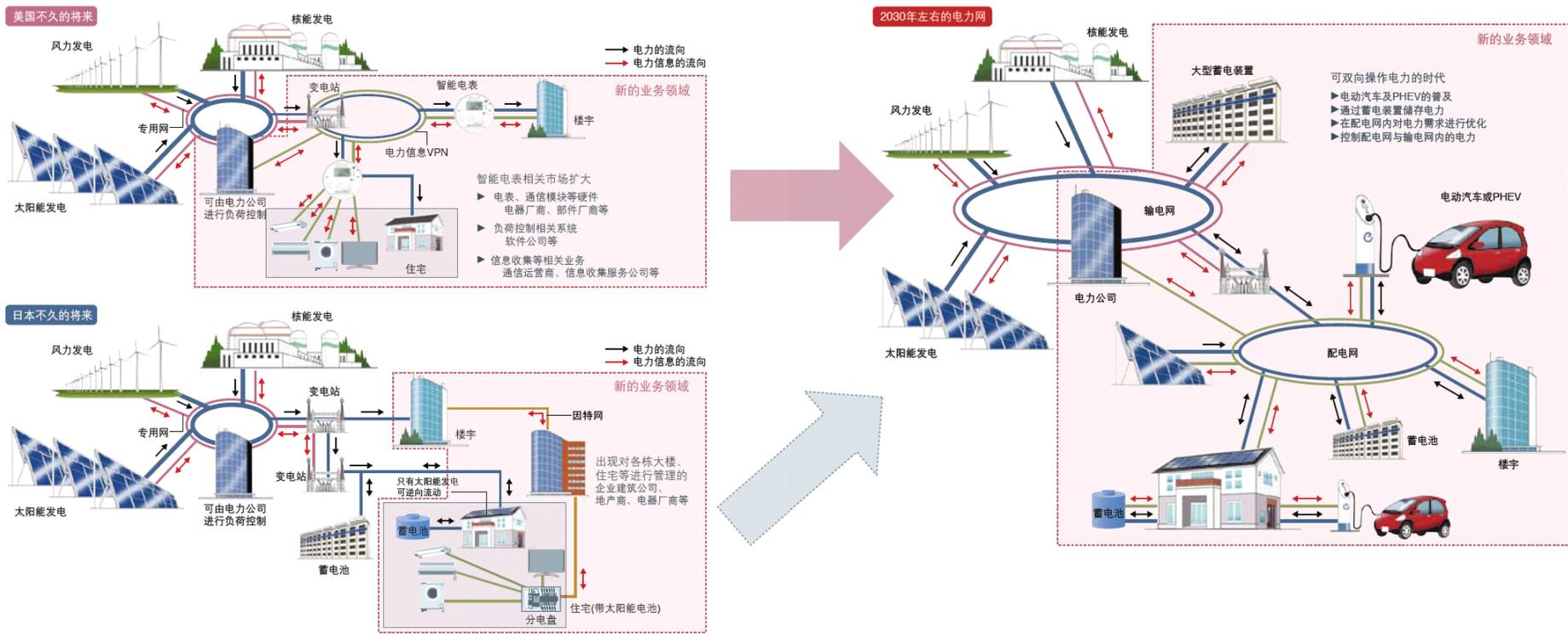


图 11 日本特色的电力基础设施发展计划

资料来源：蓬田宏树, 2009

根据《能源自主与安全法案 2007》，NIST 负责牵头标准的制定工作，并成立了 6 个工作组，能源部给予了 1000 万美元资助。该机构将智能电网关键标准的制定分为三个阶段：

第一阶段的目标是促使公用事业机构、设备供应商、消费者、标准开发者和其他相关各方就智能电网标准达成一致。这个过程包括 2009 年 5 月 19~20 日在华盛顿召开的大会。到 2010 年秋初预期完成：智能电网架构；优先完成互操作和信息安全标准，以及一套支持实施的初步标准；其他标准需求的规划。

第二阶段是发起成立一个正式伙伴关系组织，协调其他标准的开发，解决遗留问题和新技术的集成。

第三阶段是到年底前制定测试和检验计划，保证智能电网设备和系统符合安全和互操作相关标准。

2009 年 5 月美国能源部和商务部联合召开由相关组织机构和工业部门参加的智能电网会议，讨论智能电网行业标准问题。同月，美国商务部长骆家辉和能源部长朱棣文联合宣布了第一批 16 个智能电网协同性与安全性的行业标准（表 2）。

NIST 并与 EPRI 达成协议，共同制定一份智能电网架构标准路线图。2009 年 6 月，EPRI 向 NIST 提交了《关于智能电网互操作标准路线图的报告》，报告指出，就下一代电网的可靠、可互操作的架构达成一致并非一个简单的过程，对现有技术标准和国家智能电网相关问题的理解还是不完整和狭隘的。报告主要针对可构成智能电网的关键部分确定了大约 80 项已有的或正在制定中的标准，包括四个优先领域：广域状态告警、需求响应、电力储存与电力传输。美国国家标准与技术研究院将利用此路线图起草其《智能电网互操作框架》，描述高层架构并确定首批已有的关键标准予以支持，并将制定有关新标准或修订标准的策略。

表2 美国首批16个智能电网行业标准

标准	应用
AMI-SEC 系统安全性需求	高级量测体系和智能电网端到端安全性
ANSI C12.19/MC1219	收益量测信息模型
BACnet ANSI ASHRAE 135-2008/ISO 16484-5	建筑自动化
DNP3	变电和馈电设备自动化
IEC 60870-6 / TASE.2	内部控制中心通信
IEC 61850	变电自动化与保护
IEC 61968/61970	应用层面能源管理系统界面
IEC 62351 Parts 1-8	电力系统控制操作的信息安全
IEEE C37.118	相量测量（PMU）通信
IEEE 1547	电力公司与分布式发电（DG）之间的物理与电气互联
IEEE 1686-2007	智能电子设备（IEDs）的安全
NERC CIP 002-009	大型电力系统的网络安全标准
NIST Special Publication (SP) 800-53, NIST SP 800-82	联邦信息系统的网络安全标准与指南，包括大型电力系统
开放自动需求响应（Open ADR）	价格反应灵敏和直接负载控制
OpenHAN	家庭区域网（HAN）设备通信、测量和控制
ZigBee/HomePlug Smart Energy Profile	家庭区域网设备通信和信息模型

资料来源:DOE, 2009

智能电网发展中的一个问题是在实施这些标准时如何保持对知识产权的保护。根据标准制定的详细条款,可能会出现两种类型的标准:开放的,非专有的行业标准和半开放式的行业标准。与开放标准不需缴纳使用费不同,半开放的标准要求对知识产权提供合理、平等的保护,其中包括合理费用。通过在智能电网各个组成部分采用开放或半开放式的行业标准,可以促进供应商之间的竞争和互操作,降低供应商垄断的风险。电力部门和最终用户将受益于这种较易接受的行业标准。与开放标准的个人电脑行业类似,智能电网涉及的公用事业机构、企业和消费者都希望有统一的标准而不必担心兼容问题。根据这些标准,智能电网的子组件(如智能家电、智能仪表和分布式能源)可以来自不同的供应商并且可以实现互操作,使供应商之间的竞争促进智能电网技术的创新。

4 我国智能电网的发展现状

4.1 发展基础

我国关于智能电网技术和规划方面的研究已有了一定的基础。两大骨干电网企业在运营管理和技术研发上已积累了丰富的经验。20世纪80年代以来,我国电网的自动化、信息化发展很快,电网调度自动化、发电厂生产自动化控制系统、电力负荷预测与控制、计算机辅助设计、计算机仿真系统等在电力工程领域得到了广泛应用,在线路保护、继电保护、主设备保护等电网安全领域已达到国际先进水平。在智能电网基础数据采集、传输、执行机构研制上与国外处于同一起跑线。通信网络上已实现以光纤和数字微波为主,卫星、电力载波、电缆、无线等多种通信方式并存且基本覆盖全国,电力专用通信网已初具规模。电力信息化系统建设发展迅速,如数据采集与监控系统、分散控制系统(DCS)、配电管理系统、能量管理系统(EMS)、相量测量单元/广域测量系统(PMU/WAMS)等不断升级。“十一五”期间,国家电网公司开始实施“SG186”信息化工程,许多示范工程成果已经纷纷上线,如华东电网企业级信息系统项目、华北电网企业级信息技术集成平台项目、西北电网ERP项目、上海电力“SG186”示范工程等。但对智能电网的系统理论研究和实践上还只是刚刚起步。

2007年10月,华东电网正式启动了智慧电网可行性研究项目,并设计了2008-2030年“三步走”的行动计划,在2008年全面启动了以高级调度中心项目群为突破的第一阶段工作,以整合提升调度系统、建设数字化变电站、完善电网规划体系、建设企业统一信息平台为4条主线,力争到2010年全面建成华东电网高级调度中心,使电网安全控制水平、经营管理水平得到全面提升。

2009年2月,作为华北公司智能化电网建设的一部分——华北电网稳态、动态、暂态三位一体安全防御及全过程发电控制系统通过专家组验收。这套系统首次将以往分散的能量管理系统、电网广域动态监测系统、在线稳定分析预警系统高度集成,调度人员无需在不同系统和平台间频繁切换,便可实现对电网综合运行情况的全景监视并获取辅助决策支持。

由中国电力科学研究院等单位承担、周孝信院士担任首席科学家的国家973计划项目“提高大型互联电网运行可靠性的基础研究”研究人员开展了基于智能和专家系统的电力系统故障诊断和恢复控制技术研究,为智能型的电力系统动态调度与控制提供了基本的分析工具,开发成功电网在线运行可靠性评估、预警和决策支持系统平台,为新的智能化电网运行控制开发提供了系统的研发平台。

4.2 国家电网公司智能电网规划

国家电网公司早在2007年即制定了“数字化电网关键技术研究框架”,提出了“构建数字化电网,打造信息化企业”的战略目标。该框架对数字化电网的内涵进行了的描

述：数字化电网面向输电网和配电网，综合运用各种先进科技和数字化手段，为电网生产全过程提供完整、统一、准确地信息，实现对电网直观、实时的监控和智能分析，并为规划、计划、设计、建设、运行、调度、营销等各个环节的科学决策提供技术支持，保证电网安全稳定、经济优质运行，提高电网公司生产效率，为建设信息化企业奠定基础。

2009年5月，国家电网公司公布了智能电网的发展计划，并将智能电网内涵定义为统一坚强智能电网，是以坚强网架为基础，以通信信息平台为支撑，以智能控制为手段，包含发电、输电、变电、配电、用电和调度六大环节，覆盖所有电压等级，实现“电力流、信息流、业务流”的高度一体化融合，是坚强可靠、经济高效、清洁环保、透明开放、友好互动的现代电网。

国家电网公司初步制定了智能电网的发展规划，将分为三个阶段逐步推进：

(1) 2009-2010年进行规划试点阶段，主要是制定发展规划、技术和管理标准，进行技术和设备研发，及各环节试点工作。

主要目标：特高压两纵两横加快建设，向家坝-上海±800 kV 直流、宁东-山东±660 kV 直流建成，西北 750 kV 电网“十一五”规划完成；高级调度系统在各网省局试点，调度系统市场增长 30%以上；全数字化变电站大面积试点，数字化开关和数字化互感器得到试用；750 kV 柔性输电建成示范工程，百兆级 SVG 和 500 kV 短路电流限制器研制并建设示范工程；用电管理采集系统在公用变、商业用户和大客户全面建设；分布式电源接入方案，实用性配电自动化系统和配电管理系统研发试点。

(2) 2011~2015年开始全面建设阶段，加快特高压电网和城乡配电网建设，初步形成智能电网运行控制和互动服务体系，关键技术和装备实现重大突破和广泛应用。

主要目标：高级调度系统全面推广，原有调度系统更新、升级；全数字化变电站全面建设；500kV 短路电流限制器大规模采用，静止同步串联补偿器、统一潮流控制器示范应用；智能电表和用电信息采集系统大规模深入到居民小区，双向互动在大城市得到推广；配电网管理和配电自动化全面推广应用，分布式电源接入。

(3) 2016~2020年为引领提升阶段，全面建成统一的“坚强智能电网”，技术和装备全面达到国际先进水平。

主要目标：高级调度系统、全数字化变电站成为标准配置；柔性输电技术全面应用；智能电表全面覆盖，双向互动，智能家电走入家庭；自愈、灵活、可调度智能配电网建成；分布式能源、实用型储能装置、电动汽车充电站在主要城市广泛应用。

2009年7月11日国家电网年中工作会议以智能电网为主要议题，并确定了智能电网发展规划和总体投资。与发展规划相应，会上也确定投资计划，即到2020年智能电网总投资规模接近4万亿元。具体为今、明两年的投资约5500亿元，其中特高压电网投资830亿元；全面建设阶段投资约2万亿元，其中特高压电网投资3000亿元；基本建成阶段投资1.7万亿元，其中特高压投资2500亿元。仅特高压总投资达到6330亿元。从实施阶段来看，初期智能电网的建设主要体现在特高压建设的推进、用电端采集系统的铺开以及智能化、新能源并网技术的应用、数字化变电站试点的建设方面。

国家电网针对智能电网建设已经专门成立了智能电网工作部，由这一部门专门负责智能电网建设相关重大问题的组织领导和输电、配电、用电、生产、调度等多个部门的统一协调工作。

4.3 南方电网公司“数字南方电网”

作为我国电网骨干企业之一，南方电网公司提出了“数字南方电网”的构想，打造数字化和智能化的南方电网。其中，数字化阶段的目标是实现管理、安全、运行等信息的获取、传递和使用的数字化，而智能化阶段的目标则是在数字化的基础上，综合考虑

学科前沿技术和未来发展的方向、趋势，提高管理和生产方面的智能程度，逐步完成智能系统对人工的替代，使得系统具备自动恢复到安全稳定状态的能力，实现电网的自愈功能。

2009年11月南方电网与中国移动签约。在电能计量自动化系统、电力行业终端通信保障平台和服务热线平台三大领域进行全方位合作，打造一个全面感知、可靠传递、智能处理的和谐数字化生态系统，合力建设智能电网。

预计到2020年我国在智能电网领域的总投资规模或达到上万亿元。甚至有望达到4至5万亿元，新增年均投资至少为800至1000亿元。

4.4 标准制定

在国家电网公司、科技部等部门的共同组织下，由中国电力科学研究院着手牵头成立了智能电网标准体系工作组，任务是结合国际标准体系研究进展，对国家电网公司现有的相关标准进行梳理、分析，提出适应公司发展的智能电网标准体系，以满足工程和产品开发需要，并为后续智能电网标准的完善和系统化提供指导。但需要指出的是国家电网公司的标准还不属于行业标准或国家标准。

5 我国智能电网研发方向

5.1 我国智能电网研发需求

首先，我国能源资源分布和经济发展与生产力布局存在很大的不平衡性，如何及时、按需、合理、安全地实现全国能源再分配，是中国经济发展所面临的重要问题。从长远看，要满足经济社会发展对电力的需求，必须走远距离、大规模输电和大范围资源优化配置的道路。尽管存在争议，特高压输电能够提高输送容量、减少输电损耗、增加经济输电距离，在节约线路走廊占地、节省工程投资、保护生态环境等方面也具有明显优势。因此，发展特高压电网，构建电力“高速公路”就成为必然的选择。

实体电网作为智能电网的物理载体，是实现智能电网的基础。如何进一步优化特高压和各级电网规划，做好特高压交流系统与直流系统的衔接、特高压电网与各级电网的衔接，促进各电压等级电网协调发展、送端电网和受端电网协调发展、城市电网与农村电网协调发展、一次系统和二次系统协调发展，成为需要解决的关键问题。

其次，随着电网规模的扩大，互联大电网的形成，电网的安全稳定性与脆弱性问题越来越突出，对主网架结构的规划设计要求相应地提高。只有灵活的电网结构才能应对冰灾、战争等突发灾害性事件对电网安全的影响。

第三，必须考虑我国新能源与可再生能源未来发展的需求。按我国提出的发展战略，到2020年，风电装机容量将达到1.5亿kW、光伏发电容量将达到2000万kW，占总发电功率的10%左右。且未来的总发电量还是比重都将继续大大提高，如何容纳和优化利用这类规模大、间歇性强、电能质量劣于传统电源的发电能力，都将对电网产生重要的影响。

新能源特别是可再生能源的资源特点、发电方式和机组特性均与现有发电单元具有根本性的差异，如何解决未来电网的安全性、稳定性、可靠性等多方面的问题，并实现电网的优化运行，将成为未来智能电网的关键性挑战。

我国偏远地区和经济不发达地区面积广阔，在国家骨干电网的支撑下，未来智能电网既要适应大型电源基地的接入，还要适应各类分布式电源的接入；除了考虑分层分区的电源接入，还要考虑分散式接入。分布式发电作为新能源的一种有效的利用方式，将在电网中占有相当大的比重，应予以充分考虑。

第四，从长远来看，以电动汽车为代表的未来电气化交通工具，其充电负荷将成为

电网中的主要负荷之一，应统筹考虑电动汽车充电站的建设对新能源不稳定性和间歇性的补偿和调节作用。

5.2 我国智能电网研发重点

从上述需求来看，我国在智能电网建设中应当加强前瞻性的理论探索和规划研究，提升大电网规划的统一优化能力，尤其是以特高压电网为核心，适应电力市场以及电网发展的坚强电网。加大特高压骨干电网的建设，提高实时分析、智能决策和市场适应能力，以构成坚强的国家电网构架。同时加强地区配电网的结构优化及升级，构建灵活、可靠、坚固的配电网。加大对适应未来大规模可再生电力并网、分布式电源、微网的柔性连接，实现电源电网协调，以实现资源的优化配置和效益最大化。

因此，我国智能电网的研发重点领域是：

(1) 智能化电力电子设备

电力电子技术在发电、输电、配电和用电的全过程均发挥着重要作用。现代电力系统应用的电力电子装置几乎全部使用了全控型大功率电力电子器件、各种新型的高性能多电平大功率变流器拓扑和 DSP 全数字控制技术。随着智能电网对信息获取和处理能力要求的提高，各种智能设备和智能系统在电网中将呈现日益整合、相互交融、灵活组态的发展趋势。因此，在今后电网建设和改造中，应该鼓励和优先采用适用于未来智能电网建设所需和可用的智能电网设备。其中应以建设数字化变电站为重点，全面提高电网装备技术水平，为智能电网打好物质基础；同时开展一系列新型、先进的输变电应用技术研究，以新技术、新设备应用带动电网输送能力的不断提高。包括统一潮流控制器、静止无功补偿器、交直流变换器、高温超导电缆与超导线路以及铝导体复合电缆、电线等。

(2) 智能化传感技术

现代电网中，应用传感器能输出电压、电流、频率等多种形式的信号，满足信息传输、处理、记录、显示、控制等功能要求，具有结构紧凑、体积小、线性度好、灵敏度高等优点。随着微机保护、光纤通信及信息技术的发展，特别是数字式智能测控保护综合装置的成功研制，智能传感器技术在电力系统中的应用越来越多。当前，基于光学传感技术的光学电流互感器（OCT）与电子式电流互感器（ECT）是替代传统电磁式电流互感器的理想产品。其中全光纤式电流互感器（FOCT）以其测量精度高和长期稳定性好而成为主流方向。

我国自 1998 年以来便开始在大型电厂、电力系统等变电站建设中应用电压/电流传感器，但多采用国外 ABB、西门子等公司的产品，近几年来国电南瑞、华中科技大学、清华大学、北京航空航天大学等已在研制全光纤式电流互感器。

(3) 可再生能源并网

风能、太阳能等可再生能源在地理位置上分布不均匀，都具有波动性和间歇性的特点，发电可调节能力比较弱，对可靠供电造成冲击，需要有一个网架坚强、备用充足的电网支撑其稳定运行。因此需要重点研究与发展风电并网技术（主要是大型风电机组的低电压穿越技术、大型风电机组的电网适应性和无功补偿技术、大型风电场的功率调节技术、大型风电场的整体协调控制技术、风电系统中的实时监测技术等）和光伏发电并网技术（包括电站的拓扑结构与整体控制、大型并网逆变器技术、低电压穿越技术、功率调度技术、光伏跟踪阵列统一协调控制、与储能系统的协调控制等）

(4) 储能技术

储能系统是智能电网的组成部分之一，将在智能电网中发挥重要作用，充当发电与输配电之间、输配电与用电之间的“耦合器”、“平衡器”和“缓冲器”。电力储能技术为实现电网可持续发展目标、解决电量供需不平衡矛盾和提高供电可靠性问题提供了一揽子解决方案。大容量储能系统可广泛应用于城市电网、发电厂、居住小区、医院、大型企业、可再生能源优化等。采用大规模储能装置，可以减少和延缓用于发、输、变、配电设备的投资，提高现有电力设备的利用率和供电可靠性，降低发电煤耗、供电线损。目前比较先进的大容量储能技术包括：压缩空气、液流电池、金属-空气电池、钠硫电池、超级电容器。

对我国而言，大规模高效储能技术是电力系统亟待解决的“瓶颈”技术。从储能系统成套生产和产业化水平来看，我国尚处于起步状态，与国外先进水平相比存在不小的差距。因此，应调动和整合全国的科研、制造优势资源，开展攻关，提高装备水平和制造能力。如果能实现电力储能系统国产化，使其成本达到或接近应用水平，随着峰谷电价差的逐步加大和对电能质量要求的日益提高，被压抑的电网对电力储能系统的需求将迅速得到强劲释放。

(5) 分布式能源技术

对大型电网而言，局部事故极易扩散，而且电网越大，联网和维护的费用也越高，利用率也越低。分布式能源系统是应对这一问题的重要解决方案之一，将中小型发电装置靠近用户侧安装，既独立于公共电网直接为少量用户提供电能，也可将其并入电力系统低压配电网，与公共电网一起共同为用户提供电能。分布式能源供电可作为备用电源为要求不间断供电的用户提供电能，在峰谷电价的情况下可以保障电力的可靠性，同时减少电费的支出。由于分布式发电装置与大电网的并网具有相对自主性，当大电网发生故障时，可以自动通过保护装置断开与大电网的联系独立为用户供电，起到了稳定电网的作用。

分布式能源包括分布式发电和分布式储能，在许多国家都得到了迅速发展。分布式发电技术包括：微型燃气轮机技术、燃料电池技术、太阳能光伏发电技术、风力发电技术、生物质能发电技术、海洋能发电技术、地热发电技术等。分布式储能装置包括蓄电池储能、超导储能和飞轮储能等。

参考文献

- [1] 蓬田宏树.2009-11-27.“日本版智能电网”在行动.<http://china.nikkeibp.com.cn/news/ec.on/46908-20090708.html>
- [2] 邵汉桥.2009.欧洲的能源政策与电网发展趋势——赴英国、瑞士考察报告.华中电力, 22(1): 74~79
- [3] 宋永华, 孙静.2008.未来欧洲的电网发展与电网技术.电力技术经济, 20(5): 1~5, 20
- [4] 王成山, 高菲, 李鹏, 等.2008.可再生能源与分布式发电接入技术欧盟研究项目述评.南方电网技术, 2(6): 1~6
- [5] 肖世杰.2009.构建中国智能电网技术思考.电力系统自动化, 33(9): 1~4
- [6] 余贻鑫.2009.智能电网的技术组成和实现顺序.南方电网技术, 3(2): 1~5
- [7] 张弥.2007.“数字南方电网”构想.电力系统自动化, 31(23): 21~23
- [8] 张文亮, 刘壮志, 王明俊, 等.2009.智能电网的研究进展及发展趋势.电网技术, 33(13): 1~11
- [9] 张宇.2008.电力储能技术应用前景分析.华东电力, 36(4): 91~93
- [10] A Battaglini, J Lilliestam, C Bals, et al.2009-12-7.The SuperSmart Grid.<http://www.supersmartgrid.net/wp-content/uploads/2008/06/battaglini-lilliestam-2008-supersmart-grid-tallberg1.pdf>
- [11] COMMISSION OF THE EUROPEAN COMMUNITIES.2009-12-28.GREEN PAPER on a European strategy for sustainable, competitive and secure energy.<http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2006:0105:FIN:EN:PDF>
- [12] Department of Energy and Climate Change.2009-12-28.Smarter Grids: the opportunity.<http://www.decc.gov.uk/media/viewfile.ashx?filepath=what we do/uk energy supply/futureelectricitynetworks/>

- 1_20091203163757_e_@@_smartergridsopportunity.pdf&filetype=4
- [13] Electric Power Research Institute.2009-11-29.IntelliGrid: Smart Power for the 21st Century.http://my.epri.com/portal/server.pt?Product_id=00000000001012094
 - [14] Electricity Advisory Committee.2009-12-17.Smart Grid: Enabler of the New Energy Economy.<http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/final-smart-grid-report.pdf>
 - [15] Electricity Networks Strategy Group.2009-12-28.A Smart Grid Vision.http://www.ensg.gov.uk/assets/ensg_smart_grid_wg_smart_grid_vision_final_issue_1.pdf
 - [16] European Commission.2009-11-22.Towards Smart Power Networks Lessons learned from European research FP5 projects. http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/towards_smartpower_en.pdf
 - [17] European SmartGrids Technology Platform.2009-11-30.Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future.http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/smart_grid/EU_Smartgrids_Vision_and_Strategy.pdf
 - [18] European SmartGrids Technology Platform.2009-12-23.Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future.<http://www.smartgrids.eu/documents/vision.pdf>
 - [19] European SmartGrids Technology Platform.2009-12-26.Strategic Deployment Document for Europe's Electricity Networks of the Future. http://www.smartgrids.eu/documents/3rdGA/SmartGrids_SDD_Draft_25_sept_2008.zip
 - [20] European SmartGrids Technology Platform.2009-12-26.STRATEGIC RESEARCH AGENDA FOR EUROPE'S ELECTRICITY NETWORKS OF THE FUTURE.http://www.smartgrids.eu/documents/sra/sra_finalversion.pdf
 - [21] Federal Ministry of Economics and Technology.2009-11-25.E-Energy - ICT-based energy system of the future.<http://www.e-energy.de/en/>
 - [22] GridWise™ Action Plan. <http://www.smartgridnews.com/pdf/GridWiseAction.pdf>
 - [23] GridWise® Alliance.2009-12-20.GridWise® Alliance: Joining Forces to Realize a Smart Grid.http://www.gridwise.org/gridwisealli_about.asp
 - [24] GridWise® Architecture Council.2009-12-30.Mission & Structure.<http://www.gridwiseac.org/about/mission.aspx>
 - [25] IBM.2009-12-10.Smart Grid.<http://www.ibm.com/ibm/ideasfromibm/us/smartplanet/topics/utilities/20081124/index.shtml>
 - [26] Joe Miller.2009-12-10.Principal Characteristics of the Modern Grid.<http://www.sandiego.edu/EPIC/news/documents/Miller.pdf>
 - [27] Litos Strategic Communication.2009-12-27.The Smart Grid: An Introduction.[http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/DOE_SG_Book_Single_Pages\(1\).pdf](http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/DOE_SG_Book_Single_Pages(1).pdf)
 - [28] National Energy Technology Laboratory.2009-11-26.Modern Grid v1.0: A Systems View of the Modern Grid Appendix A5: Accommodates a Wide Variety of Generation Options.http://www.mastech.org/dg/benefits/2006_DER_ModernGrid_a5_v1.pdf
 - [29] National Energy Technology Laboratory.2009-12-15.Advanced Metering Infrastructure. http://www.netl.doe.gov/smartgrid/referenceshelf/whitepapers/AMI%20White%20paper%20final%20021108%20%282%29%20APPROVED_2008_02_12.pdf
 - [30] National Energy Technology Laboratory.2009-12-2.Smart Grid Implementation Strategy.<http://www.netl.doe.gov/smartgrid/>
 - [31] National Energy Technology Laboratory.2009-12-21.A Vision for the Modern Grid. http://www.netl.doe.gov/smartgrid/referenceshelf/whitepapers/A%20Vision%20for%20the%20Modern%20Grid_Final_v1_0.pdf
 - [32] National Energy Technology Laboratory.2009-12-28.Modern Grid Benefits.http://www.netl.doe.gov/smartgrid/referenceshelf/whitepapers/Modern%20Grid%20Benefits_Final_v1_0.pdf
 - [33] Office of Electric Transmission and Distribution, U.S. Department of Energy.2009-11-22.National Electric Delivery Technologies Roadmap.http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/ER_2-9-4.pdf
 - [34] Ontario Smart Grid Forum.Enabling Tomorrow's Electricity System.2009-11-20.http://www.ieso.ca/imoweb/pubs/smart_grid/Smart_Grid_Forum-Report.pdf
 - [35] Pike Research.2009-12-30.Smart Grid Investment to Total \$200 Billion Worldwide by 2015.<http://www.pikeresearch.com/newsroom/smart-grid-investment-to-total-200-billion-worldwide-by-2015>
 - [36] SmartGridNews.2009-12-29.Beyond the Buzz: The Potential of Grid Efficiency.http://www.smartgridnews.com/artman/publish/article_180.html
 - [37] The Brattle Group.2009-12-14.Transforming America's Power Industry: The Investment Challenge 2010-2030.http://www.eei.org/ourissues/finance/Documents/Transforming_Americas_Power_Industry.pdf
 - [38] U.S. Department of Energy.2009-12-15.Smart Grid System Report.http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/SGSRMain_090707_lowres.pdf
 - [39] U.S. Department of Energy.2009-12-17.Five-Year Program Plan for Fiscal Years 2008 to 2012 for Electric Transmission and Distribution Programs.http://www.oe.energy.gov/DocumentsandMedia/Section_925_Final.pdf
 - [40] U.S. Department of Energy.2009-12-19.FY 2007 Congressional Budget Request Highlight.<http://www.mbe.doe.gov/budget/07budget/Content/Highlights/Highlights.pdf>
 - [41] WALTER S BAER, BRENT FULTON,SERGEJ MAHNOVSKI.2009-12-23.Estimating the Benefits of the GridWise Initiative: Phase I Report.http://www.rand.org/pubs/technical_reports/2005/RA

ND_TR160.pdf

- [42] Xu Zhao, Gordon Mark, Lind Morten, et al. 2009. Towards a Danish power system with 50% wind - Smart grids activities in Denmark. Power & Energy Society General Meeting, 2009. IEEE: 1~8