

用电数据挖掘 技术与应用

罗辑 杨劲锋 肖勇 阙华坤 编著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

用电数据挖掘 技术与应用

罗辑 杨劲锋 肖勇 阙华坤 编著

000100
111111010010100110000100
01010101001010111000101001111110100101001100001
010111110000101001010101111111100000001001001
001110101010101011011001111100101001110010
001111110101010101010101111111



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

当前,以“互联网+”和“智能化”为主要特征的全球新一轮产业革命正在孕育兴起,先进信息技术及互联网理念与传统行业的不断融合,推动着新业态的产生与发展,为相关产业带来了前所未有的发展机遇。在电力行业,随着智能电网的不断发展,信息技术融入电网公司各个专业领域,特别是在用电领域,智能电能表近年来大面积推广,电网公司建设了规模庞大的电能计量自动化系统,积累了丰富的用电数据,数据处理的复杂性与不确定性也不断增强,在此背景下如何有效处理大规模数据,如何发现和提取数据中蕴含的知识、规律,对相关领域提出了前所未有的挑战。

本书系统阐述了用电数据挖掘技术,共分10章,包括绪论、电能计量自动化主站系统、数据挖掘基础、数据挖掘常用技术、海量数据分析框架、海量数据可视化挖掘技术、窃漏电监控诊断、用户个性化电力负荷预测、停电事件自动统计判断、变压器及线损分析。

本书可供从事智能配电、智能用电领域的设计、建设、咨询、运行等管理人员和技术人员使用。

图书在版编目(CIP)数据

用电数据挖掘技术与应用/罗辑等编著. —北京:中国电力出版社,2015.11

ISBN 978-7-5123-7813-1

I. ①用… II. ①罗… III. ①电能测量-数据处理 IV. ①TM933.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 112228 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>)

北京九天众诚印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2015年11月第一版 2015年11月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 15.25印张 331千字

印数 0001—2000册 定价 47.00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

信息技术的不断进步与广泛应用,促进了经济社会各个领域的数据采集能力日益增强、积累的数据越来越多。在电力行业,随着智能电网的兴起与发展,电网公司建立了规模庞大的电能计量自动化系统,采集数以百万计的智能电能表数据,不断激增的数据背后隐藏着许多重要的信息,这些信息对于支持企业进行科学决策具有重要价值。

本书共分十章,包括绪论、电能计量自动化主站系统、数据挖掘基础、数据挖掘常用技术、海量数据分析框架、海量数据可视化挖掘技术、窃漏电监控诊断、用户个性化电力负荷预测、停电事件自动统计判断、变压器及线损分析。前两个章节主要介绍当前智能电网发展背景和电能计量自动化系统建设情况,第3~6章主要介绍数据挖掘基础知识,第7~10章结合具体案例,介绍了数据挖掘技术在电力行业四个方面的应用。本书内容深入浅出,系统阐述了数据挖掘技术在电力行业的应用,书中案例操作性强,读者可以结合实际数据进行实战演练,加深对本书所提数据挖掘技术应用的理解。

本书的案例主要来自作者承担的中国南方电网有限责任公司科技项目,罗辑负责第1章和第2章内容的编写,杨劲锋负责第3~6章内容的编写,肖勇负责第7章内容的编写,阙华坤负责第8~10章内容的编写。卢世祥、雷晓江、王和栋对本书内容进行了校核,何宏明、化振谦、陈蔚文、林国营在本书的编写过程中提供了宝贵的意见,再次谨致以深深的谢意。

编著者

2015年5月

目 录

前言

第 1 章	绪论	1
	1.1 概述	1
	1.2 智能电网	3
	1.3 高级计量架构 (AMI)	10
	1.4 用电数据挖掘	16
	1.5 本章小结	20
第 2 章	电能计量自动化主站系统	21
	2.1 主站系统结构	22
	2.2 数据采集处理子系统	24
	2.3 应用子系统	34
	2.4 本章小结	55
第 3 章	数据挖掘基础	56
	3.1 数据挖掘的产生背景	56
	3.2 数据挖掘的定义及含义	58
	3.3 数据挖掘的基本任务	60
	3.4 数据挖掘技术分类	61
	3.5 数据挖掘的实施步骤	64
	3.6 数据挖掘与数据仓库	69
	3.7 数据挖掘进阶	76
	3.8 本章小结	84
第 4 章	数据挖掘常用技术	85
	4.1 数据挖掘相关技术	85
	4.2 数据挖掘常用经典算法	87
	4.3 本章小结	111

第 5 章	海量数据分析框架	113
5.1	Hadoop 大数据生态系统	113
5.2	分布式计算架构 Hadoop	115
5.3	基于 Hadoop 的大数据分析算法库 Mahout	126
5.4	基于 Hadoop 的大数据产品	129
5.5	分布式计算系统 Spark	131
5.6	智能用电海量数据挖掘系统	139
5.7	本章小结	142
第 6 章	海量数据可视化挖掘技术	143
6.1	概述	143
6.2	海量数据可视化挖掘技术分类	145
6.3	常用可视化数据挖掘工具简介	149
6.4	本章小结	160
第 7 章	窃漏电监控诊断.....	161
7.1	概述	162
7.2	防窃漏电诊断自适应闭环应用机制	163
7.3	传统窃漏电评价建模方法	164
7.4	自适应窃漏电监控诊断模型	165
7.5	窃漏电诊断模型建立流程	167
7.6	窃漏电诊断模型评价分析	181
7.7	窃漏电监控诊断软件功能	182
7.8	本章小结	183
第 8 章	用户个性化电力负荷预测	184
8.1	概述	185
8.2	预测模型架构	186
8.3	用户分群	186
8.4	时序预测	195
8.5	负荷预测软件功能	200
8.6	本章小结	200

第 9 章	停电事件自动统计判断	201
	9.1 概述	201
	9.2 用户停电事件逻辑判断方案	202
	9.3 基于 GIS 的停电事件跟踪方案	203
	9.4 实证数据分析	204
	9.5 停电事件判定分析	208
	9.6 本章小结	209
第 10 章	变压器及线损分析	210
	10.1 变压器负载聚类分析	210
	10.2 线损评价聚类分析	215
	10.3 本章小结	219
案例一	基于模块化回声状态网络的负荷预测	221
案例二	基于过程回声状态网络的用户用电模式分类研究	227
参考文献		232

第 1 章

绪 论

本章将从当前社会经济发展形势入手，分析了电力行业发展面临的问题。简要介绍了智能电网的发展历程和展望，高级计量架构（AMI）的概念、发展历程以及其与智能电网的关系。进而引出智能电网下的电能计量自动化系统，介绍了该系统的构成、功能等基本情况，从而给本书读者提供一个较清晰的轮廓。

1.1 概 述

随着社会经济的发展，能源短缺问题日益严峻、结构性矛盾日益突出，供电可靠性要求不断提高，用户需求更加多样，电网运营面临着巨大挑战。为了应对这些挑战，国内外结合各自的实际情况积极开展智能电网研究和实践工作，以有效应对大规模清洁能源、可再生能源接入电网而对电网带来的影响，保证电网清洁、高效运行。在我国，随着社会发展和人民生活水平的提高，特别是国家电力系统两网改造工作的逐步推行，“一户一表，管电到户”政策的贯彻，用电网络急剧膨胀，使得供电企业对用电网络的管理任务日益繁重。传统电能计量方式不但数据采集不及时，数据统计不准确，操作难以规范，而且劳动量大，工作效率低，给用户和管理部门带来种种不便，已很难满足社会发展的要求。

电力工业是能源工业的重要组成部分，是国民经济的重要基础行业，对整个社会的发展起着巨大的决定性作用，电气化程度和管理现代化水平是衡量一个国家发达程度的重要标志。电力生产的特点是发电厂发电、供电部门供电、用户用电这三个环节连成一个系统，不间断地同时完成。发电、供电、用电三方如何销售与购买电能，如何进行经济计算，涉及许多技术、经济问题。电能测量技术与仪表在我国经济建设中起着重要作用，其公平、公正、准确、可靠，直接关系到发电、供电与用电三方的经济利益，具有广泛的社会性。随着我国电力系统的改革，对电能计量工作提出了更高的要求。电能计量设备包括电压互感器、电流互感器、计量二次回路、电能表计等诸多设备单元，每个单元的误差及信号衰减都会影响计量精度，特别是在市场经济条件下，降低电能计量综合误差，提高其准确性显得尤为重要。

在计量设备的支持下，如何将各终端设备的数据进行汇总分析是摆在电力部门面前



的一个难题。但随着计算机技术和通信技术的发展,使电能计量自动化成为可能。电能计量自动化技术是新兴的、先进的计量技术,融合了当今先进的电子技术、计算机技术和通信技术,并随着硬件和软件不断发展而更新。可以说,电能计量自动化技术是一项发展中的技术,将是电网管理未来发展的主要方向,现已日益引起电力管理部门和电能表及相关行业的关注和投入。该系统的应用对于提高经济效益和用电管理水平,使管理更加科学化、规范化无疑有着十分重要的意义。电能计量自动化是用来实现对民用或工业用电能表所计电能量的自动记载,是一种不需要人员到达现场,而是利用计算机技术和通信技术来实现对每个电能表记载数据的自动正确采集、准确传递、记录和整理,从而达到提高工作效率的目的。供电管理部门可以掌握每个用户消耗的电能情况,准确地统计各类供电线路、各个用户的实际用电情况,从而进行合理的调度,以提高电力系统和地区整体的经济效益。此外还能及时发现供电和用电中的问题,确保安全供电和用电,最终达到科学用电、节能降耗的目的。该系统的实现是迈向配电自动化的第一步,有助于提高电力系统用电管理的现代化水平。

近年来,电力企业在不断扩大大用户负荷管理系统覆盖范围的基础上,全面开展了地区配电变压器监测计量系统、厂站电能量计量遥测系统和低压用户集中抄表系统等项目的建设,并在此基础上进行四分线损分析及需求侧辅助决策等的建设。这些计量自动化项目的分散建设不可避免的带来了计量自动化孤岛问题的出现。为避免该问题,提高电能量数据的综合应用水平和使用效率,避免重复投资和资源浪费,优化项目建设方案,进一步提高电力企业计量自动化建设水平和深入开展计量技术创新,需要建设智能电网下覆盖全区域的电能计量自动化系统。

考虑目前厂站电能量遥测系统、大用户负荷管理系统、低压用户集中抄表系统技术已经成熟,在电力企业范围内均已经开始推广建设。同时配电变压器监测及管理系统在部分供电部门也做了有益的试点,配电变压器无功补偿技术也开始逐步应用。在线损理论计算工作方面也有长足的进步,建设电能计量自动化系统条件已逐渐成熟。今后电力企业应该是一个全面集成的数字化企业,并能够通过集成化的企业战略框架不断加以改进,以适应电力行业的不断发展。通过建设电能计量自动化系统,解决目前统计线损中数据不全、统计口径不一、计算困难、误差影响因素等实际问题,将线损“四分”管理、需求侧管理落到实处,并统筹考虑各地区大用户负荷管理系统、配电变压器监测计量系统、厂站电能量遥测系统、居民集中抄表系统建设方案,避免重复投资、重复开发、重复建设,为实现“经营型、服务型、一体化、现代化企业”的发展战略目标作出贡献。

因此,适应智能电网的电能计量自动化系统建设已成为智能电网发展的迫切需求。高级计量架构(Advanced Metering Infrastructure, AMI)是在智能表计与公共企业系统间的通信硬件和软件及相关的系统和数据管理软件共同形成的一个网络,并具备为公共事业单位、用户、零售商等其他机构收集传递数据信息的功能。AMI是一个用来测量、收集、储存、分析和运用用户用电信息的完整的网络和系统,为电力行业提供电环节“信息化、数字化、自动化、互动化”的坚实基础。在AMI的基础上,根据各个层

面的管理需要，在电厂、变电站、专用变压器大用户、公用变压器和低压用户等环节均设立计量点，安装配套智能计量设备等，然后建立各层的系统，最后将所有系统进行整合集成，最终完成电能计量自动化系统的建设。

随着电力市场的开放，电能计量自动化系统在电力系统中的地位与作用与日俱增，具体体现在电能计量、电量结算、负荷预测、经济运营等。计划经济体制阶段，实行统配电力电量、固定时间、固定电价、计量简单、不带时间标志，在未来的电力市场体制下，采用竞价上网、实时电价、分时电价、严格要求测量数据带有时间标志，因为计量的准确性关系到电能计费结算的准确性，涉及各利益主体的经济效益，并对系统的运行具有参考和指导意义。在电力市场商业化运营下，除了要对设定模式下的电能数据进行分时段、分费率电能统计结算，还要根据电网实时运行状态，对一定特殊情况下的电能进行计量结算。在电力市场条件下，负荷预测和负荷分析直接关系到各方的利益，因此对负荷预测的准确性要求更高。在垄断经营条件下，负荷预测不准可用限电方式来保持发用电的基本平衡，但在电力市场条件下，任何拉电限电行为都将是违反合同行为，必须进行经济赔偿。用电大户用电是否经济，电网结构配置是否合理，将直接影响着整个电网的运行。

电力改革正在深入进行，在电力企业中电力营销日益被重视，发电企业和供电企业，都清醒地认识到随着电力行业的市场化，打破垄断，引入竞争，提高效率，降低成本，健全电价机制，优化资源配置，促进电力发展，推进全国联网，构建政府监管下的政企分开、公平竞争、开放有序、健康发展的电力市场体系势在必行，电力营销将是电力企业的核心竞争力的重要组成部分。而在电力营销体系当中，电能计量是其中很重要的一个因素。电能要经过发电、输电、配电、变电等多个环节才能输送到最终用户处，发电厂与电网公司之间、电网与电网之间、电网公司内部各供电公司之间、供电公司内部各区所之间、直至供电所与最终用户之间，都要进行经济结算，而经济结算的依据就是由在电网的各个节点安装的电能计量装置提供的电能信息。因此，建立电能计量自动化系统，以提高电力系统管理自动化水平和经营效益水平已成大势所趋。

1.2 智能电网

1.2.1 智能电网的概念

自进入信息时代，全球资源环境的压力不断增大。能源需求不断增加，电力市场化的进程不断深入，用户对电能可靠性和质量的要求也在不断提升。电力行业面临前所未有的挑战和机遇，建设更加安全、可靠、环保、经济的电力系统已经成为全球电力行业的共同目标。在这种逐渐变化的环境下，人们设想着建立一个电力系统网络，将能源资源开发、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，通过数字化信息网络连接在一起，并通过智能化控制使整个系统得以优化。这一系统将充分利用各种能源资源，特别是低碳的天然气、风、光、

水等可再生能源、核能以及各种废弃的资源等，依靠分布式能源系统、能源梯级利用系统、蓄能系统和蓄电交通系统等组合优化配置，实现精确供能、对应供能、互助供能和互补供能，将能源利用效率和能源供应安全提高到一个全新的水平，令环境污染与温室气体排放降低到一个可以接受的程度，使用户成本和投资效益达到一种合理而有利的状态。人们普遍将这样的电力系统网络称为智能电网。

智能电网是以包括发、输、变、配、用、调度和信息等各环节的电力系统为对象，不断研发新型的电网控制技术、信息技术和管理技术，并将其有机结合，实现从发电到用电所有环节信息的智能交流，系统地优化电力生产、输送和使用。智能电网的本质就是能源替代和兼容利用，它需要在创建开放的系统和建立共享的信息模式的基础上，覆盖包括从需求侧设施到广泛分散的分布式发电，再到电力市场的整个电力系统及相关环节，促进电力流、信息流、业务流的高度融合和统一。电力企业通过促成技术与具体业务的有效结合，使智能电网建设在企业生产经营过程中切实发挥作用，最终达到提高运营绩效的目的。

1.2.2 智能电网发展历程

智能电网是当今世界电力系统发展变革的最新动向，并被认为是 21 世纪电力系统的重大科技创新和发展趋势。以欧美等发达国家为代表，欧盟委员会、美国能源部，各种类型的电力企业与组织，纷纷投入相当的精力，力图尽早取得突破。中国、日本、韩国、加拿大、澳大利亚等国家也开始注意到电网的这一新的发展动向，正在积极推进。

1. 美国智能电网

在过去 30 年间，信息、通信技术发生了翻天覆地的变化，但日渐老化的美国电网并没有跟上技术变革的步伐，用户对电力供应提出了越来越高的要求，国家安全、环保等各方面政策都对美国电网的建设和管理提出了更高的标准。为了争取更多用户，在市场竞争中取胜，美国各电力企业纷纷提高服务水平，加强与用户的交互，提供更多产品供用户选择，最好地满足不同类型用户的需求。近年来在基础材料、电力技术、信息技术的等领域研究中，出现了不少可以明显改善电网可靠性、效率等运行指标的技术。这些技术的推广应用为电网运行管理水平的提高创造了条件。为解决电网存在的问题，美国电力行业目前普遍公认的解决方案是建设一个基于全新技术和架构的“智能电网”，利用日新月异的信息技术对电网进行彻底改造，以期建成一个高效能、低投资、安全可靠、灵活应变的电力系统。

2001 年，美国电力科学研究院创立了智能电网联盟，推动“Intelli Grid”研究。Intelli Grid 项目有两个目标：①分析出电力系统运行的商业需求，包括现在、未来的各种需求，如自愈电网概念等；②以分析得出的电力系统的需求作为基础，提出支撑未来电力系统的信息需求系统，使用战术性的方法来建立一个战略视图，以战略的高度建立一个不依赖于具体技术的视图框架。这两个目标明确提出了未来电力系统是一个融合两种基础设施（电力输送能源基础设施和信息基础设施）的能源系统。这两种基础设施的融合表明，未来的能源系统必须在两个方面同时进行。

为了使美国电网实现现代化,保证经济安全和国家安全,美国能源部于2003年发布了“Grid2030”,对美国未来电网远景进行了阐述。DOE于2004年又进一步发布了“国家输电技术路线图”,为实现“Grid2030”进行战略部署。在这两份文件以及工业界的指导下,2004年,在DOE支持下,电网智能化项目(Grid Wise)启动,其目标包括:①利用信息技术对能源系统进行更新换代;②通过发展和部署技术方案,为所有参与者创造商业价值;③通过在电力网络中融合信息技术,促进电力更加稳定可靠,更富灵活性和自适应性;④鼓励用户参与电网,并从中获利。电网智能化联盟成员包括跨国技术公司有 AREVA、GE、IBM;电力公司和电网运营商有 AEP(美国电力公司)、巴纳维亚(Bonneville)电力管理局、PJM及法国电力集团(EDF)等,研究机构有 EPRI、巴特尔(Battelle)、RDS和 SAIC(科学应用国际公司)等。

2005~2006年,DOE与美国国家能源技术实验室(NETL)合作,发起了“现代电网”倡议,任务是进一步细化电网现代化愿景和计划,并在全国范围内达成共识。“现代电网”倡议创立一个全国范围内共享的关于现代电网主要特性及关键技术领域的一个蓝图。这个蓝图分析了电网的性能和技术缺口,提出了现代电网的国家级概念,鼓励工业界对现代电网的认可并协调区域技术的集成项目。“现代电网”倡议还建立了现代电网的视图,提出了现代电网的目标、性能、主要特征、关键技术以及评价体系等。它符合DOE的使命,并和其他一些工业界的努力和行动形成互补,如EPRI领导的Intelli Grid项目、Galvin Electric Initiative、Grid Apps联盟,还有其他致力于提高国家电网性能的机构。同时,DOE又成立了电网智能化架构委员会(Grid Wise Architecture Council, GWAC)。该委员会既不是一个设计团队,也不是标准制定实体,它的主要工作是将合适的实体组织起来,促进各电力公用事业单位之间在电力系统方面的互操作性,为互操作概念和标准的发展提供参考准则,为智能电网的实现提供工业层面上的指导和必要的工具。国际电工委员会IEC于2008年底筹建了SG3智能电网战略工作组,以制定智能电网的相关标准,推进智能电网的进程,促进各国在智能电网发展过程中的一致性。智能电网战略工作组于2009年4月底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,首先提出与智能电网有关的标准列表,经初步评估和分析后征集各专业委员会意见,并将在9月的会议上研究讨论建立智能电网标准框架。

2009年1月,美国白宫发布的《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能表。2009年4月,奥巴马政府公布了40亿美元智能电网技术投资计划,计划划拨约40亿美元的刺激资金用于开发新的电力传输技术,其中34亿美元用于智能电网技术开发,6.15亿美元用于智能电网的演示项目。美国政府希望推动新的人工智能电网的开发,大大提高电力设施的效率。2009年6月,美国又公布了一项简称为“IEEEP2030”的智能电网标准和互通原则,其核心就是推动电力工程、通信和信息技术的互动。

2009年4月,美国National Grid向马萨诸塞州公共事业部提交了一个持续两年、总投资达5700万美元的智能电网示范工程项目。该项目将包含新英格兰地区的15 000

个用户，为所有用户安装智能电能表、可编程的恒温器，提供电子账单，并在一些变电站接入可再生能源。公司还计划集成分布式电源和即插即用混合动力汽车。

2. 欧洲智能电网

智能电网成为欧洲电网的发展趋势，有其独特的发展背景。其一，经过逾百年的长期发展，欧洲各国的电力系统已走完了以外延扩张为主的发展阶段，早已具备了可以满足经济社会运转需求的较为充裕的输配电供应能力，对电力行业的要求转向了更加高效、灵活、环保且有利于市场化等方面。其二，欧洲各国的能源政策更加强调对环境的保护和可再生能源发展，尤其是风能、太阳能和生物质能等可再生能源发展是近年来欧盟委员会能源政策的基本着力点和中心目标。因此，基于可再生能源的分布式电源发展成为欧洲电力市场的必然。其三，欧洲天然气管网发达、应用广泛且已市场化，为基于天然气的分布式发电技术的广泛应用提供了良好的能源供应基础和市场基础。

2004 年欧盟委员会启动了相关的研究与建设工作，提出了在欧洲要建设的智能电网的定义。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》明确强调欧洲已经进入一个新能源时代，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。欧洲电网属于分布发电与交互式供电的发展模式，更适宜建立智能电网。因此，智能电网在英国、法国、德国等都有潮流性发展趋势。

作为欧洲 2020 年及后续的电力发展目标，未来欧洲电网应满足如下需求：①灵活性，在适应未来电网变化与挑战的同时，满足用户多样化的电力需求；②可接入性，使所有用户都可接入电网，尤其是推广用户对可再生、高效、清洁能源的利用；③可靠性，提高电力供应的可靠性与安全性以满足数字化时代的电力需求；④经济性，通过技术创新、能源有效管理、有序市场竞争及相关政策等提高电网的经济效益。

2006 年 4 月，未来电力网络技术平台顾问委员会发布了“欧洲未来电力网络视图和战略”（Vision and Strategy for Europe's Electricity Networks of the Future）。在该报告中，提出许多新的理念与目标，未来的电力市场和网络必须能为用户提供一个可靠、灵活、可访问和低成本的电力供应系统；充分利用大型集中的发电厂和小型分布式的电源；终端用户在电力市场和电网上均体现更重要的互动性；电力将由集中和分散的电源提供，电网系统在欧洲各层次上更加互连，促进安全和高效。这些新概念的电力网络称为智能电网视图。

随着智能电网视图的发布，顾问委员会在来自大学、策办以及电力企业的支持和建议下，研究机构、工业界发展了战略研究议程（Strategic Research Agenda, SRA）。SRA 有 5 个主要的研究领域，并共分成 19 个研究任务。这是一个战略性的文件，希望告知、鼓励和简化欧洲及各成员国之间研究项目上的一致性。SRA 是一个加强各利益相关者共同研究的参考性文件，它为未来的研究项目提供了一个框架。

2007 年，欧洲委员会发布了最新的第七框架计划（The 7th Framework Programme, FP7），执行期从 2007 年 1 月到 2013 年 12 月，旨在使欧洲经济成为最富活力、最具竞争力的经济体。该计划包括 10 个子项目，其中第 5 个和第 6 个分别为能源和环境（包括气候变暖）。这两部分和电力工业的发展息息相关，将直接影响电力工业

的革新。能源子项目主要包括：氢能源和燃料电池、可再生电力、再生燃料生产、供热供冷的再生、CO₂捕获和储存以实现零排放发电、洁净煤炭技术、智能能源网络、能效和节能以及能源决策分析知识。

能源计划的发布将进一步促进欧洲智能电网的发展和部署。2008 年底，欧洲公用事业电信联合会（UTC）发布了一份名为“智能电网——构建战略性技术规划蓝图（Smart Grids: Building a Strategic Technology Roadmap）”的报告，以帮助公用事业公司做充分的规划准备工作，进而更好的制定智能电网发展计划，实现智能电网的发展目标。在智能电网的实践方面，欧洲已经有大量的电力企业在如火如荼地开展智能电网建设，内容覆盖发电、输电、配电和售电等环节。例如，意大利的电力公司早在 2001 年就安装和改造了约 3000 万台智能电能表，实现自动抄表和管理，建立一个全新的、智能化计量管理网络。该项目的实施预计为该电力公司节省约 5 亿欧元管理费用；高峰负荷减少 2.5% 以上，优化和减少电网建设和改造投资；用户服务成本降低 40% 以上；电费回收周期减少 2 天，计费不准引起的纠纷减少 50%，欠费问题减少；提高了对用户用电需求和负荷模式的认识水平以及服务水平，更好的编制供电计划；基于实时用户需求，创造新的服务，增加企业收入。

3. 亚洲智能电网

（1）韩国智能电网。韩国电力系统自 1970 年随着经济的发展而不断发展。2006 年，韩国总发电容量达到 64.5GW，峰值电量达到 58.99GW。预计到 2020 年，韩国电力将保持稳步增长，这就需要未来在发电、输电、配电等方面有巨大的投资。

为了满足韩国电力未来的需求，韩国需要持续建设传统的大型热电厂，包括核电、煤电、LNG 等。但是由于环保要求的限制，建设这样大型的电厂已经越来越困难了，韩国电力系统不断地出现各种分布式能源，如冷热电联供、风电和太阳能发电等，这些分布式能源的出现对电力系统的运行和控制增加了难度。

2004 年 12 月，韩国政府启动了“电力信息化工程”，为了增强电力系统的可靠性和安全性，通过资产管理减少运行维护费用，通过需求响应增加电力市场效率，提供新的电力行业服务，为制造厂提供新的商业机会。参加电力信息化工程的单位和部门有 100 多个，主要包括知识经济部、电力信息化国家项目中心（CPIT）、KEPCO、KPX、KERI、LSIS、Hyosung 重工业公司、Hyundai 重工业公司、KDN、半导体高级研究联盟、韩国电力工业技术研究联盟、韩国电力制造协会、韩国电力工程和科学研究机构等。该工程在 2005~2010 年提供大约 2000 亿美元的经费，主要用于 10 个大型的项目、10 个小型的项目，还有两个基础设施项目。大型项目的研究时间是 4~5 年，而小型项目是 1~2 年。小型项目是用来支撑重点项目或者是作为重点项目间的连接桥梁。两个基础设施项目包括研究生和工业研究人员的教育和培训项目，电力 IT 相关的系统、设施和设备等的标准化研究。韩国信息化工程是由一系列独立的项目组成，每个项目都基于其自身的研究内容和技术范畴来发展，每个项目都包含用途、应用主题、服务和基础设施。该工程总共由 10 个项目组成，其技术领域包括 1 个发电、4 个输电、1 个变电、4 个配电和 2 个终端用户，下面给出这些项目及其涉及的领域：

- 1) 韩国能量管理系统;
- 2) 基于 IT 的柔性交流输电系统;
- 3) 智能输电网络监测和运行系统;
- 4) 基于数字控制技术的高级变电站自动化系统;
- 5) 智能配电管理系统;
- 6) 电力设施监测的主动遥测系统;
- 7) 用于 IT 能量商业服务的用户人口系统;
- 8) 宽带电力线通信;
- 9) 用于分布式发电和工业逆变应用的电力半导体;
- 10) 服务于微网的能量管理和测试系统。

在这 10 个研究项目中, 3 个项目主要用于实现智能电网的设备和组件的发展(例如基于 IT 的柔性 AC 输电系统, 宽带电力线通信, 用于分布式发电和工业逆变应用的电力半导体)。尽管韩国电力信息化工程的方法是基于每个独立的项目, 但是整个智能电网的实现可以通过集成每一个技术和项目来完成。2009 年 3 月, 韩国政府宣布, 计划在 2011 年前建立一个智能电网综合性试点项目。届时能提高韩国环保能源的能力。韩国知识经济部认为这种电网能将普通导线和 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、电线通信普及技术等。韩国希望在未来 20 年内将绿色能源在总能源中所占的比例由 2.4% 提高到 11%。智能电网将会是这项工作的一部分。

(2) 中国智能电网。随着全球资源环境压力的不断增大, 电力市场化进程的不断深入以及用户对电能可靠性和质量要求的不断提升, 电力行业正面临着前所未有的挑战和机遇, 建设更加安全、可靠、环保、经济的电力系统已经成为全球电力行业的共同目标。我国电力工业也面临着类似于欧美国家的情况: 在宏观政策层面, 电力行业需要满足建设资源节约型和环境友好型社会的要求, 适应气候变化的需要; 在市场化改革层面, 交易手段与定价方式正在发展, 市场供需双方的互动将会越来越频繁。这说明智能电网建设也将成为我国电网发展的一个新方向。另外, 我国的电网规模正在快速扩张, 用户的用电行为也在发生变化。以建设智能电网为抓手, 借助电网扩张的机遇, 能够比较方便地建成满足未来需要的下一代电力网络, 直接占领电网技术的最高点。

我国关于智能电网方面的研究进展缓慢, 甚至是刚刚起步。2007 年 10 月, 华东电网公司启动了智能电网可行性研究项目, 密切跟踪国际先进电力企业和研究机构对智能电网的研究, 并结合华东电网的现状和今后发展的要求, 提出了三个阶段的发展思路和行动计划——2010 年初步建成电网高级调度中心, 2020 年全面建成具有初步智能特性

的数字化电网,2030年真正建成具有自愈能力的智能电网。争取在智能电网建设的方向上取得实质性的突破,为早日实现“一强三优”现代公司做出贡献。2009年1月华东电网公司在传达国家电网的年度会议上,又进一步强调:“聚焦高级调度中心项目群建设,开展‘互动电网’前瞻性研究,开展企业一体化信息平台建设,全面推进创新型企业建设,提升公司引领发展的能力”。

2008年,国家电网公司开始推行电力用户用电信息采集系统,规划用3~5年时间实现全网的电能信息采集,实现“全覆盖、全采集、全预付费”的目标,这将为智能电网的集成通信系统提供一个非常强大的信息网络平台,保证了数据的双向实时高速传递,为智能电网的下一步推行奠定了充分的基础。

2009年4月,中国国家电网公司高层领导访美,在华盛顿举办的一场题为“更坚强的电网——中国与美国展望”的会议上发表主旨演讲称:“中国国家电网公司正在全面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,以信息化、自动化、互动化为特征的自主创新、国际领先的坚强智能电网。”国家电网公司指出,智能电网应涵盖发电、调度、输变电、配电和用户等各个环节,是一个闭环系统。智能电网首先应该是坚强的电网,能够实现能源资源的大范围优化配置,保障安全可靠的电力供应,进一步实现清洁、高效、互动的目标。

在2009年5月举行的特高压输电技术国际会议上,国家电网公司正式对外界公布了“坚强智能电网”计划。会议指出,“发展特高压电网是建设坚强智能电网的基础。为保障安全、清洁、高效、可持续的能源和电力供应,积极发展智能电网已成为世界电力发展的新趋势。”“智能电网首先应当是一个坚强的电网。坚强是智能电网的基础,智能是坚强电网充分发挥作用的关键,两者相辅相成、协调统一。因此,特高压对于发展智能电网来说至关重要。”国家电网公司同时提出规划和目标:将按照统筹规划、统一标准、试点先行、整体推进的原则,在加快建设由1000kV交流和 ± 800 、 ± 1000 kV直流构成的特高压骨干网架,围绕发电、输电、变电、配电、用电、调度等主要环节和信息化建设等方面,分阶段推进坚强智能电网发展。

国家电网公司将分三个阶段推进坚强智能电网建设。2009~2010年是规划试点阶段,重点开展坚强智能电网发展规划,制定技术和管理标准,开展关键技术研发和设备研制,开展各环节的试点;2011~2015年是全面建设阶段,将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;2016~2020年是引领提升阶段,将全面建成统一的坚强智能电网,技术和装备达到国际先进水平。届时,电网优化配置资源能力大幅提升,清洁能源装机比例达到35%,分布式电源实现“即插即用”,智能电能表得到普及应用。

智能电网已成为全球发展电力工业的焦点,在国外智能电网发展驱使下,中国应该根据自己的国情,抓住机遇,寻求适合中国特色的智能电网战略规划,并尽快实施。尽管智能电网的研究与实践尚处于起步阶段,但是建设智能电网已经成为世界电力行业的一种美好愿景和趋势,必将进一步推动电力工业的变革与进步。

1.3 高级计量架构 (AMI)

近年来,得益于通信技术和信息技术的长足进步,以及环境保护方面政府条例的推动,高级计量架构(Advanced Metering Infrastructure, AMI)因其在系统运行、资产管理,特别是负荷响应所实现的节能减排方面的显著效果成为整个电力行业最热门的项目。AMI是一套完整的包括硬件及软件的系统。它利用双向通信系统和能记录用户详细负荷信息的智能电能表,可以定时或即时取得用户带有时标的分时段的或实时(或准实时)的多种计量值,如用电量、用电需求、电压、电流等信息。因此,AMI是智能电网的一个基础性功能模块,也称为智能量测体系(SMI),AMI的技术和范畴还在不断地发展。

1.3.1 AMI的概念

AMI并非一个独立的技术实现过程,而是一个全面可配置的基础设施,并且必须集成于现在和将来的电力网络和运行过程之中。这个基础设施主要包括家庭网络系统、智能表计、本地通信网络、连接电力公司数据中心的back-haul通信网络、表计数据管理系统以及数据集成平台等。此外,AMI提供了一个向整个电网智能化的智能过渡。

在用户层面上,智能表计同时将耗能情况传递给本地用户和电力公司。智能表计通过本地实时数据显示告知用户耗能情况。而电力公司提供的实时电价信息则有利于本地负荷控制设备调节耗电量。高级用户还会根据电价信息布置分布式能源。用户通过分析AMI数据实现智能的节能方案。

电力公司利用AMI的历史数据和实时数据来帮助优化电网运行,降低成本以及提升用户服务。例如,通过AMI提供的实时的用户停电信息和电能质量信息,电力公司能快速分析电网的不足。AMI的双向通信能力支撑电网在变电站级和电路级的自动化。通过AMI获得大量数据有利于企业资产的改进或者更好地进行资产维护、增加或者替换。所有这些都将使电网更加高效和稳定。

2006年8月,在法律及自由市场贸易的驱动下,美国联邦能源政策委员会定义了AMI的概念:AMI是一个计量系统,它能够每小时或以更高频率记录用户的用电行为或者其他参数,并通过通信网络将测量的数据传送到一个中心。

高级计量架构建设包含智能电能表、通信系统、电能表资料管理及相关应用程式等软硬件的建设与开发。根据国外建设经验,AMI可提供诸多优点,例如:量测及收集能源使用咨询,支援紧急尖峰电价计量的用户计费;提供用户了解能源使用状态并进行节能;支持传送信号进行用户负载控制,以应付电价改变的自动响应;支援故障侦测、故障定位及停复电管理;进行变压器及馈线等配电设备资产管理;改善负载自动预测;用户用电品质管理;提升线路损失计算精确度;减少区域线路阻塞;降低不平衡率等。

2008年美国加州公共电业委员会(California Public Utility Commission, CPUC)