



中国自动化学会通讯

COMMUNICATIONS OF CAA

主办：中国自动化学会

<http://www.caa.org.cn>

E-mail: caa@ia.ac.cn

中国智能电网建设与清洁能源 发展将全面提速

ISSN 2151-335X



6 915920 700067

2012年3月

第1期

第33卷 总第166期

Contents



第33卷 第1期 总第166期 2012年3月

www.caa.org.cn

主办单位：中国自动化学会



主编的话

让我们畅想这样一种未来的生活场景：

我们日常使用的电能不仅来自于化石能源，还广泛来自于太阳能、风能等新能源。当电价比较低时，我们可以把公用电网提供的电能存储到储能设备中，而当用电高峰期来临时，储能设备将可以向家庭中的各种用电设备提供电能。一个建筑、一个社区、一个城市都以一种优化的方式来使用电能。这样，不仅每个家庭的用电花费将因此而有效降低，同时整个电网中的能源也能得到优化的利用。

这是我在美国工作时主持的一项科研课题，旨在研究未来美国家庭高效的能源利用手段，以实现智能电网中用电环节的智能化。电网是典型的复杂网络系统，而随着新能源的并网发电等因素带来的各种不确定性，以及电网规模不断增加带来的复杂性，都为自动化科学的理论与技术发展带来了巨大的挑战和重大的机遇。因此，我作为《中国自动化学会通讯》的主编负责的第一期专刊关注的正是智能电网的研究。在此，非常感谢各位专家为本专刊贡献了优秀的稿件，也希望学界同仁和广大读者对我今后的工作给予大力支持。

本专刊主要介绍了国内外智能电网的最新研究进展与热点，智能电网的前景与挑战，分布式发电与智能电网之间的关系，智能电网中的故障监测与自愈协调控制，智能电网电能的自适应优化调控等内容。自动化和智能化是实现智能电网的重要手段，发展先进的自动控制理论和智能控制理论将有效提升智能电网的控制与管理水平。

就在最近，多个省市公布了阶梯电价听证方案，而我国将从今年6月1日起全面试行居民阶梯电价。阶梯电价可以认为是实时电价的一种形式，是提高电网运行效率和节约能源的基础。可以预见，智能电网将为促进新能源的大规模开发利用，提高能源利用效率，进而缓解能源危机发挥重要作用。


刘德荣

专题

- 4 智能电网研究进展及热点
- 11 电网智能化的动因、前景与挑战
- 21 智能电网与自动化技术的协调发展
- 28 智能电网中的故障监测与自愈协调控制：挑战与机遇
- 32 基于数据的智能电网电能自适应优化调控

译文

- 45 智能电网中的计算智能
——历史，挑战与机遇

新闻

- 52 中国智能电网建设与清洁能源发展将全面提速
- 52 智能电网助力清洁能源大发展



本刊声明

为支持学术争鸣，本刊会登载学术观点彼此相左的不同文章。来稿是否采用并不反映本刊在学术分歧或争论中的立场。每篇文章只反映作者自身的观点，与本刊无涉。

- 53 中科院与中国科协举行工作座谈会
- 54 《自动化学报》十届二次编委会在京召开
- 55 中国自动化学会2012年第一次正副秘书长工作会议

会员园地

- 56 成都自动化研究会被评为四川省第一批科技服务示范机构
- 56 “2012第十四届中国国际工控自动化及仪器仪表（济南）展览会”和“2012第十四届中国国际动力传动与控制技术（济南）展览会”召开
- 57 天津市自动化学会第八次代表大会暨先进自动化技术报告会成功举行
- 58 第三届全国平行控制 社会计算 平行管理会议成功举办



刊名题字：宋 健

编辑：中国自动化学会办公室

地址：北京市海淀区中关村东路95号 邮编：100190

电话：(010) 6254 4415 E-mail: caa@ia.ac.cn

传真：(010) 6252 2248 http://www.caa.org.cn

编辑委员会

荣誉主编

戴汝为 CAA理事长、中国科学院院士、中国科学院自动化研究所研究员
孙优贤 CAA理事长、中国工程院院士、浙江大学教授

主 编

刘德荣 CAA常务理事、中国科学院自动化研究所研究员、复杂系统管理与控制国家重点实验室副主任

副主编

陈俊龙 CAA常务理事、澳门大学教授
张化光 控制理论专业委员会委员、东北大学教授

专题栏目

主 编

周东华 CAA常务理事、副秘书长、清华大学教授

编 委

蒋昌俊 CAA常务理事、同济大学教授
戴国忠 CAA理事、计算机图形学与人机交互专业委员会主任委员、中国科学院软件研究所研究员
张丽清 CAA理事、生物控制论与生物医学工程专业委员会主任委员、上海交通大学教授

观点栏目

主 编

孙彦广 CAA理事、副秘书长、冶金自动化研究设计院教授级高工

编 委

范 铠 CAA理事、仪表与装置专业委员会主任委员、上海工业自动化仪表研究院教授级高工
陈宗海 CAA理事、系统仿真专业委员会主任委员、中国科技大学教授
张文生 计算机图形学与人机交互专业委员会秘书长、中国科学院自动化研究所研究员

新闻栏目

主 编

陈 杰 CAA常务理事、副秘书长、北京理工大学教授

编 委

熊范纶 CAA理事、农业知识工程专业委员会主任委员、中国科学院合肥物质科学研究院研究员
李艳华 CAA理事、遥测遥感遥控专业委员会主任委员、中国航天科技集团公司第704研究所研究员
郝 宏 系统复杂性专业委员会秘书长、中国科学院自动化研究所高级工程师

译文栏目

主 编

刘 民 CAA理事、名词委员会主任委员、清华大学教授

编 委

王庆林 CAA理事、青年工作委员会主任委员、北京理工大学教授

会员栏目

主 编

张 楠 CAA专职副秘书长、办公室主任

编 委

孙长银 CAA理事、青年工作委员会主任委员、北京科技大学教授
柯冠岩 平行控制与管理专业委员会秘书长、国防科学技术大学工程师
薛成海 清华大学博士后联谊会会长、清华大学博士后

智能电网研究进展及热点

程时杰, 袁小明

华中科技大学 电气与电子工程学院 武汉 430074

摘要: 面对日益紧迫的能源环境恶化问题, 发展智能电网推进可再生能源的大规模开发利用, 提升传统能源利用效率, 已成为世界各主要国家的基本共识, 也是我国实现可持续发展战略的重大需求。本文从大规模可再生能源发电及储能的智能接入, 智能调度与控制保护, 智能配用电系统及微网, 智能输变电装备与先进输电技术, 以及智能电网通信与信息基础五个研究领域入手, 对国内外智能电网研究进展和热点做一概述和分析。

关键词: 智能电网, 可再生能源, 储能, 输配电系统, 通信与信息

面对化石能源日益枯竭、环境污染、气候变化等人类共同的难题, 通过发展智能电网以实现风能、太阳能等可再生能源的大规模开发利用, 提升传统能源利用效率, 已成为世界各国的基本共识和应对策略, 也是我国重大战略需求。

美国智能电网建设是其经济振兴计划的重要组成部分, 欧洲将智能电网建设作为其发展新能源发电的重要保障, 澳洲、日本、韩国等诸多国家和地区也都提出了各自的智能电网发展方案。2010年7月19-20日的24国部长联席会议上确定组成了国际智能电网行动网 (International Smart Grid Action Network, ISGAN), 在法律和政策领域开展国际合作, 以加速清洁能源技术发展。ISGAN的参与国涵盖了全球超过70%的GDP和超过80%的温室气体排放量, 成为国际智能电网合作的最高等级政府合作平台。

我国也高度关注智能电网的建设。胡锦涛总书记2010年6月7日在两院院士大会上的讲话中提出“构建覆盖城乡的智能、高效、可靠的电网体系”。温家宝总理2010年3月5日在第十一届全

国人民代表大会第三次会上的政府工作报告中提出“大力开发低碳技术, 推广高效节能技术, 积极发展新能源和可再生能源, 加强智能电网建设”。国家科技部在《关于加快我国智能电网技术发展的报告》明确提出了我国发展智能电网的目标和任务, 并启动了国家高技术研究发展计划 (863计划) 重大项目“智能电网关键技术研发”, 第一批项目已于2010年底通过论证。目前, 智能电网已成为目前社会各方高度关注的热点问题, 并将对未来电力行业、能源领域乃至信息、通信、家电、汽车、建筑等相关行业的发展带来重大影响。

智能电网涉及到能源、环境、社会和经济等多个方面, 其发展需要宏观的协调和多行业、多领域的共同支持。但迄今为止, 各行业大都是站在各自的角度提出对中国智能电网发展模式 and 方向的看法, 不同的参与方往往是从自身的角度来理解和规划智能电网技术的发展, 甚至开始出现借发展智能电网的旗帜谋求自身利益最大化的不良做法。长此以往, 必将对我国智能电网建设的

健康有序发展造成障碍。

本文从大规模可再生能源发电、储能与智能接入,智能调度与控制保护,智能配用电系统及微网,智能输变电装备与先进输电技术和智能电网通信与信息基础五个研究领域入手,对国内外智能电网研究进展和热点做一概述和分析。

1 大规模可再生能源发电、储能与智能接入

世界各国在大规模可再生能源并网方面的研究进展日新月异,并都在政府的支持之下,建立了综合性的研究基地,取得了很多新的研究成果。在大规模风电并网方面,欧盟是世界上风力并网发电技术水平最高的地区,欧盟议会及各国政府均设立了与风力并网相关的大型研究课题,以推动风电技术整体水平的不断提高。部分研究进展及热点分述如下。

在欧盟第六框架项目SUPWIND (Decision Support for Large Scale Integration of Wind Power) 资金的支持下,丹麦Riso实验室研制并开发了含风力发电的电力系统调度计划制定软件WILMAR,通过风电预测的结果以及日前电力市场的交易情况,制定详细的机组调度日前计划。在欧盟的Anemos及Nightwind项目的支持下还将进一步研究主动式的负荷管理以及储能技术,以提高可再生能源电力接入电网的灵活性以及电网稳定性。

结合风机模型与短期功率预测的研究,德国的ISET实验室帮助德国的电力运营商实现风电的区域间的交换与平衡。ISET实验室联合了电网运营商ENE和VE-T,风机制造商Enercon,气象预报服务Deutsche Wetterdienst和Kassel大学,合作开展了名为“大型海上风电场的并网运行”的重大研究课题,在保证电网经济性与安全性的前提下,对陆地及海上风电场接入电网的安全运行、控制

及调度开展了深入研究。

荷兰在大规模风电并网方面有we@sea研究计划和EOS研究计划,we@sea计划针对大型海上风力发电及其商业利用展开研究,EOS研究计划主要研究包含多种可再生大规模分布式能源的电网设计。

目前进行全国风电场集中控制的国家只有西班牙。西班牙系统运营商(REE)开发了一个可再生能源控制中心(CECRE),对全国的风电场进行集中控制。在西班牙的风电控制分为四个层次,从底层到顶层依次为风机控制、风电场控制、发电控制站控制和CECRE控制。CECRE设定了两种风电出力控制模式,即风电最大出力限制模式和风电出力减少模式。当电网发生某一故障时,CECRE能够有效地控制全国风电出力,从而保证电力系统安全稳定运行。

在大规模太阳能发电及接入系统,美国是太阳能发电技术世界领先的国家。为推动太阳能发电并网技术的发展,2007年由美国国家能源局牵头,发布了名为《可再生能源的系统接入》的研究课题,组织了包括GE全球研究中心以及美国可再生能源实验室(NREL)的专家参与该项课题。

我国可再生能源资源和生产力发展呈逆向分布,可再生能源丰富地区远离经济发达地区,分布极不均匀,远距离大规模输送可再生能源电力是我国电网面临的重大问题。在现有的规模下,我国并网风电已经面临比较明显的电源结构和运行稳定等问题。截至2010年底我国风电的实际并网容量为3107万千瓦,仅低于美国的4018万千瓦,居全球第二。但实际年发电量仅500亿千瓦时,远低于美国的946.47亿千瓦时。

现在德国、美国和西班牙等风电发展大国都遇到了电网瓶颈,也就是输电阻塞问题。目前我国大规模风电并网所遇到的最显著和最核心的问题也是风电的送出问题。

此外，风能资源本身具有的间歇性和波动性特点使得风电场与常规的火电厂、水电厂不同，不能进行稳定的电力生产。由于风电场出力的不稳定，电力系统一般会限制风电在系统中所占比例，尤其是在系统出现阻塞的时候常常会采用切除风机的手段，这无疑是风电发展的一大阻碍。只有通过各种措施增强电力系统的灵活性、提高电网对风电的输送能力、解决大规模风电的电网瓶颈问题，才能对风电进行充分利用，促进风电健康快速发展。

从长期看，如果要充分利用可再生资源，将可再生能源作为稳定的主力电源来使用，就需要考虑风电的电能储存与转换问题。美国能源部认为目前比较有前景的储能技术有六项：飞轮储能、压缩空气储能、超导储能、超级电容器、化学电池储能和抽水蓄能。以上储能技术的基础研究部分放在美国能源部基础能源科学办公室（DOE's Office of Basic Energy Sciences）进行，而开发和部署部分通过美国能源部储能计划（DOE's Energy Storage Program）推进。除了抽水蓄能外，很少技术能够达到在电力系统大规模应用的发展阶段。

根据我国政府制定的国家发展目标，2020年可再生能源的发电比例可以达到15%以上，2040年之后可以达到30%或更高的水平，成为重要的替代能源。其中2020年我国风电装机容量达到1.5亿千瓦，太阳能发电达到2000千瓦。可再生能源的时空分布特性以及电力生产过程与传统能源有诸多不同甚至有本质的差异。大规模可再生能源发电以及所采取的各种电力电子接入技术将对电力系统的结构形态、运行特性与控制方式产生根本性影响。特别是我国能源结构与分布特点，将使大规模可再生能源发电接入问题更为突出，急需建立可以指导大规模开发利用可再生能源的新理论。

2 智能调度与控制保护

智能电网是电源多元化、电网多层次、负荷多类型的复杂系统，这对电力系统调度与控制保护提出了新的挑战。而随着智能电网建设的推进，信息化程度的大幅提高，各种传感器的大量应用和一体化监测平台的建设，将为研究多能源互补经济运行理论及系统控制保护创造条件。

大规模可再生能源的接入对电网的一体化运行和统一协调控制提出了新的要求，需要全面构建具备信息化、自动化、互动化功能的支撑体系，这对广域量测系统构建支撑平台提出了更高要求。广域测量系统（WAMS）以相量测量装置（PMU）为基础，具有描述系统动态行为的能力，在电力系统中状态估计、自适应保护、在线稳定预测、故障录波、扰动录波、输电和发电系统计算模型验证等方面具有较为广泛的应用。国内外已有大量同步PMU在实际电网投入使用。

利用广域信息系统可以实现大规模电力系统的在线安全评估，同时完成继电保护、测量监视和控制等功能。目前北美、法国、罗马尼亚、西班牙等国家或地区已经有实际运行的广域保护与智能控制系统。国内的电力工作者结合我国电网的特点在广域保护与智能控制领域开展了大量的研究和实践，尤其在利用广域量测信息进行大电网安全稳定在线协调防御技术方面达到了国际领先水平。目前随着智能电网建设的推进，大电网广域保护与智能控制研究工作得到重视，相关研究工作正在开展。

目前，国外的智能调度尚未形成体系。2008年美国PJM提出了理想调度（Perfect Dispatch）的概念，主要侧重于有功调度，进行各种时间尺度计划的协调、实时计划与AGC的配合。PJM认为广域测量技术是保证大电网安全的重要手段，也是实现智能输电网的基础，PJM目前主要从同步相

量技术和先进控制中心的研究建设着手开展智能调度的工作。相比目前在电力行业中广泛使用的数据采集与监视控制系统（SCADA），相量测量系统胜在速度：SCADA的数据采集与测量频率大约是每4秒一次，而在GPS高精度的原子时钟同步控制下，相量测量工具可以每秒30次的频率测量电网的电压和电流。根据“北美实时相量测量倡议”，北美电力系统中的100个枢纽点安装了相量测量工具，测量的相量数据传送到田纳西流域管理局（TVA）的相量测量数据中心，进而实现实时数据采集、设备控制、测量、参数调节以及各类信号报警等各项功能。

国内对智能调度进行了许多有益的研究和探索。狭义上的智能调度是指辅助调度员值班的调度辅助决策功能，目前已经成功应用于部分调度中心。广义上的智能调度涵盖了调度中心全专业的智能化。目前，少数网省公司进行了有益的尝试，但已有成果无论从广度还是深度方面都与真正的智能调度存在较大差距。

3 智能配用电系统及微网

未来配电系统将会在系统结构、运行模式等方面与现有系统显著不同：分布式电源与微网的广泛接入、大量电动汽车充放电设施的建设、交/直流配网并存、网状闭环运行模式、智能配电设备与柔性配电技术的广泛应用、用户与电网间常态化互动等，在规划思路、控制策略、运行方法与管理措施等方面有一系列基础理论和关键技术问题需要解决。

目前，世界上不同国家针对本国的能源和电网现状制定了不同的智能电网发展目标，尽管由于国情不同，每个国家发展智能电网的驱动力可能不同，但配电系统和用电系统的智能化是所有国家发展智能电网的重点所在。例如：

由美国能源部主持行业同盟协会成立的电网

智能化（GridWise）的研究，主要把目标放在负荷侧的智能管理上，任务是为了激发全社会的技术创新力量，动员电能消费者参与电力市场，通过开发和部署信息解决方案，创造新的市场价值。美国电力科学研究院开展的智能电网（Intelligrid）研究，与“电网智能化”项目相似，但在系统运作和消费者与系统的融合方式上都有了根本性的变化，它更关心输配电网络和通信、信息技术的集成。美国的Austin Energy公司在2003年就将其30%的人工测量装置改为智能测量装置，在2008年底前将其余的测量装置均改为智能测量装置。2010年，美国政府启动了经济振兴计划智能电网项目，总计支持了100个项目，其中90个项目属于配电和用电领域，投资占总投资35亿美元的96%。

欧洲于2005年提出“智能电网”计划，并在2006年出台该计划的技术实现方略。作为欧洲2020年及后续的电力发展目标，该计划指出未来欧洲电网应满足如下需求：①灵活性（Flexible），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（Accessible），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（Reliable），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（Economic），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。欧洲智能电网具有5个关键特征：自愈，互动，优化，兼容，集成。在欧洲，已经有大量的电力企业在如火如荼地开展智能电网建设实践。

日本电网是世界上技术最先进的电网之一，电网结构坚强，安全可靠水平高。日本主要围绕大规模开发太阳能等新能源，同时确保电网系统稳定这一目标来构建智能电网，强调节能与优质服务，注重通过建设智能电网实现各种能源的兼容优化利用。2009年3月，日本政府公布了包

括推动可再生资源 and 电动汽车的发展等政策在内的政府发展战略。日本电网经过多年的建设和改造，已经具备了一定的智能化水平，其设备已达到世界一流水平。今后日本智能电网的发展将更加偏重于提高资源利用率、降低电网损耗、提高供电服务质量，以及开发储能技术、电动汽车技术等高科技产业，进一步提高电网的先进性、环保性和高效性。

我国在电力发展上存在着注重外延发展和发电能力建设的指导思想，形成了电力系统“重发、轻供、不管用”的传统观念，导致配电网投入不足，欠账甚多。同对发电和输电系统建设的关注度相比，在过去相当长的时期内，我国的配电和用电系统长期得不到应有的重视。直至1999年，国家才投入3000亿元第一次大规模的开始了城市配电系统的建设工作。近年来，随着我国经济的发展，人民生活水平的提高，特别是节能减排压力的日益加大，配电系统和用电系统才日益受到关注。然而，尽管最近几年对配电系统的建设力度明显加大，但同发达国家相比，同用户的需求相比，仍然还有很大的差距，而在用电领域的差距更大。我国的配电和用电系统存在一系列问题需要解决，包括：配电网投入不足，网架结构薄弱；我国配电网供电可靠性差，存在严重的电压骤降、短时停电等问题，制约着数字经济的发展；配电系统资产利用率普遍较低，经济运行指标低；配电网基础数据管理欠缺，规范化与标准化有待加强；缺乏配电系统与电力用户间的互动机制和手段，使用户无法积极参与负荷的移峰填谷，制约了配电系统与用电系统间通过互动实现节能；智能配电网的高级形态尚在探索，新技术和新设备应用率低。结合我国配电及用电系统实际，积极研发应用智能配电和用电技术，对于推动我国电力技术的革命具有十分重要的意义，同时也将产生明显的经济效益与社会效益。

4 智能输变电装备与先进输电技术

我国资源分布极不均衡，包括火电等传统电源和适宜大规模开发的风电、太阳能发电几乎都远离负荷中心。为了满足大规模电力的远距离、环境友好、安全经济的传输，需要研究未来电网模式与先进输电技术。另一方面，为适应规模化可再生能源发电的时空分散性与随机波动性特点，提升其可控性，需要研究大功率电力电子变换装置及控制技术。此外，智能电网特点决定了电力装备将依赖传感与信息技术向智能化方向发展。

实现输变电系统智能化的主要技术领域包括：智能电网规划设计技术、输变电系统的建模和仿真技术、先进的输电技术、智能变电站技术、输变电在线安全运行控制技术、一体化智能电网调度与控制技术和高压设备智能化技术。

输电网是电能输送的物理通道，是连接发电、配电和用电等环节的纽带。先进的输电技术是构建智能输电网、满足新能源发展需要、实现资源大范围优化配置的关键技术。在未来的15~20年内，我国的电力需求仍将快速增长。由于我国能源供应和消费呈逆向分布特征，一次能源集中在西部和北部地区，而负荷又集中在中东部和南部地区，因此，需要采用先进的输电技术，建设坚强的网架结构，进行远距离、大容量、低损耗、高效率的电能输送，促进水电、火电、核电和可再生能源基地的大规模集约化开发，实现全国范围内的能源资源优化配置。

在该技术领域需要重点关注的技术是灵活交流输电技术、柔性直流输电技术、超导输电技术，以及输电线路在线监测技术。

一次设备是电网的基本单元，一次设备智能化（简称智能设备）是智能电网的重要组成部分，也是区别传统电网的主要标志之一。目前国

内外关于智能设备尚没有统一的定义和标准。高压设备的智能化主要涉及变压器和开关设备,利用传感器对变压器和开关等关键设备的运行状况进行实时监控、进而实现电网设备可观测、可控制和自动化是智能设备的核心和目标。

5 智能电网通信与信息基础

智能电网是将信息技术、通信技术、计算机技术和电力基础设施高度集成的新型电网。它具有电力和信息双向流动的特点。研究信息获取、流动及其调控的规律,是智能电网的又一核心。

在通信网络方面,面对智能电网在信息通信技术方面巨大的需求和市场潜力,国外电信运营商、IT公司、软件公司均纷纷参与到智能电网的建设中。从2008年至今,美国多家电信运营商如AT&T、Verizon、T-Mobile都以不同的形式宣布加入到美国智能电网的建设中,通过与IT产业的软、硬件集成厂商和传感器网络提供商开展合作,利用其高速的通信网络设施提供数据通信回传业务、实现智能电网的建设。

智能电网需要实时监视和分析系统当前状态,整合电网运行、保护、计费、停电、控制等实时信息、各种管理信息与相关数据,海量的信息与数据的分析、加工、提炼、传输需要实现先进的、有效的信息技术,需要高速、双向、实时、集成的通信系统来支持。在“以信息化带动工业化,以工业化促进信息化”战略构想的指引下,智能电网的电力信息化迫在眉睫,需要在信息与通信安全、状态监测、配电自动化、通信与信息网络、智能变电站等方面大力发展信息与通信技术。随着通信技术和网络技术的发展,尤其是电力改革的推进和电力市场的建立,电网内部及电网之间数据交换越来越多。另一方面,Internet技术的广泛使用使得病毒和黑客日益猖獗。电力监控系统 and 数据网络系统的安全性和可

靠性已成为一个非常紧迫的问题。而且,随着通信协议标准化和互操作技术的逐渐推广,电力系统所面临的信息与通信安全风险日益加剧。智能电网必须依赖于两个基础设施:电力系统基础设施和信息系统基础设施。对于电力系统基础设施,从设计规划到运行维护,电力行业内都已经有了比较成熟的技术和手段来确保电力系统基础设施的安全可靠。对于信息系统基础设施,信息与通信安全的研究应用还不够,必须进一步研究信息系统的安全建模、定量安全评估、攻防仿真分析等一系列关键技术,尤其是智能电网通信及数据网络的信息安全监视和脆弱性分析,以及智能电网应用的多级安全管理、接入和互联技术。输电线路状态监测利用先进的测量、信息、通信和控制等技术,以线路运行环境和运行状态参数的集中在线监测为基础,建设输电线路状态监测系统,开展状态评估,实现灾害预警。

总体而言,电能是现代社会重要的公用性资源,电力系统是为社会生产和居民生活提供公共服务的重要社会基础设施,在智能电网体系下,电力的社会服务职能将得到极大的提升,成为能源优化配置的重要平台。适应我国经济社会的快速发展,应对环境和气候变化,突破我国严峻的能源资源供应瓶颈,优化能源结构,实现安全、高效、清洁的电能生产、传输与使用,促进我国经济社会的可持续发展,是我国建设智能电网的核心驱动力。

智能电网是在电力系统物理网络的基础上,应用先进的传感、通讯、信息、控制和储能等技术而构成的先进电力网络,目标是实现电力系统安全、高效、灵活、经济地运行。智能电网以深度信息化、全面互动化、电能清洁化、资产高效化、机制市场化、电网安全化、高度自动化、广泛分布式为特征,具备全方位、全过程、全要素的智能监测、诊断、通信、控制与决策能力,是电力、信息的综合传输平台。电网的智能化是长

期、持续的过程，智能电网技术会随着电网的发展和技术的进步而不断革新。

我国智能电网的发展思路应结合我国的基本国情，深入分析我国经济社会、能源供应与电力行业可持续发展所面临的重大需求与关键问题，“以我为主，实事求是”，建设有中国特色的智能电网，以促进经济社会的持续快速发展，适应能源、资源和环境的多重约束，实现以电力为中心的高效的能量梯级利用，满足广大用户的多样化电能需求，实现能源资源的高效、优化配置。

建设智能电网具有广泛、积极的社会效益与经济效益；是转变经济发展方式、促进产业结构优化升级的重大举措；是孕育和形成战略性新兴产业

的重要引擎，对战略性新兴产业的培育和发展具有重要意义；是承载大规模清洁能源并网发电的重要载体，将促进全社会低碳经济的发展和大规模的节能减排；是提高电网资产利用效率、输电和用电能效的必由之路，将全面实现安全、清洁、高效、优质的电力供应。

智能电网是一个广泛联系、开放融合的有机系统；其以电力行业为主体，整合并推动新能源、信息通讯、计算机、材料、仪器仪表、工业控制、交通运输等相关行业的先进技术，实现跨行业、跨学科、跨要素的技术集成创新。电网的智能化是手段、是过程，而非目的。建设智能电网应始终以严谨的技术可行分析与全面的成本效益分析为依据。

作者简介

袁小明 华中科技大学教授，“千人计划”国家特聘专家，国家重点基础研究计划（973计划）项目“大规模风力发电并网基础科学问题”首席科学家，国家高技术研究计划（863计划）新型电力电子关键技术及装备主题专家。2002-2008年任GE全球研究中心（上海）电力电子研究室经理，2009-2010年任GE全球研究中心（美国）电气总工程师（Chief Engineer）。发表学术论文35篇。获得美国专利30项。

1986年山东大学获得电力系统继电保护专业学士学位，1993年浙江大学获得电力电子专业硕士学位，1998年卡特琳娜联邦大学（巴西）获得电力电子专业博士学位。主要研究方向包括可再生能源发电设备及其控制，含大规模可再生能源电力系统的控制与保护，大容量变压器工业应用等。

程时杰 男，汉族，1945年7月出生，湖北通山人。电力系统专家，教授，博士生导师，国务院学位委员会电气工程学科评议组成员。国家有突出贡献中青年专家，湖北省优秀科技工作者，湖北省科技精英，湖北省优秀教师。2007年当选为中国科学院院士。1967年毕业于西安交通大学，1981年获得华中工学院硕士学位，1986年获得加拿大Calgary大学博士学位，1988年回华中理工大学工作。1991年晋升为教授，1993年获得博士生导师资格。现任华中科技大学学术委员会副主任，湖北省电力安全与高效重点实验室主任，IEEE高级会员，中国电机工程学会常务理事，中国电机工程学会电力系统专业委员会和自动化专业委员会委员，湖北省电机工程学会副理事长，曾先后工作于加拿大Calgary大学、德国慕尼黑工业大学和新加坡南洋理工大学等。长期致力于电力系统及其自动化领域的研究，在电力系统适应控制、智能控制、次同步振荡等方面取得了众多研究成果。近年来，他积极倡导并努力实践了基于储能原理的电力系统稳定控制这一新的研究方向，在基于高温超导磁储能和旋转储能的电力系统稳定控制方面进行了创新性的研究。获国家科技进步二等奖1项，省自然科学一等奖1项，省科技进步一等奖1项、二等奖2项，国家教委科技进步三等奖1项。在国内外学术刊物和国际学术会议上共发表学术论文361篇，其中SCI检索38篇，EI检索168篇，译著1部，获国家发明专利2项，在电气工程领域非常突出。

电网智能化的动因、前景与挑战

杨柳青, 王飞跃

中国科学院自动化研究所 复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190

摘要: 传统电网通常用来将电能从数量有限的集中发电设施输送到数量庞大的用户, 以单向通信、集中发电、辐射状网络结构为特点。与此同时, 随着数字经济的发展、气候变化的加剧与国家能源政策的最新调整, 电力网络与电力市场、电力用户之间的协调和交换越来越紧密, 电能质量水平要求逐步提高, 可再生能源等分布式发电资源和电动车数量不断增加, 传统电网已经难以支撑如此多的发展要求。为了解决这些问题, 必须在发电、输电、变电、配电、用电和调度等环节逐步实现智能化, 建设智能电网体系。本文从智能电网的动因入手, 由信息的采集、控制及管理 and 信息的传递三个方面简要概述了相应的前景、现状、挑战和机遇。

关键词: 智能电网, 信息与测量, 控制与管理, 通信与网络

1 概述

传统电网至今已有125年的历史。从生产电力到用户最终获得电力, 电网做为一个整体系统, 开始于化学能、势能、核能等在发电厂转化为电能, 通过高压或超高压输电线传输, 高压到低压的变电和配送系统到达终端用户而提供用电体验和消费。随着数字经济的发展、气候变化的加剧、环境监管要求的日趋严格与国家能源政策的最新调整, 电力网络与电力市场、电力用户之间的协调和交换越来越紧密, 电能质量水平要求逐步提高, 可再生能源等分布式发电资源数量不断增加, 传统电网已经难以支撑如此多的发展要求。为了解决这些问题, 必须在发电、输电、变电、配电、用电和调度等环节逐步实现智能化, 建设智能电网体系。

传统电网通常用来将电能从数量有限的集中发电设施输送到数量庞大的用户, 以单向通信、集中发电、辐射状拓扑网络为特点, 而智能电网

通常被认为允许电能和信息的双向传输以形成一个自动化的、分布式的先进电能交换和分配网络。传统电网是一个刚性系统, 电源的接入与退出、传输等都缺乏弹性, 致使电网没有动态柔性及可组性; 垂直的多级控制机制反应迟缓, 无法构建实时、可配置、可重组的系统; 系统自愈、自恢复能力完全依赖于实体冗余; 对客户的服务简单、信息单向; 系统内部存在多个信息孤岛, 缺乏信息共享。人们设想中的智能电网将进一步拓展对电网全景信息的获取能力, 以坚强、可靠、流畅的实体电网架构和信息交互平台为基础, 以服务生产全过程为需求, 整合系统各种实时生产和运营信息, 通过加强对电网业务流实时动态的分析、诊断和优化, 为电网运行和管理人员提供更为全面、完整和精细的电网运营状态图, 并给出相应的辅助决策支持, 以及控制实施方案和应对预案, 最大程度的实现更为精细、准确、及时、绩优的电网运营和管理。在文献[1]中, 作者对智能电网和现有电网的区别作了如表1

所示的简要概括。

通过使用现代信息技术，智能电网能够更有效地进行电力传输，对各种电力事件的反应也会更快。总的来说，智能电网可对电网任何位置的事件进行反应，并采取相应的措施。智能电网是一个在电能生产、传输、配送及消费各方面对双向安全信息通讯技术和计算智能进行有机整合的，清洁、安全、可靠、坚强、高效、并可持续发展的电力系统。

表 1 智能电网对比现有电网

现有电网	智能电网
机电	数字
单向通讯	双向通讯
集中式发电	分布式发电
分层式	网络式
少量传感器	大量传感器
人工恢复	自愈
故障、停电	自适应、孤岛运行
人工检测	远程检测
有限的控制	渗透性控制
少量用户选择权	大量用户选择权

2 电网智能化的动因

传统电网本质上是单向的^[1]：电力往往产生于一些基于水力、热力、化学能或核能发电机组的集中式电厂。为了利用规模优势，这些发电厂往往规模巨大并远离人口聚居区。所产生的电能一般先转换为较高的电压等级以进行长距离传输，在到达变电站后，再转换为较低的电压等级进行配电，在用电端再次下降到用电电压。

随着化石燃料的逐渐枯竭和成本增加，可再生能源对未来的发电将起到越来越重要的作用。图1显示不同能源份额在未来40年的预测^[2]。从图中所列的能源种类可以看出，相当一部分新能源，尤其是可再生能源，并不支持传统上的大规模、集中式发电模式。另外，小规模、分布式发电还能在一定程度上提高电能质量及可靠性^[3]。

由于用户可以选用自己的发电设备，分布式发电的大规模普及将会从根本上改变传统电网的设计理念，即发电机连接到输电线。大量分布式发电设施在整个电网中的广泛采用将会形成一个与传统电网完全不同的分布式系统：电网将从分层式进化为网络式，其中电能的流动将远远不是单向的，因为用电方同时也成为了发电方。正如

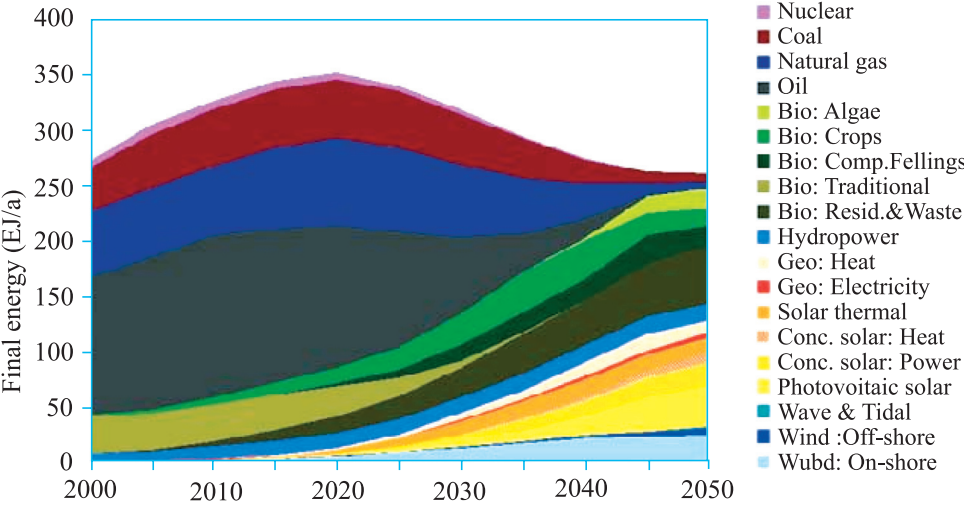


图1 世界电能按能源种类的分布与演化^[2]

文献[3]指出的,电网的分布化可能经历以下三个过程:首先在现有电网中融入分布式发电,然后在集中式电网中引入与之协作的分布式发电分散系统,最后达到多数电能由分布式发电提供而只有少量来自集中式发电。

分布式发电,促成了一个电网新范式,称为微网。智能电网的进化预计会在很大程度上依赖对即插即用的大量微网的整合^[1]。据此,微网被普遍认为是未来智能电网的基石。微网是一组局部化的发电、储电、用电设施。在正常运行时,它与传统的大电网相连。微网的用户可以依赖分布式发电,如太阳能板、风力涡轮机和燃料电池,而产生低市电电压。因此,微网可以断开与大电网的单点耦合,并作为孤岛自主运行。同时具备分布式发电和与大电网扰动隔离的能力使得微网能够大大提高供电可靠性^[4]。

然而,实现高效可靠的分布式发电并不简单。首先,分布式发电涉及到包括太阳能和风能等的可再生能源发电的大规模部署。这些能源的产出波动范围很大,而一般而言,可再生能源的发电模式往往与用电需求模式相去甚远^[5]。因此,对分布式发电的高效利用离不开对可再生能源产出的不确定性的综合考虑。这样一种网络式的结构与分布式发电相结合,一方面会带来发电系统机动性的提高,另一方面却将造成功率流量控制的极大复杂化。即使是孤岛状态下的微网,其中的设施虽然在电力上与大电网隔离,但却必须与外部保持大量的信息交换。比如说,孤岛微网以及外部电网的状态都必须实时掌控,以便确认微网是否需要并可能重新并网。并网的时机也要通过这些信息进行确认,并网前后更是需要密切关注可能的扰动以保持供电可靠性及电能质量。所有这些都对电网的信息获取、传输、及控制提出了前所未有的要求。

另一个电网智能化的动因是电动汽车。这是一种使用一个或多个电机作推进力的车辆。由于

化石燃料的日渐减少和价格提升,纯电动汽车或充电式油电混合车正逐渐普及。这引出了两个新的概念,即网到车(G2V)和车到网(V2G)。G2V是由电动车从电网充电而引出的。这个概念看似简单——不过是电池充电而已。然而对电网来说,电动车的普及意味着一种高需求、高流动性的新型负荷。另一方面,电动汽车作为一种移动储能装置,又具备作为移动电源的潜力。V2G正是由这一功能引出的新概念。多数情况下,车辆大部分时候是在停置状态的。例如,文献[6]显示美国的汽车平均每天只有一个小时在路上行驶。而在这些大量的汽车停置的时段,电动汽车可接入电网提供电能或起到重要的调峰作用。在具体实现上,主要有三个模式:混合动力或燃料电池汽车从储存的燃料直接产生电能进行调峰;太阳能车在电池充满后开始为电网供电;电池供电或充电式油电混合车使用多余的可充电电池进行调峰。在前两种情况下,电动汽车相当于一个分布式发电系统,其能源可以来自传统的化石燃料、氢气、或诸如太阳能等的可再生能源。在第三种情况下,电池可在非高峰时段以较低的成本进行充电,从而相当于一个分布式储能系统^[37]。

在文献[7], [8]中,作者指出未作协调的电动车充电可能会产生诸如电力系统性能和效率的急剧下降甚至过载等的严重后果。减轻电动车充电对电网影响的一种流行的解决方案是对电动汽车的充电曲线进行优化,即在虑及车辆充电的额外能耗的条件下保持尽可能低的峰值功率需求。这可以通过协调不同的电动汽车充电业务来实现,使它们的发生时间形成适当的分布。

电动车带来的其他亟待解决的问题还包括电池和电网的连接、V2G的有效性及可行性、其环境和经济效益、以及新的市场和系统集成^[9-10]。另外值得一提的是,G2V和V2G并非两个完全独立的概念。例如,具备V2G功能的电动车常用于提供电能,以帮助平衡负载、调峰填谷,但却不可避

免的在某些时段以G2V模式运行。因此,确定适当的充电(G2V)和放电(V2G)时间是同一问题的两个紧密相连的方面。而这个问题的有效解决不仅依赖于单个电动车辆的自身监控以及电网状态的实时监控和预测,而且取决于大量电动车辆之间、以及它们与电网之间的信息交换以及基于这些信息的综合控制和优化。在这个过程中,除了物理因素,诸如电能在各个季节或时段的买入和卖出价格、电池的充放电次数等的经济因素也应被考虑在内。

综上所述,电网的发展进化不仅依赖于先进的发电设备和技术,而且还取决于计算机监控、分析与优化从少量到遍布,从集中到分布的充分发展。分布式自动化的问题,大多始于信息的采集、集中和交换。具体来讲,控制及管理的需要决定了信息采集和处理的内容、地点、实时性等特征,也据此决定了信息流的走向和流量以及相应的通信技术要求。接下来,我们从信息的采集、控制及管理、和信息的传递三个方面来讨论智能电网的前景及面临的挑战。

3 信息采集

智能电网中的信息采集设备主要分为三大类:智能电表,同步相量测量装置,和监测传感器。智能电表是直接面向用户的终端设备。它通常是一个能够对电能使用进行按时(每小时或更短间隔)记录并将记录按时(每天或更短间隔)发送到指定目的地的电子设备^[11]。同时,它还具备一定的实时或接近实时的针对电能质量特定参数的传感功能。智能电表最初的使用形成了自动抄表(AMR)系统^[12]。该系统从电表装置自动收集诊断、用电和状态数据并传送到指定的中心数据库以实现计费、故障排除和分析。智能电表基础设施(AMI)系统^[13]是在自动抄表系统基础上的进一步发展。与AMR相似,AMI的核心还是智能电

表,但与之不同的是,在AMI中使用了交互通信,使得智能电表采集的信息不再是单方面按固定的时间间隔发送,而是实时按需发送。这样就使得高质量的系统运行和用户用电控制成为可能。自然的,适用于AMI的智能电表还应具备远程通断的功能和控制用户设备和电器的能力,以便对负载和用电进行有效的管理。这些功能在很多未来智能空间的设计中已经成为必不可少的要素。

对用户来说,智能电表具备相当多的潜在优势。例如,用户能够对计费进行估计并对用电进行相应的优化。当用户配有分布式发电系统或具备V2G功能的电动车时,AMI所赋予的自由度更能发挥其调节电能质量和降低用电成本的作用:用户可根据实时电价和自身需求通过可双向计费的智能电表进行电能买卖,智能电表甚至能够根据电网和用户的状态实施自动的或辅助的用户孤岛或并网操作。对供电方来说,智能电表是实现动态电价的必经之途,通过实时调整电价间接达到调峰填谷的目的,根据智能电表采集的数据更有针对性的进行直接供需调配,并借助AMI与分布式发电进一步提高供电质量和供电稳定性。

受益于全球定位系统GPS(global positioning system)提供的精确时间,同步相量测量装置PMU(phasor measurement unit)在上世纪90年代初研制成功^[14]。与智能电表不同,同步相量测量装置并不直接面向用电户,然而在维护电网的稳定性和维持电能质量上,它们的作用却是不可或缺的。相量是对电力系统中电压或电流正弦波形幅值和相位的复数表示。同步相量测量装置参照同一个时间源(GPS)对电网中任意位置的电压或电流相量进行测量。这种多个测量点之间的时间同步性使得不同点的测量值之间的实时对比成为可能,而这种实时对比又可以通过电力系统中的各种分析手段对整个系统的状态作出实时评估和动态响应^[14]。

举例来说,状态估计SE(state estimation)是现代能量管理系统(EMS)最重要的功能之一^[15-16]。

传统的状态估计技术可追溯到上世纪60年代^[17-18]。由于缺少必须的时间同步和测量装置间的有效通信,多个测量点间无法取得统一的参照时间点,并且数据采集间隔通常相当长。这种状态估计过程使用非同步的多种测量(如有功、无功功率,电压、电流幅值等),通过迭代法对非线性方程求解,一般需要数分钟或更长时间才能取得收敛,更重要的是该过程在最需要准确的状态估计的系统扰动期间却往往不能达到收敛^[14,19]。基于这些原因,状态估计是急需借助PMU发生变革的重要电力系统分析手段之一。由于同步测量装置的高度时间同步性,不仅传统状态估计的时间错位和长周期问题得到了解决,而且基于对电压和电流相量的直接测量,状态估计的系统模型也成为线性,使得求解的复杂度大大降低,动态状态估计和动态监视也成为可能^[14,18]。

基于PMU的线性状态估计往往要求电网上按一定地理分布部署足够数量的该装置,因而早期的PMU应用主要集中在系统模型的验证和事故后分析的研究。电力系统的模型在很大程度上决定了数值仿真的可信度,而后者是获取电力系统的许多运行极限的常用方法。同步相量测量技术使直接观察扰动后的系统振荡成为可能,将测量数据与仿真结果做对比有助于验证模型并对其进行修正。同步相量测量技术还能够提高设备保护、系统保护等的效率,最显著的例子就是自适应失步保护^[20]。另一个重要应用是输电线路电流差动保护,在相量差动动作判据中,参加差动判别的线路两端电流相量必须是同步得到的,PMU即可提供这种同步相量。要在智能电网实现对电网任何位置的事件进行反应,并采取相应的措施,对故障点的定位是一个重要步骤。在这个问题上,传统的单端型故障定位方法是基于电抗测量原理,这种方法的精度将受故障电阻、系统阻抗、线路对称情况和负荷情况等多种因素的影响。有了同步相量测量技术,就可以利用线路两端同步测量

的电压和电流相量进行故障距离的求解。这样获得的高精度定位结果将简化和加快输电线路的维护和修复工作,从而提高电力系统供电的连续性和可靠性。

归功于它的谐波抑制能力和简单结构,离散傅立叶变换DFT(discrete Fourier transform)^[14]是最普遍采用的相量测量算法。当采样频率是实际信号频率的整数倍时,DFT可以提供高精度的相量估计。然而,在实践中,这一要求并不总是满足。这是因为采样频率一般是给定的而系统的工作频率时有变化。在这种情况下,频谱泄漏会造成误差从而达不到标准(例如IEEE Std. C37.118.2005^[21])的要求。在一些文献中提出了改进技术来解决这个问题。一个常用的方法是在一个固定的频率采样,然后在相量估计前先进行实际的信号频率估计。在获得频率偏差的基础上,可以计算相应的相量补偿^[22,23]。频率估计是信号处理上的经典问题。一些低复杂度并且基于PMU的固有DFT模块的方法可在文献[24-27]中找到。然而这些方法多是依据直觉开发的,缺乏系统的性能分析以及经典的(但是高复杂度)算法的比较。此外,旨在依据实时测量求解每条母线上复数电压,状态估计(SE)的核心是对测量误差的检测和识别。这个过程被称为坏数据处理^[28-29]。在同步相量测量中,感知故障和通讯问题均可导致坏数据的产生^[16,30]。如果不加以适当的处理,坏数据可极大地破坏所估计状态的准确和可信度^[30]。在现有文献中,针对基于PMU的状态估计的坏数据处理的研究极为有限。这一问题的主要解法,根据^[14],仍是上世纪70年代开发的LRR去除(LRR)算法^[29]。不仅如此,一些初步研究表明,即使是在没有噪声的理想情况下,LRR甚至不能保证对一个单一坏数据的识别。然而令人鼓舞的是,基于PMU测量的状态估计线性模型使得包括稀疏约束的最小化和压缩感知^[31]及统计回归^[32]在内的很多统计信号处理的新方法和成熟工具都成为可能。

今天, 传感器或传感器网络已在各行各业被大量用作不同用途的监测和测量手段^[33]。其中, 无线传感器网络 (WSNs), 得益于其低成本和易布设的特性, 可以提供同时具备可行性和成本效益的系统远程监控及诊断的感知与通信平台。这些监控传感器在电力系统中构成了第三类信息采集设备^[34]。例如, 文献[35]中作者提出传感器网络应嵌入到电网中以辅助评估输电线路的实时机械和电气条件, 获取系统的物理和电气实时状态, 诊断即将发生或永久性的故障, 一旦异常机械故障出现还应确定并实施适当的自动控制措施或向系统运行人员及时报告。[36]综述了无线传感器网络在电力系统的机遇和挑战, 并描述了对其在各种电力系统环境中的实验研究。结论显示WSN可协助在电网中的偶然事故导致连锁效应和严重后果前对其进行检测和隔离。

与一般用途的传感器网络相比, 智能电网中的传感器网络基于其应用特性提出了一些特殊的要求^[36-37]。例如, 关键的电网故障监测数据应及时到达控制器, 并因此对网络的时延和吞吐量产生相应的要求。基于电网的规模, 传感器必须具备远程访问和配置的功能, 但这一点却不能以安全性为代价。在各种电力系统场景下, 常见腐蚀性、高湿度、振动、污垢和灰尘等环境。因此, 除了在设计传感器时要注意针对这些恶劣条件配备一些防范措施, 同时在传感器网络的设计上必须考虑到部分传感器节点故障下网络的生存能力。此外, 传感器节点虽然与电网紧密相连, 节能仍不容忽视。这是因为除可靠性和高电能质量外, 智能电网的主要目标中还包括能源使用的绿色化、清洁化和高效化。

4 控制与管理

这些采集到的信息为实现智能电网的各种控制职能和管理目标奠定了基础。以清洁、安全、

可靠、坚强、高效、并可持续发展为终极目标, 智能电网控制与管理的主要对象包括: 改善能源效率、降低运营成本、供需平衡、排放控制等。同时, 这些预期要在分布式发电和电动汽车大范围普及的条件下实现。正是智能、准确、遍布的信息采集, 以及电能的双向流动使这些目标成为可能。以需求响应DR (demand response) 为例。作为一个电能质量的重要因素, 传统上已开发出一系列达到供需平衡的方法。但当用户的用电需求的概率分布变化很大时, 这种做法的成本高昂。而在智能电网中, 不仅更多更细的智能电表记录的实时和历史用电数据可用来更准确的预测用电需求, 更重要的是需求响应可以通过调整用户需求来协助达到供需平衡的目的。比如说, 与其使供应响应需求, 电网的智能控制可以通过AMI控制或以浮动电价影响用电户来调整用电量而满足供需平衡。在这里, 信息的交互流动起到了重要作用。另外, 当大量用户同时还具备一定的分布式发电能力, 或使用专门的或者和电动车结合的储能设备, 智能电网的多方位供需调节就有了更大的自由度。

如前所述, 分布式发电使可以孤岛运行的微电网成为趋势, 但是要达到稳定性要求, 微电网自身的控制以及与大电网的连接与断开都需要设计和优化。在这些方面, 一些以降低总的运行成本、孤岛运行负载控制、或是电能管理为目标的研究可在文献[38], [39]中找到。对于电动车, 研究的方向包括协调充电及电力调度、电动车基础设施规划以协同优化智能交通系统和智能电网、电动车充放电时段的优化、以及电动车作为储能元件对分布式可再生能源发电和排放控制的影响^[40]。同时, 一些V2G技术试验也在进行中。例如, 美国太平洋天然气和电力公司试图将一些自有的丰田普锐斯汽车在谷歌园区改装成V2G, 而Xcel公司在其位于科罗拉多州博尔德市的智能电网城市 (SmartGridCity) 项目中进行了V2G电动车的首个

大型测试^[37]。

这些研究都还处在起步阶段,但是已经涌现出了各种研究方法和工具。对于优化方法,常用的数学工具通常包括凸规划^[8,41-42]和动态规划^[5,43]。由于可再生能源供应往往是随时间变化的过程并有着各种约束条件,随机规划、鲁棒编程和粒子群优化也有广泛的应用^[40, 44-46]。以电网这样的规模,可以确定的是我们不能总是要求和预期所有的用户都合作。因此博弈论是智能电网的管理和优化中的一个强有力的分析工具。作为一个数学框架,博弈论可以分为两个主要分支:非合作博弈理论和合作博弈理论。非合作博弈理论可以用来分析一个包含数个独立实体(即玩家)的战略决策过程,决策过程由这些玩家的行为决定,而玩家对于上述过程的结果又可发生部分或完全的利益冲突。从本质上讲,非合作博弈可以理解为一个分布式决策过程,其中玩家可以在没有任何协调或沟通的条件下进行优化,而目标函数则通过参与博弈的玩家的行为相互耦合。在智能电网中,非合作博弈的应用是多方面的。一方面,非合作博弈可以用来执行分布式的需求管理和实时监测或部署基于自治代理的微电网。另一方面,经济因素,如市场和动态定价也是智能电网的一个重要组成部分。在文献[47]中,作者对博弈论在智能电网中的应用做了综述。

5 信息的传递

我们看到,从信息的采集到信息的集中和处理,到控制和管理决策作出后指令的下发,以及动态电价和供需调配中牵涉的谈判,都使智能电网对信息传递的要求达到了一个前所未有的高度。

显然,智能电网需要一个允许各种实体和电网间进行交互信息传递的通讯网络。然而,近年来通讯技术的飞速发展在提供很多可供选择的技

术的同时,也为选取一个广泛认同的具体技术带来了一定的难度。实际上,传统电网的通信本来就由一些不同类型的网络所组成,智能电网中更是普遍存在各种对时延和数据率要求各异的信息和需求,因此,智能电网中必然会应不同的信息传递要求而形成一个具备互操作性的异构共生通讯网络。

在有线通信技术中,大型电力公司历来都使用光纤通信连接自己的发电网络和控制设施。此外,它具有很强的抗电磁和射频干扰能力,这对高电压的运行环境非常理想。基于这些和其大带宽、高数据率的优点,以及现今已有的大范围部署,光纤将在智能电网中继续发挥网络骨干的作用。另外一种受到广泛注意的有线通信技术是电力线通信PLC(powerline communications)。它是一种利用传递电能的导体同时传递信息的通信技术。在过去的几十年里,世界各地的公用事业公司已经采用PLC进行远程抄表和负荷控制^[48]。作为一种有线通信技术,电力线通信却具备无线通信技术的一大优点,那就是不需要特地为通信进行二次布线。这在一些现有的,尤其是已经相当拥挤的,电力设施是一个极大的便利。然而,电力线通信的优缺点和适用场景无论在学界和业界都还是一个函待解答的问题。一个根本的因素是,电力线本质上是为传递电能设计的,而不是以通信为目的。此外,通信信道还受到有色噪声、负载变化、及支路情况的影响,而通信方式的设计又是紧密依赖于信道特征的。因此,一方面,一些研究人员已经着手研究电力线信道的建模和分析方法;另一方面,基于各种信道模型的通信收发器及通信协议的设计优化也正在进行中^[49-51]。

相对于有线通信,无线通信技术具备低安装成本,快速部署,流动性强等优点。其中,无线网状网,一种由无线节点组成网状结构的通信网络^[52],已在智能电表的部署中得到了实际应用。蜂窝移动通信系统在我们的日常生活中已经必不可

少。通过使用现有的蜂窝通信系统，可以快速和低成本地获得大区域数据通信覆盖范围。文献[53]提出使用蜂窝网络的短信服务（SMS）可以为成千上万的移动电动车充电控制提供一个简单的接口。相比其他无线技术，蜂窝移动通信系统最大的优势在于这种成熟技术的普及程度。

随着电网系统中广域测量、监测、保护和控制的发展，通信负荷急剧增加。虽然无线通讯是一个很好的候选对象，今天无线通信的爆炸性增长也带来了无线频谱资源的恐慌。另一方面，智能电网中的通信系统设计不仅需要满足当前的管理要求，也应该适应未来的潜在需求。因此，预计无牌频谱也将用于未来的智能电网。现有的无牌频谱技术包括Wi-Fi，蓝牙和Zigbee等，但要进一步增加实时高容量数据通信的能力，需要新的频谱再利用技术。实际上，虽然频谱几乎已经全部分配给各种授权的无线用户，其实际利用率相当低^[54]。为了解决这种效率低下，认知无线电系统提出了一种在时间或空间上填补频谱空缺的手段^[55]。这种技术在未来智能电网的具体应用最近也被提出^[56]。

智能电网中高渗透性的实时交互通信，在为电能质量和用户体验带来巨大好处的同时，也引起了人们对潜在的安全和隐私威胁的担忧。以智能电表基础设施（AMI）为例，攻击者可能在AMI注入虚假数据，造成系统性能降低，甚至大规模的停电。由于其安装的物理位置的不安全性，智能电表所测量和储存的用户的用电数据可能被窃听和分析以推断私人信息，如何种家电在何时运行以及主人是否在家等。如果攻击者蓄意收集和分析大量的数据，他们甚至可能了解受害人的日常活动细节和习惯并将此用于恶意目的。在极端情况下，用电户可能不信任供电公司，并会要求公用事业不能将其用电信息与用户的身份信息相关联。因此，保护数据安全、和维护客户的隐私

权，都是一个适用的AMI通信网络必不可少的功能。

广域监测设备（如传感器和同步相量测量装置）虽然不直接威胁到用户隐私，但它们的信息流失或损害也可能导致重大电力系统问题，以至一次性地影响到大量用户。这些广域部署的精确测量设备通常要将测量值传递到一些控制中心（如SCADA系统）^[57]。状态估计、数据分析和系统建模都在这里进行。因此，它的完整性对电网的可靠稳定运行是基本的必要保证。在这些方面，很多初步的研究工作已经展开，有兴趣的读者可进一步参考文献[37]中的详细综述。

参 考 文 献

- [1] H. Farhangi. The path of the smart grid. IEEE Power and Energy Magazine, 8(1):18–28, 2010.
- [2] WWF. The energy report, <http://wwf.panda.org/what-we-do/footprint/climate-carbon-energy/energy-solutions/renewable-energy/sustainable-energy-report/>. 2010.
- [3] International Energy Agency. Distributed generation in liberalised electricity markets 2002
- [4] R. H. Lasseter and P. Paigi. Microgrid: A conceptual solution. PESC'04, pages 4285–4290, 2004.
- [5] A. Molderink, V. Bakker, M. G. C. Bosman, J. L. Hurink, and G. J. M. Smit. Management and control of domestic smart grid technology. IEEE Transactions on Smart Grid, 1(2):109–119, 2010.
- [6] W. Kempton, V. Udo, K. Huber, K. Komara, S. Letendre, S. Baker, D. Brunner, and N. Pearre. A test of vehicle-to-grid (V2G) for energy storage and frequency regulation in the PJM system. Mid-Atlantic Grid Interactive Cars Consortium, 2009.
- [7] S. W. Hadley and A. A. Tsvetkova. Potential impacts of plug-in hybrid electric vehicles on regional power generation. Electricity Journal, 22(10):56–68, 2009.
- [8] E. Sortomme, M. M. Hindi, S. D. J. MacPherson, and S. S. Venkata. Coordinated charging of plug-in hybrid electric vehicles to minimize distribution system losses. IEEE Transactions on Smart Grid, 2(1):198–205, 2011.
- [9] W. Kempton and J. Tomic. Vehicle-to-grid power fundamentals:

- Calculating capacity and net revenue. *Journal of Power Sources*, 144(1):268–279, 2005.
- [10] W. Kempton and J. Tomic. Vehicle-to-grid power implementation: From stabilizing the grid to supporting large-scale renewable energy. *Journal of Power Sources*, 144(1):280–294, 2005.
- [11] Federal Energy Regulatory Commission. Assessment of demand response and advanced metering. Staff Report, <http://www.ferc.gov/legal/staff-reports/2010-dr-report.pdf>. 2010.
- [12] D. W. Rieken and M. R. Walker. Ultra low frequency power-line communications using a resonator circuit. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(1):41–50, 2011.
- [13] D. G. Hart. Using AMI to realize the smart grid. *IEEE Power and Energy Society General Meeting 2008 –Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, pp. 1–2, 2008.
- [14] A. G. Phadke and J. Thorp. *Synchronized phasor measurements and their applications*. New York: Springer Science, 2010.
- [15] A. Abur and A. Gomez-Exposito. *Power System State Estimation: Theory and Implementaion*. CRC Press, 2004.
- [16] F. Schweppe and E. Handschin, Static state estimation in electric power systems. *Proceedings of the IEEE*, 62(7):972–982, July 1974.
- [17] K. Martin, D. Hamai, M. Adamiak, S. Anderson, M. Begovic, G. Benmouyal, G. Brunello, J. Burger, J. Cai, B. Dickerson, V. Gharpure, B. Kennedy, D. Karlsson, A. Phadke, J. Salj, V. Skendzic, J. Sperr, Y. Song, C. Huntley, B. Kasztenny, and E. Price. Exploring the IEEE standard c37.118–2005 synchrophasors for power systems. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 23(4):1805–1811, October 2008.
- [18] T. Yang, H. Sun, and A. Bose. Transition to a two-level linear state estimator –Part I: Architecture. *IEEE Transactions on Power Systems*, 26(1): 46–53, February 2011.
- [19] F. F. Wu. Power system state estimation: A survey. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 12(2):80–87, April 1990.
- [20] V. Centeno, et al. An Adaptive Out-of-Step Relay. *IEEE Trans. on Power Delivery*, 12(1):61–71, 1997.
- [21] IEEE Standard for Synchrophasors for Power Systems, IEEE Std C37.118, 2005.
- [22] G. Benmouyal. System and algorithm for exact compensation of fundamental phasors. United States Patent 6,934,654. August 2005.
- [23] W. Premierlani. Method and apparatus for compensation of phasor estimations. United States Patent 6,141,196. October 2000.
- [24] E. Aboutanios and B. Mulgrew. Iterative frequency estimation by interpolation on Fourier coefficients. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 53(4):1237–1242, April 2005.
- [25] C. Candan. A method for fine resolution frequency estimation from three DFT samples. *IEEE Signal Processing Letters*, 18(6): 351–354, June 2011.
- [26] E. Jacobsen and P. Kootsookos. Fast, accurate frequency estimators: DSP tips & tricks. *IEEE Signal Processing Magazine*, 24(3):123–125, May 2007.
- [27] S. Provencher. Estimation of complex single-tone parameters in the DFT domain. *IEEE Trans. on Signal Processing*, 58(7):3879–3883, July 2010.
- [28] J. Chen and A. Abur. Placement of PMUs to enable bad data detection in state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*. 21(4): 1608–1615, November 2006.
- [29] E. Handschin, F. C. Schweppe, J. Khola, and A. Fiechter. Bad data analysis for power system state estimation. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 94(2): 329–337, March 1975.
- [30] M. Rice and G. Heydt. The measurement outage table and state estimation. *IEEE Transactions on Power Systems*, 23(2):353–360, May 2008.
- [31] Rice University, Compressive Sensing Resources. [Online]. Available: <http://dsp.rice.edu/cs>
- [32] P. J. Rousseeuw and A. M. Leroy. *Robust regression and outlier detection*. New York, NY: Wiley, 1987.
- [33] I. F. Akyildiz, W. Su, Y. Sankarasubramaniam, and E. Cayirci. A survey on sensor networks. *IEEE Communications Magazine*, 40(8):102–114, 2002.
- [34] V. C. Gungor, B. Lu, and G. P. Hancke. Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid, *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol. 57, no. 10, pp. 3557–3564, October 2010.
- [35] R. Leon, V. Vittal, and G. Manimaran. Application of sensor network for secure electric energy infrastructure. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 22(2):1021–1028, 2007.
- [36] V. C. Gungor, B. Lu, and G. P. Hancke. Opportunities and challenges of wireless sensor networks in smart grid. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 57(10):3557–3564, 2010.
- [37] X. Fang, S. Misra, G. Xue, and D. Yang, *Smart Grid–The New And Improved Power Grid: A Survey*, *IEEE Communications Surveys and Tutorials (COMST)*.
- [38] T. L. Vandoorn, B. Renders, L. Degroote, B. Meersman, and L. Van-develde. Active load control in islanded microgrids based on the grid voltage. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2(1):139–151, 2011.

- [39] C. M. Colson and M. H. Nehrir. A review of challenges to realtime power management of microgrids. IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1–8, 2009.
- [40] F. Pan, R. Bent, A. Berscheid, and D. Izraelevitz. Locating PHEV exchange stations in V2G. IEEE SmartGridComm'10, pp. 173–178, 2010.
- [41] A.-H. Mohsenian-Rad and A. Leon-Garcia. Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments. IEEE Transactions on Smart Grid, 1(2):120–133, 2010.
- [42] P. Samadi, A.-H. Mohsenian-Rad, R. Schober, V. W. Wong, and J. Jatskevich. Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid. IEEE SmartGridComm'10, pp. 415–420, 2010.
- [43] R. N. Anderson, A. Boulanger, W. B. Powell, and W. Scott. Adaptive stochastic control for the smart grid. Proceedings of the IEEE, 99(6):1098–1115, 2011.
- [44] X. Liu. Economic load dispatch constrained by wind power availability: A wait-and-see approach. IEEE Transactions on Smart Grid, 1(3):347355, 2010.
- [45] A. J. Conejo, J. M. Morales, and L. Baringo. Real-time demand response model. IEEE Transactions on Smart Grid, 1(3):236–242, 2010.
- [46] A. Y. Saber and G. K. Venayagamoorthy. Unit commitment with vehicle-to-grid using particle swarm optimization. IEEE Bucharest Power Tech Conference, pp. 1–8, 2009.
- [47] Walid Saad, Zhu Han, H. Vincent Poor, and Tamer Basar, Game Theoretic Methodologies for the Future Smart Grid, to appear, IEEE Signal Processing Magazine, special issue on Signal Processing Techniques for Smart Grid.
- [48] H. Ferreira, L. Lampe, J. Newbury, and T. Swart. Power line communications: Theory and applications for narrowband and broadband communications over power lines. John Wiley and Sons, 2010.
- [49] S. Barmada, A. Musolino, M. Raugi, R. Rizzo, and M. Tucci. A wavelet based method for the analysis of impulsive noise due to switch commutations in power line communication (PLC) systems. IEEE Transactions on Smart Grid, 2(1):92–101, 2011.
- [50] F. J. C. Corripio, J. A. C. Arrabal, L. D. del Rio, and J. T. E. Munoz. Analysis of the cyclic short-term variation of indoor power line channels. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 24(7):1327–1338, 2006.
- [51] S. Galli. A simplified model for the indoor power line channel. IEEE International Symposium on Power Line Communications and Its Applications, pp. 13–19, 2009.
- [52] I. F. Akyildiz and X. Wang. A survey on wireless mesh networks. IEEE Radio Communications, pp. 23–30, 2005.
- [53] C. Hochgraf, R. Tripathi, and S. Herzberg. Smart grid charger for electric vehicles using existing cellular networks and sms text messages. IEEE SmartGridComm'10, pp. 167–172, 2010.
- [54] S. Haykin, Cognitive radio: brain-empowered wireless communications, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 23, no. 2, pp. 201–220, February 2005.
- [55] G. Staple and K. Werbach. The end of spectrum scarcity. IEEE Spectrum, 41(3): 48–52, March 2004.
- [56] R. C. Qiu, Z. Hu, N. Guo, R. Ranganathan, S. Hou, and G. Zheng. Cognitive radio network for the smart grid: Experimental system architecture, control algorithms, security and microgrid testbed. IEEE Trans. on Smart Grid, 2(4):724–740, December 2011.
- [57] National Communications System. Technical Information Bulletin 041, Supervisory control and data acquisition (SCADA) systems. 2004.

作者简介

杨柳青 2004年获美国明尼苏达大学电子与计算机工程博士学位，现任中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室研究员，目前主要研究领域为智能电网和智能交通系统。

王飞跃 1990年获美国伦塞利尔理工学院计算机与系统工程博士学位。1990年起在美国亚利桑那大学先后任助教授、副教授和正教授，1998年作为国家计划委员会“引入海外杰出人才计划”和中国科学院“百人计划”人才回国工作，曾任中国科学院自动化研究所副所长。现任中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室主任、研究员。

王飞跃教授主要研究领域为智能系统、社会计算和复杂系统的建模、分析和控制。现为IEEE Intelligent Systems、IEEE ITS汇刊和《自动化学报》主编。现任中国自动化学会副理事长兼秘书长，中国管理现代化研究会系统管理与复杂性科学专业委员会主任。2007年获国家自然科学奖二等奖。2003年起先后当选IEEE，IFAC，INCOSE，ASME和AAAS等学术组织的Fellow。

智能电网与自动化技术的协调发展

张化光

东北大学 电气自动化研究所 辽宁沈阳 110819

摘要：分布式发电（Distributed Generation, DG）作为智能电网的关键技术之一，在其设计与实现中发挥着重要的作用。DG可以提高供电质量和系统的可靠性与灵活性，但DG的并网会对电压分布、电压稳定性、系统可靠性、潮流分布、功率损耗以及继电保护等造成影响。本文深入浅出地介绍了DG与智能电网之间的关系和国内外发展的现状，详细分析了目前我国在此方面存在的问题。并指出先进的自动化技术将对含分布式发电的智能电网的研究与发展提供理论支撑和有效的解决方案。

关键词：分布式发电，智能电网，自动化技术，协调发展

一、基本含义

在传统电网老化和种种弊端逐渐显露以及当今社会对电力系统供电质量、环境效益要求越来越大的背景下，一种靠近负荷中心的、安全可靠且发电方式灵活的分布式发电（Distributed Generation, DG）成为21世纪电力工业的发展方向和研究热点^[1]。不同国家和组织对于分布式发电的定义不尽相同。美国能源部（US.DOE）将分布式发电定义为“分布在用户附近的小型、模块化的发电设施，能够推迟或消除输配电系统在升级过程中的巨大投资，能够向用户提供更高质量和更加可靠的能源供给，以及清洁的环境”^[2]。国际大电网委员会（CIGRE）给出的定义是“一种发电规模约在5 MW ~ 100 MW的、通常与配电网连接的、非经规划或中央调度型的电力生产方式”。一般来讲，分布式发电是指利用各种可用和分散存在的能源，包括可再生能源（太阳能、生物质能、小型风能、小型水能、波浪能等）和本地可

方便获取的化石类燃料（主要是天然气）进行发电供能的技术。总之，分布式发电以其发电方式灵活、低投资、高可靠性等特点逐渐成为研究热点，具有广阔的市场前景。

由于大多数分布式电源具有节能环保、降低电网扩容成本、减少电能损失以及增强用电可靠性等诸多优点，近年来世界电力系统已经从集中式供电模式转为主系统与分布式电源并存的混合供电模式，这使得电力系统不再是传统意义上的电力能量单向传输的输配电网，而是电力负荷和电源并存，能量双向甚至多向流动的电网^[3]。为了在新的供电形式下保证电网的安全稳定经济运行，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”。自2003年起，美国多个政府及民间组织分别对智能电网提出了各自的定义和行动计划建议，其中具有典型意义的是美国电力科学研究院提出的智能电网（Intelligrid）^[4]。2006年，欧洲埃克西尔能源研究协会也提出了类似的概念，称为Smart Grid^[5]。

近几年,由于智能电网在安全经济运行、节能环保等方面具有明显的优势,我国开始出现这方面的介绍性内容,统称其为智能电网^[6]。目前智能电网还没有统一的定义,但是国内外研究机构普遍认为自愈、坚强、经济、共享和集成是智能电网的核心优势和重要技术攻关点。

二、智能电网与分布式发电的关系

2.1 分布式发电对智能电网的影响

将分布式发电系统集成到现在的配电系统中,是今后配电系统的发展趋势。但是大量DG的接入会对配电系统的结构和运行产生很大影响。以下介绍了其对配电网影响的几个方面:

(1) 对电能质量的影响

在DG接入配电网后,分布式电源会引起配电网的各种扰动,从而对系统的电能质量产生影响,主要表现在电压闪变(Voltage flicker)、谐波(Harmonic)、过电压(Overvoltage)、电压跌落(Voltage sags)、电压脉冲(Impulse)、浪涌(Surge)和瞬时供电中断(Outage)等^[7,8]。

(2) 对网损的影响

在配电网中接入分布式电源,整个配电系统的功率流向将发生变化。按节点负荷和DG出力大小的关系,可以分为以下3种情况^[9]:

①系统中每个节点的负荷量都大于或者等于该节点的DG输出量。

②系统中至少有一个节点的DG输出量大于该节点的负荷量,但整个系统DG的输出量小于系统中的总负荷量。

③系统中至少有一个节点的DG输出量大于该节点的负荷量,且整个系统DG的输出量大于系统中的总负荷量。

对于情况①,DG将会对配电网有减少损耗的作用;对于情况②,DG有可能会使配电网中某些

线路的损耗增加,但总的来说,整个配电网中的损耗还是会减少;对于情况③,若DG的总输出量小于总负荷量的两倍,情况与②相似,否则,整个配电网中的系统损耗将会比未接入DG时还多。由此可见,分布式发电技术的应用可能增大也可能减小系统损耗,这取决于分布式电源的位置、其与负荷量的相对大小以及网络的拓扑结构等因素。

(3) 对潮流的影响

分布式电源的接入会对原潮流流向产生影响,传统的潮流分析方法不再完全适用^[10-11]。包含DG的配电网潮流计算与普通潮流计算的区别之一是DG的潮流计算模型与传统发电机组计算模型不一致。传统发电机节点在潮流计算中一般取PQ节点、PV节点或平衡节点,而DG有特殊性,其节点是否能取为这3种节点类型需全面考虑。

(4) 对稳态电压分布的影响

传统配电网一般呈辐射状,稳态运行情况下,电压沿馈线的潮流方向逐渐降低。接入分布式电源后,在稳态情况下(视负荷恒定不变),由于馈线上的传输功率减少以及DG输出的无功支持,使得沿馈线的各负荷节点处的电压有所提高。而电压被抬高多少与接入的DG的位置及总容量的大小有关^[12-16]。

(5) 对继电保护的影响

由于传统辐射状配电网的潮流是从电源到用户单向流动的,且考虑到配电网80%的故障是瞬时的,所以传统配电网的保护设计通常是在变电站处安装反向过流继电器,主馈线上装设自动重合闸装置,支路上装设熔断器。传统的配电系统保护根据“仅断开故障支路,对瞬时故障进行重合闸”的原则,使自动重合闸装置与各侧支路上的熔断器相互协调,且每个熔断器又分别与其直接相连的上一级和下一级支路上的熔断器相互协调以实现配电网线路的保护,但是这种保护不具有方向性。

引入DG后,配电网成为一个多电源系统,这要求其保护设备应具有方向性^[17],但熔断器和传

统的自动重合闸装置并不具备方向性,而用诸如继电器那样的方向性敏感元件替换配电网中所有的熔断器和自动重合闸装置,在经济上又是不可行的。所以现在普遍的做法是:在任何故障情况下,跳开全部的DG单元,使系统恢复到DG接入前的拓扑结构,这样就可以延用传统的保护方案。但是对于今后有大量DG接入配网的情况,这种方法会降低系统的可靠性^[18]。

(6) 对系统可靠性的影响

若分布式电源仅作为备用电源,则可提高系统供电的可靠性。但是,若分布式电源与电网并联运行,就有可能降低系统的可靠性^[19-21]。例如:在系统中出现扰动时,由于DG的高度不确定性(如受太阳辐射强度影响的光伏电池,受风速影响的风机功率),也可能降低系统的可靠性。目前,实际系统一旦出现扰动,通常会切除所有的DG,使系统恢复到原来的结构,但这并不是最佳的解决方案。

2.2 发展分布式发电的意义

作为未来电力和能源领域的一个重要发展方向,发展分布式发电的意义主要可以归纳为以下几个方面:

(1) 作为未来智能电网的关键技术之一,分布式发电理论和技术的发展为新一代智能电网的设计与实现奠定了坚实基础。

(2) 分布式发电可以弥补大电网安全稳定性的不足,在意外灾害发生时能够继续供电,已成为集中供电方式不可缺少的重要补充。

(3) 分布式发电系统中各电站相互独立,用户可以自行控制,不会发生大规模停电事故,所以安全可靠比较高。

(4) 分布式电源供电能起到电力调峰作用,操作简单,由于参与运行的系统少,启停快速,便于实现全自动。

(5) 分布式发电的输配电损耗很低,甚至没

有,无需建立配电站,可降低或避免附加的输配电成本。而且具有良好的环境效益。

三、分布式发电的国内外研究现状

在分布式发电的研究和开发领域,国外如美国、英国、日本等一些国家起步较早,在技术上处于领先地位。而分布式发电技术在我国目前还处于起步阶段。

国外已对分布式发电系统的规划和运行、控制和保护以及微型电网技术等方面做了大量的理论研究工作^[22-25],在应用技术上也日趋成熟。El-Khattam^[26]为解决含分布式发电的配电网规划问题,提出了一种旨在最小化线路损耗和DG运行成本的负荷模型。Haffner^[27]提出了一种多级扩展模型,该模型考虑到并且允许现有变电站容量的增加,以及增加新的变电站,有效解决了分布式电源并网的规划问题。Keane^[28]提出一种考虑系统各种技术约束的用于确定DG最优安装位置的方法。该方法以DG最大出力为目标函数,考虑节点电压约束,线路潮流约束,短路电流比约束等多种约束,利用线性规划方法进行求解。但由于该方法首先假设每个节点都安装DG,这一点不符合实际中DG分散分布的特点。

在技术和应用领域,美国早在1978年就开始提倡发展分布式发电技术。据美国分布式电力联盟(DPCA)的研究估计,未来20年,DG将获得新增发电容量的20%(35GW)^[29]。IEEE经过评估认为,到2010年DG系统将占新增发电容量的30%;并成立了一个名为IEEE SCC 21 on Fuel Cells, Photovoltaics, Dispersed Generation, and Energy Storage的新机构,专门检查燃料电池、太阳能、DG系统、能量储存等方面标准的发展,并协调这些标准与IEEE以外的其它团体或机构所颁发标准的一致性,确保这些标准的通用性。IEEE于1999年颁布了IEEE Std 1547,即“关于分布式电源与电

力系统互联的标准草案”，极大地规范和促进了分布式发电并网技术的发展。

而在我国，分布式发电方面的研究工作相对较少，并且大部分是对于分布式电源本身的研究，例如提高燃气轮机的效率，提高风机的效率和运行稳定性^[30]，改进太阳能的利用方式等，而在DG对配电网的规划运行等方面的影响研究相对较少，且大多数集中在定性分析层面上。定量地研究DG并网后对电力系统运行的影响对于DG在我国的发展尤重要，例如DG并网后的电能质量问题，尤其是保证并网后的电网电压处于允许电压偏差范围内^[31]，还有配电网规划方面，如DG最优布置问题。另一方面，我国尚欠缺分布式电源与配电网联结的标准，缺乏规程，而我国电网还不够完善，尤其是西部电网，网架结构还比较脆弱，所以国外在并网运行方面的研究成果尚无法直接应用于我国电网。这成为制约我国分布式发电技术的一个瓶颈。

尽管还存在许多技术障碍，但以其经济、环保、安全、可靠等诸多优势，分布式发电已成为21世纪电力工业的发展趋势。

四、自动化技术与分布式发电和智能电网的协调发展

分布式电源接入电网后，将给配电网乃至输电网的电压、电能质量、系统保护和调度运行等带来一系列的影响，并联模式下电网的监控和管理面临很多技术上的难题。智能电网技术的发展为分布式电源的无缝并网提供了契机^[32]。信息化、自动化、互动化是智能电网的基本技术特征。信息化是坚强智能电网的实施基础，实现实时和非实时信息的高度集成、共享与利用；自动化是坚强智能电网的重要实现手段，依靠先进的自动控制策略，全面提高电网运行控制自动化水平；互动化是坚强智能电网的内在要求，实现电源、电

网和用户资源的友好互动和相互协调。通过合理的应用智能电网技术，能在分布式电源接入电网后，实现实时互动和协调运行。目前，世界范围内关于分布式能源与智能电网高级的控制方法与技术研究都在进行着有益的探索。

4.1 虚拟电厂技术

为适应清洁能源、分布式能源的特性，需要研究结合了电网频率、联络线潮流、电压控制技术、发电预测模型和方法等为一体化的高级控制技术。虚拟电厂技术被认为是解决分布式发电接入与控制的有效途径之一^[33]。

虚拟电厂技术将配电网中分散安装的分布式发电单元、受控负荷和储能系统合并作为一个特别的电厂参与电网运行。其中，每一部分均与能量管理系统相连，通过智能电网的双向信息传送，利用能量管理系统进行统一调度，以达到降低发电损耗、减少温室气体排放、优化分布式能源的利用、降低电网峰值负荷和提高供电可靠性的目的。虚拟电厂技术的应用，还能使分布式电源控制的可视化程度大大提高，有利于调度员和运行部门做出合理的决策。

4.2 基于多Agent系统的控制

电力系统中的数据、控制甚至运行维护人员的行为都呈分布状态，对其进行完全集中式的求解可能遇到信息不全、通信瓶颈或计算速度等问题。多Agent系统理论是设计和实现复杂软件系统和控制系统的新途径，它因适用条件与电力系统的特征相吻合而受到众多学者的关注。在电力市场研究、电力故障诊断技术、保护与无功电压控制等方面，都有多Agent系统理论的身影。

为实现智能配电自动化，在含有分布式电源的智能电网中，多Agent系统应包括控制Agent、分布式发电Agent、用户Agent和数据库Agent。各Agent之间通过协议交换数据，并通知对方自身的

服务器名称和地址；各Agent发送功能数据给相关服务商后，用户Agent、分布式发电Agent与相联控制Agent注册，并由控制Agent响应完成多Agent系统的初始化。通过多Agent之间的通讯获得电网运行状态，并用来构造自身的性能指标函数，从而在自身性能指标函数学习优化的过程中实现相互之间的协调和性能优化^[34]。

4.2 含分布式电源的智能电网优化控制

电力系统的优化运行问题长期以来一直是电力系统技术人员和学者研究的重点^[35]，而加入了分布式电源后的智能电网优化问题不仅仅需要考虑无功功率的优化更需要考虑有功功率的优化，而且优化操作主体也由唯一的主电网发展为主电网与分布式电源并存^[36]，这更增大了优化控制问题的难度^[37]。智能电网优化运行可以归结为一个多目标、复杂约束、强耦合、非线性、包含多种不确定因素的信息处理和优化控制问题，涉及到电力系统分析、最优控制理论、以及混杂信息处理等多学科交叉的研究领域。近几十年来，对这一复杂问题，国内外学者对其进行了多年深入的研究，并取得了一定的成果。

近似动态规划（Adaptive dynamic programming, ADP）是最优控制领域新兴起的一种近似最优方法。ADP方法利用函数近似结构来近似哈密顿-雅可比-贝尔曼方程的解，采用离线迭代或者在线更新的方法，来获得系统的近似最优控制策略，从而能有效的解决非线性系统的优化控制问题。基于ADP方法的优化控制为此提供了理论基础，近几年来在电力系统优化控制中已有一些成功的应用。文献^[38]将HDP方法应用到单机电力系统汽轮发电机的实时控制

中，克服了传统的基于频域中相位补偿理论的超前滞后补偿器无法保证在电力系统实际运行中的性能等缺点。文献^[39]将ADP方法应用到同步发电机控制中，取代了传统的自动电压调节器。但是由于当前的主电网与分布式电源间大量的信息无法有效共享，计算分析方法不同，功率调节控制装置特性不同，不同主体优化目标不同等多重因素的共同作用，极大的加剧了智能电网优化运行的难度。

五、研究与发展

国家电网规划到2020年智能电网总投资规模接近4万亿元，从2009开始已经对智能电网的关键性、基础性、共用性技术进行研究，其中配电网是研究的核心内容。随着大量分布式发电（风电、光伏等）并网运行，配电网控制的不确定性增强，传统的配电网系统相关技术和理论并不能直接应用到含分布式发电的电网中。而且分布式发电具有分布自主和出力不确定等诸多特性，和所引起的传统配电网潮流单向性的改变，均对配电网的运行及管理带来巨大影响或变革。最终各个方面的问题必须在一个统一的平台之上进行协调及控制。

从目前来看，国内对智能电网的研究问题主要集中在：故障诊断与网络重构，自愈控制与故障预警，分布式发电及网络结构规划，智能电网的优化和经济运行等几个方面（如图1）。

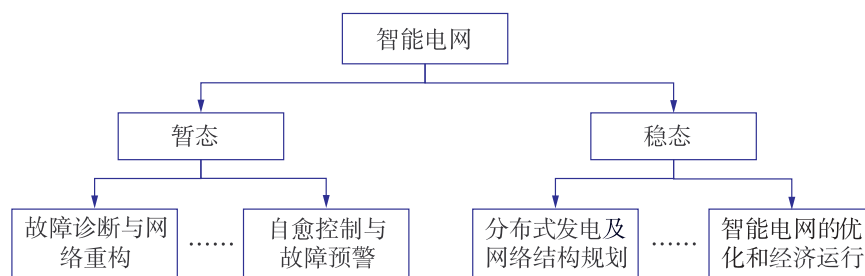


图1 智能电网中的主要研究内容

可见分布式发电只是智能电网中有待解决的问题之一。在其理论方面,我们也提出了一些解决方案^[40-42]。在分布式发电与大电网并网方面,应重点考虑使用新的保护方案、智能仪表和控制方式来满足双向潮流的需要。但在新技术实施上,与我国目前的相关政策还有相抵触的地方,这对发展分布式发电产生了一定阻力。所以,在其具体应用方面,还是需要国家出台“分布式能源电网接入”等相关政策给予扶持。

分布式发电与大电网联合运营是我国电力工业未来发展的必然趋势,智能电网和自动化相关技术为实现这一宏伟蓝图提供了理论基础和技术保障。一方面电力系统在当今社会所担当角色重要性的体现,人们对于电网运行的安全性和可靠性提出了更高的要求;另一方面也是电力系统相关理论、控制理论、计算机技术及分布式发电技术发展的需要。分布式发电、并网和对电网运行及管理等方面的研究会随着工作的深入而不断清晰和实用。但从目前情况来看,对我国智能电网的研究之路还是任重而道远。

参 考 文 献

- [1] 梁志鹏, 谢正武. 中国分布式发电的机遇和挑战[J]. 节能与环保, 2004, 11: 11-13.
- [2] Definition of “Distributed Generation” by U.S Department of Energy. (<http://www.eere.energy.gov/>)
- [3] IntelliGrid (<http://intelligrid.epri.com/>)
- [4] Paul Haase. IntelliGrid: a smart network of power[J]. EPRI Journal, 2005: 17-25.
- [5] Understanding the Smart Grid[R]. Research Reports International, August, 2007.
- [6] 余贻鑫, 梁文鹏. 智能电网[J]. 动力与电气工程, 2008, 2(5):13-17.
- [7] Pedro M S C, Pedro F C, Ferreira L A. Distributed reactive power generation control for voltage rise mitigation in distribution networks[J]. IEEE Trans. Power Systems, 2008, 23(2): 766-772.
- [8] Sao C K, Lehn P W. Control and power management of converter fed microgrids[J]. IEEE trans. Power Systems, 2008, 23(3): 1088-1098.

- [9] Aekerman T, Knyazkin V. Interaction between distributed generation and the distribution network[C]. IEEE/IES Transmission and Distribution Conference and Exhibition, Asia Pacific, 2002, 02:1357-1362.
- [10] Dai M, Nanda M, Jung Jin-Woo. Power flow control of a single distributed generation unit[J]. IEEE Trans. Power Electronics, 2008, 23(1):343-352.
- [11] Xu H, Peng F Z, Li K. Multi-phase DC-DC converter with Bi-directional power flow ability for distributed generation system[C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 2008, 2800-2805.
- [12] Hazel T G, Hiscock N, Hiscock J. Voltage regulation at sites with distributed generation[J]. IEEE Trans. Industry Applications, 2008, 44(2):445-454.
- [13] Viawan F A, Karlsson D. Coordinated voltage and reactive power control in the presence of distributed generation[C]. Power and Energy Society General Meeting, July 2008, 1-6.
- [14] Cziker A, Chindris M, Miron A. Voltage unbalance mitigation using a distributed generator[C]. 11th International Conference on Optimization of Electrical and Electronic Equipment, Brasov, May 2008, 221-226.
- [15] Alinejad-Beromi Y, Sedighzadeh M, Bayat MR, et al. Using genetic algorithm for distributed generation allocation to reduce losses and improve voltage profile[C]. 42nd International Universities Power Engineering Conference, Brighton UK, 2007: 954-959.
- [16] AlHajri M F, El-Hawary M E. Improving the voltage profiles of distribution networks using multiple distribution generation sources[C]. Power Engineering Large Engineering Systems Conference, Oct. 2007, 295-299.
- [17] El-Khattam W, Sidhu T S. Restoration of directional overcurrent relay coordination in distributed generation systems utilizing fault current limiter[J]. IEEE Trans. Power Delivery, 2008, 23(2): 576-585.
- [18] Xu H, Peng FZ, Li K. Multi-phase DC-DC converter with Bi-directional power flow ability for distributed generation system[C]. IEEE Power Electronics Specialists Conference, June 2008, 2800-2805.
- [19] Calderaro V, Milanovic J V, Kayikci M, et al. The impact of distributed synchronous generators on quality of electricity supply and transient stability of real distribution network[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 79(1):134-143.
- [20] Ramesh L, Chowdhury S P, Chowdhury S, et al. Voltage stability analysis and real power loss reduction in distributed distribution

- system[C]. IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, April 2008, 1–6.
- [21] Marwali M N, Jin-Woo J, Keyhani A. Stability analysis of load sharing control for distributed generation systems[J]. IEEE Trans. Energy Conversion, 2007, 22(3):737–745.
- [22] Yazdani D, Bakhshai A, Joos G, et al. A nonlinear adaptive synchronization technique for grid-connected distributed energy sources[J]. IEEE Trans. Power Electronics, 2008, 23(4):2181–2186.
- [23] Jayaweera D, Galloway S, Burt G, et al. A sampling approach for intentional islanding of distributed generation[J]. IEEE Trans. Power Systems, 2007, 22(2):514–521.
- [24] Dugan R C. Challenges in considering distributed generation in the analysis and design of distribution systems[C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting, Pittsburgh, July 2008, 1–6.
- [25] Choi S S, Tseng K J, Vilathgamuwa DM, et al. Energy storage systems in distributed generation schemes[C]. IEEE Power and Energy Society General Meeting, Pittsburgh, July 2008, 1–7.
- [26] El-Khattam W, Hegazy Y, Salama M. An integrated distributed generation optimization model for distribution system planning[C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2005, 2392–2398.
- [27] Haffner S, Pereira L F A, Pereira L A, et al. Multistage model for distribution expansion planning with distributed generation Part I: Problem formulation[J]. IEEE Trans. Power Delivery, 2008, 23(2): 915–923.
- [28] KEANE A, MALLEY M O. Optimal allocation of embedded generation on distribution networks[J]. IEEE Trans. Power Systems, 2005, 20(3):1640–1646.
- [29] Peng F Z. Editorial special issue on distributed power generation[J]. IEEE trans. Power Electronics, 2004, 19(5):1157–1158.
- [30] 许珊珊, 聂继飞. 新能源分布式发电的应用研究现状[J]. 大众用电, 2009, 04: 3–5.
- [31] 王志群, 朱守真, 周双喜等. 分布式发电对配电网电压分布的影响[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(16): 56–60.
- [32] 季阳, 艾芊, 解大. 分布式发电技术与智能电网技术的协同发展趋势[J]. 电网技术, 2010, 34(12):15–23.
- [33] Mashhour E, Moghaddas-Tafreshi S M. The opportunities for future virtual power plant in the power market, a view point[C]. 2009 International Conference on Clean Electrical Power. Capri, Italy, 2009: 448–452.
- [34] Rahman S, Pipattanasomporn M, Teklu Y. Intelligent distributed autonomous power systems (IDAPS) [C]. IEEE Power Engineering Society General Meeting. Tampa, USA: IEEE, 2007:1–8.
- [35] Dixon J, Moran L, Rodriguez E, and Domke R. Reactive Power Compensation Technologies: State-of-the-Art Review[C]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(12):2144–2164.
- [36] Li H, Li Y, and Li Z. A multiperiod energy acquisition model for a distribution company with distributed generation and interruptible load. IEEE Trans. Power Systems, 2007, 22(2): 1821–1831.
- [37] 高严等. 中国电力百科全书——电力系统卷[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [38] Venayagamoorthy G K. A heuristic-dynamic-programming-based power system stabilizer for a turbogenerator in a single-machine power system. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(5): 1377–1385.
- [39] Park J W, Harley R G, Venayagamoorthy G K. Adaptive-critic-based optimal neurocontrol for synchronous generators in a power system using MLP/RBF neural networks. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(5):1529–1540.
- [40] Zhang H, Wang Q, Chu E, Liu X, and Hou L. Analysis and implementation of a passive lossless soft-switching snubber for PWM inverters. IEEE Trans. on Power Electronics, 2011, 26(2): 411–426.
- [41] Zhang H, Yang J and Su C-Y. T-S fuzzy-model-based robust H-infinite design for networked control systems with uncertainties, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2007, 3(4): 289–301.
- [42] Sun Q, Li Z, Yang J, Luo Y. Load distribution model and voltage static profile of Smart Grid, J. Cent. South Univ. Tech, 2010, 17(4): 824–829.

作者简介

张化光 男, 1959年出生, 国家教育部“长江学者奖励计划特聘教授”, 东北大学信息科学与工程学院电气自动化所所长。现任IEEE高级会员, IEEE计算智能社会自适应动态规划和加强学习技术委员会主席, 本领域权威刊物Automatica、IEEE Trans. FS、IEEE Trans. SMC-B、IEEE Trans. NN等期刊编委。

智能电网中的故障监测与自愈协调控制：挑战与机遇

赵千川¹，毕卫红²，孙玉娇³

1. 清华大学自动化系，清华信息科学与技术国家实验室（筹） 北京 100084

2. 燕山大学信息学院 河北秦皇岛 066004

3. 中国电力科学研究院系统所 北京 100192

摘要：结合我国电网建设的实际情况研究不确定环境下电网的安全性和可生存性分析问题，电网的大范围状态监测及故障传播态势评估问题和电网严重故障情况下的响应式网络重构与负荷协调控制问题是自动化和电力系统科研工作者需要共同努力解决的重要研究课题。

关键词：智能电网，不确定性，拓扑控制，故障传播，安全性分析

电力系统面临的安全挑战

随着经济发展，电网规模不断扩大，大规模风电和光伏新能源的接入，增加了不确定性。另外，正像大容量风电场或大容量光伏电站的接入对输电网的安全稳定运行带来诸多影响一样，当中低压配电网中的分布式电源容量达到较高的比例（即高渗透率）时，要实现配电网的功率平衡与安全运行，并保证用户的供电可靠性和电能质量也有很大困难。

随着各种新能源（风能、太阳能等）的并网发电及大规模开发与利用，电能的产、供、需不确定性和时空多尺度性越来越明显，电网的复杂性和规模不断增加。复杂系统理论告诉我们，大量发生短程相互作用组元的复杂系统，在特定的条件下系统将自行演化，最终达到一个临界的稳态，即自组织临界态。在这个亚稳态，某个微小

的故障可能诱发连锁反应导致系统的大规模崩溃。当今电网的安全与生存性面临着巨大挑战。应当指出，随着大量信息设备引入电网，与信息系统相关的某些故障（称为软故障）也可能引发实际电气设备的故障，甚至成为大停电事故的诱因。事实上，美加2003年8.14大停电中，能量管理系统中状态估计功能的瘫痪也是使得初始的小范围故障最终升级成为影响750万用户的大停电的原因之一。

我国电网规模庞大，电力系统运行控制复杂，电力系统的安全稳定控制存在巨大挑战，据统计，1999–2007年我国电网共发生因自然灾害、一次电气设备故障、安全自动装置及继电保护装置异常、控制及辅助系统故障、通信及自动化设备故障以及人员误操作、外力破坏等引起的电网事故高达37起。其中华中（河南）电网7.1事故即由于保护装置误动及安控装置未能正确动作而

引发电网连锁反应,引起华中电网大范围功率振荡,并最终导致华北、西北与华中电网解列以及川渝电网与华中主网解列,华中电网损失大量负荷。

未来,随着特高压交直流建设的全面开展及全国联网的实现,我国将形成典型的交直流送受端混合系统。当系统发生故障时交直流及多直流之间的协调配合对保证电网的安全稳定运行意义重大。而在电网建设时期,特高压直流建设速度相对较快、特高压交流电网网架结构相对薄弱以及电磁环网的存在,都将使电网抵御严重故障的能力减弱。

我国能源及负荷分布极为不均衡,“西电东送”战略的实施及“疆电外送”3000万千瓦目标的确定,都将使西北电网成为典型的交直流混合送端系统。而交直流之间、多直流之间以及控制设备之间存在交互影响,增大了连锁反应故障的风险,同时,西北地区甘肃酒泉风电、新疆哈密风电以及青海光伏等新型能源的大规模接入,进一步增加了系统的不确定性,为西北电网的安全稳定运行提出了新的问题和挑战。

智能电网建设的兴起

在面临的诸多挑战中,特别是由级联事件和人为处理不当而演变成的大停电,日益引起人们的关注。制止级联跳闸发展和缩小停电范围的主动解列、灵活分区等措施,以及从集中监视控制发展到分布协调控制,自然成为当前研发的新热点。专家指出,目前电网的安全控制正从上述面向物理系统的安全防护走向涉及自然和社会因素的灾变防御,正从利用本地自动控制装置保护本地系统免受系统故障的冲击的传统继电保护走向综合利用全网的信息进行分析,有选择地将部分本地信息传送到远端,以共同阻止重大故障的传

播的广域防护。以能量和信息双向流动机制为核心理念的智能电网的概念应运而生。

当前各国在智能电网的研究中,建立现代的能量管理系统(EMS)、动态的数据采集与监视控制系统(SCADA)系统及基于同步相量测量装置(PMU)的广域相量测量系统(WAMS)的技术研究,迅速推动了通信和软件平台的建设,为进一步研究智能电网的大范围故障监测与自愈调控打下了基础。

诸多灾变防御系统的研发热点中,美国开发的电力基础设施战略防护系统(strategic power infrastructure defense system, SPID)较为引人注目。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、因特网、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。SPID的自愈战略理念,在随后自愈电网(self healing grid)的研发中得到继承和发展。这就是:事件响应的快速仿真决策、主动解列灵活分区的分布协调/自适应控制以及紧急状态下分布能源的辅助服务。但是这些文献并没有研究稳定控制体系的功能设计和组织,也没有涉及协调的模型与算法;另一个缺陷是没有将自愈电力系统的理念与大停电的演化规律相关联。

广域监视分析保护控制(WARMAP——Wide area monitoring analysis protection-control)则是薛禹胜院士团队提出的一个时空综合的防御框架。

该框架的三大要素为：广域的静态和动态测量、安全稳定性的量化分析、时空多道防线的优化协调。其中所采用的部分关键技术，例如在线预决策的预防控制技术和自适应优化的紧急控制技术，已经在实际工程应用中积累了宝贵的运行经验。但由于问题的复杂性和故障演化趋势的不确定性，采用通用的混合非线性规划工具，将面临计算复杂性的挑战和模型鲁棒性的问题，毕竟目前的非线性规划工具能够求解的问题规模较小。

应当承认，电力系统的故障或停电是无法完全避免的，如何在发生故障的情况下，准确及时地识别和定位故障，通过正确的电网调度，尽量减小故障损失，尽快恢复供电是智能电网的重要研究内容。目前可以从电网中采集到的运行数据很多，但可以帮助在电网紧急状态下进行正确决策的信息比较少。即使存在将数据转换为所需的决策信息的快速模型，如果电网调度人员不能完全理解信息的内容，也不会完全采信其决策建议。对于智能电网，在紧急状态下做出正确响应的一些关键因素包括：被影响区域及相邻区域电网之间的良好协调措施；帮助调度员正确决策和执行动态控制措施的可靠且有效的软件工具；减少恢复过程中过负荷和失稳的控制措施。因此，灾变情况下的具有明确物理解释的可执行的先进自愈调控理论仍有待深入研究。

智能电网为提高电网安全稳定运行带来的研究机遇

智能电网的建设，为自动化科学的理论与技术在提升电力系统安全性提供了前所未有的机遇。结合我国电网建设的实际情况，研究不确定环境下在系统层面分析电网的安全性和可生存性，建立电网的大范围状态监测机制和故障传播态势评估机制，建立在电网严重故障情况下的响

应式网络重构与负荷协调控制机制是当前自动化和电力系统科研工作者需要共同努力解决的重要研究课题。

电网是典型的复杂网络化系统。随着以复杂大规模人造网络的行为研究对象的网络科学的兴起，人们逐渐认识到，大规模的网络化系统的运行背后有着深刻的物理规律。在这样的系统中，无数的不确定因素相互作用的结果，使得系统的整体呈现具有相当稳定性的规律。举例来说，复杂网络化系统不同于完全随机的系统，它们可以同时既是鲁棒的又是脆弱的。一个表现就是，系统中的节点的作用不是完全对等的。一方面，随机选取的节点上出现的故障（或受到人为的攻击），对网络整体影响可以忽略不计，从而使系统表现出很强的鲁棒性；另一方面，如果某些关键节点出现故障或遭受攻击，将导致全局瘫痪。因此我们认为，在展开对大规模电网的安全性分析和故障传播态势评估研究过程中，应当充分借鉴网络科学的最新研究成果，并综合考虑智能电网作为复杂网络的特征（包括人为错误和设备故障特性）和电网本身的电气约束（如潮流方程）。

此外，在电网安全状态监测方面，学术界已有多年的研究，在电气故障识别和监测技术方面积累了丰富的研究成果，不少也在实践中得到了检验。特别是最近，广域相角测量系统的部署和研究，为大范围故障监测提供了有力的技术支撑。我国在用于传输线状态监测的智能光电缆、高压电流互感器和高性能同步相量测量技术方面有很好的研究基础，在工程案例中也积累了大量电气故障和信息系统相关的软故障数据，这可为进一步深入研究电网安全状态分析和故障监测问题打下坚实的基础。而在混杂和离散事件动态系统的理论研究方面，我国同样有很好的研究基础。如果能够充分利用混杂和离散事件动态系统的理

论和分析方法,建立能够描述电力网络和信息网络动态交互作用的智能电网数学模型,将为研究故障在电网中的传播的机理和态势评估方法提供有力的理论支撑。

我国电网研究和运行的宝贵经验表明,采用综合的多道防线的主动防御措施,是物理概念清晰和合理的广域防御战略。继承在我国电网设计上很有特殊的多道防线的思想,充分发挥现代信息技术和电力电子技术的在获取信息和执行调控措施方面的优势,依托现代的EMS系统、动态SCADA系统及基于PMU的广域相量测量系统(WAMS)提高的信息和软件平台,提高我国智能电网系统的自愈调控自动化程度和科学性。具体地,我们建议在多道防线的思想指导下,依故障的性质和严重程度进行区别处理:在传输线状态实时监测和PMU测量等先进的电网广域安全状态监测手段和故障态势快速准确评估的基础上,对轻微局部故障,研究如何通过实时的潮流调控措施,阻止其传播;对于更严重的区域范围故

障,研究如何通过有效的切机切负荷手段,限制故障扩散范围,使其恢复供需平衡;对于涉及多个区域的大范围的全局故障,研究如何通过主动解列,避免全网的大停电。根据安全状态监测信息,结合实时的故障态势评估结果,进一步深入研究我国学者前期提出的基于验证的主动解列决策方法,给出提高电网生存度的主动解列决策,努力避免传统的解列控制针对预测的故障离线设计解列点,不能适用未预料的严重故障造成的发电机群失步的缺点。

结语

随着经济发展,电网规模不断扩大,不确定性的增加给电网安全稳定运行带来了前所未有的挑战。智能电网研究的兴起,为解决大规模电网面临的安全问题提供了机遇。我国自动化和电力系统工作者应当共同携手迎接挑战。

作者简介

赵千川 男,博士,教授,博士生导师。1969年生,河北唐县人。1996年毕业于清华大学自动化系,获工学博士学位。现工作于清华大学自动化系智能与网络化系统研究中心。主要研究方向为网络化动态系统的安全分析与性能优化,在绿色ICT技术、建筑节能和智能电网方面开展过多年的研究。研究成果获得包括国家自然科学二等奖(排名第2)、关肇直优秀论文奖(惟一获奖人)在内的多项科研奖励。积极参加学术服务活动,担任包括IEEE自动化科学与工程会刊和自动化学报在内的多个国内外学术期刊的编委,并参与组织中国控制会议等重要的学术会议,是IEEE高级会员,并入选教育部新世纪优秀人才支持计划。

毕卫红 女,博士,教授,博士生导师。1960年生,河北卢龙县人。1982年、1988年、2003年获学士、硕士、博士学位。现工作于燕山大学信息学院。主要研究方向为光电传感器及网络和信号处理工作等领域的科研工作。近五年曾获全国巾帼“建功立业”标兵、河北省“新世纪巾帼发明家”和河北省教学名师等荣誉称号。现兼任教育部光电信息科学与工程类专业教学指导委员会委员、中国光电技术委员会委会常委等职务。曾承担国家自然科学基金、国家“863”、“973”、国家基金重点和河北省攻关等科研工作。

孙玉娇 女,博士,1979年12月生,吉林人。2010年毕业于清华大学电机工程系,获得博士学位。现工作于中国电力科学研究院系统所,工程师,主要研究方向为电力系统分析与控制。

基于数据的智能电网电能自适应优化调控

魏庆来，赵冬斌

中国科学院自动化研究所 复杂系统管理与控制国家重点实验室 北京 100190

摘要：智能电网是新一代电网建设的目标，也是国内外电力工业界的共同选择。智能电网的优化运行，已经成为我国乃至世界范围内的节能减排、低碳环保、可持续性发展等经济社会和能源环境协调发展的焦点所在。现如今，随着各种新能源的并网发电、各种储能设备的应用以及实时电价的出台等，电能的供需不确定性和时空多尺度性越来越明显，电网的复杂性和规模不断增加，采用首先建立电网数学模型，然后根据电网数学模型进行优化传统优化模式已变得越来越困难。本论文以此为出发点，以电网运行数据为基础，综合考虑储能设备、新能源并网实时电价等因素，采用自适应动态规划理论优化智能电网电能供需分配并获得优化调控策略，为智能电网的优化运行提供最有力的理论支撑。

关键词：智能电网，自适应动态规划，基于数据控制，非线性系统，神经网络

1 概论

众所周知，气候变暖、能源短缺是迄今人类所遇到的最大范围的公共危机，向低碳绿色经济转型已经成为世界经济发展的大趋势，节能减排、绿色能源、可持续发展等课题逐渐成为世界各国关注的焦点。十七大报告明确指出：“加强能源资源节约和生态环境保护，增强可持续发展能力”。“开发和推广节约、替代、循环利用的先进适用技术，…，提高能源资源利用效率”。十二五规划纲要中也提出了“资源利用效率显著提高，可持续发展能力增强”，以及“通过开发推广节能技术，实现技术节能”等能源优化目标。国务院总理温家宝在2011大连夏季达沃斯年会上发表重要讲话指出“中国将坚持节约资源和

保护环境，走绿色、低碳、可持续的发展道路，显著提高资源利用效率和应对气候变化能力。节约资源、保护环境是实现可持续发展的必由之路，是我国的一项基本国策。……‘十二五’期间，把非化石能源占一次能源消费比重提高到11.4%，单位国内生产总值能源消耗和二氧化碳排放分别降低16%和17%，主要污染物排放总量减少8%至10%”，可见低碳经济已经成为国家战略层面的必须实施的问题。

面对低碳经济的发展模式，电力行业势必将成为CO₂减排的主力军，对于低碳经济的实施与发展具有重要影响。同时，电力行业的减排潜力巨大，优化空间明显，只有大力发展低碳电力，才能实现国民经济向低碳经济的转变。智能电网作为先进信息技术和高级物理电网的充分结合，是

解决未来能源输送问题的理想方案,是电网发展的大势所趋。各国政府已开始认识到智能电网在促进开发低碳技术方面的重要意义,智能电网建设越来越成为一项战略性基础设施投资^[1-6]。

“智能电网”的一个显著特征在于支撑巨量清洁能源接入^[7-8]。水电、核电、风电、太阳能等清洁能源的发展,对于优化我国能源结构、减少化石能源消费、降低温室气体排放具有重要意义。坚强的智能电网集成了先进的信息通信技术、自动化技术、储能技术、运行控制和调度技术,是电力系统、自动控制、人工智能、运筹学、系统理论等多元结构体系^[9-11],为清洁能源的集约化、规模化开发和应用提供了技术保证。目前,“智能电网”的研究在世界各国积极的开展。2006年欧洲提出智能电网愿景,制定《欧洲未来电网的远景和策略》、《战略性研究议程》以及《战略部署文件》报告。2009年美国总统奥巴马将智能电网提升为美国国家战略。随后,日本电气事业联合会正式发表了“日本版智能电网开发计划”。为了顺应时代的发展,我国也提出了建设“国际领先、自主创新、中国特色坚强智能电网”的战略发展目标。

分布式电源的接入能够加快节能减排的步伐,环保、高效、灵活、可控的分布式清洁能源的介入可以向用户提供“绿色电力”,同时有助于充分利用各地丰富的清洁和可再生能源,是实现我国“节能减排”目标的重要举措。我国颁布的《可再生能源法》、《可再生能源中长期发展规划》中都已明确将分布式发电供能技术列入重点发展与支持领域,《国家中长期科学和技术发展规划纲要(2006-2020)年》中明确提出要大力开展“可再生能源低成本规模化开发利用”以及“间歇式电源并网及输配技术”。分布式电源的接入,给传统的配用电网规划带来实质性的挑战,使得配用电网规划必须充分考虑分布式发电

对电网的影响。国内外针对分布式发电对电网的影响展开了一系列研究工作。A. Kumar教授提出了在混杂电力市场情况(Hybrid Power Systems)分布式电源最优选址^[12]。文献[13-14]在分布式电源个数、位置和容量均未知的条件下,采用遗传算法(GA)对MV级配电网中分布式电源的位置和容量进行优化,该算法考虑了馈线容量极限、馈线电压形态以及三相短路电流等技术,建立了以网络扩建及损耗成本用最少的目标函数。文献[15-16]将蚁群优化算法(ACO)用于求解配电系统中分布式电源的最优定容和选址问题。模型的目标函数考虑分布式电源的投资成本、运行维护成本、输电网电能购买成本和网损成本。文献[17-19]将粒子群优化(PSO)与潮流算法相结合,用于同时搜索分布式电源的最优容量和接入位置,在满足系统电压约束的条件下最终达到有功网损最小的目的。文献[20-22]将人工免疫与蚁群算法相结合研究在配电网重构中的应用。文献[23]分析了分布式电源接入配电网前后网络损耗的变化情况,并在此基础上提出采用混合模拟退火SA(Simulated Annealing)的改进粒子群优化算法,对分布式电源选址和定容问题进行优化求解。C. Singh教授以可靠性角度分析了分布式电源的选址方案^[24-25]。然而,当前的分布式发电研究大多集中于考虑单一分布式电源位置与容量优化的“单体静态优化”研究,一般采用先建立电力系统模型,后进行优化的研究优化模式,同时侧重于分析分布式电源并网对电网产生的影响。由于风能、太阳能等清洁能源的实时性、随机性、波动性等特点,大规模风能、太阳能等清洁能源并入电网后将对电网的运行带来负面影响,诸如系统稳定性、功率平衡、调度运行等等的影响。因此,在智能电网运行时,必须要考虑分布式电源并网比例,而在“单体静态优化”研究中很难考虑这一点。智能电网是典型的复杂系统,其数学机理模型十分难

以建立，即便建立机理模型一般也是庞大的微分方程组而难以实时求解，这给分布式电源并网分析与优化带来巨大困难，同时对分布式电源单体静态优化不能保证整体电网优化。这一系列的因素都给分布式电源优化带来巨大挑战。因此，如何在机理模型难以建立的情况下，根据直接根据电网运行数据直接对分布式发电系统进行动态的优化将是本世纪智能电网发展的重要的研究方向之一。

我国电力系统普遍存在问题是低效率运行和严重能源浪费，尤其是在配电和用电两个环节。目前用户停电95%以上是由配电系统原因引起的，电网有一半的损耗发生在配用电网，我国配用电网的自动化、智能化程度以及自愈和优化运行能力远低于输电网。引起配用电网低效率运行和严重能源浪费的根本原因就是电网电能匹配失调。配用电网急需解决的两个核心问题是用户参与电网互动问题和负荷模式的转变问题。目前，我国一些城市（如北京、香港等），以及美国、日本等国家已经提出或采用阶梯电价方法解决优化电网电能调控^[26]。阶梯电价一般采用拉姆齐定价策略（Ramsey）^[27]，即对于不同负荷用电的用户，单位电电费由低到高阶梯式增加。由于用户的用电负荷是实时变化的，因此阶梯电价可以认为是实时电价的一种形式。阶梯电价（或称实时电价）的方法使得高用电量用户的用电成本相对增高而低用电量用户的用电成本相对降低。实时电价为优化分配，提高电网运行效率以及节约能源等提供了良好的发展平台。但是我们也应该看到在实时电价方法下，用电端用户是只能调整用电方式，而没有实质性地参与电网互动和负荷模式的转变。同时，由于一般的用电端用户用电时间比较集中，每天的消耗电量也比较固定，导致可以优化调控的用电量相对较少。因此，为了解决用户参与电网互动问题和负荷模式的转变问题，必须在实时电价平台上进一步加强用户与电

网之间的交互同时促进负荷模式的转变。美国著名电力专家Kirby B曾提出“负荷即是资源”（Load as resource）这一概念，以美国为首的发达国家就开始探索如何利用负荷为电力系统提供各种辅助服务，如何实现把提高终端用户的用电效率和改善用电方式，如何提供节电资源，减少对于供电的依赖，进而延缓发电厂的建设，减少碳排放量，达到节能减排目的^[28]。上述问题解决的关键在于用电环节智能化。用电环节智能化是智能电网的重要标志，是实现电网实时信息采集管理、电网与用户之间实时交互响应，增强电网综合服务能力，满足互动营销需求，提升服务水平的重要手段。文献[29]中指出而解决上述问题的突破点在于负荷资源优化协调控制技术突破。而目前，我国针对负责资源优化协调与控制的研究并不多见。其原因是电力生产过程是连续进行的，发电和负荷及损耗之间需要时时刻刻保持着基本的平衡，而电力系统中的用户对电力的需求随时间及外界因素的变化而不断变化。传统电力系统可通过对可控发电机进行出力调节来维持发电和负荷的平衡，而智能电网包括着很多的分布式电源，而分布式电源对外界气候天气因素比较敏感，新能源发电的功率又难于控制。如果系统不能保证发电和负荷之间平衡的话，轻则电能质量恶化，造成电压和频率偏差，重则引发停电事故，甚至会诱发电力系统的崩溃，这就需要电力系统保留一定的裕量，但同时也降低了系统的运行效率。要从根本上解决这一问题，最有效的方法就是从电源侧入手，系统中安装一些大容量的储能元件，系统电力充沛时储存能源，电力紧缺时释放电力，解决供需矛盾，达到负荷资源优化协调控制的目的。因此，可以看到储能技术的应用必将在智能电网设计、规划、调度和控制等方面起到重大作用，带来智能电网的重大变革^[28]。而现在这只是一个美好的愿景，当前储能设备优化方面的研

究比较缓慢,而且所提出的算法大多是基于离线优化或静态优化(如线性规划等)^[21-28]。其原因在于电网的实时性、复杂性等特点,难于建立机理数学模型,而使得传统的优化控制算法失效。同时,在传统电网中负载端是被动的接受供电,而无法与电网进行通讯和馈电,这也是电网低效率运行和能源浪费的主要原因之一。而用电环节在不断智能化的同时,也更加大的电网负载侧的不确定性,而使得传统的基于模型的静态优化算法越来越不适用。因此,如何在发电、配电、用电网络日趋庞大复杂,负载日益多样化、用户电能质量要求越来越高的情况下,突破传统的基于模型的、静态优化方法,采用基于数据的优化方法,实时有效的实现智能电网电能优化调控是智能电网发展、低碳电力、国家减排目标能够实现的根本所在。

众所周知,动态规划方法是解决最优控制的强有力工具。然而,很难将传统动态规划方法直接应用到实际系统当中去,因为要想得到最优性能指标,需要先得到按时间顺序作用到系统中的最优控制序列,但整体的性能指标函数值在序列完成前总是未知的,所以最优控制序列的解必须在时间上到过来进行才能得到,这也即为熟知的“维数灾”问题^[33]。自适应动态规划(Adaptive Dynamic Programming, ADP)由P. Werbos教授于1977年首次提出^[34],其本质上是基于增强式学习原理,模拟人通过环境反馈进行学习的思路,近年来被认为是一种非常接近人脑智能的学习控制方法^[35]。自适应动态规划又称做近似动态规划(Approximate Dynamic Programming, ADP)、神经动态规划(Neuro-Dynamic Programming, NDP)、自适应评判设计(Adaptive Critic Designs, ACD)、强化学习(Reinforcement Learning, RL)等。2006年美国科学基金会组织的“2006 NSF Workshop and Outreach Tutorials on Approximate

Dynamic Programming”研讨会上(见:<http://www.fulton.asu.edu/~nsfadb/>),将该方法统一为自适应动态规划(Adaptive Dynamic Programming)。此次会议也宣告了自适应动态规划成为当今科学领域中最具前沿性、创新性和实用性的重要科学地位。自适应动态规划的实现方法就是利用在线和离线数据,采用函数逼近方法来估计控制性能指标或其偏导数,从而指导控制律的优化,使其逼近传统动态规划方法的最优控制律。在文献[36]中,Werbos给出了自适应动态规划的基本自适应评判结构。典型的自适应评判结构包括三个模块:评判模块、模型模块以及执行模块其中每个模块均可用神经网络近似来实现^[37]。这些模块组成了自适应动态规划系统或增强式学习系统(RLS)。在该系统中,神经网络被设计用来近似性能指标函数 J ,计算性能指标函数 J 的导数,并用来估计Hamilton-Jacobi-Bellman(HJB)方程的解。

由于自适应动态规划在求解非线性最优控制方面的强大优势,近些年来被广泛的关注并取得了丰硕的成果。在2002年,Murray等人针对一类连续时间非线性系统提出了一种迭代自适应动态规划算法^[38]。该论文中,Murray给出了系统稳定性与性能指标函数收敛性的分析,从而使得自适应动态规划在连续时间非线性系统中得以实现奠定了理论基础。在2007年,Al-Tamimi等研究了基于自适应动态规划理论的“值函数迭代法”求解离散时间非线性系统的最优控制问题^[39]。同时,Al-Tamimi等证明了在离散情况下性能指标函数收敛到满足离散时间HJB方程的最优解,从而为自适应动态规划在离散时间非线性系统中的实现奠定了理论基础。基于上述自适应动态规划理论在离散时间和连续时间非线性系统的成功应用,Abu-Khalaf和Lewis进一步研究了控制器受约束的最优控制问题^[40]。Liu和Zhang提出了一种改进的执行依赖启发式动态规划(ADHDP)方法并应用到了

倒立摆控制系统中去^[41]。Zhang等人将自适应动态规划应用到了非线性系统的无限时间最优跟踪问题^[42]。R. Padhi提出采用单神经网络实现自适应动态规划的方法^[43]。2011年Q. Wei等人将迭代ADP应用到了零和微分对策中，有效地求解出零和对分对策的鞍点^[44]。王飞跃教授则考虑了有限时间步的最优控制问题，获得 ε 最优控制律与最优控制步数，为有限时间自适应动态规划奠定了理论基础^[45]。近几年来凭借其自身的强大优势，自适应动态规划理论已经渗透到了大量的科学领域，如通讯技术^[46]，飞行器控制^[47]，电力系统控制^[48]，量子控制^[49]等领域并取得了卓越的成果。

2011年，ADP创始人P. Werbos教授在IEEE计算智能杂志上提出采用自适应动态规划解决可再生能源优化工作设想^[50]。自适应动态规划领域知名专家G. K. Venayamoorthy教授提出采用神经网络建模并通过在线调节神经网络权值算法，实现在线自适应动态规划方法从而获得最优控制的工作设想^[50]。可以看出，自适应动态规划在智能电网电能优化调控问题方面有着广泛的发展前景与极大的自身优势。首先，自适应动态规划本质上是一种基于数据的智能优化方法，近年来被认为是非常接近人脑的自学习优化方法。自适应动态规划采用执行网络（Action网络）来近似最优控制策略，采用评判网络（Critic网络）来评价并调整执行网络的输出，使得评判网络的输出最优逼近性能指标函数。可以看到，自适应动态规划可以通过系统输入输出数据自适应调整控制策略以达到优化控制目的而在理论上不必要获得系统的机理模型。这极大克服了传统基于机理模型优化方法的不足。其次，自适应动态规划可以有效解决动态系统优化问题。传统的优化方法如线性规划等，本质上属于静态规划。即优化过程与系统时间无关。这使得传统优化方法必须要在获得系统全部特征（或绝大多数特征）后进行离线运行获得最优解。随着清洁的分布式电源不断并网

以及用电负载与电网双向通讯越来越频繁，智能电网中电能优化调控越来越具有实时性、复杂性等特点，传统静态优化方法越来越不能满足智能电网的优化需求。而自适应动态规划具有很好的在线优化能力，同时克服传统动态规划时间逆序优化的缺点，使得可以时间正向优化，迭代地求解HJB方程的解。目前此方面的研究已取得显著的研究成果，比如文献[52]给出一种失误避免的学习方法；文献[53]中，给出采用在线加强学习最优控制方案等等。因此，自适应动态规划在解决动态系统优化问题方面具有强大优势。再有，采用自适应动态规划方法便于实时分析优化控制的稳定性等重要性质。当前，虽然智能优化方法也应用到智能电网电能优化调控问题中（如遗传算法、粒子群算法等），但是对于得到的优化控制策略对电网的稳定性、收敛性等重要性质却无法实时判断。这就造成了求解的控制策略的可靠性大幅下降，甚至无法使用。而在自适应动态规划方法中，性能指标函数直接参与算法迭代，而迭代性能指标函数一般具有Lyapunov函数性质。这使得智能电网系统的稳定性等重要性质可以由迭代的性能指标函数直接判断。

因此，将自适应动态规划理论融入于智能电网，依靠其基于数据优化，动态优化求解复杂系统优化策略的强大优势，建立起一套创新的、更有效的控制理论和方法，切实解决智能电网中电能优化调控问题，将为我国智能电网能够顺利发展奠定重要理论基础。同时也是我国节能减排、增效降耗的重要手段，具有重要的学术意义和广泛的实用价值。

2 带有储能设备的智能电网电能自适应动态规划调控方案

电力生产过程是连续进行的，发电和负荷及损耗之间需要时时刻刻保持着基本的平衡。带有

$$\begin{cases} x_1(t+1) = F_1(x_1(t), x_2(t), \dots, x_p(t), u_1(t), \dots, u_q(t), w_1(t), \dots, w_l(t)) \\ x_2(t+1) = F_2(x_1(t), x_2(t), \dots, x_p(t), u_1(t), \dots, u_q(t), w_1(t), \dots, w_l(t)) \\ \vdots \\ x_p(t+1) = F_p(x_1(t), x_2(t), \dots, x_p(t), u_1(t), \dots, u_q(t), w_1(t), \dots, w_l(t)) \end{cases} \quad (1)$$

储能设备的智能电网自适应动态规划调控问题中, 重要的一点是如何调控储能设备的充放电时间, 保证发电和负荷平衡同时保证负载消耗电网电能达到最低, 而且还需要考虑储能设备自身的约束条件, 其运行模式如图1所示。

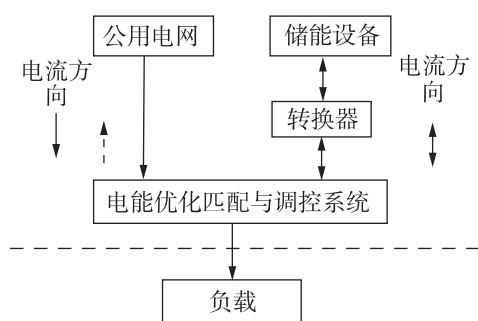


图1 带有储能设备的智能电网电能优化调控示意图。

在一般情况下, 电网系统的动态特性非常复杂, 是典型的复杂非线性系统, 其动态特性可由如下非线性方程组表示见式(1):

其中, $x_1(t), x_2(t), \dots, x_p(t)$ 为状态向量, $\forall x_i(t) \in R^i, i=1, \dots, p$ 。变量 $u_1(t), \dots, u_q(t)$ 为控制向量, $\forall u_j(t) \in R^j, j=1, \dots, q$ 。变量 $w_1(t), \dots, w_l(t)$ 为系统扰动, $\forall w_r(t) \in R^r, r=1, \dots, l$ 。通常情况下, 方程组数量可达到数十个甚至上百个而且同时带有系统带有未知扰动。这使得建立精确的电网系统变得非常困难, 采用传统的基于模型方法对其控制系统进行稳定性分析更加困难。在模型未知情况下, 如何确定储能设备的最优充放电时间就显得非常的困难。在本文中, 我们将采用基于数据的智能电网电能自适应优化方法解决带有储能设备的智能电网电能自适应调控问题。首先令

$$x(t) = [x_1^T(t), x_2^T(t), \dots, x_p^T(t)]^T$$

$$u(t) = [u_1^T(t), \dots, u_p^T(t)]^T,$$

$$w(t) = [w_1^T(t), \dots, w_q^T(t)]^T。$$

那么方程组(1)可以写成如下形式

$$x(t+1) = F(x(t), u(t), w(t)) \quad (2)$$

其中, $F(\cdot)$ 为高非线性未知函数。在智能电网运行过程中, 智能电网中储能设备具有三种模式:

1) 充电模式: 当系统负载低同时实时电价低时, 电网直接向负载供电同时储能设备充电并考虑触电设备储能级别。

2) 空闲模式: 当实时电价不高或储能设备储能级别较高时, 电网直接向负载供电, 储能系统不动作。

3) 放电模式: 当实时电价高(如用电高峰时段)时, 不使用电网能源, 而由储能设备单独向负载供电。

当储能设备充电时可以表示为

$$\begin{aligned} E_b(t+1) &= E_b(t) - P_b(t+1) \times \eta(P_b(t+1)), \\ P_b(t+1) &< 0 \end{aligned} \quad (3)$$

其中, $E_b(t)$ 表示当前储能设备储存的能量, $P_b(t)$ 表示当前时刻储能设备的输出功率, $\eta(P_b(t+1))$ 表示电转换效率。当储能设备放电时表示为

$$\begin{aligned} E_b(t+1) &= E_b(t) - P_b(t+1) \times \eta(P_b(t+1)), \\ P_b(t+1) &> 0 \end{aligned} \quad (4)$$

同时需要考虑储能设备自身的物理性约束。

1) 储能设备存储限制。储能设备在过度充电或过度放电情况下都会影响使用寿命。因此为了更好的保护储能设备, 需要考虑储能设备储存电量(或储能等级)约束。定义 $E_b(t)$ 为当前时刻的储能设备的储能等级, 则 $E_b(t)$ 满足

$$E_b^{\min} \leq E_b(t) \leq E_b^{\max} \quad (5)$$

其中, $E_b^{\min}$, $E_b^{\max}$ 表示最小、最大储电等级。

2) 为了安全使用储电设备, 储电设备不能过快或过慢的充电或放电。因此, 需要考虑储电设备的充电(或放电)速率。定义 $P_b(t)$ 为充电(或放电)速率。当 $P_b(t) > 0$ 表示充电速率, 当 $P_b(t) < 0$ 表示放电速率。

$$P_b^{\min} \leq P_b(t) \leq P_b^{\max} \quad (6)$$

其中, $P_b^{\min}$ 表示最小充电(或放电)速率, $P_b^{\max}$ 表示最大充电(或放电)速率。

对于负载端, 负载的消耗电功率等于储电设备供电功率与电网供电功率之和。表示为

$$P_L(t) = P_b(t) + P_g(t) \quad (7)$$

其中, $P_L(t)$ 表示负载功率, $P_g(t)$ 表示电网的供电功率, $P_b(t)$ 为储电设备充电(或放电)速率。

因此, 智能电网电能优化问题可以描述为使得如下性能指标函数达到极小

$$\begin{cases} \min J(t) = \sum_{t=1}^{\infty} C(t) \times P_g(t) \\ s. t. \quad x(t+1) = F(x(t), u(t), w(t)) \\ \text{储能设备物理约束} \end{cases} \quad (8)$$

其中, $C(t)$ 表示实时电价, $J(t)$ 性能指标函数。其中 $u(t) = -1$ 为储能设备放电, $u(t) = 0$ 表示储能设备空闲, $u(t) = 1$ 表示储能设备充电。基于以上分析, 提出一种新型基于数据自适应动态规划方法。首先定义新型性能指标函数为

$$Q(t-1) = \sum_{k=t}^{\infty} C(k) \times P_g(k). \quad (9)$$

当 $C(t)$ 与 $P_g(t)$ 相关时, 可以写成指标函数也可以写成 $Q(t-1) = \sum_{k=t}^{\infty} C(P_g(k)) \times P_g(k)$, 本论文中统一写成(9)式。

那么, 离散时间HJB方程可以表示为

$$Q(t) = C(t) \times P_g(t) + Q(t+1) \quad (10)$$

由上式可以看出, 如果记录上一时刻的性能

指标函数 $Q(t-1)$, 同时获得当前时刻的电价并测得当前时刻电网供电功率的数据, 则可以获得当前时刻性能指标函数而无需系统机理模型。因此, 带有储能设备的住宅电网电能自适应动态规划优化调控方案可行, 其算法框图可如图2所示。

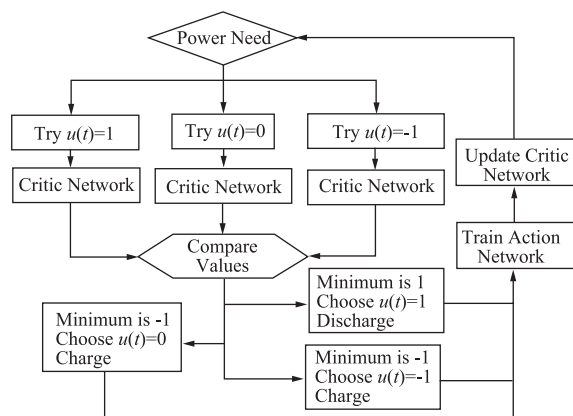


图2 带有储能设备的智能电网电能供需优化调控方案示意图

其具体的实现步骤可以表述为:

步骤1: 根据电网系统运行数据训练评判网络, 初始化性能指标函数。

步骤2: 令当前时刻为 $t=0, 1, \dots$, 获得当前状态数据。将可选择控制策略 $u(t)$ 及状态数据带入评判网络, 并进行比较获得最小性能指标函数对性的控制策略。

步骤3: 根据当前状态训练执行网络使得执行网络的输出逼近于所获得优化控制策略。

步骤4: 训练评判网络使得性能指标函数满足HJB方程。

步骤5: 令 $t=t+1$, 算法返回到步骤2重复算法, 直到性能指标函数收敛。

3 清洁能源分布式发电接入的智能电网电能自适应优化调控

目前, 风能发电、太阳能光伏发电等清洁能源得到了空前的发展, 因此本论文以风能和太阳能发电为对象研究智能电网的电能优化调控问题。令风力发电功率表示为

$$P_w(t) = \begin{cases} 0 & V_w < V_m \\ f(\lambda\beta) \cdot \frac{1}{2} \rho A V_w^3 & V_m \leq V_w < V_R \\ P_R & V_R \leq V_w < V_{out} \\ 0 & V_w \geq V_{out} \end{cases} \quad (11)$$

其中, $P_w(t)$ 表示风力发电功率, V_w 表示当前风速, $f(\lambda\beta)$ 表示风力机叶片气动特性函数已知量, λ , β , ρ , A 为风力机叶尖速率比、桨距角、空气密度和扫风面。由于 $f(\lambda\beta)$, λ , β , ρ , A 均为已知量, 因此只要测定当前风速, 即可获得风力发电功率。太阳能光伏发电设备的发电电流与电压关系可以表示为:

$$I = I_{sc} \left\{ 1 - C_1 \left[\exp\left(\frac{U}{C_2 U_{oc}}\right) - 1 \right] \right\}, \quad (12)$$

其中

$$\begin{cases} C_1 = \left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \exp\left(-\frac{U_m}{C_2 U_{oc}} \right) \\ C_2 = \left(\frac{U_m}{U_{oc}} - 1 \right) \left[\ln\left(1 - \frac{I_m}{I_{sc}} \right) \right]^{-1} \end{cases} \quad (13)$$

从上述太阳能光伏发电模型中可以看出, 如果给出光伏电池的技术参数短路电流 I_{sc} 、开路电压 U_{oc} 、最大功率点电流 I_m 、最大功率点电压 U_m , 就可以得出中间变量 C_1 和 C_2 , 其中 I_{sc} 、 U_{oc} 、 I_m 、 U_m 为时变参数, 采用下式调节

$$\begin{cases} \Delta T = T - T_{ref} \\ \Delta S = \frac{S}{S_{ref}} - 1 \\ I'_{sc} = \frac{I_{sc} S}{S_{ref}} (1 + \alpha \Delta T) \\ U'_{oc} = U_{oc} (1 - c \Delta T) (1 + b \Delta S) \\ I'_m = \frac{I_m S}{S_{ref}} (1 + a \Delta T) \\ U'_m = U_m (1 - c \Delta T) (1 + b \Delta S) \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \min J(t) = \sum_{t=1}^{\infty} (C(t) \times P_g(t) - C(t) \times P_{bg}(t) - C(t) \times P_{rg}(t)) \\ x(t+1) = F(x(t), u(t), w(t)) \\ s. t. \quad \begin{array}{l} \text{储能设备物理约束} \\ \text{分布式电源物理约束} \end{array} \end{cases} \quad (19)$$

因此如果阳光强度已知, 那么光伏电池供电功率就可以获得。可以看到, 风能与太阳能发电与当前时刻的风强度与阳光强度紧密相关。而一般情况下, 风强度与阳光强度是无法预测的。这使得很难在整个时域上建立分布式发电的精确数学模型。同时电力系统模型又难以构造, 这使得分布式发电接入电网后电能的优化分配带来巨大困难。因此必须通过分布式能源实时数据建立智能电网电能实时优化与调控的自适应动态规划理论。令 $P_R(t)$ 表示当前时刻分布式能源的发电功率。如果

$$P_R(t) \leq P_L(t) \quad (16)$$

也即是当前时刻分布式能源的发电功率小于负载功率时, 将分布式能源全部用于负载供电。此时, 负载电能平衡方程可以写为

$$P_L(t) = P_b(t) + P_R(t) + P_g(t) \quad (17)$$

效用函数可以表示为 $U(t) = C(t) \times (P_L(t) - P_b(t) - P_R(t))$ 。如果

$$P_R(t) > P_L(t) \quad (18)$$

此时负载电能全部由分布式能源供应, 此时储能设备只考虑充电或不动作而不考虑放电情况。当考虑分布式电源接入电网的情况下, 可以看到电网电能工序优化调控由储能设备与分布式电源共同控制。分布式电源控制策略有到4种, 即令 $u_r(t) = 1$ 表示分布式电源向负载供电, $u_r(t) = 0$ 表示分布式电源不并网, $u_r(t) = -1$ 表示分布式电源向储能设备供电, $u_r(t) = -2$ 表示向电网馈电。储能设备同样具有4种控制策略。在此情况下, 性能指标函数变化, 见式(19)

综上, 自适应动态规划算法可以描述为:

步骤1: 根据电网系统运行数据训练评判网络, 初始化性能指标函数。

步骤2: 令当前时刻为 $t = 0, 1, \dots$, 获得当前状态数据。将可选择控制策略 $u(t)$ (含4种控制策略) 与 $u_r(t)$ (含4种控制策略) 及状态数据带入评判网络, 并进行比较获得最小性能指标函数对性的控制策略。

步骤3: 根据当前状态训练执行网络使得执行网络的输出逼近于所获得优化控制策略。

步骤4: 训练评判网络使得性能指标函数满足 HJB 方程。

步骤5: 令 $t = t + 1$, 算法返回到步骤2重复算法, 直到性能指标函数收敛。

4 仿真研究

在本节中, 我们将给出仿真实例验证本文提出的基于数据的智能电网电能自适应优化方法的有效性。仿真将分别给出带有储能设备的智能电网电能自适应动态规划调控方案与清洁能源分布式发电接入的智能电网电能自适应动态规划调控方案, 并论证其有效性。

Case 1 带有储能设备的智能电网电能自适应动态规划调控方案仿真。

我们首先考虑带有储能设备的智能电网电能自适应动态规划调控方案。令系统函数如 (1) 式表达, 令性能指标函数为 (8) 式。控制 $u(t)$ 为储能设备的充放电控制策略。接下来, 采用神经网络实现自适应动态规划算法, 其具体构建方案如图3所示。

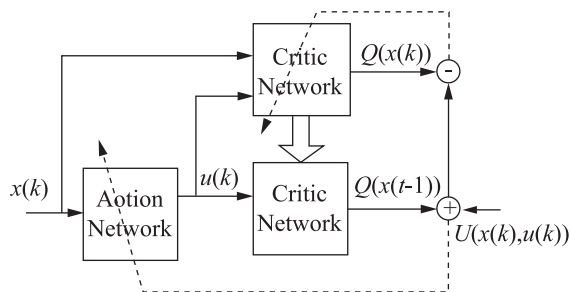


图3 智能电网电能优化的自适应动态规划方法实现框图

首先, 需要根据离线的采集的 (历史) 数据对神经网络进行预学习 (离线学习), 其数据由图4与图5表示。其中图4给出了每天电价的24小时变化数据, 图5给出了每天用户的用电负载负荷24小时变化数据。

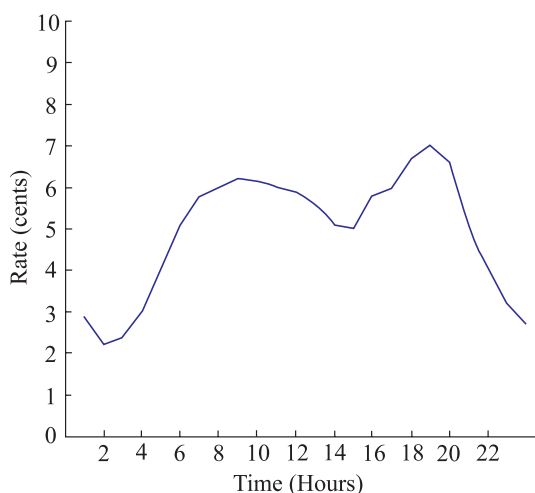


图4 电价的24小时变化数据图

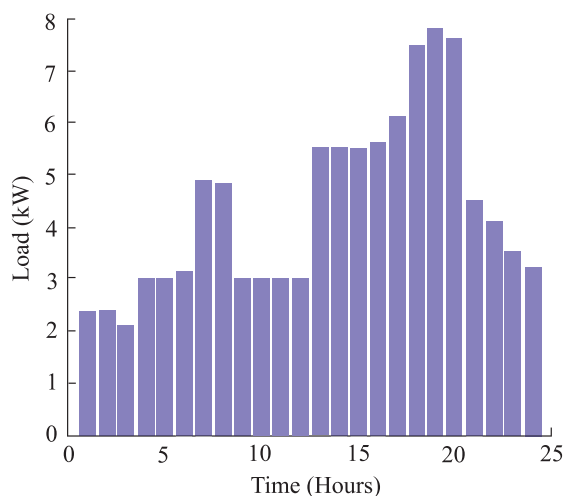


图5 用电负载负荷的24小时变化数据图

当神经网络与学习之后自适应动态规划方法将根据电网的实时数据进行在线学习与优化, 达到智能电网自适应优化的目标。令电网储能设备运行参数如表1表示, 其中 η 表示储能设备效率, BL_0 表示储能设备初始储电等级, BL_{MIN} 表示储能设备最小储电等级, BL_{MAX} 表示储能设备最大储电等级, $C/D \text{ rate}$ 表示储能设备充/放电效率。

表 1 储能设备运行参数表

η	BL_0	BL_{MIN}	BL_{MAX}	$C/D\ rate$
100%	80	20	100	16

应用自适应动态规划进行智能电网电能优化的结果如图6所示。可以看到，当用户负载、电网电价等实时变化的情况下，应用电网实时数据，自适应动态规划方法对智能电网电能起到了很好的实时优化作用。

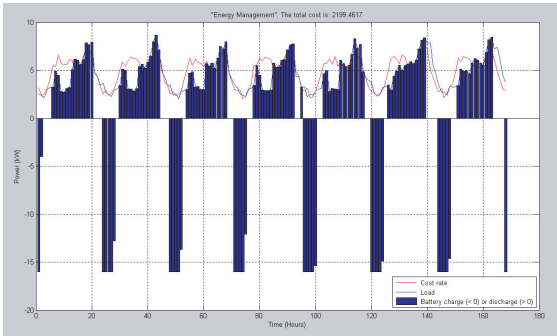


图6 带有储能设备的基于数据的智能电网电能自适应动态规划优化控制图

Case 2 清洁能源分布式发电接入的智能电网电能自适应动态规划调控方案。

在Case 1的研究基础之上，进一步讨论在新型能源（太阳能、风能）并网时的智能电网电能自适应动态规划调控方案。由于风能与太阳能具有很强的实时性，因此，很难对其建立精确的数学模型。太阳能与风能发电功率如图7所示。我们仍然采用自适应动态规划方法对电网电能进行实时优化。自适应动态规划实现的具体构建方案如图3所示。令系统函数如（1）式表达，此时性能指标函数表示为（19）式。我们仍然采用离线数据对神经网络进行预学习，预学习完毕之后，应用电网实时数据，将自适应动态规划用于智能电网电能的在线优化与调控，其效果如图8所示。可以看到，当用户负载、电网电价以及分布式电源功率均实时变化的情况下，应用电网实时数据，自适应动态规划方法仍然对智能电网电能起到了很好的实时优化作用。

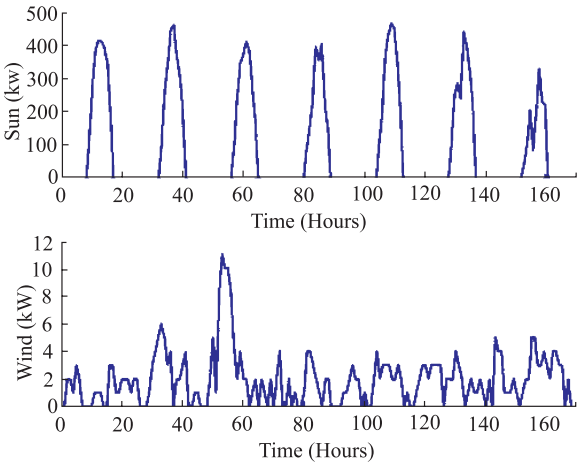


图7 太阳能与风能发电功率170小时实时变化数据图

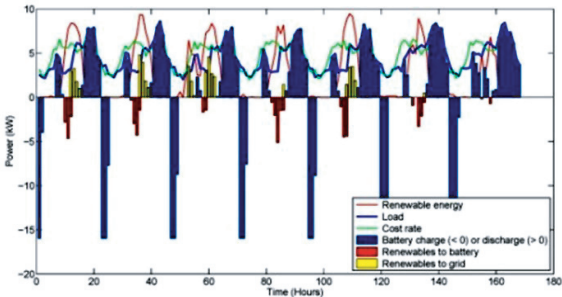


图8 带有分布式电源的基于数据的智能电网电能自适应动态规划优化控制图

结论

本文针对复杂的智能电网电能调控系统，采用自适应动态规划理论，研究基于数据的优化策略分析与控制方法，综合考虑了电网储能设备与太阳能、风能等分布式电源并网的情况，提出解决智能电网电能自适应优化调控的自适应动态规划算法。研制出基于自适应动态规划理论的最优控制器，本文采用神经网络近似自适应动态规划的性能指标函数与最优控制策略，以满足最优性方程，通过离线预学习，在线自学习方法达到优化效果。最优将提出的自适应动态规划方法在仿真中进行验证活得很好的优化控制效果。

致谢：

论文受国家自然科学基金（61034002，60921061，60904037）资助。

参考文献

- [1] 吴俊勇. 国内外智能电网的发展战略, 变频器世界, 9, 34-37, 2011.
- [2] 刘生春, 张杰, 李春来. 智能电网发展趋势分析, 科技信息, 16, 478-479, 2011.
- [3] Paul J. Werbos. Computational Intelligence for the Smart Grid—History, Challenges, and Opportunities, IEEE Computational Intelligence Magazine, 6(3), 14-21, 2011.
- [4] 刘继春. 电力调度优化理论及其应用. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [5] 吴旭. 智能电网, 带来全新生活方式. 供电企业管理, 2, 80-81, 2011.
- [6] 张堰华, 程刚. 智能电网中CO₂减排的评估. 电力电子, 5: 32-35, 2011.
- [7] 张岚, 闫海荣, 赵明, 尹文君, 郭端敏, 冯乾. 从标准看智能电网的发展, 中外能源, 16, 24-30, 2011.
- [8] EPRI. European smart-grids technology platform : Vision and strategy for Europe's electricity networks of the future (Report). Directorate-General for Research Sustainable Energy Systems, 2006.
- [9] 王振. 智能电网技术现状与发展趋势, 企业科技与发展, 5, 16-18, 2011.
- [10] 何光宇, 孙英云. 智能电网基础. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [11] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇等. 微电网研究综述, 电力系统自动化, 2007, 31(19), 100-107.
- [12] Luis F. Ochoa, Gareth P. Harrison. Minimizing Energy Losses: Optimal Accommodation and Smart Operation of Renewable Distributed Generation, IEEE Transactions on Power Systems, vol. 26, no. 1, pp. 198-205, 2011.
- [13] A. Kumar, W. Gao. Optimal distributed generation location using mixed integer non-linear programming in hybrid electricity markets, IET Generation, Transmission & Distribution, 4(2), 281-298, 2010.
- [14] A. M. El-Zonkoly. Optimal placement of multi-distributed generation units including different load models using particle swarm optimization, IET Generation, Transmission & Distribution, 5(7), 760-771, 2011.
- [15] C. Church, W. G. Morsi, C. P. Diduch, M. E. El-Hawary, L. Chang. Voltage collapse detection using ant colony optimization for smart grid applications, 2010 IEEE Electric Power and Energy Conference (EPEC), pp. 1-5, 2010.
- [16] 刘立, 王建兴, 秦书硕, 莫城恺. 一种改进蚁群算法在配电网优化规划中的应用, 科学技术与工程, 11(24), 5801-5804, 2011.
- [17] 聂彬, 沈祖成. 一种改进的蚁群算法在配电网规划中的应用, 电力科学与工程, 26(5), 30-33, 2010.
- [18] 周源, 邓景云, 任海军, 张昀, 李健, 孙才新. 基于蚁群算法的配电网空间负荷预测方法研究, 电力系统保护与控制, 38(24), 99-104, 2010.
- [19] 孙丽萍, 曾丽娜, 唐文秀, 王春丽. 基于改进蚁群算法的配电网潮流计算, 机电产品开发与创新, 22(6), 16-18, 2009.
- [20] S. S. Lin, C. H. Lin, and S. C. Horng. An Efficient Algorithm for QCDP and Implementation, IEEE Transactions on Power Systems, 25(1), 234-242, 2010.
- [21] A. Ahuja, S. Das, and A. Pahwa. An AIS-ACO Hybrid Approach for Multi-Objective Distribution System Reconfiguration, IEEE Transactions on Power Systems, 22(3), 1101-1111, 2007.
- [22] 徐延炜, 贾嵘. 基于人工免疫思想的蚁群算法(AIACS)在配电网重构中的应用, 电力系统保护与控制, 38(18), 89-93, 2010.
- [23] Ming-Hao Hung, Li-Sun Shu, Shinn-Jang Ho, Shioh-Fen Hwang, Shinn-Ying Ho. A Novel Intelligent Multiobjective Simulated Annealing Algorithm for Designing Robust PID Controllers, IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part A: Systems and Humans, 38(2), 319-330, 2010.
- [24] In-Su Bae, Jin-O Kim, Jae-Chul Kim, and C. Singh. Optimal Operating Strategy for Distributed Generation Considering Hourly Reliability Worth, IEEE Transactions on Power Systems, 19(1), 287-292, 2004.
- [25] R.C. Green, L. Wang, M. Alam, C. Singh. Intelligent and parallel state space pruning for power system reliability analysis using MPI on a multicore platform, IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), pp. 1-8, 2011.
- [26] 李芝娟. 北京市居民用电阶梯式电价方案分析, 科学之友, 13, 40-42, 2011.
- [27] 齐放, 张粒子, 魏玢, 阙光辉. 基于拉姆齐定价理论的销售电价研究, 电力需求侧管理, 2, 24-27, 2010.
- [28] E. Hirst and B. Kirby. The Functions, Metrics, Costs, and Prices for Three Ancillary Services. Edison Electric Institute, Washington, DC, October, 1998.
- [29] 马其燕, 秦立军. 智能配电网关键技术, 现代电力, 27(2), 39-44, 2010.
- [30] 甄晓亚, 尹忠东, 孙舟. 先进储能技术在智能电网中的应用和展望, 电气时代, 1, 44-47, 2011.
- [31] A. Chranzhofer, J. Chen, L. Thiele. Dynamic Power-Aware Mapping of Applications onto Heterogeneous MPSoC Platforms, IEEE Transactions on Industrial Informatics, 6(4), 692-707, 2010.

- [32] N. I. Osman, T. El-Gorashi, J. M. H. Elmirghani. Reduction of energy consumption of Video-on-Demand services using cache size optimization, 2011 Eighth International Conference on Wireless and Optical Communications Networks (WOCN), pp. 1–5, 2011.
- [33] R. E. Bellman, Dynamic Programming. Princeton, NJ: Princeton University Press, 1957.
- [34] P. J. Werbos. Advanced forecasting methods for global crisis warning and models of intelligence, General Systems Yearbook, 22, 25–38, 1977.
- [35] P. J. Werbos. Using ADP to understand and replicate brain intelligence: the next level design, Proc. 2007 IEEE Symposium on Approximate Dynamic Programming and Reinforcement Learning, Honolulu, HI, Apr. 2007, 209–216.
- [36] P. J. Werbos. Approximate dynamic programming for real-time control and neural modeling, in Handbook of Intelligent Control: Neural, Fuzzy, and Adaptive Approaches (Chapter 13), D. A. White and D. A. Sofge, Eds. New York: Van Nostrand Reinhold, 1992.
- [37] D. V. Prokhorov and D. C. Wunsch. Adaptive critic designs, IEEE Trans. Neural Networks, 8(5), 997–1007, 1997.
- [38] J. J. Murray, C. J. Cox, G. G. Lendaris, and R. Sacks. Adaptive dynamic programming, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics—Part C: Applications and Reviews, 32(2), 140–153, 2002.
- [39] A. Al-Tamimi, F. L. Lewis, and M. Abu-Khalaf. Discrete-time nonlinear HJB solution using approximate dynamic programming: Convergence proof, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics, 38(4), 943–949, 2008.
- [40] M. Abu-Khalaf and F. L. Lewis. Nearly optimal control laws for nonlinear systems with saturating actuators using a neural network HJB approach, Automatica, 41(5), 779–791, 2005.
- [41] D. Liu, X. Xiong, and Y. Zhang. Action-dependent adaptive critic designs, Proceedings of the INNS-IEEE International Joint Conference on Neural Networks, Washington, DC, July 2001, vol. 2, pp. 990–995.
- [42] H. Zhang, Q. Wei, and Y. Luo. A novel infinite-time optimal tracking control scheme for a class of discrete-time nonlinear system based on greedy HDP iteration algorithm, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics, 38(4), 937–942, 2008.
- [43] R. Padhi, N. Unnikrishnan, X. Wang, and S. N. Balakrishnan. A single network adaptive critic (SNAC) architecture for optimal control synthesis for a class of nonlinear systems, Neural Networks, 19(10), 1648–1660, 2006.
- [44] H. Zhang, Q. Wei, and D. Liu. An iterative adaptive dynamic programming method for solving a class of nonlinear zero-sum differential games, Automatica, 47(1), 207–214, 2011.
- [45] F. Wang, N. Jin, D. Liu, and Q. Wei. Adaptive dynamic programming for finite-horizon optimal control of discrete-time nonlinear systems with ϵ -error bound, IEEE Transactions on Neural Networks, 22(1) 24–36, 2011.
- [46] D. Liu, Y. Zhang, and H. Zhang. A self-learning call admission control scheme for CDMA cellular networks, IEEE Trans. Neural Networks, 16(5), 1219–1228, 2005.
- [47] R. Enns and J. Si. Helicopter trimming and tracking control using direct neural dynamic programming, IEEE Trans. Neural Networks, 14(4), 929–939, 2003.
- [48] W. Liu, G. K. Venayagamoorthy, and D. C. Wunsch. A heuristic dynamic programming based power system stabilizer for a turbogenerator in a single-machine power system, IEEE Trans. Industry Applications, 41(5), 1377–1385, 2005.
- [49] D. Dong, C. Chen, T. J. Tarn, A. Pechen, and H. Rabitz. Incoherent control of quantum systems with wavefunction-controllable subspaces via quantum reinforcement learning, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics, 38(4), 957–962, 2008.
- [50] P. J. Werbos. Computational Intelligence for the Smart Grid—History, Challenges, and Opportunities, IEEE Computational Intelligence Magazine, 6(3), 14–21, 2011.
- [51] G. K. Venayagamoorthy. Dynamic, Stochastic, Computational, and Scalable Technologies for Smart Grids, IEEE Computational Intelligence Magazine, 6(3), 22–35, 2011.
- [52] D. Liu and H. Zhang. A neural dynamic programming approach for learning control of failure avoidance problems, Int. J. Intelligent Control and Systems, 10(1), 21–32, 2005.
- [53] J. Si and Y.-T. Wang. On-line learning control by association and reinforcement, IEEE Transactions on Neural Networks, 12(2), 264–276, 2001.
- [54] N. Poursafar, H. D. Taghirad, M. Haeri. Model predictive control of non-linear discrete time systems: a linear matrix inequality approach, IET Control Theory & Applications, 4(10), 1922–1932, 2010.
- [55] R. N. Anderson, A. Boulanger, W. B. Powell, W. Scott. Adaptive Stochastic Control for the Smart Grid. Proceedings of the IEEE. 99(6), 1098 – 1115, 2011.

作者简介

魏庆来 中国科学院自动化研究所助理研究员，2002年毕业于东北大学信息科学与工程学院自动化专业，获学士学位，2003年9月在东北大学信息科学与工程学院攻读控制理论与控制工程专业博士学位（硕博连读），并于2008年12月获博士学位。2009年1月在中国科学院自动化研究所从事博士后工作，承担国家自然科学基金青年基金项目一项，获得中国博士后基金特别资助。2011年7月至今在中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室任助理研究员。主要研究兴趣为基于数据的控制、自适应动态规划，最优控制，非线性系统控制和神经网络控制理论。

赵冬斌 博士，中国科学院自动化研究所，复杂系统管理与控制国家重点实验室研究员、博士生导师，中国科学院研究生院兼职教授。

2000年于哈尔滨工业大学获得工学博士学位。2000年至2002年在清华大学从事博士后工作。2002年起在中国科学院自动化研究所工作。2007-2008年受国家留学基金资助在美国亚利桑那大学留学访问一年。

2005年至今任中国自动化学会青年工作委员会委员，2006年至今中国机械工程学会高级会员，2010年至今IEEE高级会员，2011年至今Cognitive Computation的编委，2012年至今IEEE Trans. on Neural Networks and Learning Systems 的编委。2011年IEEE Trans. on Neural Networks和Neurocomputing Special Issue的Guest Editor。负责、参加国家自然科学基金委、科技部等支持的科研项目20余项，获国家省部级奖励5项。发明专利授权21项，实用新型专利授权7项，软件著作权登记29项，发表中文学术著作1本、论文100余篇（其中SCI收录论文30余篇、他引180多次，EI收录论文100余篇，ISTP收录论文90余篇）。

目前主要研究方向为计算智能、智能交通、机器人、过程控制、智能电网。



译 文

智能电网中的计算智能

——历史，挑战与机遇

撰文：Paul J. Werbos

翻译：李宏亮（中科院自动化所复杂系统管理与控制国家重点实验室）

摘要：本文回顾了四代智能电网概念的发展，计算智能在满足它们的要求时所扮演的角色，以及相关研究和工具的典型例子。第一代智能电网集中于建造更多的线路、安装自动化仪表、提高生产力和减少大停电等传统概念，但计算智能已经应用于智能电网。由EPRI的Massoud Amin宣扬的第二代智能电网强调广泛使用全局控制系统和稳定性概念，这适逢新的市场设计和实时电价。新的第三代和第四代智能电网概念以实现真正的智能电网为目标，提出可持续的全球能源系统的新要求，充分利用实时优化的新方法、可外接充电型电动汽车、新能源、储能、分布式智能和新的神经网络以应对复杂性和随机性的挑战。重要的社会机遇和新的基础研究挑战将始终存在着。

1 简介

为帮助我们满足更智能的电网这个全球性需求，计算智能面临着各种各样的机遇。为抓住这些机遇，提升该领域基础并真正实现其愿景，我们也面临着一些重要挑战。与此同时，智能电网的探讨已经激发了计算智能、控制理论和许多其他领域的大量研究人员试图迅速致富，但并没有真正思考电网或智能系统将走向何方。在从大量可能性中决定建议和资助什么之前，我们有理解更大目标的特殊责任。本文将探讨更广阔的需求和战略形势，并介绍其服务的需求背景下的细节。

2 智能电网路线图——需求与机遇

第四代智能电网（如图1）在人类获得可持续

的全球能源系统的紧急任务中将发挥重要作用。从长远来看，我们想要电力系统中的所有决策成为某种程度上最好的决策，从低电平继电器开关和发电机控制到地区输电组织（RTOs）做出的全局决策，从毫秒级的决策到控制不期望的谐波再到长期规划决策。这是通过利用足够的传感器输入来计算最好的决策，并利用足够的执行器或控制器来充分接近系统的潜在效率实现的。换句话说，整个系统中采用的所有算法在某种程度上应该实现真正的智能优化控制，具有预测和自适应能力，并能抵抗随机干扰和恐怖分子有组织的威胁。它应该是一个真正的智能系统。

该愿景与通常的每个个体均为某种智能体所组成的多智能体系统概念有所不同。通过博弈论和经济学，我们知道多个优化智能体组成的系统至多收敛到纳什均衡点。除非存在设计更大市场

体系的特殊努力或实现某种集体最优的合作，否则纳什均衡点通常远不如任何最好的可能结果。这个特殊的努力就是第四代智能电网愿景的关键定义元素之一。

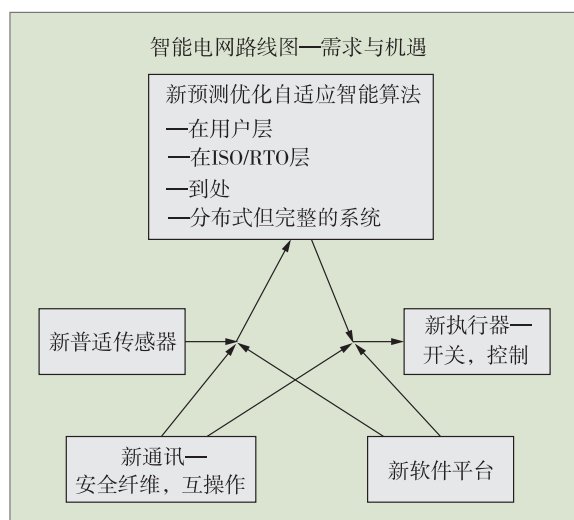


图1 第四代智能电网的愿景

该愿景当然不会在短期内实现。对这些丰富的能力的需求直到最近才被认可。因此，我首先回顾智能电网的早期愿景，以及切实的短期需求，这些需求将成为实现真正愿景的基石。

3 第一代愿景

1998年以前，IEEE电力工程协会（PES）极力让全国更加重视电力网络的需求。正当我们试图向其增加更有挑战的新需求时，例如能产生谐波并影响电能质量的新的非线性负载，许多工程师称电网正在迅速老化。他们说维护电网的人员老龄化更加迅速，这造成了比以往更严重的劳动力危机。康奈尔大学和PES的Bob Thomas称我们需要重新考虑大规模非线性系统（LSNS）理论以帮助我们更好的减少大停电和连锁故障。1986年，美国自然科学基金委（NSF）邀请Thomas来设立LSNS和电力工程的项目。该项目开始于1987年，并发展成为如今电力与能源协会（EPAS）扩展项目的

一部分。

许多电力工程师在当时就认为计算智能可以很好的解决这些艰难的挑战。例如，电力研究所（EPRI）的Dejan Sobajic认识到时滞递归神经网络（TLRN）和时序误差反向传播（BTT）作为电力系统的预测和诊断工具的重要性，并与Bernie Widrow一起做出了大量的重要工作。PES的Bob Marks和Mohammed El-Sharkawi组建了IEEE神经网络协会，并将神经网络应用于可靠性估计等领域。一个重要的年度会议——应用于电力的智能系统（ISAP）——成立了，它包含了神经网络、模糊逻辑、进化计算以及其他方法在电力系统中的应用。Mo Yuen-Chow和Kwang Lee采用TLRN研发了新的具有突破性的电动机和电力系统实时诊断系统。Curt Lefebver曾研发了具有处理TLRN的独特能力的神经维软件包，然后将这些工具投入到发动机控制的实际应用中。这使得他成为新创公司NeuCo的创建者并长期担任该公司的董事长。他现在估计这些软件已经应用于20%的美国燃煤发电机。

同时，电力工业也认识到许多更现实的升级需求，例如使用自动化电子仪表、简单传感器和通讯设备来感知复杂多样的电网中实际上所正在发生的事情，更不必说利用互联网了。

第一代智能电网的愿景本质上是通过大量投资来实现电网现代化、以更高的层次支持PES和ISAP上报道的研究、建造更多的线路、安装新的仪表和安装新的传感器和通讯设备，以使得现有电网更好地解决大停电问题。

在我们真正实现第四代愿景之前，我们当然需要新的仪表、线路、传感器和通讯设备。同时，不要让一些传统标准和投资成为我们向第四代愿景迈进的绊脚石。例如，安全问题会变得更重要，而在电网的某些部分过度依赖无线通讯使这一要求更难满足，这是因为潜在敌人会进入智能系统并操纵电力设备。

4 第二代愿景

故事的下一章节奇怪地开始于与EPRI接近的NASA Ames组织的研讨会。一位叫Massoud Amin的大学研究人员发表了一篇出色的关于时滞递归神经网络的论文，这吸引了EPRI的Dejan Sobajic等人的关注。进入EPRI后，Amin从1998到2001年开创了智能电网的新尝试，并创建了我认为是智能电网的第二代愿景。

这里的关键元素本质上是LSNS思想的扩展，这是在控制理论协会发现和发展能够获得复杂系统稳定控制最好方法的尝试。Amin也在本领域为EPRI担任有力的发言人。他向EPRI展示的条形图显示美国所有电网领域的研发投入，将公共的和私有的都算上也低于每年2千万美元，这比任何其他工业所占的百分比都小。从那时到现在，NSF在这方面的投入可能超过了政府投入的一半。尽管能源部大部分资助都用于了第一代智能电网的发展，但已经连续3年投入了更多的额外资金。在离开EPRI后，Amin继续担任这一愿景的发言人。他也在该领域普及了自愈概念。

与此同时，人们对实时电价这个重要概念的兴趣与日俱增。从长期看，发电的成本在一天中的每一小时会变化很大。然而不管在一天中的什么时候，用户通常都要支付相同的电价。经济学家长期倡导改变这一状况以使得电价能够反应成本，并鼓励人们在电价较低时购买更多的电。

这被称为“负载转移”。在2000年以前，大多数政策分析员认为不管实时电价将多大程度的提高效率和减少用电拥堵，共用事业委员会（PUCs）都永远不会允许，然而这种情况已悄然改变。

这一时期的另一重要发展是电力工业政策变化的加速。由于电力是一种自然垄断，讨论摆脱所有管制是不现实的。然而，大量的努力开始试图建立尽可能多的基于市场的决策体系，其关键

思想是使得发电工业成为一个真正开放的竞争市场，而建立新的独立系统经营主体（ISOs）和RTO来使得更高层决策可以控制输电系统的使用，并受限于输电公司和地区配电公司（电能与小规模用户之间的最后一英里）的PUCs的管理。即使到现在，大量的关于电网的研究和政策思考都没有很好的考虑到ISOs和RTOs新的重要现实。这在2010年由联邦能源管理委员会组织的一系列研讨会上被非常清晰和数学化的阐述了。在那一时期管理NSF电力的Marija Ilic极力组织电力工程协会进行研发以实现这一转变。她也为FERC上最近的研讨会做出了极大的贡献，该会议主要关注与ISOs和RTOs相关的最重要的近期研究挑战。

在撤销管制规定前，电力行业一般被允许将其收入的1%投入到EPRI的研究中。由于这个通常在管制规定撤销期间失败，EPRI在后面几年进行了持续的努力，特别是支持大学的基础研究。

5 第三代愿景

在Marija于2001年回到大学之后，我负责管理NSF的电力领域，此外还包括计算智能的长期项目。

在那时，报纸的头条都是关于加州因大停电而造成的数十亿美元和许多工作的损失。报纸头条和高层决策者都从传统观点认为在三年之内降低加州电力的物理成本无计可施，但我对此持怀疑态度。在我看来最近在巴西举行的ISAP会议上巴西国家实验室的研究人员已经证明新的传输技术能够为加州节约数十亿美元。因为巴西具有欧洲水平的高等教育，在电网研发中比美国投入更多资金，并在电力领域面临着主要挑战，他们已开始部署电力潮流数字控制技术，并发展被称为“SIL”的新技术以增强现有线路的电力安全性。为了帮助加州解决危机，我联系了EPRI并建议在加州举行研讨会，邀请巴西人来商讨如何将巴西的先进技术引入到美国。

这促成了Fritz Kalhammer、Massoud Amin、Jame Momoh、我、Edris和EPRI另一成员在华盛顿一个宾馆里的重要会晤。当我让Kalhammer资助这个传输技术研讨会时，他有条件的接受了。这个条件是我们也资助他认为最大的尚未满足该工业研发需求的研讨会，该需求是整个电网的全局动态优化。他说如今的电网工程视角都太过狭窄和肤浅。人们设计独立的部分时，仅仅考虑它们单独工作时或是在假设模型下的效果，这样根本无法保证将它们结合到一起时仍然顺利工作。设计它们时，应该让它们尽可能多的为大系统服务。“我料想你会说这是不可能的，是白日梦，就和所有我谈及到这个问题时的其他工程师一样，但这就是对于整个系统我们真的越来越需要的。”当Momoh和我迅速同意时，他相当惊讶。但事实上，Momoh已经花费数年时间发展世界上最先进的电力潮流优化（OPF）系统。该系统由EPRI推广，可能是如今解决该任务的最先进的系统。OPF集成了各种局部决策，已经真正实现了电网的全局优化，但OPF是一种在单个时间片上的静态优化。此外，我已经花费数年开拓自适应/近似动态规划（ADP）这个新领域以解决多时段优化的普遍问题。该方法在面对非线性、随机干扰和复杂性时，就像哺乳动物的大脑所要应对的情况一样，具有预测和学习能力。所以，我们迅速达成一致。

于2001年10月举行的第一届研讨会是不寻常的经历。会议主席是Chen-Ching Liu,他因将模糊逻辑应用于电力系统而在ISAP上很有名。巴西人提出了极为令人印象深刻的详细方案来将他们的技术引入到美国西部电力网络。SIL技术将允许对加州和落基山脉之间的现有线路进行迅速升级，并允许煤电厂在不提高成本或增加其他区域供电的条件下以低成本价格把电卖给加州。但联邦政府其他部门的高层官员不愿意来参会，原因是他们感觉美国能从巴西学习的整个想法是一种侮辱。主要的ISO发言人来参会了，并同意巴西的方案会立即落实，尽管

那时的市场规则使得美国的任何人为升级支付都不可能。首先，他们说我们需要改变市场规则的研究以鼓励人们从事该工作。EPRI的代表作了非常有说服力的演讲，他们提到危机并没有真正结束，它使得加州每年仍然要花费200亿美元。他们还引出了许多大公司说到如果电力供应不改进，他们将把硅谷的大量工作外包出去，事实说明他们正是这么做的。这对美国经济和加州公立教育造成的代价可能持续到今天。

于2002年4月在墨西哥卡门海滩举行的第二届研讨会非常令人鼓舞。第一届集中于电网的全局动态优化，主要是吸引活跃于PES或者ISAP的研究人员。第二届集中于一般的全局动态优化算法。令人警醒的是依然有人问：“电网的全局动态优化和全局动态优化的算法——那些非常不同的领域之间可能有什么关系？”

这些研讨会促成了智能电网的第三代愿景，由Momoh和我完成的书里面对此有所描述。其关键思想不是简单摆脱现有的OPF方法，而是通过训练和添加值函数或评判网络来提高OPF方法。因为传统的多层感知机具有出色的函数逼近能力，并且我们知道大脑中的神经网络能够比多层感知机处理更大的空间复杂性，所以先进的神经网络被用来近似值函数。OPF已经输入当前效用值作为优化的一部分。在动态随机电力潮流优化（DSOPF）中，它输入同样的效用值和表征将来值的测量。神经网络评判网络可以初始化为对电网有意义的形式，例如El-Sharkawi训练的表示网络安全度的神经网络。除了提升OPF，OPF的输出(即值测量)将作为价格信号在整个网络中传输。他们将被用来提供一种价格的动态测量，这要比如今通常使用的分区边际电价的静态测量好很多。

在研讨会的一开始，Venayagamoorthy也展示了与Wunsch和Harley合作的基于双重启发规划(DHP)开发的涡轮发电机控制器的实验结果。他展示了它是如何承受干扰的，并可以达到现有的最好的

控制器所能承受干扰的三倍。这开始了与墨西哥EPRI在库埃纳瓦卡的合作，这项合作能够比美国保守的系统更容易部署这种新技术。单个涡轮发电机的控制仅要求训练大约12个变量的值函数，这可以通过在线学习、粒子群优化或多层感知机来相对容易的获得。对于像广域控制这类更复杂的系统，则要求采用更有效的神经网络（如目标网络），并且采用更有生物学基础的局部学习规则（如修改的误差反传）。

尽管ADP最终在主流控制理论和运筹学研究中变得更加流行，但控制理论近期的一些工作忽略了随机的情形。这些应用要求回到一般的随机情况和基于模型的方法来处理系统的复杂性。当然，完全理解哺乳动物中相似的能力也同样要求这样。

在NSF的研讨会上，研究经典线性鲁棒控制的发言人曾说：“如果你们所做的是最大化添加的值函数，那么你们将失去系统的可靠性，那是它自己很难实现的。你们太乐观了。我们更想要系统是基于提供绝对的无条件稳定性的固定理论。我们不会用真实世界中的其它任何东西。”资助他工作的电力公司行政长官站起来说：“如果你不能添加值函数，那么我们就不资助你。”我的回答更加中立：“你才是过度乐观”。如果你认为可以百分百的保证电力系统从不会发生大停电，那就是你没有面对真实的世界。你正在过度依赖不完美的模型。我们要在真实世界中面临不确定性和非线性，我们所能做到最好的就是最小化大停电的概率，或者最小化大停电带来的损害期望值，这是ADP能够解决的优化问题。和鲁棒控制相对，我称之为弹性控制。但事实上，正如经济学家告诉我们的，适当的效用函数也应该包含一项添加到值函数中。尽管存在表示服务质量或抵抗大停电风险的值函数，但为了在这些值函数之间达到帕累托最优，我们需要设计将两者都考虑到的效用函数。

尽管可靠性的简单常识依然存在，但第三代

智能电网将集中于竞争性目标之间的智能平衡。非线性鲁棒控制理论的研究告诉我们一般意义下最鲁棒的控制器是通过求解HJB方程得到的，这就是ADP所做的。尽管仍然存在提高通用目的的ADP算法的进一步研究空间，但ADP始终是一系列利用自适应、学习和近似来尽可能有效地求解HJB方程的方法集合。

6 第四代愿景

第四代智能电网的愿景形成于自2001开始的全球能源需求和现实市场的讨论中。尽管我在2009年提出了该愿景的早期版本，本文可能是目前对该愿景最完整和最可靠的描述。第四代智能电网的主要目标是尽可能地帮助人类以战胜威胁人类生存的能源问题。

A. 汽车和电网的愿景

最紧急的问题是日益增长的对化石燃料的依赖，因其有限的供应带来严峻的难管理冲突和经济冲击的短期风险。让我们变得完全不依赖于化石燃料的技术已经存在：灵活的可插拔混合动力汽车（PHEV）的GEM燃料技术。

第四代智能电网的关键目标是最大化地使用基于GEM技术的混合动力汽车，特别是在石油突然短缺的时候。计算智能如果和其他主要技术相结合，不仅可以在电网层面发挥重要作用，也可以在汽车上发挥作用。

例如，丰田的Danil Prokhorov于2008年展示了如何采用神经网络控制在不断增加汽车成本下提高普瑞斯混合动力汽车的里程数达15%。按照汽车工业标准，这是一个巨大的提高。这使得TLRN控制被大量采用，这也是福特、西门子和IEEE计算智能协会可替代能源方向参与者的工作中重要的核心技术。不幸的是Bernie Widrow的卡车倒车经典例子没有按其预想的在大学课程里被广泛使用。

最近，混合汽车永磁发动机所用的稀土材料据说已经很稀少，这将限制我们过渡到PHEVs。IEEE最近创造更通用的术语“可插拔电动汽车”（PEV），包括PHEVs、纯电动车（EV）和燃料汽车。稀土材料的缺少将威胁所有PEVs和传统混合汽车，然而两种可替代的电动机类型，即感应电动机和开关式磁阻电动机，不需要稀土材料，并且如果能够找到足够弹性的控制器来解决这个非常有挑战性的非线性控制问题，实际上在整个行驶循环中可获得更大的平均效率。丰田最近称由于控制的突破，他们至少将不再需要汽车发动机中所用的稀土材料，智能非线性控制能使它更广泛的有效。

主要的汽车公司具有的控制芯片能够以很低的成本处理GEM弹性，并采用虚拟传感减少传感器硬件成本，但完全采用自适应优化方法可能使汽车在燃料混合时真的是在线优化其性能。TLRNs和ADP是两项与其他方法结合所需的关键技术。Sarangapani的工作证明在Otto和柴油发动机上采用ADP提高效率可能是迈向这个目标有益的第一步。

对PHEVs更重要的目标是减少电池和电力电子技术的成本，这导致在充分利用新型电力电子技术时要求更长的电池寿命和弹性。电池制造商告诉我，缺少在汽车中使用足够好的一般的弹性电池管理系统，是像通用汽车这样的公司充分利用可获得的最低成本有效电池的主要阻碍，更不用说使用新型电池了。普通的ADP和TLRNs本应该在采用正确的输入数据和变量后对所有电池控制都运行得很好，但由于该任务的复杂性和网络特性，想要更好地控制工业电池并且在电池内部处理新的切换自由度可能需要采用对象网络。对于电力电子技术，NSF资助的Khaligh和Emadi的工作已证明，当增加能够接入国家电气规范中480伏特交流电的快速充电能力时，新的功率芯片和高频设计能够使先进PHEVs的电力电子技术成本减半。这开创了控制的新机遇，也将给未来电网带来根

本性的变化，这是因为电网中480V交流电比美国和日本正在部署的快速直流充电站更容易提供。

许多人相信更广泛地使用PHEVs的主要障碍是在电网的局部层面。高频电源转换技术在那里可能也将发挥重要作用。Khaligh和Emadi的证明基本告诉我们在局部分布层也能够采用新的基于芯片的技术，但我们还不知道将旧的转换器大量替换成新的基于芯片的电力转换器是否会极大的削减成本。新转换器的好处可能依赖于我们实际实现他们所要求的新的切换能力，这要求与更智能的控制和更智能的分布式电网相结合。总之，更大的智能可能是这里基本转换的重要部分，这个新的转换能力也将允许更好地抵抗严重的短期威胁，如巨大的太阳风暴。

B. 可再生能源和峰值负载抑制的愿景

DSOPF与传统OPF和静态优化方法相比最重要的优势是预测能力，即在不确定时实时兼顾供给和需求的能力。

供给和需求的实时平衡已经是电网的主要经济问题。例如，输电系统的大部分成本是用于应对偶然的少数峰值负载的线路成本，如在夏季最热的几天的中午的空调。即使在今天，更好的实时平衡能带来持续性的节约，并减少建造新线路的需要。

第四代智能电网的重要特征是存在许多新方式来进行传统资源和发电机的实时转换：（1）更好的需求响应，即每天电价变化时负载自适应的能力；（2）更好的爬坡，即有效的改变发电水平的能力（Alstom在FERC研讨会上的谈话）；（3）电网中更多的存储，部分原因或许是PEV向电网输电，但也可能是因为集中和分布式的新电池（压缩空气存储和抽水蓄能电站）更多的使用。为了充分利用所有这些新自由度，我们需要能够进行更好的实时优化。为了把不确定性和不可预测的事件看作优化的一部分，我们只有在电网的所有

层面发展更强大的ADP系统。主要的不确定性包括什么时候有风的不确定性，云飘过太阳能场和屋顶太阳能电池板的不确定性，以及负载的不确定性。

为了将所有传统的不同时间尺度应用到电网的管理和规划中，许多成熟的优化方法已经在ISOs和RTOs中使用，因此很显然在电网的复杂规模下，更好的性能和使用ADP能够对ISOs和RTOs有很大的帮助。这是FERC协会已经讨论的，但新的先进神经网络工具在使其在要求的规模上运行至关重要。许多智能的优势来自于向前预测以使得在进行实际调度时减少自适应的成本，采用类似方法的大规模逻辑系统中也存在类似的优势。

许多美国研究人员称家庭的电力需求可以转移数秒或数分钟，但这不足以让他们转而使用风能等可再生能源，这是因为可再生能源要求负载从一天中的某一时刻转移到另外一天。研究表明这对于传统类型的负载转移或需求响应是正确的。然而，通过新的软件仿真平台“OGEMA”将仿真研究和德国的实地研究相结合，证明了在电网层面和家庭层面允许加入智能代理的系统可以获得大量负载转移。真正的第四代智能电网将在两个层面都加入真正的智能系统（基于ADP）作为服务，这样的设计是为了使这些服务的结合能实现更大的虚拟ADP决策系统。德国的实验结果表明需求响应对负载转移的潜在贡献远大于传统的实地研究或弹性研究，这是因为新的技术及自动化允许需求对将来的价格做出比现在更智能的响应。

当然，这里的优化实际上是多标准优化，尊重个人家庭设置效用函数相应部分的权利。甚至如今的OPF系统都可以不明显地实现这一功能。发展帕累托优化理论和多参与者ADP系统的稳定性结果是将来很有潜力的研究方向，这可能像市场设计的其他部分一样需要工程师和经济学家合作。这应该是一个非常可行的研究主线，因为动态随机一般均衡理论和DSOPF具有许多共同假设，他们三个共同的“ λ ”向量也是一样的。

该挑战的另一个方面是将这个智能优化方法

扩展到包含许多新的自由度，例如电力潮流控制技术和NSF资助的传感器技术的突破。据估计这类新技术的有效使用能够将新能源传输线路的成本减半。这类成本削减与其他能源技术的重要突破和研发相结合将使得人类整体过渡到新能源成为可能，不会有核扩散风险，并且和今天相比用户会支付更低的电价。发展中国家的民用核裂变电力的广泛使用将导致可获得的敏感材料和技术大量增加。如果我们使得新能源更加廉价，新能源路径将更加安全。

McElroy和他的同事已经估计美国的陆上风力资源远大于整个国家的电力需求，并且每度发电成本仅花费大约6.7美分。如果我们能继续削减由电网80%风能的使用困难带来的额外成本，我们将以可以付得起的成本大规模过渡到新能源。我们相信特别是带有新的太阳热能能源转换系统的太阳能厂具有变得更加可靠和廉价的潜力。如果低成本可重用的进入太空技术有所进展，那么空间太阳能或太空中的激光诱发氘-氦聚变等太空能源也可能是低成本能源。这三种资源很有可能以可接受的成本满足地球上的全部需求，而且如果我们开发一个能够完全使用这些能源的电网，这还将提前实现。

7 总结和结论

目前大量投资正用于更新升级电网和实现智能电网的第一代和第二代愿景。本文呈现了实现第四代智能电网的路线图，它将在不降低可靠性的前提下，以对全球经济最小的代价，基于已有的投资，使用智能系统广域优化技术来实现高达80%的电来源于可再生能源和80%的汽车成为可外接充电的电动汽车的目标。这是实现经济持续增长与进步的重要的全球性战略元素之一，并将成为整个人类生死攸关的大事。

(August 2011, Computational Intelligence Magazine)

中国智能电网建设与清洁能源发展将全面提速

第十五届科博会2012中国智能电网产业与清洁能源发展高峰论坛即将在2012年5月23日至24日北京国际会议中心隆重举行。

科博会中国能源战略高层论坛组委会获悉2012年中国智能电网建设与清洁能源发展将全面提速，2011年底《国家电网公司绿色发展白皮书》颁布，按照规划，到2015年，我国特高压将形成“三纵三横一环网”，基本建成具有信息化、自动化、互动化特征的坚强智能电网，形成以华北、华中、华东为受端，以西北、东北电网为送端的三大同步电网，初步建成世界一流电网。

科博会中国能源战略高层论坛组委会从国家电网公司科技部智能处获悉，“到今年底，全国将有25个智能小区、楼宇实现智能用电双向交互，人们的日常生活会因为智能电网而更加低碳环保。”国家电网公司科技部智能处处长林弘宇告诉记者，智能电网涉及发电、输电、变电、配电、用电、调度6大环节。过去两年，国家电网公司全面推进智能电网试点工程建设，全面启动了21类228项试点工程，在智能变电站、配电自动

化、用电信息采集系统、电动汽车充换电设施、智能电网调度技术支持系统、电力光纤到户等六个领域取得了重要突破。

科博会中国能源战略高层论坛组委会获悉2012年用户侧光伏发电项目补助标准原则上为7元/瓦，而2011年补贴标准原则上由9元/瓦调整为8元/瓦。此次补贴虽下调，但延续了往年的补贴力度，且招标规模或将扩大；关键设备招标要求提高，将提升光伏发电效率；国内光伏应用市场加速启动。

2012中国智能电网产业与清洁能源发展高峰论坛将权威系统解析新能源与可再生能源发电产业政策、新能源与可再生能源在友好接入协调控制方面市场机遇、分布式能源解决并网技术路线途径、国际和国内智能电网技术标准体系完善的最新进展、发电输电变电配电用电智能化技术市场最新需求、调度智能化技术与通信信息技术最新进展、未来智能微网发展趋势与机遇、风光储输工程——破解新能源发电难题。

(中证网)

智能电网助力清洁能源大发展

今年的政府工作报告指出，要加强用能管理，发展智能电网和分布式能源。这表明智能电网的建设得到了社会认可，智能电网全面建设是大势所趋。日前，国家电网公司在北京发布了2011年社会责任报告，承诺2012年“坚强智能电网”的投资将超过3000亿元，我国“坚强智能电网”将进入全面建设阶段。

电网服务水平是决定我国新能源装机水平的

主要因素之一，建设“坚强智能电网”既能改善电网环境助力新能源发展，又能改善用户感受让民众得到实惠。不过，发展过程中须建立完善的标准体系，要注重分布合理，可升级、可持续。《物联网“十二五”发展规划》显示，“十二五”期间，物联网重点投资智能电网、智能交通、智能物流等九大领域。其中，智能电网的总投资预计超过2万亿元，居十大领域之首，

预计到2015年将形成核心技术的产业规模2000亿元。未来10年,将是智能电网建设和发展的黄金10年。智能电网全面建设的启动,可以说是一个重大的利好消息,将极大地促进我国智能电网发展,对于可再生能源产业也是一个重大机遇,甚至对于全国经济都有极大的带动作用。未来5年,智能电网的建设每年可以拉动国内生产总值一个百分点,电网还可能开展宽带、电视、通讯等业务,这将是一个比3G业务更大的产业空间。

去年5月,上海市发布《上海推进智能电网产业发展行动方案(2010-2012年)》,锁定新能源接入与控制、电力电子应用及核心器件,智能变电站系统及智能设备,电力储能,智能配电网与智能用户端,高温超导等5个重点发展方向。其总体目标是在国内率先建成智能电网三大基地,即智能电网功能示范应用基地、智能电网关键技术研发基地、电网核心设备产业基地,到2012年,力争培育3~5家智能电网行业的龙头企业,形成有竞争力的智能电网产业集群,产业规模达到500亿元左右。

而就在此前,江苏省发布了《江苏省智能电网产业发展专项规划纲要(2009-2012年)》,明确了坚持以智能电网建设带动智能电网产业发展,以智能电网产业发展促进智能电网建设的发展思路,以及2012年、2015年智能电网产业总产值分别突破1500亿元、3000亿元的目标。浙江省温州

市计划用两年时间建成“国际电气城”,产值达千亿元。河南省平顶山市也公布了建设“中原电气城”的蓝图。智能电网全面建设万事俱备。

由此看来,智能电网全面建设一触即发。各国对未来智能电网的愿景各有侧重。我国发展智能电网的特点与欧洲、美国有所不同,其独特挑战是保障特大规模、特高电压等级、特大输电能力输电网的“清洁、安全、自愈、经济、互动”运行。智能电网的发展,或改变我国的能源结构。我国智能电网主要是针对可再生能源的需求设计的。我国的可再生能源主要是风电、光电,但无论风电还是光电,都有波动大、预测难、不连续的特征,会给电网带来很大的干扰。智能电网以无处不在的智能传感器为触手,以高速双向通信网络为纽带,以智能决策支持系统为大脑,能清晰地掌握电量供需状况,合理地安排消费或储能,对于接纳不稳定的可再生能源有着立竿见影的作用,可以大幅提高电网接纳可再生能源电力的能力。

科博会2012中国智能电网产业与清洁能源发展高峰论坛即将在2012年5月23日-24日北京国际会议中心盛大开幕,本届论坛将诠释智能电网最新政策和智能电网行业最新动态,共聚人脉畅想未来,分享思想,是中国智能电网产业发展一次睿智交流盛宴。

(中电新闻网)

中科院与中国科协举行工作座谈会

2月9日,中国科学院和中国科学技术协会工作座谈会在中科院机关举行。中国科协常务副主席、书记处第一书记、党组书记陈希,副主席、书记处书记、党组副书记程东红,中科院院长、党组书记白春礼,党组副书记方新出席。中科院副院长李静海主持座谈会。

在座谈会上,陈希、白春礼分别代表中国科协和中科院发表讲话,并与参会人员就双方长期合作取得的成绩、下一步合作计划展开座谈。

陈希对中科院多年来对中国科协工作的关心和支持表示感谢。他认为,中国科协和中国科学院在工作中有很多交集和共同点,双方的合作对

国家科技事业的发展和科教兴国战略、人才强国战略的实施非常重要。他建议：双方在推动学会共建、推动科普资源开放与共享、加强科学道德与学风建设、加强科技人物宣传、促进国际合作、推进国际科技期刊建设、推进专家工作站建设等方面进一步加强交流与合作，为国家科技工作作出更新、更大的贡献。

白春礼首先对中国科协领导和各部门长期以来对中科院的大力支持与帮助表示感谢。他指出，长期以来，中科院和中国科协进行了密切的合作，在多个领域取得了可喜的成绩：第一，双方持续推进科普合作，多项共办活动已形成品牌

效应；第二，双方共建学会，不断提升了学会的影响力；第三，双方合作加强科技期刊建设，有效促进了学术交流；第四，双方合作加强国际科技合作，共同搭建了国际科研平台。他强调，这些合作推动了中国科技事业的发展，提升了双方在公众心目中的形象和地位，并为双方开展创新工作提供了良好的环境和条件。他希望，通过双方的真诚合作，为创新型国家的建设做出更大贡献，不辜负党和人民对科技界的殷切希望，以优异的成绩迎接党的十八大的召开。

为进一步促进交流和合作，双方还就保持经常性工作沟通联系，建立合作会商机制达成一致意见。

《自动化学报》十届二次编委会在京召开

2011年11月28日晚，《自动化学报》第十届编委会第二次会议在北京会议中心召开，四十几位学报编委参加了此次大会。中国自动化学会理事长孙优贤院士、副理事长王天然院士、郭雷院士、第十届顾问委员会委员柴天佑院士、中国科学院自动化所党委书记何林、自然科学基金委王成红处长、科学出版社期刊副总编辑肖宏、2011年度候选优秀论文作者代表应邀参加了此次会议。会议由学报主编王飞跃研究员主持。

会议开始，王飞跃主编根据学报第十届编委会第一次会议的工作计划和目标，对过去一年学报稿件收发情况、引用情况及各项工作进展作了详细汇报，并对2012年学报的工作重点进行了展望。过去一年里，编委会在主办单位中国自动化学会和中国科学院自动化研究所、基金委、科学



出版社等相关部门的鼎力支持下，始终以“质量第一”为核心，严格执行稿件处理流程；通过提升服务质量，获取优秀稿件等渠道不断增强学报在学术界的影响力。在各位顾问与前辈的支持下，在全体编委

的共同努力下，学报2011年的稿件收发情况较稳定，各项期刊评价指标不断提升，影响因子再创新高，其他各项工作也保持了良好的发展态势。为了遏制学术不端行为，引导高尚严谨的学风，学报成立了学术规范委员会，逐步完善对涉嫌学术不端行为论文的调查处理流程。为促进数字出版，学报开通微博及时发布网刊，提高刊文的可视度。王飞跃主编鼓励与会编委在即将到来的一年里，一方面积极申请组织出版有价值、有潜力的专题和专刊，吸引优秀稿件，提高学报的显示度和关注度；另一方面，尽职尽责，严把审稿质

量, 进一步提升服务质量。

随后, 学报责任编辑任艳青就英文刊筹备、待发表稿件统计、ScholarOne审稿平台的几个小功能等编辑部相关工作向与会编委进行了汇报。

在编委会的后半议程中, 与会编委对学报英文刊的筹备、学术不端行为的处理办法、收稿方向以及如何提高引用等重要问题进行了交流和讨论。与会顾问和特邀嘉宾对学报的发展提出了诸多宝贵建议。学报顾问柴天佑院士指出中国应该有自己的杂志, 鼓励与会人员将优秀的研究成果发表在自己的杂志上, 关于办刊, 柴院士表示目标不能单纯定位在SCI上, 应认真思考定位, 平衡各个学科, 办出自己的特色; 自然科学基金委王成红处长期望学报不断提高各种硬性指标, 以获取更多的资金支持, 肖宏副总编辑分享了中国科学杂志社的办刊经验, 主要讲述了学科体系建设对刊物的重要性以及编委会对刊物学术导向、水平和影响的重要性、以及如何争取优秀稿源等。中科院自动化所党委书记何林代表主办单位对编委会的辛勤工作表示感谢, 并结合自身工作实践, 针对是否创办英文刊、如何更好地防范学术

不端行为给出了很多中肯的建议。

此外, 根据学报优秀论文评选办法, 经编委/专家推荐、副主编复评、与会编委无记名投票, 最终从学报前两年(即2009年和2010年)发表的研究性论文中评选出了三篇《自动化学报》2011年度优秀论文, 分别为:

(1) Li Gang, Qin Si-Zhao, Ji Yin-Dong, Zhou Dong-Hua. Total PLS Based Contribution Plots for Fault Diagnosis. 自动化学报, 2009, 35 (6): 759-765

(2) Wei Qing-Lai, Zhang Hua-Guang, Liu De-Rong, Zhao Yan. An Optimal Control Scheme for a Class of Discrete-time Nonlinear Systems with Time Delays Using Adaptive Dynamic Programming. 自动化学报, 2010, 36 (1): 121-129

(3) 柴天佑. 生产制造全流程优化控制对控制与优化理论方法的挑战. 自动化学报, 2009, 35 (6): 641-649

最后, 王飞跃主编对此次会议进行了总结, 诚挚感谢各位编委和顾问在2011年对学报的支持与贡献。

(《自动化学报》编辑部供稿)

中国自动化学会2012年第一次正副秘书长工作会议

2012年2月27日上午, 中国自动化学会2012年第一次正副秘书长工作会议在学会办公室召开, 本次会议由CAA秘书长王飞跃主持。参加本次会议的秘书长副秘书长周东华、田捷、孙彦广、吴惕华、张楠, 办公室工作人员列席了本次会议。

秘书长王飞跃首先对去年年底的中国自动化大会(2011CAC)进行了详细总结, 并就现阶段以及下一步的工作安排进行了介绍, 各位副秘书长就各自工作提出了自己的想法。会议就如下问题

进行了讨论: 关于CAA进一步规范会员管理、加强采集会员信息、发放个人会员证的意见和建议; 关于CAA高级会员和会士的申报与审批工作; 关于进一步加强对CAA专委会的服务, 促进专委会的积极性和专委会的改革; 设立中国自动化学会优秀博士论文奖; 理事和会员代表作用的发挥; 如何强化对会员的服务以及发展会员等等。

(学会办公室供稿)

成都自动化研究会被评为四川省 第一批科技服务示范机构

2012年2月23-24日，四川省科技工作会议在成都市隆重召开。省政府副省长刘捷、省政府副秘书长蔡竞，各市（州）分管副市（州）长，市（州）科技局局长等代表共350余人参加。会议由科技厅党组书记、厅长彭宇行主持。会议传达了全国科技工作会议精神，总结了2011年全省科技工作，部署了2012年全省科技工作。大会还表扬了全国科技进步考核先进单位、全省科技工作优秀单位和科普先进集体，并向四川省第一批科技服务示范机构授牌。成都自动化研究会、成都科学技术服务中心等成为四川省第一批科技服务示范机构。此次获得省科技厅的表彰，既是上级科技主管部门对



我会工作的肯定，同时也是一种激励，鞭策我们再接再厉，继续努力！

我会将继续围绕“促进信息化与工业化融合，走新型工业化道路”、“利用先进自动化与信息化技术改造提升制造

业”、“推动科技成果转化及产业化，促进自主创新”等科技发展重点，积极拓展学会的社会职能，承接政府相关科技工作，整合聚集成都工业自动化领域的创新资源，推动成都工业自动化科技创新服务建设，对促进产学研结合、创新载体建设、推动成果转化等发挥积极的作用。

（成都自动化研究会供稿）

“2012第十四届中国国际工控自动化及 仪器仪表（济南）展览会”和“2012 第十四届中国国际动力传动与控制技术 （济南）展览会”召开

经过精心的组织策划和筹备，由我会牵头主办的“2012第十四届中国国际工控自动化及仪器仪表（济南）展览会”和“2012第十四届中国国际动力传动与控制技术（济南）展览会”于2012

年3月1-3日在济南国际会展中心拉开帷幕。

“济南自动化会展”自创办以来，已连续成功举办十三届，备受国内外客商的一致好评，展会多年来共汇集6000多家国内外知名品牌参

展，吸引了60多个国家和地区的6600多名境外客商，75万余名专业观众前来参观、咨询、洽谈。展会集中展示了自动化领域的新技术、新产品、新设备，推动了华东地区相关行业大量采用技术含量高、市场前景好的工业控制及自动化配套产品，也为参展企业赢得了更大的发展空间。

“济南自动化会展”是一个关于工业自动化全面解决方案、过程自动化控制系统、电气系

统、机器人技术、工业IT与制造业信息化、先进仪器仪表、传动装置及微系统技术领域的国际盛会。我们将坚持国际化、专业化、品牌化的发展方向，在专业特色、参展质量、展会内容等方面不断取得新的发展。旨在为制造商、销售商、采购商及业内人士提供一个信息交流、贸易订货、学术研讨、投资洽谈、合资合作的贸易平台。

（山东省自动化学会供稿）

天津市自动化学会第八次代表大会暨先进自动化技术报告会成功举行

天津市自动化学会于2011年11月19日，举行了第八次会员代表大会。对第七届理事会的理事进行换届。大会由学会副理事长郭明主持，市科协领导宣读了学会换届的批复，孙慧秘书长做七届理事会《工作总结报告》，中环天仪股份有限公司总经理、自动化所长 高明璋就召开第八届会员代表大会（暨理事会换届）有关筹备工作说明及修改章程的说明，选举产生第八届理事会理事及理事长，天津市科委主任、科工委书记赵海山同志，再次当选为理事长。理事会由93名理事，71个理事单位组成。中国自动化学会发来贺信，给予天津市自动化学会鼓励和支持，使学会今后在总会的领导下，再创辉煌！同时大会进行“先进自动化技术”学术报告第一个：请德国倍福自动化有限公司OEM技术主管平兆成做“倍福自动化——基于PC的控制技术”。第二个：请ABB公司周桂生高级工程师做ABB Freelance混合控制系统概述。第三个：请浩纳尔（天津）自动化科技有限公司 王华强总经理做“all in one”控制理念（全新的一体化控制理念）。这次会议我们想打破以往的学术交流形式，搞几个专题报告会，特

别想请一些知名企业介绍新产品、新技术，搞点企业急需的技书报告。天津在国内大城市中，新技术、新产品引入的理念赶不上其他城市，保守理念较严重。特别是一些领导在新产品、新技术的认知上还很缺乏，我们想通过此次交流，能让领导、企业开阔眼界，展望全国同行业，提高天津市自动化行业整体水平。同时天津作为环渤海经济发展的重点城市，发展空间是很大的，交流企业也可通过展示自己的新技术、新产品，从感性认识和理性认识上，让天津市自动化界科技人员有所感悟、认知，才能引入合作机制，这样的学术会议才能有实际意义，才能更好的进入市场经济运行中，学会活动才能有活力。这是学会、企业双赢的具有经济效益和社会效益的学术会议。

我们将企业的报告内容作为学术交流主题，并将会议全程内容及学术报告作为专题，刊登在我们的《自动化与仪表》期刊。期刊全国发行每期一万册，为双核心期刊，即中国科技核心期刊、北大中文核心期刊。

（天津市自动化学会供稿）

第三届全国平行控制 社会计算 平行管理会议成功举办

2011年11月5日至6日，由中国自动化学会平行控制与管理专业委员会、系统复杂性专业委员会、中国管理现代化研究会系统管理与复杂性科学专业委员会、国际计算机协会Social and

Economic Computing分会主办，由国防科学技术大学军事计算实验与平行系统技术研究中心、机电工程与自动化学院、信息系统与管理学院和中国科学院自动化研究所复杂系统管理与控制国家重点实验室联合承办的第三届全国平行控制o社会计算o平行管理会议同时在湖南省张家界专家村宾馆隆重召开。

会议开幕式由国防科学技术大学机电工程与自动化学院胡小平院长主持并致欢迎词，自动化所王飞跃研究员作《平行系统理论》的主题报



告，国防科学技术大学信息系统与管理学院沙吉昌教授作《战争设计与社会设计》的主题报告，北京系统工程研究所游光荣研究员做了《系统工程新领域：武器装备体系研究》的主题报告。



本次会议共有60多个专题报告、50多篇论文海报展示，参会人员来自国内相关领域的主要研究机构，探讨了各自领域的核心问题和最新研究思想、方法及应用成果，并对未来研究发展方向

进行探讨，极大地促进了学术交流。

当前社会系统和工程系统变得越来越复杂，这些系统呈现出动态性、快速性、开放性、交互性与数据海量性等特征，使得其中的管理与控制变得异常困难，国内学者创造性地提出了解决这些问题的新思路--ACP方法（人工社会+计算实验+平行执行）。在ACP方法的指导下，针对纯社会复杂性问题、社会复杂性+工程复杂性问题、纯工程复杂性问题，相应形成了社会计算、平行管理、平行控制三个理论，为系统性地解决传统方法难以处理的复杂系统建模、分析、控制问题难提供了新思路，已在社会安全、乙烯生产、城市交通、智能电网等若干重要领域展开应用示范，并取得了显著效益。参会人员认为平行控制、社会计算、平行管理将对现代社会发展产生重要影响，为国民经济发展及构建和谐社会做出贡献。

（中科院自动化所复杂系统管理与控制国家重点实验室供稿）

THE FIRST IJCAI INTERNATIONAL SUMMER SCHOOL ON AI

—In Honor of the 100th Anniversary of Alan Turing's Birth



Call for Participation



July 16-20, Beijing

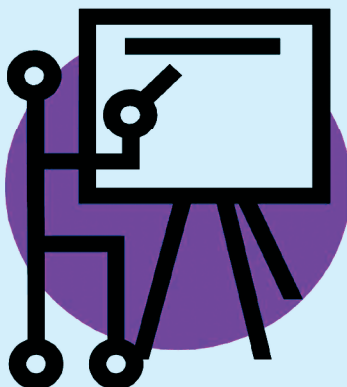
Artificial
Intelligence

www.elsevier.com/locate/artint

This will be a general AI Summer School with well-known international researchers as speakers and in depth coverage of the state of the art across various AI areas. The Summer School will consist of 9 half days with invited lectures, as well as cultural and excursion activities to ancient Chinese historical sites in Beijing. Enjoy your time and a unique AI experience in Beijing, China.

The school is open to students in all countries. Enrollment is limited. Apply now!

Please go to <http://www.ijcaissummerschool.org> for more details!



Important Dates

Application deadline: **April 20, 2012**

Notification of acceptance: **April 25, 2012**

Registration and payment: **May 30, 2012**

Co-Chairs

Fei-Yue Wang, Institute of Automation, CAS, China

Vincent Conitzer, Duke University, USA

You are the future of AI
Join the Summer School

Contact Us



Hongxia Zhao
Institute of Automation,
CAS, China
86-10-62554288
ijcai.2012ss@gmail.com

List of Speakers

Craig Boutilier, University of Toronto, Canada

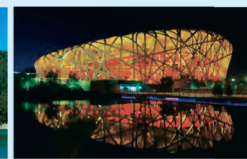
Francesca Rossi, University of Padova, Italy

Manuela Veloso, Carnegie Mellon University, USA

Michael Wooldridge, University of Liverpool, UK

Milind Tambe, University of Southern California, USA

Toby Walsh, University of New South Wales, Australia





欢迎加入

中国自动化学会

Chinese Association of Automation

这里可以 **获取技术信息** **结识业内专家**
获得同行认可 **施展个人才华**

作为个人会员，你可以

- 优惠或免费获得学会提供的技术咨询和资料（以电子邮件方式为主）
- 优惠或免费参加学会或其所属专业委员会举办的学术活动
- 优惠或免费订阅学会通讯及与学会签约的学术期刊
- 优惠参加学会提供的继续工程教育培训
- 通过学会申请各类奖项和荣誉资格
- 其它可能由学会提供的服务

作为团体会员，你可以

- 派出代表参加全国会员代表大会
- 优惠参加学会组织的有关学术论坛、科技展览等活动
- 优惠或免费获得学会提供的有关资料、学术期刊和服务
- 优惠取得学会的技术咨询、新产品鉴定、工程项目验收等服务
- 优惠获得学会为单位员工进修而举办的新产品、新技术培训活动
- 其它可能由学会提供的服务

中国自动化学会办公室

地址：北京市海淀区中关村东路 95 号自动化大厦 509 室

邮编：100190

传真：010-62522248

电话：010-62544415

<http://www.caa.org.cn> E-mail: caa@ia.ac.cn