

智能电网环境下家庭能源管理系统研究综述

张延宇^{1,2,3}, 曾鹏¹, 臧传治¹

(1. 网络化控制系统重点实验室, 中国科学院沈阳自动化研究所, 辽宁 沈阳 110016;
2. 河南大学计算机与信息工程学院, 河南 开封 475004; 3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 家庭能源管理系统是智能电网在居民侧的延伸, 是智能电网领域的研究热点之一。阐述了智能电网环境下家庭能源管理系统与传统家庭能源管理系统的不同和智能电网环境下家庭能源管理系统的新功能需求。提出了智能电网环境下家庭能源管理系统的结构和功能模块, 接着给出了智能电网环境下家庭能源管理系统的技术体系。从检测技术、网络通信技术和优化调度算法三方面综述了该领域的研究进展, 讨论了存在的技术挑战, 指出了未来的研究方向。

关键词: 智能电网; 需求响应; 家庭能源管理系统; 检测; 通信; 优化调度

Review of home energy management system in smart grid

ZHANG Yan-yu^{1,2,3}, ZENG Peng¹, ZANG Chuan-zhi¹

(1. Key Lab of Networked Control System, Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China; 2. School of Computer and Information Engineering, Henan University, Kaifeng 475004, China; 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Home energy management system (HEMS) is an extension of smart grid in residential sector, and it is a hot topic of smart grid. First, this paper compares the differences between conventional HEMS and HEMS in smart grid, and discusses the new functions of HEMS in smart grid. Second, it presents the system structure and function modules of HEMS in smart grid. Third, the paper describes the technology system of HEMS in smart grid, and reviews the advancements in measurement technologies, communication technologies and optimal scheduling algorithms of HEMS in smart grid. Finally, it points out the research challenges and future research directions in this area.

This work is supported by National High-tech R & D Program of China (No. 2011AA040103) and National Natural Science Foundation of China (No. 61100159) and Important National Science and Technology Specific Project (No. 2013ZX03005004).

Key words: smart grid; demand response; home energy management system; measurement; communication; optimal scheduling

中图分类号: TM73 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)18-0144-11

0 引言

电力广泛应用于我们日常生活、生产的各个领域, 随着经济和社会的发展, 全社会的电力需求量持续增加, 电力生产、传输、使用过程中的效率对经济可持续发展、环境保护等方面具有重要影响。居民侧用电量占社会总用电量的 36.6%, 但研究表明该领域的用电效率低, 浪费严重^[1]。为此, 美国和部分欧洲国家于 20 世纪 70 年代开始了家庭能源管理系统 (Home Energy Management System, HEMS) 的研究, 提高该领域的用电效率, 达到节

能减排的目的^[2]。

家庭能源管理系统利用传感器采集室内环境、人员活动和设备工作状态信息, 通过对这些信息的分析来对用电设备进行调度和控制, 在满足用户舒适度的前提下减少电能消耗, 提高用电效率。近几年智能电网技术的发展为家庭能源管理系统的研究提供了新的机遇与挑战。

智能电网是为解决传统电网的不足而提出的, 它是当前学术界的热点之一^[3-6]。不同于传统电网中只存在单向的能量流, 智能电网中的能量流是双向的, 并且智能电网采用了先进的信息通信技术, 网络中还存在双向的信息流^[7]。家庭能源管理系统作为智能电网在居民侧的延伸, 它是智能电网的重要组成部分。智能电网为家庭能源管理系统提高居民侧用电效率、实现节能减排提供了新方法。同时,

基金项目: 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 资助项目 (2011AA040103); 国家自然科学基金资助项目 (61100159); 国家科技重大专项基金资助项目 (2013ZX03005004)

智能电网也为家庭能源管理系统提出了新的功能需求, 智能电网众多新功能的实现都需要家庭能源管理系统的支持。

目前, 国内外研究人员和科研机构正在对智能电网环境下的家庭能源管理系统进行深入的研究。本文首先总结了智能电网环境下家庭能源管理系统新的功能需求; 然后给出了实现这些功能所需的系统组成结构和功能模块; 最后描述了智能电网环境下家庭能源管理系统技术体系, 并从检测技术、网络通信技术和优化调度算法三方面对该领域的研究现状进行综述, 讨论了其中存在的技术挑战, 指出了未来的研究方向。

1 智能电网环境下家庭能源管理系统新需求

在不同的电网结构下家庭能源管理系统具有不同的功能, 家庭能源管理系统作为智能电网的有机组成部分, 智能电网为其提出了新的功能需求。

传统电网的能量流向是单向的, 即电能由少量大容量发电厂集中生产, 然后通过大规模的输电网、配电网送至用户侧, 最终由用户消费掉。在这种模式下, 家庭用户只是电能的消费者, 被动参与电网的运行, 家庭能源管理系统的功能就是提高用电效率, 实现节能减排, 功能单一; 并且这种家庭能源管理系统主要考虑单一用户用电效率的提高和舒适度的增加^[8], 并未考虑大量用户协同工作对电网的影响。

智能电网除了大容量集中式发电厂外, 还包含大量分布式电源和可再生能源, 它具有复杂的潮流分布。电网和用户之间的能量流是双向的, 家庭用户不仅可以消费来自电网的电能, 而且可以将本地分布式发电装置产生的多余电能售给电网以获得相应的经济效益。

智能电网是一个完全自动化的供电网络, 其中的每一个用户和节点都得到实时的控制, 并保证从发电厂到用户端电气之间的每一个点上的电流和信息的双向流动; 能保证电网上各成员之间的无缝连接和实时互动^[9]。

除了提高居民侧用电效率、实现节能减排外, 智能电网环境下的家庭能源管理系统需要具备以下新功能:

1) 支持需求响应在居民侧的实施。目前电力资产利用率低, 研究^[3]表明 20% 的系统容量仅用于满足电力峰值需求, 其运行时间仅占系统运行时间的 5%。通过实施需求响应可以降低电力需求的“峰谷比”和电力资产投资额, 提高电力资产的利用效率, 增强电力系统运行的安全性。需求响应在大工

业用户和商业用户中已经得到了实施; 然而单个家庭用户用电量少, 而用户数量众多, 在传统电网下无法有效实施需求响应。但据美国能源管理委员会 (Federal Energy Regulatory Commission) 报告, 居民用户侧是通过实施需求响应来削减电力峰值需求的最大潜在领域。在智能电网环境下, 借助于家庭能源管理系统可以实现这一功能。此外, 居民用户通过家庭能源管理系统对电力公司发布的动态电价信号进行合适的响应, 对用电设备进行优化控制可以降低用户用电费用。

2) 支持风力发电、光伏发电等分布式可再生能源接入电网。智能电网中存在大量的分布式电源, 其中风电和光伏发电是居民侧最常见的分布式可再生能源形式, 它们对于提高可再生能源的利用率、优化能源结构、降低用户用能费用具有重要意义, 但同时使配电网中的潮流复杂化。另外风能、太阳能具有间歇性和随机性的特点, 风电和光伏发电的大规模接入会给电网电能质量和电网的安全运行带来挑战^[10-12]。家庭能源管理系统需要为家庭用户拥有的分布式可再生能源接入电网提供支持。

3) 支持大规模电动汽车安全接入电网。电动汽车具有节能环保、运行费用低的优点, 对于减少交通运输领域的能量消耗和温室气体排放具有重要的作用。但电动汽车具有电池容量大、充电功率高、接入电网充电时间集中的特点^[13]。大量电动汽车无序接入电网充电会造成电力需求峰值增加, 电网供需失衡, 输电线路和变压器过载等后果^[14-15], 降低电力资产利用率, 缩短设备寿命, 威胁电网的安全运行。通过家庭用电网络接入电网是电动汽车入网充电的重要方式之一, 利用家庭能源管理系统对电动汽车的充电过程进行控制可以削弱或消除电动汽车上网充电对电网的不利影响^[14], 同时减少用户的用电费用。

综上, 智能电网环境下家庭能源管理系统除了实现提高用电效率、节能减排的基本功能外, 还要为居民侧需求响应的实施、分布式可再生能源和大规模电动汽车安全接入电网、降低用户用能费用提供支持, 这些新需求的实现为该领域的研究提出了新挑战。

2 智能电网环境下家庭能源管理系统组成

与传统的家庭能源管理系统相比, 智能电网环境下的家庭能源管理系统实现的功能更多、更复杂, 需要全新的系统结构支持这些功能的实现。智能电网环境下家庭能源管理系统示意图如图 1, 它主要

包括三类设备：用电负载、储能设备和分布式电源。根据用电模式和用户需求不同，用电负载分为可调度负载和不可调度负载。HVAC (Heating, Ventilation and Air Conditioning) 系统、洗衣机、干衣机、热水器、洗碗机、电动汽车、用于家庭泳池的抽水泵等，在一定条件下对这些设备的运行进行调度不会影响

到用户的舒适度，它们是可调度负载。不可调度负载主要包括计算机、打印机、冰箱、家庭娱乐系统、照明系统、安保系统等，对这些负载进行调度会严重影响用户的需求满意度。对可调度负载的运行进行优化调度是实现居民侧需求响应的重要途径之一。

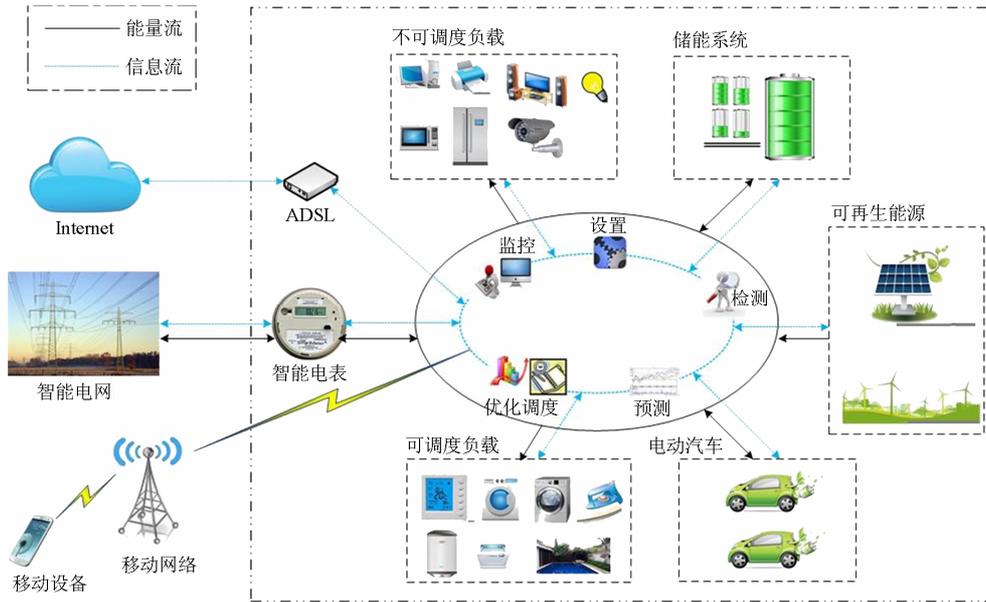


图 1 智能电网环境下家庭能源管理系统示意图

Fig. 1 Diagram of home energy management system in smart grid

电动汽车是一种特殊的可调度负载，它不仅可以通过 G2V (Grid to Vehicle) 从电网中吸收电能满足用户的交通需求，而且还可以通过 V2H (Vehicle to Home) 向家庭环境内的其他用电负载提供应急电能。大量电动汽车在集合者 (Aggregator) 的协调下可以组成大规模的电动汽车群 (Vehicle Fleet) 协同工作，通过 V2G (Vehicle to Grid) 功能在用电高峰期间将电动汽车存储的电能回馈给电网，起到调峰等辅助作用^[16-19]。电动汽车需要在家庭能源管理系统的控制下有序接入电网，以消除大量电动汽车无序接入电网造成的危害。

目前，居民侧的分布式可再生能源主要是风力发电和光伏发电。由于风能和光能的间歇性、随机性，以及风能的反调节特性，需要利用储能装置改善风电和光伏发电的电能质量，维持系统稳定，提高其利用率。风电、光伏发电主要供给用户自身使用，多余的电能卖给电网。

储能系统除了用于提高可再生能源的电能质量和电能利用率外，还可以在电力需求的“谷底”从电网吸取电能，在用电高峰时期供给家庭用电负载

使用，或者售给电网来获取经济效益，降低用户的用电费用。

家庭能源管理系统与外界既有能量的交换，也有信息的交换。它通过智能电表与外部电网实现双向能量流动和计量。智能电表也是电力公司和家庭能源管理系统进行通信的信息接口。

用户可以通过 Internet 网络和家庭能源管理系统进行交互，比如通过 Web 页面监测当前家庭用能情况，对家庭用电设备进行控制。用户还可以与朋友、同事等进行节能比赛，获取节能建议等^[20]。用户也可以通过移动网络与家庭能源管理系统进行交互，实现上述功能。

智能电网环境下的家庭能源管理系统主要包含以下五个功能模块：

1) 用户设置模块。用户通过人机界面对家庭环境内的设备进行参数设置，比如室内环境温度上下限、洗碗机的开始工作时间、电动汽车的充电完成时间等；可以设定不同用电设备的优先级；选定不同的控制模式。用户通过此模块完成与系统相关的所有设置。

2) 检测模块。检测模块用于实现环境检测、设备检测和用户行为检测。环境检测包括室内的温度、湿度、光照等因素的检测; 设备检测指用电负载、储能系统、分布式电源的工作状态检测, 比如电动汽车的当前连接状态、充电功率、电池荷电状态等; 用户行为检测包括用户物理位置检测和家庭环境内用户行为模式的识别。

3) 预测模块。风电、光伏发电具有出力不稳定的特点, 利用预测算法对其功率输出进行预测有利于提高它们的利用率。若用户采用实时电价, 还需要对电价进行预测; 另外, 也可以对家庭环境内的负载进行预测, 这些预测结果用于优化调度过程以提高系统性能。

4) 优化调度模块。该模块是家庭能源管理系统的核心, 它根据用户设置、设备工作状态、环境信息、人员活动信息、电价信息、可再生能源的出力预测等信息对家庭环境内的可调度用电负载及储能系统的运行进行优化调度, 达到用户预先设定的某一最优目标, 比如最小化用户用电费用等。

5) 设备监控模块。该模块根据优化调度模块计算的结果对用电负载、储能系统的运行进行控制, 实时监测设备的工作状态, 并将设备的工作状态和当前的用电状态通过人机界面实时反映给用户。

家庭能源管理系统利用通信技术将家庭环境内的用电负载、分布式电源、储能装置及检测控制装置组成网络, 实现用能的监控, 并实现与外部网络信息流的双向流动。

3 智能电网环境下家庭能源管理系统关键技术及其未来研究方向

智能电网环境下家庭能源管理系统的技术体系如图 2 所示。物理层由负载、储能系统和可再生能源三类设备构成; 在中间层检测、预测、用户设置的基础上对物理层设备的运行进行优化调度, 优化调度的结果通过设备监控作用于物理层设备上, 利用网络通信技术构成家庭能源管理系统通信网络; 在中间层的支持下可以实现节能减排、需求响应、可再生能源接入、电动汽车接入等系统功能。

在此技术体系中, 检测是进行优化调度和监控的基础, 优化调度是核心, 网络通信技术是实现系统的关键技术之一。另一方面, 风电、光伏发电出力预测、电价预测和负载预测可直接采用已有的预测算法^[21-26]。因此, 本节从检测技术、网络通信技术和优化调度算法三方面总结智能电网环境下家庭能源管理系统的技术研究取得的成果, 讨论存

在的技术挑战, 并指出未来的研究方向。

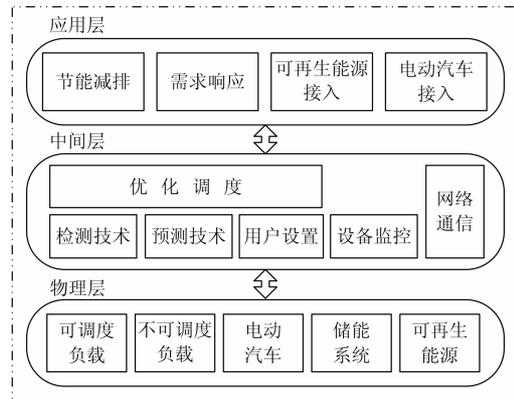


图 2 智能电网环境下家庭能源管理系统技术体系

Fig. 2 Technology system of home energy management system in smart grid

3.1 家庭能源管理系统的检测技术

与传统的家庭能源管理系统相比, 智能电网环境下家庭能源管理系统检测的物理量范围更广、频率更高、粒度更细。以检测用电设备的耗电量为例, 智能电网环境下的家庭能源管理系统不仅要检测家庭用户的总用电量, 还要将用电量细化到具体的用电设备和用电时段上。传统检测方法需要为每个检测对象安装传感器, 成本高, 安装、维护难, 并且它是一种侵入式检测方法, 难以被用户接受。

非侵入式负载检测方法可以弥补传统方法的不足, 是当前的研究热点。它由 MIT 的 George Hart 提出, 最初用于居民楼负载监测^[27]。该方法通过分析负载的稳态和瞬态特征实现负载的识别。非侵入式负载检测方法只需要在家庭环境内安装少量传感器检测关键节点的用电量, 然后通过算法来确定具体设备的工作状态和耗电量。图 3 所示是安装在用户侧的智能电表在一段时间内测量的用户用电功率实时曲线图, 可以采用基于“时间窗口”的方法以窗口期功率信号的边沿特征、顺序特征、变化趋势和持续时间为特征量, 通过与特征数据库中的特征匹配来识别设备, 从而将智能电表测量的总功耗分解到具体的用电负载^[28]。非侵入式负载检测方法中设备特征选取和识别算法设计是关键, 目前的算法有时间序列法^[29]、维特比算法^[30]、整数规划法^[31]、模糊聚类法^[32]、神经网络法^[33]、遗传算法^[34]等。

非侵入式负载检测方法采用的仪表少、成本低、安装维护容易, 易于被用户接受, 但对于能耗小、工作模式复杂的设备进行识别比较困难, 并且随着设备数量的增加, 识别精度下降; 大部分算法需要大量的训练和标定过程^[35]。

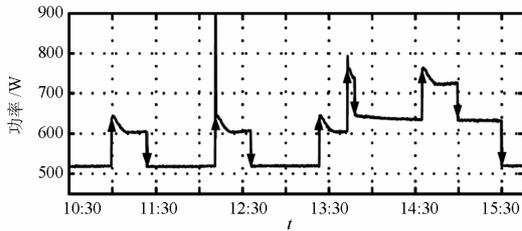


图3 智能电表实时功率数据^[28]

Fig. 3 Real-time power data acquired via smart meter

对家庭环境内用户的物理位置和行为进行检测和识别,采用一定的方法对用户的行为模式进行预测有利于家庭能源管理系统对设备的运行进行优化调度。检测手段除了传统的红外法、RFID 标签法外,还可以通过嵌入在家用电器中的无线收发器接收信号强度的变化来检测人员活动信息^[36]。

除了传统的以数据为中心的人员行为检测,也可以采用知识驱动的方式进行家庭环境内人员行为检测,比如利用本体对家庭环境和人员行为进行表示、建模,采用语义推理、分类和领域知识进行人员行为识别^[37]。

目前,家庭环境内人员活动行为的检测和识别主要集中在单用户方面,在实际家庭环境内往往存在多个用户,他们之间的行为具有耦合性,增大了行为识别和预测的难度,但识别和预测的结果对提高家庭能源管理系统的优化调度性能具有重要价值。

因此,非侵入式检测识别算法、多用户用能行为检测和识别是家庭能源管理系统检测技术领域未来的研究重点。

3.2 家庭能源管理系统的网络通信技术

与传统的家庭能源管理系统不同,智能电网环境下的家庭能源管理系统不仅要单个家庭环境内的用能进行优化、管理,而且多个家庭还要协同工

作,因此,智能电网环境下的家庭能源管理系统需要家域网(Home Area Network)、小区网络(Neighborhood Area Network)和广域网(Wide Area Network)三种网络的支持。每个家庭能源管理系统含有一个智能电表,它是家域网与外部网络进行信息交换的接口。同一区域的众多智能电表构成小区网络,来自各个智能电表的数据在小区网络数据聚合中心进行聚合,再通过广域网送到电力公司用于实现用能计量、负载预测等功能;电力公司发布的需求响应控制命令、电价等信息沿相反的路径传输。三种网络之间的关系如图4所示^[38]。目前,可用于组建家域网的通信网络技术如表1所示^[39]。

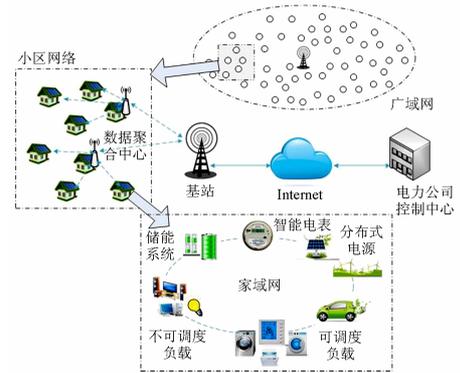


图4 家庭能源管理系统相关网络

Fig. 4 Networks related to home energy management system

由于用户移动、增减用电负载等操作会造成网络拓扑结构频繁改变,因此不适于采用有线方式组建家庭能源管理系统通信网络。无线通信技术是当前组建家庭能源管理系统家域网的主流技术,其中 ZigBee 技术由于具有低功耗、自组织、拓扑结构灵活、低成本等优点,是家庭能源管理系统家域网最常用的通信方式。

表1 家域网通信网络技术

Table 1 Communication and networking technologies for home area networks

连接方式	技术标准	最大速率	通信范围	采用率
有线	HomePlug(IEEE P1901)	14~200 Mbps	300 m	中等
	Ethernet(IEEE 802.3)	10~1 000 Mbps	100 m	高
	X10(X10 标准)	50~60 kbps	300 m	中等
	Insteon(Insteon 标准)	1.2 kbps	3 000 m	中等
无线	Z-Wave(Zensys, IEEE 802.15.4)	40 kbps	30 m	高
	WiFi(IEEE 802.11, IEEE 802.15.4)	11~300 Mbps	100 m	高
	6LowPAN(IEEE 802.15.4)	250 kbps(2.4 GHz)	10~75 m	中等
		40 kbps(915 MHz)		
		20 kbps(868 MHz)		
		250 kbps(2.4 GHz)		
ZigBee(IEEE 802.15.4)	40 kbps(915 MHz)	10~75 m	非常高	

家庭环境内含有大量种类多样的设备, 由不同的制造商生产, 采用不同的通信标准, 尽管 ZigBee 技术在该领域得到了广泛应用, 但尚未形成家庭能源管理系统家域网的统一通信标准。这增加了系统集成的难度。

另外, 目前家庭环境内的大部分用电设备检测、通信功能有限, 需要外置的检测、通信模块来检测自身用能情况和组成网络, 这种方式使家庭能源管理系统实施难度大、成本高、不易被用户接受。

互操作研究仍是家庭能源管理系统家域网领域研究的热点。通过和智能家电制造商联合制定家庭能源管理系统的标准, 未来的智能家电自身含有能量检测和通信组网能力, 来自不同制造商的智能家电能够按照同一标准自动组网, 自我报告自身用能情况。这种标准的制定有利于解决目前家庭能源管理系统存在的能量检测精度低、设备互操作难的问题, 降低家庭能源管理系统的实现成本, 提高用户接受度。

网络安全问题是智能电网环境下家庭能源管理系统网络通信领域另外一个研究热点。在智能电网环境下, 用户通过 Internet 和移动网络可以对家庭环境内的设备进行监控, 同时家庭能源管理系统采集大量的用户用电数据。非法用户可以通过用户用电数据的分析推断出用户的生活习惯, 造成用户隐私泄露; 非法的网络入侵会威胁到系统的安全运行, 造成用户的经济损失。因此, 研究相应的网络安全技术对于保障家庭能源管理系统的安全运行和用户隐私及经济利益具有重要的意义^[40-42]。

但家庭能源管理系统中的设备存在资源受限、计算能力弱的特点, 比如, 智能洗衣机的控制器是典型的中低端嵌入式微处理器, 其计算能力有限。并且家庭能源管理系统网络中涉及控制的信息传输要满足硬实时性的要求。所以传统的 Internet 网络安全技术不能满足系统需求, 因此计算资源受限情况下满足实时性要求的网络安全技术是未来的研究重点。

另外, 家庭能源管理系统采集大量的用户用电数据, 内含用户隐私, 如何在满足电力公司正常需求的前提下尽量保护用户隐私也是值得研究的方向之一。

3.3 家庭能源管理系统的优化调度算法

对家庭环境内的用电设备进行调度减少设备的空闲损耗、提高用电效率是传统家庭能源管理系统的主要调度目的。智能电网环境下家庭能源管理系统实现功能的多样性、可再生能源出力的不确定性、动态电价、能量流动的复杂性等因素都增大了优化

调度的难度。图 5 所示是智能电网环境下家庭能源管理系统中的能量流图, 箭头表示能量流动的方向, 箭头上的符号表示功率的大小。

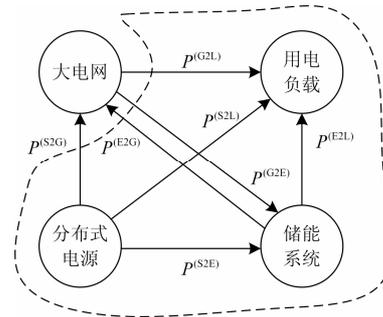


图 5 智能电网环境下家庭能源管理系统能量流图
Fig. 5 Energy flow of home energy management system in smart grid

虚线框内的部分为单个家庭用户拥有, 它和大电网之间存在双向的能量流动关系: 家庭用户可以从大电网购买电能供用电负载消耗, 或由存储系统储存, 并为此支付相应费用; 在动态电价机制下, 购买电能时段的选择直接影响到用户支付费用的多少。用户也可以将分布式电源产生的多余电能和储能系统储存的电能出售给电网来获得相应的收益, 并且售电时段的选择也与其收益大小密切相关。在一段时间内用户需要支付的总用电费用由式 (1) 表示。

$$C_{\text{total}} = C_{\text{G2H}} - C_{\text{H2G}} \quad (1)$$

其中: C_{G2H} 表示用户从电网购买电能支付的费用; C_{H2G} 表示用户向电网出售电能获得的收益。

分布式电源产生的电能可以供给用电负载消耗、储能系统存储和售给大电网, 在一特定的时刻, 不同的选择会对用户的用能费用产生不同的影响。同样, 储能系统能量存储、释放策略的选择也影响着用户的用能费用。因此, 对虚线框内用户拥有的部件进行控制, 实现对图 5 所示各组成部分之间的能量流动方向和大小进行优化调度对降低用户总用能费用具有重要的意义。

光伏发电和风力发电的功率输出不稳定, 根据它们的出力预测对可调度用电负载和储能系统的运行进行调度, 能够提高可再生能源的利用率^[43]。此外, 需求响应的实施和大规模电动汽车的安全接入电网都需要优化调度算法的支持, 因此优化调度问题是智能电网环境下家庭能源管理系统的核心问题。

根据优化调度的目的不同,当前的优化调度算法主要分为以下三类:总用电功耗小于目标值的调度算法、最大化可再生能源利用率的调度算法、最小化用户用能费用的调度算法。

1) 总用电功耗小于目标值的调度算法。在居民侧实施需求响应除了利用动态电价信号通过经济刺激方法引导用户改变用电模式外,电力公司还可以根据当前的电力供应情况,直接向用户发布需求响应控制信号,向用户指定需求响应的持续时段和在此期间该用户的家庭用电上限,电力公司根据事先与用户签订的协议为用户支付相应的经济补偿。用户收到需求响应控制信号后,通过家庭能源管理系统中的优化调度模块对家庭环境内的用电设备进行调度,确保满足需求响应控制信号的要求,必要时可以牺牲用户的部分舒适度^[44]。

优化调度算法不仅要考虑可调度负载对家庭总用电量的影响,还要考虑不可调度负载及可再生能源出力不确定性对调度结果的影响^[45]。

2) 最大化可再生能源利用率的调度算法。光伏发电和风力发电的出力不确定性不利于它们大规模接入电网,限制了它们的利用率,通过大容量的储能系统可以削弱出力波动,提高可再生能源的利用率,但该方法成本高,不便推广。同时光伏发电、风力发电的出力波动大,储能系统的容量不易确定,储能系统的利用效率低。家庭能源管理系统通过对用电负载和储能系统的调度,优先消纳本地光伏发电、风力发电等可再生能源产生的电能,有利于提高可再生能源的利用率^[43],降低可再生能源出力波动对电网的不利影响。

家庭能源管理系统可以根据天气预报网站分小时发布的天气预报信息对可再生能源的出力进行预测,然后根据电价的预测结果和用电负载的优先级对用电设备进行调度,从而最大化可再生能源的利用率,并最小化用户用能费用^[46-47]。

将电动汽车的充/放电与可再生能源发电预测相结合,建立一个同时计及具有 V2G 功能的电动汽车、风电和光伏发电系统出力不确定性的电力系统协同调度模型,可平抑可再生能源的出力波动,改善电力系统运行的经济性,提高可再生能源的利用率^[48]。

3) 最小化用户用能费用的优化调度算法。在智能电网环境下,家庭能源管理系统除了降低负载的空闲损耗来降低用电费用外,可以采取多种方法来降低用户用电费用:响应电价信号,将部分负载从“高电价时段”调度到“低电价时段”;根据可再生能源发电的出力状况协同控制用电设备增加低成本

可再生能源的利用量,减少从电网购买的电能;将可再生能源产生的多余电量售给电网;利用储能系统在低电价时存储电能,在高电价时供给用电负载或售给电网获取经济效益等。这种算法是目前最常见的优化调度算法,可表示为如式(2)所示的约束优化问题。

$$\begin{aligned} \min C_{\text{total}} \\ \text{s.t. } h_i(x) = 0, \quad i = 1, \dots, m \\ g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, \dots, l \end{aligned} \quad (2)$$

式(2)中的等式、不等式表达式表示由设备工作特性、用户设置、设备工作环境等因素引入的约束条件。比如为了保证储能系统的安全运行,图5中储能系统的充电功率不能大于其最大充电功率上限 $P^{(E),c \max}$,可由式(3)表示。

$$P^{(S2E)}(i) + P^{(G2E)}(i) \leq P^{(E),c \max} \quad (3)$$

不同的调度算法考虑的对象范围不同,HVAC系统用电占整个家庭电能消耗的22.3%^[49],提高HVAC系统的效率是实现节能减排、用户侧需求响应的重要手段^[50],对降低用户用电费用具有重要意义。因此,HVAC系统的优化调度算法是该领域当前的研究重点之一。根据动态变化的电价和室外温度的变化对未来时段HVAC系统的温度设定进行优化调度,能够在保证用户舒适度的条件下降低用户用能费用^[51-53]。检测室内人员活动信息,分析用户行为模式,有针对性地对HVAC系统的运行进行优化调度也可以提高使用HVAC系统的效率,降低用户用能费用^[54]。利用房屋具有的储能特性,根据可再生能源的出力状况对HVAC系统进行控制,通过提高可再生能源的利用率来降低用户用能费用。

家庭用户不仅关心HVAC系统的用能费用,更关心整个家庭环境内的总用能费用,因此优化调度算法还要考虑其他用电负载、储能系统和分布式电源对优化调度结果的影响。对家庭环境内的分布式能源资源和储能系统进行优化调度,也可以降低用户的用能费用^[55-56]。与只考虑用电负载、储能系统、分布式能源中的某一类或几类的优化调度算法相比,在统一的框架下综合考虑用电负载、储能系统和分布式电源的优化调度模型和算法能够获得更优的结果^[57-58]。

在实际应用中,并非所有用户都同时拥有用电负载、储能系统、分布式能源和向电网出售电能的能力,但研究表明用户拥有储能系统、分布式电源和向电网出售电能的能力有助于降低用户的用能费用^[57]。

T.Hurbet 和 S.Grijalva 在优化调度算法仅考虑用电负载的基础上, 依次加入储能系统、用户向电网售电能力、光伏发电系统和发电机组, 每种情况下都用三种不同的算法对系统进行优化调度, 相应的用户用能费用如表 2^[57]所示。从表 2 可见每种优化调度算法下用户用能费用都随着新设备和用户向电网售电能力的加入而减少。

表 2 不同场景下用能费用对比^[57]

Table 2 Electricity usage cost comparison among different scenarios

	实时电价下	日前电价下	考虑不确定性
	的算法	的算法	的鲁棒算法
仅对负载调度	18.29	14.86	13.11
加入储能系统	16.67	13.61	10.39
加入售电能力	16.79	13.28	10.18
加入光伏发电	7.38	6.98	4.55
加入发电机组	5.02	6.82	4.40

智能电网环境下家庭能源管理系统的优化调度算法除了以上三类主要算法之外, 一些研究人员提出了通过对一定数量的 HVAC 系统、热水器、电动汽车进行协同调度控制, 为电力系统的运行提供调频、调峰等服务的算法^[59-60]。

研究表明用户的用能费用与用电负载、储能系统、分布式电源和向电网出售电能等因素均有关系, 但在统一的优化框架下综合考虑这些因素的研究目前较少。另外, 已有的调度算法对可再生能源出力预测、负载预测、电价预测、用户用能不确定性和环境因素(比如室外环境温度)等不确定性因素对优化调度结果的影响研究不足。因此, 在不确定性环境下基于统一优化框架综合考虑各种因素的调度算法是该领域未来的研究方向之一。

4 结语

在智能电网环境下, 居民用户拥有用电负载、储能系统、分布式电源等设备, 家庭环境内的用电网络已经构成一个家域微电网。家庭能源管理系统为节能减排、提高用电效率及智能电网环境下的居民侧需求响应实施、分布式电源和电动汽车接入网络提供支持。研究人员在家庭能源管理系统结构、检测技术、网络通信技术、优化调度算法等领域进行了深入研究, 但仍存在一些挑战尚未解决。对智能电网环境下家庭能源管理系统的研究有助于智能电网技术在居民侧的实施, 能够促进智能电网技术的健康发展。

参考文献

- [1] ALAHMAD M A, WHEELER P G, SCHWER A, et al. A comparative study of three feedback devices for residential real-time energy monitoring[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2012, 59(4): 2002-2013.
- [2] HAZAS M, FRIDAY A, SCOTT J. Look back before leaping forward: four decades of domestic energy inquiry[J]. IEEE Pervasive Computing, 2011, 10(1): 13-19.
- [3] FARHANGI H. The path of the smart grid[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2010, 8(1): 18-28.
- [4] MASSOUD A S, WOLLENBERG B F. Toward a smart grid: power delivery for the 21st century[J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2005, 3(5): 34-41.
- [5] 王增平, 姜宪国, 张执超, 等. 智能电网环境下的继电保护[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 13-18. WANG Zeng-ping, JIANG Xian-guo, ZHANG Zhi-chao, et al. Relay protection for smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 13-18.
- [6] 颜伟, 文旭, 余娟, 等. 智能电网环境下电力市场面临的机遇与挑战[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(24): 224-230. YAN Wei, WEN Xu, YU Juan, et al. Opportunities and challenges faced by electricity market in smart grid[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(24): 224-230.
- [7] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网述评[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(34): 1-8. YU Yi-xin, LUAN Wen-peng. Smart grid and its implementations[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(34): 1-8.
- [8] OZTURK Y, SENTHILKUMAR D, KUMAR S, et al. An intelligent home energy management system to improve demand response[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2013, 4(2): 694-701.
- [9] 余贻鑫, 栾文鹏. 智能电网[J]. 电网与清洁能源, 2009, 25(1): 7-11. YU Yi-xin, LUAN Wen-peng. Smart grid[J]. Power System and Clean Energy, 2009, 25(1): 7-11.
- [10] 丁明, 陈忠, 苏建徽, 等. 可再生能源发电中的电池储能系统综述[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(1): 19-25, 102. DING Ming, CHEN Zhong, SU Jian-hui, et al. An overview of battery energy storage system for

- renewable energy generation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 19-25, 102.
- [11] 张丽英, 叶廷路, 辛耀中, 等. 大规模风电接入电网的相关问题及措施[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(25): 1-9.
ZHANG Li-ying, YE Ting-lu, XIN Yao-zhong, et al. Problems and measures of power grid accommodating large scale wind power[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(25): 1-9.
- [12] 陈炜, 艾欣, 吴涛, 等. 光伏并网发电系统对电网的影响研究综述[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(2): 26-32, 39.
CHEN Wei, AI Xin, WU Tao, et al. Influence of grid-connected photovoltaic system on power network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(2): 26-32, 39.
- [13] SU W, EICHI H, ZENG W, et al. A survey on the electrification of transportation in a smart grid environment[J]. IEEE Trans on Industrial Informatics, 2012, 8(1): 1-10.
- [14] VICINI R, MICHELOUD O, KUMAR H, et al. Transformer and home energy management systems to lessen electrical vehicle impact on the grid[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2012, 6(12):1202-1208.
- [15] 曾正, 赵荣祥, 杨欢, 等. 电动汽车高渗透率的应对策略及换电站的最优规划[J]. 电力自动化设备, 2012, 32(9): 7-13.
ZENG Zheng, ZHAO Rong-xiang, YANG Huan, et al. Responsive schemes to high penetration of electric vehicles and optimal planning of battery swap stations[J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(9): 7-13.
- [16] 刘晓飞, 张千帆, 崔淑梅. 电动汽车 V2G 技术综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(2): 121-127.
LIU Xiao-fei, ZHANG Qian-fan, CUI Shu-mei. Review of electric vehicle V2G technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(2): 121-127.
- [17] 胡泽春, 宋永华, 徐智威, 等. 电动汽车接入电网的影响与利用 [J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(4): 1-10, 25.
HU Ze-chun, SONG Yong-hua, XU Zhi-wei, et al. Impacts and utilization of electric vehicles integration into power systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(4): 1-10, 25.
- [18] 黄媛, 刘俊勇, 陈井锐, 等. 计及电动汽车入网的负
荷频率控制[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 24-28.
HUANG Yuan, LIU Jun-yong, CHEN Jing-rui, et al. Load frequency control considering vehicle to grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(9): 24-28.
- [19] 杨冰, 王丽芳, 廖承林. 大规模电动汽车充电需求及影响因素[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 22-27, 35.
YANG Bing, WANG Li-fang, LIAO Cheng-lin. Research on power-charging demand of large-scale electric vehicles and its impacting factors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 22-27, 35.
- [20] SUNDRAMOORTHY V, COOPER G, LINGE N, et al. Domesticating energy-monitoring systems: challenges and design concerns[J]. IEEE Pervasive Computing, 2011, 10(1): 20-27.
- [21] 孟洋洋, 卢继平, 王坚, 等. 基于 Volterra 自适应滤波器的风电功率混沌预测[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 90-95.
MENG Yang-yang, LU Ji-ping, WANG Jian, et al. Wind power chaos prediction based on Volterra adaptive filter[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 90-95.
- [22] 陈昌松, 段善旭, 蔡涛, 等. 基于模糊识别的光伏发电短期预测系统[J]. 电工技术学报, 2011, 26(7): 83-89.
CHEN Chang-song, DUAN Shan-xu, CAI Tao, et al. Short-term photovoltaic generation forecasting system based on fuzzy recognition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(7): 83-89.
- [23] 丁明, 王磊, 毕锐. 基于改进 BP 神经网络的光伏发电系统输出功率短期预测模型[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 93-99, 148.
DING Ming, WANG Lei, BI Rui. A short-term prediction model to forecast output power of photovoltaic system based on improved BP neural network[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 93-99, 148.
- [24] HALILCEVIC S S, GUBINA A F. The short term electricity prices forecasting using Markov chains[C] // Energy Market (EEM), 2011 8th International Conference on the European, IEEE, 2011: 198-203.
- [25] 孙志刚, 翟玮星, 李伟伦, 等. 基于 EMD 和相关向量机的短期负荷预测[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(1): 92-97.
SUN Zhi-gang, ZHAI Wei-xing, LI Wei-lun, et al.

- Short-term load forecasting based on EMD and RVM[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(1): 92-97.
- [26] 黎祚, 周步祥, 林楠. 基于模糊聚类与改进 BP 算法的日负荷特性曲线分类与短期负荷预测[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(3): 56-60.
- LI Zuo, ZHOU Bu-xiang, LIN Nan. Classification of daily load characteristics curve and forecasting of short-term load based on fuzzy clustering and improved BP algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(3): 56-60.
- [27] WANG Z, ZHENG G. Residential appliances identification and monitoring by a nonintrusive method[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(1): 80-92.
- [28] MING D, MEIRA P C M, WILSON X, et al. An event window based load monitoring technique for smart meters[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(2): 787-796.
- [29] FAN Y C, LIU X, LEE W C, et al. Efficient time series disaggregation for non-intrusive appliance load monitoring[C] // 9th International Conference on Ubiquitous Intelligence & Computing and 9th International Conference on Autonomic & Trusted Computing (UIC/ATC), 2012: 248-255.
- [30] ZEIFMAN M. Disaggregation of home energy display data using probabilistic approach[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 2012, 58(1): 23-31.
- [31] SUZUKI K, INAGAKI S, SUZUKI T, et al. Nonintrusive appliance load monitoring based on integer programming[C] // SICE Annual Conference, 2008. IEEE, 2008: 2742-2747.
- [32] GAO Y, YANG H. Non-intrusive load identification by fuzzy cluster analysis based on active power[C] // Power and Energy Engineering Conference (APPEEC), 2012 Asia-Pacific, IEEE, 2012: 1-4.
- [33] CHANG H H, CHEN K L, TSAI Y P, et al. A new measurement method for power signatures of nonintrusive demand monitoring and load identification[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2012, 48(2): 764-771.
- [34] TSAI M S, LIN Y H. Development of a non-intrusive monitoring technique for appliance identification in electricity energy management[C] // Advanced Power System Automation and Protection (APAP), 2011 International Conference on, IEEE, 2011, 1: 108-113.
- [35] SRIVASTAVA M. From measurements to sustainable choices [Perspectives][J]. Design & Test of Computers, IEEE, 2012, 29(4): 58-60.
- [36] MRAZOVAC B, BJELICA M Z, KUKOLJ D, et al. A human detection method for residential smart energy systems based on Zigbee RSSI changes[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 2012, 58(1): 819-824.
- [37] CHEN L, NUGENT C D, WANG H. A knowledge-driven approach to activity recognition in smart homes[J]. IEEE Trans on Knowledge and Data Engineering, 2012, 24(6): 961-974.
- [38] NIYATO D, LU X, PING W. Machine-to-machine communications for home energy management system in smart grid[J]. IEEE Communications Magazine, 2011, 49(4): 53-59.
- [39] KAILAS A, CECCHI V, MUKHERJEE A. A survey of communications and networking technologies for energy management in buildings and home automation[J]. Journal of Computer Networks and Communications, 2012.
- [40] LISOVICH M A, MULLIGAN D K, WICKER S B. Inferring personal information from demand-response systems[J]. IEEE Security & Privacy, 2010, 8(1): 11-20.
- [41] MARMOL F G, SORGE C, UGUS O, et al. Do not snoop my habits: preserving privacy in the smart grid[J]. IEEE Communications Magazine, 2012, 50(5): 166-172.
- [42] KALOGRIDIS G, CEPEDA R, DENIC S Z, et al. ElecPrivacy: evaluating the privacy protection of electricity management algorithms[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2011, 2(4): 750-758.
- [43] BYUN J, HONG I, PARK S. Intelligent cloud home energy management system using household appliance priority based scheduling based on prediction of renewable energy capability[J]. IEEE Trans on Consumer Electronics, 2012, 58(4): 1194-1201.
- [44] PIPATTANASOMPORN M, KUZLU M, RAHMAN S. An algorithm for intelligent home energy management and demand response analysis[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(4): 2166-2173.
- [45] CHEN C, NAGANANDA K G, XIONG G, et al. A communication-based appliance scheduling scheme for consumer-premise energy management systems[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2013, 4(1): 56-65.
- [46] ABDUL S S, MAHMUD S A, KHAN G M, et al. M2M communication in smart grids: implementation scenarios and performance analysis[C] // Wireless

- Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW), 2012 IEEE. IEEE, 2012: 142-147.
- [47] MATALLANAS E, CASTILLO-CAGIGAL M, GUTIERREZ A, et al. Neural network controller for active demand-side management with PV energy in the residential sector[J]. Applied Energy, 2012, 91(1): 90-97.
- [48] 王贵斌, 赵俊华, 文福拴, 等. 配电系统中电动汽车与可再生能源的随机协同调度[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(19): 22-29.
WANG Gui-bin, ZHAO Jun-hua, WEN Fu-shuan, et al. Stochastic optimization dispatching of plug-in hybrid electric vehicles in coordination with renewable generation in distribution systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 22-29.
- [49] CHEN Y W, CHEN X, MAXEMCHUK N. The fair allocation of power to air conditioners on a smart grid[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(4): 2188-2195.
- [50] ASWANI A, MASTER N, TANEJA J, et al. Reducing transient and steady state electricity consumption in HVAC using learning-based model-predictive control[J]. Proceedings of the IEEE, 2012, 100(1): 240-253.
- [51] HONG Y Y, LIN J K, WU C P, et al. Multi-objective air-conditioning control considering fuzzy parameters using immune clonal selection programming[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(4): 1603-1610.
- [52] MOLINA D, LU C, SHERMAN V, et al. Model predictive and genetic algorithm-based optimization of residential temperature control in the presence of time-varying electricity prices[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2013, 49(3): 1137-1145.
- [53] THOMAS A G, JAHANGIRI P, WU D, et al. Intelligent residential air-conditioning system with smart-grid functionality[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(4): 2240-2251.
- [54] WHITEHOUSE K, RANJAN J, LU J, et al. Towards occupancy-driven heating and cooling[J]. IEEE Design & Test of Computers, 2012, 29(4): 17-25.
- [55] ARABALI A, GHOFrani M, ETEZADI-AMOLI M, et al. Genetic-algorithm-based optimization approach for energy management[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2013, 28(1): 162-170.
- [56] PEDRASA M A A, SPOONER T D, MACGILL I F. Coordinated scheduling of residential distributed energy resources to optimize smart home energy services[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2010, 1(2): 134-143.
- [57] HUBERT T, GRIJALVA S. Modeling for residential electricity optimization in dynamic pricing environments[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(4): 2224-2231.
- [58] HUBERT T, GRIJALVA S. Realizing smart grid benefits requires energy optimization algorithms at residential level[C] // Innovative Smart Grid Technologies (ISGT), 2011 IEEE PES. IEEE, 2011: 1-8.
- [59] KONDOH J, LU N, HAMMERSTROM D J. An evaluation of the water heater load potential for providing regulation service[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2011, 26(3): 1309-1316.
- [60] LU N. An evaluation of the hvac load potential for providing load balancing service[J]. IEEE Trans on Smart Grid, 2012, 3(3): 1263-1270.

收稿日期: 2013-12-10

作者简介:

张延宇 (1980-), 男, 博士研究生, 讲师, 研究方向为智能电网、需求响应、智能计算; E-mail: zyy@henu.edu.cn

曾鹏 (1976-), 男, 博士, 研究员, 博士生导师, 研究方向为智能电网、工业无线网络等;

臧传治 (1977-), 男, 博士, 副研究员, 研究方向为智能电网、工业无线网络等。