

基于分布式光伏电站和储能系统的 家庭能效管理策略研究

高琳¹,王志新¹,邹建龙²,史莉³

(1. 上海交通大学 电气工程系,上海 200240;2. 嘉兴清源电气科技有限公司,浙江 嘉兴 314031;
3. 上海纳杰电气成套有限公司,上海 200900)

Research on home energy efficiency management strategy based on distributed photovoltaic power station and energy storage system

GAO Lin¹, WANG Zhi-xin¹, ZOU Jian-long², SHI Li³

(1 Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China;
2 Jiaxing Qingyuan Electrical Technology Co., Ltd., Jiaxing 314031, China;
3 Shanghai Najie Electric Unit Ltd., Shanghai 200900, China)

摘要:设计了一种基于ZigBee技术的智能家居系统,该系统由家庭网络、家庭服务器和手机终端构成,简单有效且可扩展性良好。研究了基于分布式光伏电站和储能系统的家庭能效管理系统,通过建立家庭用电总费用最低的目标函数,结合分时电价给出了家庭能效管理的控制策略。通过决策储能电池的充放电功率以及可平移负荷的工作时间,实现对家庭负荷的优化利用,提高运行经济性,达到经济效益最大化,也能起到削峰填谷的作用。最后,结合某家庭用户家用电器设备进行仿真测试,结果表明该能效管理算法能有效节省家庭用电总费用,证明算法的有效性和可行性。

关键词:智能家居;能效管理;分布式光伏电站;蓄电池;可平移负荷

Abstract: In this paper, a smart home system based on ZigBee technology is designed. The system includes home network, home server and mobile terminal. The program is simple, effective and scalable. This paper studies the home efficiency management system based on distributed photovoltaic power station and energy storage system. Through the establishment of the objective function of minimizing the household electricity cost, the control strategy of home efficiency management is given, based on time-of-use electricity price. By deciding the charge and discharge power of energy storage battery and working time of shiftable loads, the optimal utilization of home loads can be realized, in order to improve operation economy and maximize economic benefits. It can also play the role of peak load shifting. Finally, combined with home appliances of a home user, the proposed algorithm is tested. The simulation results show that the algorithm can effectively save the household electricity cost, and demonstrate that the algorithm is effective and feasible.

Key words: smart home; energy efficiency management; distributed photovoltaic power station; power storage battery; shifting load

中图分类号:TM714;TK018 文献标志码:B

作为智能电网的重要领域,分布式光伏发电具有清洁高效、布局分散灵活、对电网起到削峰填谷的作用等优点,对优化大电网能源结构、实现国家经济可持续发展具有重要意义。发展可再生能源是对现在火电为主的能源结构的补充和改善,受到政府大力的推广和社会广泛的关注,因此分布式光伏发电在居民侧的应用得到快速的发展。随着安装户用分布式光伏并网发电系统的用户增多,对户

收稿日期:2016-09-19

基金项目:国家863计划(2014AA052005);国家自然科学基金(51377105);上海市教育发展基金项目(2015LM11);上海市闵行区重大产业技术攻关计划资助(2015MH103)

作者简介:高琳(1992),女,江苏无锡人,硕士研究生,研究方向为分布式光伏发电;王志新(1964),男,贵州遵义人,博士生导师,教授,研究方向为智能配电技术、分布式发电及风电并网控制、电机控制与系统节能。

用分布式光伏发电以及家庭用电进行控制管理、信息采集和能量优化具有重要意义。因此,如何结合分布式光伏电站和储能系统使家庭用电更安全高效、智能合理,提高家庭用电效益,缩短分布式光伏系统成本回收周期等问题成了该领域的研究热点。

智能电网与分布式电源的结合,催生了家庭能效管理概念的提出和发展。结合分时电价、光伏出力情况和家庭负荷运行特性,根据家庭能效管理策略对家庭负荷用电进行合理调度,同时对分布式光伏电站与储能系统进行协调控制,可以实现对家庭负荷的优化利用,提高家庭用电经济性。同时能对电网起到削峰填谷的作用,增强电网运行的稳定性。

1 基于 ZigBee 的智能家居系统

随着计算机技术、信息控制技术的不断发展,智能化家居得到快速发展。智能家居不仅具有传统的居住功能,还让用户能够用更方便的手段来管理家庭设备,在家庭外部也能对家庭内部进行远程监控,帮助用户进行家庭能效管理,生活质量得到极大的提高^[1]。

本文设计了一个基于 ZigBee 技术的智能家居系统,主要由家庭网络、家庭服务器和手机终端3部分构成。该系统简单有效且可扩展性良好。智能家居系统结构如图1所示。

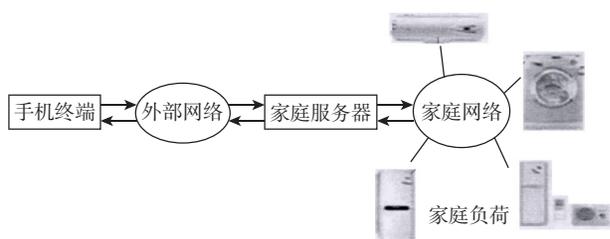


图1 智能家居系统结构

1.1 家庭网络

家庭网络是智能家居系统中重要的结构基础,它将各种可控的家庭负荷作为节点组网,在家庭内部实现数据的传输,可以实现多种能源管理功能^[2]。家庭网络可采用有线和无线2种通信方式,相比于传统有线方案,无线网络的安装维护更为简便可靠,同时增强了系统的可扩展性。与其他的短距离无线技术相比,ZigBee 无线网络是组建家庭网络的首选方案^[3]。ZigBee 技术作为一种基于 IEEE 802.15.4 标准的双向无线网络技术,它的突出特点有低成本、低功耗、近距离、低复杂度以及高安全等^[4]。支持 ZigBee 技术的芯片价格也很便宜,这可以大大降低智能家居系统的成本。

因此本系统中的家庭网络使用 ZigBee 无线网络,主要由 ZigBee 协调器和多个终端节点构成。ZigBee 协调器负责整个 ZigBee 无线网络的建立和管理,它的通信距离可以覆盖正常的家庭居住环境,所以采用星型网络拓扑结构,所有终端节点均可与协调器直接通信。目前系统的 ZigBee 协调器采用 CC2530 单片机^[5],并采用 IAR embedded workbench 来编译程序。

ZigBee 终端节点分别位于室内不同位置,与电能计量模块连接,用于采集负荷电能信息,同时与开关继电器模块连接,通过触发继电器执行协调器发来的控制命令,它们集合成了智能插座。家庭负荷通过智能插座连接电源,智能插座可以实现对负荷的开关控制以及对负荷电能信息的采集。

1.2 家庭服务器

家庭服务器是整个系统的后台数据管理核心。家庭服务器可以查询各负荷运行状况、远程控制负荷开关,并且负责存储各用电负荷电能信息。本系统中,家庭服务器和 ZigBee 协调器共同构成了家庭网关,负责连接外部网络和内部网络。家庭服务器与协调器通过串口进行通信,通过 ZigBee 协调器获得终端节点采集的电能数据,并将控制命令通过协调器发送给终端节点。同时家庭服务器通过外部网络与手机终端连接,通过 Socket 通信与手机终端传输数据。

家庭服务器也是智能家居系统的控制中心,对家庭负荷和户用分布式能源进行统一监控管理。家庭服务器实时获取家庭能耗状态,通过对采集到的负荷用电信息、光伏出力数据的分析处理,进行家庭用电调度,实现家庭能效管理。

1.3 手机终端

手机终端为用户提供远程操作平台,以实现对整个系统的远程监控。手机客户端基于安卓系统开发,在 Eclipse 软件环境下,采用 Java 语言进行编写。手机终端通过移动数据网络或 WIFI 网络连接家庭服务器,接收家庭服务器发出的用电信息并在界面显示,同时手机终端把控制命令发送到家庭服务器,由家庭服务器完成对负荷的控制。用户通过在手机客户端进行操作,就可以直接查看各负荷用电情况以及运行状态,并直接控制负荷的开断,另外,用户还可以在手机客户端进行设置,让负荷在指定时间段内开启或关闭。

2 家庭能效管理系统

本文将智能家居系统和户用分布式光伏电站与储能系统相结合,在家庭服务器中加入家庭能效管理策略,实现家庭能效管理。家庭能效管理系统根据峰谷分时电价和光伏出力情况,以及对负荷用电信息的分析处理,通过分析建模找到最优的家庭用电方案。根据最优用电方案,系统通过对光伏电站和储能电池充放电的协调控制,以及对家庭负荷的用电调度,实现对家庭负荷的优化利用,提高运行经济性,达到经济效益最大化。家庭能效管理系统结构如图2所示。

家庭能效管理系统主要包含光伏阵列、蓄电池、逆变器、家庭服务器以及家庭负荷等部分。家庭服务器能与逆变器、智能插座进行通信,并可以进行实时控制。

光伏阵列由多块太阳能电池板组成,光伏阵列接受日照后发出直流电能,通过逆变器实现最大功率点跟踪控制,实时的功率输出信息会传送到家庭

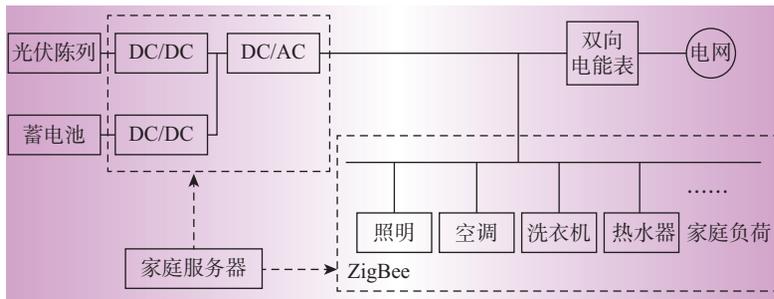


图2 家庭能效管理系统结构

服务器。光伏电池板和储能蓄电池接入家庭供电入口,并与电网相连。户用分布式光伏发电系统既可以为家庭负荷供电,又可以把多余电量输送到配电网。储能蓄电池负责储存电能,并在光伏发电量不足时向负荷供电。电网与家庭存在双向电能交换,需安装双向计量电能表对电网与家庭之间的功率交换进行双向计量^[6]。

对于普通家庭用户,可以认为在一定时期内家庭负荷的用电时间相对固定。用户负荷按其可调度性大致可分为3类,包括重要负荷、可调整负荷、可平移负荷^[7-8]。重要负荷是指必须在特定的时间段内供电的负荷,如:照明、冰箱等;可调整负荷是指需求量在一定范围内可变的负荷,如:暖气、空调等;可平移负荷是指负荷供电时间可按计划变动的负荷,如:洗衣机、消毒柜、热水器等。家庭负荷中存在着一定的可平移负荷。家庭服务器通过与智能插座的通信与控制,实现对负荷的平移。因此在峰谷分时电价条件下,家庭能效管理系统可以对可平移负荷的开始运行时间进行合理调度,有利于提高运行经济性^[9-10]。同时有助于实现社会范围的削峰填谷作用,增强电网运行的稳定性。

3 家庭能效管理数学模型及控制策略

3.1 家庭能效管理数学模型

为了实现有效的家庭能效管理,需要建立家庭用电总费用的数学模型。本文以一天为1个周期进行家庭能效管理,将一天24 h平均分为 n 个时间段,将连续性问题离散化,当 n 足够大时,每个时间段足够小,可以认为各个变量值在每个时间段内保持不变。

在 t 时间段内,通过家庭负荷用电功率、光伏发电功率、蓄电池发出功率和家庭从电网吸收功率的关系,可以得到系统内的功率平衡方程为

$$P_G^t = P_A^t - P_{PV}^t - P_b^t \quad (1)$$

式中: P_G^t 为 t 时段内家庭从电网吸收的功率,当家庭从电网吸收电量时 P_G^t 为正,当家庭将多余电量输送到电网时 P_G^t 为负; P_A^t 为 t 时段内所有家庭负荷的总功率; P_b^t 表示 t 时段内蓄电池放电功率,当蓄电池放电时 P_b^t 为正,当蓄电池充电时 P_b^t 为负;

P_{PV}^t 为 t 时段内光伏输出功率。光伏输出功率受到太阳辐照度、环境温度、湿度等诸多因素的影响,可以通过光伏发电功率预测得到当日的光伏输出功率预测数据^[11-12]。

家庭光伏并网发电系统采用“自发自用,余电上网”运行模式,余电上网可以获得售电收益,另外光伏发电还可获得光伏补贴。因此家庭用电总费用表示为电网用电费用减去余电上网的收益,再减去光伏补贴。

目前有很多地区实行峰谷电价制度,在用电高峰时段电价较高,在低谷时段则较低。结合分时电价,一天 n 个时间段内家庭用电总费用为

$$C = \sum_{i=1}^n \left(f^i P_G^i \frac{24}{n} - f_{PV} P_{PV}^i \frac{24}{n} \right) \quad (2)$$

$$= \sum_{i=1}^n \left[f^i (P_A^i - P_{PV}^i - P_b^i) \frac{24}{n} - f_{PV} P_{PV}^i \frac{24}{n} \right]$$

式中: C 为一天内家庭用电总费用; f_{PV} 为光伏发电补贴单价; $\frac{24}{n}$ 为1个时间段的时间。

式(2)中 f^i 的表达式为

$$f^i = \begin{cases} f_G^i, & P_G^i > 0 \\ f_R, & P_G^i < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: f_G^i 为 t 时段内用户用电电价,根据时间段的不同分为峰时电价和谷时电价; f_R 为余电上网电价。一天中任何时刻的 f_G^i 、 f_R 和 f_{PV} 均为已知值。

家庭负荷的总功率 P_A^t 等于 t 时段内所有可平移负荷和其它负荷的功率之和

$$P_A^t = P_{L,i}^t + P_{else}^t = \sum_{i=1}^m P_{L,i}^t + \sum_{j=1}^l P_{else,j}^t \quad (4)$$

式中: $P_{L,i}^t$ 为第 i 个可平移负荷在 t 时段内的功率, $P_{else,j}^t$ 为第 j 个其它负荷在 t 时段内的功率。可平移负荷主要包括洗衣机、消毒柜、洗碗机以及热水器等,其负荷模型可以表示为

$$P_{L,i}^t = \begin{cases} P_{L,i}^t, & T_{L,i} \leq t < T_{L,i} + \Delta t_i, \\ & T_{L,i} \in [t_i^s, t_i^e] \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

式中: $P_{L,i}$ 为第 i 个可平移负荷的工作功率; $T_{L,i}$ 为第 i 个可平移负荷的开始工作时间; Δt_i 为第 i 个可平移负荷的工作时长; $[t_i^s, t_i^e]$ 为第 i 个可平移负荷的开始工作时间的范围。 $P_{L,i}$ 、 Δt_i 、 t_i^s 和 t_i^e 均为确定值。

其他负荷的用电功率 $P_{else,j}^t$ 均为已知,而可平移负荷的用电功率根据开始工作时间的不同而变化, $T_{L,i}$ 为未确定值。当 $T_{L,i}$ 不同时,家庭负荷总功率 P_A^t 也随之改变,从而改变家庭用电总费用 C 。

3.2 控制策略

家庭能效管理的目标为经济效益最大化,即以

家庭用电总费用 C 最低化为目标建立目标函数。由可平移负荷模型可知,结合分时电价改变可平移负荷的开始运行时间 $T_{L,i}$ 可以改变家庭负荷总功率,从而降低家庭用电总费用。

另外,对于光伏发电和储能电池的控制策略为:在用电高峰时段,首先将光伏发电全部利用,光伏发电大于负荷功率时,多余电量余电上网。光伏发电小于负荷功率时,其余电量尽量由蓄电池提供,除非蓄电池达到最小荷电状态时,不够的用电量由电网补充。在用电低谷时段,蓄电池以最大充电功率充电,利用储能将电能先存储起来,所有负荷用电从电网补充。

同时要考虑蓄电池的最大充放电功率和容量对蓄电池的充放电行为的限制。蓄电池充放电功率和荷电状态的限制为

$$-P_{b,max} \leq P'_b \leq P_{b,max} \quad (6)$$

$$SOC_{min} \leq SOC^t \leq SOC_{max} \quad (7)$$

式(6)中: $P_{b,max}$ 为蓄电池的最大充放电功率;式(7)中 SOC^t 为 t 时段内蓄电池的荷电状态; SOC_{min} 为蓄电池荷电状态的最小值; SOC_{max} 为蓄电池荷电状态的最大值。

根据控制策略,对储能电池充放电功率进行优化控制。在高峰时段 $t \in [t_1, t_2]$, t_1 为用电高峰时段的开始时间, t_2 为用电高峰时段的结束时间时,蓄电池的放电功率取值为

$$P'_b = \begin{cases} \min\{P'_A - P'_{PV}, P_{b,max}\}, & P'_A \geq P'_{PV}, SOC^t \geq SOC_{min} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (8)$$

在低谷时段 $t \in [1, t_1]$, 蓄电池的放电功率取值为

$$P'_b = \begin{cases} -P_{b,max}, & SOC^t \leq SOC_{max} \\ 0, & \text{else} \end{cases} \quad (9)$$

需要计算蓄电池的荷电状态,蓄电池在充放电过程中的荷电状态与充放电功率的关系为^[13]

$$SOC^{t+1} = SOC^t(1 - \sigma) - \frac{P'_b \eta_{ch} \frac{24}{n}}{E_{b,max}} \quad (10)$$

$$SOC^{t+1} = SOC^t(1 - \sigma) - \frac{P'_b \frac{24}{n}}{E_{b,max} \eta_{dis}} \quad (11)$$

式(10)描述的是充电过程中蓄电池荷电状态与充电功率的关系,此时 P'_b 为负;式(11)描述的是放电过程中蓄电池荷电状态与放电功率的关系,此时 P'_b 为正。 SOC^{t+1} 为 $t+1$ 时段内蓄电池的荷电状态; σ 为蓄电池的自放电率,当时间间隔很小,自放电率接近于0%; η_{ch} 表示蓄电池的充电效率, η_{dis} 表示蓄电池的放电效率; $E_{b,max}$ 表示蓄电池的最大容量。

综合上述分析,家庭能效优化问题可以总结为确定可平移负荷的开始工作时间以及每个时刻储能电池的充放电功率,以达到用电总费用最低化的

目标,描述如下。

目标函数

$$\min C = \sum_{t=1}^n \left[f^t (P'_A - P'_{PV} - P'_b) \frac{24}{n} - f_{PV} P'_{PV} \frac{24}{n} \right] \quad (12)$$

约束条件

$$T_{L,i} \in [t_i^s, t_i^e] \quad i = 1 \cdots m$$

$$-P_{b,max} \leq P'_b \leq P_{b,max}$$

$$SOC_{min} \leq SOC^t \leq SOC_{max}$$

4 算例分析

为了验证本文所提出的家庭能效管理方法的有效性,结合上海某家庭用户家用电器设备进行仿真和分析。家庭能效管理系统由光伏电池板、蓄电池、逆变器、家庭服务器和家庭负荷等部分组成。系统配置参数如表1所示。

表1 系统配置参数表

项目	型号	规格	容量/kW
光伏电池板	多晶硅	255 W	2
储能逆变器	5048D-ES	2.5 kW	2.5
蓄电池	铅酸蓄电池	200 Ah/12 V	9.6
智能插座	CC2530	3 kW	

上海市居民生活用电实行峰、谷分时电价,峰时段为6:00~22:00,电价为0.617元/kWh;谷时段为22:00~次日6:00,电价为0.307元/kWh。光伏余电上网电价为0.4048元/kWh。上海市的光伏发电补贴包括0.42元/kWh的国家补贴以及0.4元/kWh的地方补贴,总共为0.82元/kWh。

假设蓄电池的最大充放电功率为1.5 kW;荷电状态的最小值取为0.2,荷电状态的最大值取为0.9,蓄电池的初始荷电状态 SOC^1 设置为0.2;蓄电池的充放电效率取为0.9。

取 $n=144$,将一天24 h平均分为144个时间段,每个时间段有10 min。图3为某日光伏系统的发电功率曲线图。家庭负荷的运行参数如表2所示,其中,洗衣机和热水器为可平移负荷。

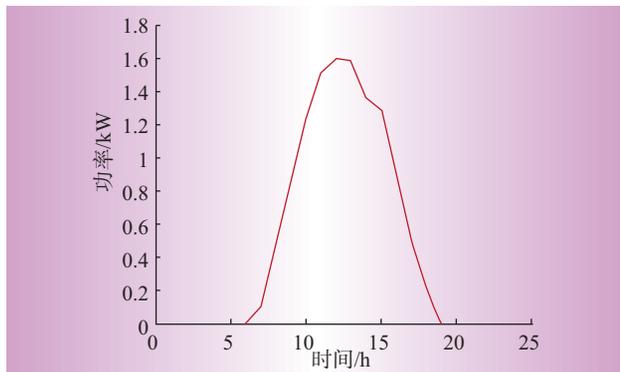


图3 光伏发电功率曲线

表2 家庭负荷运行参数列表

家用电器	功率/kW	运行时长/h	开始工作时间范围
洗衣机	0.40	1	8:00~23:00
热水器	2.00	1	18:00~22:00
照明电器	0.05	6	18:00
电饭煲	1.50	1	17:00
空调	2.50	6	18:00
电冰箱	0.20	24	0:00

基于表2上述数据,利用 Matlab 对家庭负荷的优化管理进行仿真研究。根据家庭能效管理算法,找到最优的家庭用电方案,使一天的用电总费用最低。仿真结果如图4所示。

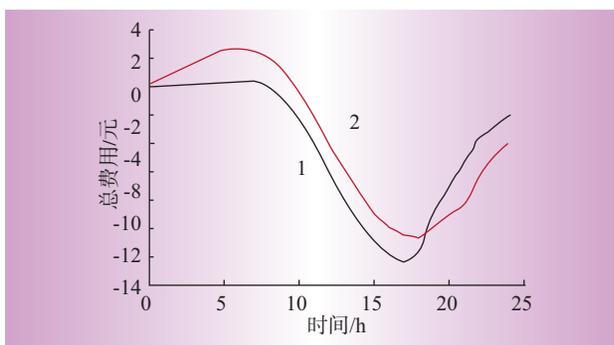


图4 一天中的家庭用电总费用曲线

经过仿真计算得到, $T_{1,1} = 133$, $T_{1,2} = 132$ 时,家庭用电总费用最低。即洗衣机的开始工作时间为 22:00,热水器的开始工作时间为 21:50。

图4表示一天中从 0:00~24:00 的家庭用电总费用的变化曲线。曲线1为没有经过家庭能效管理的总费用曲线,曲线2为经过调整可平移负荷的工作时间以及加入储能电池充放电管理后的总费用曲线。

家庭用电总费用为负时表示余电上网的收益加上光伏补贴大于电网用电费用。可以看出曲线1在 6:00 之后随着光伏出力的增加产生了余电上网的收益和光伏补贴,用电总费用在不断减小。直到 17:00 之后随着光伏出力逐渐减弱为 0,负荷需要从电网吸收电量,使得用电总费用开始增加。最终到 24:00 时,用电总费用 $C = -2.02$ 元。

经过家庭能效管理后,从曲线2可以看出,在 0:00 之后由于蓄电池从电网吸收电量充电,用电总费用增加较快。在 17:00 之后光伏发电量不足,由蓄电池向负荷供电,用电总费用的增加速度明显慢于曲线1。而可平移负荷的用电调度也使得用电总费用进一步减少,最终到 24:00 时,用电总费用 $C = -4.10$ 元。因此在加入家庭能效管理后,这一天的家庭用电总费用减少了 2.08 元。

仿真结果说明了家庭能效管理算法的正确性,能有效提高运行经济性,实现经济效益最大化。

5 结束语

本文设计了基于 ZigBee 技术的智能家居系统,并与户用分布式光伏电站与储能系统相结合,加入家庭能效管理策略,实现家庭能效管理。本文建立了家庭能效管理数学模型,并结合峰谷分时电价给出了家庭能效管理的控制算法。仿真结果表明该算法能有效地决策储能电池的充放电功率及可平移负荷的工作时间,有效节省了家庭用电费用,提高了经济效益,也能起到削峰填谷的作用。证明了该能效管理算法的正确性和可行性。D

参考文献:

- [1] 侯冉冉,张亮. 关于智能家居系统的探讨[J]. 智能建筑电气技术,2010,4(2):3-7.
- [2] 刘畅,周渝慧,许蔚,等. 基于智能电网高级计量体系的居室智能节电系统设计[J]. 电力需求侧管理,2010,12(1):45-48.
- [3] 阮星. 几种智能家居无线组网技术的分析和比较[J]. 科技信息,2010,27(10):39,42.
- [4] 彭道刚,张浩,李辉,等. 基于 ZigBee 技术的发电设备无线远程监测系统研究[J]. 华东电力,2009,37(2):287-290.
- [5] 徐健,杨珊珊. 基于 CC2530 的 ZigBee 协调器节点设计[J]. 物联网技术,2012,2(5):55-57.
- [6] 侯曦,爻国华,张士文. 数字双向多功能电度表设计[J]. 微处理机,2007,28(1):16-18.
- [7] 符杨,蒋一鑫,李振坤,等. 计及可平移负荷的微网经济优化调度[J]. 中国电机工程学报,2014,34(16):2612-2620.
- [8] Katiraei F, Iravani R, Hatziargyriou N, et al. Microgrids management [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2008,6(3): 54-65.
- [9] Chavali P, Peng Yang, Nehorai A. A distributed algorithm of appliance scheduling for home energy management system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2014,5(1): 282-290.
- [10] Zhuang Zhao, Won Cheol Lee, Yoan Shin, et al. An optimal power scheduling method for demand response in home energy management system [J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2013,4(3): 1391-1400.
- [11] 袁晓玲,施俊华,徐杰彦. 计及天气类型指数的光伏发电短期出力预测[J]. 中国电机工程学报,2013,33(34):57-64,12.
- [12] 姜侨娜,陈中. BP-马尔科夫组合预测方法在光伏发电量预测中的应用[J]. 电力需求侧管理,2011,13(6):21-24.
- [13] 丁明,林根德,陈自年,等. 一种适用于混合储能系统的控制策略[J]. 中国电机工程学报,2012,32(7):1-6,184.

(本栏责任编辑 马雷)