

含可再生能源的热电联供型微网经济协调的多目标优化调度方法

含可再生能源的热电联供型微网系统由于在节能、环保和经济等方面的优势，成为新能源利用的重要发展方向之一。首先构建了含风电机组、光伏电池、微型燃气轮机、燃气锅炉、蓄电池以及热/电负荷的热电联供型微网系统综合模型；随后，针对热/电负荷需求的不匹配性和随机特性，结合分时电价，建立起热电协调成本函数；最后，构建可综合考虑生产成本和热电协调成本的热电联供型微网系统的多目标经济协调优化调度模型。仿真算例表明所提出的多目标优化调度方法可有效提升热电联供型微网系统运行的综合经济性，对含可再生能源的热电联供型微网能量的优化管理具有积极的指导意义。

薛海龙/中国航空规划建设发展有限公司第二设计研究院



薛海龙/工程师

环境污染和能源危机问题是长期困扰世界各国经济发展的两大难题，探索提高能源利用效率的方法与手段，成为世界范围内的研究热点问题。热电联产系统在微网中得到了广泛的应用^[1-4]。一方面，热电联产系统可以利用发电装置废热供给热负荷，能够通过能源的梯级利用提升系统综合能源利用率并降低生产成本。另一个角度，微网不仅能消纳大量间歇性可再生能源（如太阳能、风能等），还能在保证电能供应质量的前提下有效满足本地负荷需求^[5]，当上游配电网发生故障情况下，微网系统可切换至孤岛运行，保障对局部区域关键负荷的可靠供能，可有效提高系统运行的可靠性^[6]。为此，将热电联供系统与微网系统相结合构建为热电联供型微网系统具有提升能源利用效率、消纳间歇性可再生能源、改善供电品质以及供电可靠性等多方面的优势。本文以热电联供型微

网系统为对象，探索此类型微网经济协调的多目标优化调度方法。

对于热电联供型微网系统已经有一部分研究成果。文献[7]针对楼宇冷热电供能系统，提出了由联供机组、制冷机组、燃气锅炉和热线圈等组成的典型冷热电联供（Combined Cooling Heating and Power, CCHP）系统的容量配置和运行优化方法；文献[8]提出了热电联供型微网系统的基本理念，表明了其在提升能源利用效率领域的巨大潜力；文献[9]提出了一种基于改进遗传算法的含燃料电池的热电联供型微网系统的经济最优调度运行方法；文献[10]针对热电联供型微网系统中不同微电源分别建立了最优潮流模型，从而使整个微网系统达到最小的年运行费用；文献[11]基于微网系统热能供应的不确定性，在建立优化模型中综合考虑了环境保护效益；文献[12]设计了太阳能冷热电三联供系统，并建立了多目标优化模型，同时针对不同目标函数下的优化设计和运行策略进行了深入探讨；文献[13-14]将需求可响应资源用于微网系统的运行优化。然而，上述研究并未充分考量热电联供型微网系统热和电之间的综合作用及其协调成本，具有一定的局限性。

为克服上述难题，本文首先构建了包含风电机组、光伏电池、微型燃气轮机、燃气锅炉、蓄电池以及热电负荷在内的热电联供型微网系统的综合模型；随后，在预测未来一天（24 h）风电、光伏功率以及热电负荷的基础上，构建

关键词/Keywords

微网 ·
热电联供 ·
可再生能源 ·
协调优化调度 ·
热电协调成本函数 ·

了可综合考虑热电联供型微网系统运行成本和热电协调成本的热电联供型微网经济协调的多目标优化调度模型,并利用最大隶属度原理将多目标问题转化为单目标非线性优化问题进行求解^[15]。最后,通过典型仿真算例验证了本文提出的多目标优化调度方法可有效提升热电联供型微网系统运行的综合经济性,对含可再生能源的热电联供型微网能量的优化管理具有积极的指导意义。

含可再生能源的热电联供型微网系统

本文给出的含可再生能源的热电联供型微网系统综合模型如图1所示,该热电联供型微网系统由两部分组成。

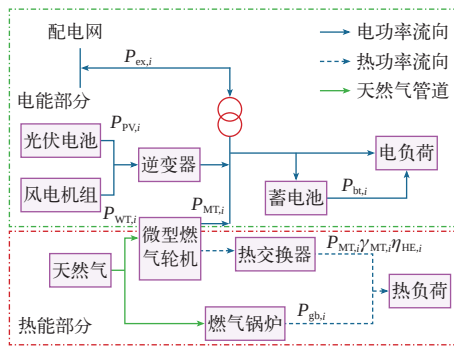


图1 含可再生能源的热电联供型微网系统

1) 电能部分。热电联供型微网系统内用户的电负荷由风电机组、光伏电池、电池储能以及微型燃气轮机供给,蓄电池的充电状态(State of Charge, SOC)可以根据热电联供型微网系统的运行状态进行实时动态调整。电能部分可以和上游配电网进行双向功率交换。当发电量大于电负荷量时可向上游配电网反送功率,当发电量小于电负荷量时可从电网购电,具备一定的灵活性。

2) 热能部分。热电联供型微网系统内用户的热负荷由系统内微型燃气轮机和燃气锅炉供给。微型燃气轮机和燃气锅炉利用一次能源天然气作为其动力来源,其中微型燃气轮机构建起了热电联供微网电系统和热系统之间的桥梁,通过对其进行定向优化控制,不仅可以实现微网系统

的热电联供,还可实现热电负荷之间的优化协调配比。

热电联供型微网系统经济协调优化调度方法

1. 热电联供型微网系统生产成本

热电联供型微网系统生产成本包括以下部分。

- 1) 从上游配电网购电产生的费用。
- 2) 燃气锅炉、微型燃气轮机的天然气使用费用。
- 3) 风电机组、光伏电池、微型燃气轮机、燃气锅炉、热交换器和蓄电池等设备的维护费用,其计算公式为

$$C_1 = \sum_{i=1}^{24} \left[\frac{C_{ph,i} + C_{se,i}}{2} P_{ex,i} + \frac{C_{ph,i} - C_{se,i}}{2} |P_{ex,i}| + C_{gas} \left(\frac{P_{MT,i}}{\eta_{MT}} + \frac{P_{gb,i}}{\eta_{gb}} \right) + P_{MT,i} C_{MT_om} + P_{MT,i} \gamma_{MT} \eta_{HE} C_{HE_om} + P_{gb,i} C_{gb_om} + |P_{bt,i}| C_{bt_om} + P_{WT,i} C_{WT_om} + P_{PV,i} C_{PV_om} \right] \quad (1)$$

式中, C_1 为热电联供型微网系统总生产成本; $P_{ex,i}$ 为第 i 时段与上游配电网的功率交换, 购电为正, 售电为负; $P_{MT,i}$ 为第 i 时段微型燃气轮机的输出功率; $P_{gb,i}$ 为第 i 时段燃气锅炉的输出功率; $P_{bt,i}$ 为第 i 时段电池储能系统的充/放电功率, 放电为正, 充电为负; $P_{WT,i}$ 为第 i 时段风电机组的功率; $P_{PV,i}$ 为第 i 时段光伏电池的功率; $C_{ph,i}$ 为第 i 时段的购电价格; $C_{se,i}$ 为第 i 时段的售电价格; C_{gas} 为天然气的价格; C_{MT_om} 、 C_{HE_om} 、 C_{gb_om} 、 C_{bt_om} 、 C_{WT_om} 和 C_{PV_om} 分别为微型燃气轮机、热交换器、燃气锅炉、蓄电池、风电机组以及光伏电池的设备维护价格; η_{MT} 、 η_{gb} 和 η_{HE} 分别为微型燃气轮机、燃气锅炉和热交换器的效率; γ_{MT} 为微型燃气轮机的热电比。

2. 热电联供型微网系统热电协调成本

本节针对热电联供型微网系统内热电负荷的不匹配性和随机特性,同时考虑机组运行在不同的热电生产状态下,结合分时电价,构建热电联供型微网系统热电协调成本函数。

(1) 热电比、热电负荷比定义及计算方法

1) 热电比是指热电联产机组发电量和供热量的比值,即供能期间电力与热力的比值,用式(2)表示为

$$k = \frac{H}{P} \quad (2)$$

式中, H 和 P 分别为微型燃气轮机的供热量、发电量。

2) 热电负荷比是指热电联供型微网系统用户在不同的时刻热量需求与电量需求的比值,即

$$K_i = H_{Di} / P_{Di} \quad i=1,2,3,\dots,24 \quad (3)$$

式中, H_{Di} 、 P_{Di} 分别为第 i 时段用户的热量需求和电量需求。

(2) 热电联供型微网系统的热电协调成本函数

热电协调成本是在满足热电联供型微网系统热电负荷需求的基础上,根据额定的热电比,解决负荷不匹配的情况,并使得整个热电联供型微网系统的总煤耗最低。热电协调成本函数为

$$C_2 = \sum_{i=1}^{24} [C_{ph,i} \max \left\{ - \left[\sum_{m=1}^{N_p} P_m(i) + \left(1 - \frac{k}{k_i} \right) \sum_{k=1}^{N_c} P_k(i) - \sum_{n=1}^{N_h} H_n(i) \right], 0 \right\} - C_{se,i} \max \left\{ \left[\sum_{m=1}^{N_p} P_m(i) + \left(1 - \frac{k}{k_i} \right) \sum_{k=1}^{N_c} P_k(i) - \sum_{n=1}^{N_h} H_n(i) \right], 0 \right\} \quad (4)$$

式中, $C_{ph,i}$ 为第 i 时段的购电价格; $C_{se,i}$ 为第 i 时段向电网的售电价格; k 、 k_i 分别为第 i 时段的热电比和热电负荷比。

3. 热电联供型微网系统经济协调的多目标优化调度方法

根据上文提出的热电联供型微网系统热电协调成本,本节给出热电联供型微网系统经济协调的多目标优化调度模型。

(1) 多目标优化模型

热电联供型微网系统经济协调的多目标优化调度模型的目标函数为

$$f = \min(C_1, C_2) \quad (5)$$

式中, C_1 、 C_2 分别为热电联供型微网系统在一天(24 h)内的生产成本和热电协调成本。多目标优化模型的目标就是使综合考虑生产成本和热电协调成本达到最小。若单纯以生产成本最小为目标,电力不足部分可以从电网购买,使得热电协

调成本相对较大。若单纯以热电协调成本最小为目标,尽管热电协调成本最小,但是此时热电联供型微网系统会尽可能向电网售电,从而增加系统的发电量,使得生产成本大幅增加,不符合经济运行的基本原则。因此,应采用综合考虑生产成本和协调成本的多目标优化模型,从而获得最优的热电联供型微网系统的最优调度方案。

(2) 约束条件

式(6)~式(10)分别从不同角度给出上述多目标优化模型的约束条件。

1) 功率平衡约束为

$$P_{ex,i} + P_{MT,i} + P_{WT,i} + P_{PV,i} + \frac{P_{bt,i}}{\eta_{ch}} - P_{D,i} = 0 \quad (6)$$

$$P_{ex,i} + P_{MT,i} + P_{WT,i} + P_{PV,i} + P_{bt,i} \eta_{dis} - P_{D,i} = 0 \quad (7)$$

式中, $P_{D,i}$ 为第 i 时段的用户负荷; η_{MT} 为微型燃气轮机的效率; η_{ch} 、 η_{dis} 分别为蓄电池的充、放电效率。

2) 热量平衡约束为

$$P_{MT,i} \gamma_{MT} \eta_{HE} + P_{gb,i} - H_{D,i} = 0 \quad (8)$$

式中, $H_{D,i}$ 为第 i 时段的热负荷。

3) 与电网交换功率约束为

$$P_{ex,min} \leq P_{ex,i} \leq P_{ex,max} \quad (9)$$

式中, $P_{ex,min}$ 、 $P_{ex,max}$ 分别为在第 i 时段热电联供型微网系统和上游配电网之间传输功率的最小值和最大值。

4) 系统运行约束为

$$\begin{cases} P_{MT,min} \leq P_{MT,i} \leq P_{MT,max} \\ P_{HE,min} \leq P_{MT,i} \gamma_{MT} \eta_{HE} \leq P_{HE,max} \\ P_{gb,min} \leq P_{gb,i} \leq P_{gb,max} \\ P_{bt,min} \leq P_{bt,i} \leq P_{bt,max} \\ \sum_{i=1}^{24} P_{bt,i} = 0 \\ W_{bt,min} \leq W_{init} - \sum_{i=1}^{24} P_{bt,i} \leq W_{bt,max} \end{cases} \quad (10)$$

式中, $P_{MT,min}$ 、 $P_{MT,max}$ 分别为第 i 时段微型燃气轮机输出功率的最小、最大值; $P_{gb,min}$ 、 $P_{gb,max}$ 分别为第 i 时段燃气锅炉的输出功率的最小、最大值; $P_{bt,min}$ 、 $P_{bt,max}$ 分别为第 i 时段蓄电池的最小、最大充/放电功率; $W_{bt,min}$ 、 $W_{bt,max}$ 分别为蓄电池的最小、最大存储容量。式(10)中最后一个约束条件是为

了保证电池储能初始值和终值相等。

(3) 模型求解步骤

1) 分别求解两个单目标优化问题。求解生产成本和热电协调成本目标函数值 C_1 、 C_2 以及二者分别单目标优化时对应的其他目标函数值, 生产成本最小时对应的热电协调成本 C_{20} , 热电协调成本最小时对应的生产成本 C_{10} 。

2) 定义隶属函数, 将各单目标函数模糊化。其中成本伸缩原则为

$$\delta_{01} \leq C_{10} - C_1 \tag{11}$$

$$\delta_{02} \leq C_{20} - C_2 \tag{12}$$

3) 采用最大隶属度原理将多目标问题转化为下述单目标非线性优化问题^[15]

$$\begin{aligned} \min C_3 &= -\lambda \\ \text{s. t. } C_1 + \delta_{01}\lambda - C_{10} &\leq 0 \\ C_2 + \delta_{02}\lambda - C_{20} &\leq 0 \\ 0 &\leq \lambda \leq 1 \end{aligned} \tag{13}$$

4) 采用二次规划法求解式(13)构造的单目标优化模型, 从而得到兼顾多目标成本模型的最优解。

算例与仿真结果

1. 算例

热电联供型微网系统仿真算例如图1所示。该微网系统一天(24 h)风电、光伏功率以及热电负荷预测曲线分别如图2和图3所示。

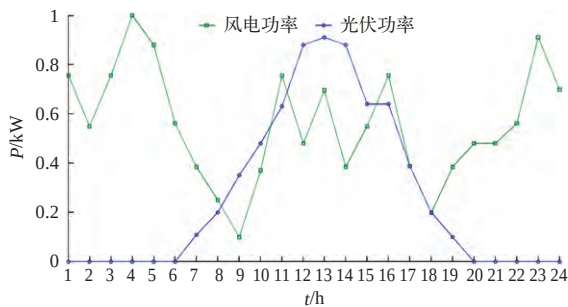


图2 微网24 h风电功率与光伏功率预测曲线

算例仿真计算中的参数设置如表1所示, 算例中电网的分时电价如表2所示。

2. 优化仿真结果

本节给出的仿真结果分两部分: ① 分别以生

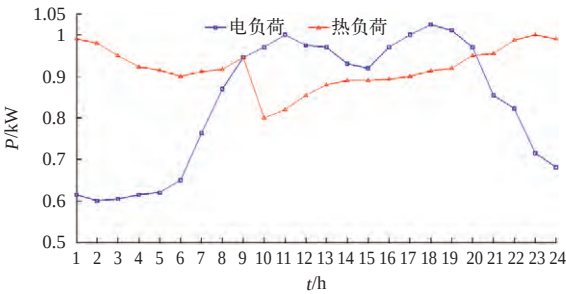


图3 微网24 h电负荷与热负荷预测曲线

表1 算例仿真参数

参数	设定值	参数	设定值
$P_{ex,min}$	-400 kW	$P_{gb,max}$	150 kW
$P_{ex,max}$	400 kW	C_{gas}	0.2元/kW·h
$P_{MT,min}$	0 kW	$C_{MT,om}$	0.04元/kW·h
$P_{MT,max}$	150 kW	$C_{HE,om}$	0.025元/kW·h
$P_{bt,min}$	-10 kW	$C_{gb,om}$	0.03元/kW·h
$P_{bt,max}$	10 kW	$C_{bt,om}$	0.02元/kW·h
$P_{gb,min}$	0 kW	$C_{WT,om}$	0.11元/kW·h
γ_{MT}	0.680 1	$C_{pv,om}$	0.08元/kW·h
η_{MT}	0.271 6	η_{gb}	0.9
η_{HE}	0.9	η_{dis}	0.9
η_{ch}	0.9		

表2 分时电价数据

时间/h	C_{ph} / [元/(kW·h)]	C_{eq} / [元/(kW·h)]
(10, 15], (18, 21]	0.774 9	0.615 0
(7, 10], (15, 18], (21, 23]	0.455 1	0.356 7
(0, 7], (23, 24]	0.159 9	0.123 0

产成本最小为目标和以热电协调成本最小为目标的单目标最优经济调度仿真结果; ② 给出可综合考虑微网系统生产成本和热电协调成本的多目标协调最优经济调度仿真结果。

(1) 单目标优化仿真结果

算例系统单目标函数仿真结果如表3所示, 其中 C_2 为负值表示分别以生产成本和热电协调成本为目标的热电联供型微网系统在热电协调方面盈利。

表3 经济成本的单目标优化仿真结果 (单位: 元)

目标	C_1	C_2
生产成本为目标	1 801.6	-912.4
协调成本为目标	2 648.7	-1 257.6

由表3可以看出, 选择不同的经济协调优化目标, 所得到的热电联供型微网系统的全天(24 h)

生产成本 (C_1) 和热电协调成本 (C_2) 是不同的。以全天生产成本为目标的 C_1 为 1 801.6 元, 低于以全天热电协调成本为目标的 C_1 为 2 648.7 元; 而以全天生产成本为目标的 C_2 为 -912.4 元, 高于以全天热电协调成本为目标的 C_2 为 -1 257.6 元, 也即以全天生产成本为目标的优化调度方案在热电协调方面的盈利少于以全天热电协调成本为目标的优化调度方案。反之当以热电协调经济成本为优化目标时, 生产成本 C_1 会升高, 同时热电成本 C_2 会降低。二者对应的优化调度结果分别如图 4、图 5 所示。

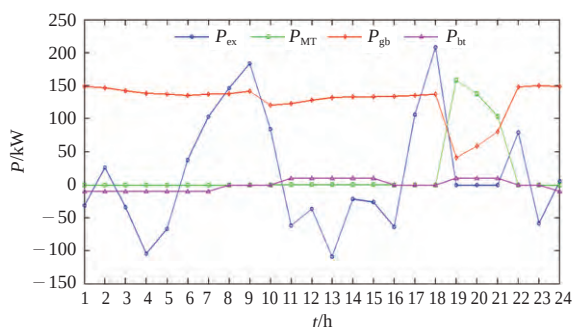


图4 以生产成本最小为优化目标的优化调度

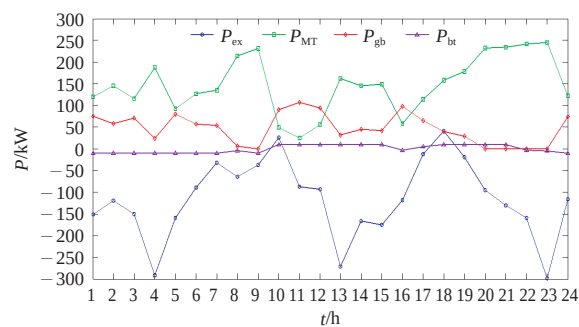


图5 以热电协调成本最小为目标的优化调度

(2) 多目标优化仿真结果

热电联供型微网系统经济协调优化调度仿真结果如表 4 所示, 其中负值表示热电联供型微网系统在热电协调方面盈利。

表 4 经济成本的多目标优化仿真结果 (单位: 元)

目标	C_1	C_2
多目标	1 816.3	-1 010.1

仿真结果显示, 若单纯以生产成本最小为目标 (见表 3), 电力不足部分可以从电网购买, 使

得热电协调成本相对多目标优化经济调度方案较大 ($-912.4 > -1\ 010.1$), 也即以生产成本最小为目标的经济调度方案在热电协调方面的盈利略少于多目标优化经济调度方案。若单纯以热电协调成本最小为目标 (见表 3), 尽管热电协调成本相对多目标优化经济调度方案降低 ($-1\ 257.6 > -1\ 010.1$), 但是此时热电联供型微网系统会尽可能向电网售电, 从而增加系统的发电量, 使得生产成本相对多目标优化经济调度方案大幅增加 ($2\ 648.7 > 1\ 816.3$), 不符合经济运行的原则。因此, 本文提出的可综合考虑生产成本和热电协调成本的多目标最优经济调度模型可结合热电联供型微网系统运行情况, 利用权重系统对不同目标加以优化协调, 可有效实现热电联供型微网系统的综合成本最优, 其优化调度结果如图 6 所示。

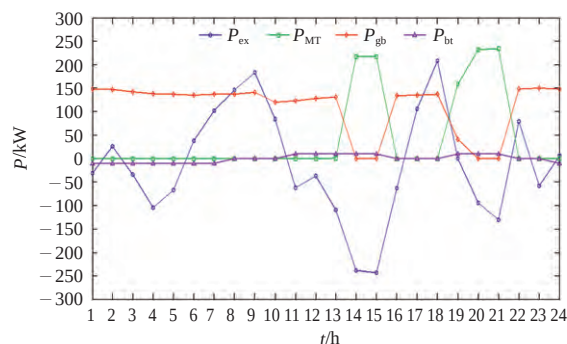


图6 经济协调的多目标优化调度仿真结果

结束语

本文面向含可再生能源的热电联供型微网, 对其经济优化调度问题展开了深入研究。首先, 构建了含可再生能源的热电联供型微网系统综合模型; 随后在该模型的基础上, 针对热电负荷需求的不匹配性和随机特性, 结合分时电价信息, 建立了热电协调成本函数; 在此基础上, 提出以生产成本与热电协调成本最小化的热电联供型微网经济协调的多目标优化调度方法; 最后, 通过典型算例验证了本文所提方法的有效性。从仿真结果可以得出以下几方面内容。

1) 传统的单目标经济优化调度方法已无法适应当今含可再生能源的热电联供型微网系统, 究其原因就在于已有方法未能充分考虑此类微网系

统热和电之间的相互耦合用及其协调成本,具有一定的局限性。

2) 通过综合考虑热电联供型微网系统的运行成本和热电协调成本,构建热电联供型微网经济协调的多目标优化调度模型,可有效提升微网运行的经济性。

3) 本文所提出的以生产成本与热电协调成本最小化的热电联供型微网经济协调的多目标优化调度方法,对含可再生能源的热电联供型微网的能量管理具有积极的指导意义,可有效促进此类微网未来的广泛应用。

未来研究方向将进一步综合考虑此类微网内部间歇性分布式电源随机出力的不确定性以及其与储能系统之间的协调作用,充分挖掘互动机制在微网能量管理中的重要作用,进一步提升微网能量管理的高效性、经济性与可靠性。

参考文献

- [1] Houwing M, Negenborn R R, De Schutter B. Demand response with micro-CHP systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99 (1): 200-213.
- [2] 吴雄,王秀丽,别朝红,等.含热电联供系统的微网的经济运行[J].电力自动化设备,2013,33(8):1-6.
- [3] 汪伟,段邵辉,张兆鹏,等.冷热电蓄能联供微网系统优化配置的影响因素[J].电力系统及其自动化学报,2013,25(4):156-161.
- [4] Jia H, Qi Y, Mu Y. Frequency response of autonomous microgrid based on family-friendly controllable loads [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56 (3): 693-702.
- [5] Mu Y, Jia H. An approach to determining the local boundaries of voltage stability region with wind farms in power injection space [J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53 (12): 3232-3240.
- [6] Jia H, Mu Y, Qi Y. A statistical model to determine the capacity of battery-supercapacitor hybrid energy storage system in autonomous microgrid [J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2014, 54 (1): 516-524.
- [7] Wang J, Jing Y, Zhang C. Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm [J]. Applied Energy, 2010, 87 (4): 1325-1335.
- [8] 王锐,顾伟,吴志.含可再生能源的热电联供型微网经济优化运行[J].电力系统自动化,2011,35(8):22-27.
- [9] 陈洁,杨秀,朱兰,等.微网多目标经济调度优化[J].中国电机工程学报,2013,33(19):57-66.
- [10] 雷金勇,谢俊,甘德强.分布式发电供能系统能量优化及节能减排效益分析[J].电力系统自动化,2009,33(23):29-36.
- [11] 杨佩佩,艾欣,崔明勇,等.基于粒子群优化算法的含多种供能系统的微网经济运行分析[J].电网技术,2009,33(20):39-40.
- [12] 荆有印,白鹤,张建良.太阳能冷热电联供系统的多目标优化设计与运行策略分析[J].中国电机工程学报,2012,32(20):82-87.
- [13] Jia Hongjie, Qi Yan, Mu Yunfei. Frequency response of autonomous microgrid based on family-friendly controllable loads [J]. Science China Technological Sciences, 2013, 56 (3): 693-702.
- [14] Jian L, Xue H, Xu G, et al. Regulated charging of plug-in hybrid electric vehicles for minimizing load variance in household smart microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60 (8): 3218-3226.
- [15] Zhao Bo, Cao Yijia. Multiple objective particle swarm optimization technique for economic load dispatch [J]. Journal of Zhejiang University Science, 2005 (5): 421-422.

(收稿日期:2014-12-01) EA