

含冷热电联产的微电网经济运行控制策略的研究

首先给出了基于微燃机的冷热电联供系统的结构和数学模型以及微电网的经济模型，并分析比较了微电网经济运行时分别遵循“以热（冷）定电”和“以电定热（冷）”不同原则的两种控制策略，然后分别运用这两种控制策略对各发电单元进行经济调度，分别对两种控制策略下优化结果进行分析，验证了所建经济模型的可靠性，并比较了两种结果的经济性和环保性，最后总结了当天然气价格变化时，各发电单元发电量和电网购电量的变化趋势。

芦思为 黄彦全 沈金锁 唐诗光/西南交通大学电气工程学院

0 引言

微电网的概念由美国电力可靠性技术方案协会首次提出，微电网可向用户同时提供电能和热能，实现冷热电联产。冷热电联产系统可以实现现场能量的转换，将制冷、供暖和发电三种功能合而为一，实现多种能源形式高效梯级利用，有利于电网节能高效运行^[1-5]，建设资源节约型社会，达到更高的能源综合利用效率^[6-8]。含冷热电联产系统的微电网控制策略可以分别遵循“以热（冷）定电”和“以电定热（冷）”两种运行方式。针对微电网运行的控制策略和经济模型，国内外学者展开了很多研究。文献[9]建立了含两台往复式天然气发电机、热电联产系统、风机和光伏阵列的微电网模型，并以燃料消耗最小为目标函数进行优化；文献[10]对含冷热电联产系统的微电网的一次能源节约率、年运行成本和污染气体排放成本等目标进行优化调度；文献[11]在冷热电联产系统中引入储能装置，用粒子群算法对发电单元容量进行优化；文献[12]以一

座八层的商业办公楼作为微电网冷热电联供系统的研究对象，比较了“以热定电”和“以电定热”两种运行方式的成本，但没有考虑向外电网售电的情况。

本文建立了含风、光、储及基于微燃机的冷热电联产系统和燃料电池的微电网，用分别遵循“以热（冷）定电”和“以电定热（冷）”不同原则的两种控制策略对微电网各发电单元进行经济调度，比较了运行成本和环境性，并给出了天然气价格变化对各发电单元的影响。

1 基于微燃机的冷热电联产系统

1.1 冷热电联产系统结构

将微燃机和余热锅炉组合在一起，用余热锅炉来回收微燃机排气中的余热，能显著提高微燃机效率。余热锅炉按照有无燃烧设备可以分为无补燃余热锅炉和带补燃余热锅炉，联产系统中为带补燃余热锅炉，在夏天和冬天的冷热负荷高峰期或微燃机停运时，可以向锅炉添加燃料进行补燃，从而提高联产系统可靠性。余热锅炉回收微燃机排放的余热后，通过制冷机制冷和换热器供热分别满足冷热负荷，这一过程是以蒸汽为媒介来实现系统各种能量转换的，相对于其他媒介更容易实现。当余热锅炉补燃达到一定量时，联产系统的效率反而会降低，所以在余热锅炉之后，配备一台燃气锅炉作为调峰锅炉使用^[13]。微燃机的燃料使用天然气，基于微燃机的冷热电联产系统如图1所示。



芦思为/硕士研究生

关键词/Keywords

冷热电联产·
微电网·
控制策略·
经济调度·

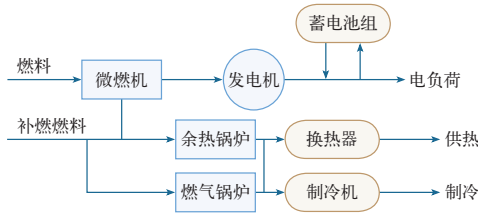


图1 基于微燃机的冷热电联产系统

1.2 冷热电联产系统数学模型

微燃机模型的发电效率和输出的电功率在 t 时刻的关系为^[14]

$$\eta_{MT}^t = 0.0753 \left(\frac{P_{MT}^t}{65} \right)^3 - 0.3095 \left(\frac{P_{MT}^t}{65} \right)^2 + 0.4174 \left(\frac{P_{MT}^t}{65} \right) + 0.1068 \quad (1)$$

式中， η_{MT}^t 为 t 时刻微燃机的发电效率； P_{MT}^t 为 t 时刻微燃机的输出电功率； t 为一天24个时刻，下同。

微燃机供热量、制冷量和输出电功率与消耗天然气量的关系为

$$Q_{MT}^t = \frac{P_{MT}^t (1 - \eta_{MT}^t - \eta_h)}{\eta_{MT}^t} \quad (2)$$

$$V_{MT}^t = \frac{P_{MT}^t}{\eta_{MT}^t \text{LHV}} \quad (3)$$

$$\begin{cases} Q_{\text{heat}}^t = Q_{MT}^t \eta_h \text{COP}_{\text{heat}} \\ Q_{\text{cool}}^t = Q_{MT}^t \eta_h \text{COP}_{\text{cool}} \end{cases} \quad (4)$$

式中， Q_{MT}^t 为微燃机在 t 时刻的排气余热； η_h 为微燃机散热损失系数； V_{MT}^t 为微燃机在 t 时刻输出电功率为 P_{MT}^t 时消耗的天然气量；LHV为天然气的低热值，这里取 $9.7 \text{ kW} \cdot \text{h}/\text{m}^3$ ； Q_{heat}^t 、 Q_{cool}^t 为微燃机在 t 时刻提供的供热量和制冷量； η_h 为排气余热利用率； COP_{heat} 、 COP_{cool} 分别为制热系数和制冷系数。

t 时刻，冷热电联产系统运行成本为

$$C_{\text{CCHP}}^t = C_{\text{MT,om}} P_{MT}^t + C_{\text{fuel}} V_{MT}^t + C_{\text{fuel}} V_{\text{boiler}}^t \quad (5)$$

$$V_{\text{boiler}}^t = \frac{Q_{\text{boiler}}^t}{\eta_{\text{boiler}} \text{LHV} \text{COP}_{\text{heat(cool)}}} \quad (6)$$

$$Q_{\text{boiler}}^t = \begin{cases} Q_i^t - Q_{\text{heat(cool)}}^t & Q_i^t > Q_{\text{heat(cool)}}^t \\ 0 & Q_i^t \leq Q_{\text{heat(cool)}}^t \end{cases} \quad (7)$$

式中， $C_{\text{MT,om}}$ 为微燃机的运行维护成本； C_{fuel} 为考虑燃烧产生污染气体的环境成本后天然气的价格； V_{boiler}^t 为锅炉补燃时消耗天然气量； η_{boiler} 为锅炉热

能利用率，本文设为85%； Q_{boiler}^t 为锅炉在 t 时刻需要补燃输出的制热（冷）量； Q_i^t 为 t 时刻的热（冷）负荷需求。

冷热电联产系统供热制冷收益为

$$C_1^t = Q_{\text{heat}}^t K_1 \quad (8)$$

$$C_2^t = Q_{\text{cool}}^t K_2 \quad (9)$$

式中， C_1^t 、 C_2^t 为 t 时刻供热、制冷收益； K_1 、 K_2 分别为单位制热量、制冷量售价。

2 含冷热电联产系统的微电网运行经济模型

2.1 目标函数

所建微电网运行经济模型的成本包括：微燃机冷热电联产系统运行成本、燃料电池运行成本、向电网购电成本、售电收益和供热制冷收益。目标函数表示为

$$\min \left\{ C = \sum_{t=1}^T (C_{\text{CCHP}}^t + C_{\text{FC}}^t + C_{\text{grid}}^t - C_1^t - C_2^t) \right\} \quad (10)$$

$$C_{\text{FC}}^t = C_{\text{FC,om}} P_{\text{FC}}^t + C_{\text{fuel}} \frac{P_{\text{FC}}^t}{\eta_{\text{FC}}^t \text{LHV}} \quad (11)$$

$$C_{\text{grid}}^t = C_{\text{ex}}^t P_{\text{grid}}^t \quad (12)$$

$$C_{\text{ex}}^t = \begin{cases} C_{\text{buy}}^t, P_{\text{grid}}^t \geq 0 \\ C_{\text{sell}}^t, P_{\text{grid}}^t \leq 0 \end{cases} \quad (13)$$

式中， T 为调度总时段，本文以一天为调度总时段，故 T 取24； C_{FC}^t 、 C_{grid}^t 分别为燃料电池和电网在 t 时刻的运行成本； $C_{\text{FC,om}}$ 为燃料电池的运行维护成本； P_{FC}^t 、 η_{FC}^t 分别为 t 时刻燃料电池的输出电功率和发电效率； P_{grid}^t 为 t 时刻微电网与电网的交换功率，购电为正，售电为负； C_{buy}^t 、 C_{sell}^t 分别为 t 时刻向电网购电和售电电价。

2.2 约束条件

为了使微电网能经济、可靠和环保地运行，必须满足供电质量、对环境的影响等约束条件，包括电功率平衡约束、冷热功率平衡约束、发电单元出力约束、功率响应速度约束、污染气体排放约束以及与电网交换功率约束、蓄电池充放电约束和旋转备用约束等^[15-17]。

3 微电网经济运行的控制策略

根据电能和热能优先考虑的次序,微电网中的冷热电联产系统可以分为“以热(冷)定电”和“以电定热(冷)”两种运行方式,微电网经济运行的控制策略也相应分为两种。

冷热电联产系统在“以热(冷)定电”的运行模式下微电网经济运行的控制策略如下。

1) 风力发电和光伏发电没有燃料成本和环境成本,运行维护成本较低,为了充分利用自然资源,对光伏阵列和风机进行最大功率跟踪,并优先运行。

2) “以热(冷)定电”的运行方式首先要满足冷热负荷,所以由微电网中的冷热负荷确定微燃机MT的出力,若MT达到最大出力时,仍不能满足冷热负荷需求,则使用锅炉补燃来满足剩余冷热负荷需求。

3) 若此时光伏发电、风力发电和微燃机MT以热(冷)定电的发电量小于微电网电负荷需求,监测蓄电池充放电状态,并比较所有发电单元的发电成本和电网购电成本,优化各发电单元发电量、蓄电池发电量和电网购电量;若各发电单元和蓄电池发电量大于微电网电负荷需求,可向电网售电。

4) 若所有发电单元都达到最大出力仍不能满足负荷需求,则应切除部分非重要负荷。

冷热电联产系统在“以电定热(冷)”的运行模式下微电网经济运行的控制策略如下。

1) 同样,优先安排光伏发电和风力发电。

2) 当此时光伏发电和风力发电的发电量小于电负荷需求时,由于MT在发电的同时,余热被利用起来满足冷热负荷需求,所以将MT发电成本与其他发电单元的发电成本、电网购电成本加上锅炉补燃成本进行比较,若MT发电成本较低,由于系统是“以电定热(冷)”的运行方式,MT的发电量由剩余的电负荷需求来决定。①当MT最大发电量小于剩余电负荷需求时,MT满负荷发电,电量不足的部分从电网购入或由其他发电单元来满足;②如果MT最大发电量大于剩余电负荷需求时,MT采用部分负荷发电。MT提供的热量不能

满足冷热负荷需求时,使用余热锅炉补燃。

3) 若各发电单元和蓄电池的发电量大于微电网电负荷需求,可向电网售电,若所有发电单元都达到最大出力仍不能满足负荷需求,则应切除部分非重要负荷。

微电网能量管理策略流程图如图2所示。

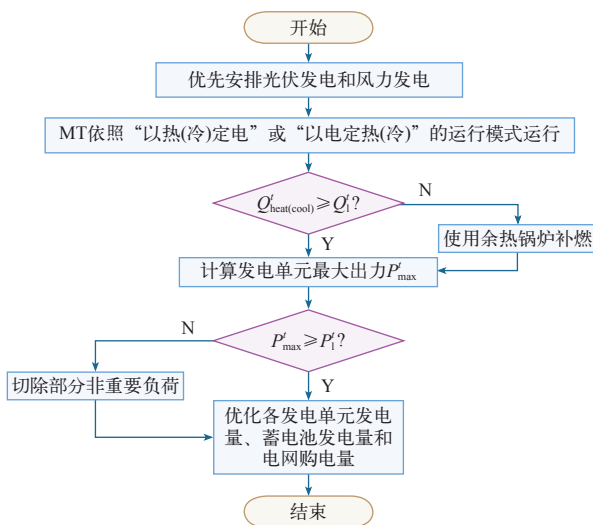


图2 微电网能量管理策略流程图

4 算例分析

4.1 基础数据

以夏季制冷期典型日为例,使用上述两种控制策略对某居民小区微电网进行经济调度,同样的调度策略适用于其他季节。当地分时电价政策:峰时段时间为11:00~15:00、19:00~21:00;平时段时间为8:00~10:00、16:00~18:00和22:00~23:00;谷时段时间为0:00~7:00。能源价格如表1所示,天然气的价格为考虑环境成本后的价格。

表1 天然气和电能的价格

能源		价格
天然气		2.5元/m ³
购电	峰时段	0.94元/kW·h
	平时段	0.60元/kW·h
	谷时段	0.28元/kW·h
	峰时段	0.65元/kW·h
售电	平时段	0.38元/kW·h
	谷时段	0.13元/kW·h

MT、FC运行维护成本和出力约束如表2所示,

MT、FC产生的污染气体排放系数如表3所示^[18]。

表2 MT、FC的运行参数

微源	运行维护成本/(元/kW·h)	出力下限/kW	出力上限/kW
MT	0.041 09	15	65
FC	0.029 33	5	30

表3 MT、FC的污染气体排放系数

参数	CO ₂	SO ₂	NO _x	PM-10
MT排放系数/(kg/MW·h)	718.2	0.003 6	0.198	0.040 5
FC排放系数/(kg/MW·h)	427.5	0.002 3	0.004 5	—

MT在两种控制策略下的购电平衡功率如表4所示。系统“以冷定电”运行、求解MT购电平衡功率时，比较的是MT发电成本和购电电价；而系统“以电定冷”运行时，还考虑了锅炉补燃成本。

表4 MT的购电平衡功率

微源	“以冷定电”运行的 购电平衡功率/kW			“以电定冷”运行的 购电平衡功率/kW		
	谷时段	平时段	峰时段	谷时段	平时段	峰时段
MT	—	—	58.54	—	38.21	15

当地夏季典型日微电网系统冷负荷、电负荷和PV、MT机组发电功率情况如图3所示。

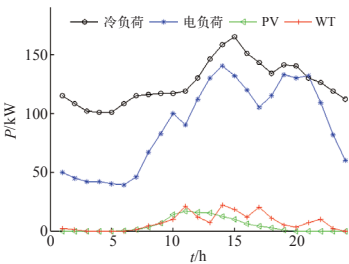


图3 冷负荷、电负荷和PV、MT机组发电功率

4.2 系统“以冷定电”运行的优化结果

“以冷定电”时，先确定MT为满足冷负荷需求时的发电量，“以冷定电”优化结果如图4所示。

谷时段时，MT和FC发电成本均高于电网购电电价，故FC以最小功率运行，MT在满足冷负荷需求后不再发电，剩余电负荷由电网承担；平时段时，MT发电成本仍高于电网购电电价，故只满足冷负荷需求，FC发电成本低于电网购电电价且高于电网售电电价，故FC在满足电负荷后不多发电，而在9：00~10：00、16：00~18：00和22：00~23：00时，FC在最大出力的情况下仍不

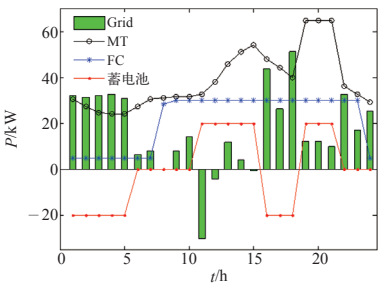


图4 “以冷定电”的优化结果

能满足电负荷需求，则向电网购电；峰时段时，FC发电成本小于电网购电和售电电价，故FC一直满发，在19：00~21：00时，微电网系统电负荷缺额大于MT的购电平衡功率，此时MT优先于电网发电。蓄电池在谷时段充电，在峰时段放电，起到了削峰填谷的作用。在11：00、12：00和15：00时，发电单元发电量加上蓄电池放电量大于电负荷需求，故向电网售电。系统在夏季“以冷定电”运行时典型日成本为1 475.2元。

4.3 系统“以电定冷”运行的优化结果

“以电定冷”优化结果如图5所示。谷时段时，MT和FC的发电成本均高于电网购电电价，故FC和MT均以最小功率运行，剩余电负荷由电网承担，剩余冷负荷由余热锅炉进行补燃；平时段时，电负荷缺额大于MT的购电平衡功率，FC发电成本低于电网购电电价且高于电网售电电价，则发电优先顺序为MT、FC和电网，且MT和FC在满足电负荷后不多发电；峰时段时，电负荷差额也大于MT购电平衡功率，则优先让MT满足电负荷，FC发电成本小于电网购电和售电电价，故FC一直满发。在平时段和峰时段，MT在大多时段都处在满负荷运行状态，产生的多余热量则被浪费。系统“以电定冷”运行时在夏季典型日成本为1 456.3元。

比较图4、图5的优化结果可以看出，对于MT，在谷时段，前者MT出力一直大于后者，那是因为“以冷定电”的运行方式必须让MT首先满足冷负荷需求，而在“以电定冷”的运行方式下，微电网必须有余热锅炉进行补燃；在平时段和峰时段时，MT在“以电定冷”的运行方式

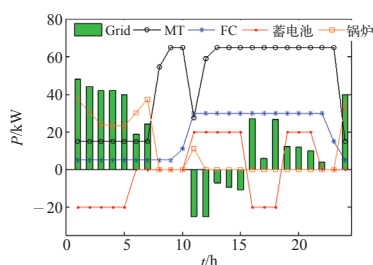


图5 “以电定冷”的优化结果

下的购电平衡功率小于在“以冷定电”运行方式下的，使得电负荷差额更容易大于MT的购电平衡功率，所以MT在“以电定冷”方式运行时发电量较大。对于FC，在谷时段和峰时段，FC发电量相同；而在平时段和“以冷定电”方式运行下，FC优先于MT发电，但在“以电定冷”运行方式下由于增加了制冷成本，使得MT优先于FC发电，故在“以电定冷”运行方式下FC发电量较少。两种策略在夏季典型日一天的污染气体排放量如表5所示。

表5 两种策略的污染气体排放量

运行方式	CO ₂ 排放量/kg	SO ₂ 排放量/kg	NO _x 排放量/kg	PM-10排放量/kg
以冷定电	891.27	0.004 5	0.187	0.038
以电定冷	980.72	0.005	0.221	0.045

微电网在“以冷定电”运行方式下的运行成本稍高于“以电定冷”时的成本，但在运行过程中冷热电联产系统没有热量浪费，污染气体排放量较少的优点也非常显著，所以冷热电联产系统在“以冷定电”的运行方式下更符合当今建设资源节约型和环境友好型社会的发展趋势。

4.4 天然气价格对仿真结果的影响

居民小区微电网中的MT、FC和余热锅炉的燃料都是天然气，所以天然气价格变化时，必然会对微电网经济调度产生影响。当天然气价格从1.0元/m³变化到3.5元/m³时，在两种控制策略下，MT和FC在夏季典型日全天的发电总量变化曲线如图6所示，电网全天购电总量和锅炉全天补燃总量的变化曲线如图7所示。

从图6、图7可以看出，随着天然气价格的增加：

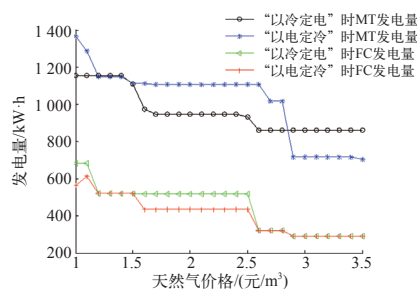


图6 天然气价格对MT和FC发电量的影响

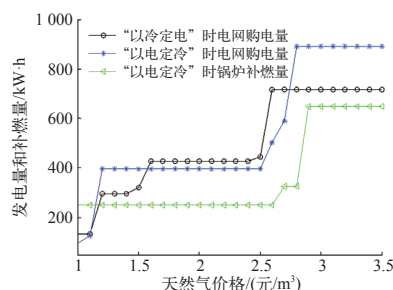


图7 天然气价格对电网购电量和锅炉补燃量的影响

1) MT和FC的发电成本相对于电网购电价格在增加，每天的发电量均呈下降趋势，故选择的MT和FC额定功率也应该减小。对于MT，“以冷定电”运行方式的发电量曲线比“以电定冷”时较稳定，因为MT满足冷负荷的发电量是确定的，在天然气价格大于2.8元/m³时，“以冷定电”运行方式下的MT发电量最终稳定在仅满足冷负荷需求的情况下，而“以电定冷”运行方式下的MT则会继续随成本的增加而减少发电量，最终稳定在最小出力的情况。对于FC，“以冷定电”运行方式的发电量大于“以电定冷”的发电量，故FC的额定功率在“以冷定电”运行方式时可以选择较大一些。

2) MT和FC发电成本的增加，使得从电网购电显得更经济，所以当天然气价格上升时，微电网与电网交换功率的约束限值提高能减小微电网运行成本。

3) 系统在“以电定冷”运行模式下，MT发电量减少，余热锅炉补燃量增大，此时必须增加冷热电联产系统制冷量上限，否则冷负荷需求无法满足。

5 结束语

建立了含有基于微燃机的冷热电联产系统

的微电网的经济模型,并详细分析了微电网经济运行时遵循“以热(冷)定电”和“以电定热(冷)”不同原则的两种控制策略。对发电单元进行优化调度,研究了天然气价格从1元/m³变化到3.5元/m³时对各发电单元发电量的影响。仿真算例表明,遵循“以热(冷)定电”原则的控制策略更符合当今建设资源节约型和环境友好型社会的发展趋势,并且随着天然气价格上升,微燃机和燃料电池发电量呈下降趋势,电网购电量呈上升趋势,所以通过减小微燃机和燃料电池额定功率,增加微电网与电网交换功率的约束限值和提高冷热电联产系统制冷量上限值,可以减小微电网的安装成本和提高微电网可靠性。对于储能装置,本文只考虑了蓄电池的储电装置,由于“以电定热(冷)”的运行方式会有热能损失,所以带有蓄热装置的微电网将是今后研究的重点。

参考文献

- [1] 黄伟,孙昶辉,吴子平,等.含分布式发电系统的微网技术研究综述[J].电网技术,2009,33(9):14-18.
- [2] Ipakchi A, Albuyeh F. Grid of the future [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2009, 7(2): 52-62.
- [3] Jiayi H, Chuanwen J, Rong X. A review on distributed energy resources and microgrid [J]. Renew and Sustainable Energy Reviews, 2008, 12(9): 2472-2483.
- [4] 冯庆东.分布式发电及微网相关问题研究[J].电测与仪表,2013,50(2):54-59.
- [5] Shahidehpour M, Clair J F. A functional microgrid for enhancing reliability, sustainability, energy efficiency [J]. Electricity Journal, 2012, 25(8): 21-28.
- [6] 魏兵,王志伟,李莉,等.微型燃气轮机冷热电联产系统经济性分析[J].热力发电,2007,36(9):1-5.
- [7] 苏玲,张建华,王利,等.微电网相关问题及技术研究[J].电力系统保护与控制,2010,38(19):235-239.
- [8] Shahidehpour M. Role of smart microgrid in a perfect power system [C]. Power and Energy Society General Meeting, 2010: 1.
- [9] Hernandez-Aramburo C A, Green T C, Mugniot N. Fuel consumption minimization of a microgrid [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2005, 41(3): 673-681.
- [10] Mago P J, Hueffed A K. Evaluation of a turbine driven CCHP system for large office buildings under different operating strategies [J]. Energy and Buildings, 2010, 42(10): 1628-1636.
- [11] Wang J J, Zhai Z J, Jing Y Y, et al. Particle swarm optimization for redundant building cooling heating and power system [J]. Applied Energy, 2010, 87(12): 3668-3679.
- [12] 覃健.微网冷热电联供系统经济性优化研究[D].北京:华北电力大学,2013.
- [13] Campanari S, Boncompagni L, Macchi E. Micro-turbines and trigeneration: optimization strategies and multiple engine configuration effects [J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2004, 126(1): 92-101.
- [14] 李乐.微网的经济运行研究[D].北京:华北电力大学,2011.
- [15] 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):38-42.
- [16] Mohamed F A, Koivo H N. Online management of microgrid with battery storage using multiobjective optimization [C]. International Conference on Power Engineering, 2007: 231-236.
- [17] 李国庆,张慧杰,王鹤,等.计及储能装置削峰填谷的微网优化运行[J].电测与仪表,2013,50(10):73-78.
- [18] Morgantown W. Emission rates for new DG technologies: the regulatory assistance project [EB/OL]. 2001-05. <http://www.raponline.org/Proj Docs/DREms Rul/Collfile/DGEmissions May2001.pdf>.

(收稿日期:2016-03-31) **EA**