

# 基于太阳能和生物质能的农村分布式供能系统研究

韩中合, 祁 超, 丁 敬, 刘明浩, 王 珊

(华北电力大学电站设备状态监测与控制教育部重点实验室, 保定 071003)

**摘 要:** 建立基于太阳能和生物质的农村户用型分布式供能系统。通过系统全工况动态数学模型,以中国北方寒冷地区典型新农村建筑为研究对象,分析系统运行特性。结果表明:系统与农村居民建筑负荷匹配较好,平均一次能源利用率达74%;相比常规系统可减少散煤燃烧2.85 t,减排CO<sub>2</sub> 8.23 t,每年节约费用5446元。

**关键词:** 分布式发电; 生物质; 太阳能; 农村供能; 散煤替代

**中图分类号:** TK6; TK123

**文献标识码:** A

## 0 引 言

农村供暖由于热用户分散及单位面积热负荷小,不具备大规模集中供暖条件,故目前主要采用散煤燃烧。因散煤燃烧未采取除尘、脱硫等环保措施,排放的污染物质是火电燃煤的5~10倍<sup>[1]</sup>。散煤燃烧是产生雾霾的主要因素,京津冀主要城市的一次PM<sub>2.5</sub>在冬季采暖期间约增加50%<sup>[2]</sup>。探索清洁高效的农村供暖技术,实现散煤燃烧替代,对优化能源结构和大气环境治理具有重要意义。

分布式供能系统可同时为用户提供冷/热及电负荷,在能源、经济和环境效益上相比于传统供能方式均存在较大优势。一方面,农村存在丰富的太阳能和生物质资源,构建多能互补的分布式供能系统为用户提供供暖、生活热水和电负荷,可减少散煤燃烧并优化能源结构;另一方面,微型化是分布式能源的发展方向<sup>[3]</sup>,国际能源署的“IEA/ECBCS Annex 42”项目对户用型内燃机和燃料电池做了深入的系统研究,并将模型在世界范围内验证应用,为户用型分布式能源系统的发展做了重要铺垫<sup>[4]</sup>。现阶段诸多学者<sup>[3,5,6]</sup>从理论基础、性能分析、系统优化等方面对多能互补分布式能源系统做研究,但对象均为大型商业楼或工业园区。

考虑到我国农村资源禀赋和负荷特点,将生物质、太阳能与户用型内燃机结合的分布式能源系统

的研究很少。基于此,本文提出太阳能和生物质互补的户用型分布式供能系统,建立系统主要设备数学模型,以我国北方寒冷地区石家庄典型单户新农村建筑为对象,在预测供暖、用电和生活热水负荷的基础上,分析系统全工况性能,并从能效、经济和环境3个方面与常规系统进行比较,探讨该系统在我国农村的适用性和可行性。

## 1 系统构建

系统以太阳能和生物质为能量来源,为用户提供供暖、电、生活热水负荷,结构如图1所示。生物质原料在厌氧发生器里厌氧发酵,产生低浓度沼气,经过脱水等净化后储存在储气器里供内燃机使用。内燃机利用沼气发电,余热经缸套水换热器和烟气换热器生产热水进入蓄热器。太阳集热器收集太阳辐射能产生热水进入蓄热器。因沼气在适宜恒温条件下产气率高,故蓄热器中的热量一部分进入厌氧发生器加热进料并维持恒定发酵温度,另一部分用来供暖和提供生活热水。为保证系统可靠性,当集热器和内燃机余热不足时,所缺负荷由热泵补充,不足电负荷由电网补充。控制系统根据热、电平衡控制内燃机和热泵的启停、功率输出及电网的接入。由于非供暖期用户热负荷较小,厌氧发酵装置和内燃机不工作。

收稿日期: 2017-05-12

基金项目: 国家科技支撑计划(2014BAA06B01)

通信作者: 韩中合(1964—),男,博士、教授、博士生导师,主要从事低温余热利用、新能源及分布式能源方面的研究。  
han\_zhonghe@163.com

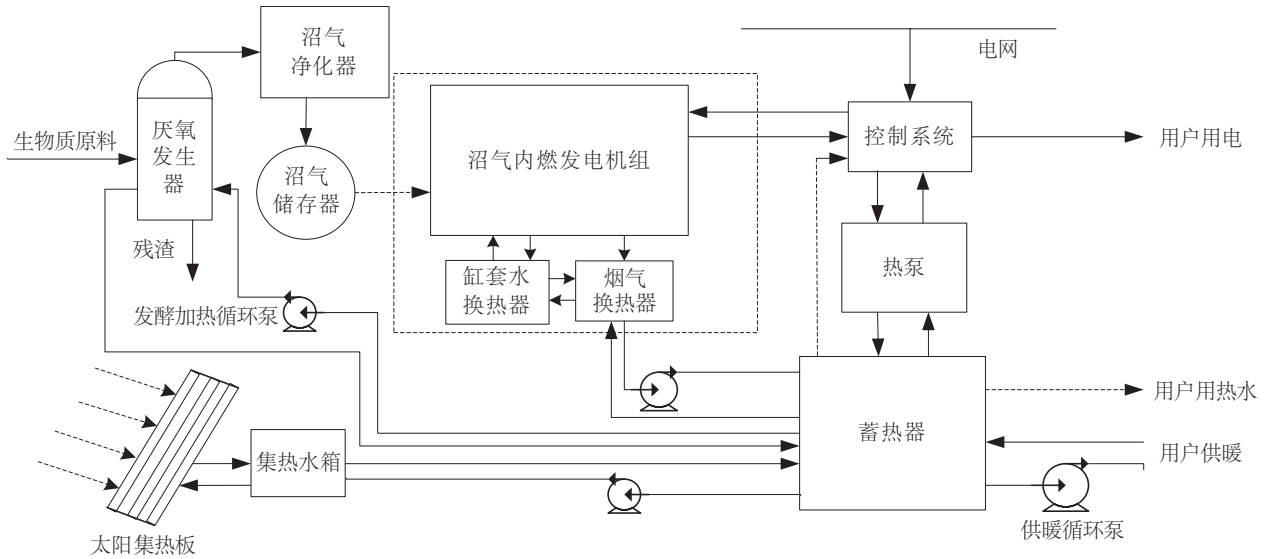


图1 太阳能和生物质能互补供能系统

Fig. 1 Solar energy and biomass energy complementary power supply system

## 2 系统模型

### 2.1 厌氧反应器

厌氧反应器模型采用文献[7]提出的甲烷动力学方程。沼气池体积和池容产气率分别为:

$$V_a = \frac{q_b \times 3600 \times 24 \times \eta_2}{\eta_1 \times \gamma_v \times \varepsilon} \quad (1)$$

$$\gamma_v = \frac{B_0 S_0}{HRT} \left( 1 - \frac{K}{HRT \mu_m - 1 + K} \right) \quad (2)$$

式中,  $V_a$ ——沼气池体积,  $\text{m}^3$ ;  $q_b$ ——所需沼气体积流量,  $\text{m}^3/\text{s}$ ;  $\eta_1$ 、 $\eta_2$ ——沼气净化前后的甲烷含量, %;  $\gamma_v$ ——沼气池容产气率,  $\text{m}^3/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ ;  $\varepsilon$ ——沼气池容积利用系数, 一般取 85%;  $B_0$ ——有机废弃物的极限甲烷产率,  $\text{m}^3/\text{kg}$ ;  $S_0$ ——进料底物浓度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $HRT$ ——水力停留时间,  $\text{d}$ ;  $\mu_m$ ——微生物最大生长比率,  $\text{d}^{-1}$ ;  $K$ ——动力学参数;  $\mu_m$  和  $K$  值参见文献[7]。

温度是生物质厌氧发酵的重要影响因素, 根据文献[8], 中高温条件下厌氧发酵最适宜温度为 35 和 55  $^{\circ}\text{C}$ 。为保证产气率, 需维持反应温度  $T_{AD}$  为适应的恒定温度, 进料增温耗热量为:

$$Q_{an} = \sum_i c_{p,i} m_i (T_{AD} - T_0) \quad (3)$$

式中,  $c_{p,i}$ ——第  $i$  种生物质比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;

$m_i$ ——第  $i$  种生物质进料质量,  $\text{kg}$ ;  $T_0$ ——环境温度,  $\text{K}$ 。

沼气池内池为圆柱体, 选用 304 不锈钢作为主体材料, 内池外层为 10 cm 厚的空腔, 用来盛装加热盘管, 加热沼气池, 沼气池外壁覆盖 15 cm 厚的硬质聚氨酯保温材料。

沼气池顶部和底面散热为平板散热, 则:

$$Q_n = \frac{T_{AD} - T_0}{1/Ah_1 + \delta/\lambda + 1/Ah_2} \quad (4)$$

式中,  $Q_n$ ——沼气池顶部和底面散热的热流密度,  $\text{W}$ ;  $T_{AD}$ ——反应温度,  $\text{K}$ ;  $h_1$ 、 $h_2$ ——壁内和壁外的对流传热系数;  $\delta$ ——壁厚,  $\text{m}$ ;  $\lambda$ ——壁的导热系数;  $A$ ——散热面积,  $\text{m}^2$ 。

侧面为圆柱体传热模型:

$$Q_t = \frac{T_{AD} - T_0}{1/Ah_1 + \ln(d_2/d_1)/2\pi l\lambda + 1/Ah_2} \quad (5)$$

式中,  $d_1$ 、 $d_2$ ——圆柱的内、外径,  $\text{m}$ ;  $l$ ——圆柱的高,  $\text{m}$ 。

### 2.2 内燃机

内燃机稳定运行时能量转换关系为:

$$P_s = \eta_e P_g \quad (6)$$

$$P_h = \eta_h P_g \quad (7)$$

$$P_g = m_f Q_{net} \quad (8)$$

式中,  $P_s$ ——输出电功率,  $\text{kW}$ ;  $P_h$ ——输出热功

率, kW;  $\eta_e$  ——电效率;  $\eta_h$  ——热效率;  $P_g$  ——燃料输出功率, kW;  $m_f$  ——燃料质量流量, kg/s;  $Q_{net}$  ——燃料低位发热量, kJ/kg。

在非稳定工况下, 内燃机输出功率  $P$  随外界负荷变化, 但变化速率受内燃机结构的限制:

$$\frac{dP}{dt} = \frac{|P_{demand}^{t+\Delta t} - P_s^t|}{\Delta t} \quad (9)$$

$$P_s^{t+\Delta t} = \begin{cases} P_{demand}^{t+\Delta t}, & \frac{dP}{dt} \leq \left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max} \\ P_s^t + \frac{dP}{dt}, & \frac{dP}{dt} > \left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max} \end{cases} \quad (10)$$

式中,  $\frac{dP}{dt}$  ——功率变化率, kW/s;  $P_s^t$  —— $t$  时刻电功率, kW;  $P_s^{t+\Delta t}$  —— $t+\Delta t$  时刻电功率, kW;  $P_{demand}^{t+\Delta t}$  —— $t+\Delta t$  时刻的电负荷, kW;  $\left(\frac{dP}{dt}\right)_{\max}$  ——功率最大变化率, kW/s。

### 2.3 太阳集热器

太阳集热器分为真空管和平板 2 大类。真空管集热器热损小、保温性能好, 在环境温度较低和进口水温较高情况下仍能保持较高的效率; 平板集热器与外界的热对流和热辐射较大, 当环境温度较低时工作性能较差。本文研究的建筑位于冬季气温较低的河北省石家庄, 因平板集热器工作性能较差, 而气温低的冬季正是热负荷需求最大时, 需尽可能多地利用太阳能, 减少内燃机出力, 所以应采用真空管集热器。

真空管集热器的效率方程为:

$$\eta_{hc} = \eta_{hc0} - U_{hcl}(T_{hc} - T_0)/G \quad (11)$$

式中,  $\eta_{hc}$  ——集热器效率, %;  $\eta_{hc0}$  ——瞬时效率截距, %;  $U_{hcl}$  ——集热器的热损系数, W/(m<sup>2</sup>·K);  $T_{hc}$  ——集热器工作温度, K;  $G$  ——太阳辐射强度, W/m<sup>2</sup>。

面积为  $S_{hc}$  的集热器吸热功率  $q_{hc}$  为:

$$q_{hc} = \eta_{hc} G S_{hc} \quad (12)$$

### 2.4 空气源热泵

热泵性能系数  $COP$  定义为热泵制热功率  $Q_{hp}$  与压缩机耗功  $W_{hp}$  的比值:

$$COP = \frac{Q_{hp}}{W_{hp}} \quad (13)$$

### 2.5 蓄热水箱

蓄热水箱在蓄热温差在  $\Delta T$  时的蓄热量如

式(14)。蓄热水箱在蓄热的过程中会存在热量损失, 假设每过 1 小时, 热量损失 1%。

$$Q_{\text{tank}} = \rho_w V_{\text{tank}} C_w \Delta T \quad (14)$$

式中,  $Q_{\text{tank}}$  ——蓄热水箱最大蓄热量, kJ;  $\rho_w$  ——水的密度, kg/m<sup>3</sup>;  $V_{\text{tank}}$  ——蓄热水箱容积, m<sup>3</sup>;  $C_w$  ——水的比热容, J/(kg·K)。

## 3 负荷预测及分析

以石家庄的农村典型新农村住宅为研究对象, 住宅分为 2 层——有客厅 2 间, 卧室 4 间, 厨房 1 间, 卫生间 2 间, 总建筑面积为 232 m<sup>2</sup>, 人口为 6 人。电负荷主要分为 3 大类: 1) 照明负荷, 根据《GB 50034—2013 建筑照明标准》计算; 2) 家用电器负荷, 根据农村居民电器种类和电器作息时间计算; 3) 供能系统中热泵和循环泵的用电负荷, 根据系统运行情况计算。采用清华大学开发的 DeST 软件计算, 根据实建筑模型, 再以石家庄典型气象数据为基础, 设定室内供暖温度为 16 ℃, 计算得到全年逐时热负荷。生活热水负荷根据《GB 50015—2010 建筑给排水设计规范》, 结合每人用水量及作息时间得到。

北方供暖时间一般为 11 月 15 日~次年 3 月 15 日, 但模拟结果表明 11 月初~3 月底一直有热负荷需求, 故设定系统供暖时间为 11 月 1 日~次年 3 月 31 日。图 2 和图 3 分别给出了全年逐时负荷曲线和冬季典型日(1 月 16 日)负荷曲线。由图 2 和图 3 可知, 农村居民建筑电负荷随季节波动很小, 但短小时内波动很大, 变化频率快, 类似于波形中的“高频率等幅振荡”, 供暖期因循环泵运行, 电负荷在非供暖期的基础上上移, 平均电负荷较非供暖期大。生活热水负荷与电负荷变化相似, 区别在于季节性较强, 夏季因环境温度高, 生活热水负荷明显低于其他季节。供暖热负荷远大于电负荷, 且波动较大。整体而言, 农村居民建筑负荷绝对值小且波动大, 与工业园区和商业建筑存在本质差别, 工业园区和商业建筑分布式供暖系统的成功经验并不能完全用于农村居民建筑, 需根据负荷特点和资源禀赋做针对性研究。

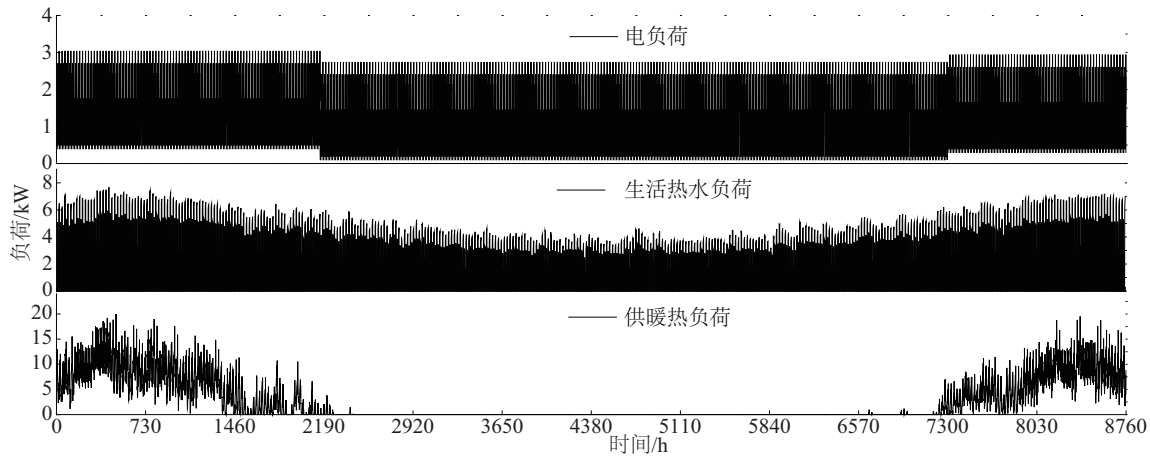


图2 全年逐时供暖、生活热水、电负荷

Fig. 2 Annual hourly heating, domestic hot water and electricity load

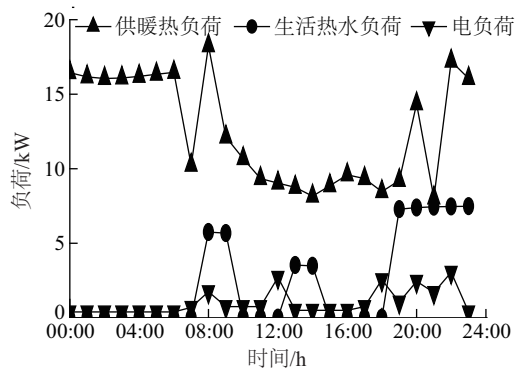


图3 冬季典型日负荷

Fig. 3 Typical daily loads in winter

电平衡得到热泵功率和电网补电量。具体参数和来源见表1。

表1 系统参数  
Table 1 System parameter

设备	参数	数值
内燃机 <sup>[10]</sup>	最大电功率/kW	6.00
	最大热功率/kW	15.00
	最小热功率/kW	2.00
	功率最大变化率/kW·s <sup>-1</sup>	0.76
太阳集热器	面积/m <sup>2</sup>	25
	瞬时效率截距	0.6
	热损系数/W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup>	2.5
	反应温度/℃	35
厌氧反应器 <sup>[9]</sup>	进物料底料浓度/kg·m <sup>-3</sup>	60
	水力停留时间/d	15
	有机物极限甲烷产率/m <sup>3</sup> ·kg <sup>-1</sup>	0.4
	沼气池内径/m	2
蓄热器	体积/m <sup>3</sup>	4
	最大蓄热温差/℃	40
	最小蓄热温差/℃	5
热泵	参照克莱克空气源热泵 COP性能曲线	

## 4 系统热力性能

### 4.1 参数界定及运行模式

内燃机选用国际能源署“IEA/ECBCS Annex 42”项目开发的户用型内燃机模型。因热负荷明显高于电负荷,内燃机采用以热定电的运行模式。根据Rosato等<sup>[9]</sup>的研究结果,拟合出功率-效率曲线代入内燃机模型中。根据选定的内燃机参数试算内燃机每日最大进气量,结合发酵动力学模型得到沼气池体积设定沼气池内径,计算得到其他物理尺寸,进一步得到沼气池热负荷,其具体计算参见宋清源<sup>[10]</sup>的研究。设定集热器面积,再根据集热器效率曲线得到集热器效率。蓄热器对热负荷的削峰填谷,降低系统最大配置容量,提高系统供能可靠性和连续性,其容积根据保证供能可靠性的同时尽可能减少成本的原则经多次试算得到。最后,根据热平衡和

### 4.2 运行性能分析

根据系统数学模型及参数,编写 Matlab 仿真程序,将前文得到的全年逐时供暖、生活热水和电负荷进行差分,以1 s为时间步长,模拟系统全年动态性能。为便于表达,将结果按天进行累加得到全年



逐天性能曲线。

供暖期热负荷包括供暖热负荷、生活热水负荷、厌氧反应器新增物料加热负荷和保温负荷,非供暖期只有生活热水负荷。非供暖期,太阳集热器提供热负荷,不足部分通过热泵补充。供暖期,供暖热负荷和生活热水负荷先由太阳集热器提供,不足部分通过内燃机余热提供,且内燃机供热功率需满足最值和最大变化速率约束,当内燃机不足以满足热负荷需求时,蓄热器补充不足部分,同时蓄热器也需满足最大蓄热和最小蓄热约束,当蓄热低于最小蓄热时热泵工作,直至蓄热等于最小蓄热。从图 4a 可看到,非供暖期中间时段,因热负荷小,集热器基本能满足热负荷需求,非供暖期两端,集热器能满足大部分热负荷,少量热负荷需要通过热泵补充。供暖期因太阳能辐射强度降低,集热器功率较小,绝大多数热负荷通过内燃机提供,热泵在极限负荷日贡献较大,尤其 1 月份中下旬热负荷达到峰值,热泵在此时段贡献最大。具体数据上,全年供暖热负荷 23022 kWh,生活热水负荷 13990 kWh,厌氧反应器热负荷 6844 kWh,集热器供热 7860 kWh,内燃机供热 27068 kWh,热泵补热 10777 kWh。全年电平衡如图 4b 所示,非供暖期,内燃机不运行,电负荷完全由电网提供。供暖期,因采用以热定电的方式,内燃机供电由热负荷决定,不足部分电网补充,考虑到我国农村现有电网条件,不考虑多余电网上网收益,这对系统效率造成一定影响,将随分布式能源上网技术的发展逐步得到解决。从数据上看,全年电负荷 7279 kWh,热泵加热所需电负荷 3175 kWh,内燃机发电 4947 kWh,电网供电 5507 kWh。

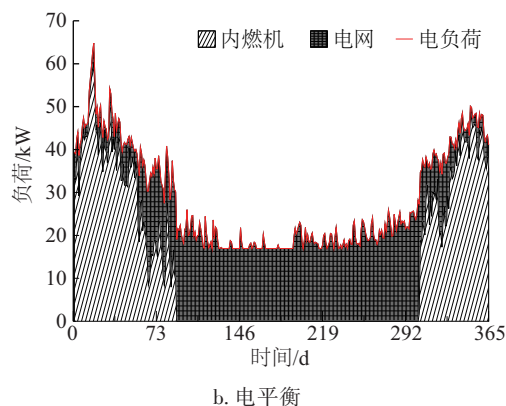
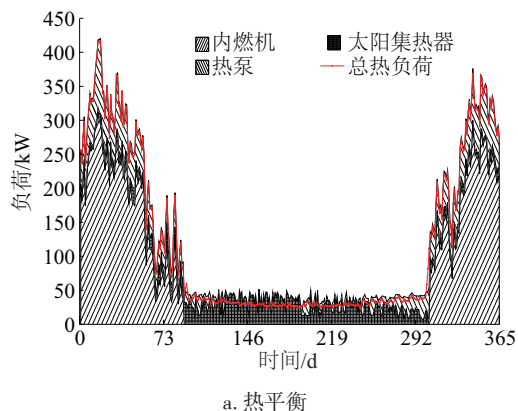


图 4 全年逐天热平衡及电平衡图

Fig. 4 Annual daily heating and electricity balances

典型日热、电平衡如图 5 所示。因为夜间环境温度低,夜间平均热负荷较白天大。需要说明的是,图 5 中典型日热负荷并非逐时平衡,这是因为蓄热器的存在一方面延迟了热负荷响应,如 07:00~08:00 一部分热负荷需求在 08:00~09:00 得到响应,另一方面降低了最大供应热负荷,如 10:00~11:00、

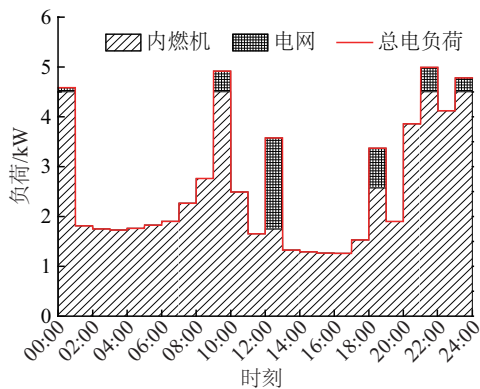
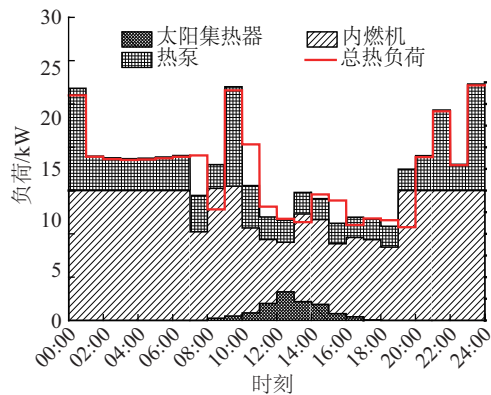


图 5 冬季典型日热、电平衡

Fig. 5 Typical daily heating & electricity balances in winter

15:00~16:00 等,蓄热器起到降低系统配置容量、提高系统可靠性的作用。对于典型日电平衡,共出现6个内燃机发电无法满足电负荷的时段。因典型日热负荷需求较大,热泵功率较大,造成典型日夜间电负荷大于白天,这并不是电负荷常规特性。正常情况下,白天因人员活动,电负荷应大于夜间。

4.3 效益分析

4.3.1 能源效益

用一次能源利用率评价能源效益。系统一次能源利用率定义为:

$$PER = \frac{P_e + P_{heat} + P_{water}}{P_{solar} + m_f Q_{net} + P_{grid} / \eta_{plant}} \quad (15)$$

式中,  $P_e$  ——电负荷, kW;  $P_{heat}$  ——供暖热负荷, kW;  $P_{water}$  ——生活热水负荷, kW;  $m_f$  ——内燃机燃料质量流量, kg/s;  $P_{solar}$  ——集热器功率, kW;  $P_{grid}$  ——电网补电功率, kW;  $\eta_{plant}$  ——电厂发电效率, %。

如图6所示,系统全年逐天一次能源利用率均在0.5以上,供暖期平均一次能源利用率较非供暖期高且波动小,主要因为供暖期内燃机一次能源利用率高。整体而言,系统具有较高的一次能源利用率,平均值为0.74。

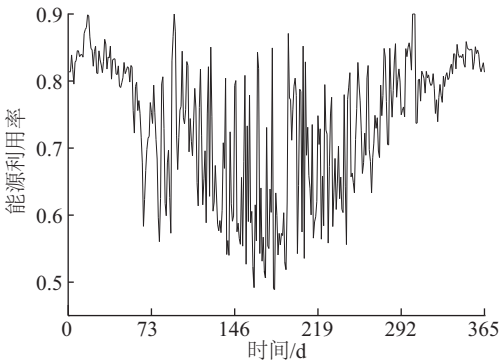


图6 一次能源利用率

Fig. 6 Primary energy rate of system

4.3.2 环境效益

用碳减排量来评价环境效益。系统减少碳排放主要从以下3个方面入手:1)沼气和内燃机改变了生物质的利用方式,避免了生物质的直接焚烧,由于生物质总量不变,根据物质守恒,可认为内燃机碳排放量与直接燃烧相当;2)减少了冬季取暖散煤的燃烧碳排放;3)减少了用电量,进而减少了火力发电厂燃煤排放。假设常规系统电负荷由电网提供;供暖期生活热水负荷和供暖负荷由锅炉燃烧

散煤提供,效率为35%;非供暖期生活热水负荷由电加热器提供,效率为95%。根据4.2节中相关数据,得到系统全年可减少散煤消耗量2.85 t,减少电网用电量7471 kWh,由此减排的CO<sub>2</sub>达8.23 t。

4.3.3 经济效益

用投资回收期评价系统经济效益。当年净收益相同时,投资回收期计算模型为<sup>[11]</sup>:

$$T_s = \frac{I}{A} \quad (16)$$

式中,  $T_s$  ——投资回收期, a;  $I$  ——系统初投资, 万元;  $A$  ——净现金流入量, 万元。

如表2所示,系统总初投资约为8.5万元,但常规系统需要电加热器和燃煤锅炉,假设两者投资之和为1万元,故可认为分布式能源系统初投资为7.5万元。分布式系统运行费用为电网补电量产生的费用,而满足相同负荷需求时常规系统年运行费用为电网用电产生的电费和煤炭购买费用之和,以两者之差为现金流入量,代入式(16)得到系统投资回收期为13.8 a,计算参数及结果详见表2。

表2 系统环境效益和经济效益

Table 2 Environmental and economic benefits of system		
项目	参数	数值
环境效益	散煤消耗量(折标后)/t	2.85
	常规系统电网耗电量/kWh	12978
	分布式系统电网耗电量/kWh	5507
	减少的电网电量/kWh	7471
	标煤CO <sub>2</sub> 排放系数/t·CO <sub>2</sub> ·tce <sup>-1</sup>	2.66
	电的CO <sub>2</sub> 排放系数 <sup>[12]</sup> /g·kWh <sup>-1</sup>	86.47
	碳减排量/t	8.23
经济效益	厌氧发酵装置造价/万元	1.0
	太阳能集热器造价/万元	0.5
	热泵造价/万元	1.0
	蓄热水箱造价/万元	0.5
	控制系统造价/万元	0.5
	沼气内燃机造价/万元	5.0
	煤炭价格/元·t <sup>-1</sup>	600
	电网电价/元·kWh <sup>-1</sup>	0.5
	常规系统年运行费用/元	8200
	分布式系统年运行费用/元	2754
	投资回收期/a	13.8

为判断项目承受风险能力,假设初投资、煤炭价格和电价在基准的基础上上下浮动 10%,得到系统动态投资回收期见图 7。从图 7 可看出,电价和煤炭价格越高初投资越小,系统投资回收期越短。当变化幅度不超过 10%时,最大投资回收期为 15.1 a。系统中主要部件如内燃机的设计寿命超过 20 a,故在热经济学上系统是可行的。这是在系统多余电量不上网以及不计算国家对新能源相关补贴的基础上得到的。

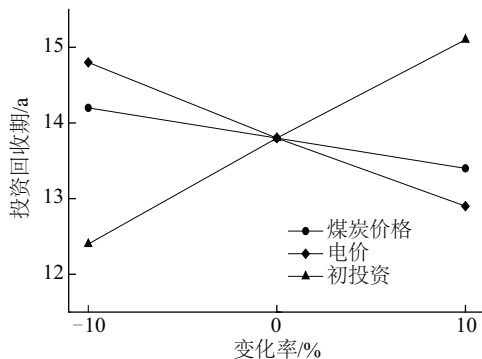


图 7 系统经济效益敏感性分析

Fig. 7 Sensitivity analysis of system economic benefit

不可否认对于农村用户而言,负担 7.5 万元的一次性初投资有一定困难,13.8 a 的投资回收期也相对较长。如果考虑资金的时间成本,投资回收期将更长,所以需要国家的政策倾斜及设立基金、贷款优惠等方式,分级承担投资。另外国家在应对气候变化、调整能源结构的战略中有对分布式光伏、风电等新能源给予电价补贴及电量优先上网等政策,若本文系统享受相同的政策,将进一步提高其经济性。

## 5 结 论

1)农村建筑负荷小且波动大,与工业园区和商业建筑存在本质差别,需根据负荷特点和资源禀赋做针对性的研究,基于太阳能和生物质的分布式供能系统与农村居民建筑负荷匹配性强,平均一次能源利用率达 74%。

2)基于太阳能和生物质的分布式供能系统具有良好的环境效益,经济上可行。相比常规系统,每年可减排  $\text{CO}_2$  8.23 t,投资回收期为 13.8 a。若国家给予政策支持,解决初投资、多余电量上网的问题,将进一步提高其经济性,促进系统大范围推广

和应用。

3)基于太阳能和生物质的分布式供能系统可充分利用农村丰富的太阳能和生物质资源,解决农村用电、供暖和生活热水需求,减少供暖散煤燃烧,为农村清洁供暖提供参考,也为我国能源结构调整和大气环境治理提供借鉴。

## [参考文献]

- [1] 李雪玉, 杨富强. 我国雾霾成因分析及散煤治理建议[J]. 煤炭加工与综合利用, 2017, (2): 7—11.
- [1] Li Xueyu, Yang Fuqiang. Analysis of the causes of haze in China and suggestions for the treatment of scattered coal[J]. Coal Processing and Comprehensive Utilization, 2017, (2): 7—11.
- [2] 新华网. 京津冀大气污染防治专家组就重污染天气过程答记者问[EB/OL]. <http://www.xinhuanet.com/2016.12.21>, 2016-12-21.
- [2] Xinhuanet. Beijing-Tianjin-Hebei air pollution control expert group answered the journalists' questions about the heavy pollution of the weather process[EB/OL]. <http://www.xinhuanet.com/2016.12.21>, 2016-12-21.
- [3] 金红光, 隋军, 徐聪, 等. 多能源互补的分布式冷热电联产系统理论与方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3150—3161.
- [3] Jin Hongguang, Sui Jun, Xu Cong, et al. Research on theory and method of multi-energy complementary distributed CCHP system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3150—3161.
- [4] Ferguson A, Kelly N. A generic model specification for combustion-based residential cogeneration devices[R]. IEA/ECBCS Annex 42 Report, 2007.
- [5] 王亚辉, 田瑞, 宋力, 等. 太阳能-天然气分户式供暖系统的运行及节能效果[J]. 农业工程学报, 2013, 29(7): 164—169.
- [5] Wang Yahui, Tian Rui, Song Li, et al. Operation and energy-saving effects of solar-natural gas household heating system[J]. Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(7): 164—169.
- [6] 王泽龙, 田宜水, 赵立欣, 等. 生物质能-太阳能互补供热系统优化设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(19): 178—184.
- [6] Wang Zelong, Tian Yishui, Zhao Lixin, et al. Optimal design of biomass-solar complementary heating system[J]. Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(19): 178—184.

- [7] 浦绍瑞, 钱红亮, 马春燕, 等. 畜禽粪便高温发酵与秸秆热化学处理工艺的耦合[J]. 化工学报, 2015, 66(6): 2220—2226.
- [7] Pu Shaorui, Qian Hongliang, Ma Chunyan, et al. Coupling between thermophilic fermentation of livestock manure and thermochemical treatment of straw[J]. CIESC Journal, 2015, 66(6): 2220—2226.
- [8] Hashimoto A G. Methane from cattle waste: Effects of temperature, hydraulic retention time, and influent substrate concentration on kinetic parameter  $K^*$  [J]. Biotechnology & Bioengineering, 1982, 24(9): 2039—2052.
- [9] Rosato A, Sibilio S. Calibration and validation of a model for simulating thermal and electric performance of an internal combustion engine-based micro-cogeneration device[J]. Applied Thermal Engineering, 2012, (s45-46): 79—98.
- [10] 宋清源. 太阳能和生物质能互补的冷热电联产系统研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2014.
- [10] Song Qingyuan. The research of combined cooling heating and power system based on solar energy and biomass energy[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014.
- [12] 陈珠明. 投资回收期研究[J]. 工业工程, 2001, 4(1): 41—44.
- [11] Chen Zhuming. Research for the term of return of investment[J]. Industrial Engineering Journal, 2001, 4(1): 41—44.
- [12] 钱科军, 袁越, 石晓丹, 等. 分布式发电的环境效益分析[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(29): 11—15.
- [12] Qian Kejun, Yuan Yue, Shi Xiaodan, et al. Environmental benefits analysis of distributed generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(29): 11—15.

## RESEARCH ON DISTRIBUTED ENERGY SUPPLY SYSTEM BASED ON SOLAR ENERGY AND BIOMASS ENERGY IN RURAL AREA

Han Zhonghe, Qi Chao, Ding Jing, Liu Minghao, Wang Shan

(Key Lab of Condition Monitoring and Control for Power Plant Equipment, North China Electric Power University, Ministry of Education, Baoding 071003, China)

**Abstract:** This paper manages to establish a rural household distributed energy supply system based on solar energy and biomass. By applying a dynamic mathematical model of all operating conditions in the system, the operational characteristics of the system can be analyzed, taking the typical new rural buildings in cold areas of northern China as the subject. The results show that the system matches well with the rural residential building load, the average energy utilization rate reaching to 74%. Compared with conventional systems, scattered coal combustion and carbon dioxide emissions can be reduced respectively by 2.85 tons and 8.23 tons, saving 5446 Yuan a year.

**Keywords:** distributed generation; biomass; solar energy; rural energy supply; scattered coal substitution