

# 基于流体网络的微型沼燃气发电机系统 数学建模与数字仿真

黎 宾, 张海燕, 严 方  
(广西电力职业技术学院, 南宁 530007)

**摘 要:**微型沼燃气发电机系统城乡可用,是一种具有非常广阔前景的分布式发电系统。根据微型沼燃气发电机的动态特性以及溴化锂制冷原理,建立了广西电力职业技术学院冷热电联供的微型沼燃气发电机系统数学模型,并在此基础上进行了数学建模仿真,为进一步研究农村冷热电联供的微型沼燃气分布式发电系统奠定了基础。

**关键词:**微型沼燃气发电机; 数字仿真; 冷热电联供

**中图分类号:** TM 611

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7167(2017)05-0101-05



## Mathematical Modeling and Digital Simulation of Micro Biogas-Gas Turbine Generator System Based on Fluid Network

LI Bin, ZHANG Haiyan, YAN Fang

(Guangxi Electric Power Institute of Vocational Training, Nanning 530007, China)

**Abstract:** Micro biogas-gas turbine generator system is available in urban and rural areas, is a distributed generation system with very broad prospect. A mathematical model has been built in this paper based on micro biogas-gas turbine generator dynamic characteristics and lithium bromide refrigeration principle, its prototype is the electricity combined cooling heating and power miniature biogas-gas turbine generator system designed by Guangxi Vocational and Technical College, On this basis a mathematical model is established and simulation is tested, these works lay a foundation for further study of distributed miniature marsh gas generation system with function of combined cooling heating and power cogeneration.

**Key words:** micro biogas-gas turbine generator; digital simulation; combined cooling heating and power cogeneration (CCHP)

## 0 引 言

微型沼燃气发电机系统能够充分利用农村富余沼气资源,可以靠近用户用电区域布置,甚至还可建于不

方便架设电线的偏远山区。同时,微型沼燃气发电系统具有可靠性高、寿命长、使用操作简便、环境污染少、建造规划灵活方便、沼燃气互补等优势,是一种非常实用的分布式发电方式<sup>[1-3]</sup>。本系统设计为一独立的微电网系统,含沼燃气轮机、永磁发电机、整流逆变器、余热利用的溴化锂制冷机、孤立电网负荷。微型沼燃气发电机采用径流式叶轮机机械类的离心式压缩机和离心式透平机、发电机以及回热制冷等余热回收系统组成。

建立沼燃气发电机系统模型是进一步探索沼燃气发电机控制系统的基础,目前沼燃气发电机模型大多集中在燃气发电机及逆变系统的模型<sup>[4-7]</sup>,比较少涉及

收稿日期:2016-09-10

基金项目:广西高校优秀中青年骨干教师培养工程项目;广西高校科学技术研究项目(2013YB335);广西高校科学技术研究项目(YB2014547)

作者简介:黎 宾(1972-),男,广西南宁人,硕士,副教授,研究方向:机组运行仿真技术、新能源发电技术。

Tel.: 15007710718; E-mail: lbxdlxy@126.com

整体建模。本文通过流体网络建模方式,在流体网络的基础上,分别建立燃气发电机的压缩机模型、透平机模型、燃烧室模型、回热换热模型、溴化锂制冷系统模型,再通过转子转矩平衡方程、整流逆变模型建立微电网模型。相对于传统的建模方式,流体网络建模更易于实现模块化,且避免了超大微分方程迭代求解的风险。源节点和陷节点概念的引入,更方便流体网络的切割,降低流体网络方程的维数,且更加易于实现仿真系统的模块化编程。

## 1 流体网络建模

流体网络是将整个沼燃气系统、烟气及换热系统、冷却水系统等视为一个整体,将设备、阀门、容器等视为流体网络的节点。在流体网络中遵循两个守恒,一个是质量守恒定律,一个是能量守恒定律。假定流体网络中有  $n$  条分支,  $m$  个节点,则流体网络的平衡方程为<sup>[8-10]</sup>:

$$\mathbf{CH}_r - \mathbf{CP}_f - \mathbf{CH}_p = 0 \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{C} = \{c_{ij}\}_{(n-m+1) \times n}$  为支路的流体方向矩阵,其系数为各支路间的流体方向,  $\mathbf{H}_r$  为流体网络的源节点矩阵,也就是流体网络的动力节点流体压力,  $\mathbf{H}_p$  为流体网络的陷节点矩阵流体压力,也就是流体网络的终结点。流体网络概念取自于电网络概念,  $\mathbf{H}_r$  相当于电网络的发电机节点,  $\mathbf{H}_p$  相当于电网络的负荷节点,  $\mathbf{P}_f$  为流体网络的各分支的阻力矩阵。其中:

$$c_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{分支在回路中,且与回路同向} \\ -1, & \text{分支在回路中,且与回路异向} \\ 0, & \text{分支不在回路中} \end{cases} \quad (2)$$

设各支路关联矩阵为  $\mathbf{B}$ ,在流体网络中流入某节点的各分支质量流量代数和为 0,用基本关联矩阵可以表示为:

$$\sum_{j=1}^n b_{ij} Q_{M_j} = 0 \quad (3)$$

式中:  $i = 1, 2, \dots, m-1$ ;  $\mathbf{B} = \{b_{ij}\}_{(m-1) \times n}$ 。

表达为节点流体质量平衡方程为:

$$\mathbf{BQ} = \mathbf{0} \quad (4)$$

用图论中的余树弦流量简化流体流量质量平衡方程,则有:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{C}^T Q_y \quad (5)$$

式中:  $Q_y$  为流体网络回路中的余树弦支路流量。根据不同的流体管道的流阻计算公式,记  $n$  条流体支路的流体阻尼  $\mathbf{R}$  对角矩阵为:

$$\mathbf{R}_{\text{diag}} = \begin{bmatrix} R_1 & & \\ & \ddots & \\ & & R_n \end{bmatrix} \quad (6)$$

这样用余树弦流量表达的回路流体压力平衡方程为:

$$\begin{aligned} F(Q_y) &= \mathbf{CR}_{\text{diag}} \mathbf{C}^T Q_y - \mathbf{diag} \mathbf{C}^T Q_y - \\ &\quad \mathbf{CP}_f - \mathbf{CH}_p = 0 \end{aligned} \quad (7)$$

按泰勒级数展开即可得流体网络计算迭代公式:

$$Q_y^{k+1} = Q_y^k - \Delta Q_y^k \quad (8)$$

式中,  $\Delta Q_y^k = - \left( \frac{\partial F}{\partial Q_y} \right)^{-1}_{Q_y=Q_y^k} F(Q_y^k)$ 。

如图 1 所示,通过测试,迭代次数 10 次即以上,流体网络方程的收敛效果明显减弱,因此在实际计算中,流体网络迭代计算的判据为迭代 10 次或者  $\Delta < 0.1$ 。

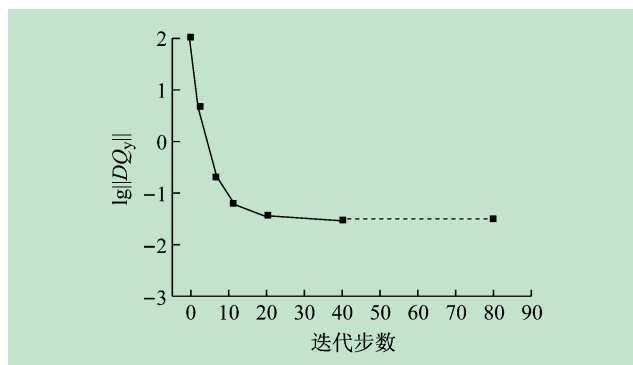


图 1 流体网络迭代收敛效果

## 2 燃气轮机及系统模型

燃气轮机对于燃气而言,为一个燃气流体陷点,对于烟气而言为烟气源点,对于电气而言,为力矩平衡点。因此燃气轮机的燃烧室和压缩机模型为流体网络模型节点,根据手册中的压力曲线可以建立源点、陷点的压力模型,在本文建模中,只需要考虑换热与转矩的平衡方程建模。

记  $n$  为转速,  $M_T$  为透平机转矩,  $M_c$  为压缩机转矩,  $M_f$  为轴摩擦等效转矩,  $M_g$  为发电机转矩,  $J$  为沼燃气轮机的整轴转动惯量,则转矩平衡方程为<sup>[11]</sup>:

$$\frac{\pi}{30} \frac{dJ}{dt} = M_T - M_c - M_f - M_g \quad (9)$$

记燃烧室出口温度为  $T_b$ ,透平机入口温度为  $T_T$ ,管道壁金属温度为  $T_p$ ,  $A$  为单位长度的换热面积,  $l$  为整个燃气轮机换热等效长度,  $d$  为换热部件的金属壁等效厚度,  $\rho$  为换热部件的金属密度,  $c$  为金属比热容,  $\alpha$  为换热系数,  $Q_T$  为透平机燃气流量,  $c_{pg}$  为燃气比热容,则燃烧室和透平机之间的传热方程可以记为<sup>[12]</sup>:

$$\alpha A l \left( \frac{T_b - T_T}{2} - T_p \right) = Q_T C_{pg} (T_b - T_T) = A l d \rho c d T_p / dt \quad (10)$$

记压缩机的出口温度为  $T_{\text{cout}}$ ,回热器出口空气温度为  $T_{\text{raout}}$ ,回热器燃气出口温度  $T_{\text{rgout}}$ ,换热面金属壁温度  $T_m$ ,透平机出口温度为  $T_{T,\text{out}}$ ,  $\alpha_a$  为空气与金属换热系数,  $\alpha_g$  为燃气与金属换热系数,  $A_a$  为空气侧换热面积,  $A_g$  为燃气侧换热面积,  $c_{pa}$  为空气比热容,  $Q_c$  为燃

气机空气流量,  $M_m$  为参与换热的金属总质量, 则沼燃气轮机中的回热器换热与蓄热方程为:

$$Q_c c_{pa} (T_{raout} - T_{cout}) = \alpha_a A_a \left( T_m - \frac{T_{raout} - T_{cout}}{2} \right) \quad (11)$$

$$Q_T c_{pg} (T_{Tout} - T_{rgout}) = \alpha_g A_g \left( \frac{T_{rgout} - T_{Tout}}{2} - T_m \right) \quad (12)$$

$$M_m c \frac{dT_m}{dt} = \alpha_g A_g \left( \frac{T_{rgout} - T_{Tout}}{2} - T_m \right) - \alpha_a A_a \left( T_m - \frac{T_{rgout} - T_{cout}}{2} \right) \quad (13)$$

燃气轮机的回热系统是一个大惯性系统<sup>[13]</sup>, 在实际仿真过程中, 为了得到更为精确的换热参数, 根据流体网络结构将回热系统进行分段分割, 按分布式参数计算处理。每段的参数模型与式(11)、(12)、(13)一致, 只是进出口参数不一致, 逐级传递。理论上回热系统分割越细致, 则仿真计算效果精度会更好, 但计算代价会增加, 建模的复杂度也随之增加。如图2所示, 经过分段仿真试验, 分段15次以上模型计算的精度提高不是很明显, 因此通常将分段定为10~15段比较合适。

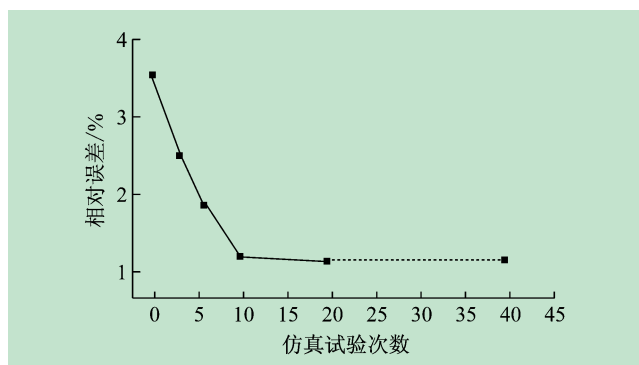


图2 回热模型分段对计算精度的影响

图3所示为10分段后回热器的换热计算结果, 计算结果表明, 回热器的每个换热分段的换热近似线性, 由于热容、流阻等因素影响, 换热效果有逐级降低的趋势, 这与实际数据是吻合的。

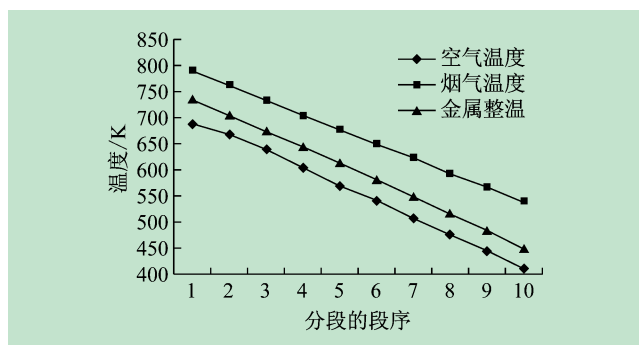


图3 回热器换热计算的稳态分布

在沼燃气轮机发电系统中, 换热为管壁式换热, 即冷热介质均通过管壁作为中间介质进行换热。换热器

本身的热惯性是不能忽略的, 即传入管壁的热量和传出管壁的热量是不一定均衡的, 热量差即金属的蓄热, 因此, 换热器模型可以描述为

$$\frac{dT_m}{dt} = \frac{1}{CM_m} (q_h - q_c) \quad (14)$$

式中:  $q_h = \alpha_h A_h (T_{mh} - T_m)$ ;  $q_c = \alpha_c A_c (T_m - T_{mc})$ 。记  $T_m$  为换热器管壁金属的平均壁温,  $A_h$  为高温侧有效换热面积,  $A_c$  为低温侧有效换热面积,  $\alpha_h$ 、 $\alpha_c$  分别为高温侧介质的换热系数,  $q_h$ 、 $q_c$  分别为金属高温侧和低温侧的放热与吸热量,  $T_{mh}$ 、 $T_{mc}$  分别为换热器热侧和冷侧的算术平均温度。

### 3 溴化锂制冷系统模型

溴化锂制冷系统包括高压发生器、低压发生器、冷凝器、高低温溶液换热器等, 所有部件同样满足工质守恒和能量守恒两大基本定律。质、能守恒同样是通过式(7)的流体网络建模来实现, 分别建立烟气、冷却水、制冷剂、冷剂水的流体网络模型, 迭代求解。

溶液蒸汽侧的进口侧工质为溶液, 筒内工质和出口工质为水蒸汽和溶液两相态, 因此, 筒内工质和出口工质密度和焓值需要计算干度值后求其混合值。溶液蒸汽侧模型为:

$$\frac{dp_c}{dt} = \frac{\sum G_o H_o - \sum G_i H_i - q_c}{V \left( 1 - \frac{c_p}{R} \right)} \quad (15)$$

$$\frac{dH_o}{dt} = \left[ \sum G_o H_o - \sum G_i H_i - q_c - H_o (1 - R/c_p) \right] \left( \sum G_o - \sum G_i \right) / [V_p (1 - R/C_p)] \quad (16)$$

$$V = V_v - V_l \quad (17)$$

式中:  $p$  为压力;  $G$  为工质质量容积;  $H$  为比焓;  $C$  为比容;  $V$  为体积。下标  $i$ 、 $o$ 、 $c$  分别表示进口、出口和容器, 下标  $v$ 、 $l$  分别表示气相和液相。

气液两相控制计算方程为:

$$\frac{dr}{dt} = \alpha_h A_h \frac{T_h - T_{ns}}{G_{ol}} + \frac{1}{\rho \gamma} \frac{dp_0}{d\tau} - \frac{1}{\gamma} \frac{dH_o}{dt} \quad (18)$$

式中:  $r$  为湿度;  $\rho$  为工质密度;  $\gamma$  为汽化潜热。

在冷凝器模型中, 高压冷剂蒸汽作为热源, 进入冷凝器后放热冷凝, 冷却水视为不可压缩流体, 金属壁作为换热介质。同样可将冷凝器分割为若干单位段, 建立冷凝器单元模型:

$$\frac{dp_{hl}}{dt} = \frac{R dT_{hl}}{A dx} (G_{h,i} - G_{h,i-1}) \quad (19)$$

$$\frac{\partial G_{ci}}{\partial t} = \frac{A \partial p_{ci}}{\partial H} - U \sigma \quad (20)$$

$$\frac{\partial T_{h,i}}{\partial t} = - \left( \frac{r_{hl}}{\rho_{vhl}} + \frac{1 - r_{hl}}{\rho_{lhl}} \right) \left[ \frac{G_{h,i}}{A} \frac{\partial T_{h,i}}{\partial x} + \right.$$

$$\frac{S_h \alpha_{h,i}}{LAC_{h,i}} (T_{h,i} - T_{m,i}) \quad (21)$$

式中:下标  $i$  表示第  $i$  分段,下标  $m$  代表金属,  $h$  代表高温,  $c$  代表低温,  $S$  代表体积流量;  $U$  为单位冷凝量,  $\sigma$  为冷凝系数。

溴化锂溶液物性方程为:

$$T = \sum_{i=0}^3 B_i y^i - T_1 \sum_{i=0}^3 A_i y^i \quad (22)$$

式中:  $A$ 、 $B$  为与溶度相关的系数,可查表得到,  $T_1$  为制冷剂水温度,  $y$  为溴化锂浓度。

#### 4 永磁同步发电机以及整流逆变器模型

在仿真系统中,考虑到永磁同步发电机和整流逆变器为系统整体,因此对整个计算模型进行了简化<sup>[14-16]</sup>。

对于理想的无负载永磁同步发电机,其线电压为:

$$u = K_e \omega \sin \omega t \quad (23)$$

式中:  $K_e$  为固定电压值;  $\omega$  为发电机角速度值。

永磁发电机模型采用如图 4 所示的 PMSM 模型,在  $dq$  坐标下的 PMSM 模型算式如下:

$$\frac{L_d di_d}{dt} = u_d - Ri_d - pL_q \omega_m i_q \quad (24)$$

$$\frac{L_q di_q}{dt} = u_q - Ri_q - pL_d \omega_m i_d - \lambda p \omega_m \quad (25)$$

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{T_e - F\omega_m - T_m}{J} \quad (26)$$

$$\frac{de}{dt} = \omega_m \quad (27)$$

$$P_{in} = U_{sa} I_{sa} - U_{sb} I_{sb} - U_{sc} I_{sc} = P_{rec} = P_c + P_{dc} \quad (28)$$

$$P_{dc} = U_{dc} I_{dc} = P_L + P_m \quad (29)$$

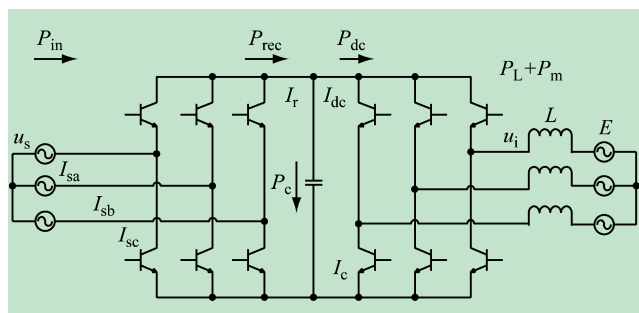


图 4 PMSM 模型

全桥直流整流滤波器输出可简化为:

$$\begin{bmatrix} M_a \\ M_b \\ M_c \end{bmatrix} = M_c \begin{bmatrix} \cos(\omega t + \sigma) \\ \cos(\omega t - 2\pi/3 + \sigma) \\ \cos(\omega t - 4\pi/3 + \sigma) \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$d_i = m_i/2 + 1/2 \quad (31)$$

$$u_i = U_{dc} m_i/2 \quad (32)$$

$$\begin{bmatrix} U_{sd} \\ U_{sq} \end{bmatrix} = \frac{M_1 U_{dc}}{2} \begin{bmatrix} \cos \sigma_1 \\ \sin \sigma_1 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$\begin{bmatrix} U_d \\ U_q \end{bmatrix} = \frac{M_2 U_{dc}}{2} \begin{bmatrix} \cos \sigma_2 \\ \sin \sigma_2 \end{bmatrix} \quad (34)$$

式中:电枢电压为  $U_{si}$ ,网侧变换输出电压为  $U_i$ ,  $d_i$  为占空比,  $m_i$  为调制度,  $u_i$  为三相整流器输入电压,  $U_{dc}$  为直流电压,  $U_{sd}$ 、 $U_{sq}$ 、 $U_d$ 、 $U_q$  分别为机侧和网侧  $dq$  变换后电压。

#### 5 仿真结果与分析

本文主要测试在稳态情况下负荷变动对沼燃气发电机的影响,在 130 s 时微型沼燃气发电机负荷从 0 kW 上升至 30 kW,大约 3 s 燃料等达到平衡,再在 190 s 时负荷从 30 kW 上升至 80 kW,大约 3 s 燃料等达到平衡,再在 220 s 时达到额定功率 100 kW,3 s 达到平衡,250 s 下降至 40 kW,5 s 左右达到平衡,310 s 后下降至 30 kW,5 s 达到平衡,340 s 后停机。

图 5 是指外部负荷发生变化后沼燃气发电机的负荷设定值变化跟随,为试验的基础条件。图 6 为沼燃气发电机的机械负荷转矩标么值响应曲线,曲线的响应时间低于 3 s,能迅速达到稳态,且机械负荷的标么值对应负荷值是准确的,符合能量守恒条件。图 7 的沼燃气发电机转速基本平衡,响应也比较及时。图 8 的沼燃气发电机燃料跟随同机械负荷跟随同步,响应曲线也是同步的。图 9 所示沼燃气发电机排烟温度的非线性较大,主要受换热器的蓄热影响,因此相对负荷的变动,排烟温度的惯性相对大一些,这一点与实际运行状况是一致的。图 10 所示系统制冷量跟随燃气发电机的负荷,以发电定供冷,制冷的趋势与负荷需求比较接近,但有些延时和滞后,且曲线相对负荷而言波动较大,这一点与实际运行也是比较接近的。

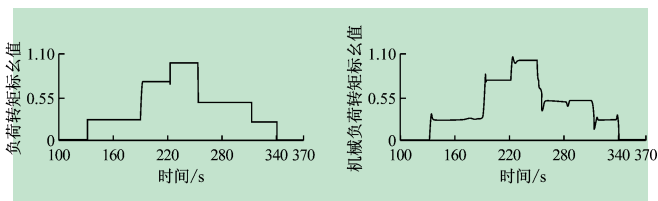


图 5 沼燃气发电机负荷转矩标么值响应曲线

图 6 沼燃气发电机机械负荷转矩标么值响应曲线

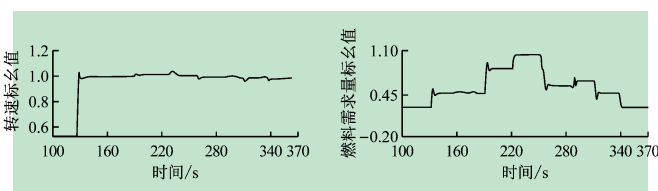


图 7 沼燃气发电机转速标么值响应曲线

图 8 沼燃气发电机燃料标么值响应曲线



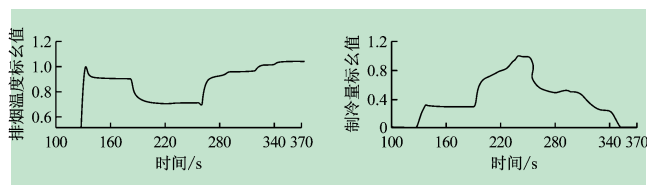


图9 沼燃气发电机排烟温度标么值响应曲线  
图10 沼燃气发电机跟随负荷制冷量标么值响应曲线

## 6 结语

图5~图10的仿真性能曲线表明,本文通过流体网络建立的燃气发电机仿真模型变化趋势与实际运行基本一致,参数计算精度在5%以内,作为精确设计燃气发电机本体模型是不够的,但作为运行参考是足够的。本文工作为进一步研究农村沼燃气发电机系统奠定了基础。

## 参考文献 (References):

- [1] 吴创之,马隆龙.生物质能现代化利用技术[M].北京:化学工业出版社,2003.
- [2] 翁一武,苏明,翁史烈.先进微型燃气轮机的特点与应用前景[J].热能动力工程,2003,18(2):111-116.
- [3] 钱申贤.燃气燃烧原理[M].北京:中国建筑工业出版社,1989.
- [4] 赵克,耿加民,孙力.微型燃气轮机发电系统新型并网控制技术[J].电机与控制学报,2008,12(4):409-414.
- [5] 翁一武,翁史烈,苏明.以微型燃气轮机为核心的分布式供能系统[J].中国电力,2003,36(3):1-4.
- [6] 孙可,韩祯祥,曹一家.微型燃气轮机系统在分布式发电中的应用研究[J].机电工程,2005,22(8):55-60.
- [7] 余涛,童家鹏.微型燃气轮机发电系统的建模与仿真[J].电力系统保护与控制,2009,37(3):27-31.
- [8] 王昱,张光.热力系统流体网络法的研究[J].现代电力,2005,22(2):38-41.
- [9] 倪何,程刚,孙丰瑞.热工流体网络简易模块化建模方法[J].系统仿真学报,2009,21(12):3536-3541.
- [10] 倪纬斗,苟建兵.热动力系统流体网络及算法处理[J].系统仿真学报,1997,9(3):78-83.
- [11] Rowen W I. Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines[J]. Journal of Engineering for Power,1983(105):865-869.
- [12] 杨世铭,陶文铨.传热学[M].北京:高等教育出版社,2006.
- [13] 李政,王德慧,薛亚丽,等.微型燃气轮机的建模研究(上)-动态特性分析[J].动力工程学报,2005,25(1):13-17.
- [14] 王成山,马力,王守相.基于双PWM换流器的微型燃气轮机系统仿真[J].电力系统自动化,2008,32(1):56-60.
- [15] 葛东霞.基于Matlab建模的永磁同步电动机SVPWM控制性能仿真研究[J].实验室研究与探索,2013,32(4):246-249.
- [16] Fethi O, Dessaint LA. Modeling and simulation of the electric part of a grid connected micro turbine[J]. Power Engineering Society General Meeting, 2004(2):2212-2219.
- [17] 秦晓鹏, Qin Xiaopeng. 太阳能燃气集成供热系统设计探讨[J]. 科技创新与生产力, 2010(7):86-88.
- [18] 张立众. 水温一循环水流量串级控制系统的研究与设计[J]. 现代商贸工业, 2008(12):381-382.
- [19] 齐政新, 李岩. 太阳能低温地板辐射采暖系统的探讨[J]. 煤气与热力, 2003, 23(5):312-315.
- [20] 韩晶, 石久. 胜太阳能热水供应系统的经济分析[J]. 长春工程学院学报, 2013(7):21-26.
- [21] 黄海耀. LCA法比较太阳能热水器和燃煤锅炉系统的环境效益[D]. 天津:天津大学, 2004.
- [22] 李文博, 吕建, 解群, 等. 村镇住宅太阳能/沼气联合采暖系统的经济性分析[J]. 天津城市建设学院学报, 2010(2):118-121.
- [23] 张琛. 保定地区太阳能与燃气壁挂炉联合供热系统的研究[D]. 保定:河北大学, 2014.
- [24] Perez De Vinaspre M. Monitoring and analysis of an absorption air-conditioning system[J]. Energy and Buildings, 2004, 36(9):933-943.
- [25] Fu lvio Ardenete, Giorgio Beccali, Maurizio Cellura, et al. Life cycle assessment of a solar thermal collector[J]. Renewable Energy, 2005, 30:1031-1054.
- [26] Onut S Soner. Energy efficiency assessment for the antalya region hotels in turkey[J]. Energy and Buildings, 2006, 38(8):964-971.
- [27] Corgnati S P, Corrado V, Filippi M. A method for heating consumption assessment in existing buildings[J]. A Field Survey Concerning 120 Italian Schools, 2008, 40(5):801-809.

(上接第74页)

## 4 结语

在上海地区,完成了太阳能辅助燃气壁挂炉冬季一月份供生活热水采暖实验,主要得到了以下结论:

在单一供生活热水模式下,天气晴好的天气(平均辐射量大于 $400\text{ W/m}^2$ )情况下太阳能的保证率平均为82%;在多云到阴的天气情况(平均辐射量小于 $250\text{ W/m}^2$ )下太阳能保证率平均值为54%。在供生活热水采暖联合模式下天气晴好的情况下太阳能保证率为10.3%左右;多云到阴的条件下太阳能保证率为5.09%左右。

集热器的瞬时换热量随太阳辐射强度的增加而增加。

## 参考文献 (References):

- [1] 陈艳,成金华.我国能源政策问题研究综述[J].中国能源,2006(10):24-27.
- [2] 赵玉文.我国太阳能利用技术的发展概况和趋势[R].北京:北京太阳能研究所,2006.
- [3] 任东明,张正敏.论中国可再生能源发展的主要问题以及新机制的建立[J].可再生能源,2003(4):1-5.
- [4] 倪纬斗.我国的能源现状与战略对策[J].山西能源与节能,2008(2):1-5.
- [5] 刘寅.远程数据采集系统体系结构研究[D].长沙:中南大学,