

微型燃气轮机发电建模与仿真研究

易桂平, 胡仁杰

(东南大学电气工程学院, 江苏 南京 210096)

摘要: 针对发电用微型燃气轮机, 介绍了不同模式下不同控制方式的数学模型, 基于 PSCAD/EMTDC 仿真平台构建其不同运行模式下的仿真模型。仿真结果验证了在联网时功率参考值变化和孤岛时负荷需求变化的条件下, 微型燃气轮机的动态响应性能良好, 输出功率均能迅速准确地跟踪需求, 暂态过程持续时间短暂。

关键词: 微型燃气轮机; PSCAD/EMTDC; 仿真模型

中图分类号: TM611

文献标志码: B

文章编号: 1009-0665(2014)04-0034-05

近年来, 以风力发电、光伏电池和微型燃气轮机等为代表的分布式发电(DG)技术的发展已成为人们关注的热点。其中, 微型燃气轮机发电系统是一种技术上最为成熟、商业应用前景最为广阔的分布式发电技术, 其相关研究问题已被列为国家“863”专项研究计划。微型燃气轮机一般是指功率在几百千瓦以内的小型热动装置, 与常规发电机组相比, 微型燃气轮机具有寿命长、可靠性高、燃料适应性好、环境污染小和便于灵活控制等优点, 它是分布式发电的最佳方式, 可以靠近用户, 无论对中心城市还是远郊农村甚至边远地区均能适用。本文建立了微型燃气轮机的数学模型, 把微型燃气轮机及电气部分当作一个整体, 利用 PSCAD/EMTDC 分析了微型燃气轮机发电系统在联网与孤岛运行模式下的动态特性。

1 微型燃气轮机发电系统结构

微型燃气轮机采用空气轴承或径流式叶轮机械, 机组尺寸小、结构简单, 能够产生大量品质极佳余热烟气, 其温度在 600℃左右, 利用价值较高, 是目前分布式能源系统特别是小型冷热电联产系统的主要动力设备。微型燃气轮机产品主要包括 2 种结构, 一种为分轴(split-shaft)结构, 另一种为单轴(single-shaft)结构。分轴结构微型燃气轮机动力涡轮与燃气涡轮采用不同转轴, 通过变速齿轮与发电机相连, 由于降低了发电机转速, 可以直接并网运行; 单轴结构微型燃气轮机中燃气涡轮与发电机同轴, 因此发电机转速较高, 需要采用电力电子器件进行整流逆变, 才能接入大电网^[1]。

单轴结构微型燃气轮机发电系统具有系统效率高, 结构紧凑, 可靠性高的特点, 是微型燃气轮机的主流产品, 本文主要研究单轴微型燃气轮机模型及运行特性。典型的单轴结构微型燃气轮机发电系统如图 1 所示。

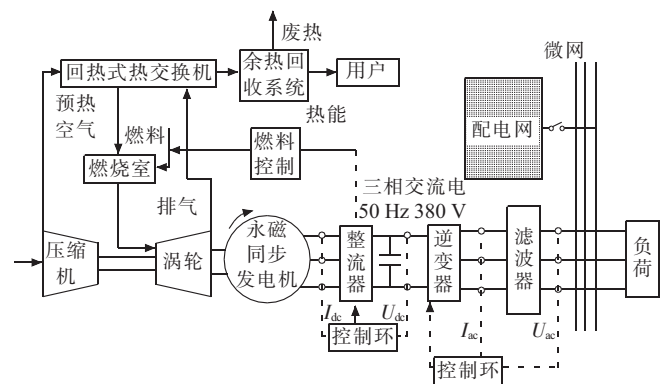


图 1 微型燃气轮机发电系统结构

系统由微型燃气轮机、永磁同步发电机、整流器、逆变器和负荷组成, 其中微型燃气轮机透平包括压缩机、燃料室、能量回收器以及带一个负荷的动力透平机。其基本的工作原理: 从离心式压气机出来的高压空气首先在回热器内经涡轮排气预热, 然后进入燃烧室与燃料混合并得到充分燃烧, 高温燃气输入向心式涡轮做功, 直接带动燃气轮机驱动内置式高速发电机, 通常燃气涡轮旋转速度可高达 30 000~100 000 r/min, 需要采用高能永磁材料(如钕铁硼材料或钕钴材料)的永磁同步发电机, 其产生的高频交流电流经过整流逆变后, 转化为工频交流电能输送至负荷或交流电网^[2]。

2 微型燃气轮机建模分析

(1) 转子方程:

$$\frac{\pi}{30} J \frac{dn}{dt} = M_T - M_c - M_f - M_g \quad (1)$$

式(1)中: n 为转速; M_T , M_c , M_f 和 M_g 分别为透平转矩、压气机转矩、轴系摩擦转矩和发电机转矩; J 为整个轴系的转动惯量^[3]。

(2) 燃烧室和透平之间的热部件不稳定传热方程:

$$\alpha A l \left(\frac{T_B + T_3}{2} - T_p \right) = G_T c_{pg} (T_B - T_3) \quad (2)$$

$$\alpha A l \left(\frac{T_B + T_3}{2} - T_p \right) = A l d p c \frac{dT_p}{dt} \quad (3)$$

式(2,3)中: T_B, T_3, T_p 分别为燃烧室出口温度、透平入口温度和管道金属壁平均温度; α 为沿气流流程换热系数; A 为单位长度上的换热面积; l 是全部气道流程长度; d 为在过渡过程中起作用的热部件金属表面厚度; ρ 是热部件金属的密度; c 为金属比热^[46]。

(3) 由于管道容积的存在,使在过渡过程引起了容积中所容纳气体量的改变,从而造成进、出口流量之间的差异。压气机和燃烧室(回热器)之间的容积方程:

$$V \frac{d\rho_2}{dt} = G_c - G_B \quad (4)$$

式(4)中: V 为是压气机与燃烧室间的管道容积; ρ_2 为管道中空气密度; G_c 和 G_B 分别为压气机出口与燃烧室入口空气流量^[7]。

(4) 燃气轮机系统中的回热器是一个很大的蓄热元件,对整个燃气轮机的动态性能有显著的影响。把回热器作为一个集中容积处理,将再按分布参数研究所得到的结果对其中参数进行适当的修正。对燃气、空气和金属壁面有以下3个方程:

$$G_c c_{pa} (T_2' - T_2) = \alpha_a A_a (T_m - \frac{T_2' + T_2}{2}) \quad (5)$$

$$G_T c_{pg} (T_4 - T_4') = \alpha_g A_g (\frac{T_4' + T_4}{2} - T_m) \quad (6)$$

$$P_m c_m \frac{dT_m}{dt} = \alpha_g A_g (\frac{T_4' + T_4}{2} - T_m) - \alpha_a A_a (T_m - \frac{T_2' + T_2}{2}) \quad (7)$$

式(5—7)中: T_2, T_2' 分别为压气机出口和回热器空气出口温度; T_4, T_4', T_m 分别为透平出口、回热器燃气出口温度和金属壁面的平均温度; c_{pa}, c_{pg}, c_m 分别为空气、燃气和金属壁面的比热; α_a, α_g 分别为空气、燃气与金属壁面的换热系数; A_a, A_g 分别为空气侧和燃气侧的换热面积; G_c, G_T 分别为空气和燃气流量; P_m 为参与换热的金属质量^[8]。

微燃机系统转速控制对控制品质有很大影响,其方程是动态数学模型的一个关键部分。本文考虑调节系统的调速器方程和执行机构方程,采用比例—积分(PI)控制规律,传递方程:

$$X_B = -X_n (\delta + \frac{T_s}{S}) \quad (8)$$

式(8)中: X_B, X_n 分别为对燃料流量和转速的相对增量的拉氏变换; δ 为调节机构的放大倍数; T_s 为调速器积分时间常数。

3 逆变器模型及控制策略

逆变器的作用是接受整流器输出的直流,并将其逆变成工频交流供给负荷。通常根据微网不同的运行方式,对各个微电源采用不同的控制,其中控制形式有

2种:控制原动机部分和控制逆变器部分。由于大部分微电源都采用逆变器作为接口,为了保证控制的统一和简单,本文采用控制逆变器的方式对微电源进行控制。当微网并网运行时,为减少对大电网的冲击,逆变器采用PQ控制,按照指定功率输出来控制其与电网的功率交换,由大电网提供电压和频率的支撑;孤岛运行时,通过控制逆变器来控制负荷端的电压及频率(简称V/f控制),以维持整个微网的电压和频率。另外,通常逆变器输出的工频电流含有谐波,所以要在逆变器输出端加装LC滤波器,滤除开关频率及其邻近频带的高次谐波,使谐波畸变率小于5%。具体的逆变器模型如图2所示,微网供应本地负荷,通过开关BRK接入配电网并网运行;当大电网发生故障时,开关BRK断开,进入孤岛运行,保证负荷电能质量的要求。

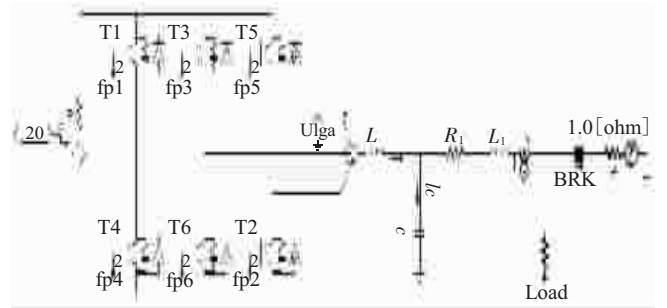


图2 三相PWM逆变器主电路拓扑

3.1 PQ控制

由图2可知,微型燃气轮机发电系统输出功率:

$$\bar{S} = P_{mt} + jQ_{mt} = ui^* \quad (9)$$

式(9)中: P_{mt} 为微型燃气轮机发电系统输出的有功功率; Q_{mt} 为其输出的无功功率; u 为负荷侧电压; i 为负荷侧电流。

通过选择合理的同步旋转轴在派克变换下将逆变器输出电压电流 abc 分量转化为 dq 分量,可得:

$$\bar{S} = P_{mt} + jQ_{mt} = ui^* = (u_d + ju_q)(i_d - ji_q) = (u_d i_d + u_q i_q) + j(u_q i_d - u_d i_q) \quad (10)$$

由此可得电流内环 dq 轴参考值为:

$$\begin{cases} i_{dref} = \frac{P_{mt}}{u_d} \\ i_{qref} = -\frac{Q_{mt}}{u_d} \end{cases} \quad (11)$$

由式(11)可得PQ控制模型,如图3所示。根据有功和无功功率参考值 P_{ntref}, Q_{ntref} 及交流母线电压 u_{abc} ,采用锁相环PLL,进行派克变换,利用上式可得 dq 轴电流参考值,功率控制转变为电流控制。

3.2 V/f控制

当微网孤岛运行时,需通过控制逆变器来控制微型燃气轮机发电系统负荷侧的电压及频率(简称V/f

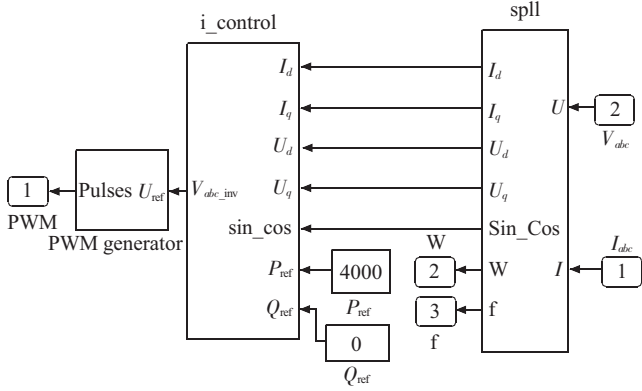


图3 PQ控制模型

控制),从而维持整个微网的电压和频率;微型燃气轮机发电系统的有功和无功功率输出根据负荷需要进行自动调节。本文采用电压电流双环控制的PWM逆变器,把逆变器出口电压及频率控制为给定值,电压幅值设为310V,频率为50Hz,可得到电压参考值 u_{dref} , u_{qref} ,对其进行派克变换,可得到dq轴上电压参考值 u_{dref} , u_{qref} 。通过采集滤波器输出端口电压信号,可以计算出逆变器电压dq轴分量 u_d , u_q ,与dq轴电压参考值进行比较后通过PI控制使得输出波形跟踪给定值,其输出作为电流内环的给定;内环是瞬时负荷电流值的反馈,采用PI控制,该环节增加了逆变器的阻尼系数,使整个系统更加稳定。V/f控制框图如图4所示。

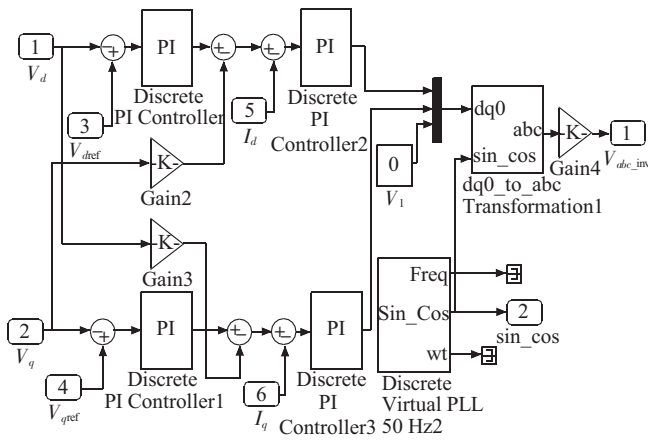


图4 V/f控制模块内部结构图

4 微型燃气轮机的动态特性仿真分析

4.1 联网运行模式下功率参考值变化

微型燃气轮机的额定容量设定为15kW,额定电压为310V,负荷大小为20kW。仿真时间80s,仿真步长0.00005s。微型燃气轮机在联网模式下采用P/Q控制,给定有功和无功功率的参考值,燃气轮机将按照给定的参考值进行出力。0~20s微型燃气轮机的有功参考值给定为15kW,剩余的5kW负荷由大电网供应;20~40s有功参考值改变为13kW,剩余的7kW负荷

由大电网供应;40~60s有功参考值降至9kW,大电网向负荷提供11kW的有功电能;60~80s有功参考值变为13kW即20~40s的运行状态^[9]。微型燃气轮机有功和无功功率如图5所示。逆变器输出的电压和电流波形如图6所示。

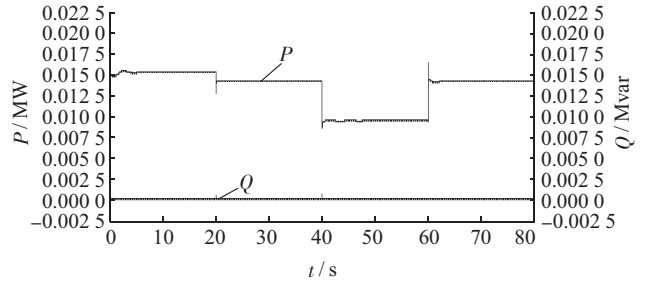


图5 微型燃气轮机有功和无功功率

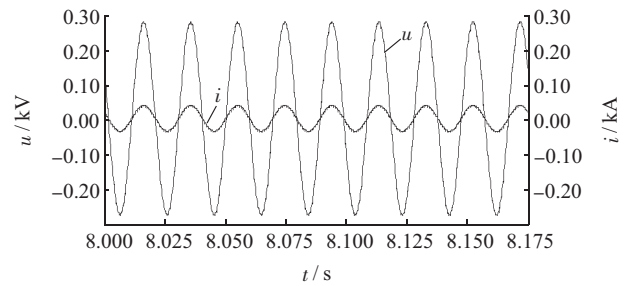


图6 整流器交流侧电压和电流

从图5有功和无功功率的响应曲线可以看出,微型燃气轮机并网逆变系统能够快速有效地跟踪外界给定的功率指令值,并且当功率指令参考值改变时,电压源逆变器的控制系统能够及时跟踪参考指令的变化,迅速地调整逆变器的输出功率。并且暂态响应的时间很短,且响应过程相当的平稳。从图6可看出,由于此时无功参考值设置为0,因此整流器交流侧输入的电压和电流波形相位一致,保持了整功率因数运行,在后续的仿真中,微型燃气轮机的无功参考值将不为0,届时整流器交流侧输入的电压和电流波形相位不再一致,由于电网带有感性负荷,因此电流相位将超前电压相位。整流器交流侧输入电压和电流波形为三相正弦波形,能满足整流器的运行要求。经过整流升压电路输出的直流电压如图7所示。 U_{dc} 基本保持了平稳运行,只在有功参考值转换瞬间有微小的波动,且升压电路将输入的交流电压幅值升高。微型燃气轮机原动机的机械特性如图8所示。从图8可看出,微型燃气轮机的机械转矩 T_m 能够很好地跟随电磁转矩 T_e 的变化,且振荡过程持续时间短,波动幅度小,能很快地进入稳态运行,较好地实现了恒功率控制的目标。原动机的转速曲线如图9所示。在微型燃气轮机调速差的控制下,转速 ω 能很好地维持在额定转速的附近,当微型燃气轮机的有功出力为额定容量15kW时,转速 ω 基本保持在1.0p.u.,当有功出力降低至13kW时,转速 ω 经小

幅振荡稳定在 1.002 5 p.u.处,当有功出力降低至 9 kW 时,转速 ω 再次上升,小幅振荡后稳定在 1.015 7 p.u.处,当有功出力恢复到 13 kW 时,转速 ω 也恢复到 20~40 s 的状态。原动机需要的燃料量曲线如图 10 所示,燃料量基本跟随负荷变化,当微型燃气轮机的有功出力为额定容量 15 kW 时,燃料需求量 W_f 基本保持在 1.0 p.u.,当微型燃气轮机的有功出力下降时,燃料需求量也随之下降,有功出力上升时,燃料需求量也随之上升,动态响应时间短暂且波动平滑。原动机的排气温度,如图 11 所示。

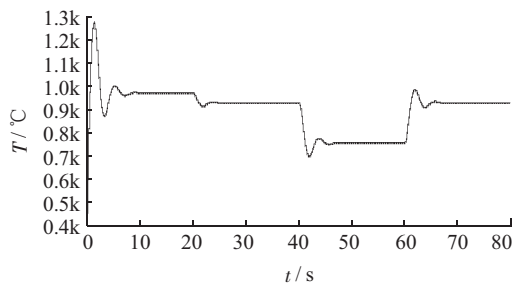


图 11 微型燃气轮机排气温度

的额定容量设定为 15 kW,额定电压为 310 V,负荷大小为 10 kW。仿真时间取 60 s,仿真步长 0.000 05 s。微型燃气轮机在孤岛模式下采用 V/f 控制,燃气轮机将根据负荷变化改变出力。0~20 s 微型燃气轮机的负荷为 10 kW;20~40 s 负荷增至 15 kW;40~60 s 负荷降为 13 kW^[10]。

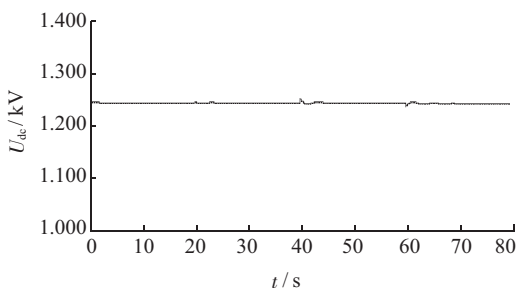


图 7 整流器直流侧电压

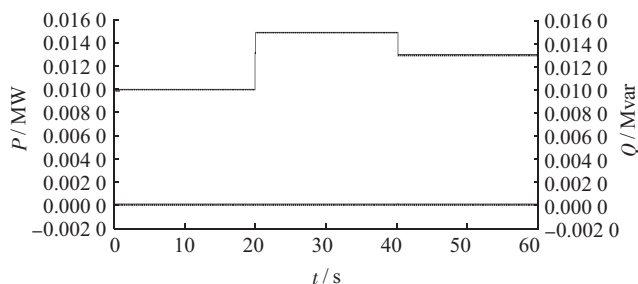


图 12 微型燃气轮机有功和无无功功率

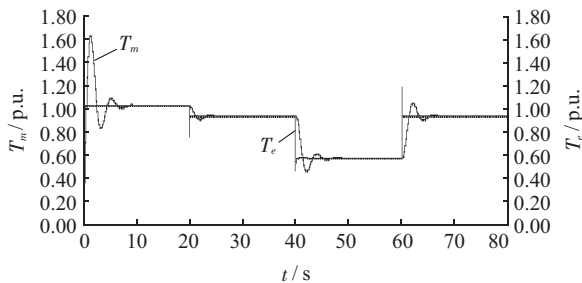


图 8 微型燃气轮机机械转矩与电磁转矩

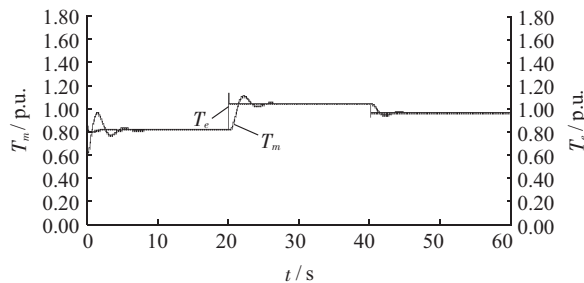


图 13 微型燃气轮机机械转矩和电磁转矩

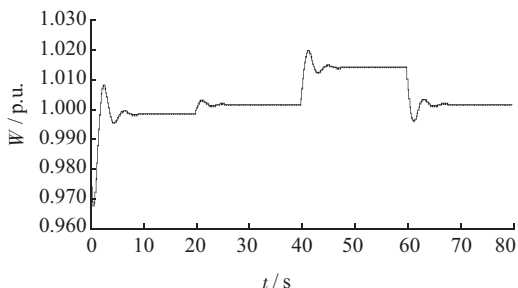


图 9 微型燃气轮机转速

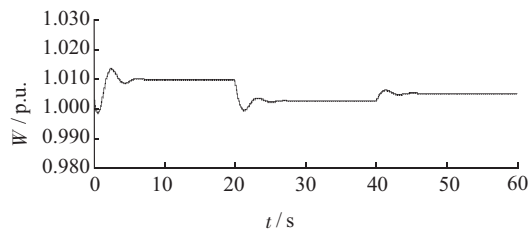


图 14 微型燃气轮机转速

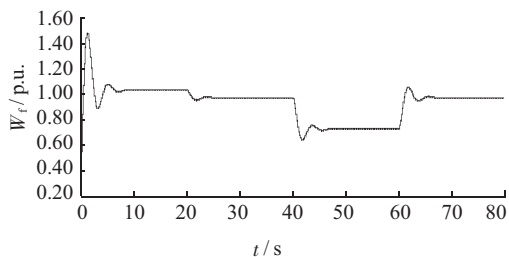


图 10 微型燃气轮机燃料需求量

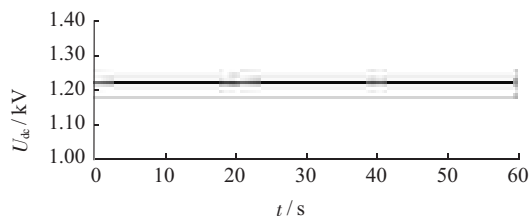


图 15 微型燃气轮机整流器输出直流电压

4.2 孤岛运行模式下负荷改变

对孤岛模式下微型燃气轮机在负荷改变时的动态特性进行仿真和分析如图 12—15 所示。微型燃气轮机

由图 12 可知, V/f 控制下的微型燃气轮机发出功率能够准确迅速地追踪负荷变化,在负荷需求变化时,

由于控制系统的良好性能,功率变化暂态过程迅速且稳定。图 13 显示微型燃气轮机产生的机械转矩能精确跟踪且与永磁同步发电机产生的电磁转矩平衡。从图 14 可以发现微型燃气轮机的转速在任何情况下都能做到仅与参考转速产生微小偏差,在微型燃气轮机输出功率为额定值时,转速为 1.0 p.u.。图 15 显示了整流器直流侧输出电压基本维持稳定在 1.24 kV,仅在负荷变化时有微小波动。

5 结束语

本文所建立的微型燃气轮机发电系统仿真模型,不仅可如实反映微型燃气轮机自身的动态特性,而且将微型燃气轮机、电力电子装置以及负荷之间的相互联系动态地表现了出来,这是等效处理或者分开建模难以实现的。本文所建立的逆变器模型,附加合理的控制后同样适用于其他采用逆变器作为接口的分布式电源,如太阳能光伏发电、燃料电池等,为进一步研究微电网中各种分布式电源之间的协调控制奠定了基础。

参考文献:

- [1] 崔恒志,黄奇峰,杨世海,等.冷热电联供型微电网容量规划优化研究[J].江苏电机工程,2013,32(3):39-42.
- [2] SAHA A K, CHOWDHURY S, CHOWDHURY S P, et al. Modeling and Performance Analysis of a Microturbine as a Distributed Energy Resource[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 2009, 24(2): 529-538.
- [3] 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,2005,25(1):13-17.
- [4] 安连锁,张健,王震,等.微型燃气轮机启动特性的模拟与分析[J].电力科学与工程,2008,24(2):20-22.
- [5] HAUGWITZ S. Modelling of Microturbine System[D]. Lund: Lund Institute of Technology, 2002.
- [6] 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.
- [7] TRAVERSO A, CALZOLARI F, MASSARDO A. Transient Analysis of and Control System for Advanced Cycles Based on Micro Gas Turbine Technology[J]. Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, 2005, 127(2): 340-347.
- [8] 余又红,孙丰瑞,张仁兴.基于 MA TLAB 的面向对象的燃气轮机动态仿真研究[J].燃气轮机技术,2003,16(1):53-56.
- [9] 维斗,徐向东.热动力系统建模与控制的若干问题[M].北京:科学出版社,1996:67-75.
- [10] POOLE G, SALS I A G. A Software Environment for the Modeling Simulation and Control of Industrial Gas Turbine Engines[J]. 1991:358-363.

作者简介:

易桂平(1981),男,江西吉安人,博士研究生,从事电力电子技术应用、微网电能质量方面的研究工作;
胡仁杰(1962),男,江苏苏州人,博士生导师,从事光伏发电、电能质量管理及超级电容器储能方面的研究工作。

Modeling and Simulation of Micro Gas Turbine Generation

YI Guiping, HU Renjie

(School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China)

Abstract: The mathematical models of micro gas turbines with different control modes and operation modes are introduced. Simulations for the micro gas turbines with different operation modes are implemented in PSCAD/EMTDC platform. The simulation results show that the dynamic response performance of micro gas turbines are satisfied for the cases of power reference value changing in grid-connected operation mode and load demand changing in island operation mode. The output power of the both cases can track demand changing quickly and the duration of transient process is short.

Key words: micro gas turbine; PSCAD/EMTDC; simulation model

下 期 要 目

- 大型地区电网调度控制系统海量历史数据处理技术
- 基于源网协同的风电并网系统双层优化调度
- 基于 D-S 证据理论的母线负荷预测
- 基于改进 PSO 算法的含风电场电力系统网架扩展规划研究
- 小电阻接地系统零序电流 II 段保护整定策略研究
- 高硫煤对燃煤机组的影响分析
- 500/220 kV 电磁环网解合环方式评价方法研究
- 太阳能光伏电池建模与动态特性仿真