

# 微型燃气轮机发电系统建模与特性分析

邓 浩 李春艳

( 德阳电业局 四川 德阳 618000)

摘 要:基于微型燃气轮机与电力电子装置工作原理,对采用双脉宽调制(PWM)变换器结构的微型燃气轮机发电系统进行了整体建模。为控制交直流变换器中电容电压,整流器采用 PWM 恒压控制;为保证负荷侧电能质量,逆变器采用 V/F 控制,实现负荷侧电压与频率的稳定。利用 PSCAD/EMTDC 软件对微型燃气轮机发电系统动态特性进行仿真验证,结果表明该模型能够反映实际微型燃气轮机发电系统的动态特性。

关键词:微型燃气轮机发电系统;建模;双 PWM 变换器;特性分析

**Abstract:** Based on the working principle of microturbine and its power electronic converter, an overall model of microturbine generation system with dual PWM converter is established. In order to maintain the capacitive voltage of AC/DC converter, a constant voltage control method is used for the rectifier. And in order to ensure the power quality of load side, V/F control is used for the inverter to realize the stability of voltage and frequency. PSCAD/EMTDC software is also used to simulate and verify the dynamic characteristics of microturbine generation system. The results show that the actual dynamic characteristics of microturbine generation system can be reflected by the model.

**Key words:** microturbine generation system; modeling; dual PWM converter; characteristics analysis

中图分类号:TM743 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2012)02-0070-03

## 0 引 言

随着能源危机和环境污染的日益严重,分布式发电技术已经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。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,以可燃性气体或液体为燃料,可同时产生热能和电能,与常规发电机组相比,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<sup>[1]</sup>,是目前实现冷热电联产的主要设备。利用 PSCAD/EMTDC 软件建立了微型燃气轮机发电系统完整的数学模型,研究了双 PWM 变流器的控制策略,分析了在负荷扰动时微型燃气轮机发电系统的动态特性。

## 1 微型燃气轮机发电系统结构

微型燃气轮机发电系统结构如图 1 所示。微型燃气轮机采用单轴结构,通过压缩机涡轮产生转矩驱动高速发电机发电,与采用齿轮变速系统的分轴结构

相比,单轴结构系统效率更高、结构更紧凑、可靠性更高。一般,微型燃气轮机转速高达 50 000 ~ 120 000 r/min,通常采用高能永磁材料(如钕铁硼材料或钕钐材料)的永磁同步发电机(PMSG),其产生的高频交流经过整流逆变转化为工频交流,通过 LC 滤波器滤除高频谐波,输送至负荷或大电网<sup>[2]</sup>。这里采用 PWM 控制的电压源整流器和逆变器。

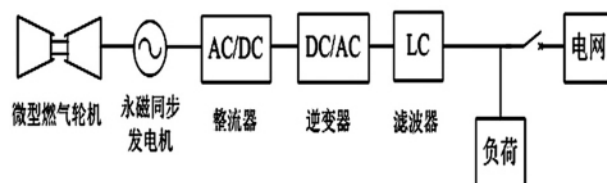


图 1 微型燃气轮机发电系统结构

## 2 微型燃气轮机数学模型

微型燃气轮机模型如图 2 所示,其中,排气温度函数  $f_1$ 、涡轮转矩输出函数  $f_2$ 、燃料供给系统中阀门定位器和燃料制动器的传递函数  $f_3$  分别为

$$f_1 = T_{ref} - 700(1 - \omega_{f1}) + 500(1 - \omega) \quad (1)$$

$$f_2 = 1.3(\omega_{f2} - 0.23) + 0.5(1 - \omega) \quad (2)$$

$$f_3 = \frac{1}{(0.05s + 1)(0.4s + 1)} \quad (3)$$

式中,  $T_{ref}$  为排气温度基准, 取  $T_{ref} = 950 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $w_{f1}$ 、 $w_{f2}$  为燃料流量信号;  $w$  是涡轮机实际转速。

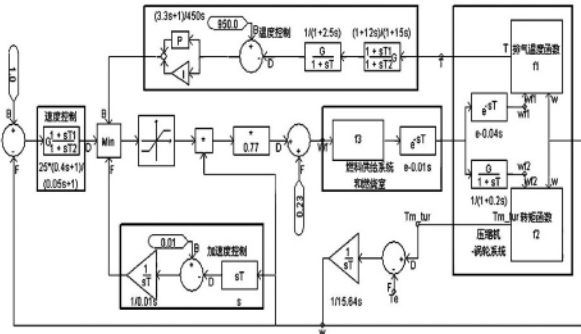


图 2 微型燃气轮机模型

从图 2 可以看出, 微型燃气轮机模型包括转速与加速度控制、温度控制、燃料供给和燃烧室以及压缩机-涡轮系统等部分。在非满载时, 微型燃气轮机主要速度控制方式为斜率控制, 即以转子速度与预先设定参考值间的差值作为输入信号, 以速度偏差比例值作为输出信号; 加速度控制目的是限制转速的变化率过大, 防止转子超出允许范围; 温度控制通过限制燃料输入量来保护系统温度不超过限定值<sup>[2, 3]</sup>。为了维持正常运行需要燃料量占了额定燃料量很大的比重, 取 0.23 的额定燃料量作为微型燃气轮机的基荷, 因此微型燃气轮机要尽量避免运行在低负荷状态以提高经济效益。

### 3 双 PWM 变换器控制策略

#### 3.1 整流器控制策略

三相电压型 PWM 整流器 (VSR) 主电路拓扑结构如图 3 所示。通过控制整流器桥臂上各功率器件的导通与关断, 实现交直流的转换, 直流侧采用电容

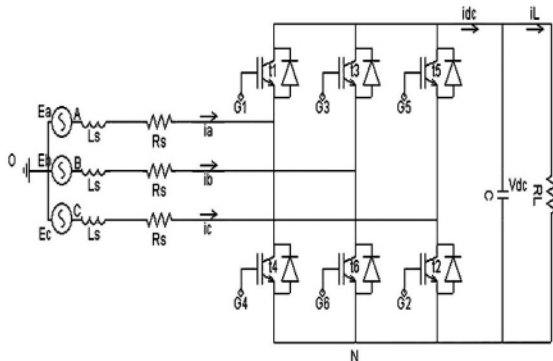


图 3 三相电压型 PWM 整流器主电路拓扑

进行直流储能, 从而使 VSR 直流侧呈低阻抗的电压源特性。由于 PWM VSR 具有谐波小、控制灵活的特点, 可通过合适算法, 快速调节微型燃气轮机输出功率, 达到缩短系统动态响应时间的目的。

三相静止对称坐标系下的 VSR 数学模型交流侧变量都为时变交流量, 不利于控制系统的设计。因此, 通过坐标变换将三相静止  $abc$  坐标系转化为与基波频率同步旋转的  $dq0$  坐标系, 简化控制系统的设计<sup>[4]</sup>。三相电压型 PWM 整流器控制结构如图 4 所示, 采用基于前馈解耦控制策略的双闭环控制结构, 图中  $V_{dref}$  为直流侧电压参考值, 直流侧电压差值经 PI 控制后产生有功电流参考值  $i_{qref}$ ; 由于无功功率取为 0, 则无功电流参考值  $i_{dref}$  取为 0, 再通过内环对  $dq$  轴电流的跟踪, 产生 PWM 脉冲信号控制绝缘栅双极型晶体管 (IGBT) 的通断, 维持直流侧电压的恒定, 实现了对有功功率和无功功率的解耦控制。电压外环的主要作用是在负荷功率变化时维持 VSR 直流侧电压恒定; 电流内环作用是按电压外环输出的电流指令进行电流控制, 实现单位功率因数正弦电流控制。整流器输出为直流, 通过逆变器转化为工频交流供给

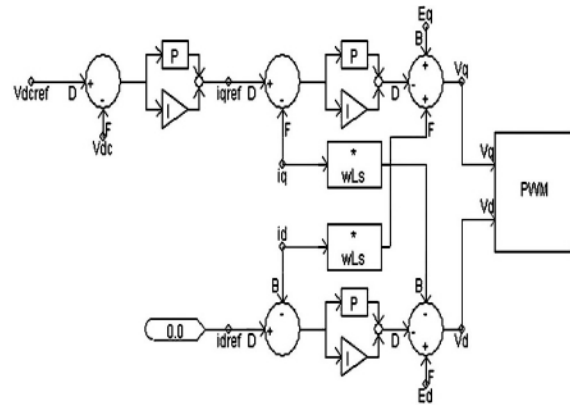


图 4 三相电压型 PWM 整流器双环控制结构

#### 3.2 逆变器控制策略

三相 PWM 逆变器主电路拓扑结构如图 5 所示,

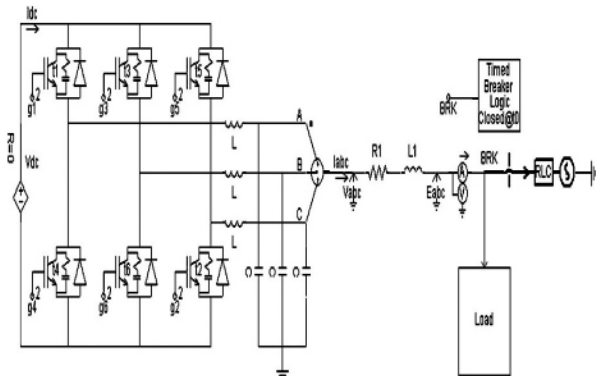


图 5 三相 PWM 逆变器主电路拓扑

负荷,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,保证负荷的电能质量。

微型燃气轮机发电系统可运行在并网与孤岛两种状态。并网时,微型燃气轮机发电系统接入大电网,输出指定功率;孤岛时,微型燃气轮机接本地负荷。主要分析孤岛时微型燃气轮机发电系统的运行特性。如图 5 所示,开关 BRK 断开,系统运行在孤岛状态,由微型燃气轮机保证负荷侧电压与频率在功率变化时维持恒定值。逆变器采用 V/F 控制,控制框图如图 6 所示,采用电压电流双闭环结构,将逆变器出口的电压及频率控制为给定值,电压幅值设为 310 V,频率为 50 Hz,可得到电压参考值  $V_{aref}$ 、 $V_{bref}$ 、 $V_{cref}$ ,对其进行派克变换,得到 dq 轴上电压参考值  $V_{dref}$ 、 $V_{qref}$ 。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  $V_d$ 、 $V_q$ ,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值;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<sup>[5]</sup>。

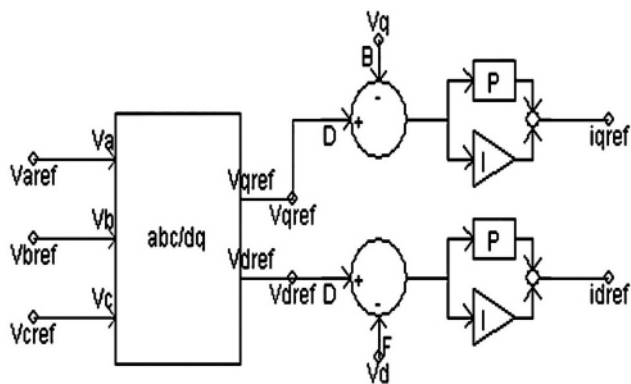


图 6 V/F 控制框图

#### 4 微型燃气轮机发电系统特性分析

根据图 1 微型燃气轮机发电系统结构,在 PSCAD/EMTDC 环境下建立了微型燃气轮机发电系统仿真图,如图 7 所示,开关 BRK 断开,微型燃气轮机处于孤岛运行状态,承担本地负荷的波动。微型燃气轮机额定功率取 30 kW,额定转速为 60 000 r/min,直流侧电压参考值  $V_{dref}$  取 800 V,同时,不考虑微型燃气轮机非线性的启动阶段,本地负荷按每 20 s 变化 50% 从空载到满载再到空载变化,观察微型燃气轮机发电系统的动态特性。

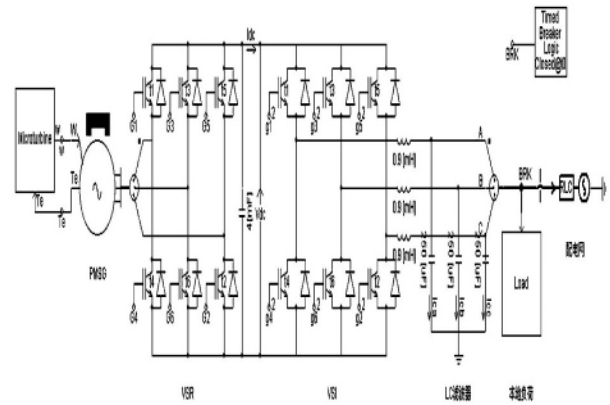
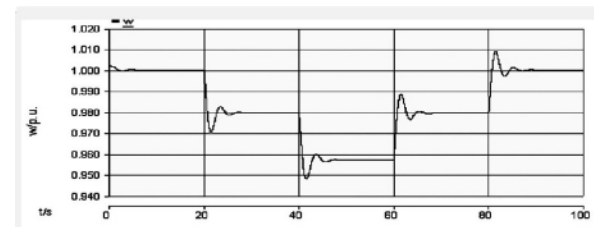
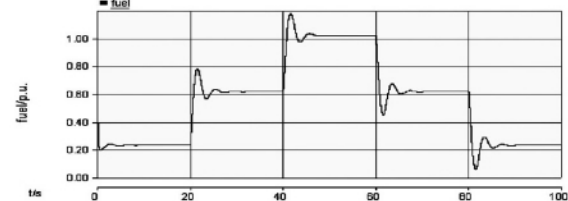


图 7 微型燃气轮机发电系统仿真图

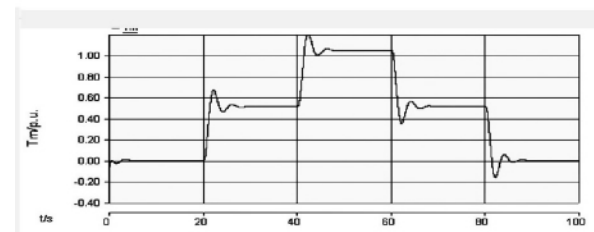
图 8 为微型燃气轮机特性仿真曲线。从图 8(a) 可以看出,空载时,转速  $w$  达到额定值 1 p.u.,当负荷功率增加至 100% 时,转速下降到 0.957 p.u.,即随着负荷功率的增加,转速会下降,仿真过程中转速基本维持在额定转速附近;从图 8(b) 可以看出,微型燃气轮机空载时所需燃料流量为 0.23 p.u.,满载时为 1.018 p.u.,验证了前面所提到的微型燃气轮机为维持正常运行所需的基础燃料为设定值 0.23 p.u.,从仿真过程来看,微型燃气轮机所需调整的燃料流量范围约为 23% ~ 100%,正好与 0 ~ 100% 的负荷功率相对应,符合实际要求;从图 8(c) 可以看出,机械转矩  $T_m$



(a) 转速



(b) 燃料流量



(c) 机械转矩

图 8 微型燃气轮机特性仿真曲线

(下转第 90 页)

[9] 鲜艳霞,李兴源.提高暂态稳定性的 HVDC 与发电机励磁的非线性最优协调[J].继电器,2004,32(20):1-4.

[10] 王宝华,杨成梧.FACTS 稳定控制策略综述[J].电力自动化设备,2000,20(2):15-21.

[11] 杨波,刘天琪,李兴源,等.基于最优变目标的 HVDC 与 SVC 非线性综合协调控制[J].继电器,2006,34(17):29-33.

[12] 严伟佳,蒋平.抑制区域间低频振荡的 FACTS 阻尼控制[J].高电压技术,2007,33(1):189-192.

[13] D. Z. Fang, Xiondong Yang, T. S. Chung, et al. Adaptive Fuzzy - logic SVC Damping Controller Using Strategy of

Oscillation Energy Descent [J]. IEEE Transactions of Power System, 2004, 19(3): 1414-1421.

[14] 马幼捷. SVC 与发电机励磁协调非线性控制[J].电工技术学报,1998,13(4):1-4.

作者简介:

何振宇(1987)男,硕士研究生,研究方向为电力系统稳定控制;

李华强(1965)男,教授,硕士生导师,从事电压稳定及无功优化控制问题研究。

(收稿日期:2011-12-07)

(上接第72页)

并没有严格按照负荷的变化成比例变化,空载时转矩为 0 p. u.,满载运行时转矩为 1.048 p. u.,其原因在于负荷增加时转速下降,空载时转速为额定值 1 p. u.,满载时转速为 0.957 p. u.,而  $P_e = T_e \omega$  ( $P_e$  为电磁功率,  $T_e$  为电磁转矩,  $\omega$  为转速),由于电磁转矩和机械转矩在稳定状态下平衡,故实际满载运行时,机械转矩会略高于 1 p. u.,但整个仿真过程中转速都维持在额定转速附近。

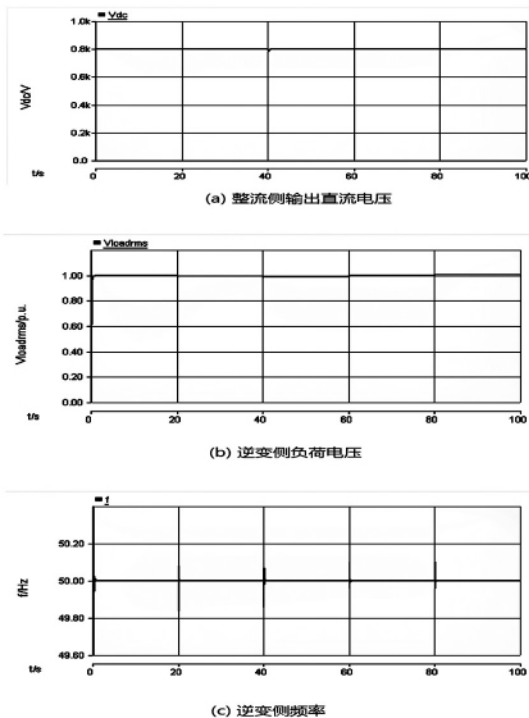


图9 整流侧和逆变侧的电压、频率

图9为微型燃气轮机发电系统整流侧和逆变侧的电压与频率,由于整流器采用双闭环恒压控制,其输出直流侧电压  $V_{dc}$  能保持在参考值 0.8 kV 附近;随着负荷的变化,逆变侧负荷电压  $V_{loadrms}$  能基本维持在 1 p. u. 左

右;频率  $f$  最高不超过 50.1 Hz,最低为 49.84 Hz,最后稳定在 50 Hz,变化范围为  $\pm 0.2$  Hz,从而保证了负荷对电能质量的要求。

### 5 结 语

根据微型燃气轮机的工作原理,把微型燃气轮机及其变流部分当作一个整体,建立了微型燃气轮机发电系统的完整数学模型。整流器采用双闭环恒压控制,维持了直流侧电压的恒定;逆变器采用 V/F 控制,保证了负荷侧电压与频率的稳定。利用 PSCAD/EMTDC 软件对微型燃气轮机动态特性进行仿真分析,验证了该模型的有效性。

### 参考文献

[1] 杨策,刘宏伟,李晓.微型燃气轮机技术[J].热能动力工程,2003,18(1):1-4.

[2] 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.

[3] 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):27-31,45.

[4] 丁奇,严东超,曹启蒙.三相电压型 PWM 整流器控制系统设计方法的研究[J].电力系统保护与控制,2009,37(23):84-87,99.

[5] 陈江辉,谢运祥,陈兵.逆变电路的控制技术与策略[J].电气应用,2006,25(9):102-106.

作者简介:

邓浩(1986)男,硕士,研究方向为电力系统自动化和电能质量;

李春艳(1985)女,硕士,研究方向为电力系统自动化和电能质量。

(收稿日期:2011-12-21)