

基于模糊PID的微型燃气轮机发电机组控制性能研究

曾维伦¹,王旭升²,吕小静¹,翁一武²

(1. 上海交通大学 中英国际低碳学院, 上海 201306; 2. 上海交通大学 机械与动力工程学院, 上海 200240)

摘要:以30 kW 燃气轮机发电机组为研究对象,基于MATLAB/Simulink平台搭建了微型燃气轮机发电机组各部件及系统仿真模型,研究了微型燃气轮机、发电机和电力变换装置的控制策略。考虑了电力变换过程的损耗影响,设计了微型燃气轮机发电机组的“机-网”功率匹配控制策略。研究了负荷大幅度阶跃突变时“机-电”动态变换规律和功率匹配特征,采用模糊PID控制改善了机组的动态响应特性。结果表明:燃气轮机负载从30 kW突降至15 kW的过程中,模糊PID控制体现出较好的控制性能。相比常规PID控制机组的暂态过程震荡幅度明显减小,其发电功率的稳定速度提高了24.5%,电功率的超调减小9.6%,转速变化更加平缓,透平入口温度的震荡幅度减小20.7%,机组功率因数的恢复速度提高36.0%。

关键词:微型燃气轮机;电力变换;模糊控制;控制策略;仿真

中图分类号:TM611.24

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlge.2021.10.028

[引用本文格式]曾维伦,王旭升,吕小静,等.基于模糊PID的微型燃气轮机发电机组控制性能研究[J].热能动力工程,2021,36(10):212-221. ZENG Wei-lun, WANG Xu-sheng, LYU Xiao-jing, et al. Research on control performance of micro gas turbine generator set based on fuzzy PID[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2021, 36(10):212-221.

Research on Control Performance of Micro Gas Turbine Generator Set based on Fuzzy PID

ZENG Wei-lun¹, WANG Xu-sheng², LYU Xiao-jing¹, WENG Yi-wu²

(1. Shanghai Jiao Tong University, China-UK Low Carbon College, Shanghai, China, Post Code:201306;

2. Shanghai Jiao Tong University, School of Mechanical Engineering, Shanghai, China, Post Code:200240)

Abstract: Taking a 30 kW gas turbine generator set as the research object, the simulation model of each component and system of micro gas turbine generator set was built based on the MATLAB/Simulink platform, and the control strategy of micro gas turbine, generator and power conversion device was studied. Considering the influence of loss in power conversion process, a “machine-grid” power matching control strategy of the micro-gas turbine generator set is designed. The “mechanical-electrical” dynamic transformation law and power matching characteristics are studied when the load is large-scale step sudden change, and the fuzzy PID control is used to improve the dynamic response characteristics of the unit. The results show that when the load of the gas turbine suddenly reduced from 30 kW to 15 kW, the fuzzy PID control shows better control performance. Compared with the conventional PID control, the transient process oscillation amplitude of the unit is significantly reduced. The stable speed of power generation has increased by 24.5%, the overshoot of electric power is reduced by 9.6%, the speed of gas turbine changes more smoothly, the oscillation of turbine inlet temperature is reduced by 20.7%, and the recovery

收稿日期:2021-03-01; 修订日期:2021-04-27

基金项目:国家自然科学基金(51806137);上海市科学技术委员会项目(17DZ1201003)

Fund-supported Project: National Natural Science Foundation of China (NSFC) (51806137); Science and Technology Commission of Shanghai Municipality (17DZ1201003)

作者简介:曾维伦(1997-),男,湖北荆门人,上海交通大学硕士研究生。

通讯作者:翁一武(1962-),男,浙江衢州人,上海交通大学教授。

speed of unit power factor is increased by 36.0% .

Key words: micro gas turbine ,power conversion ,fuzzy control ,control strategy ,simulation

引 言

微型燃气轮机 (Micro gas turbine, MGT) 具有高效、低排放、可靠性高和燃料多样性强等优点^[1]。近年来,以微型、中小型燃气轮机为主要设备的混合动力系统、分布式供能系统等正在逐步成为新的研究热点^[2]。目前,国内外对于微型燃气轮机发电机组的建模与控制都进行了一定的研究。张程莉^[3]建立了微型燃气轮机的仿真模型,研究了电力变换器件在运行过程中的电动/发电状态无缝切换控制策略。杨秀等人^[4]采用简化的燃气轮机模型与发电机组相连,提出了电压解耦控制结合电流滞环控制的协调控制策略,改善了负载波动时的电能质量。

此外,已有作者开展了基于模糊 PID 的燃气轮机控制策略的研究。王顺等人^[5]将模糊 PID 控制应用在燃气轮机上,优化了燃气轮机的转速控制性能,模糊 PID 可明显减少燃气轮机变负荷过程的响应时间和超调量。但相关文献将燃气轮机本体与电力变换装置孤立研究^[5-6],未能考虑微型燃气轮机发电机组整体的控制方式与控制性能。

本文以 30 kW 微型燃气轮机发电机组为研究对象,基于 MATLAB/Simulink 仿真平台,建立了燃气轮机发电机组整体动态模型。考虑了发电机组的电力损耗影响,设计了基于模糊 PID 的微型燃气轮机发电机组的“机-网”功率匹配控制策略,改善了机组的动态响应性能。

1 燃气轮机发电机组模型建立

微型燃气轮机发电机组如图 1 所示,主要由微型燃气轮机、永磁同步电机和电力变换装置组成,其中电力变换装置包括整流(AC/DC)、逆变(DC/AC)和滤波装置三部分。永磁同步电机与燃气轮机同轴转动,输出的交流电经过整流后转化为直流电,再经过逆变器和滤波装置后,最终能够输出可供负载使用的定压定频交流电。

1.1 模型参数选取

选取了额定功率 30 kW,转速为 96 000 r/min

的燃气轮机作为建模对象,模型在额定工况下的主要参数如表 1 所示。

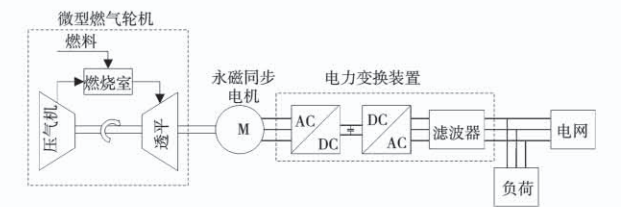


图 1 微型燃气轮机发电机组的结构
Fig.1 Structure of MGT power generator set

表 1 模型的主要参数选取

Tab.1 Selection of main parameters of the model		
部件	参数	数值
微型燃气轮机	环境温度 T_1/K	298.15
	环境压力 p_1/Pa	1.013×10^5
	压比 π_c	3.20
	空气流量 $G_a/\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	0.31
	燃料流量 $G_f/\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$	0.002 4
	转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	96 000
发电机组	定子电阻 R_s/Ω	0.048 5
	电枢电感 L/H	0.008
	滤波电感 L_f/H	0.055

1.2 微型燃气轮机模型

1.2.1 压气机

压气机在不同工况下各参数之间的关系往往是通过特性曲线^[7]来描述的。通过折合流量 $\bar{m}_c = \bar{m} \sqrt{T_1/\bar{p}_1}$ 与折合转速 $\bar{n}_c = \bar{n}/\sqrt{T_1}$ 可得到任意环境下压气机的压比 π_c 与绝热效率 η_c 。

$$\eta_c = f_1(\bar{m}_c, \bar{n}_c), \pi_c = f_2(\bar{G}_a, \bar{n}_c) \tag{1}$$

$$T_2^* = T_1^* \left[1 + \frac{1}{\eta_c} (\pi_c^{m_a} - 1) \right] \tag{2}$$

$$W_c = \frac{c_{p,a} m_c T_1^* (\pi_c^{m_a} - 1)}{\eta_c} \tag{3}$$

其中: $m_a = (k_a - 1)/k_a$; k_a —空气的绝热指数; $c_{p,a}$ —空气的平均比定压热容; π_c —压气机的压比。

1.2.2 透平

透平特性曲线可表示为膨胀比与折合转速的

函数:

$$\eta_t = f_3(\bar{\pi}_t, \bar{n}_t) \tag{4}$$

$$T_4^* = T_3^* (1 - (1 - \varepsilon^{-m_g}) \eta_t) \tag{5}$$

$$W_t = c_{p,g} m_t T_3^* (1 - \varepsilon^{-m_g}) \eta_t \tag{6}$$

式中: $c_{p,g}$ —燃气的平均比定压热容; η_t —透平的膨胀效率; ε —膨胀比; $m_g = (k_g - 1)/k_g$ 。

1.2.3 燃烧室

燃烧室出口温度 T_3 可由能量守恒方程求得:

$$T_3 = \frac{G_a c_{p,a} T_{2a} + G_f c_{p,f} T_{2f} + G_f H_f \eta_b}{(G_a + G_f) c_{p,g}} \tag{7}$$

式中: G_a, G_f —空气和燃料流量; H_f —燃料的热值; η_b —燃烧效率。

1.2.4 转子

转子的工作特性由其能量平衡方程得到:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{900}{I \pi^2} (P_T - P_C - P_{GT}) \tag{8}$$

式中: I —转动惯量; P_T —透平的功率; P_C —压气机耗功; P_{GT} —燃气轮机输出功率。

1.3 发电机组的模型建立

1.3.1 永磁同步电机

永磁同步电机在两相旋转 $d-q$ 坐标系下的电压、磁链和转矩方程分别为:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d - \omega_1 \varphi_q + \frac{d\varphi_d}{dt} \\ u_q = R_s i_q + \omega_1 \varphi_d + \frac{d\varphi_q}{dt} \end{cases} \tag{9}$$

$$\begin{cases} \varphi_d = L_{1d} i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_{1q} i_q \end{cases} \tag{10}$$

$$T_e = \frac{3}{2} n_p [\Psi_f i_q + (L_{1d} - L_{1q}) i_d i_q] \tag{11}$$

式中: ω_1 —电机旋转时的角速度; n_p —永磁同步电机的极对数; L_1 —电机侧电感; R_s —电机的电枢电阻; φ —磁链,下标 d 和 q 分别代表电机的 d 轴和 q 轴。

1.3.2 电力变换器件

定义整流器的开关函数为:

$$S_i = \begin{cases} 1, i \text{ 向上桥臂开关管导通} \\ 0, i \text{ 向下桥臂开关管导通} \\ i = a, b, c \end{cases} \tag{12}$$

则整流电路在 $d-q$ 坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} C \frac{du_{d,c}}{dt} = \frac{3}{2} (i_q s_q + i_a s_a) - i_{L2} \\ L_2 \frac{di_d}{dt} + R i_d - \omega_2 L_2 i_q = e_d - u_{dc} s_d \\ L_2 \frac{di_q}{dt} + R i_q + \omega_2 L_2 i_d = e_q - u_{dc} s_q \end{cases} \tag{13}$$

逆变电路在 $d-q$ 坐标系下的数学模型为:

$$\begin{cases} L_2 \frac{di_d}{dt} + R i_d - \omega_2 L_2 i_q = u_d - e_d \\ L_2 \frac{di_q}{dt} + R i_q + \omega_2 L_2 i_d = u_q - e_q \end{cases} \tag{14}$$

式中: C —直流侧滤波电容; L_2 —交流侧电感; ω_2 —角速度,与电路的频率相关; u, e —交流侧电压和电网相电压。

1.4 模型 PID 控制器的建立

模糊自适应控制器在常规 PID 控制器的基础上增加了模糊控制结构,能够跟随误差的变化实时改变控制器的参数,从而优化控制系统的超调量、稳定时间等动态响应性能。

模糊控制器的输入信号为误差信号 e 和误差变化率 e_c 。输入信号经过模糊化、模糊规则、模糊推理和解模糊处理后可以输出信号 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$, 如图 2 所示。将上述参数分别作为 PID 控制器输入信号,并分别与初始的比例系数 K_{p0} 、积分系数 K_{i0} 和微分系数 K_{d0} 进行加和操作,从而实现对 PID 参数的在线修正。

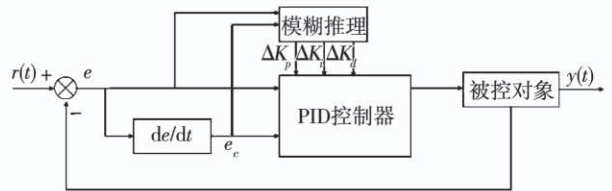


图 2 模糊 PID 控制器的结构

Fig. 2 The structure of fuzzy PID controller

$$\begin{aligned} K_p &= K_{p0} + \Delta K_p, \\ K_i &= K_{i0} + \Delta K_i, \\ K_d &= K_{d0} + \Delta K_d \end{aligned} \tag{15}$$

在 MATLAB 中利用 Simulink 模糊逻辑工具箱建立各变量的隶属函数。输入和输出的信号子集设置为 {NB, NM, NS, ZO, PS, PM, PB}, 其中元素分别代表负大,负中,负小,零,正小,正中,正大。选择输

入信号 e 和 e_c 隶属函数为高斯型 (gaussmf), 系统输出信号 $\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d$ 的隶属度函数为在论域范围内均匀分布且具有较高灵敏度三角形函数 (trimf)。

2 微型燃气轮机发电机组的控制策略

根据燃气轮机发电机组的整体结构框架,绘制

出系统结构图,如图 3 所示。燃气轮机发电机组的控制包括燃气轮机本体的控制和电力变换控制,其中电力变换的控制又分为整流器控制和逆变器的控制。燃气轮机的控制对象主要是燃料量,电力变换装置的控制对象是整流和逆变电路的空间矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 信号。

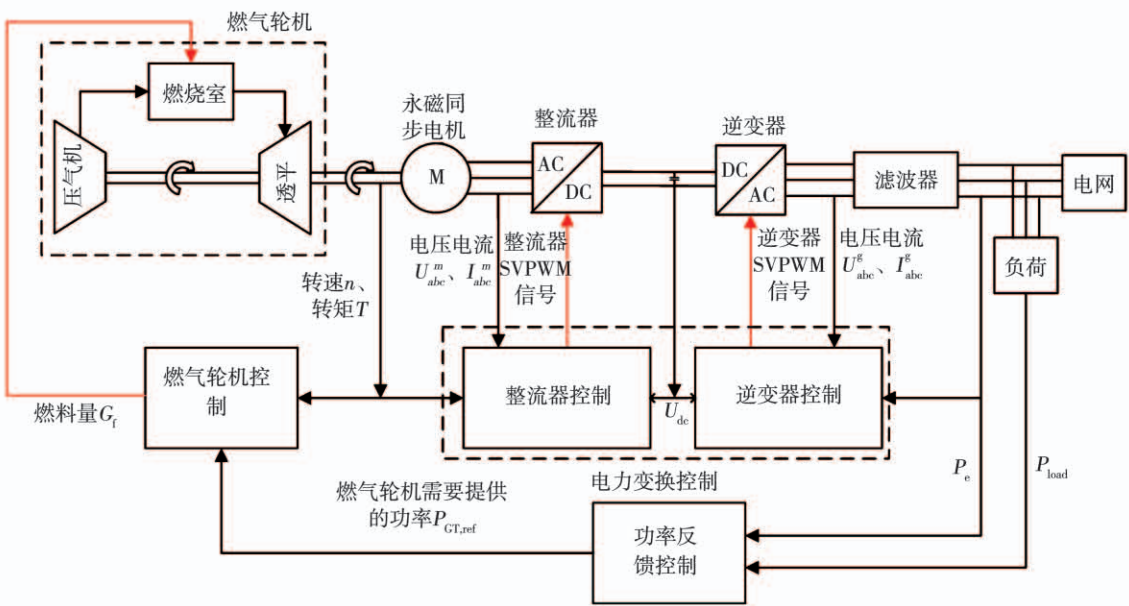


图 3 微型燃气轮机发电机组的控制结构
Fig. 3 Control structure of MGT power generator set

2.1 微型燃气轮机的控制方式

微型燃气轮机的控制系统只需要根据负载和转速调节燃料供给,即可达到改变燃气轮机输出功率的目的^[8]。燃料供给由速比阀和燃料控制阀门组成,在模型中可以将阀门看作惯性环节,其传递函数表示为:

$$G(s) = \frac{1}{0.05s + 1} \cdot \frac{1}{0.4s + 1} \tag{16}$$

燃气轮机的控制结构如图 4 所示。通过测得的转速和转矩信号,能够计算出燃气轮机的实际功率。在负荷变化时,PID 控制器会通过实际功率与给定功率之间的差值改变燃气轮机的燃料供给。通过寻优调试,燃料的 PID 控制器参数最终设定为 $K_p = 9.99, K_i = 0.78, K_d = 0.10$ 。

2.2 电力变换器件的控制策略

2.2.1 整流器的控制策略

为了简化电机的转矩方程,可选取磁场定向的矢量控制策略^[9],即在式 (11) 中令 $i_d = 0$ 。此时定

子电枢电流的磁势与转子磁势相互垂直,该控制策略达到了解耦的效果。

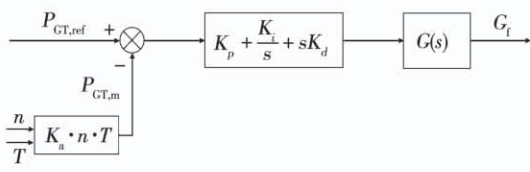


图 4 燃气轮机控制系统结构
Fig. 4 The structure of gas turbine control system

整流器的控制采用双闭环的方式实现。将外环设计为转速环,将永磁同步电机的转速与微型燃气轮机保持一致;内环为电流环,使电机的直轴电流 i_d 保持为零;模块的输出为整流器的 SVPWM 信号,控制结构如图 5(a) 所示。

2.2.2 逆变器的控制策略

在逆变器侧考虑采用有功、无功 (PQ) 解耦的控制策略,为了提高发电机组的功率因数,将 $Q_{ref} = 0$

设为控制目标。变流器的有功、无功功率满足关系式：

$$\begin{cases} P = U_d i_d + U_q i_q \\ Q = U_q i_d - U_d i_q \end{cases} \quad (17)$$

令 q 轴的电压分量 $U_q = 0$,即变流器的电压与 d 轴方向一致。此时功率 P, Q 分别仅与 i_d 和 i_q 相

关。因此通过此种方式可将 P, Q 功率解耦控制。
在控制逻辑的设计上,同样考虑采用双闭环的方式,将外环设计为电压环,使直流侧的电压保持稳定;内环为电流环,控制逆变器输出的无功功率^[10],控制结构如图 5(b) 所示。

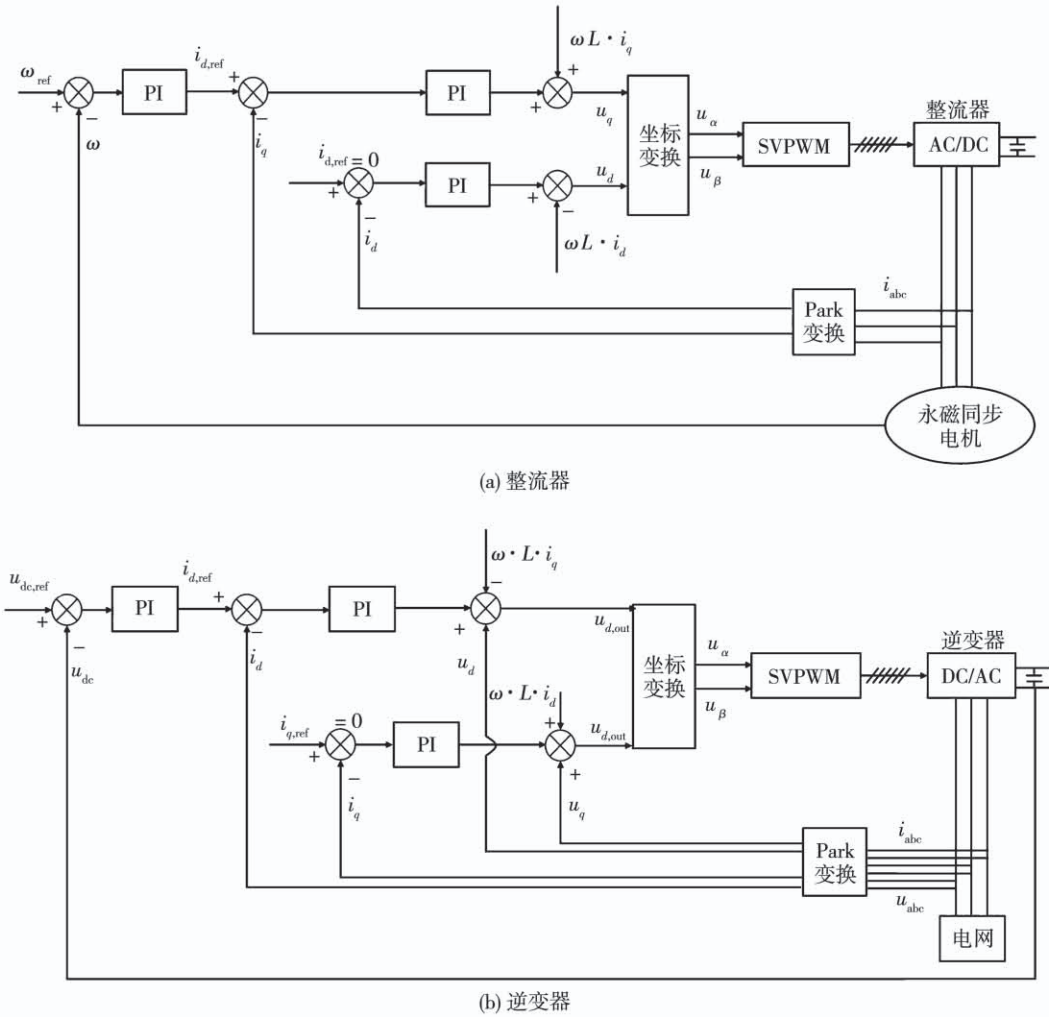


图 5 电力变换器件的控制结构

Fig. 5 Control block diagram of power conversion device

2.3 整体系统的功率匹配控制策略

发电机组的机电转化过程存在一定的功率损耗^[8],会导致机组的实际发电量低于网侧负荷的需求量。为了使微型燃气轮机发电机组在能够提供与负载 P_{Load} 相匹配的电功率 P_e ,设计了如图 6 所示的闭环功率反馈控制策略。将发电机组的发电量 P_e 与负载 P_{Load} 的需求进行对比,将误差 e 与误差的变化率 e_c 分别输入模糊控制器中。燃气轮机接收到控制信号后,根据需求增加或者减少燃料量,从而实现

对燃气轮机输出功率 P_{GT} 的控制,以补偿电力变换过程中的功率损耗。

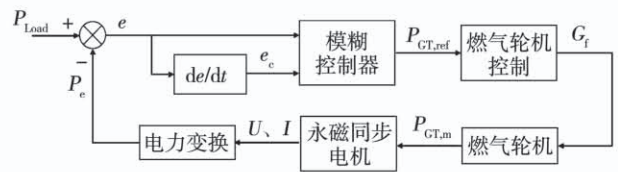


图 6 功率反馈控制的结构

Fig. 6 The structure of power feedback control

将模糊 PID 应用在功率反馈控制器中,经过整定,控制器的初始参数分别取 $K_p = 0.2, K_i = 2, K_d = 0$ 。

3 微型燃气轮机发电机组变负荷控制结果分析

3.1 模型验证

将建立燃气轮机模型变负荷时的燃气轮机效率、透平入口温度(T_3 温度)计算结果与 C30 燃气轮机技术手册^[11]进行对比。将模型的环境参数设置为手册中的 ISO 工况(101.325 kPa, 15 ℃),对比结果如图 7 所示。模型的最大误差为 3.58%,说明建立的燃气轮机模型较为准确,能够较好模拟燃气轮机变负荷时的工况。

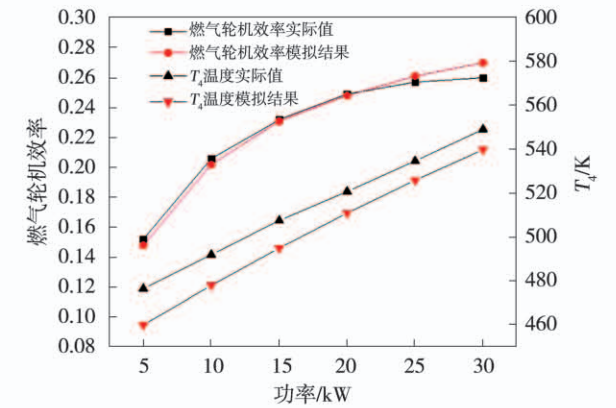


图 7 模型计算结果验证

Fig. 7 Model calculation results verification

3.2 发电功率及控制参数变化

3.2.1 负载突变

图 8 为分别采用模糊控制器与常规 PID 控制器时系统功率的变化过程。从图中可以看出,负荷 P_{Load} 从 30 kW 突降到 15 kW,该控制器能够有效地实现“机-网”功率匹配。

对比常规 PID 控制器,采用可变参数的模糊 PID 控制器后,系统动态过程中电功率最小值从 8.04 kW 变为 9.48 kW,与 15 kW 相比超调减小了 9.6%。负荷突降后,系统发电功率稳定时间从 44.1 s 减少到 33.3 s,稳定速度提高了 24.5%。

对系统变负荷鲁棒性提高的原因进行分析,在负荷突降 15 kW 时,模糊 PID 控制器的参数依据模糊规则对 K_p, K_i, K_d 的参数做自适应计算,计算结果如图 9 所示。

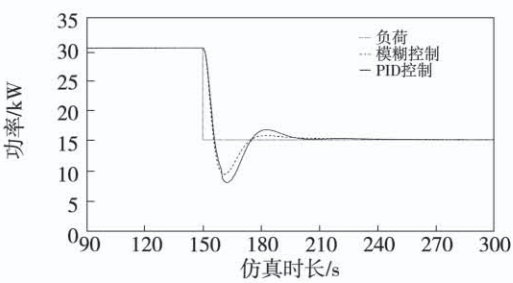


图 8 负载突变时系统发电功率变化

Fig. 8 System generated power changes with load sudden change

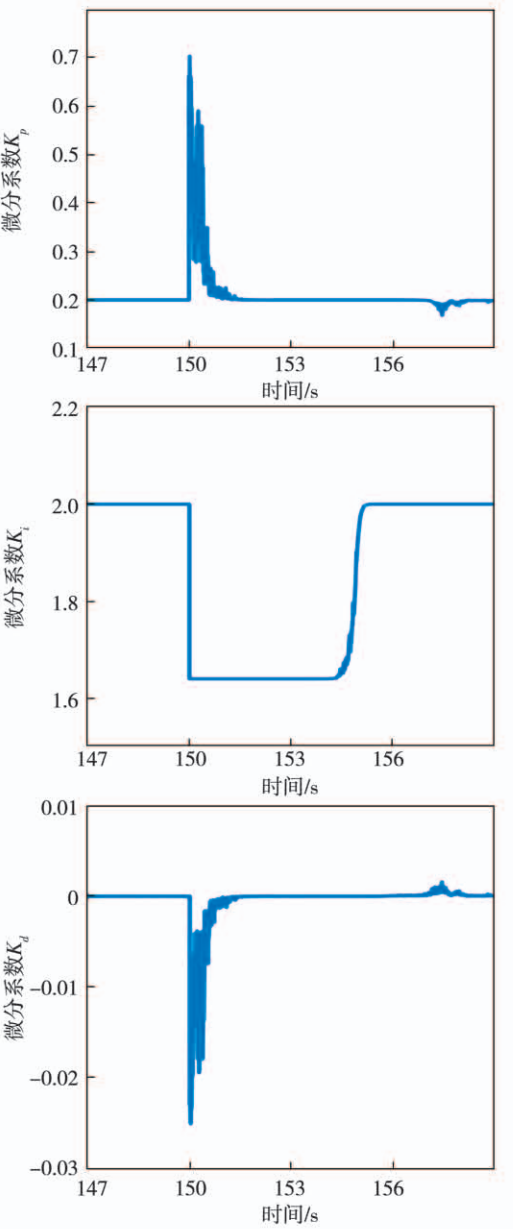


图 9 负载突变时控制参数的变化

Fig. 9 Change of control parameters with load step drop

在负荷突变时,输入模糊控制器的误差 e 以及误差的变化率 e_c 较大。根据模糊规则^[5], K_p 的值从 0.2 突增到了 0.7; K_i 的值从 2 阶跃下降至 1.65; K_d 的值突降了 0.025。控制参数的变化使得机组能够在负荷突变的初期即可快速响应,并保持调节过程的稳定性。之后功率误差及误差变化率逐渐减小,此时的比例系数 K_p 也从峰值逐步回落至 0.5 左右,以防止比例系数过大造成的超调量增加。随着机组趋于稳定, PID 的控制参数也从峰值逐渐回归至 $K_p = 0.2, K_i = 2, K_d = 0$ 的初始参数。

3.2.2 负载缓慢变化

为了研究模糊自适应控制器在不同负荷变化情况下的控制性能,模拟了负荷功率缓慢上升的过程。将初始负荷设置为 15 kW,在 $t = 90$ s 时开始线性增加负载,直至 $t = 150$ s 时达到 30 kW。微型燃气轮机发电机组的电功率与负荷之间的关系如图 10 所示。

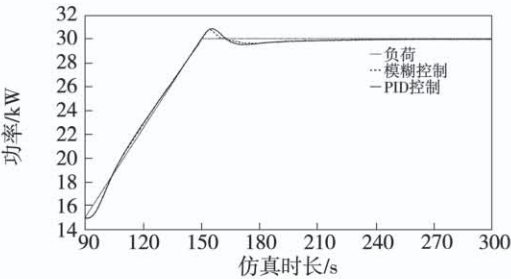


图 10 负荷缓慢变化时系统发电功率变化

Fig. 10 System generated power changes with load secular change

从图 10 中可以看出,在负荷缓慢变化时,模糊自适应控制与 PID 控制相比仍然具有一定的优势。采用模糊自适应控制时,系统的最大功率为 30.73 kW,功率的超调量仅为 2.4%;相比之下,采用 PID 控制时系统的最大功率为 30.83 kW,超调量为 2.7%。此时控制参数变化如图 11 所示。在负荷缓慢变化时, PID 参数的变化也相对较小,在负荷变化的初期仅有积分系数 K_d 变化较为明显,达到了 0.001;当负荷逐渐增加到 30 kW 并保持不变后,机组的动态响应开始出现超调,此时模糊 PID 进行自适应计算后比例系数 K_p 增大约 40%,迅速抑制超调现象。 K_i 和 K_d 随之出现了不同程度的减小,防止因

控制系数配比不合理导致机组震荡。

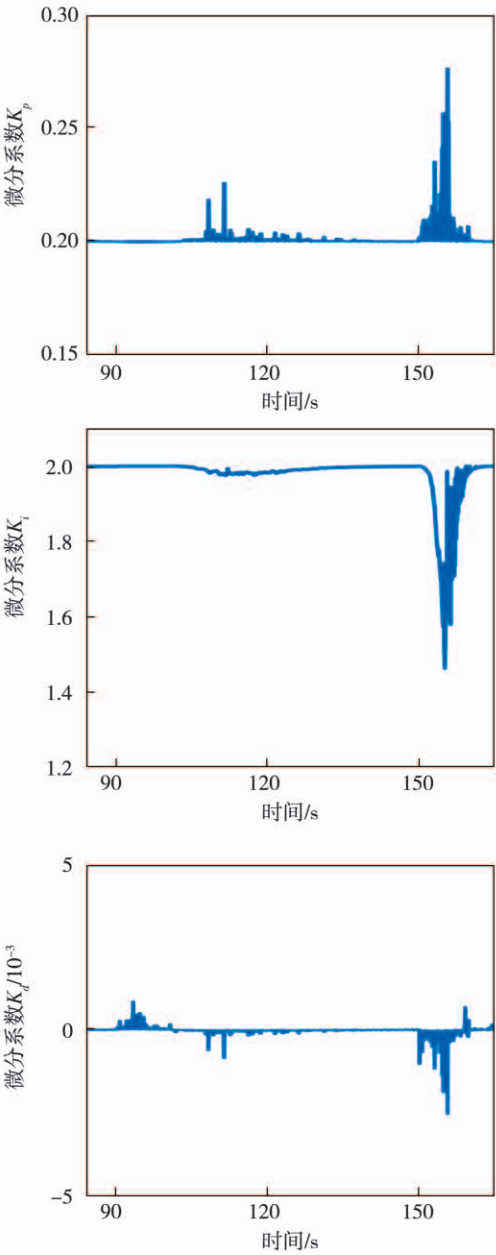


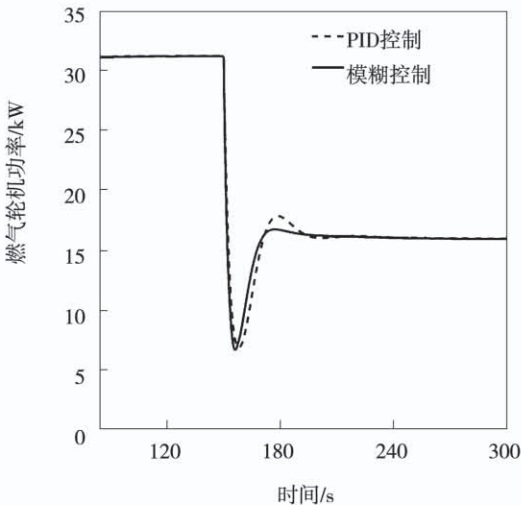
图 11 负载缓慢变化时控制参数的变化

Fig. 11 Change of control parameters with load secular change

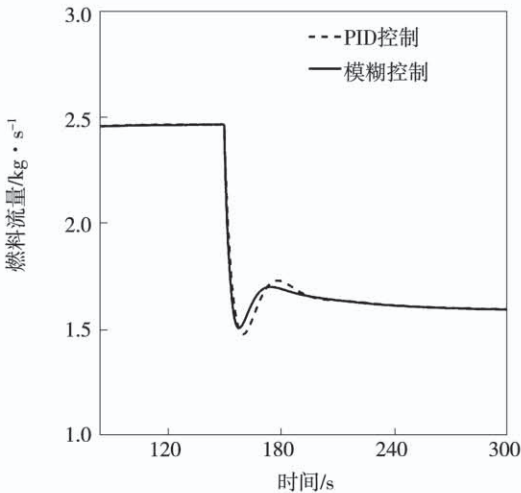
3.3 加入模糊控制前后燃气轮机的工况变化

以负载突变为例,燃气轮机的工况变化如图 12 所示。在负荷变化后,燃气轮机根据 P_e 与 P_{Load} 之间的误差,将输出功率从 15 kW 提高到了 15.97 kW,实现发电 P_e 与负荷 P_{Load} 的匹配,微型燃气轮机的燃料消耗会随之增加 2.71%。在相同的初始控制参数下,采用模糊 PID 后燃气轮机的机械功率稳定时

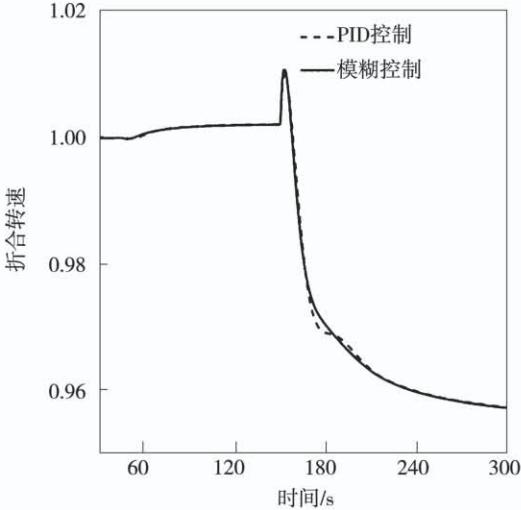
间由39.3 s减少为 18.3 s,机械功率的稳定速度提高了 53.4%;燃料流量的变化更为平缓,震荡幅度减少了 26.3%。



(a) 燃气轮机机械功率



(b) 燃料流量



(c) 折合转速

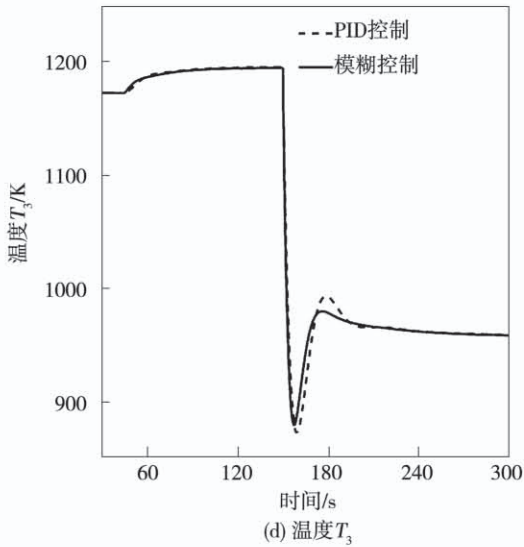


图 12 加入模糊控制前后燃气轮机工况变化
Fig. 12 Change of gas turbine operating conditions before and afterfuzzy control

常规 PID 控制下燃气轮机的转速变化速率会有一定程度的波动。采用模糊 PID 后,转速的变化近似一条光滑的曲线,变转速过程更为稳定;对比常规 PID,采用模糊控制时透平入口温度从 830 K 提高到 843 K,最高温度从 980 K 降低到 962 K,震荡幅度减少了 20.7%。为了使燃气轮机能够安全运行,透平入口温度通常会被限制在某一个区间内,采用模糊 PID 控制减少了透平超温的风险,提高了燃气轮机运行的安全性。根据图 12(d),透平温度在动态调节过程中变化约 300 K。文献[12]的实验数据表明,燃气轮机的透平叶片能够承受超过 10 K/s 的温度变化速率,因此所述控制方法不会对透平叶片材料造成损害。

3.4 发电机组的变负荷控制结果

如图 13 所示,发电机组采用所述控制策略时,在负荷阶跃下降后电压仍能够稳定在有效值为 220 V、频率 50 Hz 的正弦交流波形,电压与电流之间的相位能够保持同步。说明该控制策略能够维持电能质量的稳定,控制效果较为理想。

采用模糊控制前后对发电机组的影响如图 14 所示。在机组稳定后,无功功率 Q 能够重新维持在零附近,说明发电机组的电力变换控制能够较好地

实现有功、无功解耦控制,使电功率尽可能地转化为有功功率。

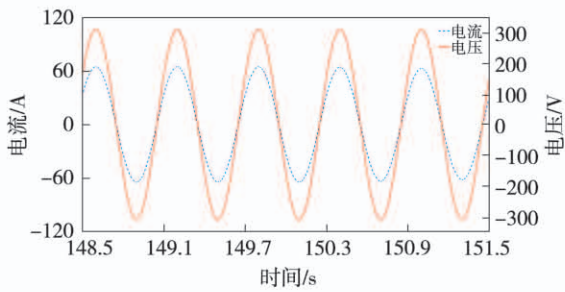


图 13 发电机组输出的电流电压波形图

Fig. 13 Waveform diagram of current and voltage output from generator set

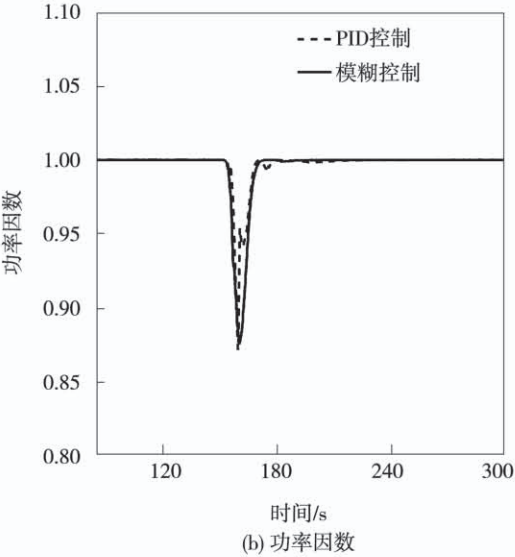
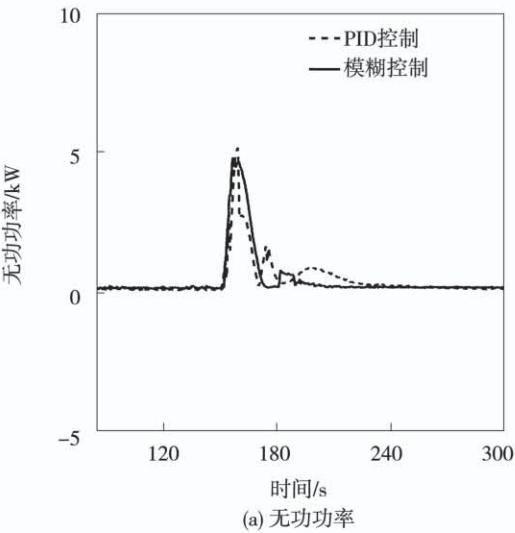


图 14 电能质量分析

Fig. 14 Power factor comparison

从图中可以看出,相比于常规 PID,采用模糊 PID 时无功功率的震荡范围和时间均有较为明显地减小,机组的功率因数恢复速度也因此提高了 36.0%。采用模糊 PID 控制器能够加快发电机组功率因数的稳定速度,提高系统的电能质量。

4 结 论

以 30 kW 微型燃气轮机发电机组为对象,建立了微型燃气轮机发电机组的模型,研究了机组变负荷时的控制策略,模拟了机组变负荷过程,分析对比了模糊 PID 与常规 PID 控制器对微型燃气轮机发电机组控制性能的影响,主要结论:

(1) 通过仿真实验分析,当机组运行于 50% 负荷时,燃气轮机终态做功需提高 0.97 kW 以补偿电力变换损失。结果表明,本文提出的控制策略能够在完成负荷调节、维持电能质量的同时,通过提高燃气轮机功率的方式补偿电力变换中的能量损失,有效地实现“机-网”功率匹配。

(2) 在负载从 30 kW 突降至 15 kW 的过程中,采用模糊 PID 控制器,PID 控制系数会随着误差 e 以及误差变化率 e_c 的不断变化而实时改变。负荷突降时, K_p 的值从 0.2 突增到了 0.7, K_i 的值从 2 阶跃下降至 1.65, K_d 的值突降了 0.025,并随着机组趋于稳定而逐渐回归至初始参数。控制参数的变化使得机组在负荷突变的初期即可快速响应,并能够保持调节过程的稳定性。

(3) 微型燃气轮机发电机组的暂态过程震荡幅度明显减小,系统发电功率的稳定速度提高了 24.5%,功率的超调减小了 9.6%,透平入口温度的震荡幅度减小了 20.7%,机组功率因数的恢复速度提高了 36.0%。模糊 PID 控制体现出了良好的鲁棒性,可更好地满足微型燃气轮机发电机组灵活控制的需求。

参考文献:

[1] 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(2):111-116,212.

- vanced micro gas turbines and their application prospects[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2003(2):111-116, 212.
- [2] WANG X, LYU X, WENG Y. Performance analysis of a biogas-fueled SOFC/GT hybrid system integrated with anode-combustor exhaust gas recirculation loops[J]. Energy, 2020, 197:117213.
- [3] 张程莉. 微型燃气轮机发电系统启发一体的控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学(北京), 2019.
- ZHANG Cheng-li. Starter and generator control of the micro-turbine generation system[D]. Beijing: North China Electric Power University(Beijing), 2019.
- [4] 杨秀, 郭贤, 臧海洋, 等. 微型燃气轮机发电系统孤岛及并网运行的建模与控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 63-68.
- YANG Xiu, GUO Xian, ZANG Hai-yang, et al. Modeling and control strategy of islanding and grid-connected operation of a micro-turbine generation system[J]. Transaction of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 63-68.
- [5] 王顺, 智同生, 施建强. 基于差分进化算法的燃气轮机转速模糊 PID 复合控制[J]. 热能动力工程, 2017, 32(10): 40-44.
- WANG Shun, ZHI Tong-sheng, SHI Jian-qiang. Fuzzy PID hybrid control over the rotating speed of a gas turbine based on the differential evolution algorithm[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2017, 32(10): 40-44.
- [6] 石莹, 朱丽君, 任建平, 等. 基于模糊 PID 控制的微型燃气轮机发电系统研究[J]. 工矿自动化, 2015, 41(3): 84-87.
- SHI Ying, ZHU Li-jun, REN Jian-ping, et al. Research of micro-turbine power generation system based on fuzzy PID control[J]. Industry and Mine Automation, 2015, 41(3): 84-87.
- [7] 吕小静. SOFC/GT 混合动力系统运行关键问题研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2016.
- LYU Xiao-jing. Key operational problem research of solid oxide fuel cell/gas turbine hybrid system[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2016.
- [8] 段建东, 赵克, 孙力. 航改微型燃气轮机发电系统[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2020.
- DUAN Jian-dong, ZHAO Ke, SUN Li. Aero-derivative micro gas turbine power generation system[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2020.
- [9] 朱勍成, 王西田, 刘时雨, 等. 微型燃气轮机直驱发电系统的控制与仿真[J]. 大电机技术, 2018(6): 42-46.
- ZHU Jie-cheng, WANG Xi-tian, LIU Shi-yu, et al. Control and simulation of micro gas turbine direct drive power generation system[J]. Large Motor Technology, 2018(6): 42-46.
- [10] 宋明玉, 曾成碧. 微型燃气轮机发电系统并网运行和孤网运行仿真[J]. 现代电力, 2010, 27(5): 72-75.
- SONG Ming-yu, ZENG Cheng-bi. Simulation on grid-connected and islanded operation of micro-turbine generation system[J]. Modern Electric Power, 2010, 27(5): 72-75.
- [11] Capstone Turbine Corporation, Technical Reference; Capstone Model C30 Performance[EB/OL]. (June 2003) [April 2021]. <https://globalmicroturbine.com/search/c30/pages/technical-reference-capstone-model-c30-performance-001.html>.
- [12] 李浩冬, 刘永葆, 贺星, 等. 微型燃气轮机自动启动控制策略设计[J]. 热力透平, 2019, 48(4): 308-314, 318.
- LI Hao-dong, LIU Yong-bao, HE Xing, et al. Design of automatic start control strategy for micro gas turbine[J]. Thermal Turbine, 2019, 48(4): 308-314, 318.

(丛敏编辑)