

微型燃气轮发电机系统的自抗扰控制方法研究

肖洪昌¹, 童家鹏², 余涛²

(1.南方电网公司东莞供电局, 广东 东莞 511700; 2.华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 微型燃气轮机是一个复杂的热动力系统, 它的不确定性与非线性特性使得难以对其实现高精度控制, 为了实现对微型燃气轮机的稳定控制, 充分发挥微型燃气轮机在分布式发电中的优越性, 引入自抗扰控制器, 以转速为输入设计扩张观测器, 利用前馈环节予以补偿, 同时通过非线性组合抑制转速偏差, 实现整个微型燃气轮机控制的优化。论文详细介绍了微型燃气轮机的模型及 ADRC 控制策略, 通过负荷波动仿真及鲁棒性仿真来研究自抗扰控制器在提高微型燃气轮机系统稳定性上的优势。仿真结果表明, 基于自抗扰控制器的微型燃气轮机表现出良好的动态性能, 具有较强的鲁棒性能。

关键词: 微型燃气轮机; 自抗扰控制; 建模; 仿真研究

Auto disturbance rejection control of microturbine system

XIAO Hong-chang¹, TONG Jia-peng², YU Tao²

(1.Dongguan Power Supply Bureau, China Southern Power Grid CO. LTD, Dongguan 511700, China;

2.College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The microturbine is a complex thermal dynamic model. It is impossible to achieve accurate control because of its uncertainty and nonlinearity. In order to realize its steady control and fully exhibit its advantages among the distributed generation, the auto disturbance rejection control is introduced. Based on the input of rotational speed, extended-state observer is established. Also the controller uses the feedback to compensate and forms nonlinear algorithms to restrain state errors, which leads to optimize the microturbine's control. The paper presents the micro-turbine and the control strategy of ADRC in detail. Researches on how the ADRC improve the stability of the micro-turbine system are done via load disturbance and robust simulation. Simulation results show that the controller possesses good dynamic performance and stronger robustness.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50807016) and National Natural Science Foundation of Guangdong Province(No.06300091).

Key words: microturbine; auto disturbance rejection control; modeling; simulation research

中图分类号: TM71 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)13-0007-06

0 引言

微型燃气轮机 (Microturbine) 是近年来新发展的一类热机, 它具有清洁高效、低成本及高可靠性的特点, 因此得到高度的关注和迅速的发展。国内外对微型燃气轮机进行了相关研究, 建立了微型燃气轮机的动态模型, 文献[1]对微型燃气轮机进行了模块化建模, 建立了微型燃气轮机的六阶系统模型; 文献[2]建立了微型燃气轮发电机系统的简单传递函数模型; 文献[3]建立了微型燃气轮机工

作于额定转速附近的简化模型, 以上的论文均把重点放在建立微型燃气轮机模型的工作上, 而对微型燃机的控制却较少涉及。对于微型燃气轮机这个复杂的非线性系统, 我们有必要采用鲁棒性更强的协调控制策略, 因此我们在微型燃气轮机控制中引入基于扩展状态观测器的自抗扰控制器 ADRC (Auto disturbance rejection controller)。

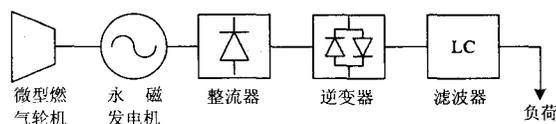


图1 微型燃气轮机发电系统示意图

Fig.1 Microturbine system architecture

基金项目: 国家自然科学基金项目 (50807016); 广东省自然科学基金项目 (06300091)

本文介绍了微型燃气轮发电机系统的工作过程,把微型燃气轮机及其电气部分当作一个整体,建立了微型燃气轮发电机系统的完整的数学模型,并详细阐述了自抗扰控制策略,通过把自抗扰控制策略与常规PI控制方法进行比较,研究自抗扰控制在提高微型燃气轮机稳定性能的特点。典型微型燃气轮机发电系统结构图如图1。

1 微型燃气轮机发电系统模型

1.1 燃气轮机模型

微型燃气轮机的工作过程大致为:常压下的空气通过压缩机入口进入气轮机,当空气压缩到最有利于燃烧的条件时,燃料在燃烧室与空气混合,然后进行充分的燃烧,高温排气在汽轮机里面膨胀做功产生机械功率,燃料的化学能在燃烧的过程中转移到了蒸汽当中。这种能量是根据气体焓来测量的,在通过汽轮机过程中膨胀做功^[4]。

微型燃气轮机是一个复杂的热动力系统,建立其准确的数学模型并不现实也没有必要。假定微型燃气轮机工作在额定转速附近,且不考虑

开机与停机的慢动态过程,在此基础上建立燃气轮机的简化模型^[3]如图2,设定约束条件简化模型有助于仿真,但同时由于忽略了某些因素使得模型的不确定性增加,因此有必要采取更为有效的自抗扰控制措施来减少这些不确定性对整个微型燃气轮机系统的影响。

微型燃气轮机的控制包括转速控制(Speed control)及加速度控制(Accelerate control)、温度控制(Temperature control)和燃料控制(Fuel flow control)。在正常运行时,微型燃气轮机的转速控制系统使得在一定负荷时维持转速基本不变,速度控制在部分负荷的时候起主要作用,温度控制则起了一个限制微型燃机排气温度的作用,而加速度控制则是为了防止转子超出允许的范围。一般情况下排气温度小于给定的温度基准,微型燃气轮机以速度调节为主;当排气温度大于给定的温度基准时,温度控制系统发出指令减少燃料系统的燃料流量,从而降低排气温度,确保微型燃气轮机运行的安全性。

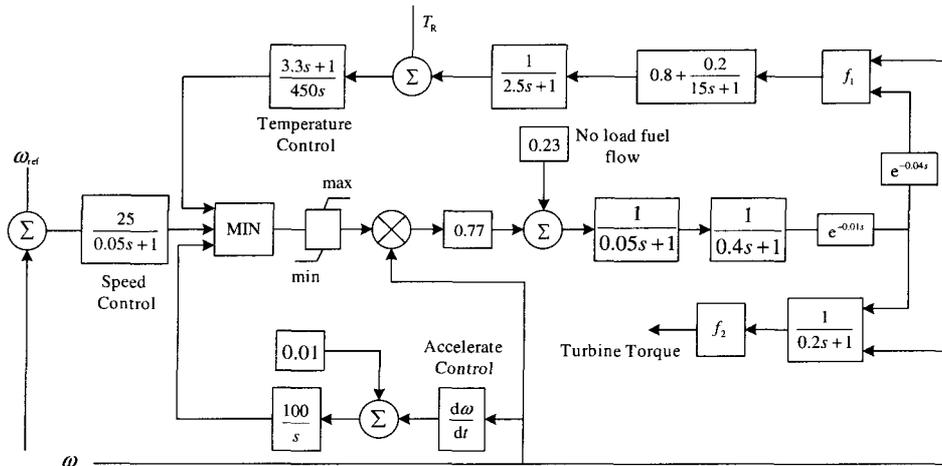


图2 微型燃气轮机模型
Fig.2 Microturbine model

由于微型燃气轮机大部分时间运行在以速度控制为主的情况下,本论文对其速度控制设计自抗扰控制器,而温度控制仍然采用常规的PI控制器。

其中燃气轮机模型中的转矩方程和排气温度方程分别为:

$$f_1 = T_R - 700(1 - W_f) + 550(1 - \omega) \quad (1)$$

$$f_2 = 1.3(W_f - 0.23) + 0.5(1 - \omega) \quad (2)$$

其中: ω 为燃机转速, W_f 为燃料流量信号, T_R 为排气温度基准,本论文中取 $T_R=950^\circ\text{C}$, ω 为发电机转速。转矩方程在100%负荷的情况下基本上是精确的,在其他情况下会存在小于5%的误差,排气温度方程相对来说不是那么精确,但由于温度控制只在温度参考值附近起作用,因此可以忽略其带来的影响。

1.2 永磁发电机及整流器的数学模型

该系统中所使用的发电机是高速永磁同步发电

机, 它与通常所说的同步发电机的区别在于永磁同步发电机采用永磁体励磁, 它的模型与同步发电机的模型相类似, 只要把励磁电流设置为定值即可, 文献[5]对永磁发电机进行了详细建模。整流器的详细模型在文献[6]中进行阐述, 其作用就是把永磁发电机发出的高频交流电流转化为直流。正如永磁发电机一样, 整流器也作为一个不可控的环节, 在建模过程中可适当的进行简化。假定永磁发电机阻尼转矩可以忽略, 可以建立永磁发电机及整流器的整体数学模型^[7]。

永磁发电机的转子运动方程可以表示为:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{T_j} (T_m - T_e) \quad (3)$$

式中: T_m 为微型燃机输出的机械转矩 (即图 2 中 Turbine Torque), T_e 为整流器输出的电磁转矩, T_j 为发电机转子的机械惯性时间常数。

永磁发电机出口线电压 V_{LL} 可表示为:

$$V_{LL} = V_m \sin(\omega t) = K_v \omega \sin(\omega t) \quad (4)$$

式中: V_m 为发电机出口线电压的幅值, K_v 为电压系数。对于三相全波整流桥, 考虑换相重叠角时, 输出的直流电压可表示为:

$$V_{dc} = \frac{3}{\pi} V_m - \frac{3\omega L_B}{\pi} I_{dc} \quad (5)$$

其中: L_B 为发电机定子绕组的漏感, V_{dc} 和 I_{dc} 分别为整流器直流侧的直流电压和直流电流。

若联立 (4) 和 (5) 两式可得:

$$K_e \omega = V_{dc} + K_x \omega I_{dc} \quad (6)$$

根据 (4)、(5) 两式可定义系数 K_e 和 K_v 分别为:

$$K_e = \frac{3K_v}{\pi}, \quad K_x = \frac{3L_B}{\pi}$$

整流器输出的电磁功率可表示为:

$$P_e = V_{dc} I_{dc} = K_e \omega I_{dc} - K_x \omega I_{dc}^2 \quad (7)$$

图 3 中的 C_{dc} 为整流器直流侧的平波电容, 假定逆变器输入电流为 I_{dc1} , 则根据电路原理可得:

$$I_{dc} - I_{dc1} = C_{dc} \frac{dV_{dc}}{dt} \quad (8)$$

假定整流器的损耗可以忽略, 则永磁发电机输出的电磁功率与整流器输出的电磁功率相等, 因此可以得出永磁发电机的电磁转矩为:

$$T_e = \frac{P_e}{\omega} = K_e I_{dc} - K_x I_{dc}^2 \quad (9)$$

永磁发电机及整流器的简化模型如图 3。

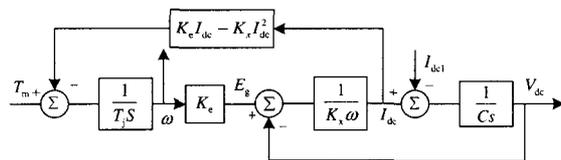


图 3 永磁发电机及整流器的等效模型

Fig.3 Permanent magnet generator and rectifier model

1.3 逆变器的数学模型

逆变器的作用是接受整流器输出的直流, 并将其逆变成工频电流。当微型燃气轮机系统作为一个孤立的电力网络运行时, 可以通过控制逆变器来控制负荷的电压及频率, 而有功和无功输出则根据负荷的需要自动的调整; 当该系统与电网并联运行时, 由于电网的电压和频率是一定的, 因此采用定功率控制可以控制其与电网的功率交换。本论文研究微型燃气轮机系统作为一个独立的电力网络时的情况, 对逆变器采用 PWM 调制方法, 通过 PI 控制器把逆变器出口的电压控制在 380 V, 并在逆变器的出口设置滤波电感来消除部分由逆变器产生的谐波。为了便于仿真, 也为进一步研究微型燃气轮机发电系统的并网运行, 本文直接采用 Matlab/Simulink 中的逆变器模型进行仿真研究, 逆变器与整流器之前的环节之间通过受控电压源来连接, 详细的模型及其控制方法详见 Matlab。

2 ADRC 控制策略

自抗扰控制是一种基于过程误差的非线性鲁棒控制技术。它根据过程误差的大小和方向, 通过配置非线性结构实施反馈控制, 利用扩张状态观测器观测出系统的状态变量及系统模型内扰和外扰的影响, 采用前馈补偿的方法将被控对象转化成简单的积分串联型系统^[8]。自抗扰控制器主要由安排过渡过程、扩张状态观测器、非线性组合及扰动补偿四部分组成^[9], 自抗扰控制器的结构如图 4。

自抗扰控制器的非线性跟踪微分器能够根据对象的承受能力, 安排合理的过渡过程, 并提取广义微分信号, 消除由于初始误差过大而引起的超调; 扩张状态观测器将系统未建模的动态和未知外扰作用归结为系统总扰动进行估计并予以补偿。自抗扰控制器不依赖被控对象的数学模型及外界扰动的具体形式, 其非线性组合使自抗扰控制器具有很好的适应性和鲁棒性。自抗扰控制器的结构如图 4。

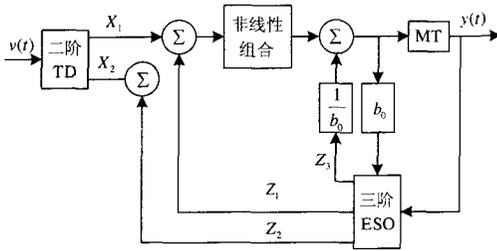


图 4 自抗扰控制器结构示意图

Fig.4 Schematic diagram of ADRC

2.1 跟踪微分器

在文献[10]所提到的三种跟踪——微分器中，我们采用二阶跟踪——微分器。为了避免在原点附近的颤振，将符号函数 sign 改为线性饱和函数 sat 就得到有效的二阶跟踪——微分器：

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -R_1 \text{sat}\left(x_1 - v(t) + \frac{|x_2| x_2}{2R_1}\right) \end{cases} \quad (10)$$

其中：

$$\text{sat}(A, \delta) = \begin{cases} \text{sign}(A), |A| > \delta \\ \frac{A}{\delta}, |A| \leq \delta, \delta > 0 \end{cases} \quad (11)$$

2.2 扩张观测器

采用常规的状态观测器进行反馈控制时，往往需要建立对象的较为精确的模型，但由于微型燃气轮机系统的不确定性与非线性，使这种方法受到很大的限制。而自抗扰技术中的扩张观测器在设计中不需要对象的精确模型，对确定和不确定、线性和非线性、定常和时变系统不须区分，只需要对象的输入和输出数据就可以实时估计对象状态、未建模动态和外扰对对象的作用^[11]。对于二阶系统可以建立三阶扩张观测器：

$$\begin{cases} \varepsilon = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_1 \varepsilon \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_2 \text{fal}(\varepsilon, \frac{1}{2}, h) + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_3 \text{fal}(\varepsilon, \frac{1}{4}, h) \end{cases} \quad (12)$$

其中：

$$\text{fal}(\varepsilon, \alpha, \delta) = \begin{cases} |\varepsilon|^\alpha \text{sign}(\varepsilon), |\varepsilon| > \delta \\ \frac{\varepsilon}{\delta^{1-\alpha}}, |\varepsilon| \leq \delta \end{cases} \quad (13)$$

2.3 误差的非线性组合

经典 PID 控制器采用误差的线性组合来计算控制量，这种组合常常引起快速性和超调量之间的矛盾，因此我们采用如下的非线性组合：

$$u_1 = \beta_{01} \text{fal}(\varepsilon_0, \alpha_0, \delta) + \beta_{02} \text{fal}(\varepsilon_1, \alpha_1, \delta) + \beta_{03} \text{fal}(\varepsilon_2, \alpha_2, \delta) \quad (14)$$

其中： $\varepsilon_1 = X_1 - Z_1$ ， $\varepsilon_2 = X_2 - Z_2$ ， $\varepsilon_0 = \int \varepsilon_1 dt$ 。

3 仿真研究

本论文主要进行两部分仿真研究，其一为稳定性仿真研究，研究微型燃气轮机系统在扰动情况下能不能保持稳定，在负荷变化时能否迅速且较小超调量的跟踪其变化；第二部分为鲁棒性研究，研究微型燃气轮机模型结构或参数变化时，自抗扰控制器能不能提高微型燃气轮机系统的鲁棒性。仿真通过把自抗扰控制与传统的 PID 控制相比较，研究自抗扰控制器在微型燃气轮机控制中的优势。

3.1 控制器参数

常规 PI 控制器的参数为： $K_I=1.1$ ， $K_P=12.5$ ，自抗扰控制其的参数为： $\beta_1=1$ ， $\beta_2=500$ ， $\beta_3=50$ ， $b=20$ ； $\beta_{01}=0$ ， $\beta_{02}=5$ ， $\beta_{03}=0.3$ ， $a_0=0.5$ ， $a_1=0.8$ ， $a_2=0.6$ ， $R_1=60$ ， $\delta=0.001$ 。以上控制器参数是通过反复调试整定获得的。

3.2 负荷波动仿真

此仿真模拟微型燃气轮机在 30 s 时失去 40% 的负荷，并且在 50 s 时恢复到额定值，图 5 给出了机械转矩 T_m 、燃料流量 W_f 、转子速度 ω 和排气温度 T_E 的仿真结果。显然，自抗扰控制器的引入增强了整个微型燃气轮机系统的稳定性，模型的输出均得到改善，调节时间变短，且不会出现超调量过大的情况。特别是转速控制更能体现自抗扰控制器的优越性，由于自抗扰控制器的引入，也使得温度控制表现出更好的效果，排气温度的输出也变得平滑。

3.3 短路仿真试验

在发生短路之前，微型燃气轮发电机系统带 15 kW 的负荷，在 18 s 的时候发生短路，持续 0.3 s 后故障被切除，仿真结果如图 6。

从图中可以看出，短路故障发生时，负荷电压和直流电压均突然下降，在经过一个振荡过程之后，两种控制器均能够使系统恢复到正常状态，但在自抗扰控制器的作用下，振荡过程显然短了许多，而

且超调量也较小。

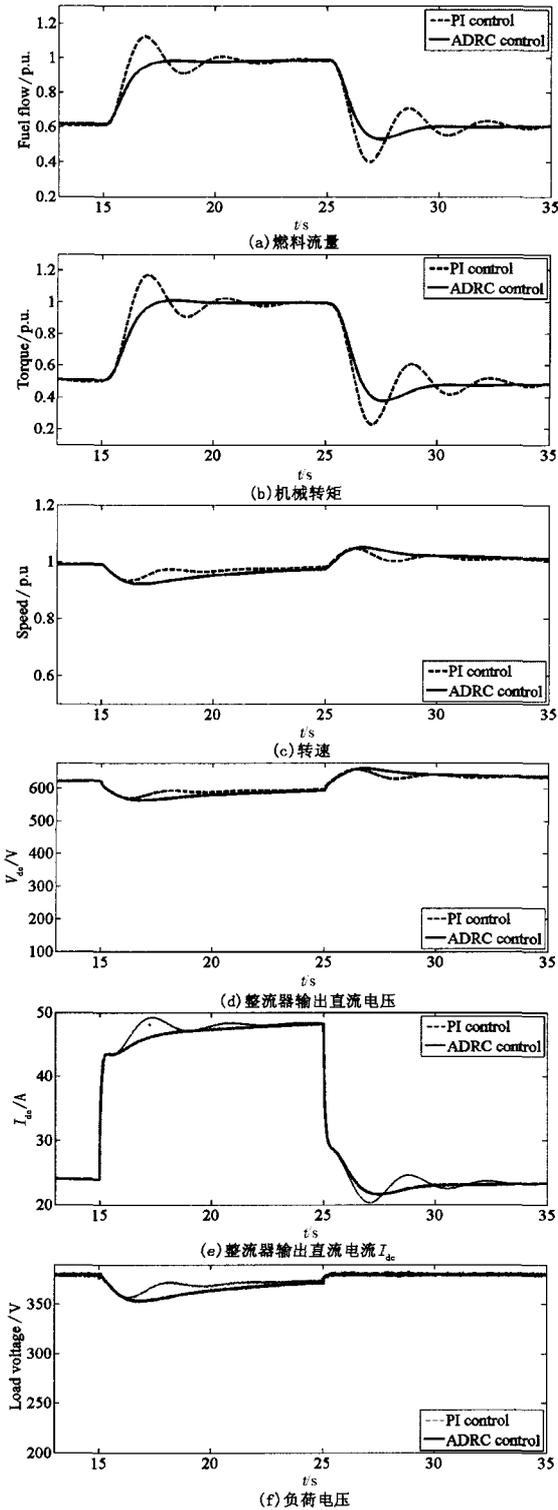


图 5 负荷波动仿真

Fig. 5 Simulation results of load disturbance

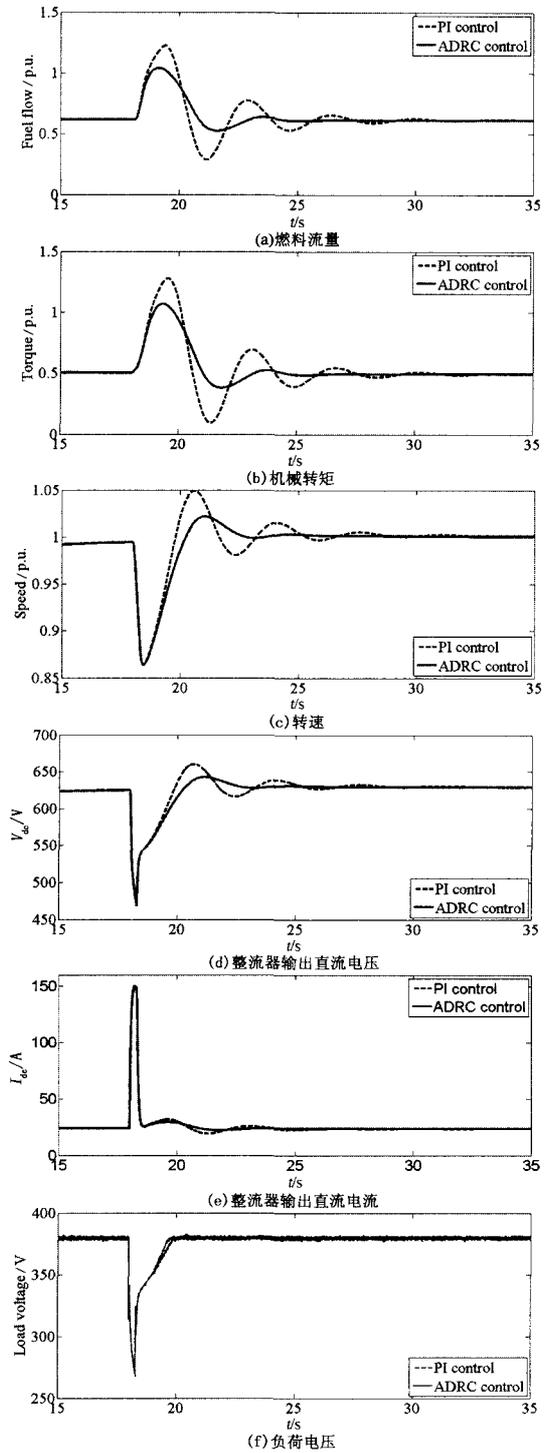


图 6 短路故障仿真

Fig. 6 Simulation result of short circuit fault

3.4 鲁棒性仿真

此部分研究微型燃气轮机模型参数发生变化时系统能不能保持其鲁棒性能, 在仿真中我们把转

子惯性时间常数从原来的 15.64 减小到 9, 而把排气温度参考值从原来的 950°C 减小到 800°C, 同时把转矩方程改为:

$$f_2 = 1.428(W_f - 0.3) + 1.5(1 - \omega) \quad (15)$$

仿真结果如图 7, 我们可以看出, 当模型的结构及参数发生变化时, 系统的输出振荡变得更剧烈, 暂态过程持续时间也变长, 但相比之下, 自抗扰控制器仍然能够维持良好的控制性能。

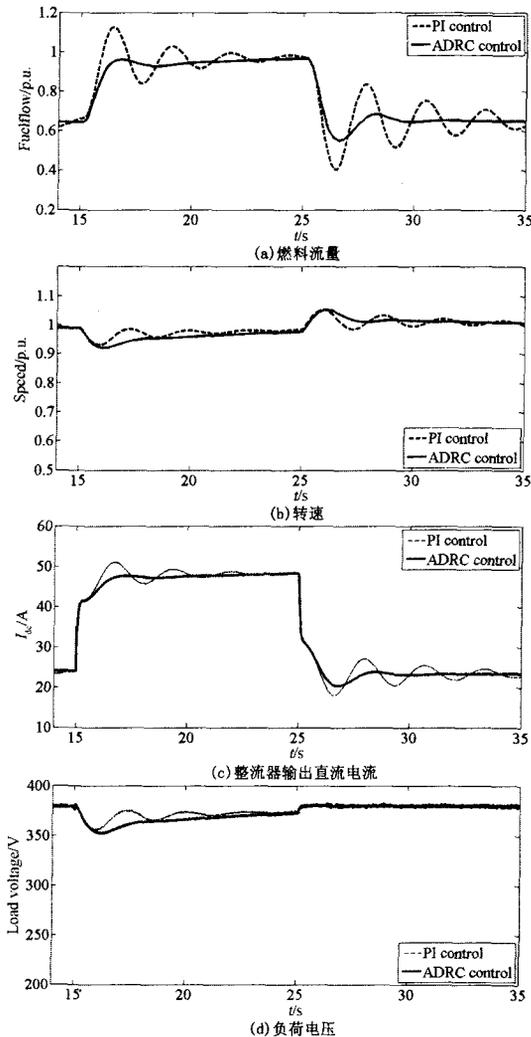


图 7 鲁棒性仿真

Fig. 7 Robust simulation result

4 结论

通过把自抗扰控制与常规 PI 控制器相比较仿真, 可以得出如下结论: 自抗扰控制器能够有效的观测系统的外部扰动并通过非线性补偿, 有效地抑制了转速偏差, 提高了系统的响应速度, 同时保持

较小的超调量, 系统发生波动时, 自抗扰控制器能够迅速的过渡到新的平衡点; 自抗扰控制器对模型的精度要求较低, 通过鲁棒性仿真研究可以看出, 在模型结构及参数发生变化时, 自抗扰控制器仍然能够保持系统输出跟踪给定值, 很好地提高微型燃气轮机系统的鲁棒性。

参考文献

- [1] 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]. 中国动力工程学报, 2005, 25(1): 13-17.
LI Zheng, WANG De-hui, XUE Ya-li, et al. Research on Ways of Modeling of Micro Gas Turbine (Part 1): Analysis of Dynamic Characteristic[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 25(1): 13-17.
- [2] Robert Lasseter. Dynamic Models for Micro-Turbines and Fuel Cells[A]. in: Power Engineering Society Summer Meeting[C]. 2001.761-766.
- [3] Rowen W J. Simplified Mathematical Representation of Heavy Duty Gs Turbines[J]. ASME Journal of Engineering for Power, 1983, 105(4): 865-869.
- [4] Jurado F. Modeling Micro-turbines Using Hammerstein Models[J]. International Journal of Energy Research, 2005, 29: 841-855.
- [5] Vadher V V, Smith I R, Fanthome B A. Simulation of Permanent Magnet Generator/rectifier Combination[J]. Aerospace and Electronic System, 1986, (22): 64-70.
- [6] Marques G D. A Simple and Accurate System Simulation of Three-phase Diode Rectifiers[A]. in: Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society[C]. 1998.416-421.
- [7] Lasseter R. Dynamic Models for Micro-turbines and Fuel Cells[A]. in: Power Engineering Society Summer Meeting[C]. 2001.761-766.
- [8] 夏长亮, 宋战锋. 变速恒频风力发电系统变桨距自抗扰控制[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(14): 91-95.
XIA Chang-liang, SONG Zhan-feng. Pitch Control of Variable Speed Constant Frequency Wind Turbines Based on Active-disturbance-rejection Controller[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(14): 91-95.
- [9] 韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007,(1): 24-31.
HAN Jing-qing. Auto Disturbances Rejection Control Rechnique[J]. Frontier Science, 2007,(1): 24-31.
- [10] 韩京清, 王伟. 非线性跟踪-微分器[J]. 系统科学与数学, 1994, 14(2): 177-183.
HAN Jing-qing, WANG Wei. Nonlinear Tracking-Differentiator[J]. Journal of System Science and Mathematic Science, 1994, 14(2): 177-183.
- [11] 田沛, 宿喜峰, 马平等. 基于自抗扰技术的主汽温全程控制[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(15): 73-77.

(下转第 31 页 continued on page 31)

并且由于对 DOC 的操作维护也很难达到理想的程度。嵌入式的实时操作系统虽然都支持对 DOC 的操作, 但是容错机制不理想, 经常出现损坏或者造成软件出错情况。

2) 基于 flash 的存储系统, 价格昂贵并且容量很小, 基本不适合于保护信息系统子站的应用。

3) 基于网络存储器的存储系统。目前看来网络存储器是最适合于保护信息子站的存储系统, 其可以提供数 Tb 的网络存储空间, 完全能够满足子站系统对存储容量的要求; 采用了多种技术保证数据的安全有效: 磁盘阵列可以防止因为硬盘损坏而造成的数据丢失; 冗余的电源和后备电池组件可以避免电力供应中断造成的数据的丢失; 服务器的多级文件访问权限可以阻止对数据的非授权访问; 访问迅速, 一般读写的速率都可以达到 Mb/s 级。并且网络存储系统上可以运行数据库, 继电保护信息子站可以通过数据库的接口来对数据进行访问, 大大改善了嵌入式保护信息子站的开发和运行环境, 效率和可靠性都会成倍提高。

由此看来网络存储器是最适合于保护信息子站的存储系统, 通过网络存储在广东电网的运行经验来看也基本验证了这一点。

6 IEC61850 的应用

随着 IEC61850 的推广, 继电保护信息子站需要具有接入采用 IEC61850 规约的保护装置的能力。IEC61850 采用面向对象的思想对一次设备和二次功能进行了统一建模, 提供和具体的通讯实现分开的抽象服务, 增强了设备间的互操作性。IEC61850 的面向对象的数据模型使得接入 IEC61850 的设备需要积极考虑数据库的组织模式。对于继电保护信息子站来说, 完全按照 IEC61850 的标准来建立数据库, 可以充分利用 IEC61850 的面向对象和信息丰富的优势, 使得基于数据库的应用。

目前保护信息系统的主站规约一般以 IEC103 为基础, 继电保护信息子站在接入 IEC61850 的保护装置以后, 需要将信息以非 IEC61850 的模式转发出

去, 所以继电保护信息子站需要增加非 IEC61850 协议的转出模块就需要将 IEC61850 转换为其他规约, 其中主要是 103 规约。这个模块实现起来相对来说比较容易, IEC61850 模型库中具有丰富的信息足够 103 规约使用。但这部分的实现难点是如何将 IEC61850 模型库中的信息进行分类, 例如如何知道哪些信息是动作元件, 哪些信息是运行告警等等, 虽然缺乏统一的提取原则, 但还是有一些原则可用, 所以我们在配置工具上作些预处理, 让配置工具对信息进行较粗的分类, 然后再人工挑选, 这样处理的结果可以满足要求。

7 结束语

继电保护信息子站在国内的应用已经有多年的历史, 但是一直以来难以有大的发展, 其原因诚然有继电保护装置类型繁多且接口不一定很规范的原因, 但也不能忽视本身技术不尽完美使其在推广应用过程中难以获得广大用户的认可, 在嵌入式继电保护信息子站的推广应用中, 有许多问题值得去深入研究探讨。

参考文献

- [1] 孙其博, 杨放春, 邹华. 基于 CORBA 技术的分布式智能网[J]. 数据通信, 2001:32-35.
SUN Qi-bo, YANG Fang-chun, ZOU Hua. Research on Distributed Intelligent Network Based on CORBA Technology[J]. Data Communications, 2001:32-35.

收稿日期: 2008-08-06; 修回日期: 2008-09-02

作者简介:

王文龙(1973-), 男, 高级工程师, 主要从事变电站自动化系统、数字化变电站技术、IEC61850 及其支撑协议、继电保护故障信息系统的研发工作; E-mail:wangwl@nari-relays.com

张兆广(1974-), 男, 工程师, 从事电力系统自动化工作;

李友军(1975-), 男, 工程师, 主要从事变电站自动化系统、继电保护及故障信息系统的研发工作。

(上接第 12 页 continued from page 12)

TIAN Pei, SU Xi-feng, MA Ping, et al. Full Scope Control on the Main Steam Temperature Based on ADRC Technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(15): 73-77.

收稿日期: 2008-08-13; 修回日期: 2008-10-05

作者简介:

肖洪昌(1964-), 男, 工程师, 主要从事电力系统调度运行管理工作; E-mail: xiaohc@139.com

童家鹏(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向电力系统自动控制;

余涛(1974-), 男, 副教授, 博士, 长期从事电力系统稳定性、非线性鲁棒协调控制等方面的研究工作。