

微型燃气轮机发电系统的建模与仿真

余涛, 童家鹏

(华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 微型燃气轮机发电系统是一种具有广泛应用前景的分布式发电系统。根据微型燃气轮机发电系统的动态特性, 把微型燃气轮机及电气部分当作一个整体, 建立了微型燃气轮机发电系统完整的数学模型, 并进一步研究了微型燃气轮机和逆变器的基本控制策略, 重点研究该系统的动态特性, 特别是负荷扰动时的动态特性, 仿真结果表明该系统模型能够反映实际微型燃气轮机发电系统。本论文的工作为进一步研究微型燃气轮机的热机控制与电气侧的逆变器控制的协调控制策略奠定了基础。

关键词: 分布式发电; 微型燃气轮机; 建模; 仿真; PWM

Modeling and simulation of the microturbine generation system

YU Tao, TONG Jia-peng

(College of Electric power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: The microturbine generation system will be the most widely used distributed generation in the near future. According to the dynamic characteristics of the Microturbine system, a mathematic model which treats the Microturbine and its electric system as a whole is built. Further researches on the basic control of the Microturbine system are presented. The dynamic characteristics of the Micro gas turbine system are emphasized, especially the characteristics of the load disturbance. Simulation results demonstrate the model is coordinate to the real Microturbine system. The general purpose of this project is for further researching thermodynamic engine control of the Microturbine and giving the basic resources to corresponding control of inverter control of generator electric side.

Key words: distributed generation; microturbine; modeling; simulation; PWM

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)03-0027-05

0 引言

近年来, 以风力发电、光伏电池和微型燃气轮机 (Microturbine) 等为代表的分布式发电 DG (Distributed Generation) 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^[1], 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。

典型微型燃气轮机发电系统结构图如图 1 所示。该独立电网系统由微型燃气轮机、永磁发电机、整流器、逆变器和负荷组成, 其中微型燃气轮机透平包含压缩器、能量回收器、燃烧室以及带一个负荷的动力透平机。其工作原理为: 从离心式压气机出来的高压空气先在回热器内由涡轮排气预热, 然后进入燃烧室与燃料混合、燃烧, 高温燃气送入向心式涡轮做功, 直接带动高速发电机 (转速在 50 000~120 000 r/min 之间) 发电, 高频交流电流经过整流器和逆变器, 即“AC-DC-AC”变换转化为工频交流电输送到交流电网^[2]。

基金项目: 广东省自然科学基金项目 (06300091)

微型燃气轮机发电系统的数学建模是对其实

施控制的基础。国内外在这方面已进行了一定研究^[3,5],但一般都把微型燃气轮机与电气系统分开建模,文献[3]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[4]只对微型燃气轮机进行建模与控制;文献[5]把逆变器之前的环节等效为一个电压源,而只对逆变器进行控制。而微型燃气轮机是一个完整的系统,等效处理和分开建模会割裂燃机系统和发电系统之间的内在耦合联系,不利于实现燃机系统和电气系统之间的协调控制设计。本文从微型燃气轮机的工作原理出发,建立了完整统一的微型燃气轮发电系统的仿真模型,为接下来的研究工作奠定了基础。

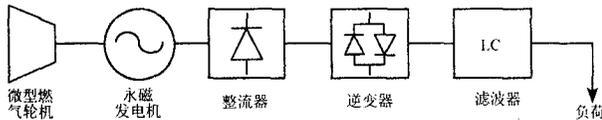


图1 微型燃气轮机系统示意图

Fig.1 Microturbine system architecture

1 微型燃气轮机系统的结构及数学模型

1.1 微型燃气轮机的数学模型

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^[6],在此基础上建立的微型燃气轮机模型如图2。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。

微型燃气轮机与蒸汽轮机有许多不同之处,最明显的区别就是微型燃气轮机在没有负荷的情况下,为了维持正常的运行需要燃料量占了额定燃料量很大的比重,本论文取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^[6],

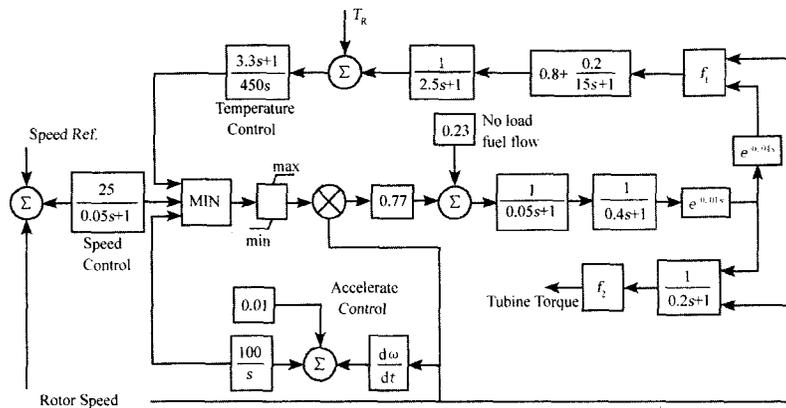


图2 微型燃气轮机模型

Fig.2 Microturbine model

这一点将会在仿真中得到验证;第二个区别是转速控制的方式,对于大型汽轮机,转速控制系统通过改变蒸汽流量来保持转速不变,而微型燃气轮机是改变燃料量来控制转速的。透平入口温度过高直接影响透平的安全性及系统的寿命,因此透平入口温度控制也是一个很重要的控制部分,在正常运行时,也是通过改变燃料量来控制透平入口温度不超过其最大设计值 T_{max} 。总的来说,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。

此外,图2中的限幅环节的最大值限制作为转速、加速度和温度控制三者控制输出的上限;而最小值限制则是为了确保有足够的燃料流量使燃气轮

机的燃烧系统正常工作。图2所示模型中的排气温度方程和转矩方程为:

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

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

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[7]对永磁发电机进行了详细建模。整流器的详细模型在文献[8]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。下面将两者作为一个整体建立数学模型, 同时假定阻尼转矩可以忽略^[9], 永磁发电机及整流器的简化模型如图 3。

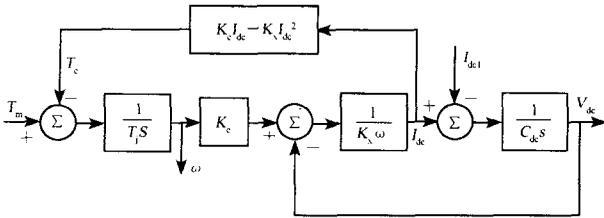


图 3 永磁发电机及整流器的简化模型

Fig.3 Permanent magnet generator and rectifier model

在本文中, 永磁发电机的转子运动方程可沿用一般发电机的转子运动方程, 即

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

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_x 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 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:

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

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:

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

1.3 逆变器及其 PWM 控制的数学模型

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 380V, 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。文献[10]建立了微型燃气轮机系统中逆变器的详细的数学模型; 本文所采用的是逆变器的四象限 (4QC) 状态空间平均 (SSA) 模型^[11], 即

$$\begin{bmatrix} L & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L & 0 & 0 \\ 0 & 0 & L & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{C}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{i}_1 \\ \dot{i}_2 \\ \dot{i}_3 \\ \dot{V}_{dc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & 0 & 0 & d_M - d_1 \\ 0 & -R & 0 & d_M - d_2 \\ 0 & 0 & -R & d_M - d_3 \\ d_1 & d_2 & d_3 & -\frac{1}{R_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \\ V_{dc} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{R_L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_1 \\ e_2 \\ e_3 \\ e_L \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中: d_k 为逆变器第 k 相上桥臂开关的占空比, 对应的第 k 相下桥臂的占空比为 $1-d_k$, d_M 为三相占空比的平均值, e_k 表示负荷电压, R 为逆变器交流侧输入滤波电感与功率开关的等效内阻之和, e_L 为直流侧的反电势, R_L 为直流侧负载, 本论文不考虑直流侧的反电势, 且直流侧不带负载, 所以该状态空间的第四行就蜕变为:

$$\sum_{k=1}^3 d_k i_k = i_{dc1} \quad (11)$$

对于占空比 d_k 可以定义如下:

$$d_k = \frac{1}{2} + \frac{m}{2} \sin[\omega t - \frac{2\pi}{3}(k-1) + \theta]$$

$$(k = 1, 2, 3) \quad (12)$$

$$d_M = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^3 d_k = \frac{1}{2} \quad (13)$$

其中： θ 为初相角， m 为逆变器调制系数：

$$m = \frac{2V_m}{V_{dc}} \quad (14)$$

式中： V_m 为逆变器出口 PWM 波的基波电压幅值从而得到逆变器的状态空间平均 (SSA) 模型：

$$\begin{bmatrix} L\dot{i}_1 \\ L\dot{i}_2 \\ L\dot{i}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R & 0 & 0 \\ 0 & -R & 0 \\ 0 & 0 & -R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ i_3 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_1 - (d_M - d_1)V_{dc} \\ e_2 - (d_M - d_2)V_{dc} \\ e_3 - (d_M - d_3)V_{dc} \end{bmatrix}$$

即 $L\dot{i}_k + i_k R = (d_k - d_M)V_{dc} - e_k (k = 1, 2, 3)$ (15)

2 仿真研究

此仿真主要模拟微型燃气轮发电机系统在负荷扰动时所表现的动态特性，在仿真的初始阶段，微型燃气轮机系统工作额定转速且不带负荷的情况下，在 10 s 的时候给该系统加上 15 kW 的负荷，在 20 s 的时候使负荷上升到额定值 30 kW，并在 30 s 的时候切掉 15 kW 的负荷。仿真结果如图 4~11。

从图 4、图 5 和图 6 中可以看出，微型燃气轮机空载达到稳态时，转速达到额定值 1 p.u.，机械转矩为 0，但此时燃料流量却保持在 0.23 p.u.。这一点验证了上文所提到的微型燃气轮机为维持正常运行所需要的基础燃料为设定值 0.23 p.u.。从整个仿真过程来看，微型燃气轮机所能调整的燃料量范围为 23%~100%，这个范围正好与 0~100% 的负荷功率相对应。

从图 6 中可以看出，空载时转子的速度为 1 p.u.，当负荷上升到 15 kW 时，转速下降到 0.98 p.u.，负荷继续上升到微型燃气轮机的额定容量时，转速继续下降到 0.96 p.u.，但整个仿真过程转速都维持在额定转速附近。

图 7~图 11 给出了微型燃气轮发电机系统的电气侧的仿真结果，当微型燃气轮机带 15 kW 的负荷时，整流器的输出电流为 23 A，直流电压为 625 V，逆变器的调制系数在 0.98 附近波动，当负荷上升到 30 kW 时，整流器的输出电流为 48 A，直流电压下降到 600 V，同时逆变器的调制系数相应地有所增加，在整个动态过程中随着负荷的增加电压有所下

降，但基本维持在 380 V 左右。

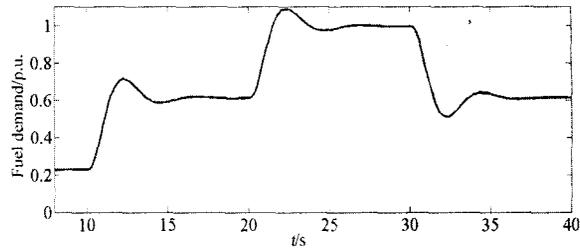


图 4 燃料流量

Fig.4 Fuel flow

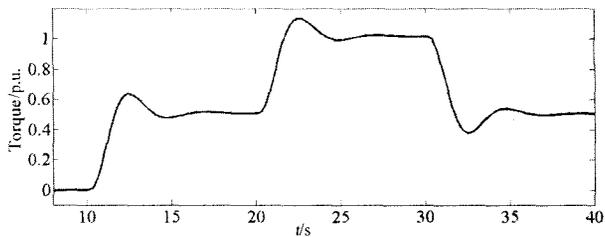


图 5 机械转矩

Fig.5 Mechanical torque

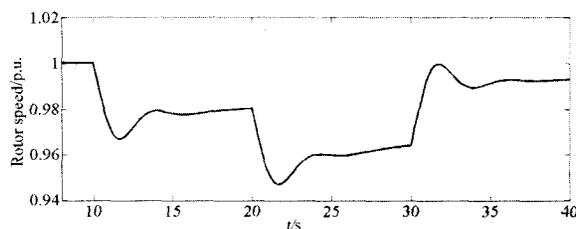


图 6 转速

Fig.6 Speed

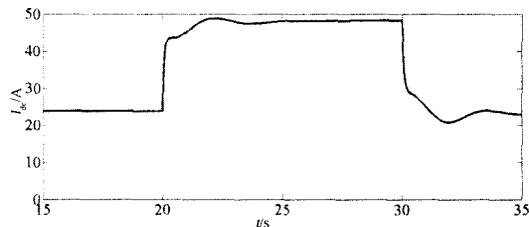


图 7 整流器输出的直流电流

Fig.7 Direct current I_{dc}

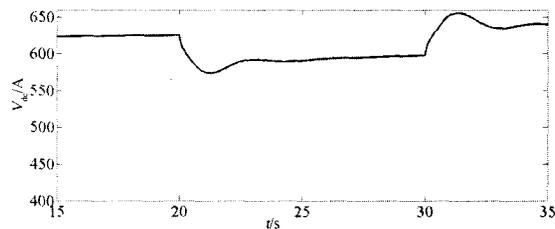


图 8 整流器输出的直流电压

Fig.8 Direct voltage

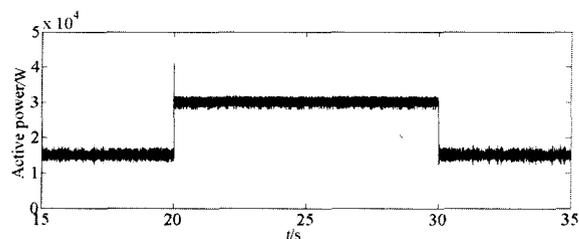


图9 负荷消耗的功率
Fig.9 Active power of the load

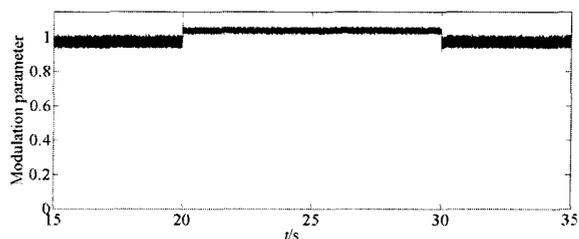


图10 逆变器调制系数
Fig.10 Modulation parameter

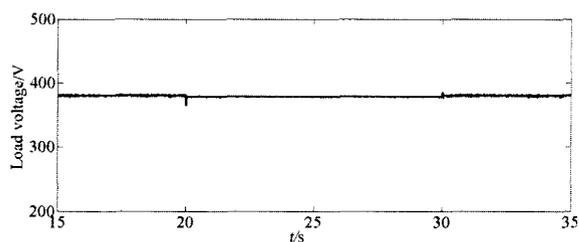


图11 负荷线电压
Fig.11 Load voltage

总的来说,微型燃气轮机在仿真中表现出良好的性能。首先,该系统采用电压源换流器(VSC),由于它具有电流自动关断能力,不需要外加换相电压,可在无源逆变方式下工作,能够自启动而脱离电网独立运行。其次,该系统具有快速调节的能力,这表明它不仅可以用于分布式发电,还可以备用电源及调峰电源,它能够为用户减缓电网拥挤,增加电网机动性,降低送电成本及改善电能质量。最后,系统的换流设备将发电机与电网分离,排除了对附加设备或为同步而进行的操作干扰,且在独立运行时能够很好地维持有功的平衡与电压的稳定^[12]。

3 结论

本文介绍了微型燃气轮发电机系统的工作原理,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,同时根据需要对微型燃气轮机进行速度控制、温度

控制和燃料控制,对逆变器也采用了基于PWM调制方法的电压控制。为了突出文章的重点,对永磁发电机和整流器采用了简化处理。通过仿真可以得出如下结论:

1) 整个仿真过程很好地体现了微型燃气轮机发电系统作为一个整体的特点,不仅反映了微型燃气轮机自身的动态,而且把整个系统的电气变换部分的动态过程很好地结合在一起表现出来,这些是等效处理和分开建模难以实现的。仿真结果与实际系统动态特性相吻合,为进一步研究微型燃气轮发电机系统的协调控制与并网运行奠定了基础。

2) 从0到100%工况范围内,燃料的供应随负荷的变化响应速度快,即负荷发生波动时,该模型能够很好地跟踪负荷的变化,并快速地过度到新的平衡态。在转速的控制作用下能够把转速维持在额定值的附近。

3) 文中的控制大多采用PI控制器,这种控制方法简单易行,但要获得更佳的综合控制鲁棒性和机电控制协调性,尚需考虑引入更高级的非线性鲁棒协调控制方法^[13]。

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.
YANG Ce, LIU Hong-wei, LI Xiao. Micro-Turbine Technology [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2003, 18(1): 1-4.
- [2] 刁正纲,微型燃气轮机走向商业化[J].燃气轮机技术,2000,13(4):13-16.
DIAO Zheng-gang, Micro-Turbine Tward Commercialization[J]. Gas Turbine Technology, 2000, 13(4): 13-16.
- [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].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 Turbines (Part I): Analysis of Dynamic Characteristic[J]. Chinese Journal of Power Engineering, 2005, 25(1): 13-17.
- [4] Jurado F. Modelling Micro-turbines Using Hammerstein Models[J]. International Journal of Energy Research, 2005, 29: 841-855.
- [5] Barsali S, Ceraolo M, Pelacchi P. Control Techniques of Dispersed Generators to Improve the Continuity of Electricity Supply [C]. Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE, 2002, 2: 789-794.

(下转第45页 continued on page 45)

般是子站)作好配置后,另一方直接调配置就行,不用再重复输入。图9为系统主子站通信的流程图。

图9所示的是主站对一个子站的通信处理主循环,主站对每个子站访问都是独立的。通信采用异步通信模式,主站发送请求命令,子站响应,提高了整个系统的可靠性以及接入子站过程中的灵活性。

3 故障信息系统新的通信标准 IEC61850 的展望

IEC 61850 是关于变电站自动化系统的第一个完整的通信标准体系,明确提出了信息分层、可实现系统的配置管理、面向对象、采用映射的方法和具体网络独立、数据对象统一建模,符合采用网络传输建立无缝通信系统的要求,已成为无缝通信系统传输规约的基础,对故障信息处理系统软件的开发有着重要的指导作用。

但考虑到目前采用 IEC61850 规约的变电站还很少,各个生产厂家的保护设备还不支持此标准,而且故障信息系统仅是处理与保护有关的信息,因此,设计故障信息系统的主站与子站间的通信协议,采用 103 规约较为合理且便于应用,但 IEC61850 规约是数字化变电站发展的一种趋势,未来变电站内必定会推广应用 IEC61850 规约。

4 结论

本故障信息系统严格遵循 103 规约,同时预留 IEC61850 的接口,具有良好的开放性,可接入不同

厂家、不同协议的设备,实现了保护装置信息的共享。主站与子站之间的通信以安徽电网故障信息系统主子站通信规约为基础,既具有通用性,又符合安徽电网实际情况。目前该系统已研发成功并陆续有二十余套在安徽电网内应用,运行状况良好。

参考文献

- [1] 张永健. 电网监测与调度自动化[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 周全仁, 张海. 现代电网自动控制系统及其应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [3] 罗钰玲. 电力系统微机继电保护[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2005.
- [4] DL/T667-1999. 远动设备及系统 第5部分 传输规约第103篇 继电保护设备信息接口配套标准[S].
- [5] 廖泽友,等. 继电保护故障信息处理系统通信方案的工程实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(4).
- [6] IEC 60870-5-101 远动设备及系统 第5部分 传输规约第101篇 基本远动任务配套标准[S].
- [7] DL/T 559-94 220~500KV 电网继电保护装置运行整定规程[S].
- [8] 国家电力监管委员会, 电监会5号令《电力二次系统安全防护规定》[S].

收稿日期: 2008-03-31; 修回日期: 2008-06-12

作者简介:

王皓(1970-), 男, 高级工程师, 硕士, 从事继电保护及整定计算方向的研究管理工作;

谢红福(1980-), 男, 工程师, 硕士, 从事故障信息系统的研发工作; E-mail: xiehongfu186@163.com

何鸣(1957-), 女, 高级工程师, 硕士, 从事继电保护的研究管理工作。

(上接第31页 continued from page 31)

- [6] Rowen W I. Simplified Mathematical Representations of Heavy Duty Gas Turbines[J]. Journal of Engineering for Power, 1983, 105(4): 865-869.
- [7] 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.
- [8] Marques G D. A Simple and Accurate System Simulation of Three-phase Diode Rectifiers [A]. Proceedings of the 24th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1998, 1: 416-421.
- [9] Lasseter R. Dynamic Models for Micro-turbines and Fuel Cells[A]. In: Power Engineering Society Summer Meeting[C]. 2001, 2:761-766.
- [10] Mollerstedt E, Stothert A. A Model of a Micro-turbine Line Side Converter[A]. In: Proceedings of International Conference on Power System Technology[C]. 2000, 909-914.
- [11] 张加胜,张磊.PWM 逆变器的直流侧等效模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 103-107.
ZHANG Jia-sheng, ZHANG Lei. Research on the

DC-side Equivalent Model of PWM Inverters [J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 103-107.

- [12] 丰镇平,微型燃气轮机技术的进展及应用展望[J/OL]. www.power.newmaker.com/art_8832.html, 2005-05-26/2008-05-05.
- [13] 余涛,朱守真,李东海,等.基于扩张状态观测器的电力系统非线性鲁棒协调控制[J].中国电机工程学报, 2004, 24(4): 1-5.

YU Tao, ZHU Shou-zhen, LI Dong-hai, et al. Extended State Observer Based Nonlinear Robust Coordinated Control of Power Systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 1-5.

收稿日期: 2008-03-31; 修回日期: 2008-05-07

作者简介:

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。

E-mail: taoyu1@scut.edu.cn

童家鹏(1984-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向电力系统自动控制。