

双模糊电力系统稳定器实现

莫 娜,田建设

(华北电力大学 电气工程学院,河北 保定 071003)

摘要: 针对常规模糊电力系统稳定器(C-FPSS)稳态性能差、结构简单、不利于规则调整的缺点,提出了能在线调整量化因子的双模糊电力系统稳定器(D-FPSS)的设计方案,在 C-FPSS 基础上增加了一个上级模糊控制器,形成二级模糊控制系统。该控制器通过调整加权因子改变控制规则,再用优化的控制规则进行控制。在 Matlab/Simulink 环境下采用龙山发电厂的参数进行非线性仿真,在不同故障运行条件下的结果分析表明:D-FPSS 控制超调小,稳定速度快;控制效果受系统运行方式影响小,适应能力强;可很好地适应运行点的变化,具有较好的鲁棒性。在实际应用中,以 M68HC705P9 单片机为例,通过查表法实现 D-FPSS,不但能够对控制规则在线优化,而且成本低、设计简单,有实用价值。

关键词: 电力系统稳定器; 双模糊结构; M68HC705P9 单片机; 查表法

中图分类号: TM 44

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)04-0060-04

0 引言

理论和实践表明^[1-3],采用电力系统稳定器(PSS)抑制低频振荡是一种经济、简单且有效的方法。但传统的 PSS 设计基于被控对象的精确模型,不能适应不同工况的运行^[4]。

应用自适应技术设计 PSS,虽能对电力系统进行在线辨识^[5],但是计算量大且耗时,对于采样周期短的快速电力系统,实现时有一定的困难。模糊逻辑、神经网络等智能方法用于 PSS 研究,虽有学习能力、自适应能力等优点,但很难实现逻辑思维,无法实现学习和推理的统一^[6]。

常规模糊稳定控制器(C-FPSS)以其物理概念清晰、知识表达简便^[7],而且容易在低成本的标准单片机上用软件实现,得到了广泛的应用^[8-9]。但是,C-FPSS 的控制动作欠细腻,结构比较简单,一旦模糊控制表确定之后,就不能改变。对于不同的控制对象,简单的模糊控制器采用不变的控制规则不能获得预期的控制效果^[10]。

这里提出了一种双模糊电力系统稳定器(D-FPSS),这种双模糊结构可以依据偏差的变化对量化因子进行在线调整,克服了 C-FPSS 控制算法稳态性能差的缺点,从而改善系统的控制精度。用龙山发电厂的数据进行了非线性仿真,验证了双模糊稳定控制器的性能优于 C-FPSS。以 M68HC705P9 单片机为例,通过查表法实现 D-FPSS 的功能推理,响应速度快、设计简单,具有较强的实用性。

1 设计原则

D-FPSS 是在 C-FPSS 基础上又增加了一个上

级模糊控制器,形成二级模糊控制系统。原理结构如图 1 所示。为抑制低频振荡,选择发电机的瞬时速度偏差($\Delta\omega$)及加速度偏差($\Delta\dot{\omega}$)作为输入信号, K_1 、 K_2 和 K_3 分别是量化因子和比例因子。

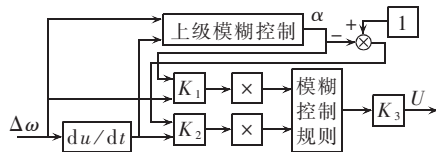


图 1 双模糊结构的电力系统稳定器框图

Fig.1 Double-fuzzy structure of PSS

该控制器通过调整加权因子 α 改变控制规则,再用优化的控制规则进行控制,即通过对模糊规则的调整从根本上提高模糊控制器的性能。这种模糊电力模型结构可用下列解析式表示:

$$U = F[\alpha K_1 \Delta\omega, (1-\alpha)K_2 \Delta\dot{\omega}] \quad (1)$$

式中 F 是模糊函数。

2 D-FPSS 控制算法实现

数字单片机的模糊控制算法有多种实现形式,常用的方法有:强度转移法、直接查表法和解析公式法^[11]。现采用双重查表法实现双模糊电力系统稳定器的推理。这种模糊控制器克服了由于查询表格离线生成、不便于规则调整的缺点,能改善系统的稳定性能,实现规则的在线调试。

2.1 控制表生成

为简化计算,便于对控制规则进行校正,把控制规则数字化,即把语言变量定义为相应的整数。速度偏差($\Delta\omega$)和加速度偏差($\Delta\dot{\omega}$)的论域{NB,NM,NS,ZE,PS,PM,PB}用数字表示为{-3,-2,-1,0,1,2,3}^[12]。

为避免反复调试,取得平滑控制效果,输出 U 的

论域 $\{N6,N5,N4,N3,N2,N1,ZE,P1,P2,P3,P4,P5,P6\}$ 表示为 $\{-6,-5,-4,-3,-2,-1,0,1,2,3,4,5,6\}$ 。由运行经验可知,当发电机的转速 $\Delta\omega$ 为正大、转速变化率 $\Delta\dot{\omega}$ 也为正大时,应采取较强的减速控制,增加发电机的励磁,PSS 输出为正大;当 $\Delta\omega$ 为正大、 $\Delta\dot{\omega}$ 为负大时,不采取控制等。这样可得 $7\times 7=49$ 条控制规则,根据这些规则可归结为一个模糊关系 R 。如式(2)(3)所示^[13]。

$$R=\bigcup_{i,j}\Delta\omega_i\times\Delta\dot{\omega}_j\times U_{i,j}\tag{2}$$

$$U_{i,j}=(\Delta\omega_i\times\Delta\dot{\omega}_j)\cdot R\tag{3}$$

再用重心法,进行反模糊化,最终得到 U 的模糊控制规则表,如表 1 所示。

表 1 控制规则表 U
Tab.1 Fuzzy control rules for U

$\Delta\dot{\omega}$	$\Delta\omega$						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0
-2	-5	-4	-3	-2	-1	0	1
-1	-4	-3	-2	-1	0	1	2
0	-3	-2	-1	0	1	2	3
1	-2	-1	0	1	2	3	4
2	-1	0	1	2	3	4	5
3	0	1	2	3	4	5	6

加权因子 α 作为上级模糊控制引入,在系统运行方式变化时,可以通过调整 α 的大小,改变对误差和误差变化的加权程度。

根据实际情况, α 的基本论域为 $[0,1]$,模糊子集可选取 $\{VS,S,M,B,VB,L\}$ 为 $\{0.3,0.4,0.5,0.6,0.7,0.8\}$,为避免小数运算,以方便编程,可将 α 扩大 10 倍成为整数进行计算。相应地,最后把所得的结果 U 除以 10 得到控制量。与 U 的规则表方法一样,得到的 α 的模糊控制规则表如表 2 所示。

表 2 控制规则表 α
Tab.2 Fuzzy control rules for α

$\Delta\dot{\omega}$	$\Delta\omega$						
	-3	-2	-1	0	1	2	3
-3	6	5	4	3	4	5	6
-2	6	6	5	4	5	6	6
-1	7	6	5	5	5	6	7
0	8	7	6	5	6	7	8
1	7	6	5	5	5	6	7
2	6	6	5	4	5	6	6
3	6	5	4	3	4	5	6

2.2 查表法实现

由于单片机的内存是按一维空间存放数据,并以地址标识某一内存单元进行数据的存取,因此将这 2 张控制表分别以行存放形式,逐行依次存入单片机的 EPROM 中。

而在实际控制中,模糊控制器只需进行 4 个步骤。

步骤 1 在每个控制周期中采样发电机的转速 ω ,计算即时 $\Delta\omega$ 和 $\Delta\dot{\omega}$ 。

$$\Delta\omega(k)=\omega(k)-\omega_0(k-1)\tag{4}$$

$$\Delta\dot{\omega}(k)=\Delta\omega(k)-\Delta\omega(k-1)\tag{5}$$

式中 $k=1,2,\cdots$ 。

把式(4)代入式(5)得:

$$\Delta\dot{\omega}(k)=\omega(k)-2\omega(k-1)+\omega(k-2)\tag{6}$$

$\Delta\omega$ 和 $\Delta\dot{\omega}$ 均由采样值得到,减少了存储次数,加快了响应速度。

步骤 2 给系统加个大扰动,把扰动后 $\Delta\omega$ 和 $\Delta\dot{\omega}$ 的变化范围 $[-x_e,x_e]$ 和 $[-x_e,x_e]$ 作为输入量的实际论域;通过式(7)确定 K_1,K_2 的初值^[14]。

$$K_1=n/x_e,\quad K_2=m/x_e\tag{7}$$

式中 n,m 分别为 $\Delta\omega$ 和 $\Delta\dot{\omega}$ 的模糊子集论域。

将实际的 $\Delta\omega$ 和 $\Delta\dot{\omega}$ 分别乘以量化因子,取得相应论域元素表征的值 $\Delta\omega_i$ 和 $\Delta\dot{\omega}_j,i,j$ 取 $0\sim 6$ 的整数。

步骤 3 将 $\Delta\omega_i$ 和 $\Delta\dot{\omega}_j$ 的论域元素与矩阵行列数 i 和 j 相对应。

$$i=[\text{INT}(\Delta\omega_i)+3],\quad j=[\text{INT}(\Delta\dot{\omega}_j)+3]$$

然后得到 $\alpha_{i,j}$ 规则表存放地址:表首地址 $+i\times 7+j$ 。将得到的 $\alpha_{i,j}$ 对 $\Delta\omega_i$ 和 $\Delta\dot{\omega}_j$ 进行修正。

$$\Delta\omega_i^*=\alpha_{i,j}\Delta\omega_i,\quad \Delta\dot{\omega}_j^*=(1-\alpha_{i,j})\Delta\dot{\omega}_j$$

步骤 4 同查找 $\alpha_{i,j}$ 的方法类似,将修正后 $\Delta\omega_i^*$ 和 $\Delta\dot{\omega}_j^*$ 查找 U 的规则表,可得输出控制量的论域值 $U_{i,j}$ 。乘以比例因子 K_3 ,得实际输出控制量。

3 Matlab 仿真

以国电河北龙山发电厂的 $60\text{ MV}\cdot\text{A},220\text{ kV}$ 发电机组的参数进行非线性仿真。选用 Fuzzy Logic 工具箱设计模糊控制器。参数(除时间常数,其他取标么值)如下:

$$\tau_{d0}'=5.17\text{ s},\tau_{d0}''=0.019\text{ s},\tau_q''=0.030\text{ s}$$
$$x_d=1.698,x_d'=0.224,x_d''=0.157,x_q=1.653$$

针对系统不同的运行方式和干扰类型,进行了大量仿真,下面是部分仿真结果。

a. $P_m=0.6\text{ p.u.}$,1 s 时在无穷大电源处发生三相短路,0.2 s 后故障切除。转速偏差 $\Delta\omega$ 和功角 $\Delta\delta$ 如图 2 所示(图中,曲线 1 为无 PSS 控制,2 为 C-FPSS 控制,3 为 D-FPSS 控制;图 3 同)。这时,C-FPSS 和

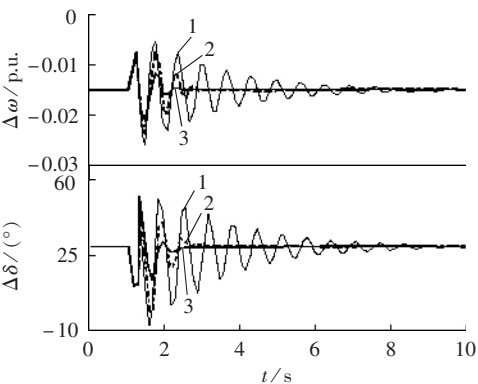


图 2 三相短路故障时动态响应曲线
Fig.2 Dynamic response curves to three-phase fault

D-FPSS 都能较快地平息低频振荡,但 D-FPSS 控制时超调更小,稳定速度更快。

b. 系统投入双回线运行,1 s 时发生单回线三相短路,0.2 s 后故障消失。 $\Delta\omega$ 和 $\Delta\delta$ 如图 3 所示。这时,C-FPSS 抑制低频振荡的效果较差,D-FPSS 对功角给予了更强的约束,说明 D-FPSS 控制效果受系统运行方式影响小,适应能力更强。

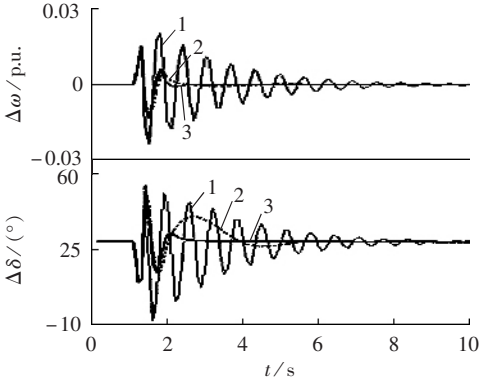


图 3 双回线运行时的动态响应曲线
Fig.3 Dynamic response curves at dual-line operating mode

c. 分别针对不同的运行点变化情况,发生单相接地故障时,D-FPSS 的控制效果见图 4,图中,曲线 1、2、3 分别代表 P_m 值取 0.4、0.6、0.9 p.u.。可以看到,D-FPSS 能够很好地适应运行点的变化,具有较好的鲁棒性。

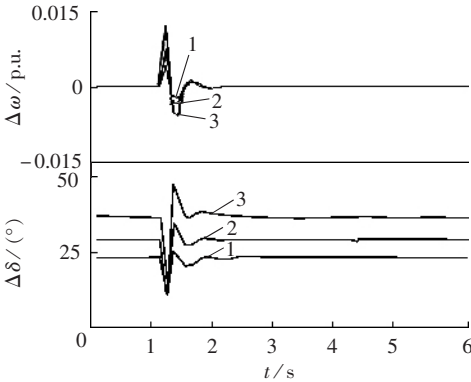


图 4 运行点变化时 $\Delta\omega$ 和 $\Delta\delta$ 的动态响应曲线
Fig.4 Dynamic response curves of $\Delta\omega$ and $\Delta\delta$ to operating point change

4 单片机模糊 PSS 功能的实现

4.1 硬件设计

励磁控制系统结构框图如图 5 所示。
随着计算机技术的发展,数字式自动电压调节器逐渐取代了模拟式调节器。以 M68HC705P 9 单片机为例,设计了模糊 PSS 作为常规励磁调节器的附加控制的功能模块。主要包括:转速测量单元、控制执行机构和配套的电源。
M68HC705P9 属于低功耗、高性能的 MC68HC 05 系列八位机^[13]。它具有 8 位的 CPU,2 112 个字节 EPROM 和各种 I/O 功能。硬件结构如图 6 所示。

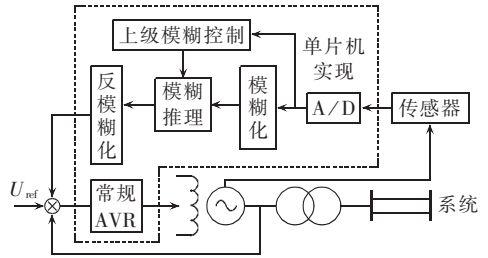


图 5 励磁控制系统结构框图
Fig.5 Structure of excitation control system

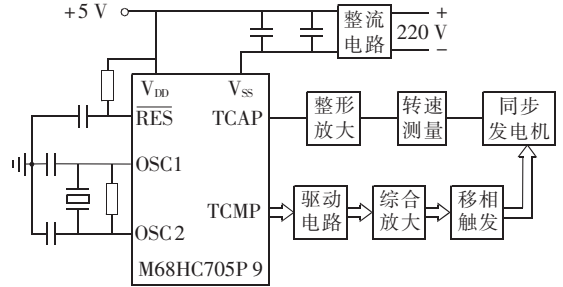


图 6 D-FPSS 的硬件结构图
Fig.6 Hardware structure of D-FPSS

其中,转速测量电路包括位置检测器^[15]和放大整形电路。位置检测器由同轴安装的 3 个圆盘组成,分别是:在定子上固定发光盘、光敏盘,遮挡盘与转子为弹性联接并同轴旋转。发光盘装有发光二极管,光敏盘装有光敏三极管 V_T ,遮挡盘上有一个圆孔,当转子带动遮挡盘旋转后,光敏三极管 V_T 收到光信号的变化,呈导通和截止 2 种状态。然后把光电传感器得到的电脉冲信号经过放大整形后,获得相同频率的方波信号脉冲。

将方波脉冲信号输入 M68HC705P 9 的比较定时器(TACP)。M68HC705P 9 的晶振频率为 4 MHz,计数器最小分辨时间 $t_d=2\mu s$,若脉冲周期 $\Delta T=m\times t_d$ ($m=1,2,\dots$),则转速的计算公式为

$$\omega = \frac{60}{m \times t_d} \text{ (r/min)}$$

通过软件计算 $\Delta\omega$ 和 $\Delta\dot{\omega}$,进行模糊推理,输出一个电压信号。最后,输出信号经过综合放大器和移相触发电路得到一个方波脉冲控制晶闸管整流电路的输出,从而调节发电机励磁电流。

4.2 软件流程图

图 7 为电力系统稳定器模糊控制系统核心部分的程序流程图。

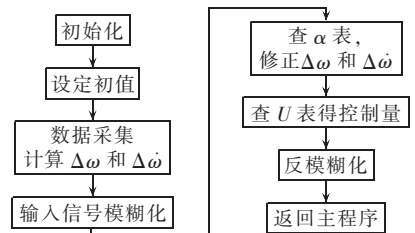


图 7 程序控制流程图
Fig.7 Software flowchart

相应软件具有如下功能:

a. 当控制电路工作后,主程序复位完成接口初始化;

b. 对频率采样,计算 $\Delta\omega$ 和 $\Delta\dot{\omega}$;

c. 模糊化,查表,反模糊化;

d. 输出控制。

5 结语

所设计的双模糊电力系统稳定器,具有以下优点:

a. 能较大程度地识别和利用控制系统所提供的信息,自动地修正控制规则,从而显著改善模糊控制系统的控制精度和稳态性能;

b. 所采用的模糊控制为简单实用的控制算法,且双重查表法实现了规则的离线生成、在线调试,易于在微机及单片机系统中实现,能够满足整个系统的实时性及精度的要求,有较强的实用性。

参考文献:

- [1] 赵书强,丁峰,侯子利,等. 自寻优模糊电力系统稳定器的设计[J]. 电工技术学报,2004,19(1):94-98.
ZHAO Shu-qiang,DING Feng,HOU Zi-li,et al. Design of self-optimizing fuzzy power system stabilizer[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2004,19(1):94-98.
- [2] ROMAN M A,RAMIREZ J M,CANEDO C. An investigation on the use of power system stabilizers for damping inter-area oscillations in longitudinal power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,1998,13(2):552-559.
- [3] 刘增煌,方思立. 电力系统稳定器对电力系统动态稳定的作用及与其他控制方式的比较[J]. 电网技术,1998,22(3):4-10.
LIU Zeng-huang,FANG Si-li. The effect of power system stabilizers(PSS) on power system dynamic stability and comparison with other control method[J]. Power System Technology,1998,22(3):4-10.
- [4] LIN Chin-teng. A neural fuzzy control system with structure and parameter learning[J]. Fuzzy Sets and Systems,1995,70(1):183-212.
- [5] RUDNOWSKI D J,PIERRE D A,SWITH J R,et al. Coordination of multiple adaptive PSS unit using a decentralized control scheme[J]. IEEE Trans on Power Systems,1992,7(1):294-300.
- [6] 叶其革,王晨皓,吴捷. 模糊神经网络及其在电力系统中的应用[J]. 继电器,2004,32(11):71-77.
YE Qi-ge,WANG Chen-hao,WU Jie. Fuzzy neural network and its application in power system[J]. Relay,2004,32(11):71-77.
- [7] 彭建春,王耀南. 基于 P-Fuzzy-PI 控制的电力系统稳定器[J]. 电力系统自动化,1997,21(10):32-34.
PENG Jian-chun,WANG Yao-nan. Power system stabilizer based on P-Fuzzy-PI control[J]. Automation of Electric Power Systems,1997,21(10):32-34.
- [8] 程远楚,漆为民,叶鲁卿,等. 发电机励磁的非线性解析模糊控制[J]. 中国电机工程学报,2003,23(9):121-125.
CHENG Yuan-chu,QI Wei-min,YE Lu-qing,et al. A nonlinear analytical fuzzy logic excitation controller of generator[J]. Proceedings of the CSEE,2003,23(9):121-125.
- [9] 金敏杰,高金峰,王俊鹏,等. 一种自适应模糊 PID 发电机励磁电压调节器设计[J]. 电网技术,2001,25(10):26-29.
JIN Min-jie,GAO Jin-feng,WANG Jun-kun,et al. An adaptive fuzzy PID generator excitation regulator[J]. Power System Technology,2001,25(10):26-29.
- [10] 姜惠兰,魏强,唐晓俊. 基于模糊神经网络的发电机励磁控制器的研究[J]. 电网技术,2005,29(1):50-55.
JIANG Hui-lan,WEI Qiang,TANG Xiao-jun. Study on the generator excitation controller based on fuzzy neural network[J]. Power System Technology,2005,29(1):50-55.
- [11] 谢宋和,甘勇. 单片机模糊控制系统设计与应用实例[M]. 北京:电子工业出版社,1999.
- [12] SANAYE-PASAND M,MALIK O P. A fuzzy logic based PSS using a standardized rule table[J]. Electric and Power Systems,1999,27(3):29-31.
- [13] 余永权,曾碧. 单片机模糊逻辑控制[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,1995.
- [14] 李士勇,夏承光. 模糊控制和智能控制理论与应用[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,1990.
- [15] 董清,单波,郝玉山,等. 一种发电机稳定监控的实现方法[J]. 电力系统自动化,1999,23(10):14-16.
DONG Qing,SHAN Bo,HAO Yu-shan,et al. Implement of the method for improving and monitoring generator stability[J]. Automation of Electric Power Systems,1999,23(10):14-16.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

莫娜(1982-),女,壮族,广西河池人,硕士研究生,研究方向为电力系统自动化技术(E-mail:moare@163.com);

田建设(1955-),男,河北保定人,教授,研究方向为电力系统自动化技术。

Implementation of power system stabilizer with double-fuzzy structure

MO Na,TIAN Jian-she

(School of Electrical Engineering,North China Electric Power University,Baoding 071003,China)

Abstract: Since C-FPSS(Common Fuzzy Power System Stabilizer) has poor steady state performance, simple structure and difficult rule regulation,a D-FPSS(Double-Fuzzy structure PSS) is proposed, which adds a superior fuzzy controller to the C-FPSS to on-line regulate the quantization factors, forming a two-level control system. The control rule is optimized by regulating the weight factor. Different fault conditions with parameters of Longshan Power Plant are simulated with Matlab/Simulink and results show that the proposed D-FPSS has fast and stable control performance with small overshoot,good adaptability to the change of system operating mode and strong robustness for different operating points. Taking M68HC705P 9 microcontroller as a practical example,D-FPSS is implemented using reference table method,which realizes on-line control rule optimization with low cost and simple design.

Key words: power system stabilizer; double-fuzzy structure; M68HC705P 9 microcontroller; reference table method