

模糊自适应 PID 控制在逆变电源中的应用

邢娅浪 孙世宇 赵锦成

(军械工程学院电气工程系 石家庄 050003)

摘要: 逆变电源控制系统具有非线性、时变性等性质,运用常规的模糊 PID 控制难以达到满意的控制效果。将专家经验用于模糊 PID 参数的在线自适应整定,设计了基于专家经验的自适应模糊 PID 控制器。这种控制器既具有模糊 PID 控制器的精度高、稳定性好、鲁棒性强的优点,又具有专家控制器进入稳定状态快的特点。仿真实验结果表明:基于专家经验的自适应模糊 PID 控制器在逆变电源控制系统的控制中,控制性能优于单独模糊 PID 控制的性能,表现出了良好的自适应性、稳定性、鲁棒性,能够用来实现对逆变电源控制系统的有效控制。

关键词: 模糊控制;自适应;逆变电源

中图分类号: TP23 **文献标识码:** A

Appliance of fuzzy self-adaptive PID controller scheme for inverters

Xing Yalang Sun Shiyu Zhao Jincheng

(Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003)

Abstract: The control system of inverters has character of nonlinear and time varying and so on, the perfect control cannot be obtained with conventional fuzzy PID control method. In order to improve the performance of fuzzy PID controller in the control system, a self-adaptive fuzzy PID control based on expert's experience is applied. In this paper, the working principle of the whole system is provided, and the design process of fuzzy controller is also given in detail. Simulation results show that: the self-adaptive fuzzy controller can not only stabilize the output sine waveforms but also realize rapid transient response under parameter variations and load disturbances. Its control performance is better than conventional fuzzy PID controller. It can be used to control the control system of inverters effectively.

Keywords: fuzzy control; self-adaptive; inverter

0 引言

逆变电源被称为“明天的电源”,应用于许多重要领域,如通讯系统、金融部门、医疗卫生、军事设备等。这些场合要求逆变器具有输出电压波形稳态精度高、动态响应快、可靠性高、抗负载启动冲击能力强等性能,因此输出电压波形的质量成为考核逆变电源性能的重要技术指标^[1]。为了获得高质量的输出电压波形,波形控制技术一直是逆变电源领域的研究热点。模糊 PID 控制具有优于常规 PID 控制器的控制品质,以其简便、调整灵活、实用性强、精度高、稳定性好、鲁棒性强的优点,在逆变电源控制系统中得到了越来越广泛的应用^[2]。然而,一般来说,模糊控制没有知识库,不具备自适应能力,灵活性和交互性都不是很强^[3]。为提高控制系统的性能,满足控制中实时性的要求,本文引入专家判断进行控制的方法,将操作人员的调整经验作为知识存入计算机中,建立知识库与现场实际情况相符的专家系统改善控制效果。通过仿真实验证明,基于专家经验的自适应模糊整定 PID 控制改善了逆变电源系统的稳定性能,提高

了输出波形的质量,使系统具有良好的动、静态性能。

1 控制系统工作原理

单向高频链逆变电源系统拓扑结构如图 1 所示。

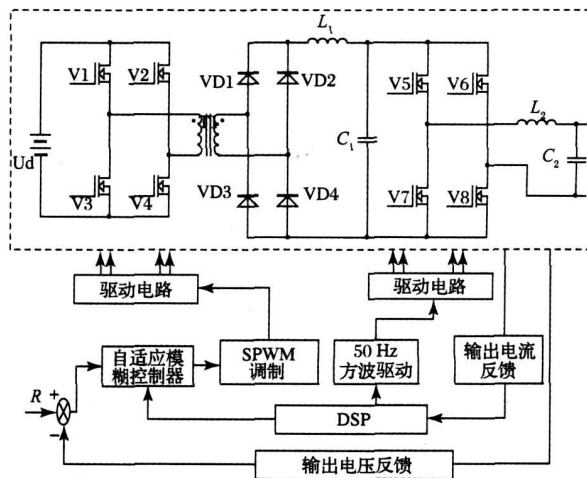


图 1 高频链逆变电源系统拓扑结构

系统采用目前应用最广泛的功率单向流动高频链逆变器方案——DC/DC 变换型高频链逆变器^[4]。该方案是在直流侧和逆变器间插入一级具有高频环节 DC/DC 变换器, 使用高频变压器实现电压调整和电器隔离, 具有三级功率变换(DG-HFAG-DG-LFAC)。由于该类型逆变器存在二极管整流环节, 其功率只能单向传递, 所以又称单向型高频链逆变器。其基本工作原理如下: 直流电压——SPWM 逆变——高频变压器——具有正弦包络线的正弦调制高频交流信号——快恢复二极管整流——小电容滤波——50 Hz 低频方波驱动——50 Hz 正弦波。DSP (TMS320LF2407A) 作为整个系统的控制中心, 输出电压反馈与参考电压进行比较, 误差和误差的变化率送入自适应模糊控制器, DSP 通过模糊控制算法输出修正后的 SPWM 控制信号对前级逆变器进行驱动, 使输出电压稳定在所设定的期望值上^[5]; 后级电路由 DSP 产生 50 Hz 方波进行驱动。

2 基于专家经验的自适应模糊 PID 控制器设计

2.1 具有专家经验的 PID 控制原理^[6]

根据专家经验, 可以得到调整 PID 控制器参数的一些规则, 如:

规则 1: 如果系统输出偏差大并且继续加大, 说明误差已经很大, 参数的调整量应按照最大(小) 输出, 以迅速调整误差, 使误差绝对值以最大速度减小;

规则 2: 如果系统输出偏差不大并且偏差变化率也不大, 说明误差绝对值朝减小方向变化, 或已达到平衡状态, 可考虑保持控制器输出不变, 不去修改 PID 控制器的系数;

规则 3: 如果系统输出偏差为正并且偏差正在减小, 应较小的调整参数的调整量;

规则 4: 如果系统输出偏差为负并且继续向负的方向增加, 应减小参数的值。

有了相应的专家经验, 将其应用于 PID 参数 K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊推理规则的公式中, 即可设计出基于专家经验的自适应模糊 PID 控制系统。

2.2 自适应模糊(SAFC)PID 控制器设计

自适应模糊 PID 控制是在 PID 控制算法基础上, 首先通过对系统的稳定性、响应速度、超调量和稳态精度等分析找出 PID 参数, 得出 K_p 、 K_i 、 K_d 对系统输出特性的影响, 建立 K_p 、 K_i 、 K_d 3 个参数与误差 e 和误差变化率 ec 之间的模糊关系, 在系统中不断检测 e 、 ec , 再根据由专家经验制定出的模糊规则进行模糊推理, 查询模糊矩阵表对参数 K_p 、 K_i 、 K_d 进行在线调整, 以满足不同 e 、 ec 时对 PID 控制参数的整定要求, 从而使被控对象具有良好的动态性能。

2.2.1 自适应模糊 PID 控制结构

自适应模糊 PID 控制原理框图如图 2 所示。3 个二维

模糊控制器分别实现 PID 控制器的系数的调节。其控制原理为: 根据当前的偏差 e 和偏差的变化 ec , 将 3 个模糊控制器 FC1、FC2、FC3 分别进行模糊化、模糊逻辑推理、解模糊等一系列操作, 最后得到当前 PID 控制器参数的调节量。

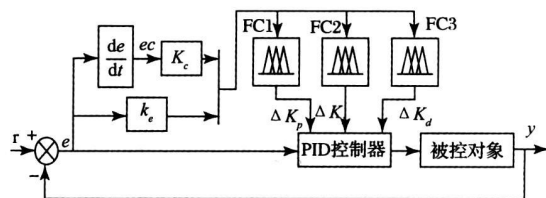


图 2 自适应模糊 PID 控制结构

2.2.2 自适应模糊 PID 控制器设计

自适应模糊 PID 控制器的设计可以按照以下步骤进行:

1) 模糊化^[7]

根据系统设计要求, 自适应模糊 PID 控制器是一个二输入三输出模糊控制器, 以 e 、 ec 为输入, ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 为输出。将系统误差 e 、误差变化率 ec 和输出 PID 参数的模糊状态输出论域分为 7 个模糊集: { 负大(NB)、负中(NM)、负小(NS)、零(ZO)、正小(PS)、正中(PM)、正大(PB) }, 论域为 $[-6, 6]$ 。系统误差 e 、误差变化率 ec 的隶属度函数采用对称三角形非均匀分布, 输出变量 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d 的隶属度函数采用对称三角形的均匀分布。

2) 建立推理规则^[8]

根据专家经验以及 e 、 ec 和 K_p 、 K_i 、 K_d 之间的整定原则, 建立合适的模糊推理运算规则, 模糊控制规则表如表 1、2、3 所示。

规则解释: 以表 1 中的规则 IF $E = NB$ and $EC = PB$ then $\Delta K_p = Z$ 为例, 应用专家经验规则 2。当偏差为负大(NB)、偏差变化率为正大(PB) 时, 说明被控量远远小于设定量, 但以较大的速度减小偏差, 因此可保持当前的比例系数, 模糊推理输出为零(Z)。

其他表格中的规则依此类推。

表 1 ΔK_p 的模糊控制规则

ΔK_p	e						
	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
ec	PB	Z	Z	NM	NM	PM	PB
	PM	PS	Z	NS	NM	PS	PB
	PS	PM	PS	Z	Z	Z	PM
	Z	PB	PS	Z	Z	Z	PM
	NS	PB	PS	Z	Z	Z	PS
	NM	PB	PM	PS	PS	NS	Z
	NB	PB	PM	PM	PS	NM	Z

表 2 ΔK_i 的模糊控制规则

ΔK_i		e						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
ec	PB	Z	Z	NM	NM	PB	PB	PB
	PM	PS	Z	NS	NS	PM	PB	PB
	PS	PM	PS	Z	Z	PS	PM	PB
	Z	PB	PM	PS	Z	PS	PM	PB
	NS	PB	PB	PS	Z	Z	PS	PB
	NM	PB	PB	PM	NS	NS	Z	PS
	NB	PB	PB	PB	NM	NM	Z	Z

表 3 ΔK_d 的模糊控制规则

ΔK_i		e						
		NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
ec	PB	NB	Z	PB	PB	PB	PM	PB
	PM	NB	NS	PM	PM	PM	PS	PM
	PS	NB	NB	PS	PS	PS	Z	PS
	Z	NB	NM	NM	NS	Z	PS	PM
	NS	PS	Z	PS	PS	PM	NM	NB
	NM	PM	PS	PM	PM	PS	NS	NB
	NB	PB	PM	PB	PB	PB	Z	NB

3) 模糊推理算法及解模糊

模糊控制器的模糊推理选用 MAX-MIN 合成法,解模糊方法选用加权平均法,加权平均法适合输出模糊集的隶属函数是对称的情况。其计算公式为:

$$Z^* = \frac{\sum \mu_{\psi}(w_j) \cdot w_j}{\sum \mu_{\psi}(w_j)} \tag{1}$$

式中: w_j 和 $\mu_{\psi}(w_j)$ 分别表示隶属度函数的质心和隶属度值。

K_p 、 K_i 、 K_d 的模糊控制规则表建立以后,根据如下方法进行 3 个参数的自适应校正:

$$\begin{aligned} K_p &= K_p + \Delta K_p \\ K_i &= K_i + \Delta K_i \\ K_d &= K_d + \Delta K_d \end{aligned}$$

3 系统仿真

基于以上分析,利用 Matlab/Simulink 对本设计系统进行了仿真^[9]。图 3 为系统在自适应模糊 PID 控制(SAFC)和普通模糊 PID 控制两种控制方式下所对应的阶跃响应波形。从图 3 中可见,与普通模糊 PID 控制相比,基于专家经验的自适应模糊 PID 控制具有上升时间较短、动态响应速度更快、超调量更小等优点。

图 4 和图 5 是采用基于专家经验的自适应模糊 PID 控制器对高频链逆变器进行控制的仿真结果。仿真主要参数如下:开关频率 50 kHz;输入电压为直流 48 V,输

出为正弦交流电压 220 V,频率 50 Hz;输出滤波电感 10 mH,滤波电容 15 μ F。图 4 为在阻性负载下逆变电源的输出电压和电流波形。图 5 是在突加和突减负载时 SAFC 的动态性能。可见,运用自适应模糊 PID 控制的逆变电源系统对于改善系统的输出波形,提高系统的动态品质有着很好的作用,表现出了良好的稳定性和鲁棒性。

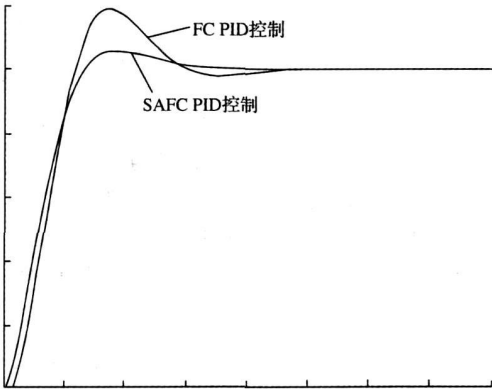


图 3 阶跃响应下两种控制方法的输出波形比较 (Y 轴:0.2/div,X 轴:10/div)

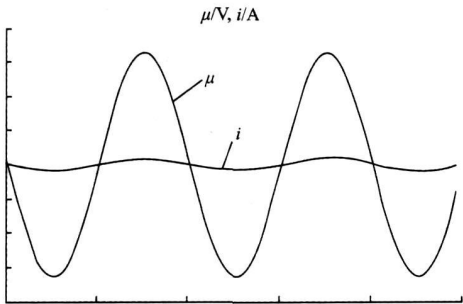


图 4 SAFC 阻性负载 (Y 轴:100 V/div,20 A/div;X 轴:10 ms/div)

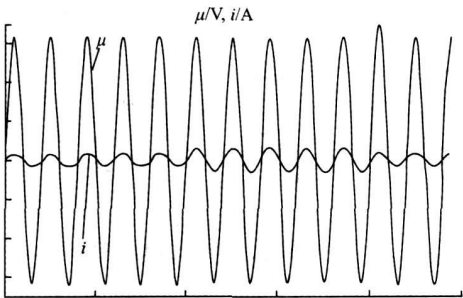


图 5 SAFC 下突减和突加负载下的输出波形 (Y 轴:100 V/div,20 A/div;X 轴:50 ms/div)

4 结 论

逆变电源控制系统具有非线性、时变性等性质,运用

常规PID控制器很难达到控制要求^[10]。本文建立了自适应模糊整定PID控制器,通过仿真实验分析,表明自适应模糊整定PID控制能够改善逆变电源系统的动、静态性能,具有良好的自适应性、稳定性、鲁棒性,能够满足对逆变电源的控制要求。

参 考 文 献

- [1] 庞庆,王震,占江山,等.基于重复学习控制的400 Hz 逆变电源研究[J].电力电子技术,2010,44(5): 61-69.
- [2] 田广,梁国.探针定位系统的模糊PID双模控制[J].应用科技,2009,36(10): 44-48.
- [3] 余兵,彭佑多,刘繁茂.模糊控制及其在液压伺服控制系统中的应用[J].液压与传动,2006(10): 56-63.
- [4] 张国娟,张代润.高频链技术的发展与应用[J].电源技术应用,2005,8(7): 43-49.
- [5] 邢娅浪,赵锦成,孙世宇.基于STC单片机的SPWM波形实现[J].国外电子测量技术,2009,28(12): 51-53.
- [6] 马晓虹.模糊自整定PID控制器的设计及仿真[J].大众科技,2006(10): 51-52.
- [7] 吴忠强,王子洋,邬伟扬.基于模糊自整定二自由度PID控制的单相SPWM逆变电源研究[J].电气传动,2006,36(11): 26-29.
- [8] 李煜.基于专家模糊PID自适应的回转窑温度控制系统[J].矿冶,2003,12(4): 78-80.
- [9] 王诗颂,李伯全.基于MATLAB的SPWM控制高频环节逆变器仿真研究[J].电气开关,2006(5): 15-18.
- [10] SATO Y, JIANG M. Output waveform improvement of high switching frequency PWM inverters introducing digital signal processing[J]. IEEE, 2007: 800-803.

作 者 简 介

邢娅浪,女,1978年3月出生,硕士,讲师,主要研究模糊控制理论等。

E-mail: x_xiaolang@sina.com

(上接第48页)

的组成,最后给出了系统测试结果。测试结果表明系统在动态范围及稳定性上达到了设计指标,可以应用于各种要求大动态范围的宽带接收系统中。

参 考 文 献

- [1] 陈邦媛.射频通信电路[M].2版.北京:科学出版社,2008.
- [2] 金廷满,梁淮宁.合成孔径雷达高精度内定标技术[J].电子测量技术,2008,31(1): 59-62.
- [3] 刘晓明,刘晓伟,仲元红,等.中频宽带接收机AGC电路的研究[J].现代雷达,2007,29(7): 89-92.
- [4] 盛振旗.微波信号发生器中自动电平控制系统设计[J].国外电子测量技术,2007,26(7): 64-67.
- [5] Analog Devices Inc. AD8367 Data Sheet [EB/OL]. www.analog.com.
- [6] Analog Devices Inc. AD8361 Data Sheet [EB/OL]. www.analog.com.
- [7] TAI- SAW TECHNOLOGY CO., LTD. TB0589A Data Sheet [EB/OL]. www.taisaw.com.
- [8] Analog Devices Inc. ADL5530 Data Sheet [EB/OL]. www.analog.com.
- [9] Analog Devices Inc. AD820 Data Sheet [EB/OL]. www.analog.com.
- [10] 王宏. Matlab 6.5 及其在信号处理中的应用[M].北京:清华大学出版社,2006.

作 者 简 介



陈立泽,男,1986年12月出生,北京航空航天大学电子信息工程学院硕士研究生,主要研究方向为射频通信电路。

E-mail: chenlize@gmail.com