

三相 SVPWM 逆变电源输出波形优化控制策略

吴家梁¹, 樊波¹, 刘嘉², 牛江川¹, 刘进¹

(1. 空军工程大学防空反导学院, 陕西西安, 710051; 2. 空军工程大学理学院, 陕西西安, 710051)

摘要 为了提高三相逆变电源的电压输出波形质量, 减少输出电压的谐波分量和总畸变率, 提出模糊神经元 PID 控制策略。以 DSP 芯片为控制系统核心, 对输出电压进行 Clarke 和 Park 矢量变换, 采用人工神经网络方法与 PID 控制理论构成神经元 PID 控制器, 对 PID 控制器参数进行在线调整, 将模糊控制理论引入神经元 PID 控制器形成模糊神经元 PID 控制策略, 并将基于 60° 坐标系的 SVPWM 算法用于逆变电源控制系统中, 对系统稳态负载、动态负载、不对称负载情况下分别进行仿真实验。仿真结果表明: 采用模糊神经元 PID 控制策略控制下的三相 SVPWM 逆变电源, 在不同负载情况下的输出电压谐波分量小, 总畸变率少, 达到电压输出波形质量性能要求。

关键词 三相逆变电源; 模糊神经元 PID; 波形控制; SVPWM

DOI 10.3969/j.issn.1009-3516.2013.04.022

中图分类号 TM464⁺.32 **文献标志码** A **文章编号** 1009-3516(2013)04-0091-04

Optimizing Strategy for Three-phase SVPWM Inverter Output Waveform

WU Jia-liang¹, FAN Bo¹, LIU Jia², NIU Jiang-chuan¹, LIU Jin¹

(1. Air and Missile Defense College, Air force Engineering University, Xi'an 710051, China; 2. Science College, Air force Engineering University, Xi'an 710051, China)

Abstract: In order to improve the quality of three-phase inverter voltage output waveform and decrease the harmonic component and aberration rate of the output voltage, this paper presents a control scheme combined with fuzzy control, neuron study and PID control. With DSP as the control core, voltage output waveform is transformed by Clarke and Park vector transformation. Neuron PID controller is used to adjust PID controller parameters online, and the fuzzy controller is used in Neuron PID controller to form the compound control strategy. And based on 60 degrees rotating frame, SVPWM technology is used in three-phase inverter control system. The control system is simulated in the situations of steady-state load, dynamic load and asymmetric load. The simulation results verify that the use of the scheme can obtain high quality voltage output waveform with low harmonic component and aberration rate.

Key words: three-phase inverter; fuzzy neuron PID; waveform control; SVPWM

当前, 逆变电源控制系统中, 大多采用正弦脉冲宽度调制 (Sinusoidal Pulse Width Modulation, SPWM) 技术与比例-积分-微分 (Proportion Integra-

tion Differentiation, PID) 相结合的控制方法。然而, SPWM 技术存在输出电压谐波分量、直流利用率不高、损耗大的缺点^[1]。PID 控制方法实现简

收稿日期: 2012-11-06

基金项目: 吴家梁 (1990-), 男, 广东清远人, 硕士生, 主要从事军用电源设备新技术研究。
E-mail: wujia2538@126.com

单、鲁棒性较好,但对被控对象的依赖性较强,难以满足复杂非线性系统的性能要求^[2]。

空间矢量脉冲宽度调制(Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM)逆变器由于其输出电压谐波分量少、直流利用率高、算法易于计算机实现等优点,得到了日益广泛的研究与应用^[3-5]。本文将模糊神经元 PID 控制器引入三相电压源型 SVPWM 逆变器。

1 控制系统原理分析

在三相电压源型逆变器控制系统中,为了获得良好的电压输出波形,系统采用闭环控制。基于 60°坐标系下,通过 Clarke 和 Park 变换,三相逆变器的电压输出 U_a 、 U_b 、 U_c 变换为 U_{gf} 与 U_{hf} 。

对于三相逆变电源,引起其输出电压波形畸变和不对称的原因有:负载电流的扰动、开关器件中死区的影响、三相逆变电源电路中的不对称和负载的不对称等^[6]。模糊神经元 PID 控制策略下的三相逆变电源,在不同负载情况下,根据实时采样电压信号,与给定参考输入 U_{gr} 与 U_{hr} 比较后得到误差和误差变化率的大小,将误差信号作为模糊神经元 PID 控制器的输入,通过神经元 PID 控制器在线校正整定 PID 控制器参数,并利用模糊控制理论对神经元 PID 控制器的输出增益进行调整,对电压输出波形进行控制。得到控制输出调制信号后,三相逆变电源 SVPWM 调制技术通过空间电压矢量分析,通过发出调制信号来控制 IGBT 器件开关,使三相输出合成电压矢量逼近期望电压输出矢量^[7]。

2 控制器设计

PID 控制方法虽然具有实现简单、鲁棒性较好等优点,但对被控对象依赖性太强,其参数一旦设定,无法进行在线修改。人工神经网络具有很强的学习能力以及泛化能力,可以通过自学习对神经网络的权值进行调整。结合人工神经网络与 PID 控制技术的优点,设计构成神经元 PID 控制器,解决了对 PID 参数的在线调整。然而,神经元 PID 输出增益 K 值的调节对控制性能具有重要影响^[8],且难以确定。为此,将模糊控制理论引入神经元 PID 控制器中,制定模糊推理规则,根据不同时刻采样的误差信号实现,对输出增益 K 值进行调整。

2.1 神经元 PID 控制器设计

神经元 PID 控制器结构见图 1 虚线框部分,图中 $r(k)$ 为参考输入, $y(k)$ 为实际输出, $u(k)$ 为神经

元控制器的输出信号,则:

$$u(k) = u(k-1) + K \sum_{i=1}^3 \omega_i(k+1) x_i(k+1) \quad (1)$$

式中: $u(k-1)$ 为上一时刻神经元控制器的输出信号; K 为神经元的输出增益; $x_i(k)$ 为神经元学习的输入状态量; $\omega_i(k)$ 为对应输入状态量的加权系数。

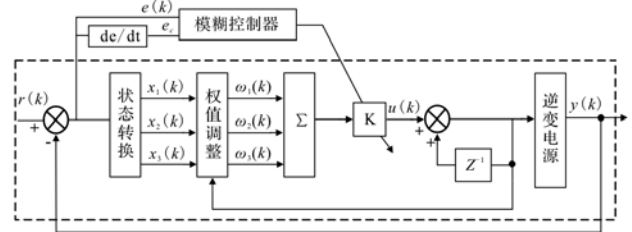


图 1 控制器结构图

Fig. 1 Controller structure

输入状态量的表达式为:

$$\begin{cases} x_1(k) = e(k) \\ x_2(k) = \Delta e(k) = e(k) - e(k-1) \\ x_3(k) = \Delta^2 e(k) = e(k) - 2e(k-1) + e(k-2) \end{cases} \quad (2)$$

式中 $e(k) = r(k) - y(k)$ 。

对于输入状态量的加权系数 $\omega_i(k)$, 采用应用最广泛的有监督 Hebb 学习规则^[9], 其表达式为:

$$\omega_i(k+1) = \omega_i(k) + \eta_i u(k) e(k) x_i(k) \quad (3)$$

式中 η_i 为权值系数学习速率。

传统增量式 PID 控制算法表达式为:

$$u(k) = u(k-1) + k_p \Delta e(k) + k_i e(k) + k_d \Delta^2 e(k) \quad (4)$$

比较式(1)与式(4)可以看出, $K\omega_1$ 、 $K\omega_2$ 、 $K\omega_3$ 分别对应于 k_i 、 k_p 、 k_d 之和的值, 这样可以实现利用人工神经网络在线校正整定 PID 参数。

相对于权值系数学习速率 η_1 、 η_2 、 η_3 , 神经元的输出增益 K 对神经元 PID 控制器收敛的快速性与稳定性影响最大。 K 取值越大, 调节时间越短, 系统的收敛快速性越好; 但 K 过大时, 容易引起较大的超调量。 K 取值越小, 调节时间越长, 系统的稳定性越好; 但 K 值过小时, 影响系统的响应速度。为此, 引入模糊控制理论, 对输出增益 K 进行校正调整, 以满足不同输入状态量时对 K 值的要求。

2.2 模糊控制器设计

模糊控制系统的鲁棒性强, 干扰和参数变化对控制效果的影响被大大减弱, 设计中不需要建立被控对象的精确数学模型, 尤其适合于非线性、时变及纯滞后系统的控制^[10]。因此, 将模糊控制引入神经元 PID 控制器, 控制系统见图 1。

模糊控制器采用二维模糊控制, 需要考虑的论域有 3 个: 输出电压偏差 e 、输出电压偏差变化率 e 以及神经元的输出增益 K , 选取电压偏差、偏差变

化率为输入,神经元的输出增益为输出,采用 Mamdani 提出的标准化设计方法。

输入输出量的隶属度函数均采用三角形形式,模糊推理的规则为:当输出电压偏差 $|e|$ 较大时,为了使系统响应具有较好的快速跟踪性能,应取较大的 K 值,以缩短调节时间;当输出电压偏差 $|e|$ 较小时,为了使系统具有良好的稳态性能,应取较小的 K 值。训练后,输出模糊子集去模糊化采用重心法进行。

3 仿真分析

在 Matlab7.1/Simulink 环境下,搭建上述控制系统进行仿真。其中直流侧电压 U_d 为 600 V,滤波电感 L 为 3 mH,滤波电容 C 为 5 000 μ F,采样开关频率为 6 kHz,开关器件死区时间为 2 μ s,采用 TMS320F2812 DSP 芯片进行控制,输出电压幅值为 220 V,频率为 50 Hz。

3.1 稳态负载性能

当三相逆变电源系统空载时,三相电压输出波形及其中单相电压频谱分析见图 2~图 3。传统 PID 控制下三相电压输出波形及其中单相电压频谱分析见图 2,输出三相电压总畸变率为 2.64%;模糊神经元 PID 控制下电压输出波形及相电压频谱分析见图 3,相电压最高单次谐波分量为 0.79%,输出三相电压总畸变率为 1.36%。

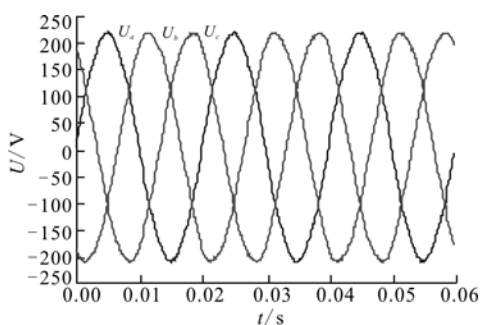
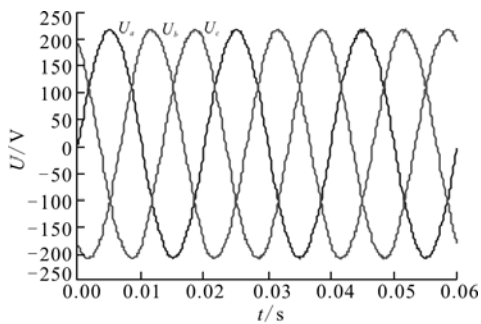


图 2 PID 控制下电压输出波形

Fig. 2 Voltage output waveform with PID



(a) 电压输出波形

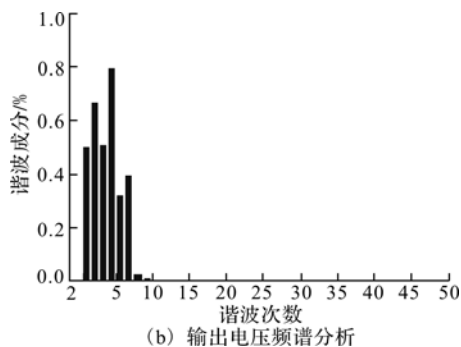


图 3 模糊神经元 PID 控制下电压输出波形

Fig. 3 Voltage output waveform with fuzzy neuron PID

对比图 2、图 3 可见,在稳态负载情况下,采用模糊神经元 PID 控制时,能够很好地减少电压输出波形畸变率,抑制谐波分量,得到较好的输出电压波形质量。

3.2 动态负载性能

当三相逆变电源突加对称阻性 25 kW 负载时,由于三相电压输出近似,取其中一相进行分析。图 4~图 5 分别为传统 PID 控制下和模糊神经元 PID 控制下的相电压输出波形。

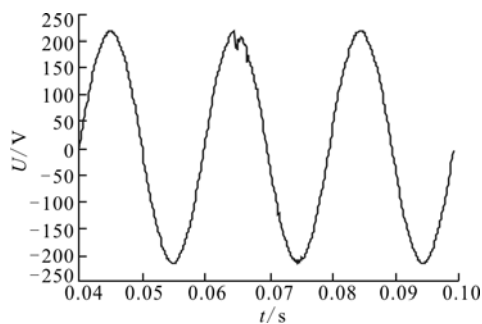


图 4 PID 控制下相电压输出波形

Fig. 4 Phase voltage output waveform with PID

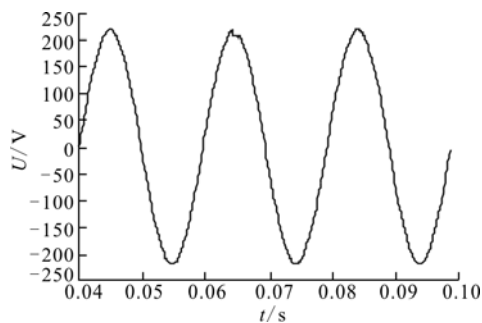


图 5 模糊神经元 PID 控制下相电压输出波形

Fig. 5 Phase voltage output waveform with fuzzy neuron PID

在动态负载情况下,采用传统 PID 控制的输出电压突变严重,波形严重失真,而采用模糊神经元 PID 控制的,输出电压突变较小,且畸变消失时间较短,输出电压波形质量较好。

3.3 不对称负载性能

当三相逆变电源 A 相为 25 kW 阻性负载、B 相为 20 kW 阻性负载、C 相为空载时,模糊神经元 PID 控制下电压输出波形见图 6,输出三相电压总畸变率为 1.52%。

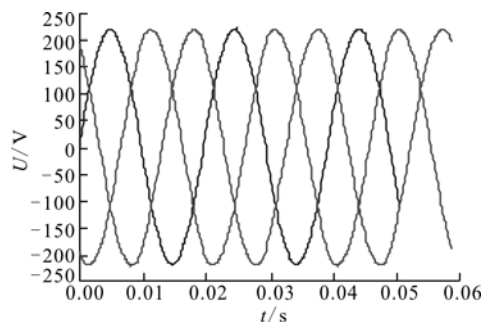


图 6 不对称负载时模糊神经元 PID 控制下电压输出波形

Fig. 6 Asymmetric load voltage output waveform with fuzzy neuron PID

由图 6 可见,当系统负载为不对称负载时,输出三相电压没有发生明显畸变,输出电压质量良好。

4 结语

本文将基于 60° 坐标系的 SVPWM 算法用于 SVPWM 技术调制的实现,并设计模糊神经元 PID 控制器对三相电压源型 SVPWM 逆变器进行控制,很好地抑制了输出电压谐波分量,获得良好的负载扰动响应,输出电压波形质量满足性能要求。控制系统具有良好的稳态性能、动态性能。

参考文献(References):

- [1] 侯利民,李洪珠,王巍. 空间电压脉宽调制 SVPWM 的原理及 DSP 的实现[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007, 26(6): 898-900.
HOU Limin, LI Hongzhu, WANG Wei. Principle of SVPWM and its realization based on DSP[J]. Journal of Liaoning technical university, 2007, 26(6): 898-900. (in Chinese)
- [2] 陈学松,杨宜民. 基于执行器-评判器学习的自适应 PID 控制[J]. 控制理论与应用, 2011, 28(8): 1187-1192.
CHEN Xuesong, YANG Yimin. A novel adaptive PID controller based on actor-critic learning [J]. Control theory & applications, 2011, 28(8): 1187-1192. (in Chinese)
- [3] Atif Iqbal, Sk Moin Ahmed, Haitham Abu Rub. Space vector PWM technique for a three-to-five-phase matrix converter [J]. IEEE transactions on industry applications, 2012, 48(2): 697-707.
- [4] Keng Yuan Chen, Jwu Sheng Hu. A filtered SVPWM for multiphase voltage source inverters considering finite pulse-width resolution [J]. IEEE transactions on power applications, 2012, 27(7): 3107-3115.
- [5] 赵辉,李瑞,王红君,等. 60° 坐标系下三电平逆变器 SVPWM 方法的研究[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(24): 39-45.
ZHAO Hui, LI Rui, WANG Hongjun, et al. Study on SVPWM method based on 60° coordinate system for three-level inverter [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(24): 39-45. (in Chinese)
- [6] 陈培青,熊健,王映波. 一种高性能的三相逆变电源控制策略[J]. 通信电源技术, 2006, 23(6): 35-42.
CHEN Peiqing, XIONG Jian, WANG Yingbo. Study on the control scheme of three-phase inverter output waveform [J]. Telecom power technologies, 2006, 23(6): 35-42. (in Chinese)
- [7] 易龙强,戴瑜兴. SVPWM 技术在单相逆变电源中的应用[J]. 电工技术学报, 2011, 22(9): 112-117.
YI Longqiang, DAI Yuxing. SVPWM technique applied to single-phase inverter power [J]. Transactions of China electrotechnical society, 2011, 22(9): 112-117. (in Chinese)
- [8] Holtz J, Nikolaos F. Neutral point potential balancing algorithm at low modulation index for three-level inverter medium-voltage drives [J]. IEEE transactions on industry applications, 2007, 43(3): 761-768.
- [9] 代睿,曹龙汉,何俊强,等. 基于微粒群算法的无刷直流电机单神经元自适应控制[J]. 电工技术学报, 2011, 26(4): 57-63.
DAI Rui, CAO Longhan, HE Junqiang, et al. Particle swarm optimization based single neuron adaptive control for brushless DC motor [J]. Transactions of China electrotechnical society, 2011, 26(4): 57-63. (in Chinese)
- [10] Xiangming Wang, Qinghe Wang. Research on control approach of DTC based on SVPWM and fuzzy control for asynchronous wind power generator [C]//International conference on computational and information sciences. Shanghai: IEEE press, 2011: 1044-1048.

(编辑:田新华)