

文章编号:1671-251X(2014)05-0067-04 DOI:10.13272/j.issn.1671-251x.2014.05.017
究文字,于少娟.基于复合控制策略的逆变器研究[J].工矿自动化,2014,40(5):67-70.

基于复合控制策略的逆变器研究

究文字, 于少娟

(太原科技大学 电子信息工程学院, 山西 太原 030024)

摘要:针对基于单一控制的单相全桥逆变器存在稳定性和鲁棒性较差的问题,提出了一种基于迭代学习控制和模糊PI控制的复合控制策略。模糊PI控制用来提高单相全桥逆变器的动态特性,迭代学习控制用来改善单相全桥逆变器的稳态精度。仿真结果表明,基于复合控制策略的单相全桥逆变器输出电压波形畸变率小,动态响应快,稳态精度高。

关键词:单相全桥逆变器;迭代学习控制;模糊PI控制;复合控制

中图分类号:TD67 文献标志码:A 网络出版时间:

网络出版地址:

Research of inverter based on compound control strategy

YAN Wenyu, YU Shaojuan

(School of Electronic Information Engineering, Taiyuan University of Science and Technology,
Taiyuan 030024, China)

Abstract: In view of problems of bad reliability and robustness existed in single-phase full-bridge inverter based on single control, the paper proposed a compound control strategy based on iterative learning control and fuzzy PI control. The fuzzy PI control is used to improve dynamic characteristics of the inverter, and the iterative learning control is used to improve steady precision of the inverter. The simulation result shows that waveform of output voltage of the inverter based on compound control strategy has low distortion rate, fast dynamic response and high steady precision.

Key words: single-phase full-bridge inverter; iterative learning control; fuzzy PI control; compound control

0 引言

随着逆变器的应用环境越来越复杂,对逆变器控制策略的要求也越来越高,即逆变器输出电压波形应具有稳态精度高、动态响应快、总谐波畸变率(Total Harmonics Distortion, THD)小等特点^[1]。为了提高逆变器的输出性能,研究人员提出了一些控制方法,如双闭环PID控制、预测控制、模糊控制、无差拍控制、重复控制和神经网络控制等^[2-4]。

经典PID控制中的参数由人工一次性整定得到,对于时变、非线性的逆变器不能保证其控制效果一直处于最佳状态,而且对交流量不能做到无差调节。因此,经典PID控制的效果和精度不理想。预测控制可以降低电流畸变、提高抗噪声能力,但是,预测控制对精确的数学模型和电路参数有很强的依赖性。基于微机实现的无差拍控制依赖逆变器的精确离散数学模型,根据逆变器的状态方程和输出反馈信号来计算逆变器下一个采样周期的脉冲宽度。然

收稿日期:2013-08-26;修回日期:2014-02-28;责任编辑:王晖。

基金项目:山西省高校教改项目(J2011130, J2013064);山西省研究生创新项目(20133112);太原科技大学博士科技研究启动基金项目(20122033)。

作者简介:究文字(1987—),男,河北唐山人,硕士研究生,主要研究方向为现代控制理论在电气传动中的应用,E-mail:wenyu3015@126.com。

通讯作者:于少娟。

而无差拍控制对逆变器参数变动的反应比较灵敏,一旦逆变器参数发生变动就有可能造成控制失败,即逆变器的鲁棒性较差^[5]。因此,针对具有多变量、时变、非线性且难于建立精确模型的逆变器来说,单一的控制效果并不理想。诸多学者提出了复合控制策略这一思想。重复控制可以实现交流量的无差调节,参考文献[1,5]均将重复控制与其他控制相结合构成复合控制,结果证明能够得到较满意的动静态特性,然而为了保证逆变器的稳定性和鲁棒性,重复控制中还必须加入滤波器与补偿器,设计比较复杂。迭代学习控制算法简单,不依赖于逆变器参数和精确的数学模型,能够有效地抑制周期性或重复性扰动,具有较强的学习能力。鉴此,本文提出一种将迭代学习控制和模糊 PI 控制相结合的新型复合控制策略。仿真结果表明,基于该复合控制策略的逆变器输出电压波形畸变率小,动态响应快,稳态精度高。

1 单相全桥逆变器结构

带 LC 低通滤波器的单相全桥逆变器主电路如图 1 所示, r 为包括滤波电感的等效串联电阻、线路电阻损耗、开关管导通压降、死区效应等各种阻尼因素的综合等效电阻。

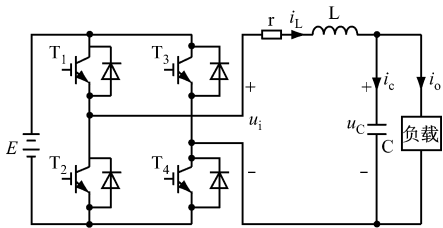


图 1 单相全桥逆变器主电路

由图 1 可得空载时逆变器的输入-输出传递函数为

$$P(s) = 1/(LCs^2 + rCs + 1) \quad (1)$$

将 $L = 0.43 \text{ mH}$, $C = 140 \text{ } \mu\text{F}$, $r = 0.1 \text{ } \Omega$ 代入式(1)可得

$$P(s) = 1/(6.02 \times 10^{-8} s^2 + 1.4 \times 10^{-5} s + 1) \quad (2)$$

根据式(2)得到逆变器的开环幅频特性曲线如图 2 所示,从图中可看出,大约在 4.07 kHz 处出现较大谐振峰值(16 dB),逆变器系统稳定性差,因此,有必要加入一定的控制手段。

2 复合控制策略

单相全桥逆变器复合控制策略原理如图 3 所

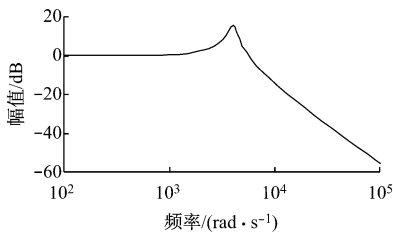


图 2 开环幅频特性曲线

示,迭代学习控制器和模糊 PI 控制器并联构成前馈-反馈迭代学习控制器。迭代学习控制用来消除死区、非线性负载等带来的周期性干扰,提高输出波形的稳态精度;模糊 PI 控制主要用来提高系统的动态响应速度。

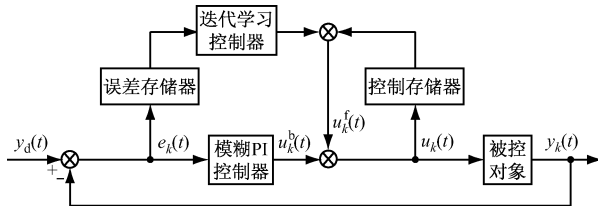


图 3 单相全桥逆变器复合控制策略原理

图 3 中, $y_d(t)$ 为期望输出值; $e_k(t)$ 为跟踪误差; $y_k(t)$ 为实际输出值; $u_k(t)$ 为控制信号; $u_k^f(t)$ 为前馈环控制信号; $u_k^b(t)$ 为反馈环控制信号。

2.1 模糊 PI 控制器设计

模糊 PI 控制器主要由传统 PI 控制器和模糊化模块 2 个部分组成,如图 4 所示(i 为给定输入; $\Delta k_p, \Delta k_i$ 为比例、积分参数 k_p, k_i 的修正量)。模糊 PI 控制主要用于找出 PI 控制中的 k_p, k_i 与误差 e 和误差变化率 e_c 之间的模糊关系,并在逆变器系统运行中不断地检测 e 和 e_c , 根据确定的模糊控制规则^[6]对 k_p, k_i 进行在线实时调整,从而实现实时控制输出电压波形的目的。

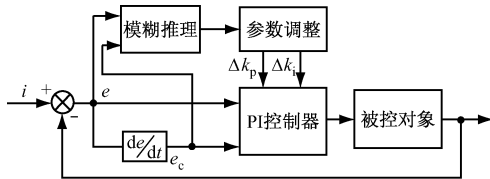


图 4 模糊 PI 控制器结构

参数 k_p 和 k_i 由式(3)确定:

$$\begin{cases} k_p = k_p^0 + \Delta k_p \\ k_i = k_i^0 + \Delta k_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: k_p^0, k_i^0 为 PI 参数的初始设定值,由逆变器系统的特性决定。

2.2 迭代学习控制器设计

迭代学习算法分为开环学习算法和闭环学习算法。开环学习算法利用的是上一次的误差校正项

e_k , 即

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \mathbf{T}_L e_k(t) \quad (4)$$

式中: $u_{k+1}(t)$ 为第 $(k+1)$ 次控制信号; $u_k(t)$ 为第 k 次控制信号; $\mathbf{T}_L$ 为学习增益矩阵; $e_k(t)$ 为第 k 次跟踪误差。

闭环学习算法利用的是当前的误差校正项 e_{k+1} , 即

$$u_{k+1}(t) = u_k(t) + \mathbf{T}_L e_{k+1}(t) \quad (5)$$

由式(4)和式(5)可知, 开环学习算法仅仅是利用逆变器系统上一次运行的信息, 迭代周期较长且容易出现发散现象; 闭环学习算法则是在利用逆变器系统当前运行信息的同时, 舍弃了上一次运行的信息, 来改善逆变器系统的控制性能。因此闭环学习算法有更好的跟踪性能和抗干扰能力^[7-9]。但是在实际应用中, 许多被控对象已经采用了基于传统的或智能反馈控制理论的系统和设备, 如传统 PID 控制、模糊控制等。如果要对其进行技术改造以改善系统的品质, 原有的系统和设备必定要被替代和更换, 造成一些不必要的浪费。本文采用开环迭代学习控制器与模糊 PI 控制器并联构成如图 3 所示的前馈-反馈迭代学习控制器, 使得迭代学习控制和模糊 PI 控制能够独立工作, 而且不需要对原有的系统和设备进行任何改变。

由图 3 可知:

$$u_{k+1}(t) = u_{k+1}^f(t) + u_{k+1}^b(t) \quad (6)$$

$$u_{k+1}^f(t) = u_k(t) + H(s)e_k(t) \quad (7)$$

$$u_{k+1}^b(t) = F(s)e_k(t) \quad (8)$$

$$y_d(t) = P(s)u_k(t) \quad (9)$$

式中: $F(s)$ 为模糊 PI 控制器传递函数; $H(s)$ 为迭代学习控制器传递函数。

由式(6)一式(9)可得复合控制器控制信号为

$$u_{k+1}(t) = \frac{1 - P(s)H(s)}{1 + F(s)P(s)}u_k(t) + \frac{H(s) + F(s)}{1 + F(s)P(s)}y_d(t) \quad (10)$$

误差为

$$e_{k+1}(t) = \frac{1 - P(s)H(s)}{1 + F(s)P(s)}e_k(t) \quad (11)$$

如果对于任意 k , 都有

$$\|e_{k+2}(t) - e_{k+1}(t)\|_\infty \leq \|e_{k+1}(t) - e_k(t)\|_\infty \quad (12)$$

可得其收敛条件为

$$\left\| \frac{1 - P(s)H(s)}{1 + F(s)P(s)} \right\|_\infty < 1 \quad (13)$$

3 仿真实验分析

为了验证复合控制策略的可行性, 利用 Matlab 仿真软件进行仿真验证, 并与单一模糊 PI 控制方法进行比较。逆变器参数: 直流输入电压为 380 V; 交流输出电压为 220 V, 50 Hz; 开关频率为 10 kHz; 额定输出功率 $P = 11$ kVA; 输出滤波电感 $L = 0.43$ mH; 输出滤波电容 $C = 140$ μ F; 等效阻尼电阻 $r = 0.1$ Ω 。逆变器复合控制仿真模型如图 5 所示。单一模糊 PI 控制的仿真结果如图 6 所示, 复合控制的仿真结果如图 7 所示。

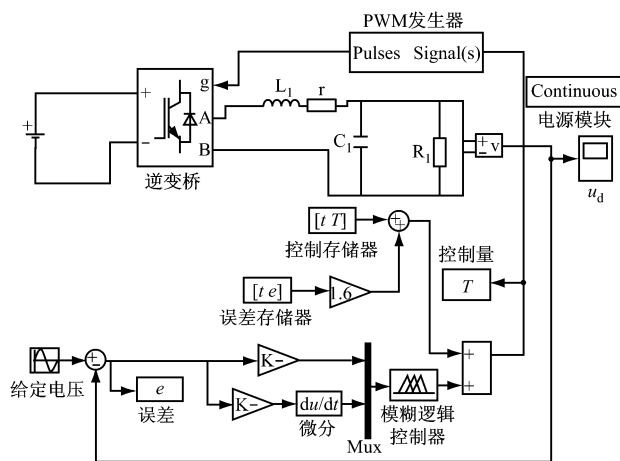


图 5 逆变器复合控制仿真模型

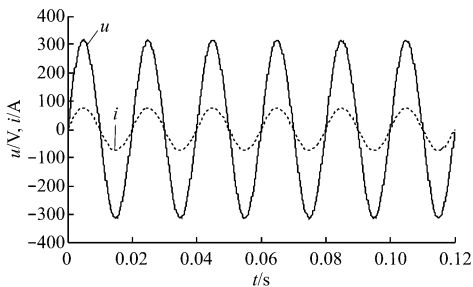
从图 6 可看出, 基于单一模糊 PI 控制的逆变器的稳态满载电压幅值为 313.5 V, THD=0.24%, 输出电压有效值为 221.8 V; 空载突加满载时, 电压有个瞬时下降-上升的过程, 但迅速恢复稳态, 稳定后电压幅值为 313.7 V, THD=0.22%。

从图 7 可看出, 基于复合控制的逆变器的稳态满载电压幅值为 311.3 V, THD=0.10%, 输出电压有效值为 220.1 V; 空载突加满载时, 电压瞬时下降且很快恢复稳态, 动态响应快, 稳定后电压幅值为 311.3 V, THD=0.17%。

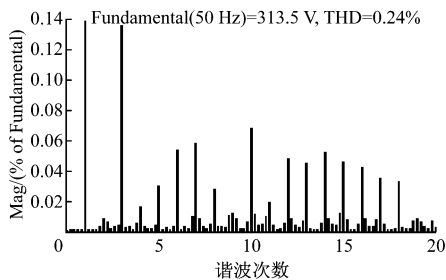
仿真结果表明, 与基于单一模糊 PI 控制的逆变器相比, 基于复合控制的逆变器的电源电压波形稳态精度高, 总谐波畸变率小, 动态响应较快, 电压突变率低。

4 结语

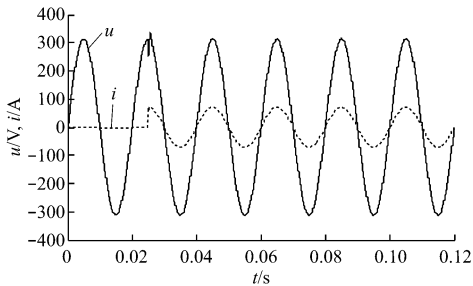
针对单相全桥逆变器, 提出了一种将迭代学习前馈控制与模糊 PI 反馈控制相结合的复合控制策略, 并通过仿真验证了该策略的优越性。



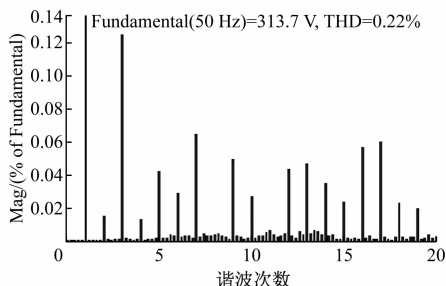
(a) 满载时输出电压、电流波形



(b) 满载时输出电压快速傅里叶分析

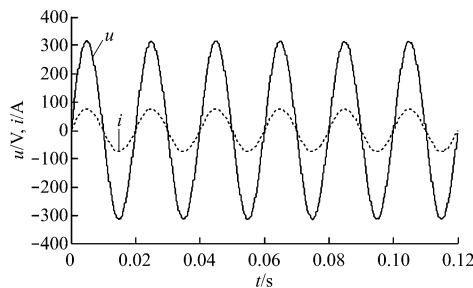


(c) 空载突加满载时的输出电压、电流波形

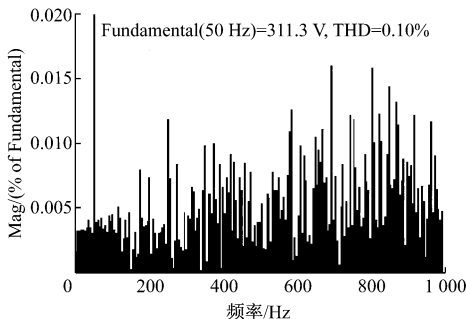


(d) 空载突加满载时的输出电压快速傅里叶分析

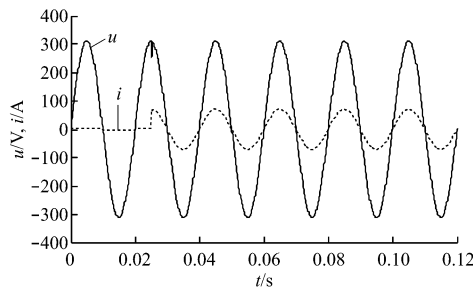
图 6 基于单一模糊 PI 控制的逆变器仿真结果



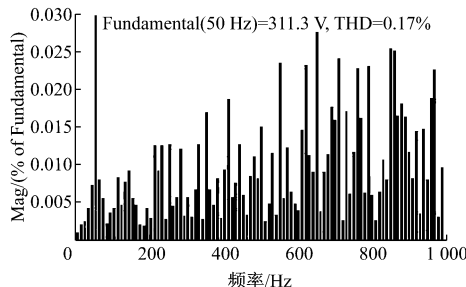
(a) 满载时输出电压、电流波形



(b) 满载时输出电压快速傅里叶分析



(c) 空载突加满载时的输出电压、电流波形



(d) 空载突加满载时的输出电压快速傅里叶分析

图 7 基于模糊 PI 控制和迭代学习控制的逆变器仿真结果

参考文献:

[1] 杨豪,赵军宏,朱雁南.单相逆变器新型重复-模糊控制方案[J].电力电子技术,2013,47(1):4-6.

[2] 徐明周.基于滞环控制的单相全桥逆变器研究[D].西安:西安交通大学,2012.

[3] HAITHEM A R. Predictive current control of voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2004,51(3):585-593.

[4] 王林兵,何湘宁.UPS 逆变器控制方法比较分析[J].电

源技术应用,2005,18(1):45-50.

[5] 张震,柴文野,潘登,等.基于 PID 和重复控制的 UPS 逆变器的研究[J].电测与仪表,2011,48(5):89-92.

[6] 王海,胡天友,刘洋,等.一种基于模糊控制的光伏逆变器分析与设计[J].电力电子技术,2013,47(2):50-52.

[7] 王明彦,郭奔.基于迭代学习控制的电动伺服负载模拟器[J].中国电机工程学报,2003,23(12):123-126.

[8] 晏静文,侯忠生.学习增强型 PID 控制系统的收敛性分析[J].控制理论与应用,2010,27(6):761-768.

[9] 叶建华,曹旭.单相逆变器迭代学习控制应用研究[J].上海电力学院学报,2011,27(5):431-434.