

文章编号: 1006-4710(2007)04-0398-04

逆变器的变结构复合控制方法

张维娜, 李敏远, 张随保

(西安理工大学 自动化与信息工程学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 在逆变器控制方式研究的基础上, 提出了一种逆变器的变结构复合控制方法。对单相全桥逆变器的滑模控制及电压滞环控制的方式进行了分析, 利用两种控制方式的优势互补, 将逆变器的滑模控制与 PI+电压滞环控制相结合用于提高系统的控制性能。仿真结果表明, 该方案具有较高的控制精度及良好的动态跟踪性和鲁棒性, 并验证了方案的可行性。

关键词: 滑模控制; 电压滞环控制; PI 调节器; 逆变器

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Variable Structure Compound Control Method of Inverter

ZHANG Wei-na, LI Min-yuan, ZHANG Sui-bao

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: A kind of compound control method with structure changes is suggested on the inverter. A sliding mode control method and the voltage hysteresis scheme for the full bridge inverter are analyzed respectively, and inter-complementation of advantages of control modes of two types—the combination of sliding mode control with PI+voltage hysteresis is applied to the improvement of the system control performances. Simulation results show that the suggested scheme is of high control accuracy and fast dynamic response and strong robustness, and certificate the feasibility of scheme.

Key words: sliding mode control; voltage hysteresis control; PI regulator; inverter

传统逆变电路的控制技术和策略主要有电压瞬时值反馈控制、电流瞬时值反馈控制和 PID 控制等。电压瞬时值反馈控制是将输出电压瞬时值与参考正弦波进行比较, 用瞬时值偏差作为控制量, 由于该方法能对逆变桥输出的 PWM 波进行动态调节, 故系统的跟踪性较好, 控制简单, 鲁棒性强, 跟踪误差小。但是, 在空载时输出波形质量较差, 其开关频率受负载参数变化影响较大, 由此给滤波电路的设计带来了困难^[1,2]。

先进的控制方法和策略主要有: 滑模控制、模糊控制及重复控制等。滑模控制实质上是一种非连续的开关控制法, 它强迫系统的跟踪误差及其导数运行于相平面上设定的滑模面上, 当系统完全运行在滑模面上时, 与系统参数变化及外部扰动无关, 因此系统具有对参数变化的不变性及较强的鲁棒性; 其次, 滑模控制动态响应快, 算法简单, 易于工程实

现^[3]。但是, 在实际应用中, 由于开关器件的时滞及惯性等因素影响, 在高频开关切换时可能出现抖振现象^[4], 输出波形在稳态时不够理想。

基于上述控制方式的特点, 为了提高系统的控制性能, 解决单一控制方法不足, 将其控制方式的优势互补, 提出了逆变器的滑模控制与 PI+电压滞环控制的变结构复合控制方案。文中分析了该方案的控制过程, 讨论了滞环比较器的输入输出特性及滞环环宽产生的瞬时误差的控制方法。仿真结果表明, 提出的控制方案兼有良好的动态和稳态特性。

1 变结构复合控制

1.1 滑模控制

全桥逆变器的电路结构如图 1 所示, 图中 $Q_1 \sim Q_4$ 为逆变器控制开关, 电感 L 与电容 C 组成滤波器。电路中电容与负载并联, 由于电感电流不能突

收稿日期: 2007-07-19

作者简介: 张维娜(1958-), 女, 山东莱阳人, 副教授, 研究方向为电力电子及控制技术。E-mail: zhangwn@xaut.edu.cn.

变, 负载出现扰动时会直接导致电容电流发生变化, 因此建立滑模控制模型时, 选取电容电流 i_c ($i_c = \dot{u}_c$) 和输出电压 u_c 为相变量, 可得系统状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{u}_c \\ \ddot{u}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1/LC & -1/RC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_c \\ \dot{u}_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ E/LC \end{bmatrix} \cdot u \quad (1)$$

式中, $u \in \{-1, 1\}$ 分别代表开关的通断状态。

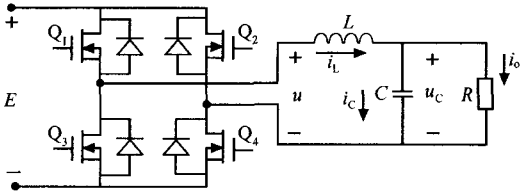


图1 单相全桥逆变电路

Fig. 1 Inverter circuit of single-phase full-bridge

以状态变量偏差建立的滑模面函数为:

$$S(u_c, t) = k_1(v_{ref} - u_c) + k_2(\dot{v}_{ref} - \dot{u}_c) = 0 \quad (2)$$

式中, k_1, k_2 为滑模面系数; v_{ref} 为电压参考信号。

式(2)表明, 当逆变器工作在滑模面时, 输出电压的动态过程与系统的结构参数无关, 体现了系统在滑模态时对系统参数和外部扰动具有完全的不变性或较强的鲁棒性。

系统状态轨迹运行在滑模面上时, 根据式(2)可得到输出电压状态轨迹解为:

$$u_c(t) = v_{ref}(t) + [v_{ref}(0) - u_c(0)]e^{-(k_1/k_2)t} \quad (3)$$

由式(3)可见, 当 k_1/k_2 值越大, 系统动态过渡过程时间越短, 输出电压跟踪的速度就越快。理想的滑模变结构控制中, 系统完全运行在滑模面上时开关切换频率无限高, 但在实际系统中, 开关管的频率具有一定的工作范围。为了解决开关频率为无限高的问题, 则采用滞环调制^[3,5], 在开关切换线两侧引入一定宽度的滞环带, 可以限制开关频率。具体的控制律如下:

$$u = \begin{cases} +1 & (S > +h) \\ -1 & (S < -h) \end{cases} \quad (4)$$

式中, $2h$ 为滞环环宽。在滑模控制中影响开关频率的因素有两个: 一是滞环环宽 $2h$; 二是滑模切换面的系数 k_1, k_2 (其中 k_1 影响较小, k_2 影响较大)^[3], 即开关频率与参数间的关系为: $f_s \propto k_2/2h$ 。

滑模切换面的系数 k_1, k_2 与系统的稳定性及到达滑模面的速度有关, 在设定开关频率时, k_1, k_2 只能在局部小范围调整。当滞环环宽增大, 可降低开

关频率, 使得开关频率被控制在开关器件的工作范围之内。然而, 滞环环宽增大, 将会带来控制精度变差。为了改善稳态控制精度, 可在系统中引入PI+电压滞环控制。

1.2 PI+电压滞环控制

电压滞环控制是采用瞬时值进行比较, 将 $|v_{ref} - u_c|$ 差值送入滞环比较器, 当 $|v_{ref} - u_c| \geq h$ 时改变开关状态, 使负载上电压以 $2h$ 的环宽跟踪参考电压, 其控制精度保持在环宽之内, 瞬时误差为环宽两倍, 如图 2a 所示。滞环上、下限为 $\pm h$, 输出电压跟踪参考电压的关系式为:

$$u'_d \approx v_{ref} \pm h \quad (5)$$

滞环环宽对跟踪性能有较大影响, 滞环环宽过窄, 跟踪误差减小, 但开关的动作频率过高, 开关损耗随之加大^[7,8]。为了消除系统的稳态跟踪误差, 将引入PI控制器来提高控制精度, $|v_{ref} - u_c|$ 差值经PI控制器送入滞环比较器, 其控制作用改善了滞环环宽效应, 使得输出电压跟踪参考电压。其等效的输出电压近似关系式为:

$$u'_d \approx v_{ref} \pm h/K_p$$

电压滞环输出跟踪参考信号波形如图 2 所示。

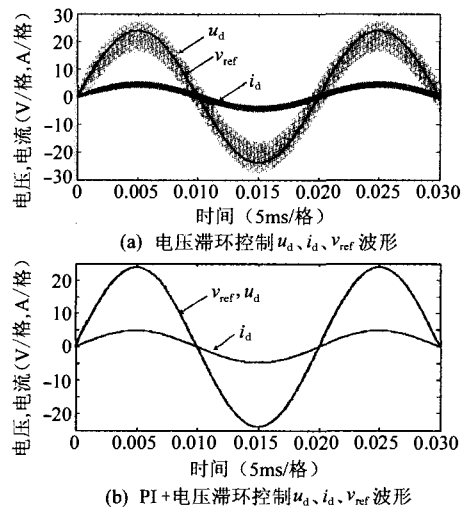


图2 电压滞环输出跟踪参考信号的波形

Fig. 2 Tracking wave of voltage of hysteresis control

图 2a 滞环环宽 $h=0.2$, 输出电压以 $2h$ 的环宽跟踪参考电压, 其控制精度保持在环宽之内, 瞬时误差为环宽两倍。图 2b 滞环环宽 $h=2$, 虽然环宽增大到 10 倍, 但由于引入PI调解器, 在保证系统稳定的前提下, 比例系数增大, 减小了环宽效应, 使得输出完全跟踪参考信号, 即输出电压波形与参考电压的波形重合。利用控制器中比例参数 K_p 的值, 使偏差放大, 以达到快速调节和跟踪, 提高控制精度。

由此可见, PI+电压滞环跟踪控制不仅消除跟

踪时的瞬时误差,而且可使滞环环宽可调,便于开关频率的选取。

1.3 复合控制

为了全面提高系统性能及抗干扰能力,将滑模控制与PI+电压滞环控制相结合构成复合控制,其系统的结构如图3所示。

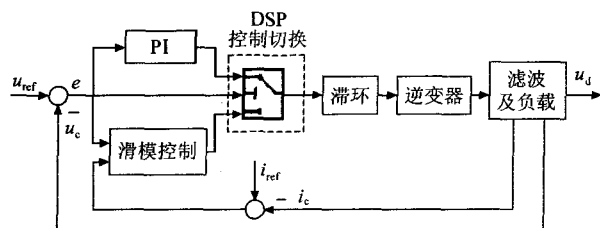


图3 逆变器变结构复合控制系统结构图

Fig.3 Variable structure compound control system of inverter

滑模控制是基于电流、电压反馈的双环控制,PI+电压滞环控制为电压反馈的单环控制,其控制开关根据检测的误差及对应的误差带进行两种控制方式的切换。

控制过程为:当系统处于稳态时误差较小($e \leq e_0$),采用PI+电压滞环控制,PI控制器中的比例环节用于消除输出电压跟踪参考电压时滞环带来的瞬态误差,由积分部分消除稳态误差;当系统出现大的扰动时误差较大($e > e_0$),控制方式切换到滑模控制,由式(2)使输出的状态轨迹快速到达滑模面,再由式(4)控制在滑模面切换回到平衡点;当输出跟踪参考电压时($e \leq e_0$),控制方式进行切换。这种变结构复合控制的方法,可使系统在偏差较大时具有滑模控制的快速性和鲁棒性,在偏差较小时PI控制器发挥作用消除静差,提高稳态精度;同时,弥补了采用单一控制方式时存在的问题。

在变结构复合控制中,根据误差带设定阈值进行两种控制方式切换。控制切换阈值 e_0 选取方法为:根据开关器件工作频率的范围要求来确定滞环的环宽,由此估算出两种控制方式下的瞬时误差带,考虑避免系统在小偏差时的频繁切换,在两个误差带间 $e_v < e_0 < e_h$ 选取合适的控制切换阈值。其中, e_v 为电压滞环控制时瞬时误差带, e_h 为滑模控制时瞬时误差带。

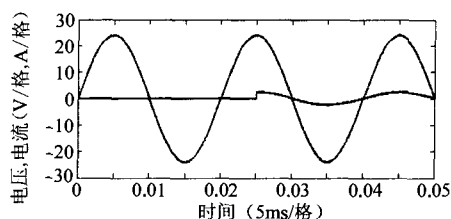
在两种控制方式下选取具有相同的开关频率范围,便于输出滤波器的设计,以达到较好的滤波效果。在控制器参数设计时,先设定开关频率 f_s ,再分别调整滑模控制方式下的参数 $2h$ 和 k_2 (同时保证滑模控制条件)及PI+滞环控制中的参数 $2h$ 和 K_p ,使系统获得较好的动态与稳态性能。

2 仿真结果

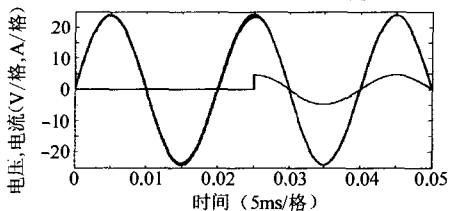
为了验证滑模控制与PI+电压滞环的变结构复合控制的设计方案,在Matlab/Simulink下进行仿真。控制系统的参数设为:输入电压 $E=60\text{ V}$,参考电压 $v_{ref} = 24\sin 2\pi \times 50t\text{ V}$;滤波器参数为 $L=500\text{ }\mu\text{H}$, $C=20\text{ }\mu\text{F}$;滞环宽度为: $2h=24$ (滑模控制), $2h=6$ (PI+电压滞环控制)。

图4给出了在 $t=0.025\text{ s}$ 时,负载由空载突加到 $R=40\text{ }\Omega$,两种控制方式下输出电压 u_d 跟踪参考电压 v_{ref} 及负载电流 i_d 的波形。

在负载突变时,由图4可以观测到滑模控制比PI+滞环控制时输出跟踪波形好,鲁棒性强。

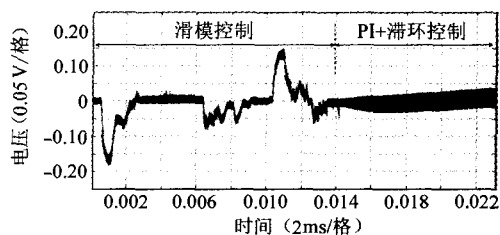


(a) 突加负载时滑模控制跟踪波形

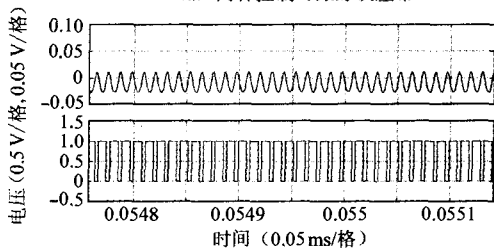


(b) 突加负载时PI+滞环控制跟踪波形

图4 突加负载时两种控制方式下的跟踪波形
Fig.4 Tracking wave of two control modes by adding load



(a) 两种控制时跟踪误差带



(b) PI+滞环控制跟踪误差及PWM调制波

图5 进入稳态时,两种控制方式下输出跟踪参考电压的偏差波形

Fig.5 Error wave of output tracking reference voltage in the steat-stating

图5为进入稳态时,两种控制方式下输出跟踪参考电压的偏差波形。图5a在 $t=0.015\text{ s}$ 时由滑

模控制切换到 PI+滞环控制,滑模控制的跟踪误差 $e_{ssh} \leq 0.13$, PI+滞环控制跟踪误差 $e_{ssPI+滞} < 0.025$ ($e_{ssh} > e_{ssPI+滞}$), 在稳态时, PI+滞环控制要比滑模控制的控制精度高。PI+滞环控制跟踪误差波形及 PWM 调制波如图 5b 所示。由仿真测试在跟踪正弦波斜率变化较大处开关频率约 106 kHz, 在跟踪正弦波斜率变化较小处开关频率约 96 kHz。由仿真结果表明, PI+电压滞环控制时开关频率随交流电压变化的范围较小, 便于滤波器的设计。

图 6 给出了 $t=0.0025$ s 时, 负载由空载突加到 $R=40 \Omega$, $t=0.0035$ s 时, 给定电压由 $E=60$ V 突变到 $E=80$ V 时, 两种控制方式下输出电压 u_d 跟踪参考电压 v_{ref} 及负载电流 i_d 的波形。

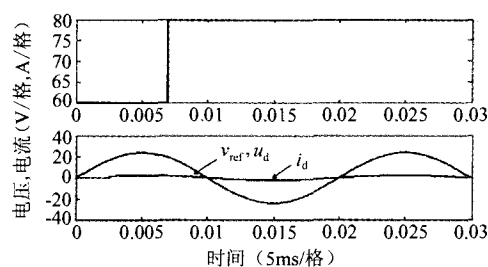


图 6 u_d 跟踪参考电压 v_{ref} 及 i_d 的波形
Fig. 6 Wave of i_d and u_d tracing v_{ref}

由图 6 可见, 当突加负载及电压突变时, 在滑模控制作用下, 输出电压 u_d 快速跟踪参考电压 v_{ref} , 即对扰动具有不变性; 当系统进入稳态时, 控制方式切换到 PI+电压滞环控制, 稳态时 u_d 跟踪参考电压 v_{ref} 波形, 输出基本无差。

系统在变结构复合控制作用下, 仿真结果可测得输出谐波总畸变率小于 0.02%。图 7 给出了输出电压各次谐波频谱图。

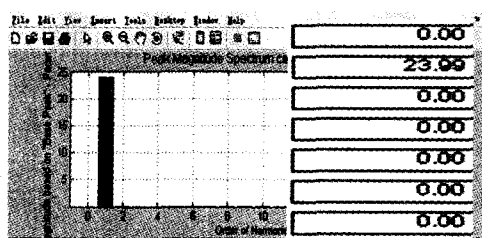


图 7 输出电压各次谐波频谱图
Fig. 7 Harmonic wave spectra of output voltage

虽然两种控制方式中均基于滞环比较 PWM 跟踪控制, 但由于采用了动态与稳态的变结构复合控制方法, 使得开关频率变化范围小, 便于滤波器设计, 输出波形质量较高。

3 结 语

本文提出了将逆变器的滑模控制与 PI+电压

滞环控制相结合的变结构复合控制方案。当误差较大(如突加负载、参数变化、电源波动等)时, 采用滑模控制可获得动态跟踪的快速性及抗干扰的鲁棒性; 当误差较小(工作在稳态)时, 采用 PI+电压滞环控制可获得较高的稳态控制精度。该控制方案兼有两种控制方式的优点, 可使系统具有较高的控制性能, 通过仿真验证了方案的可行性。

参考文献:

- [1] 陈江辉, 谢运祥 (Chen Jiang-hui, Xie Yun-xiang). 逆变电路的控制技术与策略 (The introduction of control techniques and strategy of inverter circuit) [J]. 电气应用 (Electrotechnical Application), 2006, 25(9): 102-106.
- [2] 杨旭, 王兆安 (Yang Xu, Wang Zhao-an). 一种新的准固定频率滞环 PWM 电流控制方法 (A novel quasi-constant hysteretic PWM current mode control approach) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2003, 18(3): 24-28.
- [3] 张黎, 丘水生 (Zhang li, Qiu Shui-sheng). 滑模控制逆变器的分析与实验研究 (Analysis and experimental study of sliding mode control inverter) [J]. 中国电机工程学报 (Proceedings of the CSEE), 2006, 26(3): 59-63.
- [4] Carpita M, Marchesoni M. Experimental study of a power conditioning using-mode [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1996, 11(5): 731-742.
- [5] 马皓, 张涛 (Ma Hao, Zhang Tao). 新型逆变器的滑模控制方案研究 (Analysis and design of sliding mode control for novel buck inverter) [J]. 电工技术学报 (Transactions of China Electrotechnical Society), 2005, 20(7): 50-56.
- [6] 赵剑峰, 王浔 (Zhao Jian-feng, Wang Xun). 基于双脉宽调制变换器和电压滞环控制的电能质量信号发生装置 (Dual PWM converter and voltage hysteresis control based power quality signal generator) [J]. 电网技术 (Power System Technology) 2005, 29(4): 41-44.
- [7] 陈东华, 谢少军, 周波 (Chen Dong-hua, Xie Shao-jun, Zhou Bo). 瞬时值电流控制逆变技术比较 (Comparison of instantaneous current-control inverter techniques) [J]. 南京航空航天大学学报 (Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics), 2004, 36(3): 343-347.
- [8] 朱军卫, 龚春英 (Zhu Jun-wei, Gong Chun-ying). 逆变器单极性电流 SPWM 控制与滞环控制比较 (Performance comparison of the unipolar current-SPWM control and hysteresis control inverter) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 2004, 38(1): 26-29.
- [9] 范小波, 张代润 (Fan Xiao-bo, Zhang Dai-run). 光伏并网逆变器数字滞环控制的研究 (Research on digital hysteresis control for grid-connected PV inverter) [J]. 电力电子技术 (Power Electronics), 2006, 40(6): 46-48.

(责任编辑 陈洁)