

# 基于 ICAP/4 的恒频滞环电流跟踪控制研究

何莉萍<sup>1</sup>, 王广柱<sup>2</sup>

(1.临沂师范学院, 山东 临沂 276005 2.山东大学 电气工程学院, 济南 250061)

摘要 本文在讨论恒频滞环电流跟踪控制基本原理的基础上, 提出了一种硬件具体实现方法。利用 ICAP/4 软件对控制原理和调节器设计方法进行了仿真分析, 并进行了实验调试。仿真结果和实验结果均证明了该方法的正确性和可行性, 且具有响应速度快、控制精度高和易于实现的优点。

关键词 电流跟踪滞环控制; 恒频; ICAP/4 仿真

中图分类号: TM714

文献标识码: B

文章编号: 1001-1390(2009)07-0057-03

## Study on Hysteretic Current Control method with Constant Frequency Using ICAP/4

HE Li-ping<sup>1</sup>, WANG Guang-zhu<sup>2</sup>

(1. Linyi Normal University, Linyi 276005, Shandong, China. 2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

**Abstract** In this paper, a realization method of hardware is given, based on the principle discussion of hysteretic current control method with constant frequency. Then the control principle and adjustor design is simulated by real ICAP/4 software, also the experiment is done. The results of simulation and experiment prove the correctness and feasibility of the new approach, which is much faster response and higher precision and simpler realization.

**Key words** hysteretic current control method, constant frequency, ICAP/4 simulation

### 0 引言

跟踪控制就是利用实际开关电路来实现指令信号一定比例的复现, 工作的关键在于如何产生驱动开关器件动作的驱动信号。滞环控制在跟踪的快速性方面有着其他方式所不能比拟的优势, 且控制精度高、结构简单、易于实现<sup>[1]</sup>, 但是其频率和带宽是一对矛盾, 不能同时固定。在最大带宽一定的情况下, 加入简单的频率反馈校正, 如果调节器设计方法恰当, 参数计算合理, 就可以实现恒频滞环控制。

#### 1 恒频滞环跟踪控制原理

##### 1.1 滞环电流跟踪控制的基本思想

图 1 给出了滞环跟踪控制半桥单元电路的原理图。把指令电流  $i^*$  和实际输出电流  $i$  的偏差  $i^*-i$  作为带有滞环特性的比较器的输入, 通过其输出来控制功率器件 S1 和 S2 的通断, 迫使电感电流  $i$  就在  $i^*+h$  和  $i^*-h$  的范围内, 呈锯齿状地跟踪指令电流  $i^*$ 。

滞环环宽过宽时, 开关动作频率低, 但跟踪误差大; 环宽过窄时, 跟踪误差小, 但开关动作频率过高,

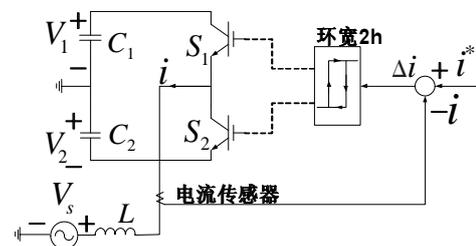


图 1 半桥单元电路滞环跟踪控制原理图

Fig.1 Principle diagram of hysteretic current control method for half-bridge unit circuit

开关损耗随之增大<sup>[2]</sup>。电感  $L$  可起到限制电流变化率的作用,  $L$  过大时  $i$  的变化率过小, 跟踪过慢;  $L$  过小时  $i$  的变化率过快, 开关动作频率过高。因此, 对环宽  $h$  和电感  $L$  大小的选择都要折中处理。

##### 1.2 恒频滞环跟踪控制的基本原理

图 2 给出了滞环跟踪控制输出电流波形的局部放大图, 以便于进行频率分析, 得出恒频滞环跟踪控制方法。

由图 2 可知滞环控制的工作周期  $T=t_1+t_2$ ,  $t_1=$

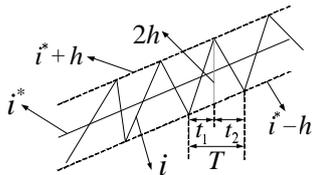


图 2 滞环跟踪输出电流局部放大图

Fig.2 Partial amplification drawing of hysteretic output current

$\frac{2h}{S_p - S_r} \quad t_2 = \frac{2h}{|S_n| + S_r}$ ; 其中  $S_p$  为实际信号上升过程的斜率,  $S_n$  为实际信号下降过程的斜率,  $S_r$  为指令信号的斜率。所以:

$$T = \frac{2h}{S_p - S_r} + \frac{2h}{|S_n| + S_r} = \frac{2h(S_p + |S_n|)}{(S_p - S_r)(|S_n| + S_r)}$$

实际信号上升和下降的斜率与电感的选择及直流工作电压有关,当电路完成以后其值不变。指令电流的斜率在工作时是变化的,所以开关周期会随之变化,这就是滞环控制系统开关频率不定的根本原因所在<sup>[3]</sup>。如果不论输入指令信号的斜率如何变化,均要求滞环以一种恒定的频率工作,则只要每个周期选择合适的带宽,使之与指令信号的斜率相对应,就可以得到恒定的开关频率,这就是恒频滞环跟踪控制的工作原理。

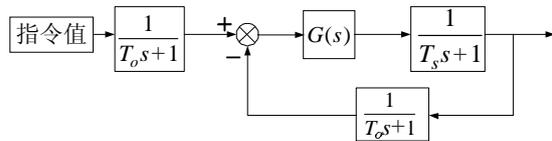
对于三相桥式逆变电路,在不同的时刻电感承受的电压是不同的,实际信号上升和下降的斜率也是存在变化的。因此,本文所提出的控制方法只适用于单相逆变电路。

### 1.3 恒频滞环控制的硬件实现设计

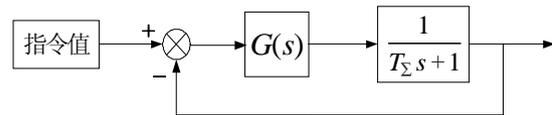
由上述分析可得:只要每个周期采样开关周期、调节滞环控制的带宽  $h$  与之对应,就可以达到恒频滞环控制的目的。本文提出利用单稳态触发器采样滞环的跟踪周期信号。

单稳态触发器的特点是在输入脉冲的触发下,其输出端产生一个具有恒定宽度的矩形脉冲,也就是触发器翻转到另一个状态,但此状态又是暂时稳定的,经过时间  $t$  后又回到初始状态。利用单稳态触发器采样滞环的跟踪周期信号,并将该周期信号转换为电压信号。转换方程为  $\theta = Q_m \cdot t / T$ ,其中  $\theta$  表示单稳态触发器滤波输出平均值  $\bar{t}$  和  $Q_m$  分别表示其时间常数和输出矩形脉冲信号幅值,  $T$  表示输入开关脉冲信号恒频周期。因此,若设定单稳态触发器的时间常数  $t$  为恒频开关周期  $T$  的一半,即  $T/2$ ,输出矩形脉冲信号的幅值为 1,则对单稳态触发器的输出进行滤波后,只要控制其值  $\theta$  为 0.5,就能准确的控制开关器件工作

在恒频周期  $T$ 。这样,对频率的控制就转换为对某一恒定指令值的跟踪,通过抽象其传递函数并设计相应的调节器就能够实现。将滞环环节抽象为一个延迟环节,则传递函数框图为:



以上传递函数可以化简为:



则只要设计相应的调节器  $G(s)$ ,使系统可以快速的跟踪指令值 0.5,就能够达到恒频控制的目的。上式中  $T_s$  为恒频的开关周期  $T$ ,  $T_0$  为滤波电路的时间常数,  $T_\Sigma = T_s + T_0$ ,  $G(s)$  为待定的调节器。设计该系统为一型系统,即  $G(s) = K/s$ ,则:

$$KT_\Sigma = 0.5 \Rightarrow K = \frac{0.5}{T_\Sigma}$$

调节器使用积分器,则积分时间常数为  $\tau = 1/K$ 。

## 2 恒频滞环跟踪控制硬件 ICAP/4 仿真及实现

### 2.1 ICAP/4 仿真软件介绍

ICAP/4 (IsSpice) 由美国 intusoft 公司开发,是一款强大的模拟和混合信号电路仿真软件包,易用加上交互式的设计风格取代了直接制作电路板原型的缓慢和繁杂,不用使用面包板,可以用不同的电路结构画出原理图,即刻进行仿真,可以称得上是一个理想的虚拟电子实验室<sup>[4]</sup>。利用 ICAP/4 系统进行电子电路仿真实验,可以排除原材料的消耗和仪器损坏等因素,使实验快速、准确、方便、灵活。

### 2.2 恒频滞环跟踪 ICAP/4 仿真

本文主电路采用全桥逆变电路,开关器件选 MOSFET-IRFP460;滞环控制是通过 RS 触发器功能模块和比较器实现的;单稳态触发器芯片 DM74121 时间常数为  $t = T_w \approx 0.7R_{ext}C_{ext}$ 。逆变器电感  $L$  可通过跟踪一正弦波电流推导出来<sup>[5]</sup>,本文以能够跟踪电流的基波为依据进行电感的选择  $L = 0.005H$ 。开关周期:  $T_s = 1/f_s = 50\mu s$ ;指令电流  $i^* = 20\sin 100\pi t$ ,电流互感器比例系数为 0.5;滤波器时间常数  $T_0 = 2T_s = 0.1ms$ 。仿真结果如图 3 所示(见下页)。

由图 3 可以看出,单稳态触发器输出平均值  $V_{s2}$  约为 0.47;实际信号  $V_{23}$  可以很好地跟踪指令信号  $V_{33}$ ,开关脉冲信号  $V_{q1}$  周期基本保持恒定,大小不再

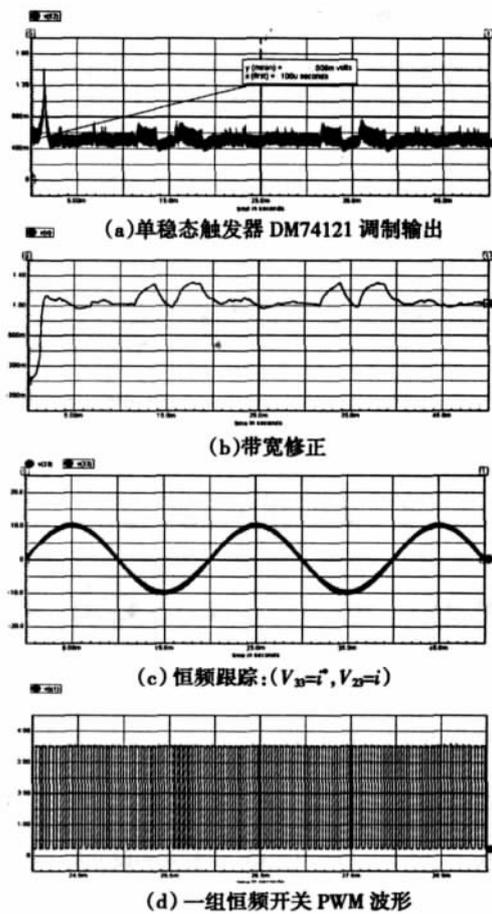


图 3 ICAP/4 仿真波形

Fig.3 ICAP/4 simulation waveform

是设定的理想值  $50\mu s$ , 而是  $55\mu s$  左右。由于采用负积分器的关系, 使得带宽修正值  $V_i$  浮动比较大, 但与原始带宽  $-0.5$  和  $+0.5$  相加减后, 带宽范围仍不超过  $1.0$ , 跟踪效果比较理想。

### 2.3 恒频滞环跟踪实验结果

实验调试中实际电感电流信号是通过一模拟电路功能模块等效产生的, 这样可以在缺少主电路的情况下验证所设计电路的正确性, 调试更加灵活、方便。实验过程中指令电流信号选择“参考地”电平信号, 实验结果如图 4 所示。

图 4(a) 中 CH1 表示滞环跟踪控制实际电流信号波形, CH2 表示指令信号波形, 纵向坐标  $500mV/格$ , 跟踪效果非常理想; 从图 4(b)、(c) 可以看出, 单稳态触发器输出滤波平均值在指令值  $500mV$  即  $0.5V$  附近波动, RS 触发器输出开关脉冲信号基本保持恒定频率  $20kHz$ , 误差不超过  $5\%$ 。上述实验结果表明, 硬件设计电路实际可行, 控制效果相当理想。

### 3 结论

本文在分析基本原理的基础上, 提出了一种适用于单相逆变电路的恒频滞环电流跟踪控制硬件实现方法, 并用 ICAP/4 仿真软件对控制原理和设计方法

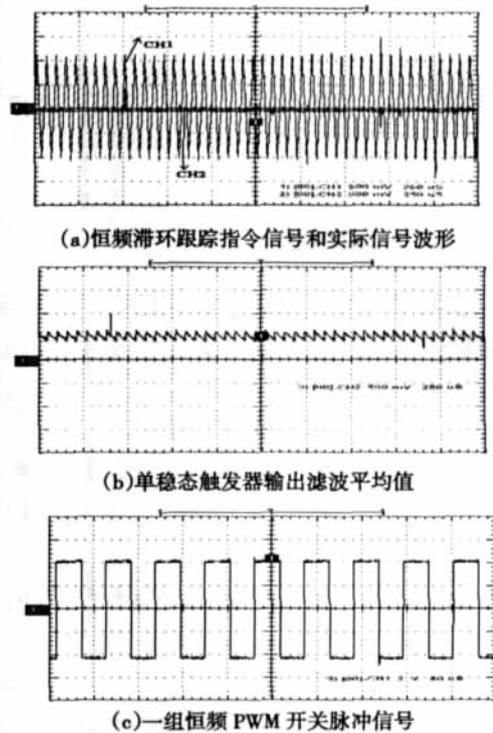


图 4 实验波形

Fig.4 Experimental waveform

进行了验证, 最后搭建了试验平台进行了调试。仿真结果和试验结果均证明了该方法的正确性和可行性, 且实现起来比较简单。

### 参考文献

[1] Malesani L, Tenti P. A novel hysteresis control method for current-controlled voltage-source PWM inverters with constant modulation frequency [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1990, 26(1): 88-92.

[2] 王兆安, 黄俊. 电力电子技术[M]. 机械工业出版社, 2001.

[3] Dawande M, Dubey G K. Bang bang current control with pre-decided switching frequency for switch mode rectifiers [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1999, 46(2): 61-66.

[4] 贾默伊, 黄晓红. 利用 ICAP/4 仿真系统进行电子电路虚拟实验[J]. 河北理工学院学报, 2002, 24(3): 48-51.

JIA Moyi, HUANG Xiaohong. Making the virtual experiments of electronic circuit with ICAP/4 simulation system. Journal of Hebei Institute of Technology, 2002, 24(3): 48-51.

[5] 崔桂梅, 王建良, 洪晓英, 任永峰. 电流跟踪型逆变器中电感值的计算[J]. 高压技术, 2003, 29(8): 5-7.

CUI Guimei, WANG Jianliang, HONG Xiaoying, REN Yongfeng. Calculation of Inductance Value of Current Following Inverter [J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(8): 5-7.

作者简介:  
何莉萍(1982-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用。Email: 1p-h@163.com  
王广柱(1963-), 男, 山东大学电气工程学院教授, 研究方向为现代电力电子技术及应用。

收稿日期 2009-02-14  
(常会敏 编发)