

## 航空三相静止变流器死区效应分析与补偿

Analysis and Compensation for Dead-zone Effect of Aviation on Three-phase Static Current Transformer

闫群民

(陕西理工学院电气工程系, 陕西 汉中 723003)

**摘要:** 为了解决航空三相静止变流器输出波形失真问题,详细分析了死区效应造成电压畸变的原因和由此带来的谐波成分。采用正弦脉宽调制(SPWM)控制技术,使变流器输出的波形更接近于正弦波,提出了设置死区与电压补偿相结合的控制方法,并通过SABER进行了仿真分析。同时,利用TMS320F2812数字芯片实现了相应的补偿策略。仿真和试验结果证明了该控制方法的有效性。

**关键词:** 三相静止变流器 正弦脉宽调制 死区效应 补偿 仿真

**中图分类号:** TM464 **文献标志码:** A

**Abstract:** In order to solve the problem of the distortion of the output waveform of aviation three-phase static current transformer (CT), the reasons of voltage distortion and the harmonic component caused by dead-zone effect are analyzed in detail. The SPWM control technology is adopted to make the output waveform approaching sine wave, and the control method of combing the setting dead-time and voltage compensation is proposed. The analysis is simulated by SABER, and by using digital chip TMS320F2812, corresponding compensatory strategy is realized. The results of simulation and experiment prove the effectiveness of this control method.

**Keywords:** Three-phase static inverter SPWM Dead-zone effect Compensation Simulation

## 0 引言

航空三相静止变流器的作用是应用功率半导体器件,将飞机主电源的27 V直流电压变换为36 V、400 Hz的恒压、恒频交流电,以此作为光电陀螺仪的激励电源。为了使飞机安全、可靠地飞行,必须给陀螺仪提供高质量的电能。三相静止变流器采用直流升压变换器和正弦脉宽调制(sine pulse width modulation, SPWM)逆变器组合形式<sup>[1]</sup>。开关器件绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT)的导通和关断存在一定时间,且关断时间比导通时间长,若在IGBT关断过程中,同一桥臂的另一个IGBT立即导通,则必然使前级直流升压变换器短路,这势必会烧毁变换器。故在实际应用中,需使同一桥臂的上下IGBT导通和关断错开一定的时间,即死区时间,以保证同一桥臂的上下IGBT总是先关后通<sup>[2-3]</sup>。当插入死区时间后,死区时间和开关器件的非理想特性往往会造成输出电压、电流的畸变,从而产生转矩脉动,影响陀螺仪的精

度。因此,必须对死区效应进行补偿<sup>[4]</sup>。死区效应补偿策略基本上属于一种平均补偿算法,即根据误差电压对电压指令进行修改,使实际输出电压等于理想电压<sup>[5]</sup>。本文详细分析了死区效应造成的电压畸变的原因和由此带来的谐波成分,同时对死区进行了电压型补偿,仿真和试验结果均证明该方法是可行、有效的。

## 1 死区效应分析

航空三相静止变流器系统主电路框图如图1所示。

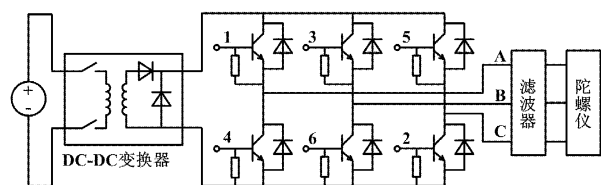


图1 航空三相静止变流器主电路图

Fig. 1 Main circuit of aviation three-phase static inverter

图1中,前级为DC/DC升压变换器,中级为正弦脉宽调制逆变结构,后级为滤波电路。三相静止变流器的主要功能是将直流电压变换成交流电压,其控制电路一般采用双极性SPWM控制策略,主回路选用IGBT作为开关器件。理论上,同一桥臂的两个开关驱动信号应严格互补,但开关管的非线性特点实际上都存在一定的开关时间,且一般情况下关断时间比开通时间略长。如果

陕西省教育厅科研计划基金项目资助(编号:2010JK472)。

修改稿收到日期:2010-09-21。

作者闫群民,男,1980年生,2006年毕业于西北工业大学电力电子与电力传动专业,获硕士学位,讲师;主要从事电力电子技术与计算机仿真方面的研究。

将一对严格互补的信号加到同一桥臂的两个开关管上,当一个开关管未关断另一个开关管已导通时,两个开关管均处于导通状态。这样会造成前级升压变换器输出端短路而烧毁变换器或损坏开关管。因此,在同一桥臂的两个开关管驱动信号应设置死区,将驱动信号的上升沿滞后一段时间,待一个开关管完全关断时,另一个再导通,从而避免直通现象的发生<sup>[6]</sup>。

### 1.1 死区时间的计算

图1中,当电流流向陀螺仪负载时为正,那么开关管驱动信号的脉冲电压波形如图2所示。其中,电流的正、负方向判断可参考文献<sup>[3]</sup>。

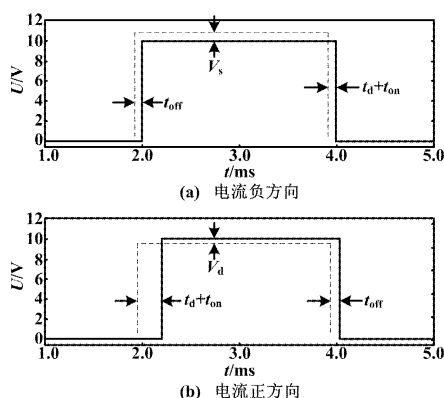


图2 相脉冲电压波形

Fig.2 Phase pulse voltage waveform

根据参考电压和补偿后电压伏秒面积相等的原则,理想情况下的伏秒面积为:

$$V_t = DT_s V_{dc} \quad (1)$$

实际获得的伏秒面积为:

$$V'_t = (DT_s - M)(V_{dc} - V_s) - (T_s - DT_s + M)V_d \quad (2)$$

式中:  $T_s$  为开关周期;  $D$  为占空比;  $V_{dc}$  为升压变换器输出电压;  $V_s$  为开关导通压降;  $V_d$  为并联二极管的导通压降;  $M = t_d + t_{on} - t_{off}$ ;  $t_d$  为死区时间。

当电流为正时,误差电压为:

$$\Delta V = MV_{dc} + (DT_s - M)V_s + (T_s - DT_s + M)V_d \quad (3)$$

相应的误差时间为:

$$\Delta t = \frac{MV_{dc} + (DT_s - M)V_s + (T_s - DT_s + M)V_d}{V_{dc} + V_d - V_s} \quad (4)$$

由式(4)可知,  $\Delta t$  与  $V_{dc}$ 、 $t_d$ 、 $t_{on}$ 、 $t_{off}$ 、 $V_s$ 、 $V_d$  等参数有关。一般情况下,可设定  $t_d$  保持不变。由于  $V_{dc}$  与前级系统输入有关,也可视为不变,但是其他量将随着工作电流的变换而变化。

以  $a$  相为例,  $a$  相上管的实际导通时间为<sup>[7]</sup>:

$$t_{aon} = t_{aref} - t_n \quad (5)$$

一个开关周期中平均相电压  $V_{ao}$  为:

$$V_{ao} = V_{dc} \frac{t_{aref} - t_n}{T_s} \quad (6)$$

开关周期中,  $a$ 、 $b$  两相的平均线电压为:

$$V_{ab} = V_{dc} \frac{t_{aref} - t_{bref}}{T_s} = V_{abref} \quad (7)$$

### 1.2 死区效应时的输出电压

假设开关管是理想的,未滤波前输出相电压  $u_a$ 、 $u_b$ 、 $u_c$  是理想的 SPWM 波,在三角波载波的调制下,以  $a$  相输出为例,它的傅里叶分解为<sup>[8]</sup>:

$$u_{a0} = \frac{ME}{2} \sin(\omega_s t - \varphi) + \frac{2E}{\pi} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{J_0 m M \pi}{m} \sin \frac{m \pi}{2} \times \cos(m N \omega_s t) + \frac{2E}{\pi} \sum_{m=1,3n=\pm 2}^{\infty} \frac{J_n m M \pi}{m} \sin \left( \frac{m+n}{2} \pi \right) \cos \frac{n \pi}{2} \times \cos[(mN+n)\omega_s t - n\varphi] + \frac{2E}{\pi} \sum_{m=2}^{\infty} \sum_{n=\pm 1, \pm 3}^{\infty} \frac{J_n m M \pi}{m} \times \sin \left( \frac{m+n}{2} \pi \right) \times \sin \frac{n \pi}{2} \sin[(mN+n)\omega_s t - n\varphi] \quad (8)$$

式中:  $u_{a0}$  为  $a$  相输出的相电压;  $E$  为电源电压;  $M$  为电压幅度调制比;  $N$  为频率调制比;  $J_0$ 、 $J_n$  为第一类 Bessel 函数;  $m$  和  $n$  分别为相对于载波谐波次数和相对于调制波的谐波次数;  $\omega_s$  为调制波频率。

由于实际应用中开关的非理想化存在死区,因此,要设置一定的开关死区。设置开关死区时间  $\Delta t$  有两种方式:一种是提前  $\Delta t/2$  关断,延滞  $\Delta t/2$  开通,称为双边对称死区设置;另一种是按时关断,延滞  $\Delta t$  开通,称为单边不对称死区设置。在三角波载波调制下得到的双边对称设置模式下的陀螺仪感性负载实际的相电压  $u'_{a0}$  为:

$$u'_{a0} = \left( \frac{ME}{2} - \frac{2E}{\pi} \Delta t \omega_c \right) \sin \omega_s t - \sum_{n=3,5}^{\infty} \frac{2E}{n \pi} \Delta t \omega_c \sin[n(\omega_s t)] - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{E}{m \pi} J_0 \left( \frac{m M \pi}{2} \right) \sin(m \Delta t \omega_c) \cos(m N \omega_s t) - \sum_{m=1}^{\infty} \frac{E}{m \pi} J_0 \frac{m M \pi}{2} [(\cos m \pi - \cos(m \Delta t \omega_c))] \sin(m N \omega_s t) - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\infty} \frac{E}{m \pi} J_n \frac{m M \pi}{2} \sin(m \Delta t \omega_c) \cos[(mN+n)\omega_s t] - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=\pm 1}^{\infty} \frac{E}{m \pi} J_n \frac{m M \pi}{2} [\cos(m+n)\pi - \cos(m \Delta t \omega_c)] \times \sin[(mN+n)\omega_s t] \quad (9)$$

比较式(8)与式(9)可以看出,在开关关断二极管续流时,死区  $\Delta t$  使输出电压基波幅值随着  $\Delta t$  的增大而减小,并且出现了幅值为  $\frac{2E}{\pi} \times \frac{\Delta t \omega_c}{n}$  的 3、5、7... 次谐波,并且  $\Delta t$  越大,3、5、7... 次谐波幅值越大,输出电压的畸变率越高。

## 2 电压补偿法

对于三相静止变流器,死区效应产生的是一系列畸变脉冲,脉冲极性与相电流向相关,运用电压平均值等效原理,可将该脉冲列等效为180°导通型的方波。由于输出三相电流互差120°电角度,这样在陀螺仪绕组中必然形成6个误差电压矢量<sup>[9]</sup>,如图3所示。采用恒相幅值变换时,误差电压矢量的幅值为 $4V_{dc}M/3T_s$ 。

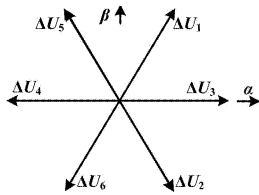


图3 误差电压矢量图

Fig. 3 Deviation voltage vector graph

电压补偿是根据电流的流向产生一个与误差电压矢量大小相等而方向相反的矢量,以抵消死区效应。以 $U_n^{com}$ 表示补偿量,并将其分别向 $\alpha$ 、 $\beta$ 轴投影,得到分量 $u_\alpha^{com}$ 和 $u_\beta^{com}$ ,如 $u_3^{com}$ 的两个分量如下:

$$\begin{cases} u_\alpha^{com} = 4V_{dc}M/3T_s \\ u_\beta^{com} = 0 \end{cases}$$

对于三相星型连接的对称负载而言,SPWM电压型静止变流器的输出电压即是负载相电压。因此,对变流器输出电压补偿就是对负载电压进行补偿,采用Clarke反变换得到的三相补偿分量为:

$$\begin{cases} u_a^{com} = u_\alpha^{com} \\ u_b^{com} = -(u_\alpha^{com} - \sqrt{3}u_\beta^{com})/2 \\ u_c^{com} = -(u_\alpha^{com} + \sqrt{3}u_\beta^{com})/2 \end{cases}$$

以a相为例,补偿后的相电压分量为:

$$u'_a = u_a + u_a^{com}$$

## 3 补偿策略

三相电流对称,其和必为零。因此,任意时刻三相电流中必有两相方向相同,对于同方向的电流不受死区效应影响,而不同向的必须进行补偿<sup>[10]</sup>。图2所示为开关理想触发信号和开关管实际导通情况波形图。当一个桥臂上的两个开关管都不导通时,桥臂的输出电压由续流二极管决定。当电流为正方向时,对上桥臂开关管而言,实际开通时间比理想开通时间缩短了 $T$ ,而下管的开通时间则延长了 $T$ ,那么需要的时间补偿是将上管的理想开通时间延长 $T$ 。由于信号的互补性,下管的开通时间就被缩短了 $T$ ,这样就达到了开关

管实际开通时间与理想给定时间长度相等的目的,保证了变流器输出电压值与给定值相等。根据双边死区设置的原则,得到补偿时间为:

$$\begin{cases} t_{com} = t_{on} - T/2 & \text{电流为正} \\ t_{com} = t_{on} + T/2 & \text{电流为负} \end{cases}$$

式中: $t_{on}$ 为理想导通时间。

## 4 仿真与试验结果

用SABER仿真软件对以上策略进行仿真。三相静止变流器直流侧输入电压为27V,调制正弦波频率为400Hz,载波比为27,调制深度为0.8;滤波电路为低通滤波电路,三相电感量 $L_a = L_b = L_c = 100 \mu\text{H}$ ,三相电容量 $C_a = C_b = C_c = 110 \mu\text{C}$ ;陀螺仪等效为阻感性负载,定子电阻 $R = 1.1 \Omega$ ,定子电感 $L = 6 \text{mH}$ 。仿真结果如图4所示。

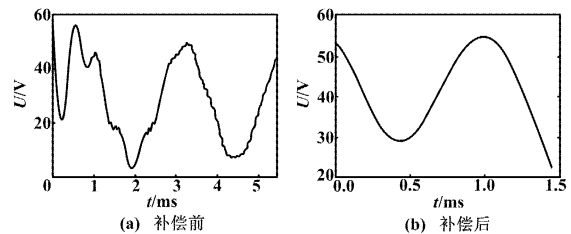


图4 补偿前后的相电压波形

Fig. 4 Before and after compensation phase voltage waveform

本文采用TI公司的TMS320F2812芯片实现补偿策略算法。试验中,地面电源测试车提供三相静止变流器的直流输入电压27V,负载为交、直流双路供电的、功率为300W的陀螺仪,通过对输出端口接入一个电流电压互感器,对703XPS插头三相输出K、L、M针脚电压进行测试,即三相静止变流器A、B、C相电压进行测试。死区补偿后的试验波形如图5所示。

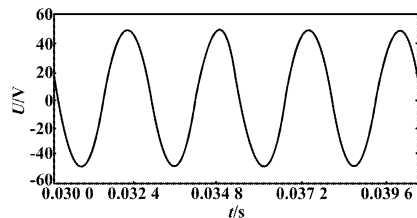


图5 补偿后的试验波形

Fig. 5 Test waveform after compensation

## 5 结束语

功率开关管的非理想化和死区时间的设置会使三相静止变流器的实际输出波形与理想波形存在差异,

(下转第18页)

通信协议以文件的形式在 Linux 下实现,以便日后扩展和集成更多的工业监控设备的通信协议。

由于要通过客户端的 IE 浏览器访问网关内嵌的 Web 服务器,因此,需要在网关网络配置中添加网口的 IP 地址、子网掩码、网关地址和 DNS(域名服务器)地址。这就需要修改 Linux 中的一部分网络配置文件。修改的文件如下。

① /linux-dist/vendors/Samsung/2410/rc 文件:rc 文件主要定义了操作系统在启动过程中需要完成的一些初始化工作。网卡的 IP 地址、子网掩码和网关地址都在此配置。

② 在/linux-dist/vendors/Samsung/2410/路径下添加 resolv.conf 配置文件,用来配置 DNS 服务器地址。在这个文件中,可以配置最多 3 个 DNS 服务器地址,网口在进行域名解析时,依次查找服务器地址。

③ /linux-dist/vendors/Samsung/2410/Makefile,由于在下载 Linux 源码包中并没有加入 resole.conf 文件,因此,如果要将该文件编译进文件系统,还需要修改 Makefile。在文件中添加 \$(ROMFSINST) /etc/resolv.conf,再重新编译 romfs 文件系统,即 make romfs,就可以在 etc/文件夹中看到此 DNS 的配置文件。

以上文件修改好之后,重新编译内核,并下载启动 Linux 系统,系统中以太网口的 IP 地址、子网掩码、网关地址和 DNS 服务器的地址就生效了。

试验结果表明,通过对客户端 IE 网页中 tempr 变量的刷新,能实现厦门宇电 AI808 智能仪表所采集的液位值的动态实时刷新,实现在客户端通过 Web 浏览器实时监控宇电 AI808 智能仪表。

(上接第 14 页)

引起输出电压波形畸变,从而产生转矩脉动,影响陀螺仪的指示精度。因此,必须对死区效应进行相应的补偿。

本文引入设置死区时间与电压补偿相结合的方法,利用数模混合仿真软件 SABER 进行仿真分析,最后通过数字芯片 TMS320F2812 来实现补偿策略,试验证明该方法是合理有效的。

参考文献

[1] 马永翔,闫群民. 基于 Saber 的三相静止变流器谐波抑制分析及仿真[J]. 电测与仪表,2008,45(512):7-10.  
 [2] 夏向阳,罗安,李茂军,等. 有源滤波器中逆变器的死区效应与补偿方法[J]. 高电压技术,2006,32(8):73-75.  
 [3] 胡庆波,吕征宇. 一种用于三相逆变器死区效应的数字补偿方法[J]. 电力电子技术,2005,39(4):9-11.  
 [4] 段善旭,孙朝辉,张凯,等. 基于重复控制的 SPWM 逆变电源死区效应补偿技术[J]. 电工技术学报,2004,19(2):52-56.

4 结束语

本文基于嵌入式 Internet 技术,探索设计了工业以太网智能高速网关的方法,为工业现场大量实际使用中的监控设备提供了上网解决方案,提高了系统的开放性和兼容性,实现了异构网络集成,使得远程用户可随时随地通过 Web 浏览器的友好界面,浏览和管理现场监控设备。本文提出的使用嵌入式网关实现异构系统集成方案已成功应用于某针织厂的信息化改造工程,通过将不同总线 PLC 控制器的通信协议集成到网关,为该厂节约了大笔更换设备的费用。实践表明,本方案能为企业信息化系统的建立及自动化改造提供高性能和低成本解决途径,具有广阔的工业应用前景。

参考文献

[1] 李丽娜,邵敏权,马庆峰. 浅谈嵌入式系统的现状及发展[J]. 长春工业大学学报:自然科学版,2004,25(2):74-75.  
 [2] 陈明. 网络设备教程[M]. 北京:清华大学出版社,2004:155-162.  
 [3] 徐联贵. 基于嵌入式的工业以太网网关设计[D]. 乌鲁木齐:新疆大学,2007.  
 [4] 熊茂华. 基于 AX88796 的嵌入式网络设备驱动程序设计[J]. 自动化仪表,2008,29(3):29-34.  
 [5] 田泽. ARM9 嵌入式 Linux 开发实验与实践[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2006:100-102.  
 [6] 赵跃华,杜云海. 嵌入式安全 Web 网关的设计与实现[J]. 计算机工程与设计,2006,27(4):565-567.  
 [7] 杜辉,舒连卿. 基于嵌入式 Web 服务器的网络设备测控系统设计[J]. 自动化仪表,2006,27(3):7-10.  
 [8] 江崇科,黄智刚,张军,等. 嵌入式网关的设计与实现[J]. 计算机工程与设计,2006,27(1):43-46.

[5] 刘亮,邓名高. 一种补偿 PWM 逆变器死区效应的新方法[J]. 电力电子技术,2005,39(6):123-125.  
 [6] 胡庆波,吕征宇. 一种新颖的基于空间矢量 PWM 的死区补偿方法[J]. 中国电机工程学报,2005,25(3):13-16.  
 [7] Choi J W, Yong S I, Sul S K. Inverter output voltage synthesis novel dead time compensation[C] // Conference Proceedings of Applied Power Electronics Conference and Exposition, Orlando, FL, USA, 1994:100-106.  
 [8] Christiansen C F, Herrada J L, Valla M I, et al. Further improvements in a three-phase sine wave generator[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1988, 35(2):338-339.  
 [9] 吴茂刚,赵荣祥,汤新舟. 正弦和空间矢量 PWM 逆变器死区效应分析与补偿[J]. 中国电机工程学报,2006,26(12):101-105.  
 [10] 刘亚东,邢岩,黄立培,等. 采用死区补偿和输出电流补偿的数控 UPS 逆变器[J]. 清华大学学报:自然科学版,2006,46(1):17-20.