

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.01.013

某高速供弹装置用交流伺服驱动控制策略研究

陈 浩,王茂森*

(南京理工大学 机械工程及自动化学院,江苏 南京 210094)

摘要:针对某高速供弹装置用交流伺服驱动的控制策略问题,对 PMSM(永磁同步电机)的控制方式 FOC(磁场导向控制)和 DTC(直接转矩控制)、PMSM 数学模型、矢量控制理论以及 PMSM“相电流重构”技术等方面进行了研究,对 PMSM 的 FOC 和 DTC 两种主流控制方式以及几种主流的全区域电流采样及相电流重构的方法进行了归纳与比较,选取 FOC + SVPWM 作为系统的控制方式,提出了一种新的相电流重构的策略“固定时间有效矢量插入法”,利用 Matlab/Simulink 对 PMSM 的相电流进行仿真分析并搭建实验平台进行测试。研究表明,采用“固定时间有效矢量插入法”能够避免 PWM 的不对称输出,可在全区域内进行电流重构而且电流波形畸变率只有 5.35%。实验验证了 FOC + SVPWM 的控制策略是可行并且正确的,为交流伺服驱动高速供弹装置的进一步研究奠定了良好的基础。

关键词:高速供弹装置;永磁同步电机;交流伺服系统;矢量控制;电流重构

中图分类号:TP13;TH39

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)01-0067-07

Control strategies of AC servo drive for high-speed ammunition feeding equipment

CHEN Hao, WANG Mao-sen

(School of Mechanical Engineering and Automation, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Aiming at the control strategy of AC servo drive for high-speed ammunition feeding equipment, field oriented control(FOC) and direct torque control(DTC), permanent magnet synchronous motor(PMSM) mathematical model, vector control theory and “phase current reconstruction” technology were researched. A new strategy named “Fixed time effective vector insertion” was proposed after analyzing some existent methods that make the current reconstruction realized in whole regions. Simulation experiments were carried out in Matlab/Simulink and hardware platform was built for experiments. The results indicate that “Fixed time effective vector insertion” can avoid the asymmetry of PWM output, this strategy can realize the current reconstruction in whole regions, the current waveform distortion rate is only 5.35%. The correctness and the feasibility of the control strategies are verified, And some good foundation is laid for further experiment with AC servo drive for high-speed ammunition feeding equipment.

Key words: high-speed ammunition feeding equipment; permanent magnet synchronous motor (PMSM); AC servo system; vector control; current reconstruction

0 引 言

低空飞行的制导导弹能借助地面各种复杂信号作

掩护,利用雷达“盲区”对目标进行有效打击,这是对防空反导作战的新挑战。然而,小口径高射速自动炮凭借其高频率,高射速形成大面积的火力覆盖,在对低

收稿日期:2014-08-21

作者简介:陈 浩(1990-),男,江苏南京人,主要从事自动控制方面的研究. E-mail: innsir@163.com

通信联系人:王茂森,男,副教授,硕士生导师. E-mail: smewms@yahoo.com

空、近距离的导弹拦截上有着不可替代的重大战略意义。发展至今,高射速小口径火炮几乎都是以自动方式进行供弹的。可以断言,将来火炮武器数字化之后,自动供弹系统将成为整个武器系统的核心,适应高射速不仅对供弹装置的结构同时也对供弹单元的伺服驱动有很高的要求。伴随着机电控制以及计算机技术的进步,同时材料与电子技术的不断发展,使得交流伺服系统不论是在调速范围还是精度以及响应方面都能有不凡的表现。它的动态特性与静态特性已经同直流伺服系统相差不多^[1]。而且在武器系统上的应用也越来越广泛。代表性的如法国的 AUF1 式 155 自行榴弹炮,采用了交流伺服供输弹系统实现了弹药的全自动装填;我国火炮自动装填系统的研究起步较晚,水平比其他发达国家有一定的差距。但是经过国防科研人员不断的探索,取得了很大的进步。例如,国内新的 155 自行榴弹炮采用交流伺服供输弹系统,达到了与俄罗斯 2S-19 式 152 自行榴弹炮相当的全自动装填水平^[2];新型 98 式主战坦克也采用了交流伺服自动装填系统^[3]。

最早从 20 世纪 70 年代末开始,人们开始对交流伺服系统进行研究和应用。从 2000 年开始至今,世界范围内不断出现表现越来越优异的永磁交流伺服系统,性能指标不断提高,应用范围不断扩大,如工业机器人、数控机床、加工中心等。通过归纳世界范围内交流伺服系统这些年的发展以及它的近况^[4-7],可以总结出它的发展前景,总的来说体现在电机材料永磁化、控制全数字和智能化、驱动控制电路高度集成化以及多节点网络化等。乃至,人们关于“交流取代直流伺服”的期望正逐步得以实现。

经过不断的研究与探索,人们借鉴了异步电动机的控制方式,将磁场定向控制(FOC)与直接转矩控制(DTC)应用到了同步电动机、永磁同步电动机的控制上,并逐步演变为当今主流的高性能的交流电机的两种控制策略。而在交流伺服系统中普遍应用的脉宽调制(PWM)控制手段方面,通常采取的控制方式有电压型 SPWM 控制、电流跟踪型 PWM 控制以及空间矢量脉宽调制(SVPWM)控制等。其中,应用最为普遍的是 SPWM 技术,但是它也存在不足之处。而使用 SVPWM 技术可以有效地减弱逆变电路中的谐波电流,减小电机由于电流谐波造成的损耗,同时它也有利于减小转矩脉动。SVPWM 技术可以提高电压利用率,并且将其进行数字化控制也不复杂,所以 SVPWM 技术越来越普遍的应用在交流伺服系统中。

本研究针对供弹系统需求,采用分析对比的方法,

对 FOC 和 DTC 控制进行选择。对矢量控制的关键“相电流重构”技术进行研究,分析几种有代表性的重构方法,用仿真实验的手段验证新的重构方法“固定时间有效值插入法”的可行性。最后,构建 PMSM 硬件试验装置,进一步对控制策略进行检测。

1 供弹系统介绍

本研究分析了多种当前普遍应用的供弹方式,比较了它们各自的工作特点之后,在满足小口径火炮高射速的要求下,设计出一套混合式的供弹系统,该系统集成了有链供弹和无链供弹方式的优势,以综合的手段为火炮进行供弹。

该供弹系统供弹单元的装置示意图如图 1 所示。

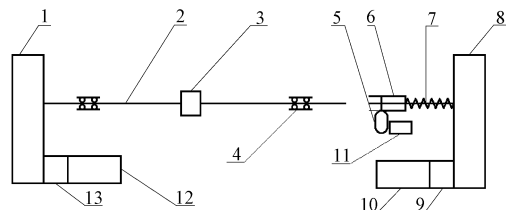


图 1 供弹单元结构示意图

- 1—齿轮传动机构;2—螺杆;3—供弹螺母;4—轴承;5—挡板;6—保险机构;7—弹簧;8—解锁机构;9—减速器;10—解锁电机;11—电磁铁;12—选弹电机;13—减速器

自动方式供弹时,在控制系统中输入需要弹种及所需要弹数,选弹电机按指令要求正转对所在单元进行选弹。当发出供弹指令后,供弹单元上的控制器控制解锁电机正转打开解锁机构,解锁机构到达某一位置后,解锁到位传感器检测到解锁到位,并反馈于控制系统,关闭解锁电机;然后电磁铁通电,卡锁机构被吸下,高速定位离合器迅速与螺杆接合,此时供弹螺杆在主控电机带动下带动螺母推动弹夹开始进行供弹;当供弹单元上的炮弹与闭合弹链交接完成后,螺母运动到位,螺母前端的小凸起使得供弹螺杆与离合装置分离,解锁电机反转关闭解锁机构;最后电磁铁断电、卡锁复位,系统完成供弹。

高速供弹装置要求驱动部分响应迅速,控制精确,初步决定选弹进给流程采用永磁同步电机控制。永磁同步电动机(PMSM)的优势主要体现在:结构紧密(节省空间)、功率密度和转矩惯性比较高(工作效率高),因此在高性能数控系统、航空航天、机器人等众多领域里被广泛使用。该供弹装置用交流伺服系统采用三闭环控制方式,内环为电流环,速度环为外环,位置环为最外环,主控制器采用 STM32,结合 FOC + SVPWM 算法实现 PMSM 驱动控制器的设计。

2 PMSM 数学模型建立

电压方程、磁链方程和转矩方程对构建永磁同步电机(PMSM)数学模型来说是至关重要的几个方程,是研究 PMSM 控制的基础。

交流永磁同步电动机的电压方程为:

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

磁链方程为:

$$\begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos 0^\circ & \cos 120^\circ & \cos 240^\circ \\ \cos 240^\circ & \cos 0^\circ & \cos 120^\circ \\ \cos 120^\circ & \cos 240^\circ & \cos 0^\circ \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta - 240^\circ) \end{bmatrix} \varphi_f \quad (2)$$

式中: u_a, u_b, u_c —三相定子绕组的电压; i_a, i_b, i_c —三相定子绕组的电流; $\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$ —三相定子绕组的磁链; R_a, R_b, R_c —定子相电阻, $R_a = R_b = R_c = R$; φ_f —转子磁场的等效磁链; θ —转子轴线与定子 A 相绕组轴线夹角的电气角。

交流永磁同步电动机的转矩方程为:

$$\mathbf{T}_d = p_n \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}^T \frac{d}{d\theta} \begin{bmatrix} \cos \theta \\ \cos(\theta - 120^\circ) \\ \cos(\theta - 240^\circ) \end{bmatrix} \varphi_f \quad (3)$$

式中: p_n —电机的极对数。

矢量控制理论中,引入了旋转坐标系($d-q$),在坐标系($d-q$)中,交流永磁同步电机定子磁链方程为:

$$\varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \quad (4)$$

$$\varphi_q = L_q i_q \quad (5)$$

则 PMSM 定子电压方程为:

$$u_d = R i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega \varphi_q \quad (6)$$

$$u_q = R i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega \varphi_d \quad (7)$$

式中: u_d, u_q — d, q 轴定子电压; i_d, i_q — d, q 轴定子电流; L_d, L_q — d, q 轴定子电感; φ_d, φ_q — d, q 轴定子磁链; ω —转子机械角速度。

PMSM 的转矩方程为:

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_e &= \frac{3}{2} p_n (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) = \\ & \frac{3}{2} p_n [\varphi_f i_q - (L_q - L_d) i_q i_d] = \mathbf{T}_m - \mathbf{T}_r \end{aligned} \quad (8)$$

$$\mathbf{T}_m = \frac{3}{2} p_n \varphi_f i_q \quad (\text{励磁转矩})$$

$$\mathbf{T}_r = -\frac{3}{2} p_n (L_q - L_d) i_q i_d \quad (\text{磁阻转矩})$$

PMSM 的状态方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_q \\ \dot{i}_d \\ \dot{\omega} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -P_n \omega & \frac{-P_n \varphi_n}{L} \\ P_n \omega & -\frac{R}{L} & 0 \\ 1.5 \frac{P_n \varphi_n}{J} & 0 & -\frac{B}{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_q \\ i_d \\ \omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_q}{L} \\ \frac{u_d}{L} \\ -\frac{T_L}{J} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中: L —等效 d, q 轴电感; φ_n —每对磁极磁通; J —折算到电机轴上的总转动惯量; B —粘滞摩擦系数; T_L —折算到电机轴上的总负载转矩。

可以看出,再引入旋转坐标系($d-q$)之后,能够将电流矢量进行解耦,将其分解为旋转坐标系上互相独立并且正交的两个电流分量 i_d 和 i_q ,这样一来,可以对这两个电流分量分开进行控制。如此一来,本研究就可以像对直流电动机一样的对交流电动机进行转矩控制^[8]。

3 磁场定向(FOC)矢量控制方法

德国西门子公司 F. _Blaschke 等早在二十世纪七十年代就提出了“感应电机磁场定向的控制原理”,参考直流电动机的控制,为了将异步电动机的转矩和磁链也独立开来,而采用了坐标变换的方式对其进行解耦控制。这就是矢量控制的最初的由来,现在也将矢量控制称作磁场定向控制(FOC)。1985 年,直接转矩控制(DTC)理论初次被一个叫 M. Depenbrock 的德国学者提了出来,接着来自日本的学者高桥也发表出与之相似的控制理论^[9]。直接转矩控制跟矢量控制的区别在于:其不需要经过坐标变换,无需对转矩和磁链进行解耦控制。它强调的是直接的转矩控制效果,引入了离散的电压状态和六边形磁链轨迹等概念,因为无需进行复杂的数学变换,直接转矩控制的实现比矢量控制要容易许多。

有学者以 PMSM 的数学模型为基础,从数学层面对直接转矩控制跟矢量控制进行了剖析与比较,得出了两种控制策略各自的优缺点:DTC 控制的优势在于其控制结构简洁,转矩响应较为迅速,并且实现的难度不大。可是,由于采用离散的电压状态和六边形磁链轨迹导致电机运行时的转矩和磁链脉动不太理想。FOC 控制在转矩和磁链控制精度方面比 DTC 控制更加有优势,但是它的响应速度没有 DTC 控制快,而且实现难度较高。

考虑到供弹单元这一特殊应用场合,对伺服系统的转矩控制精确度、转矩脉动控制要求严格。这也是

笔者后来选择 FOC 控制的原因之一。永磁同步电机矢量控制是一种先进的控制方法,其采用矢量合成的方法来对交流电机的磁通、电流和电压空间矢量进行控制。其核心思路就是对交流电机进行解耦控制,以达到如同直流电机一般的相互独立的转矩和磁通的控制效果。将电流矢量从定子坐标系 (abc) 上变换到旋转坐标系 (dq) 中,从而在旋转坐标系上得到互相独立并且正交的两个电流分量 i_d 和 i_q ,这样一来,可以对这两个电流分量分开进行控制。

根据坐标变换理论,经过 Clark 和 Park 两个变换,本研究将定子侧的三相交流流量转换为 $d-q$ 坐标系下互相垂直,彼此独立的励磁电流 i_d 跟转矩电流 i_q ,即进行磁耦与转矩的解耦控制。最后由 Park 逆变换得到定子电压 V_α 跟 V_β ,用于 SVPWM 的控制。

通过 Clark 变换将定子电流 I_a, I_b, I_c 转换为 I_α, I_β :

$$\begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (10)$$

通过 Park 变换将定子电流 I_α, I_β 转换为 I_d, I_q :

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ -\sin\theta & -\cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_\alpha \\ I_\beta \end{bmatrix} \quad (11)$$

通过 Park 逆变换将电压 V_d, V_q 转换为 V_α, V_β :

$$\begin{bmatrix} V_\alpha \\ V_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ -\sin\theta & -\cos\theta \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} \quad (12)$$

永磁同步电机的模型不是线性的,其中不仅有很多变量而且变量之间还有复杂的耦合关系,为了实现像直流电机那样的线性控制,就必须对其进行解耦,矢量控制正是应用广泛的解耦控制手段之一,根据 PMSM 用途不同,对其进行的电流矢量控制方式也有所不同,按照控制目标可分为: $i_d = 0$ 控制、功率因数 $\cos\varphi = 1$ 控制、恒磁链控制、最大转矩/电流控制、弱磁控制、最大输出功率控制等。 $i_d = 0$ 控制实现了 PMSM 电机的解耦控制,同时,对于表贴式 PMSM 电机 (SM-PMSM), $i_d = 0$ 控制就是最大电流/电压控制。由式 (8) 可以看出,PMSM 电机的电磁转矩基本上由交轴电流分量 i_q 跟直轴电流分量 i_d 决定。令励磁电流分量 i_d 为零时,不论永磁同步电机的转子是表贴式还是内嵌式,它的电磁转矩方程都能简化为:

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \varphi_f i_q \quad (13)$$

由式 (13) 可以看出,PMSM 经过解耦之后可以具备像直流电机一样的良好的线性控制能力。

基于 FOC 的 PMSM 矢量控制结构框图如图 2 所示。

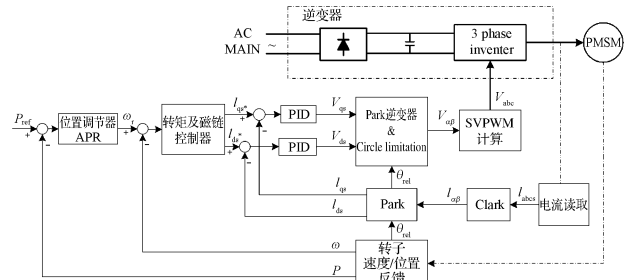


图 2 基于 FOC 的 PMSM 矢量控制结构框图

4 单电阻采样及相电流重构分析

由 PMSM 矢量控制结构框图可以看出,电流采样是进行矢量控制的必要环节,电流检测是否精确直接影响到电机矢量控制系统的性能。供弹单元对交流伺服控制系统各项要求严格,作为伺服控制内环的电流环更是要求反应迅速,控制精确,因此相电流重构是一项非常重要的工作。

目前,应用于母线电流采集测量的主要有以下两种方案:一种是依靠霍尔传感器完成对三相电流的测量^[10]还有一种是通过在桥电路的回路上串联单个精密采样电阻,依靠单个电阻完成电流重构^[11]。由于电路简单、使用方便,并且具有良好的隔离效果,霍尔传感器被广泛地应用于电流采样。但是,使用霍尔传感器成本比较高,而且占用的空间也比较大,所以在对空间和成本有要求的时候不太好用。使用单个采样电阻对母线电流进行采样,不仅电路上容易实现,不占用太多空间,而且精密采样电阻价格低廉,使得这种方案在很多需要控制成本的场合应用广泛。使用单个采样电阻进行母线电流采样,不仅节省了 3 个 AC 电流传感器,而且即使驱动电路使用的是整桥封装的 (IPM) 智能功率模块也同样适用。这也就使得近年来对单电阻相电流重构技术的应用越来越广泛,对单电阻相电流重构的研究也越来越多^[12-16]。

SVPWM 电压源型三相全桥逆变器共有 8 种开关状态,其中 6 个为有效矢量,2 个为零矢量。某一特定相电流会在有效电压矢量运行的时后呈现在电路的直流侧。母线电流与三相电流之间的关系如表 1 所示。

表 1 基本电压矢量作用下母线电流与三相电流的关系

基本电压矢量	母线对应相电流
$U_0 (V_{100})$	$+i_a$
$U_{60} (V_{110})$	$-i_c$
$U_{120} (V_{010})$	$+i_b$
$U_{180} (V_{011})$	$-i_a$
$U_{240} (V_{001})$	$+i_c$
$U_{300} (V_{101})$	$-i_b$

由表1所反映的电机某一特定相的电流和母线电流之间的联系,在1个PWM周期内将母线电流检测分别安排在两个基本电压矢量单独作用的时候进行,然后通过 $i_a + i_b + i_c = 0$ 计算得到电机的全部三相电流信息。

在实际情况下,由于存在死区延迟、母线电流信号建立延迟、A/D转换延迟等原因,系统若想采样得到准确的母线电流信息,其采样时间必须 T_{sample} 要满足大于等于 $T_{\text{min}}^{[17]}$ 。 T_{min} 为:

$$T_{\text{min}} = t_d + t_{\text{AD}} + t_{\text{up}}$$

式中: t_d —死区时间; t_{AD} —A/D转换时间; t_{up} —母线电流建立时间。

然而在一些特定的区域,非零基本电压矢量作用时间过短,这些区域统称为非观测区。在这些区域内, T_{sample} 小于 T_{min} ,系统无法采样得到准确的电流。非观测区分为两种:扇区过渡区与低压调制区。

以第一扇区为例具体分析。从图3可以看出电压矢量 V_{110} 从第六扇区过渡到第一扇区时,有效作用的时间小于采样所需的必要时间,无法采样得到准确的电流值 i_c ,在一个PWM周期内只能测得 i_a ,无法完成相电流重构。

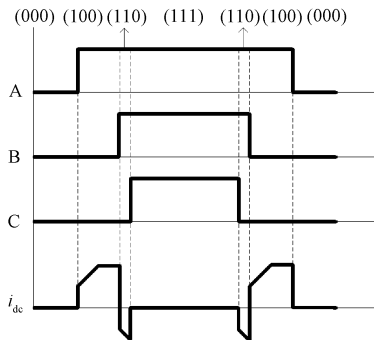


图3 扇区过渡区 PWM 波形

以第一扇区为例,低压调制区 PWM 波形如图4所示,在处于低压调制区的时候, V_{100} 和 V_{110} 的作用时间都很短,无法采样得到准确的相电流,不能完成相电流重构。

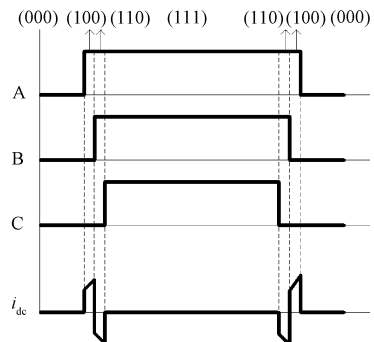


图4 低压调制区 PWM 波形

对于全区域的相电流重构问题,已经有很多学者对之进行了深入地研究,提出了多种有效的解决非可观测

区相电流重构的方法和策略。其中,比较有代表性的有:采样修改法、周期外采样法以及 PWM 移相法。

采样修改法可以在扇区过渡区中使用,当电压矢量进入到扇区过渡区时,某一相电压矢量的作用时间会过短导致无法准确采样。此时,系统对该电压矢量对应的母线电流不加以检测,保持之前正常采样的值。并且,扇区号在某特定相电流保持不变的时候也要固定不作改变,常规的电流采样要等到有效电压矢量运行到正常区域的时候才能进行。采样修改法可以修正相电流重构过程中因无法正确采样而产生错误脉冲,使重构的相电流波形更加接近真实情况。但是由于采用保持值代替不可测得电流值,不可避免地导致了重构电流波形一定程度上的失真^[18]。

周期外采样法是在1个完整的 PWM 周期之后添加3个有效电压矢量,这种方法不用考虑电压矢量的空间位置,在任意时间都能够精确的对相电流完成重构。在 PWM 周期外加入3个特定的电压矢量 V_{100} , V_{010} 和 V_{001} 可以测得 i_a , i_b , i_c ,完成相电流的重构。

为了获得精确的采样,必须确保每个脉冲作用时间大于电压矢量的最小时间 T_{min} ;可以证明,在原始电压矢量中引入的3个特定的电压矢量是封闭的,即合矢量为零,所以这种在 PWM 周期外插入脉冲矢量并不会影响原始矢量的幅值和相位。PWM 周期外采样法与 PWM 周期内采样法相比的优点是:采样重构的电流波形失真更小,即使是在扇区切换处也不会出现波形畸变的情况,重构效果更加理想。但因为存在 PWM 周期之外的采样脉冲,从而将不可避免地导致电机电流产生的高次谐波,造成电动机转矩产生高频波动^[19]。

PWM 移相法就是使用非对称 PWM 输出,将 PWM 波形前移或者后移,在 PWM 载波前半周期内预留足够的采样时间 T_{sample} ,满足 $T_{\text{sample}} \geq T_{\text{min}}$ 的条件,以解决非观测区的问题。以第一扇区为例,当目标电压矢量处于扇区过渡区时,若需要增加 V_{110} 在 PWM 前半周期的作用时间,只需将 C 相 PWM 波向后移动即可。非零基本电压矢量 V_{110} 在 PWM 前半周期作用时间增加至 T_{min} ,零矢量 V_{000} 作用时间与非零基本电压矢量 V_{100} 作用时间减小,此外还插入补偿矢量 $V_{101}^{[20]}$ 。

可以用矢量合成的方法证明,C 相 PWM 波平移之后并不会改变原目标电压矢量的相位和幅值。C 相 PWM 波移相之前目标电压矢量 V_{set} 由 V_{100} 和 V_{110} 合成。

$$V_{\text{set}} = V_{100} \cdot T_1 + V_{110} \cdot T_2$$

C 相 PWM 波移相之后,插入补偿矢量 V_{101} ,作用时间为 $T_{\text{add}} = T_{\text{min}} - T_2$,同时后半周期 V_{100} 作用时间缩短为 $T_1' = T_1/2 - T_{\text{min}} + T_2$ 。可以证明 C 相 PWM 波平

移之后的合成电压矢量依然是 V_{set} 。

$$V_{100} \cdot \frac{T_1}{2} + V_{110} \cdot T_{min} + V_{101} \cdot T_{add} + V_{110} \cdot T_1' =$$

$$V_{100} \cdot \frac{T_1}{2} + V_{110} \cdot T_{min} + V_{101} \cdot (T_{min} - T_2) + V_{110} \cdot$$

$$\left(\frac{T_1}{2} - T_{min} + T_2 \right) = V_{set}$$

还是以第一扇区为例,当目标电压矢量处于低压调制区时,需要同时移动 A、C 两相 PWM 波,将 V_{100} 和 V_{110} 作用时间增至 T_{min} 。同样可以证明 A、C 相 PWM 波平移之后并不会改变原目标电压矢量的相位和幅值。

然而,经过 PWM 移相法调整后的非对称的 PWM 信号会使得电流总谐波畸变率 (THD) 增加^[21]。为了避免 PWM 输出信号的不对称以及方便实现,本研究采用一种新的相电流重构策略:“固定时间有效矢量插入法”。依旧以第一扇区为例,当目标电压矢量处于扇区过渡区时,扇区过渡区固定时间有效矢量插入法如图 5 所示。在零电压矢量 V_{111} 中间插入一个有效电压矢量,将插入的有效矢量的时间控制为 T_{min} 能有效的减弱相电流谐波;为了保证目标电压矢量的幅值和相位不发生变化,需要同时保证 3 个桥臂的占空比不变,所以 C 相还需进行占空比补偿。

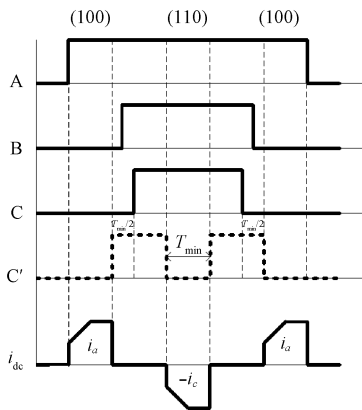


图 5 扇区过渡区固定时间有效矢量插入法

当目标电压矢量处于低压调制区时,固定时间有效矢量插入的方式会跟之前的有所不同。一般说来,当电压矢量处于低压调制区时,也就意味着电机是低转速的,也就是说在相邻的两个 PWM 周期里,正线电流波形不会有太大的变化,因此,低压调制区固定时间有效矢量插入法如图 6 所示,能够交替地在 A 相和 B 相中使用“固定时间有效矢量插入技术”。在 PWM 的某个周期内只进行一相电流的采样,而另外一相的电流取前一回采样得到的结果。

采用固定时间有效矢量插入法进行相电流重构,使得 PWM 对称输出,有利于降低电流总谐波畸变率;

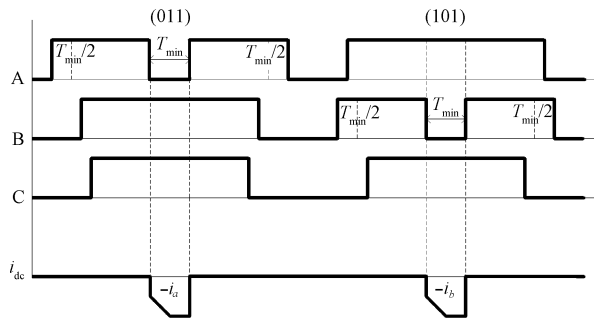


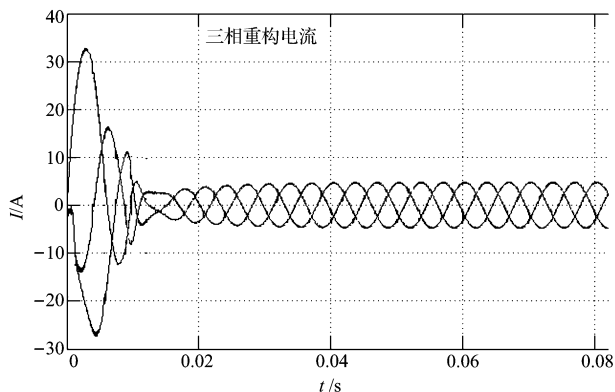
图 6 低压调制区固定时间有效矢量插入法

使用 STM32 高级定时器的“toggle”模式,配合 DMA 更新定时器比较寄存器,可以方便地实现有效矢量插入。

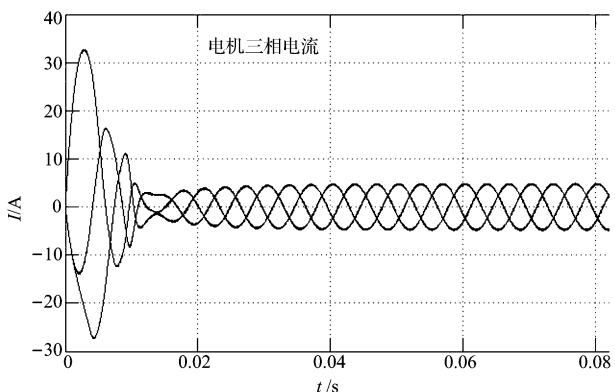
5 仿真与实验

本研究利用 Matlab/Simulink 搭建 PMSM 单电阻采样的仿真模型,仿真系统电机参数:定子电阻 $R_s = 2.8 \Omega$,直轴电感 $L_d = 0.00835 \text{ H}$,交轴电感 $L_q = 0.00835 \text{ H}$,永磁体磁链 $\varphi_f = 0.175 \text{ Wb}$,极对数 $P = 4$,转动惯量 $J = 0.8 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$,电机给定转速 $n = 1500 \text{ r/min}$,负载 $T = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

仿真波形如图 7 所示。从仿真结果看出采用“固定时间有效矢量插入法”重构出的电流与电机中的电流基本一致,可以在全区域实现电流重构。但是,有效矢量插入使得 PWM 失真,PWM 失真会在相应的一相



(a) “固定时间有效矢量插入法”重构电流值



(b) PMSM 三相电流仿真值

图 7 仿真波形图

中导致电流失真,因此重构出的电流波形相比较电机电流波形来说,不是很光滑。实际操作时,需要对重构的电流进行补偿。

单独对 A 相重构电流进行 (FFT) 频谱分析,如图 8 所示。“固定时间有效矢量插入法”重构出的相电流波形畸变率较小, $THD = 5.35\%$ 。

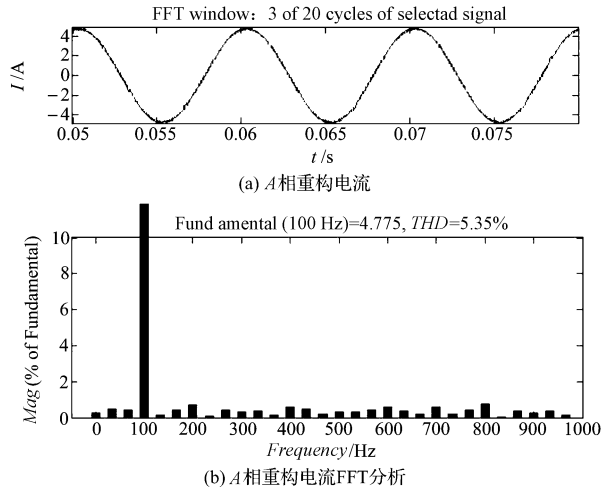


图8 A相重构电流进行(FFT)频谱分析

6 结束语

本研究在分析某高速供弹系统的基础上,对交流伺服供弹策略进行了研究。

(1)在分析对比 DTC 与 DOC 之后,选择了高精度转矩和磁链控制的 FOC 作为供弹系统控制方案。

(2)提出了“固定时间有效矢量插入法”。仿真实验证明,该方法重构的电流 THD 仅为 5.35% 。

(3)该 PMSM 控制方案可利用 STM32 MCU 来实现。这种基于 STM32 的 FOC + SVPWM 控制方案可以广泛用于低成本 PMSM 交流伺服应用,实用价值较高。

参考文献 (References):

[1] 葛宝明,王祥晰,苏鹏声,等. 交流传动系统控制策略综述[J]. 电气传动自动化,2001,23(4):3-8.

[2] 罗卫祥. 某火炮自动供弹机数字伺服驱动控制研究[D]. 南京:南京理工大学机械工程学院,2012.

[3] 赵军健. 某快速自动化传送装置的动力学与控制[D]. 南京:南京理工大学机械工程学院,2007.

[4] 黄声华,吴芳. 永磁交流伺服系统国内外发展概况[J]. 微特电机,2008(5):52-56.

[5] 骆再飞,蒋静坪,许振伟. 交流伺服系统及其先进控制策略综述[J]. 机床与液压,2002(6):7-10.

[6] 杨建,周绪利,彭世忠. 交流伺服系统高精度电流矢量控制[J]. 兵工自动化,2012(6):85-86,100.

[7] 李长兵,曹章平. 交流伺服驱动单元抗干扰设计与实现[J]. 机电工程技术,2013(6):66-69.

[8] 李志民,张遇杰. 同步电动机调速系统[M]. 北京:机械工业出版社,1996.

[9] 赵争鸣,袁立强,孟朔,等. 通用变频器矢量控制与直接转矩控制特性比较[J]. 电工技术学报,2004,19(4):81-84.

[10] 郝晓弘,魏祥林. 永磁同步电机 FOC 与 DTC 控制策略原理和仿真的比较[J]. 科学技术与工程,2008,13(8):3463-3468.

[11] RAY W F, DAVIS R M. The Definition and Importance of Power Factor for Power Electronics Converters[C] // European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), 1988:799-805.

[12] 张卫平. 开关变换器的建模与控制[M]. 北京:中国电力出版社,2005.

[13] KIM H, JAHNS T M. Phase current reconstruction for AC motor drives using a DC link single current sensor and measurement voltage vectors[J]. **IEEE Transactions on Power Electronics**, 2006, 121(5):1413-1419.

[14] LEE W C, LEE T K, HYUN D S. Comparison of single-sensor current control in the DC link for three phase voltage-source PWM converters[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2001, 48(3):491-505.

[15] SARITHA B, JANAKIRAMAN P A. Single sensor current control of permanent magnet synchronous motor using field programmable gate array[J]. **IET Electric Power Applications**, 2007, 1(3):416-422.

[16] BERTOLUZZO M, BUJA G, MENIS R. Direct torque control of an induction motor using a single current sensor[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, 2006, 53(3):778-784.

[17] MOGNIHAN J F, KAVANAGH R C, EGAN M G, et al. Indirect Phase Current Detection for Field Oriented Control of a Permanent Magnet Synchronous Motor Drive[C] // In Proc. EPE'91, 1991:641-646.

[18] 杜凡,李云辉,魏延羽,等. 两种基于母线电流传感器的相电流重构方法[J]. 微机电. 2013, 46(12):55-57.

[19] CARPANETO M, FAZIO P, MARCHESONI M. Dynamic performance evaluation of sensorless permanent magnet synchronous motor drives with reduced current sensors[J]. **IEEE Transactions on Industry**, 2012, 59(12):4759-4588.

[20] 王帆,陈阳生. 不同 PWM 模式下交流电机单电阻三相电流采样的研究[J]. 机电工程, 2013, 30(5):585-590.

[21] 顾义坤,倪风雷,杨大鹏,等. 基于母线电流传感器的相电流重构方法[J]. 电机与控制学报, 2009, 13(6):812-815.

[编辑:洪炜娜]

本文引用格式:

陈浩,王茂森. 某高速供弹装置用交流伺服驱动控制策略研究[J]. 机电工程, 2015, 32(1):67-73.

CHEN Hao, WANG Mao-sen. Control strategies of AC servo drive for high-speed ammunition feeding equipment[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2015, 32(1):67-73.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>