

直线电机脉宽调制算法及仿真研究*

林 峰, 邓小雷

(衢州学院 机械工程学院, 浙江 衢州 324000)

摘要: 为解决目前常规空间矢量脉宽调制(SVPWM)算法存在的计算繁琐、难以数字化实现的缺点,在综合分析永磁直线同步电机(PMLSM)控制原理的基础上,提出了一种用于永磁直线同步电机的新型SVPWM快速算法。该算法通过永磁直线同步电机位移传感器的检测值完成扇区判断与开关工作时间的计算。最后,通过 Matlab/Simulink 建立了仿真模型。仿真结果表明,该算法效果良好,解决了常规SVPWM算法由于反正切函数运算而导致系统响应慢、控制精度低的问题,具有一定的实用性与可行性。

关键词: 空间矢量脉宽调制;永磁直线同步电机;谐波分析;电压调制

中图分类号: TM341; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)06-0682-04

Pulse width modulation algorithm and simulation based on linear motor

LIN Feng, DENG Xiao-lei

(Department of Mechanical Engineering, Quzhou University, Quzhou 324000, China)

Abstract: In order to solve the problem of computational complexity and reduce the difficulty on implementing digitization with space vector pulse width modulation(SVPWM), a novel rapid algorithm for SVPWM was proposed based on the comprehensive analysis of the control principle of permanent magnet linear synchronous motor(PMLSM). The sector judgment and the calculation of switching time can be calculated based on the data from the displacement sensor of PMLSM. Finally, the model of the algorithm was established in Matlab/Simulink. The simulation results show that the novel algorithm is practical and feasible, the problems of low response and low control accuracy from inverse tangent calculation in conventional SVPWM is solved.

Key words: space vector pulse width modulation(SVPWM); permanent magnet linear synchronous motor(PMLSM); harmonic analysis; voltage modulation ratio

0 引 言

在直线电机交流驱动控制系统中,为实现解耦控制,产生可控的电磁转矩,多采用空间矢量脉宽调制技术(SVPWM),其输出电流谐波少、脉动推力小、电压利用率高^[1]。但常规的SVPWM算法需要进行复杂的反正切函数运算,控制系统的计算量大,且其复杂的计算过程对于高精度的直线电机位移控制产生不可忽略的影响^[2]。为解决上述问题,许多学者从简化扇区判断与优化开关矢量导通时间计算等方面入手,并取得了一定的研究成果^[3-8]。

本研究在综合分析永磁直线同步电机控制原理的基础上,通过检测直线电机位移信号完成对参考控制电压的扇区判断与开关切换时间的计算,实现逆变器输出电流可控的目的,具有控制简单、稳定性好等优点。

1 SVPWM新算法实现

1.1 永磁直线同步电机控制原理

在永磁直线同步电机的控制中,为最有效地产生推力,多采用电枢电流 $i_d = 0$ 的控制方法,只要在逆变器中控制好定子电流的幅值和相位,就会得到满意的

推力控制特性^[9]。永磁直线同步电机的控制系统框图如图1所示,包括永磁同步直线电机、位移传感器、速度及电流控制器、PWM逆变器、PWM生成器等。

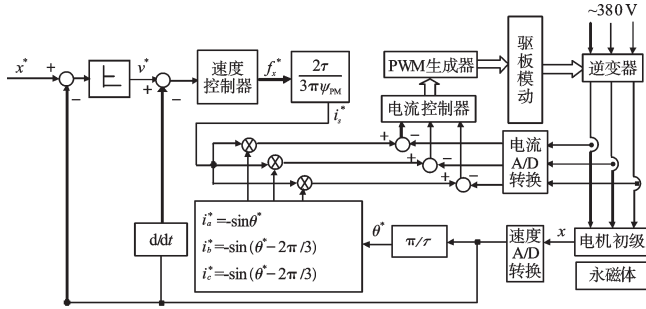


图1 永磁直线同步电机控制框图

在实际电机控制中,位移和速度控制器根据控制指令产生参考推力信号 f_x^* ,计算得到参考控制电流 i_s^* ;同时,位移传感器检测直线电机动子的实际位移 x ,计算出动子的实际位移角并通过三角函数发生器变换为三相正弦信号,如下式所示:

$$\begin{cases} i_a^* = -\sin \theta^* \\ i_b^* = -\sin(\theta^* - 2\pi/3) \\ i_c^* = -\sin(\theta^* + 2\pi/3) \end{cases} \quad (1)$$

本研究将式(1)得到的三相正弦信号与参考控制电流 i_s^* 相乘,并将所得的值送到PWM逆变器中,便可达到控制输出电枢三相绕组电流目的,而PWM逆变器输出三相绕组瞬时值如下式所示:

$$\begin{cases} i_a^* = -i_s^* \sin \theta^* \\ i_b^* = -i_s^* \sin(\theta^* - 2\pi/3) \\ i_c^* = -i_s^* \sin(\theta^* + 2\pi/3) \end{cases} \quad (2)$$

本研究将式(2)得到的三相电流经三相-两相变换后,便得到:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(-\theta^*) & \cos(-\theta^* + 2\pi/3) & \cos(-\theta^* - 2\pi/3) \\ \sin(-\theta^*) & \sin(-\theta^* + 2\pi/3) & \sin(-\theta^* - 2\pi/3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a^* \\ i_b^* \\ i_c^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ i_s^* \end{bmatrix} \quad (3)$$

在直线电机的运行过程中,绕组电流随 θ^* 做正弦变化,电枢的直轴电流 i_d 始终为0,电机推力只与参考控制电流有关,便可实现电机的解耦控制。

1.2 空间矢量脉宽调制原理与新算法实现

永磁直线同步电机交流驱动系统多采用交直交电压型PWM逆变器。电机的相电压依赖于它所对应的逆变器功率开关的状态,功率开关一共有3对,逆变器工作时,上下一对开关实现180°导通,即上桥臂功率开关处于开通状态时,相应电压控制信号的状态量定义为“1”,此时下桥臂功率开关处于关断状态;相反,当上桥臂开关处于关断时,下桥臂导通,相应控制信号状态量为“0”。功率开关一共有8种工作状态,其

中在空间矢量坐标系中可以确定6个幅值相等、相位互差60°电角度的基本空间矢量,分别为 $V_1(100)$ 、 $V_2(110)$ 、 $V_3(010)$ 、 $V_4(011)$ 、 $V_5(001)$ 、 $V_6(101)$,两个基本空间矢量之间的区域定义为扇区,共6个扇区,逆变器基本电压矢量及扇区如图2所示,而 $V_0(000)$ 、 $V_7(111)$ 为零开关矢量,属于自由切换状态。

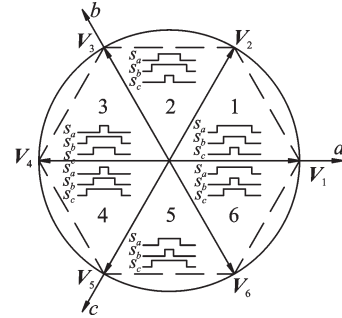


图2 逆变器基本电压矢量及扇区

对于任意位置的空间电压参考矢量 U_s ,必属于6个扇区中的一个,因此可通过控制构成该扇区的两个基本空间矢量的作用时间合成该矢量。本研究定义扇区的起始轴为 X 轴,结束轴为 Y 轴,参考矢量转过该扇区的角度为扇区角 θ_0 ,根据伏秒平衡原则,该参考矢量通过基本空间矢量表示为:

$$U_s T_s = U_x T_x + U_y T_y \quad (4)$$

式中: T_s —一个PWM周期, T_x 、 T_y —基本空间矢量 U_x 、 U_y 的作用时间。

其计算公式为:

$$\begin{cases} T_x = \sqrt{3} T_s \frac{|U_s|}{U_{dc}} \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta_0\right) \\ T_y = \sqrt{3} T_s \frac{|U_s|}{U_{dc}} \sin \theta_0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: θ_0 —扇区角, U_{dc} —直流母线电压。

对于扇区角 θ_0 ,其与动子的实际位移角 θ^* 的关系可表达为:

$$\theta^* = \theta_0 + n \cdot \pi/3 \quad (n = \pm 1, \pm 2, \pm 3 \dots) \quad (6)$$

通过计算 θ_0 的三角函数值取代计算 θ^* 的三角函数值,避免了控制器多次重复计算,提高了运行效率。

一个完整PWM周期不仅包括基本矢量的作用时间,同时还包括零矢量的作用时间 T_0 ($T_0 = T_s - T_x - T_y$)。为实现SVPWM算法,必须使 T_0 为非负数,而在实际工作中常有参考电压过饱和导致 $T_x + T_y > T_s$,可将工作时间 T_x 和 T_y 按下式处理:

$$\begin{cases} T_x = T_s \cdot T_x / (T_x + T_y) \\ T_y = T_s \cdot T_y / (T_x + T_y) \end{cases} \quad (7)$$

的频谱如图4(b)所示。从图中可以看出,电流到达稳态时具有良好的正弦波形,通过傅立叶变换得到的主要谐波分量频率为PWM频率的整数倍,但最大谐波分量频率幅值相对较小,约为基波的0.30%。

为了研究电压调制比与逆变器输出电流波形之间的关系,本研究选取直流母线电压 $U_{dc}=150\text{ V}$, PWM 周期 $f_s=10\text{ kHz}$ 的情况下进行仿真,得到的a相相电流波形及其频谱(截取频率范围0~1 000 Hz)如图4(c)所示。从图中可以看出,逆变器输出电流在波峰与波谷的位置发生畸变,谐波幅值谱显示电流在0~500 Hz 的频率范围内出现谐波,最大谐波分量频率幅值约为基波幅值的3.4%。

为了研究PWM周期与逆变器输出电流波形的关系,本研究选取PWM频率 $f_s=1\text{ kHz}$,直流母线电压 $U_{dc}=300\text{ V}$ 的工作情况下进行仿真,得到的相电流波形及其频谱如图4(d)所示。从图中可以看出,逆变器输出的正弦波形出现大量扰动,其主要谐波频率为PWM频率的整数倍,最大谐波频率幅值约为基波频率幅值的3.1%。

本研究对上述结果进行分析,逆变器输出电压含有大量的高幅值的谐波分量,但电流输出具有良好的正弦波形,如图4(a)、图4(b)所示。输出电流波形与电压调制比和PWM频率有关。电压调制比定义为 $k=2U_s/U_{dc}$ [10-11],参考电压与直流母线电压的关系满足 $T_x+T_y\leq T_s$, $k\leq 1.154$,逆变器输出良好的正弦电流;反之, $k>1.154$,输出的电流波形将产生畸变。PWM频率是影响输出电流精度的重要因素之一,其值越大,电流所包含的谐波量越小,输出正弦波的精度越高。

电机推力稳定性是判断算法实用性的标准之一。PMLSM在 $U_{dc}=300\text{ V}$, $f_s=10\text{ kHz}$ 的工作情况下的推力仿真波形图如图5所示。从图中可以看出,电机推力维持在560 N附近上下波动,波动幅度小,具有良好的稳定性。

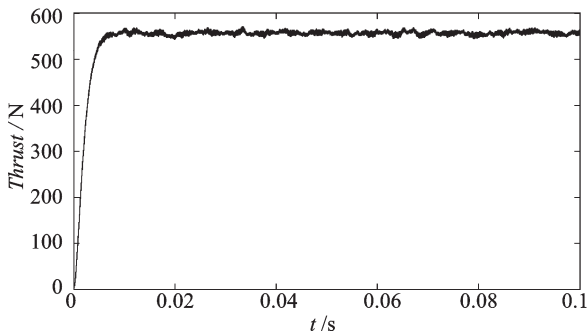


图5 PMLSM推力波形

3 结束语

本研究提出了一种通过优化扇区判断的SVPWM新算法,通过计算电动机的位移完成扇区判断与逆变器开关切换时间的计算,实现了逆变器输出电流可控的目的。与常规的SVPWM算法相比,该算法省略了反正切函数运算计算相角的过程,提高了逆变器的响应速度与控制精度。在Matlab/Simulink中建立了仿真模型,仿真结果表明该算法正确且具有良好的稳定性;同时还讨论了电压调制比、PWM频率等影响逆变器输出电流波形的因素。

该算法编程简单,易于DSP编程实现,为下一步实现数控机床的直线电机伺服进给系统数字化控制奠定了良好基础。

参考文献(References):

- [1] 金建勋,郑陆海. 基于SVPWM的PMLSM控制系统仿真与实现[J]. 智能系统学报,2009,4(3):251-257.
- [2] 刘 取. 电力系统稳定性及发电机励磁控制[M]. 北京:中国电力出版社,2007.
- [3] 浦志勇,黄立培,吴学智. 三相PWM整流器空间矢量控制简化算法的研究[J]. 电工电能新技术,2002,21(2):56-60.
- [4] 张进高,卢琴芬,王 利,等. 基于SVPWM的直线电机地铁的驱动控制[J]. 机电工程,2011,28(10):1260-1263.
- [5] 周卫平,吴正国,唐劲松,等. SVPWM的等效算法及SVPWM与SPWM的本质联系[J]. 中国电机工程学报,2006,26(2):133-137.
- [6] 余秋实,王秋晓. 异步电机SVPWM矢量控制系统仿真[J]. 机电工程,2010,27(1):76-81.
- [7] RAHIMAN B A, NARAYANAN G, RANGANATHAN V T. Modified SVPWM algorithm for three level VSI with synchronized and symmetrical waveforms[J]. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**,2007,54(1):486-494.
- [8] ZENG Q, CHANG L, SONG P. SVPWM-based Current Controller with Grid Harmonic Compensation for Three-phase Grid-connected VSI[C]// 35th Annual IEEE Power Electronics Specialists Conference. Germany: [s.n.], 2004: 2494-2500.
- [9] 潘开林. 永磁直线电机的驱动特性理论及推力波动优化设计研究[D]. 杭州:浙江大学机械与能源工程学院,2003.
- [10] 杨贵杰,孙 力,崔乃政,等. 空间矢量脉宽调制方法的研究[J]. 中国电机工程学报,2001,21(5):79-83.
- [11] 张海荣,陈汉平,黄堤彬,等. 基于MSP430F149的空间矢量脉宽调制波的实现[J]. 机电技术,2011(2):17-19.

[编辑:张 翔]