

文章编号: 1671- 251X(2010) 06- 0057- 04

# 永磁直线同步电动机垂直提升系统的仿真与实现

曹春岩, 崔建明, 刘红丽

(太原理工大学电气与动力工程学院, 山西 太原 030024)

**摘要:** 针对传统的永磁直线同步电动机驱动的垂直提升系统容易产生失步和振荡现象的问题, 提出了一种永磁直线同步电动机速度、电流、位置闭环矢量控制系统的设计方案, 采用次级磁链定向的矢量控制技术, 结合空间电压矢量脉宽调制方法, 在 Matlab/Simulink 环境下对垂直提升系统的分段式永磁直线同步电动机闭环矢量控制系统进行了建模与仿真, 并基于实验室自制样机做了闭环实验。实验结果表明, 该系统具有良好的动、静态性能, 基本满足垂直提升系统相应性能的要求。

**关键词:** 垂直提升系统; 永磁直线同步电动机; 磁链; 电压空间矢量; 脉宽调制; PMLSM

**中图分类号:** TD614 **文献标识码:** A

Simulation of Vertical Hoisting System Driven by PMLSM and Its Implementation

CAO Chunyan, CUI Jianming, LIU Hongli

(College of Electrical and Power Engineering of Taiyuan University of Technology,  
Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** In view of the problem that traditional vertical hoisting system driven by PMLSM is easy to produce phenomenon of out of step and oscillation, the paper proposed a design scheme of closed-loop vector control system of PMLSM with speed, current and position. It made modeling and simulation for the closed-loop vector control system of PMLSM with segmentation structure of vertical hoisting system under Matlab/Simulink by using vector control technology of oriented secondary flux and SV PWM method, and made closed-loop experiment based on self-made prototype in laboratory. The experiment result showed that the system has good dynamic and static performances and basically meets with demands of vertical hoisting system.

**Key words:** vertical hoisting system, permanent magnet linear synchronous motor, flux, voltage space vector, PWM, PMLSM

## 0 引言

永磁直线同步电动机(PMLSM)是新型无绳提升系统的核心,它不仅具有永磁电动机高效、节能的特点,且兼有直线电动机结构简单、控制方便、无污染、低噪声等优点。与传统的煤矿提升装置相比, PMLSM 驱动的垂直提升系统具有结构简单、占地面积少、高速、高效、节能、可靠性高及抗震等优点,

应用于高层和地下建筑时,设备数量减少,提升系统简化,随着深度和高度的增加只需增加支撑构件,减少基建费用。但在传统的 PMLSM 驱动的垂直提升系统速度电流双闭环控制中, PMLSM 容易产生失步和振荡现象。针对该问题,笔者在其基础上增加了位置控制,使得电动机能够平稳运行,基本满足垂直提升系统的性能要求。

## 1 PMLSM 仿真模型的建立

### 1.1 数学模型

由于 PMLSM 三相绕组相互之间都存在电磁耦合,要建立其精确的模型是很困难的,所以必须进行合理的简化:忽略磁路饱和、磁滞和涡流损耗的影

收稿日期: 2010- 02- 05

基金项目: 山西省科技攻关项目(2006031176)

作者简介: 曹春岩(1983- ),男,山西临汾人,太原理工大学电气与动力工程学院在读硕士研究生,主要研究方向为电力电子与电力传动。E-mail: bianyuan429@163.com

响;忽略励磁磁势的变化,假设气隙是恒定的;假定初级与次级表面光滑,忽略齿槽效应。由永磁体产生的磁动势为定值,其  $d-q$  轴数学模型方程式为<sup>[2]</sup>

$$\begin{cases} u_d = i_d R_s + p \Psi_d - \omega \Psi_q \\ u_q = i_q R_s + p \Psi_q + \omega \Psi_d \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中磁链为

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d i_d + \Psi \\ \Psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

电动机的电磁功率为

$$P_e = F_{evs} = \frac{3}{2} \omega_s (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) \quad (3)$$

对于垂直运动的电动机而言,  $L_d = L_q$ , 则电动机总推力可表示为

$$F_e = \frac{3\pi p}{2\tau} \Psi_{PM} i_q \quad (4)$$

垂直运动的直线电动机的机械运动方程为

$$M \frac{dv}{dt} = F_e - F_l - B_v v - Mg \quad (5)$$

式中:  $u$  为电压;  $i$  为电流;  $\Psi$  为磁链;  $d, q$  为下标, 分别表示初级  $d, q$  分量;  $p$  为微分算子;  $R_s$  为初级绕组的电阻;  $\omega$  为电角速度;  $\Psi$  为永磁体对定子绕组的磁链;  $L_d, L_q$  分别为初级直轴和交轴电感;  $v_s$  为电动机转速;  $\omega_s$  为转差角速度;  $\tau$  为极距;  $\Psi_{PM}$  为永磁体对电动机定子绕组的磁链;  $F_l$  为负载阻力;  $B_v$  为机械阻尼系数;  $M$  为动子质量;  $g$  为重力加速度。

## 1.2 空间电压矢量脉宽调制(SVPWM)方法

SVPWM 方法以三相电压源所形成的理想磁链圆为基准, 通过三相逆变器不同的开关模式所产生的实际磁链矢量去逼近理想磁链圆, 并由两者相比较后的结果决定逆变器的开关状态, 生成 PWM 波形, 这样就可以达到理想的控制性能, 如图 1 所示<sup>[3]</sup>。

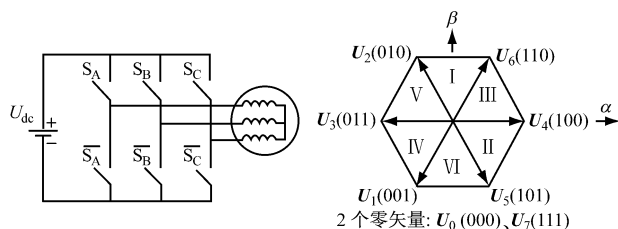
图 1(a) 中, 三相逆变器的基本结构由 6 个开关器件组成, 其输出的合成空间电压矢量为

$$u = \frac{2}{3} (u_a + e^{j2\pi/3} u_b + e^{j4\pi/3} u_c) \quad (6)$$

三相逆变器的桥臂开关状态可以组成 8 种空间电压矢量:

$$u_k = \begin{cases} \frac{2}{3} U_{dc} e^{j(k-1)\pi/3}, & k = 1, 2, 3, 4, 5, 6 \\ 0, & k = 0, 7 \end{cases} \quad (7)$$

图 1(b) 中, 8 个空间电压矢量将空间分成 6 个面积相同的扇区, 其中所需参考空间电压矢量都可以用邻近 2 个空间电压矢量的线性组合来表示。SVPWM 方法就是用基本空间电压矢量逼近给定所需参考的空间电压矢量。8 个基本空间电压矢量遵循平行四边形法则, 可以线性组合成任意的电压空间矢量。合成空间电压矢量  $u$  由 3 个相电压空间矢量相加所形成, 并且以电源角频率  $\omega$  速度进行旋转, 其方向是磁链圆轨迹的切线方向, 并且与频率成正比。当磁链矢量在空间旋转 1 周时, 空间电压矢量按磁链圆的切线方向, 连续运动  $2\pi$  弧度, 其运动轨迹与磁链圆重合。这样, 电动机旋转磁场的形状问题就可以转换为空间电压矢量运动轨迹的形状问题来讨论。



(a) 三相逆变器结构

(b) 输出的电压矢量示意图

图 1 三相逆变器结构及输出的电压矢量示意图

## 1.3 系统建模

在 Matlab/Simulink 环境下, 笔者搭建了基于 SVPWM 控制的垂直提升系统的分段式 PMLSM 闭环矢量控制系统仿真模型, 如图 2 所示。

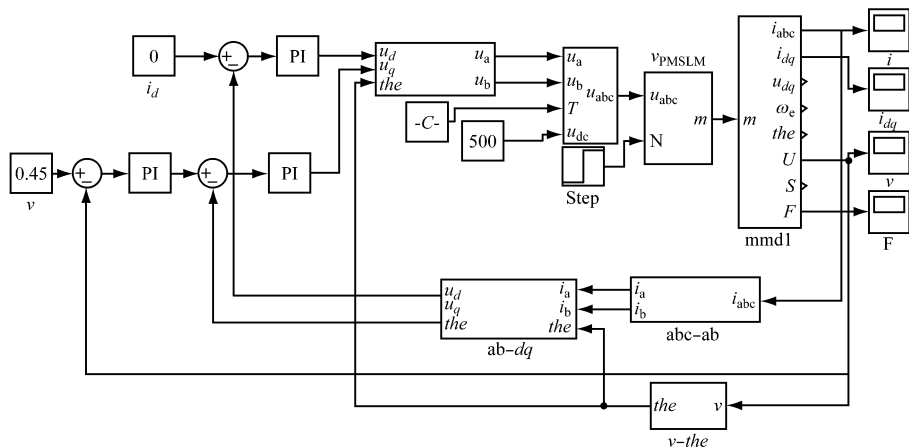
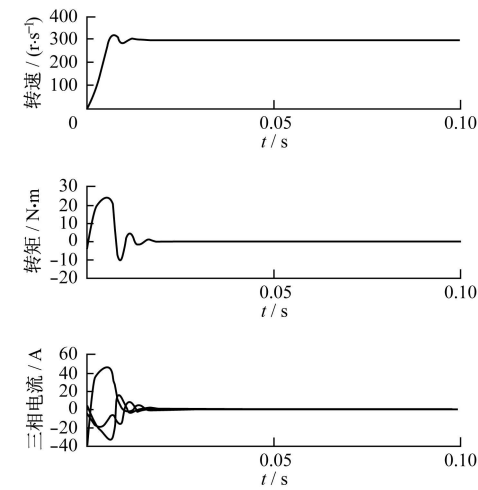


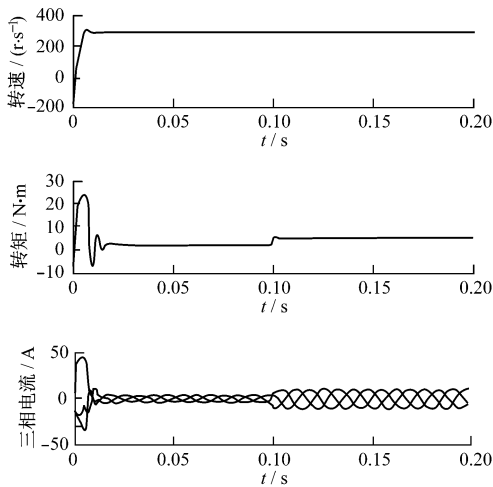
图 2 基于 SVPWM 控制的垂直提升系统的分段式 PMLSM 闭环矢量控制系统仿真模型

1.4 仿真结果及分析

根据所搭建的仿真模型, 笔者对 PMLSM 驱动的垂直提升系统在空载及突加负载的情况下作了进一步的研究, 最后得到系统转速、转矩、三相电流仿真曲线, 如图 3 所示。



(a) 空载时的仿真曲线



(b) 突加负载时的仿真曲线

图 3 PMLSM 驱动的垂直提升系统在空载及突加负载的情况下转速、转矩、三相电流仿真曲线

从图 3(a) 可看出, 电动机稳速运行时, 电磁转矩均值为零; 从图 3(b) 可看出, 在  $t=0.1\text{ s}$  突加负载时, 转矩发生波动, 但又能迅速恢复到平衡状态。该仿真结果为下一步的实验室实现提供了理论依据。

2 PMLSM 闭环矢量控制系统的实现

PMLSM 闭环矢量控制系统由主控制器、检测装置及保护电路组成, 电源电压由 6 个不可控二极管整流后, 经 IPM (智能功率模块) 逆变电路及隔离驱动电路后输出到 PMLSM, 其中数字控制部分以

DSP2407 为核心, 位置、速度检测、电流检测都由 DSP2407 处理<sup>[4]</sup>, 如图 4 所示。由于 PMLSM 是直接产生直线运动的, 所以旋转的光电编码器无法在 PMLSM 上应用, 本系统采用的位置传感器为光栅尺。光栅尺是依据摩尔条纹原理, 通过光电转换, 以数字方式表示线性位移量的高精度位移传感器, 其输出用来检测位移、计算速度。

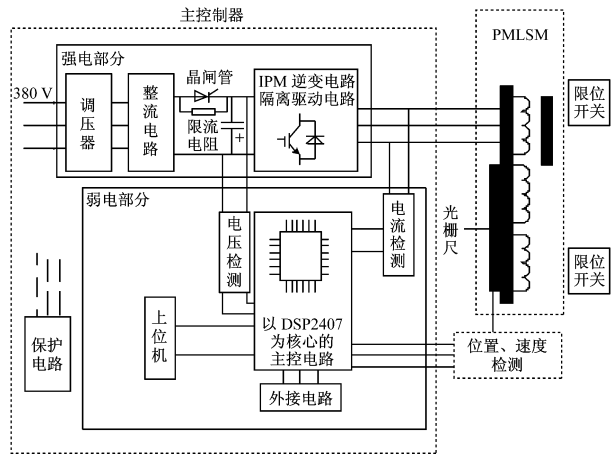


图 4 PMLSM 闭环矢量控制系统结构

2.1 系统硬件设计

PMLSM 闭环矢量控制系统主电路包括整流电路、滤波电路、IPM 逆变电路、PWM 脉冲隔离转换电路及保护电路, 如图 5 所示。其工作原理: 将三相交流电压通过不可控整流模块变为直流电压, 整流后的脉动电压再经过大电容平滑后成为稳定的直流电压; IPM 逆变电路对该直流电压进行斩波, 形成电压和频率可调的三相交流电提供给 PMLSM。由于 DSP 输出的 PWM 脉冲不能直接供给 IPM 逆变电路, 因此, 需要 PWM 脉冲隔离转换电路将由 DSP 生成的 3.3 V 的 PWM 脉冲信号转换为 IPM 逆变电路所需的电压信号, 然后进入 IPM 逆变电路中。

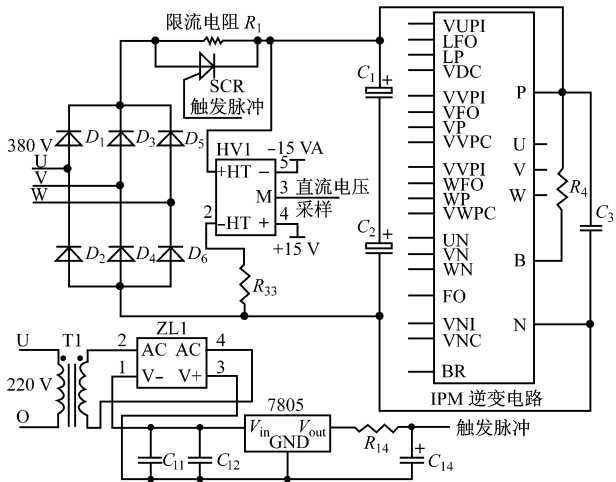


图 5 PMLSM 闭环矢量控制系统主电路

## 2.2 系统软件设计

PMLSM 闭环矢量控制系统软件包括初始化程序、主循环程序、启动校正子程序、中断服务子程序和串行通信子程序 5 个部分。初始化子程序对系统的各种相关的寄存器进行初始化设置、设置中断矢量为整个程序的运行做好准备。初始化子程序后就进入主循环程序: 首先与上位机通信进行数据交换; 其次设置事件管理器的相关寄存器和中断控制寄存器, 开启中断服务子程序; 同时设置和保存一些重要的系统参数, 以保证系统正常运行。如果系统启动时不能确定动子位置, 那么在电动机启动时会发生倒滑、抖动现象, 严重时甚至会导致电动机启动失败, 也有可能影响系统启动以后的运行性能, 因此, 必须对动子进行相位初始化。图 6 为系统软件程序流程 (SCI 为串行通信接口, SPI 为串行外设接口)。

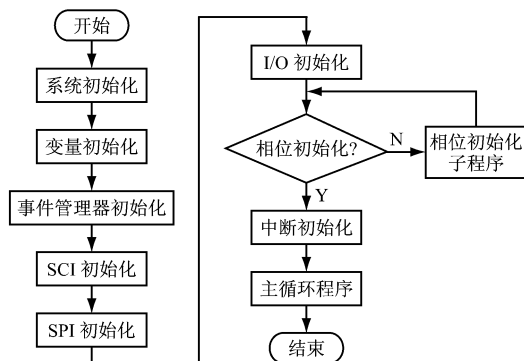
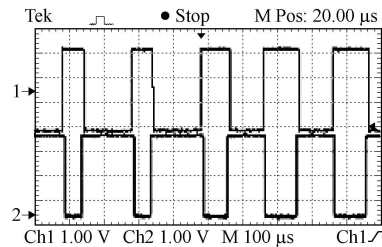


图 6 PMLSM 闭环矢量控制系统软件程序流程

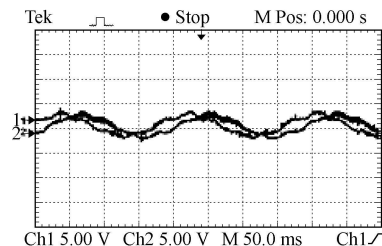
## 2.3 实验结果

PMLSM 闭环矢量控制系统所用的 PMLSM 的样机是实验室设计的。原设计定子由 5 段绕组构成, 考虑到节省研究经费, 实际实验所用 PMLSM 定子由 3 段绕组构成。 $d-q$  轴电感  $L = 25 \text{ mH}$ 、 $\Psi = 0.27 \text{ Wb}$ 、相电阻  $R = 1.5 \Omega$ 、有效行程为  $800 \text{ mm}$ 、额定工作电流  $I = 6 \text{ A}$ 、额定相电压有效值为  $88 \text{ V}$ 、最高频率为  $20 \text{ Hz}$ 、最大同步速度为  $1.8 \text{ m/s}$ 、PWM 采样频率为  $5 \text{ kHz}$ 、调制波周期为  $200 \text{ ms}$ 、载波周期  $T_{\text{pwm}} = 200 \mu\text{s}$ 、负载为  $30 \text{ N}$ 。示波器显示的波形如图 7 所示。

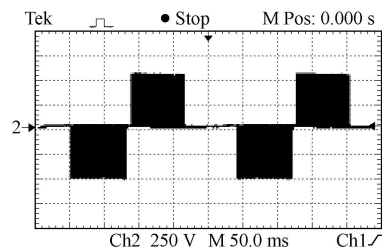
从图 7(a) 可看出, 上下桥臂存在死区时间, 进一步测量可得到死区时间为  $4.2 \mu\text{s}$ , 说明 PWM 波输出正确; 从图 7(b)、(c) 可看出, 在 IPM 逆变电路的输出端可以测得两相电流和线电压, 说明 PWM 波工作正常, 能够驱动 IPM 逆变电路输出所需要的电压和电流。



(a) 上下桥臂触发脉冲波形



(b) 两相电流波形



(c) 线电压波形

图 7 示波器显示的波形

## 3 结语

本文利用 Matlab/Simulink 提供的仿真环境, 设计了基于 SVPWM 控制的垂直提升系统的分段式 PMLSM 闭环矢量控制系统的仿真模型, 该模型采用速度、电流、位置闭环控制方式, 有效解决了电动机的失步和振荡现象。实验结果表明, 该 PMLSM 闭环矢量控制系统具有良好的动、静态性能, 基本满足垂直提升系统的性能要求。

### 参考文献:

- [1] 叶云岳. 直线电动机原理与应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [2] 李志明, 张遇杰. 同步电动机调速系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 1996.
- [3] 王建宽, 崔巍, 江建中. SVPWM 技术的理论分析及仿真[J]. 微特电机, 2006(6): 15-18.
- [4] 李永东. 交流电动机数字控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [5] 祝琴, 钟祥微, 章鸿. SVPWM 原理及 SIMULINK 仿真[J]. 电机电器技术, 2005(4): 49-51.