

文章编号:0253-9993(2008)07-0826-05

# 分段初级永磁直线同步电机提升系统失电保护分析

司纪凯<sup>1,2</sup>, 陈昊<sup>1</sup>, 袁世鹰<sup>2</sup>, 汪旭东<sup>2</sup>, 焦留成<sup>3</sup>

(1. 中国矿业大学 信电学院, 江苏 徐州 221008; 2. 河南理工大学 电气工程与自动化学院, 河南 焦作 454000; 3. 郑州大学, 河南 郑州 450000)

**摘要:** 采用有限元法结合运动系统的能量解析式对分段初级永磁直线同步电机 (PMLSM) 垂直提升系统的失电保护过程的几个阶段进行分析, 其实质是 PMLSM 三相绕组短路时的发电制动过程. 上升过程中失电, 制动过程可分为 3 个阶段: 减速上行、加速下行、匀速下行. 在这 3 个阶段中, 流过电机绕组的电流和动子速度变化很大, 变化程度由负载大小、绕组阻抗及动子永磁体产生的磁场强度等决定. 电流和速度的仿真和试验结果验证了失电保护过程分析的正确性.

**关键词:** 永磁直线同步电机 (PMLSM); 提升系统; 失电保护

**中图分类号:** TM351 **文献标识码:** A

## Analysis of power fail interrupts protection duration of vertical lift driven by discontinuous primary PMLSM

SI Ji-kai<sup>1,2</sup>, CHEN Hao<sup>1</sup>, YUAN Shi-ying<sup>2</sup>, WANG Xu-dong<sup>2</sup>, JIAO Liu-cheng<sup>3</sup>

(1. The School of Information and Electrical Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221008, China; 2. College of Electrical Engineering and Automation, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China; 3. Zhengzhou University, Zhengzhou 450000, China)

**Abstract:** Duration of power fail interrupt protection of discontinuous primary Permanent Magnet Linear Synchronous Motor (PMLSM) was analyzed using finite element method (FEM) combining energy analytical formulation of the motion system. The study was focus on power generation braking for three-phase short-circuit of PMLSM. If the power fails interrupt in the motor mover upward process, braking duration may include three phases: decelerate up, accelerate down, speed-constant. In the duration, the motor current and the mover velocity changed rapidly, extents changing were depended on load magnitude, winding resistance and magnet density reduced permanent magnet etc. The analysis for power fail interrupt duration was validated by the compares of simulation and experiment results of the current and velocity.

**Key words:** permanent magnet linear synchronous motor (PMLSM); lift system; power fail interrupt protection

分段初级永磁直线同步电机 (DPPMLSM) 驱动提升系统的新型模式应用到深井采掘及高层建筑中, 给垂直运输领域注入了新的活力. 驱动源电机具有永磁电机高效、节能、结构简单等特点, 系统具有无绳、直接驱动、速度不受限制等优异性能<sup>[1-3]</sup>. 在工业实际中, 供电系统瞬间停电是必然事件, 因此, 有必要对提升系统失电保护进行深入研究.

收稿日期: 2007-09-05 责任编辑: 许书阁

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60474043); 河南省高等学校创新人才培养工程 (200512623)

作者简介: 司纪凯 (1973—), 男, 河南扶沟人, 博士研究生, 讲师. Tel: 0391-3980039, E-mail: sijikai@hpu.edu.cn

在变频传动中，电机驱动提升系统制动分为：机械制动和电气制动两种。机械制动的动力来源于外部或负载本身<sup>[4]</sup>。外部提供的机械制动采用液（气）压泵站实施对提升系统抱闸；负载本身提供的制动在设计时常考虑采用防坠装置。前者需要增加提升系统的负载，引起无谓的功耗，且拖线运行；后者由于提升系统的轨道、轿箱等限制，利用防坠装置来制动负载很大的轿箱是不现实的，在 DPPMLSM 驱动提升系统的调试过程中，对于已设计的防坠装置措施感到力不从心，因此把目光转向电气制动。

在供电系统全部停电瞬间，PMLSM 的三相定子绕组短路，实现电气制动。对电机失电制动保护的过程进行深刻的分析和研究，进行制动特性计算，对校核电机的优化设计程序，变频器选型，控制方法选取和制动系统设计都有重要作用。文献 [5-7] 利用 PMLSM 相等效电路初步分析了双边分段式 PMLSM 提升系统失电过程中的稳态发电工况，推导出制动电磁力的解析式，但忽略其段间切换时电机的过渡过程。文献 [8] 中的长定子型 PMLSM 不具有段间切换特性，其分析动子 3 种初速度工况及电机绕组电阻对提升系统最后制动速度关系，然制动过程中的电流和速度没有描述，也未考虑漏阻抗效应。本文采用有限元法结合运动系统的能量解析式对 DPPMLSM 驱动提升系统失电过程进行分析，并对实验数据与解析仿真结果进行比较。

## 1 永磁直线同步电机提升系统模型

### 1.1 物理模型

整个系统由控制器、电机本体、轿箱等组成，其中电机分为定子（初级）、电枢绕组、动子（次级）。动子由永久磁铁、隔磁块及铁轭构成，结构为隐极式，电机初级均匀地布置在固定框架（提升罐道）上。DPPMLSM 驱动提升系统结构如图 1 所示，样机的电气参数：额定供电电压为 110 V，绕组电阻为 3 Ω，同步电感为 0.035 H，漏电感为 0.21 H，额定工作频率为 2 Hz，气隙为 5 mm。

### 1.2 有限元模型

由麦克斯韦方程可知，PMLSM 发电制动过程中的矢量磁位  $A$  的瞬态场方程为

$$\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} = -\mu J_m,$$

式中， $A$  为矢量磁位的  $z$  轴分量； $J_m$  为永磁体等效面电流密度； $\mu$  为磁导率。

对于均匀充磁、形状规则、线性退磁、磁化强度为  $M_0$  的钕铁硼，采用等效面电流法处理永磁体。 $J_m = M_0 / \mu_0$ ，本文采用三角形剖分网格，单元基函数为  $n$  次多项式，采用线性插值。利用伽辽金法对麦克斯韦场方程进行离散，则系统方程离散为

$$[S - C] \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix} + \frac{\partial}{\partial t} [T \quad 0] \begin{bmatrix} A \\ I \end{bmatrix} = G,$$

式中， $A$  为节点的未知矢量磁位； $I$  为流过绕组的电流； $S$ 、 $C$ 、 $T$  分别为系数矩阵； $G$  为与等效磁化电流密度对应的矩阵。

对于 DPPMLSM 的大气隙特性，电机的电阻与漏电抗是不容忽略的。由欧姆定律和法拉第电磁感应定律可知，初级三相绕组所产生的电动势和端电压之间的关系为

$$\frac{d}{dt} \psi + L_1 \frac{d}{dt} I + RI = U,$$

式中， $\psi$  为绕组磁链； $L_1$  为电机漏电感； $R$  为绕组电阻； $U$  为绕组端电压。

对于 PMLSM 采用麦克斯韦表面张力法求解电机的电磁力，可得到包括各种谐波分量的电磁力。则电机切向力为

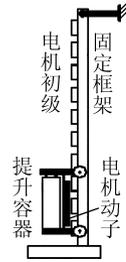


图 1 分段 PMLSM 提升系统结构

Fig. 1 Structure of the discontinuous primary PMLSM

$$F_{\text{thrust}} = \frac{L_1}{\mu_0} \int_0^{L_2} (-B_x B_y) dx,$$

式中,  $F_{\text{thrust}}$  为电磁推力;  $L_1$  为绕组有效导体长度;  $L_2$  为积分区间;  $B_x$  为气隙磁场  $x$  轴向磁密;  $B_y$  为气隙磁场  $y$  轴向磁密.

## 2 PMLSM 提升系统发电制动过程分析

从运动的角度分析, 可获得电机在发电制动过程中的速度曲线, 然而更应深层剖析电机的电流、电压及磁场的变化情况, 这样能对电机运行性能有一个整体把握, 制动性能校核电机优化设计程序; 进行制动特性计算, 对变频器选型以及控制方法和制动系统的设计都有重要的作用. 本文从电机运动态势与发电制动性能参数两方面进行分析.

### 2.1 减速上行阶段理论分析

减速上行阶段供电系统断电时, 提升系统从同步速度减小到零. PMLSM 断电后, 三相绕组瞬时短接, 绕组切割磁通, 产生电磁力制动力, 阻碍电机上行. 在正常上升工况下, 本试验提升系统最大载荷 1.5 t, 电机断电, 提升系统仍要上升很小距离.

在此过程中, 提升系统的动能转化为储存于系统内的位能和克服电磁力做功, 即

$$mv_u^2/2 = mgh_u + E_f + \Delta E,$$

式中,  $mv_u^2/2$  为提升系统动能;  $mgh_u$  为提升系统位能;  $E_f$  为电机铁耗及机械损耗;  $\Delta E$  为气隙磁场储能变化量.

$$mg - F_{\text{emu}} + f_u = ma_u,$$

式中,  $m$  为提升系统质量 (电机转子与轿箱质量和);  $g$  为重力加速度;  $F_{\text{emu}}$  为电机上行电磁力;  $f_u$  为上行摩擦力;  $a_u$  为提升系统上行加速度.

### 2.2 加速下行阶段理论分析

提升系统上行的速度为零, 系统转入下一阶段: 加速下行.

$$mg - F_{\text{emd}} - f_d = ma_d,$$

式中,  $F_{\text{emd}}$  为电机下行电磁力;  $f_d$  为下行摩擦力;  $a_d$  为提升系统下行加速度.

系统势能转化为电机铁耗和铜耗、磁场储能变化量及系统动能,  $mgh_u = mv_u^2/2 + E_f + \Delta E$ . 提升系统速度达一定时, 开始减速运行, 而后进入近似匀速运行状态.

### 2.3 匀速下行阶段理论分析

分段式 PMLSM 提升系统工作在匀速发电状态, 只是对于理想电机而言. 由于电机存在齿槽效应, 电机控制方式又为开环, 提升系统速度在一定范围内波动, 系统加速度很小, 工程中认为为零. 又因电机初级分段之特性, 在段间会出现速度的突变.

对于 PMLSM 的大气隙特性, 电机磁路线性, 磁性物质中的电磁能量可以忽略, 因此气隙磁场储存的电磁能量视为电机的磁场储能. 电机转子速度、位移、系统位能及电磁力等物理量都可以在有限元程序的后处理中获得, 因此有限元程序的后处理和上述解析公式的结合来分析 PMLSM 发电制动过程各个阶段的运动性能.

## 3 结果分析

### 3.1 试验系统

电压测量选用 STCV-400V 霍尔电压传感器, 电流测量采用 STCA-20A 霍尔电流传感器, 速度传感器为输出脉冲数为 2 000 个/r 的 E6B2-CWZ6C 型光电编码器, 编码器安装在转子上与滚轮相接触, 能测量转子位移, 位置传感器安装在初级上, 用于分段初级的开断, 利用已设计的数据采集与处理系统完成试验数据的获取. 试验系统原理如图 2 所示.

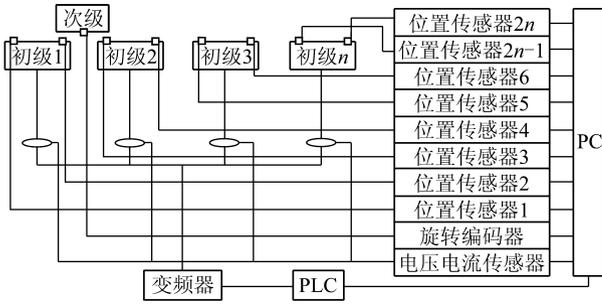


图 2 试验系统

Fig. 2 Experimental system

系统在失电后，所有初级绕组闭合，系统的势能转换成电能，即 PMLSM 处于发电制动状态。

图 3 (a) 为电机发电状态其中一台电机绕组 c 相的仿真电流 (后称测试电机)。动子下端部没有进入测试电机区域，因此绕组中电流为零；随着动子下端部逐渐进入测试电机区域，动子的永磁体形成的磁场与闭合绕组作用，产生感生电流，电流数值逐渐增加，速度变大；当动子完全与测试电机耦合，绕组中电流不发生改变，动子速度稳定；在动子下端部即将进入测试电机后一台电机时，电机发生扰动，动子速度增大，绕组中的电流变大，后恢复稳定状态；动子逐渐退出测试电机，两者间的耦合面积变小，绕组电流逐渐变小，动子的电磁力变小，系统重力没有发生变化，则提升系统速度逐渐增加。

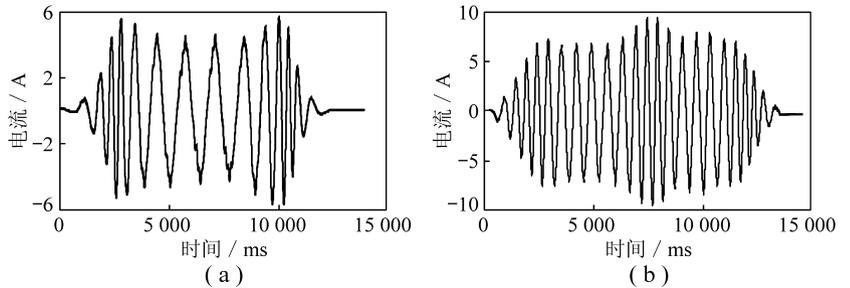


图 3 发电制动过程中 c 相绕组短接时流过的仿真电流 (a) 和试验电流 (b)

Fig. 3 c-phase simulation current and experiment current for motor closed windings after loss power

试验样机为 3 台电机并联运行，次级级数 36，初级级数 13，测试电机 c 相电流为 23 个周波，如图 3 (b) 所示。在动子刚进入测试电机与基本退出时，绕组电流幅值相当小，测试设备未能完全显示。在 5 ~ 6 电流周波前，绕组电流逐渐增加，速度增大；在动子与测试电机完全耦合后，电流幅值与周期基本不发生变化；在电机间切换时存在扰动，电机绕组电流幅值变大，周期减小，后进入稳定；动子逐渐退出测试电机区域时，电流幅值逐渐减小。由电流的变化情况可反应提升系统在失电过程中速度的变化情况。

图 4 为永磁体矫顽力 867 000 A/m、负载 1 500 kg 无外加电阻时系统失电后动子的仿真和实测速度。除动子进入、退出与绕组切换时，提升系统速度发生变化之外，动子速度保持在 0.10 m/s 附近，近似匀速下行。速度突变可达 0.28 m/s。在仿真过程中发现，负载越大，动子下降速度越大，在初级间切换时扰动越突出，当负载很大

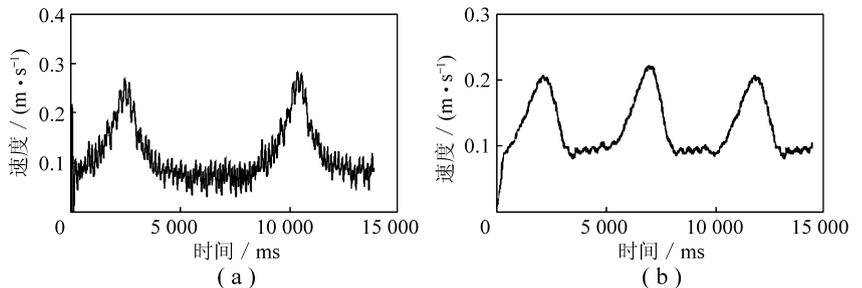


图 4 失电后电机动子的仿真速度和试验速度

Fig. 4 Mover simulation velocity and experiment velocity after loss power

### 3.2 仿真、试验结果及分析

由于提升系统长行程，整个罐道可以看作由多个短初级并联而成，此系统属于长初级短次级型。分段原则：次级长度应跟一台电机初级和两初级间隙之和相等，因此，在仿真模型的搭建过程中，动子的永磁体只取 17 极，初级 13 极，两初级间隙 4 极。

由于系统的质量为 1.5 t，提升速度为 0.312 m/s，在上升过程中系统失电，提升系统上行的距离很小，可不予考虑。提升系统

在失电后，所有初级绕组闭合，系统的势能转换成电能，即 PMLSM 处于发电制动状态。

时,如绕组没有外接电阻,可能损害电机绕组,制动效果不佳,因此设计提升系统时一定要考虑电机绕组和负载间的关系及对电机发电制动的影响.对于大气隙 PMLSM,电阻较同步电抗大,绕组电阻的大小对发电制动影响也很明显<sup>[9]</sup>.动子的实测速度也基本上稳定在 0.1 m/s 附近,但速度突变可达 0.23 m/s.图 4(a)中第 1 次速度突变是电机次级退出第 1 初级时加速、进入第 2 初级时减速的变化情况;第 2 次速度突变是电机次级退出第 2 初级、进入第 3 初级时的变化情况.而图 4(b)中有 3 次速度突变,是因实际动子长度为 36 极,仿真中动子 17 极,PMLSM 分段特性,在电机动子运行到初级段间切换过程中,出现系统速度突变.动子仿真速度图和实测速度图形基本吻合.

## 4 结 论

分段初级 PMLSM 驱动提升系统在没有机械制动与开环控制能够依赖初级绕组短接,PMLSM 动子的势能转换为电能,电机工作在发电制动状态.

(1) 失电下坠的提升系统稳定在 0.1 m/s 的速度附近下放(排除速度突变段).初级存在齿槽及次级永磁体与隔磁块磁导率不同等因素引起速度在 0.1 m/s 附近波动.

(2) PMLSM 具有大气隙特点,绕组电阻与主电感比值较大,这对电机的发电制动特性影响很大.

(3) 分段初级 PMLSM 处于发电制动时,动子的速度在段间的过渡过程中速度突变较大,对系统的发电制动稳态运行不利.

(4) 对于分段初级 PMLSM 的磁路不连续等结构特点,采用有限元法研究电机上升时的发电制动过程的几个阶段效果显著,可以考虑许多电路及磁路参数对失电保护的作用.

## 参考文献:

- [1] 汪旭东. 永磁直线电机统一解析理论及应用研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2002.  
Wang Xudong. Study on the unified analytical method-theory and its applications for PMLSM [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2002.
- [2] 上官璇峰. 分段初级永磁直线同步电机理论与试验研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2006.  
Shangguan Xuanfeng. Study on the theory and experiment of permanent magnet linear synchronous motor with segment-primary [D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2006.
- [3] Cruise Rupert J, Landy Charles F. Linear synchronous motor propelled hoists for mining applications [A]. Conference Record- IAS Annual Meeting [C]. San Diego: IEEE, Piscataway, NJ, USA, 1996: 2 514-2 519.
- [4] Bimal K Bose. 现代电力电子学与交流传动 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 201-202.  
Bimal K Bose. Modern power electronics and AC drivers [M]. Beijing: China Machine Press, 2005: 201-202.
- [5] 焦留成, 袁世鹰. 垂直运动永磁直线同步电动机运行特性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2002, 22 (4): 37-40.  
Jiao Liucheng, Yuan Shiyong. Study on operating characteristics of permanent magnet linear synchronous motor for vertical movement [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2002, 22 (4): 37-40.
- [6] 焦留成. 垂直运动永磁直线同步电动机电磁参数及特性研究 [D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 1998.  
Jiao Liucheng. Study on electromagnetic parameters and characteristics of permanent magnet linear synchronous motor for vertical movement [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 1998.
- [7] Mei T X, Goodall R M. Motor-generator control operation of a double sided linear motor [A]. Proceedings of the 1995 IEEE Conference on Control Applications [C]. Albany: IEEE, Piscataway, NJ, USA, 1995: 593-598.
- [8] Yamaguchi Hitoshi, Osawa Hiroshi, Watanabe Toshiharu, et al. Brake control characteristics of a linear synchronous motor for ropeless elevator [A]. Proceedings of the 1996 4th International Workshop on Advanced Motion Control, AMC '96. Part 2 [C]. Tsu, Jpn: IEEE, Piscataway, NJ, USA, 1996: 441-446.
- [9] Shangguan Xuanfeng, Li Qingfu, Yuan Shiyong. Analysis on characteristics of permanent magnet linear synchronous machines with large armature resistance and small reactance [A]. ICEMS 2005: Proceedings of the 8th International Conference on Electrical Machines and Systems [C]. Piscataway: IEEE Computer Society, 2005: 434-437.