

永磁同步曳引机变频调速系统的内模控制*

李明辉

(西继迅达电梯有限公司, 河南 许昌 461000)

摘要: 永磁同步曳引机是典型的非线性多变量强耦合系统, 在同步旋转坐标系下 dq 轴电流存在耦合, 传统的 PI 控制器无法实现解耦, 提出一种基于内模控制原理和空间矢量算法相结合的高性能永磁同步曳引机解耦控制方法, 用内模控制策略控制理想电机模型, 对定子电流交叉耦合电势动态解耦, 提高系统的动态响应性能, 同时在整个电流闭环过程中对参数摄动和外扰动具有良好的鲁棒性, 这种方法不需要额外的电机参数和检测硬件, 试验结果验证了这种方法有效可行。

关键词: 永磁同步曳引机; 内模控制; 解耦; 稳态误差; 观测器; 空间矢量脉宽调制

中图分类号: TM 341 **文献标志码:** A **文章编号:** 1673-6540(2017)07-0071-05

Internal Model Control of Permanent Magnet Synchronous Traction Machine Variable Frequency Drive System*

LI Minghui

(XJ Schindler Elevator Co., Ltd., Xuchang 461000, China)

Abstract: The permanent magnet synchronous traction machine was a typical nonlinear multi-variable coupled system, there was cross-coupling between dq currents in synchronous-frame, the dq currents could not be decoupled by the traditional PI, a combination of high performance permanent magnet synchronous traction machine control method based on the intima of the control principle and space vector algorithm decoupling was proposed, the internal model control (IMC) was used to control an ideal motor decoupled model, which was designed to dynamic decoupling of the stator current cross-coupling potential, the system dynamic response performance was improved, the robustness of parameter uncertainties and disturbances in the current loops was satisfied, extra motor parameters and hardwares were not necessary in this method, the experimental results showed the feasibility and effectiveness.

Key words: permanent magnet synchronous traction machine (PMSTM); internal model control (IMC); decoupling; steady-state error; observer; space vector puls width modulation (SVPWM)

0 引言

永磁同步曳引机 (Permanent Magnet Synchronous Traction Machine, PMSTM) 以其体积小、功率密度高、转矩/惯量比高等特点在电梯行业应用非常广泛。低速大转矩的应用特性决定了电梯 PMSTM 多采用凸极效应明显的外转子集中绕组结构。集中绕组 PMSTM 含有丰富的定子磁势谐波, 在同步旋转坐标系下定子电压中耦合电压和反电势对 dq 轴电流交叉耦合作用复杂。传

统同步 PI 控制依赖电机本体参数, 且忽略了 dq 轴电流交叉耦合, 实际工程中, 当其中一个轴上的电流改变时, 对另一轴上电流产生瞬时误差, 使转矩输出产生瞬时畸变, 影响系统动态性能。

内模控制 (Internal Model Control, IMC) 作为一种先进的控制技术, 其不过分依赖于被控对象的准确数学模型, 在 PI 解耦电流主控器的基础上, 构造电流环的内模状态方程, 利用 IMC 原理设计电流环观测器, 实现电流补偿控制, 对系统内部参数摄动及外部环境扰动具有自适应

* 基金项目: 国家质检总局公益性行业科研专项资助项目 (G2013709); 河南省博士后研发基地资助项目 (豫人社博管[2015]8号)

作者简介: 李明辉 (1970—), 男, 高级工程师, 研究方向为电梯驱动与控制。

性。系统跟踪性能好,鲁棒性强,控制器参数单一,结构和算法简单,调整方向明确,工程上易于实现。

1 PMSTM 的数学模型

不考虑 PMSTM 的制动系统,PMSTM 可简化为凸极效应明显的永磁同步电机 (Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM),在同步旋转坐标系下数学模型为

$$i_d' = -\frac{R}{L_d} i_d + \frac{\omega L_q}{L_d} i_q + \frac{U_d}{L_d} \quad (1)$$

$$i_q' = -\frac{R}{L_q} i_q - \frac{\omega L_d}{L_q} i_d - \frac{\omega \psi}{L_q} \quad (2)$$

式中: L_d 、 L_q ——直轴和交轴电感;

ψ ——转子磁钢产生的永磁磁链;

R ——定子绕组电阻;

ω ——转子电角速度;

i_d 、 i_q ——直轴和交轴电流;

u_d 、 u_q ——直轴和交轴电压。

由式(1)和式(2)可见,模型的准确度依赖于系统参数。对定子电流 i_d 、 i_q 表现为一阶时间滞后环节, d 轴和 q 轴电流分别对 q 轴和 d 轴方向产生耦合电动势。如果定子电流 i_d 、 i_q 完全解耦,由式(1)和式(2)可得

$$u_{d0} = u_d + \omega L_q i_q = R i_d + L_d i_d' \quad (3)$$

$$u_{q0} = u_q - \omega L_d i_d - \omega \psi = R i_q + L_q i_q' \quad (4)$$

式中: u_{d0} 、 u_{q0} ——电流解耦后的直轴和交轴电压。

2 基于 IMC 观测器的 PMSTM 控制设计

IMC 的原理是利用反馈滤波器来改善鲁棒性和对抗性,本质是一种鲁棒控制方法,是 PI 控制的扩展,等效于交叉解耦的 PI 控制。其原理如图 1 所示: $R(s)$ 为参考输入, $F(s)$ 为信号反馈, $E(s)$ 为 PI 控制器输出, $C(s)$ 为内模控制器, $G(s)$ 为系统传递函数, $G_m(s)$ 为内模, $d(s)$ 为扰动信号, $Y(s)$ 为输出。

根据图 1 可得

$$F(s) = \frac{R(s)C(s)[G(s) - G_m(s)] + d(s)}{1 + [G(s) - G_m(s)]C(s)} \quad (5)$$

$$Y(s) = [R(s) - F(s)]G(s)C(s) + d(s) \quad (6)$$

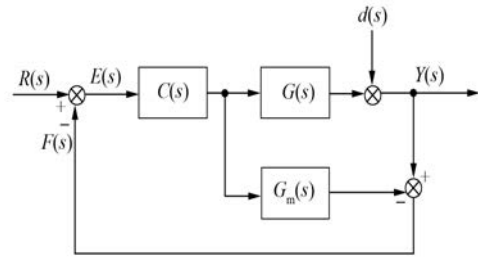


图 1 内模控制原理图

如果内模建模精确,与系统模型匹配,即 $G_m(s) = G(s)$,则由式(5)、式(6)可得

$$F(s) = d(s) \quad (7)$$

$$Y(s) = R(s)G(s)C(s) + d(s)[1 - G(s)C(s)] \quad (8)$$

由式(7)可知,系统反馈信号 $F(s)$ 就是扰动信号 $d(s)$;由式(8)可知,如果 $C(s)G(s) = 1$, $C(s) = 1/G(s)$,系统可对扰动信号进行完全补偿, $Y(s) = R(s)$,系统实现开环系统控制,输出信号可以直接跟踪输入信号。

按照上述 IMC 原理,将式(3)和式(4)拉普拉斯变换后得

$$U_{qf}(s) = R_s I_q(s) + sL_q I_q(s) + \omega_r L_d I_d(s) \quad (9)$$

$$U_d(s) = R_s I_d(s) + sL_d I_d(s) - \omega_r L_q I_q(s) \quad (10)$$

$$\text{令: } U(s) = \begin{bmatrix} U_{qf}(s) \\ U_d(s) \end{bmatrix}, I(s) = \begin{bmatrix} I_q(s) \\ I_d(s) \end{bmatrix}$$

可得

$$I(s) = D(s)U(s) \quad (11)$$

其中:

$$D(s) = \begin{bmatrix} R_s + sL_q & \omega_r L_d \\ -\omega_r L_q & R_s + sL_d \end{bmatrix}^{-1}$$

若使 $C(s) = D^{-1}(s)$,就构成 IMC,使得输出 $Y(s) = R(s)$,则输出电流可以直接跟踪指令电流。由于 $D(s)$ 表现为一阶系统,没有纯时延和右半平面的零点,所以系统是天然稳定的。为了优化控制器参数,增加一个低通滤波器,增强系统鲁棒性,定义:

$$C(s) = D^{-1}(s)L(s) \quad (12)$$

其中:

$$L(s) = \frac{\alpha I}{s + \alpha}$$

式中: α ——调制系数。

则所定义的 $C(s)$ 为

$$C(s) = D^{-1}(s)L(s) = \begin{bmatrix} R_s + sL_q & \omega_r L_d \\ -\omega_r L_q & R_s + sL_d \end{bmatrix} \frac{\alpha}{s + \alpha} \quad (13)$$

将内模结构模型等效为反馈控制模型,如图2所示。

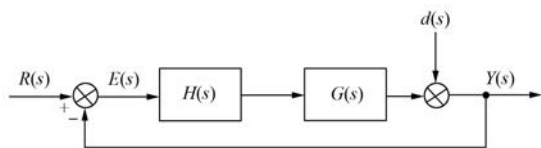


图2 等效反馈控制模型

其中: $H(s) =$

$$\left[I - \frac{\alpha}{s + \alpha} \right]^{-1} D^{-1}(s) \frac{\alpha}{s + \alpha} = \frac{\alpha}{s + \alpha} D^{-1}(s) = \alpha \begin{bmatrix} L_q \left(I + \frac{R_s}{sL_q} \right) & \frac{\omega_r L_d}{s} \\ -\frac{\omega_r L_q}{s} & L_d \left(1 + \frac{R_s}{sL_d} \right) \end{bmatrix} \quad (14)$$

可以看出 IMC 本质是 PI 控制的一个扩展,等效于交叉解耦的 PI 控制。从以上分析可以得到如图3所示的电流内模解耦控制器框图。

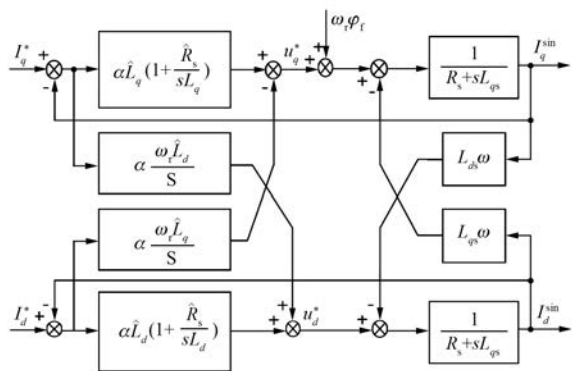


图3 电流内模解耦控制器

由图3可知,内模解耦控制调节参数只有 α , 算法简单,参数单一,在线调试方便,且系统没有超调,是天然稳定的。系统阶跃响应上升时间与参数 α 的关系为

$$t_r = \frac{\ln 9}{\alpha} \quad (15)$$

由式(15)可知,系统响应时间 t_r 与调节参数

α 成反比例,增大调节参数 α 将减小系统响应时间,加快系统响应速度,但是 α 不能无限增大,实际工程中系统响应时间受限于硬件的电气时间常数。

3 IMC 在 SVPWM 电流环控制中的应用

电梯 PMSTM 采用内环电流环和外环速度环的双闭环空间矢量脉宽调制 (Space Vector Pulse Width Modulation, SVPWM) 控制,系统由电流反馈,电流 Clarke、Park 与 Ipark 变换,SVPWM 发生器,速度反馈,速度控制,定子电流内模控制器等部分组成。控制系统框图如图4所示。系统采用绝对值编码器获得转子的位置和速度信息,把转子的反馈速度与指令速度相比较得到速度差值,对速度差值进行 PI 调节获得转矩电流分量的指令值 i_q^* ,由于磁场由永磁体产生,所以励磁电流分量指令值 $i_d^* = 0$,经过 Clarke 和 Park 变换得到的实际定子转矩和励磁电流分量 i_q, i_d 与指令值 i_q^*, i_d^* 比较,经过内模控制器交叉解耦到 dq 轴坐标系定子电压分量指令值 u_q^*, u_d^* ,再经过 Ipark 变换得到 $\alpha\beta$ 轴坐标系定子电压分量指令值 u_α^*, u_β^* ,由 SVPWM 发生器产生 IGBT 逆变器驱动控制信号,通过 IGBT 驱动 PMSTM 运行。

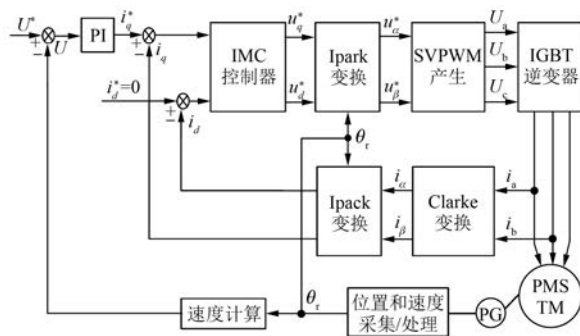


图4 带内模控制器的 SVPWM 控制系统图

4 试验平台的硬件和软件设计

4.1 硬件设计

试验平台硬件采用美国 TI 公司的 TMS320F2812 DSP 最小系统为核心算法处理器,德国 SEMIKRON 的 SKD75 为三相整流电路,日本三菱公司的 PM75RLA120 IPM 为三相电压源逆

变器,以瑞士 LA 霍尔电量传感器和德国海德汉公司 ERN1387 sin/cos 编码器为反馈传感器,组成 PMSTM 变频调速驱动控制平台,如图 5 所示。

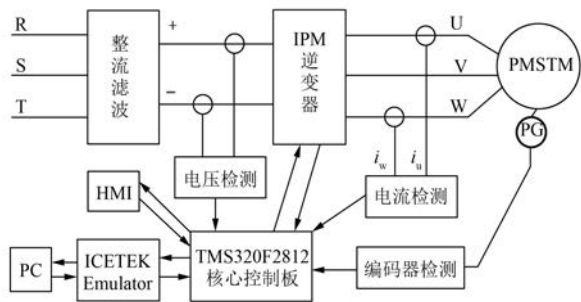


图 5 试验系统组成框图

霍尔电流传感器将 A、B 相电流隔离转换成电压信号,经过运放电路输入到 DSP 的 A/D 模块进行采样计算、内模控制器交叉解耦等处理得到

反馈电流分量,与 sin/cos 编码器 C、D 采集的转子角度位置信息一起参与电流环的调节运算, sin/cos 编码器 A、B 经过比较电路获取正交信号,输入到 DSP 的正交编码脉冲电路(QEP),通过检测脉冲的边沿信号 4 倍频后给 DSP 内部计数器,计算出转子反馈速度,参与速度环的调节运算。

4.2 软件设计

系统软件设计主要有主程序、中断程序和子程序三部分组成。主程序主要完成 DSP 内部控制寄存器的初始化,系统上电自检,函数初始化,参数的设定、标幺,中断处理,HMI 调用等,如图 6 (a)所示。考虑到 PMSTM 控制的实时性和快速响应,把电流、电压、编码器的信号采集,控制算法以及 SVPWM 波的产生,功率器件保护等放在定时中断程序里,如图 6(b)所示。将通信、人机交互、算法单元等编译成子程序供调用。

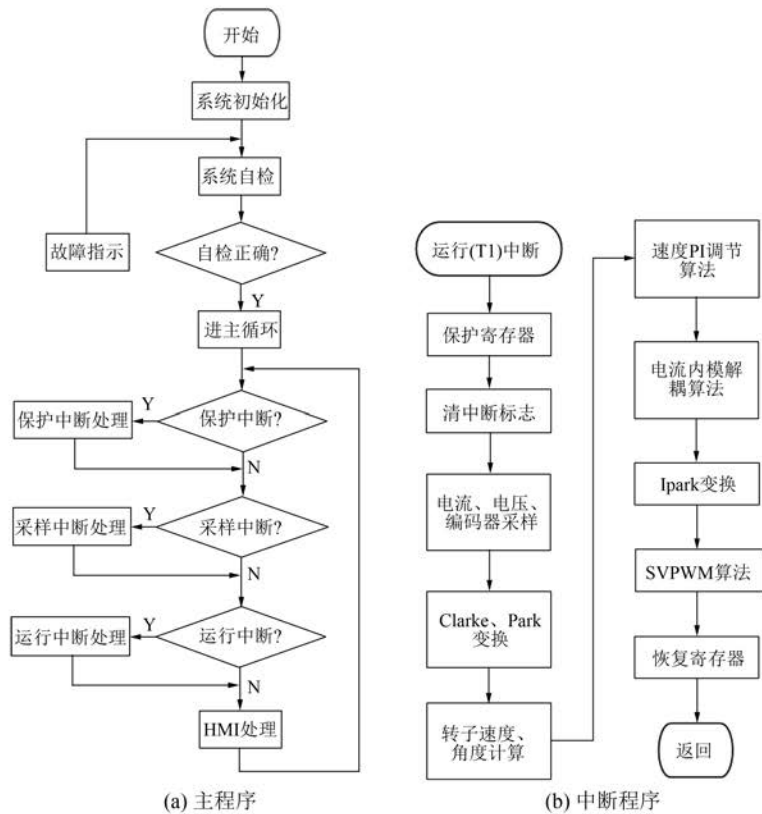


图 6 曳引机控制程序流程图

5 试验及结果分析

试验平台中选用的 PMSTM 额定转速为 180 r/min,额定功率 11.7 kW,额定电流 24 A,额

定转矩 670 N·m,磁极数 24 极,定子相电阻 0.345 Ω,电感 14.2 mH,电流环采样频率选取 16 kHz,速度环采样频率选取 160 Hz,采用内模交叉解耦控制和 PI 控制对比,每个采样周期在

TMS320F2812 的缓冲区中记录速度、电流的指令值和反馈值,利用 DLOG4CH 四通道软件记录模块,通过 XDS510 仿真器将记录数据发送到 CCS 仿真软件,利用软件的 Graph 功能实时记录、比较指令值和反馈值之间的误差。通过 HMI 的 SCI 串行通信接口将采样数据传送到 PC 中,运用 MATLAB 进行存储、处理分析、比较显示。

试验中,初始角速度给定为 20π rad/s,在 $t = 0.08$ s 时刻角速度给定由 20π rad/s 升为 40π rad/s,在 $t = 0.57$ s 时刻角速度给定从 40π rad/s 降到 20π rad/s,每间隔 6.25 ms 获取一组 PMSTM 角速度 ω 、电流 i_q 、电流 i_d 、A 相电流 i_A 试验数据,将试验数据绘制成时域曲线。图 7 和图 8 分别为 IMC 交叉解耦控制和传统 PI 控制所得到的角速度 ω 、电流 i_q 、电流 i_d 、A 相电流 i_A 的时域曲线图。两种控制方式所得到的角速度 ω 的响应时间基本相同,IMC 所得到的角速度 ω 的稳态误差为 PI 控制的 40%, i_q 和 i_d 电流纹波值为 PI 控制的 50%,对电流环实现了更好的补偿控制。

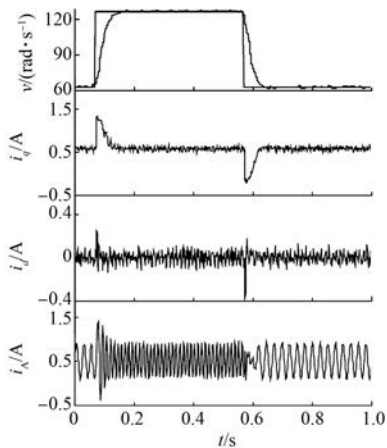


图 7 IMC 控制得到的 ω 、 i_q 、 i_d 和 i_A

通过对角速度 ω 分别为 10π 、 20π 、 30π 、 40π 、 50π rad/s 时,IMC 和 PI 控制方式试验所得数据统计分析,得出两种控制方式的主要参数对比,如表 1 所示。可见,在 IMC 控制方式下的角速度稳态误差小于 PI 控制方式下的角速度稳态误差,而且,随着角速度越大稳态误差越小;IMC 控制方式下的 i_q 和 i_d 电流纹波值小于 PI 控制方式下的 i_q 和 i_d 电流纹波值,而且,随着角速度越大电流纹波值越小。

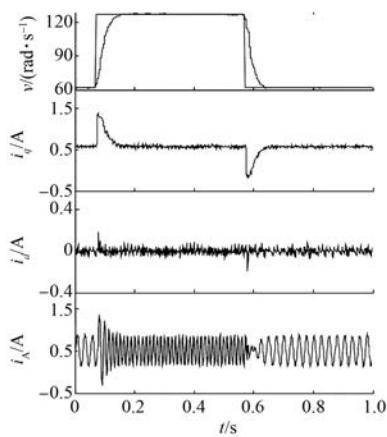


图 8 PI 控制得到的 ω 、 i_q 、 i_d 和 i_A

表 1 IMC 和 PI 控制方式的试验结果

$\omega/(rad \cdot s^{-1})$	对比参数	IMC 控制	PI 控制
10π	ω 稳态误差	± 0.83	± 1.56
	i_q 纹波 (mV)	225.7	276.2
	i_d 纹波 (mV)	239.3	283.6
20π	ω 稳态误差	± 0.71	± 1.35
	i_q 纹波 (mV)	208.2	254.5
	i_d 纹波 (mV)	226.5	250.4
30π	ω 稳态误差	± 0.63	± 1.14
	i_q 纹波 (mV)	190.8	232.7
	i_d 纹波 (mV)	210.7	238.3
40π	ω 稳态误差	± 0.51	± 0.82
	i_q 纹波 (mV)	173.2	216.2
	i_d 纹波 (mV)	198.5	224.7
50π	ω 稳态误差	± 0.39	± 0.53
	i_q 纹波 (mV)	150.2	192.4
	i_d 纹波 (mV)	183.6	201.3

6 结 语

本文针对电梯 PMSTM 多变量强耦合系统,受参数摄动和外扰动影响问题,利用 IMC 原理,构造电压和电流的内模方程,提出了一种基于内模控制原理和空间矢量算法相结合的交叉解耦控制方法。该方法系统响应快,鲁棒性好,在动态和稳态下都能达到很高的控制精度,控制算法易于用 DSP 实现,适用于转子磁场定向的 SVPWM 矢量控制。经过基于 TMS320F2812 试验平台的工程实际验证,各项指标满足电梯 PMSTM 控制要求。

(下转第 97 页)