

离散 smith 预估器在永磁同步电机电流环中的应用

范仁凯

(南京埃斯顿自动化股份有限公司, 江苏南京邮编 211106)

Application of Discrete Smith Predictor in PMSM Current Loop

Fan Renkai

(Nanjing Estun Automation co.,ltd, Jiangsu Nanjing 211100)

摘 要: 在永磁同步电机数字控制系统中, 控制算法离散化、反馈回路采样、功率放大器等均存在纯延时, 这些延时会使系统响应产生超调, 降低了控制环路的阻尼并缩小了稳定裕度。本文针对永磁同步电机电流环中存在的整数倍及非整数倍延时, 提出使用离散 smith 预估器进行预测补偿。该 smith 预估器能准确地对整数倍及非整数倍延时进行补偿, 从而使数字化永磁同步电机电流环的电流响应与理论连续系统相接近。实验证明, 该方法对参数变化具有较好的鲁棒性且能满足电流环较高带宽的要求。

关键词: 永磁同步电机, 电流环, 离散 smith 预估器, 纯延时

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Abstract: In PMSM digital control system, pure delay of discretization, feedback sample, power amplifier, etc. can cause overshoot and decrease system's damping and stable margin. This paper proposes discrete smith predictor to compensate delay either integer or non-integer multiples of sample period in PMSM control system. Using this method, PMSM digital current loop can get similar responses of an analog system. Experiments prove that, the proposed method is robust to system parameters and can satisfy high bandwidth requirement.

Keywords: PMSM Current loop, Discrete smith predictor, Pure delay

0 引言

在现代高精度交流伺服产品中, 永磁同步电机的控制均是基于固定采样周期的数字化控制。区别于传统模拟控制系统, 数字控制系统中存在离散延时, 延时大小与采样周期有关。同时, 由于该控制器中电流采样电路和功率开关电路不可避免地存在延时, 这些延时综合在一起会使电流响应产生较大的超调, 从而降低了电流环的阻尼和稳定裕度^[1]。

早在 1957 年, 瑞典科学家就提出使用 smith 预估器来解决闭环控制中存在的纯延时问题。时至今日, smith 预估器依然被国内外众多科研人员所研究^[2]。smith 预估器最大的问题是需要已知被控对象精确的数学模型^[2], 而多数应用场合被控对象的数学模型又很难精确建立。因此, 文献[3]~[8]提出了一系列改进 smith 预估器的方法, 以减小其对被控对象数学模型的依赖, 从而增加控制系统的鲁棒性。但是, 这些方法很难从根本上解决问题, 反而增加了系统的复杂程度, 难于工程实现。得益于永磁同步电机设计理论、矢量控制理论、仿真技术及高精度测量仪器的发展, 精确测量并建立永磁同步电机电流环模型并不是一件难事, 这为 smith 预估器的实现创造了先天条件。因此, 本文采用 smith 预估器来补偿永磁同步电机电流环中存在的纯延时。

Smith 预估器理论上可以完美补偿延时对电流跟踪产生的影响^[2], 但实际上 smith 预估器的效果还与永磁同步电机参数测量精度、离散化方法、电流环最大带宽等因素有关。电机参数测量不准确会使 smith 预估器的延时补偿产生偏差, 从而影响 smith 预估器的效果; 使用传统的 z 变换^[10]直接对 smith 预估器进行离散化会使电流跟踪存在稳态误差, 从而影响电流跟踪性能; 使用 smith 预估器时, 电流环带宽设置太宽会影响电流环的稳定性, 从而限制了电流环的性能。本文针对 smith 预估器特有的结构使用改进的离散化方法, 使电流跟踪不存在稳态误差且能将整数倍及非整数倍延时离散化^[11], 实验证明该方法对电机参数变化具

有较好鲁棒性，且电流环实测带宽可以达到 1.75kHz。

1 永磁同步电机电流环

通常，高精度永磁同步电机的电流环均是基于矢量控制，这样可使电机的转矩电流 i_q 和磁场电流 i_d 分开控制，从而可以实现类似于他励直流电机的解耦控制效果。本文在永磁同步电机的 d、q 轴电流环分别使用 PI 调节器，采用零极点对消的方法分别将 d、q 轴电流环配置成一阶惯性系统^[9]，图 1 为理想情况下 q 轴电流控制环路。

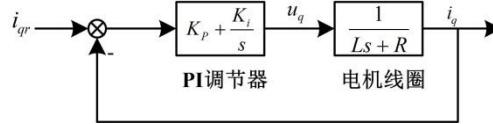


图 1 理想永磁同步电机电流环

Fig.1 Ideal PMSM current loop diagram

此时，电流环开环传递函数为

$$G_1(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \frac{1}{Ls + R}$$

其中， L 为电机线圈电感， R 为电机线圈电阻， K_p 为电流调节器的比例系数， K_i 为电流调节器的积分系数。

但是电流调节器的物理实现是离散数字系统，且存在电流采样延时、逆变器延时等纯延时环节，如图 2 所示。

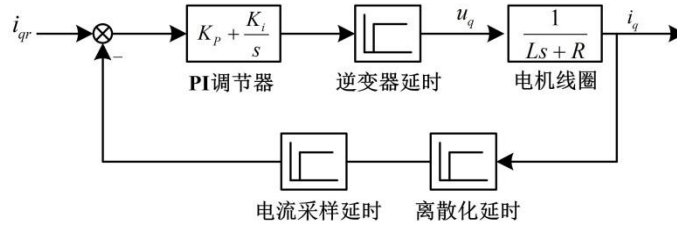


图 2 考虑延时后永磁同步电机电流环

Fig.2 PMSM current loop diagram with delay

图中，电流环开环传递函数为

$$G_2(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \frac{1}{Ls + R} e^{-\tau s}$$

其中， τ 为电流环总延时。

考虑电流环延时后，电流环的响应将发生较大变化，如图 3 所示。图中，连续系统的阶跃响应为理想一阶系统的阶跃响应，其上升时间与所设计的 PI 参数有关；而离散延时系统，则存在明显的滞后和超调，阻尼和稳定裕度偏小。

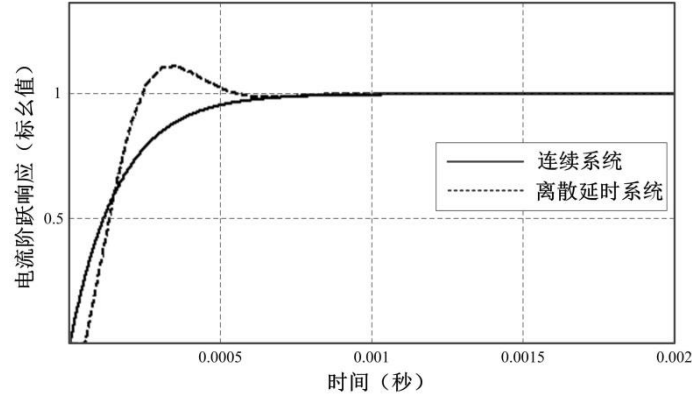


图3 连续系统和离散延时系统的电流阶跃响应
Fig.3 Step response of continues and discrete current loop

2 Smith 预估器原理与实现

在连续系统中实现 smith 预估器较为简单,如图 4 所示。图中,电流环开环传递函数为

$$G_3(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \left[\frac{1}{Ls + R} e^{-\tau s} + \frac{1}{L's + R'} - \frac{1}{L's + R'} e^{-\tau's} \right]$$

其中, L' 为电感测量值、 R' 为电阻测量值、 τ' 为延时测量值。如果测量参数与实际参数相等,则

$$G_3(s) = \frac{K_p s + K_i}{s} \frac{1}{Ls + R}$$

即与 $G_1(s)$ 相等。可见,加入 smith 预估器后,用于电流环计算的电流反馈 i'_q 已完全不受延时的影响,但是电机的实际电流反馈 i_q 依然存在一定的延时。不过研究证明:即便如此,smith 预估器依然能有效地改善被控对象的性能^[2]。

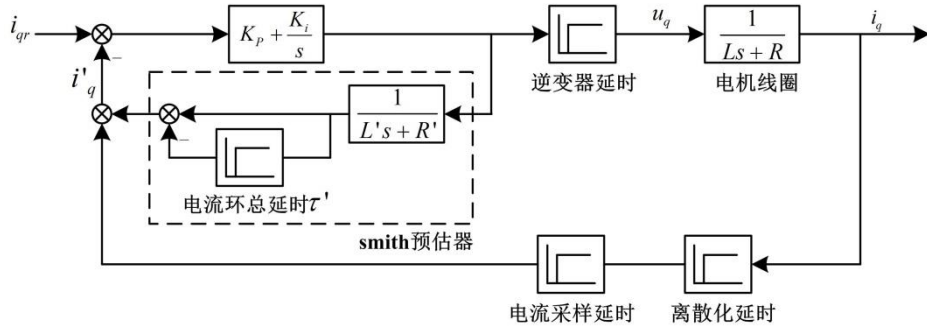


图4 Smith 预估器结构图
Fig.4 Smith predictor structure diagram

图中, smith 预估器的传递函数为

$$G_s(s) = \frac{1}{L's + R'} (1 - e^{-\tau's})$$

在 smith 预估器中加入一个零阶保持器,并进行 z 变换

$$G_s(z) = \mathcal{Z} \left(\frac{1 - e^{-T_s s}}{s} G_s(s) \right)$$

离散化之前,需要将总延时 τ' 分为整数倍数 n (相对于采样周期) 和非整数部分 m , 即 $\tau' = nT_s - m$ 。其中, T_s 为离散周期, $n \geq 1$, $0 \leq m < T_s$ 。例如,总延时为 120us,离散周期为 100us,则整数倍数为 2,非整数部分为 80us。

记 $a = \frac{R'}{L'}$, 则

$$\begin{aligned} G_s(z) &= \frac{z-1}{z} \mathcal{Z} \left(\frac{G_s(s)}{s} \right) \\ &= \frac{1}{R'} \frac{z-1}{z} \mathcal{Z} \left(\frac{a}{s(s+a)} - e^{-(nT_s-m)s} \cdot \frac{a}{s(s+a)} \right) \\ &= \frac{1}{R'} \frac{z-1}{z} \left(\frac{(1-e^{-aT_s})z}{(z-1)(z-e^{-aT_s})} - z^{-n} \mathcal{Z} \left(\frac{e^{ms}}{s} - \frac{e^{ms}}{s+a} \right) \right) \end{aligned}$$

其中

$$\begin{aligned} \mathcal{Z} \left(\frac{e^{ms}}{s} \right) &= \mathcal{Z} \left(\frac{1}{s} \right) = \frac{z}{z-1} \\ \mathcal{Z} \left(\frac{e^{ms}}{s+a} \right) &= \frac{ze^{-ma}}{z-e^{-aT_s}} \end{aligned}$$

整理得

$$G_s(z) = \frac{(1-e^{-aT_s})z^{-1} - (1-e^{-am})z^{-n} + (e^{-aT_s} - e^{-am})z^{-n-1}}{R' - R'e^{-aT_s}z^{-1}}$$

3 实验验证

实验所用永磁同步电机和控制器的主要参数如下

表 3 永磁同步电机和控制器参数
Tab.1 PMSM and controller parameters

参数名	符号	数值
电感	L	3.03mH
电阻	R	0.57Ω
总延时	τ	70us
离散周期	T_s	50us
开关频率	f_s	20kHz
死区时间	T_d	2us

实验中, 使用信号发生器可测出电流采样信号链的延时, 再加上一个离散周期的延时, 即可算出电流采样回路总延时。将以上电感、电阻、延时及离散周期带入离散 smith 预估器, 并进行电流阶跃响应测试。为测试离散 smith 预估器的效果, 现将永磁同步电机转子固定, 给定额定 q 轴电流以测量电流环阶跃响应, 如图 5 所示。图中显示, 使用离散 smith 预估器后电流跟踪效果没有超调, 响应过程与一阶系统接近, 与设计意图一致。

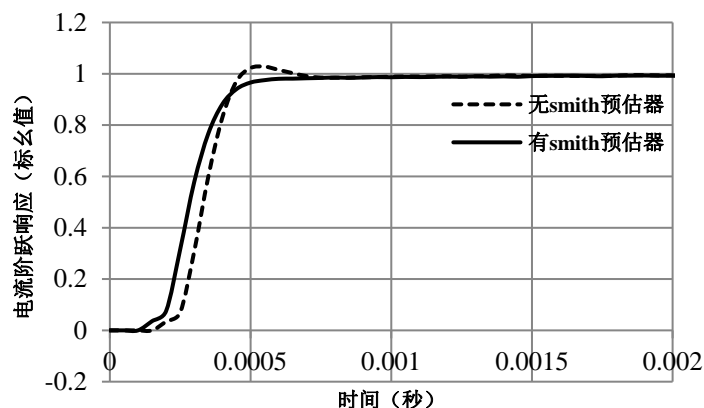


图 5 加入离散 smith 预估器后电流跟踪效果

Fig.5 Step response of current loop w/o discrete smith predictor

在实际使用过程中,永磁同步电机的参数测量难免存在着一定的误差,且电机运行时电感、电阻参数也会受温度、过载等因素的影响。因此,测试离散 smith 预估器对参数变化的鲁棒性也十分必要。如图 6 所示为离散 smith 预估器使用不同延时参数时的效果对比图,此时电感、电阻使用表 3 中的标准值,延时分别使用 0.8τ 、 τ 和 1.2τ (τ 为表 3 中的标准值)。图中显示,如果延时参数发生变化,则电流响应会发生较小的变化,但不至于对电流跟踪性能产生很大的影响。

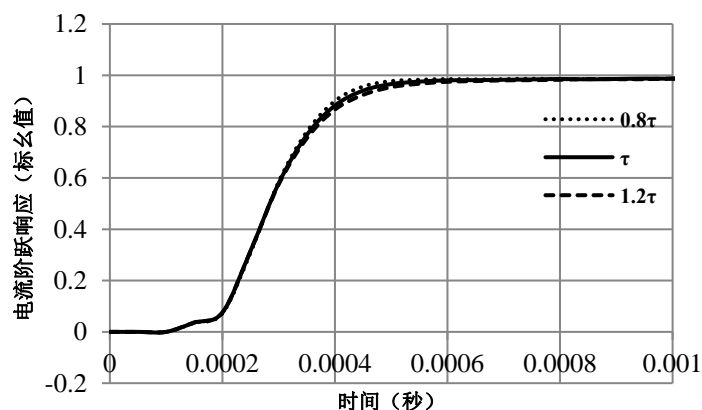


图 6 延时参数对离散 smith 预估器的影响

Fig.6 Step response variation when delay drifts

使用同样的方法,还测试了电感、电阻参数变化对离散 smith 预估器性能的影响,如图 7 和图 8 所示。图中显示,电感变化会对电流跟踪产生影响,但同样影响较小;而电阻变化则几乎不产生影响。

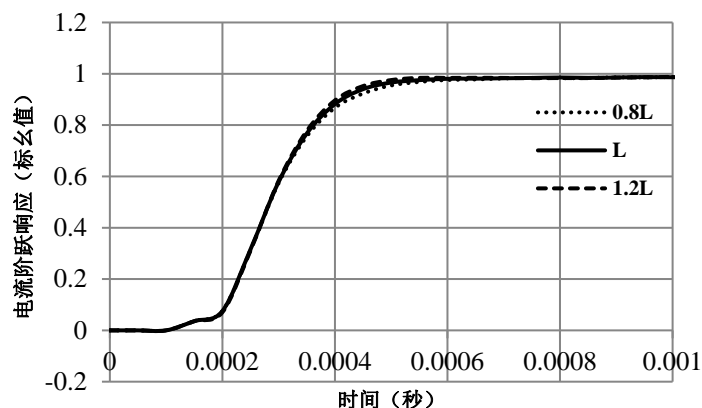


图 7 电感参数对离散 smith 预估器的影响
Fig.7 Step response variation when inductance drifts

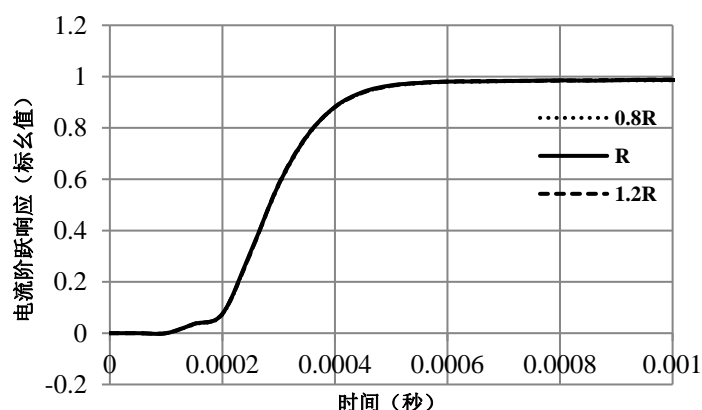


图 8 电阻参数对离散 smith 预估器的影响
Fig.8 Step response variation when resistance drifts

使用离散 smith 预估器后,从图 5~图 8 中均可以测出电流上升时间约为 0.2ms,根据一阶系统带宽和上升时间的近似对应关系^[10]可计算出电流环带宽高达 1.75kHz。

4 结论

本文针对永磁同步电机电流控制环路中存在延时的特点,使用 smith 预估器进行延时补偿。文中在传统连续 smith 预估器的基础上,使用改进的离散化方法以利于工程化实现的同时保证了 smith 预估器的性能。实验证明,文中所述的离散 smith 预估器能很好地抑制永磁同步电机电流控制环路中延时带来的不良影响,且对电机参数变化具有较好的鲁棒性,同时又不影响电流环的高带宽表现。

参考文献

- [1] Seung-Ki Sul, 电机传动系统控制[M]. 机械工业出版社, 2013.
- [2] 郭庆鼎, 孙宜标, 王丽梅. 现代永磁电动机交流伺服系统[M]. 中国电力出版社, 2006.
- [3] J.E. Normey-Rico, E.F. Camacho, Smith predictor and modifications: a comparative study[J]. European Control Conference, 1999: 2257-2262.
- [4] 王华培, 魏彤, 李海涛. 基于改进 Smith 预估器的无刷直流电机电流环控制方法研究[J]. 微电机, 2012, 45(3): 47~50, 65.
- [5] Liu T, Cai Y Z, Gu D Y, et al. New modified smith predictor scheme for integrating and unstable processes with time delay[J]. IEE Pro-Control Theory Appl, 2005, 152(2): 238-246.

- [6] VERONESI M. Performance improvement of Smith predictor through automatic computation of dead time[J]. Yokogawa Technical Reprot, 2003, 35:25-30.
- [7] Matausek,M.R.A.D. Micic.On the modified smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time[J]. IEEE Transactions on automatic control, 1996, 41(8):1199-1203.
- [8] KJ Astrom, CC Hang, BC Lim. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time[J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1994, 39(2):343-345.
- [9] 陈伯时主编.电力拖动自动控制系统——运动控制系统[M]. 机械工业出版社, 2003.
- [10] 胡寿松主编, 自动控制原理——第四版[M]. 科学出版社, 2001.
- [11] Gene F. Franklin, J. David Powell, Michael Workman. Digital Control of Dynamic Systems(Third Edition)[M]. Addison Wesley Longman, 1998.

第一作者范仁凯, 1988 年生, 男, 江苏盐城, 软件工程师, 南京埃斯顿自动化股份有限公司, 主要从事伺服控制方面的研究, fanrenkai@estun.com。