

基于单步模型算法的 PMSM 控制策略^①

孙旭霞, 姚梦钰, 王琼芳

(西安理工大学 自动化与信息学院, 西安 710048)

摘要: 分析了永磁同步电机(PMSM)矢量控制系统的工作原理, 针对传统 PI 控制器调节时间长、对电机参数依赖度高的缺点, 采用了单步模型算法控制策略. 设计了基于单步模型算法的永磁同步电机矢量控制系统, 并进行了仿真分析. 仿真结果表明, 单步模型算法控制策略具有不过分依赖电机数学模型、能较好地抑制各种不确定性干扰等优点, 系统在动态过程中有较小的超调, 且对于负载扰动具有较强的鲁棒性.

关键词: 永磁同步电机; 预测控制; 单步模型算法; 矢量控制; 转速调节

Strategy of PMSM Based on the Single Step Model Algorithm

SUN Xu-Xia, YAO Meng-Yu, WANG Qiong-Fang

(Faculty of Automation and Information Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The working principle of permanent magnet synchronous motor (PMSM) vector control system is analyzed. For the disadvantages of traditional PI regulator, like the long regulation time and high degree of dependence on motor parameters, a strategy of single step model algorithm is used. A PMSM vector control system based on single step model algorithm is designed, and the system is simulated and analyzed. The simulation results demonstrate that the single step model algorithm control has advantages of low dependence of motor mathematical model, less influenced by uncertainties. In the dynamic process, the system has a better rapidity of dynamic response and a smaller overshoot, and has strong robustness to load disturbance.

Key words: permanent magnet synchronous motor; predictive control; single step model algorithmic control; vector control; speed regulation

永磁同步电机(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)采用高性能永磁体作为转子,具有低惯性、快响应、高功率密度、低损耗、高效率等优点^[1], 在交流调速领域得到了广泛的应用^[2].

对于传统的永磁同步电机交流调速系统, 速度控制器普遍使用 PI 控制技术, 传统 PI 控制器设计简单, 并在参数匹配的条件下可以获得良好的控制性能, 但是存在以下问题: ①控制系统依赖精确的电机数学模型; ②控制性能易受参数变化和不确定因素的影响, 导致控制品质下降. 因此, 寻找一种算法简单、有较高的动态性能且能抑制参数变化、扰动及各种不确定性干扰的新型控制策略成为必然. 模型算法控制(MAC-Model Algorithmic Control)正是应此要求而被

提出的一种新型计算机控制算法^[3,4]. 模型算法控制是 1978 年由 Richalet 等人提出的一种以对象脉冲响应为基础的非参数模型预测控制算法. 该算法具有能够在实时预测、优化、反馈校正的优点, 且对模型的要求低、鲁棒性强, 能克服系统中存在的不确定性. 文献[3]将模型预测控制算法应用于交流电机中, 采用一阶 ARMA 模型为预测控制的参数模型, 用于位置伺服系统控制, 该算法整定参数较少, 可以满足电动机的实时性要求. 文献[4]提出了一种基于预测算法的永磁同步发电机无传感器控制方案, 对反电势进行串联补偿, 实现了定子电流的无静差跟踪. 该控制方案控制精度较高, 稳态性能较好, 但转矩动态响应慢. 文献[6]采用模型预测控制的交流电机电流控制器代替传统 PI 控

^① 收稿时间:2014-09-01;收到修改稿时间:2014-10-24

制器,取得了优于 PI 控制的效果,并对参数变化具有较强的鲁棒性,但该方法目前只应用于异步电机矢量控制系统中。

传统 MAC 是以系统的输入作为控制量,本质上仍为比例控制,若对控制量有约束时,即使采用闭环预测也将导致静差,同时,在模型算法控制中,预测模型的好坏将直接影响到算法的实时性:模型过于复杂,不利于在线计算;模型过于简单则没有充分利用已知信息,起不到预测模型的作用。针对以上问题,本文将模型算法控制进行了简化与改进,设计了 PMSM 矢量控制系统,并在此基础上提出了基于单步模型算法的转速控制方案。该控制方案算法简单易行,整定参数较少,有效克服了传统算法卷积运算量大的缺点,能够很好的满足系统对于实时性的要求,同时获得了优于 PI 控制器的控制效果。仿真结果验证了所提算法的正确性和有效性。

1 PMSM的数学模型

永磁同步电机在转子磁场定向的同步旋转 d, q 坐标系下的数学模型可以表示如下:

定子电压方程为:

$$u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_r \psi_q \tag{1}$$

$$u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_r \psi_d \tag{2}$$

定子磁链方程为:

$$\psi_d = L_d i_d + \psi_f \tag{3}$$

$$\psi_q = L_q i_q \tag{4}$$

电磁转矩方程为:

$$T_e = 3n_p [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] / 2 \tag{5}$$

电机的运动方程为:

$$\frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} = (T_e - T_L - B\omega_r) \tag{6}$$

式中, R_s 为 PMSM 定子电阻; L_d, L_q 为 d, q 坐标系直轴和交轴电感; $u_d, u_q, i_d, i_q, \psi_d, \psi_q$ 分别为直轴和交轴电压, 电流和磁链; ψ_f 为转子永磁体磁链; n_p, J 分别为 PMSM 极对数和转动惯量; T_e, T_L 为电磁转矩和负载转矩; ω_r 为电机电角速度。

通过电机的数学模型可知永磁同步电机的动态过程由式(5)与式(6)确定,电机动态特性的调节和控制完全取决于动态过程中能否简单而精确地确定电磁转

矩,而电磁转矩则取决于交轴电流 i_d 和直轴电流 i_q , 因此,对转矩的控制最终可以转化为对交轴电流和直轴电流的控制。

2 单步模型算法控制

模型算法控制可以分为单步模型算法控制、多步模型算法控制、增量型模型算法控制等,而这类控制算法由预测模型、反馈校正、滚动优化、参考轨迹等几部分组成。单步模型算法采用存放在计算机内存中的模型作为内部模型,经过模型输出误差进行反馈校正,再与参考轨迹进行比较,进行滚动优化,最后计算当前时刻应加于系统的控制动作,从而完成循环过程。其原理框图如图 1 所示。对于被控过程的每一个输出只选择其未来某一时刻的预测值来计算最优控制律,其控制步数只取一步。在控制过程中选择未来某一时刻的一个预测值来计算 k 时刻的一步控制量,而 $k+1$ 时刻及其以后的控制量维持不变。

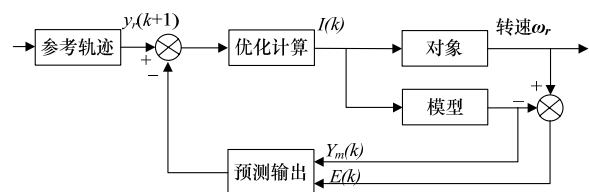


图 1 模型算法控制原理框图

单值预测控制使控制系统的分析和设计大为简化,计算时间也大为缩短,而且避免了传统 PI 控制器过于依赖整定参数的缺点。本文利用单步模型算法控制的在线实时预测、滚动优化和反馈校正的优点,采用 PMSM 的二阶 ARMA 模型为预测控制的参数模型,克服了 MAC 在线计算量大的缺点。

3 PMSM的单步模型算法控制系统

常用的 PMSM 矢量控制方法有 $i_d=0$ 控制、最大转矩电流比控制、弱磁控制等。其中 $i_d=0$ 控制简单常用,直轴电流为零,电机电流为产生电磁转矩的交轴电流,电流控制效率高;最大转矩电流比控制是使电动机输出给定转矩时,控制定子电流最小的电流控制方法,此方法的不足在于输出转矩的增大会导致功率因数快速下降。本文选用凸极式永磁同步电机,转子磁路对称,即 $L_d=L_q$,磁阻矩为零,电磁转矩仅由励磁转矩构成, $i_d=0$ 控制就是最大转矩控制。所以本文采用 $i_d=0$ 的矢量控制方法,该方法不但简单易行,而且

能获得较宽的调速范围。

3.1 预测模型

本文采用 $i_d=0$ 的矢量控制, d 轴磁链 ψ_d 被确定为常数, 同时电磁转矩 T_e 正比于 q 轴电流, 即:

$$T_e = \frac{3}{2} P_n \psi_d i_q \quad (7)$$

对式(6)所示的 PMSM 运动方程, 令 $T_L=0$, 得:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = (T_e - B\omega_r)/J \quad (8)$$

式中, B 为粘滞摩擦系数。

对式(8)取拉普拉斯变换, 得到的传递函数为:

$$G(s) = \frac{1}{Js + B} \quad (9)$$

经零阶采样保持后, 可得永磁同步电机数学模型的离散化 Z 传递函数:

$$G(z) = z \left[\frac{1 - e^{-Ts}}{s} \cdot \frac{k_r}{Js + B} \right] = \frac{bz^{-1}}{1 + az^{-1}} \quad (10)$$

其中, $a = -e^{-TB/J}$, $b = \frac{3}{2} p_n \psi_d (1 - e^{-TB/J}) / B$, T 为采样周期。

由式(10)可得差分方程为:

$$\omega_r(k) = -a\omega_r(k-1) + bi_q(k-1) \quad (11)$$

$$\omega_r(k+1) = -a\omega_r(k) + bi_q(k) \quad (12)$$

上式经整理可得 PMSM 转速预测模型的离散表达式:

$$\omega_r(k+1) = (1-a)\omega_r(k) + a\omega_r(k-1) + b\Delta i_q(k) \quad (13)$$

由此得 $(k+1)T$ 时刻 PMSM 转速预测模型为:

$$\omega_{r,m}(k+1) = (1-a)\omega_r(k) + a\omega_r(k-1) + b\Delta i_q(k) \quad (14)$$

其中, $\Delta i_q(k)$ 为 q 轴电流的控制增量, $\omega_r(k)$ 是 kT 时刻电机实际转速。

3.2 闭环预测

$(k+1)T$ 时刻系统的闭环预测输出为:

$$\omega_{r,m}(k+1) = (1-a)\omega_r(k) + a\omega_r(k-1) + b\Delta i_q(k) \quad (15)$$

3.3 参考轨迹

在模型算法控制中, 控制的目的是使系统的输出 $y(k)$ 沿着一条事先规定的曲线逐渐到达设定值 ω_r , 这条指定的曲线称为参考轨迹 $y_r(k)$ 。通常参考轨迹为当前时刻的实际输出值出发的一阶指数形式, 它在未来 P 时刻的值为:

$$y_r(k+1) = y(k) + [e - y(k)][1 - e^{-PT/\tau}] \quad (16)$$

其中, $p = 1, 2, 3, \dots, n$, $y(k)$ 为 k 时刻实际输入值, τ 为参考轨

迹时间常数。根据单步预测控制的思想, 令 $\alpha = e^{-T/\tau}$, 则上式可改写为:

$$y_r(k+1) = \alpha y(k) + (1 - \alpha)c \quad (17)$$

采用上述形式的参考轨迹, 将减小控制作用时间, 使系统的输出能平滑地到达设定值 c 。

3.4 滚动优化

本文选用输出预测误差和控制量加权的二次型性能指标, 其目标函数的表达式如下:

$$J = \lambda [\omega_{r,p}(k+1) - y_r(k+1)]^2 + \beta [\Delta i_q(k)]^2 \quad (18)$$

式中, λ 、 β 为权系数, 分别表示对跟踪误差及控制变量变化的抑制。

单步模型控制算法要求目标函数取得最小值, 因此必须满足函数取得极值的必要条件, 即 $dJ/d\Delta i_q^*(k) = 0$, 由此可得 $\Delta i_q^*(k)$ 的表达式为:

$$\Delta i_q^*(k) = -\frac{\lambda b_1}{\lambda b_1^2 + \beta} [(1 - \alpha)\omega_r(k) + \alpha\omega_r(k-1) + c(k) - y_r(k+1)] \quad (19)$$

在 k 时刻, 实际加于对象的最优控制量为:

$$i_q^*(k) = i_q^*(k+1) + \Delta i_q^*(k) \quad (20)$$

速度控制器通过对转速误差的预测控制调节, 使系统能稳定地跟踪速度设定值, 其输出作为内部电流环的给定, 最终使稳态时实际转速跟踪设定值。由式(19)与式(20)可知, 单步模型算法控制对模型的依赖度小于传统 PI 控制, 其性能可靠, 避免了传统 PI 控制器过于依赖整定参数的缺点。

4 系统仿真及分析

本文提出的基于单步模型算法控制的 PMSM 矢量控制系统结构框图如图 2 所示。控制系统的内环为电流环, 外环为速度环, 设计一个单步模型算法控制器取代传统的转速 PI 调节器对电机转速进行实时调节。

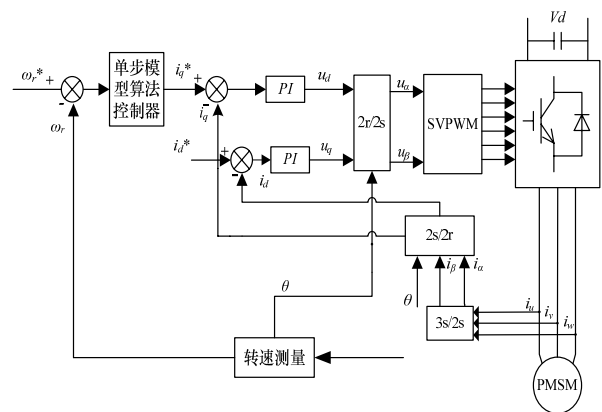


图 2 PMSM 矢量控制结构图

图 3 为本文设计的基于单步模型算法的速度控制器的原理框图,其原理是在采样时刻 kT , 得到 PMSM 的实际转速 $\omega_r(k)$, 实时计算误差 $e(k)$ 与参考轨迹 $y_r(k+1)$, 从而求得控制增量为 $\Delta i_q^*(k)$, 经积分后将控制量 $i_q^*(k)$ 作用于实际对象; 将控制增量 $\Delta i_q^*(k)$ 作用于预测模型, 可求得 $(k+1)T$ 时刻的转速预测值 $\omega_{r,m}(k)$, 并等待下一采样时刻的到来, 在 $(k+1)$ 时刻对上述过程进行重复。

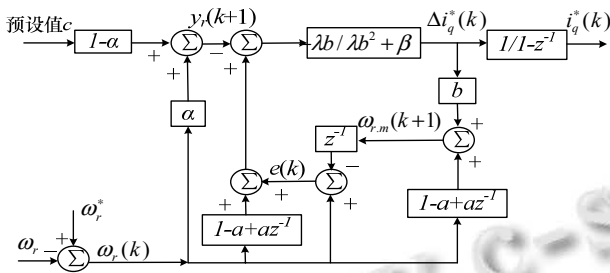


图 3 基于单步模型算法的速度控制器原理框图

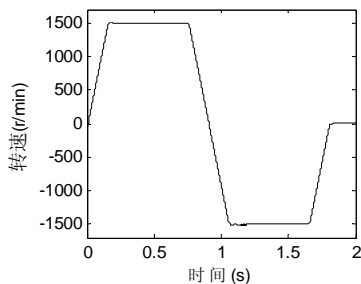
本文采用 Matlab/Simulink 仿真来验证所提出的单步模型算法控制策略的正确性和有效性, 模型中 PMSM 的参数如表 1 所示。

表 1 PMSM 参数

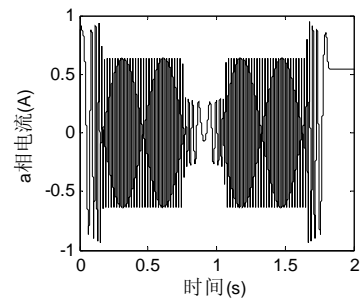
参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	1.5	定子电阻/	4.765
额定转速/(r/min)	1500	转子磁链/Wb	0.1848
极对数	2	d 轴电感/mH	14
转动惯量/kg·m ²	0.1051×10 ⁻³	q 轴电感/mH	14

对图 2 所示的永磁同步电机矢量控制系统进行仿真试验, 仿真中, 采样周期 $T=0.002s$, 预测误差 $\lambda=1$, 控制量的加权系数 $\beta=2$, 时间常数 $\tau=0.008s$ 。

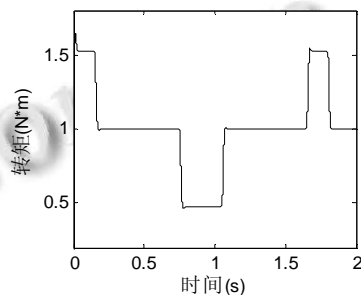
图 4 给出了基于单步模型控制的永磁同步电机作四象限运行时的瞬态响应特性, 给定转速从 1500r/min 变化到 -1500r/min 并最后停转, 负载转矩 $T_L=1N\cdot m$ 。仿真结果表明基于单步模型控制的 PMSM 矢量控制系统能够平稳起动、加速, 并能实现快速四象限运行, 在全速范围内都表现出优良的控制性能。



(a) 转速波形



(b) a 相电流波形



(c) 转矩波形

图 4 基于单步模型控制的 PMSM 四象限运行特性

图 5 为给定转速为 1500r/min 时的转速仿真波形, 由图 5 可以看出传统 PI 控制在起动阶段的转速超调为 48r/min 左右, 调节时间约为 0.13s, 而单步模型控制在起动阶段转速超调约为 32r/min, 且调节时间仅为 0.09s, 由此可见, 单步模型控制相较于传统 PI 控制具有更快的动态性能。

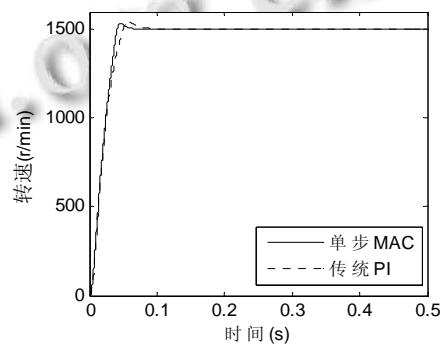


图 5 转速给定 1500r/min 时响应曲线

图 6 为稳态时电机突加负载的响应曲线, 由图 6(a) 可以看出, 系统空载起动, 在 $t=0.3s$ 时突加 10N·m 的负载后, 传统 PI 控制的在经过 0.07s 的调整时间后到达稳定状态, 其转速跌落约为 16r/min, 而单步模型控制的转速在经过 0.03s 的调整时间后到达稳态, 且加载后电机转速降落仅为 8r/min。由图 6(b) 的转矩对比波

形可以看出单步模型控制在系统突加负载后,其转矩提升的更快,且到达稳态所用的时间更少.由此可以看出单步模型控制相较于传统PI控制在电机突加负载后的动态响应更快,具有更好的稳态性能.

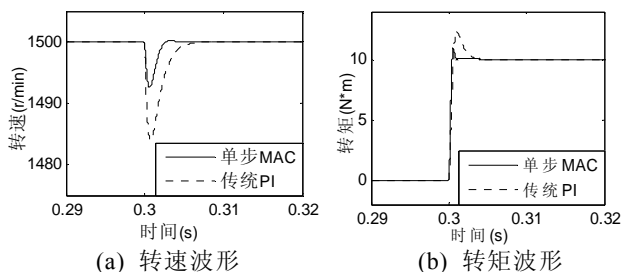


图6 加载时转速与转矩响应曲线

在电机运行过程中,温升等外界环境的影响会导致电机参数发生变化,图7给出了定子电阻与转子磁链变化时基于单步MAC控制的转速仿真波形.由图7(a)可以看出,当定子电阻在 $t=0.25s$ 由初始值 4.765Ω 突变为 9.53Ω 时,转速跌落约为 $5r/min$,在经过 $0.05s$ 的调整时间后迅速回到稳态值.

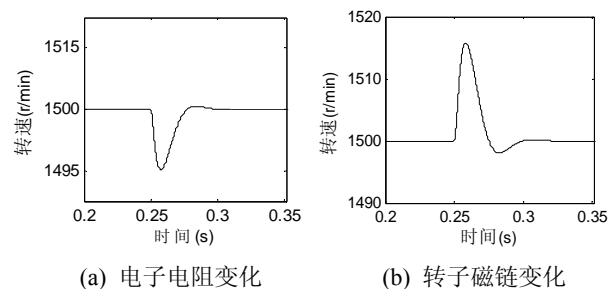


图7 参数失配时单步MAC的控制性能

同时,温升会导致转子磁链减小.由图7(b)可以看出,当转子磁链在 $t=0.25s$ 由初始值 $0.1848Wb$ 突变为 $0.0924Wb$ 时,转速上升约为 $16r/min$,在经过 $0.07s$ 的调整时间后迅速回到稳态值.

值得注意的是,上述仿真中定子电阻、转子磁链的变化均为突变,而实际中这些电机参数是缓慢变化的,故不会出现图7中那么大的突变.综合上述仿真结果可见,基于单步模型的永磁同步电机控制策略具有良好的控制效果,与传统PI控制相比有较快的速度响应和较好的稳态性能,在电机突加负载与电机参数失配时具有良好的鲁棒性.

5 结语

本文提出了一种基于单步模型算法的永磁同步电机控制策略,通过取代传统矢量控制系统的转速PI控制器,提高了系统的控制性能.仿真结果表明,基于单步模型算法的永磁同步电机控制策略有较好的快速性、稳定性以及鲁棒性,与传统PI控制相比在起动与稳态过程中电机转速能更快地趋于给定值,系统具有更好的动静态性能.

参考文献

- 刘静,赵丽媛,李启申.永磁同步电机控制分析.起重运输机械,2014(4):52-55.
- 王伟华,肖曦.永磁同步电机电流增量预测算法参数设计及性能分析.电机与控制学报,2014,17(12):98-105.
- 葛宝明,王祥沂,苏鹏声,蒋静坪.模型算法控制的交流位置伺服系统.电气传动,2001,31(4):3-6.
- 童力,邹旭东,丰树帅,黄清军,张允,康勇.基于预测无差拍算法的永磁同步发电机无传感器控制.电工技术学报,2013,28(3):17-26.
- 宋文祥,阮智勇,朱洪志,周杰.异步电机低开关频率的模型预测直接电流控制.上海大学学报,2013,19(6):647-653.
- 郑泽东,王奎,李永东,马宏伟.采用模型预测控制的交流电机电流控制器.电工技术学报,2013,28(11):118-123.
- 王伟华,肖曦.永磁同步电机高动态响应电流控制方法研究.中国电机工程学报,2013,33(21):117-123.
- 牛里,杨明,刘可述,徐殿国.永磁同步电机电流预测控制算法.中国电机工程学报,2012,32(6):132-137.
- Rahman MF, Haque ME, Tang LX, Zhong LM. Problems associated with the direct torque control of an interior permanent-magnet synchronous motor drive and their remedies. IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2004, 51(4): 799-809.
- 朱昊,肖曦,李永东.永磁同步电机转矩预测控制的磁链控制算法.中国电机工程学报,2010,30(21):86-90.
- 牛里,杨明,王庚,徐殿国.基于无差拍控制的永磁同步电机鲁棒电流控制算法研究.中国电机工程学报,2013,30(15): 78-85.