

doi: 10.7690/bgzd.2014.04.013

考虑非线性的永磁同步电机电流环分析

孙耀程, 薛文彬, 胡勤丰, 朱万平

(南京航空航天大学自动化学院, 南京 210016)

摘要: 为提高永磁同步电机的动态性和鲁棒性, 对非线性的永磁同步电机电流环进行分析。从永磁同步电机的数学模型入手, 利用分析工具 Matlab 对电流环的开环传递函数进行近似线性化。画出不同转速下开环传递函数的伯德图以分析电枢反应和反电势对电流跟踪效果的影响, 并基于 Matlab/Simulink 永磁同步电机转速控制模型进行仿真验证。分析结果表明: 针对选定的永磁同步电机, 电枢反应主要对电流环的动态响应产生不利影响且随着转速增加影响增大, 而反电势则主要对电流环的稳态误差产生影响且与转速无关。

关键词: 永磁同步电机; 电流环; 非线性; 电枢反应; 反电势; 近似线性化

中图分类号: TP273 **文献标志码:** A

Current Loop Analysis of PMSM Considering the Nonlinearity

Sun Yaocheng, Xue Wenbin, Hu Qinfeng, Zhu Wanping

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: In order to improve the dynamic characteristic and robustness of the permanent magnet synchronous motor (PMSM), analyze the nonlinear PMSM current loop. Carry out approximate linearization of the open loop transfer function of current loop based on the PMSM model in coordinate system by using the analysis tool Matlab. And drawing the bode diagrams at several different speed points to analyze the effects on current tracking of armature reaction and EMF, and the simulink of PMSM speed control model based on Matlab/Simulink verifies the conclusion. By analyzing the appointed PMSM, armature reaction will influence the dynamic reaction of current loop, and the influence will be more serious if the speed increases; EMF has an influence on the steady state of current loop which is independent of the speed.

Keywords: PMSM; current loop; nonlinearity; armature reaction; EMF; approximate linearization

0 引言

永磁同步电机具有高功率密度、高效率、低转矩脉动等优点。随着矢量控制技术和高精度位置传感器的发展, 永磁同步电机伺服系统的控制精度越来越高; 通过计算机辅助设计而得的电机本体拥有更高的功率密度、效率并具有较高的转矩脉动。近年来, 永磁同步电机伺服系统已广泛应用于航空航天、工业机器人等高要求伺服领域。

基于矢量控制的永磁同步电机伺服系统的设计, 电流环的设计是重中之重。首先, 电流环作为整个系统的最内环, 可改造内环控制对象, 减小电气时间常数, 提高了系统的快速性; 其次, 电流环实现电流的跟踪, 可以及时抑制电压波动所带来的不利影响, 电流环还可以削弱电气系统非线性(如开关死区)的影响^[1-2]。文献[3-6]对不同调制方式和控制策略对电流环动态性及鲁棒性的影响做了一定的研究和分析。为提高永磁同步电机的动态性和鲁棒性, 笔者将对电流环中的耦合非线性因素进行仿真, 分析反电势和电枢反应对电流环跟踪性能的影响。

1 永磁同步电机数学模型和控制框图

基于同步旋转坐标系的永磁同步电机数学模型如下:

$$u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - p_n \omega_r L_q i_q \quad (1)$$

$$u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + p_n \omega_r L_d i_d + p_n \omega_r \psi_f$$

$$T_e = \frac{3}{2} p_n [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (2)$$

$$T_e - T_L = J \frac{d\omega_r}{dt} + B \omega_r \quad (3)$$

其中: u_d 、 u_q 为定子电压; i_d 、 i_q 为定子电流; L_d 、 L_q 为定子电感; ω_r 为转子机械角速度; ψ_f 为永磁磁链; T_e 、 T_L 分别为电磁转矩和负载转矩; p_n 为电机极对数; J 为电机转子转动惯量; B 为粘滞摩擦系数。

由于文中研究的永磁同步电机是表贴式转子结构, 它的交直流电感满足 $L_d=L_q$, 所以式(2)可以改写为

$$T_e = \frac{3}{2} p_n \psi_f i_q \quad (4)$$

收稿日期: 2013-11-10; 修回日期: 2013-12-28

作者简介: 孙耀程(1989—), 男, 江苏人, 工学硕士, 从事交流电机调速及无位置传感器控制研究。

根据式 (1)、式 (3)、式 (4) 永磁同步电机的模型框图如图 1。从图 1 中可看出，基于 d 、 q 坐标系的永磁同步电机模型并没有实现完全解耦。其中， d 、 q 轴之间存在交叉耦合项 $p_n\omega_r Li_d$ 和 $p_n\omega_r Li_q$ ，它们可视为 d 、 q 轴电枢反应； q 轴和机械角速度 ω_r 之间的耦合项 $p_n\omega_r \psi_f$ 为反电势对 q 轴的影响。电枢反应和反电势必会对电流的跟踪效果产生不利影响，使实际系统的电流波形和理论分析相差较大^[7-8]。

图 2 为永磁同步电机的转速控制框图^[1]，其中

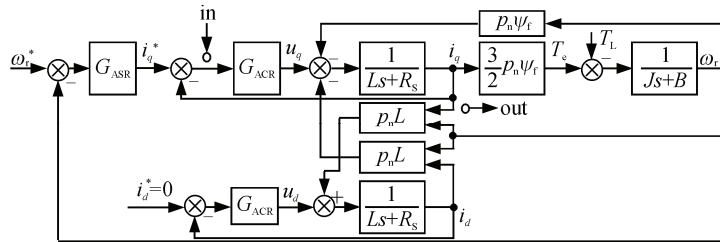


图 2 永磁同步电机的控制框图

永磁同步电机的参数为： $R_s=2.6 \Omega$ ， $L=21.9 \text{ mH}$ ， $\psi_f=0.186 \text{ 2 Wb}$ ， $p_n=2$ ， $J=0.000 \text{ 152 kg}\cdot\text{m}^2$ ， $B=0.001 \text{ Nm}\cdot\text{s}/\text{rad}$ 。

调节器的参数为：

$$G_{ASr} = \frac{0.08(s+125)}{s} \quad (5)$$

$$G_{ACr} = \frac{0.08(s+125)}{s} \quad (6)$$

2 电流环的近似线性化并分析

由于采用的电流控制策略是 $i_d^*=0$ 的控制策略，且电机的电磁转矩与 q 轴电流成正比关系(式 (4))，所以笔者仅以 q 轴电流环为研究对象，选择研究对

G_{ASr} 和 G_{ACr} 分别为转速调节器和电流调节器，并采用 $i_d^*=0$ 的控制策略。

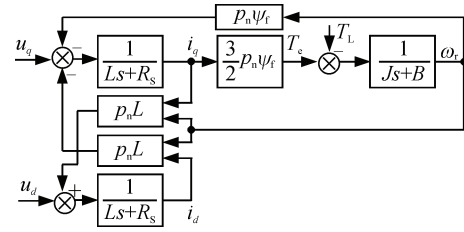


图 1 永磁同步电机模型框图 ($L=L_d=L_q$)

象的输入和输出分别如图 2 中的 in 和 out。近似线性化采用开环结构，因此线性化所得为被控对象校正后的开环传递函数。

表 1 所列为不同转速下考虑电枢反应和反电势时近似线性化结果，即不同转速下的近似开环传递函数^[9]。

去掉交叉耦合项 $p_n\omega_r Li_d$ 和 $p_n\omega_r Li_q$ ，即不考虑 d 、 q 轴电枢反应的影响，得到如图 3 所示的控制框图。此时以 in 为输入、out 为输出的研究对象不再是非线性系统，因此在不同转速下研究对象的开环传递函数不变，说明反电势对电流环的影响与转速无关，算出此时研究对象的开环传递函数为式 (7)。

表 1 q 轴电流环近似线性化结果

| $\omega_r/(\text{rad}/\text{s})$ | 近似开环传递函数(校正后) |
|----------------------------------|---|
| 0 | $s_{1_0} = \frac{9 \ 132s^2 + 9.733e5s + 6.008e6}{s^3 + 125.3s^2 + 6.327e4s}$ |
| 100 | $s_{1_{100}} = \frac{9 \ 132s^4 + 8.546e7s^3 + 1.735e10s^2 + 9.445e11s + 5.487e12}{s^5 + 9 \ 376s^4 + 2.176e6s^3 + 7.073e8s^2 + 5.806e10s}$ |
| 200 | $s_{1_{200}} = \frac{9 \ 132s^4 + 8.546e7s^3 + 1.735e10s^2 + 9.445e11s + 5.487e12}{s^5 + 9 \ 376s^4 + 2.296e6s^3 + 7.132e8s^2 + 5.815e10s}$ |
| 300 | $s_{1_{300}} = \frac{9 \ 132s^4 + 8.546e7s^3 + 1.735e10s^2 + 9.445e11s + 5.487e12}{s^5 + 9 \ 376s^4 + 2.497e6s^3 + 7.19e8s^2 + 5.817e10s}$ |
| 400 | $s_{1_{400}} = \frac{9 \ 132s^4 + 8.546e7s^3 + 1.735e10s^2 + 9.445e11s + 5.487e12}{s^5 + 9 \ 376s^4 + 2.777e6s^3 + 7.251e8s^2 + 5.816e10s}$ |

$$s_2 = \frac{9 \ 132s^2 + 9.733e5s + 6.008e6}{s^3 + 125.3s^2 + 6.327e4s} \quad (7)$$

在 $\omega_r=0$ (即系统起动)时刻 d 、 q 轴电流均为 0，即没有电枢反应的影响。对比发现 s_2 和 s_{1_0} 恰好相同，从而验证了此近似线性化方法的正确性。

再在图 3 的基础上去掉反电势项 $p_n\omega_r \psi_f$ ，即不考虑电枢反应和反电势的影响，如图 4 所示。永磁同步电机调速系统的电流、转速调节器的设计一般都基于该模型。此时以 in 为输入、out 为输出的研究对象即为电流调节器 G_{ACr} 和 $1/(Ls+R_s)$

的串联系统，该对象仍然是线性的，其开环传递函数为式 (8)。

$$s_3 = \frac{9\ 132s + 9.132e5}{s^2 + 118.7s} \quad (8)$$

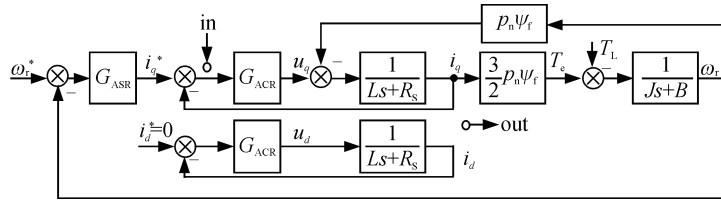


图 3 不考虑电枢反应时永磁同步电机控制框图

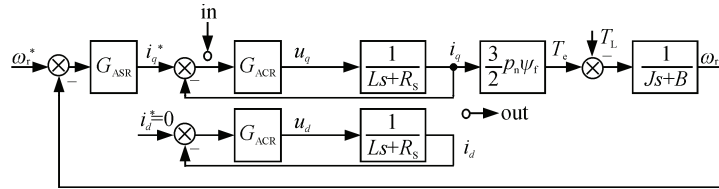


图 4 不考虑电枢反应和反电势时永磁同步电机控制框图

下面将画出不同情况下研究对象的(近似)开环传递函数，并进行比较分析。

如图 5 所示为 s_{1_0} 、 s_2 与 s_3 的开环伯德图，显然，2 条曲线的差别是由反电势引起的。比较可得：1) 考虑反电势的开环系统低频幅值增益比不考虑反电势时小约 40 dB，这将对电流环的稳态误差产生较大的影响；2) 幅频曲线的截止频率相同，说明反电势对电流环的动态性能影响很小；3) 两系统的相频曲线差别较大，但是它们的相位裕度相同，因此反电势对电流环稳定性的影响也有限。

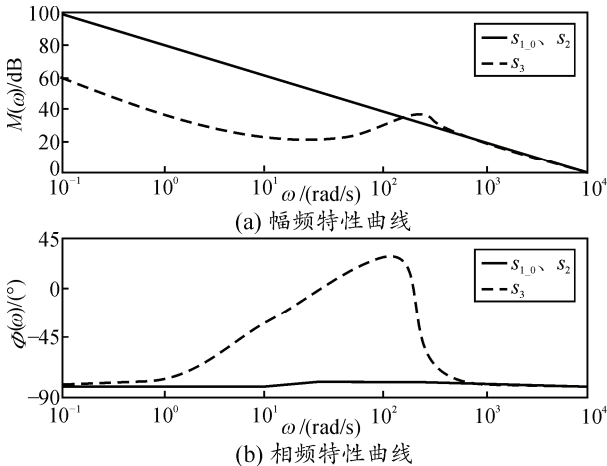


图 5 s_{1_0} 、 s_2 与 s_3 的开环伯德图

图 6 中的开环伯德图同时考虑了反电势和电枢反应的影响，由于反电势对电流环的影响与转速无关，所以该图中曲线的变化是由电枢反应引起的。图中标出了 ω_r 增大时幅频/相频曲线的变化趋势。可以看出：1) 在频段 100~1 000 rad/s 中幅频曲线幅值和相频曲线相位略有变化，这将对电流环的动态性能产生影响，且 ω_r 越大，该频段的幅值增益越小，则电流环的动态性能越差；2) 低频增益、截止频率和相位裕度均不变，所以 ω_r 的变化对电流环稳态误

差和稳定性影响有限。

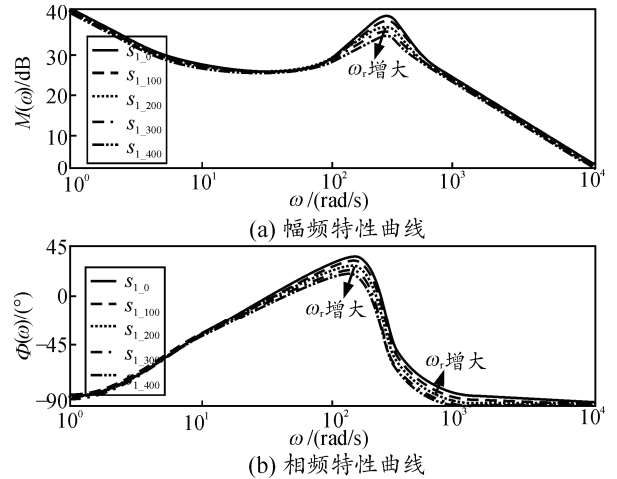


图 6 s_{1_0} 、 s_{1_100} 、 s_{1_200} 、 s_{1_300} 、 s_{1_400} 的开环伯德图

从对永磁同步电机转速控制系统的 q 轴电流环进行近似线性化可得：在采用同样的电流环校正环节的前提下，反电势的存在将使电流环的稳态误差变大且该误差与转速的大小无关，而电枢反应将使电流环的动态响应性能变差，且电机的转速越高动态响应性能越差。

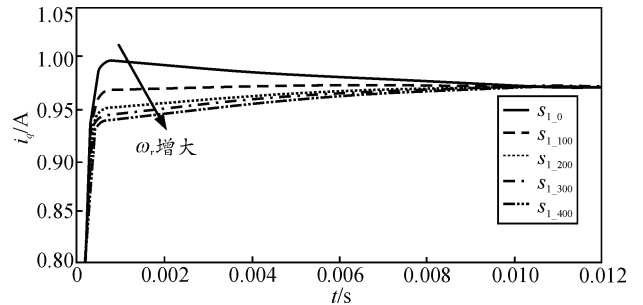


图 7 不同转速下电流环近似线性化系统的闭环阶跃响应

图 7 所示为表 3 中各近似线性化系统的闭环阶跃响应曲线。从图中可以看出：1) 当转速为 0 时，电枢反应不起作用，此时反电势的影响使得电流环

的稳态误差变大，但动态性能与理想电流环的响应接近；2) 随着转速的升高，近似线性化系统的动态性能逐渐变差，但是稳态误差不变。这两点验证了上述分析得出的结论。

3 基于 Matlab/Simulink 的仿真分析

使用 Matlab/Simulink 的 SimPowerSystems 工具箱搭建永磁同步电机转速控制模型，如图 8 所示。图中转速、电流调节器均采用 PI 调节器，调节器参数选择分别参照式 (5) 和式 (6)。系统采用 SVPWM

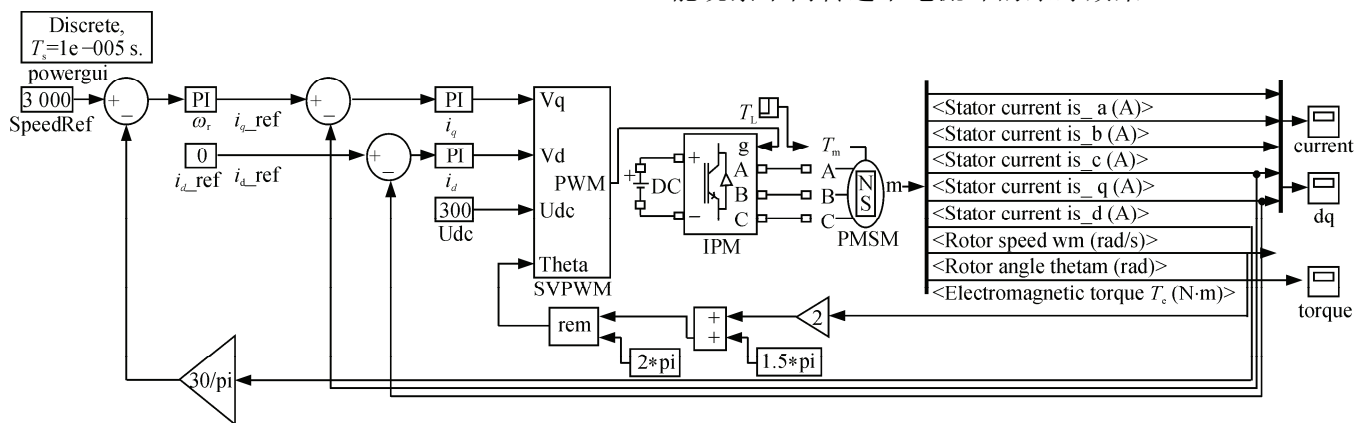


图 8 永磁同步电机转速控制模型

从图 9 的 q 轴电流响应曲线可以看出：在 $t=0$ s (电机转速为 0) 时， q 轴电流 (i_{q_fdb}) 能很好地跟踪 q 轴电流给定 (i_{q_ref})；而在 $t=0.02$ s (电机处在较高转速) 时， q 轴电流已经明显不能跟踪 q 轴电流给定了。该结果验证了在不同转速下电流环动态性能的影响，但是从图 9 中不能明显看出稳态误差的区别，这是因为电流调节器中加了较强的积分作用，经过一段时间后稳态误差总能趋于零。

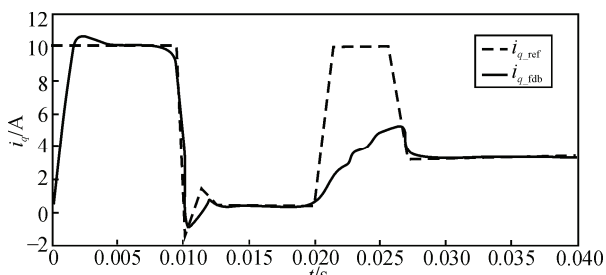


图 9 q 轴电流响应曲线

4 结束语

笔者经过对永磁同步电机的电流环数学模型仿真分析得知：反电势将对电流环的稳态误差产生影响且与转速无关；而电枢反应将对电流环的动态性能产生不利影响且转速越高影响越大。通过对永磁同步电机转速控制模型仿真验证发现，电流环的动态性能确实会受到转速变化的影响，而电流调节器中积分环节的存在使得稳态误差并无明显变化。

调制方式，该调制方式所得到的电流谐波含量小，且具有较高直流母线电压利用率^[10]。

通过给定转速 3 000 r/min 并在 0.02 s 时刻加载 1.6 N·m，然后观察 q 轴电流响应情况来观察电流环的跟踪效果。这里采用转速、电流双环控制模型而不是直接采用电流单环控制模型来观察电流环的跟踪效果是因为：1) 直接给定电流阶跃信号很可能会使电流调节器饱和 (因为反电势和电枢反应的存在)；2) 电流单环不能控制电机的转速，这样就不能观察不同转速下电流环的跟踪效果。

参考文献：

- [1] 陈伯时. 电力拖动自动控制系统——运动控制系统[M]. 3 版. 北京：机械工业出版社, 2003: 52-84.
- [2] 胡寿松. 自动控制原理[M]. 5 版. 北京：科学出版社, 2007: 77-109.
- [3] Dixon J, Tepper S, Moran L. Practical evaluation of different modulation technique for current-controlled voltage source inverters[J]. IEE Proceedings Electric Power Applications, 1996, 143(4): 301-306.
- [4] Sedighy M, Dewan S B, Dawson F P. A robust digital current control method for active power filiters[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 2000, 36(4): 1158-1164.
- [5] Morimoto S, Sanada M, Takeda Y. Wide-speed operation of interior permanent magnet synchronous motor swith high-performance current regulator[J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1994, 30(4): 920-926.
- [6] Fernando B B, Michael W D, Lorenz R D. Dynamic analysis of current regulators for AC motors using complex vectors[J]. IEEE Trans on Industry Application, 1999, 35(6): 1424-1432.
- [7] 王洪诚, 陈刚, 王钰涵, 等. 基于线性模型的开关磁阻电机控制系统[J]. 兵工自动化, 2012, 31(6): 70-73.
- [8] 王家军, 赵光宙, 齐冬莲. 反推式控制在永磁同步电动机速度跟踪控制中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(8): 95-98.
- [9] 张鸿斌. 基于 DSP 的步进电机控制系统的设计[J]. 四川兵工学报, 2013, 34(7): 88-91.
- [10] 黄佳佳. 滑模控制永磁同步电机伺服系统的研究[D]. 南京：南京航空航天大学, 2008: 6-18.