

改进的永磁同步电机直接转矩控制系统仿真实现

王玲芝

(西安邮电学院计算机系, 陕西 西安 710061)

摘要: 直接转矩控制的主要缺点是低速时转矩脉动大。其中一个重要原因是电机在运行中存在温度升高及电流频率变化等现象, 定子电阻的阻值发生变化, 使定子磁链的估计精度降低, 导致电磁转矩出现较大的脉动。针对这一问题, 设计了一种改进的永磁同步电机直接转矩控制系统。根据实际转矩和给定转矩的偏差, 提出了一种使用PI控制器补偿定子电阻变化的方法。仿真表明该控制系统可以减小磁链和转矩脉动, 改善了系统的运行性能, 提高了系统对电机参数变化的鲁棒性。

关键词: 永磁同步电机; 直接转矩控制; 转矩脉动; PI控制器; 定子电阻变化

Simulation of improved direct torque control system for permanent magnet synchronous motor

WANG Ling-zhi

(Department of Computer Science, Xi'an Institute of Posts and Telecoms, Xi'an 710061, China)

Abstract: The main disadvantage is of high torque ripple at low rate. An important reason is that stator resistance value changes for the phenomenon of rising temperature and changing current frequency when motor is running. Thus the estimation precision of stator flux decreases, leading to high electromagnetic torque ripple. Aiming at this problem, a direct torque control system of permanent magnet synchronous motor is devised. According to the error between actual torque and reference torque, a means for compensating stator resistance variation using PI controller is proposed. The simulation results show that the control system can reduce the flux and torque ripple. The running performance of system is improved and the robustness to parameters variation is enhanced.

Key words: PMSM; direct torque control; torque ripple; PI controller; stator resistance variation

中图分类号: TM341 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)19-0065-04

0 引言

德国学者 M.Dепенbrock 于 1985 年针对异步电机提出了一种高性能电机控制方法——直接转矩控制。直接转矩控制算法简单、控制效果优良, 并成功应用到异步电机调速系统中, 直接转矩控制方法已成为交流伺服系统的研究热点之一。但是直接转矩控制研究大部分集中在异步电机的控制上, 近几年有一些学者致力于该控制方法在永磁同步电机控制中的应用, 初步实现了永磁同步电机的直接转矩控制, 体现了直接转矩控制简单及优良的动态控制性能等特点^[1,2]。但这些研究工作还处于初级阶段, 许多问题还有待解决, 如低速时转矩观测器和转矩脉动等。

电机在实际运行过程中参数变化相对较大, 其

中定子电阻是电机运行中变化最大的一个参数, 而直接转矩控制中定子磁链和转矩的估算都要依赖于电机中的定子电阻。若在直接转矩控制转矩、磁链的估算中电机的电阻值受运行情况以及环境温度等因素影响而变化过大, 驱动系统就可能变得不稳定^[3-6]。针对这一问题, 本文提出了一种基于转矩偏差PI控制器的定子电阻补偿器, 从而降低电机运行中定子电阻的变化产生的影响。

1 永磁同步电机直接转矩控制原理

直接转矩控制技术, 用空间矢量的分析方法, 采用定子磁场定向直接计算与控制交流电动机的转矩, 借助于离散的两点式调节(Band-Band control)产生 PWM 信号, 直接对逆变器的开关状态进行最佳控制, 以获得转矩的高动态性能, 是一种具有高静态性能和动态性能的交流电机控制方法。

永磁同步电机直接转矩控制系统原理框图如

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(SJ08-ZT14); 西安市科技计划项目(CXY08017(1))

图1所示。主要包括转矩和磁链控制器；开关状态选择表；转矩、磁链计算单元等环节。

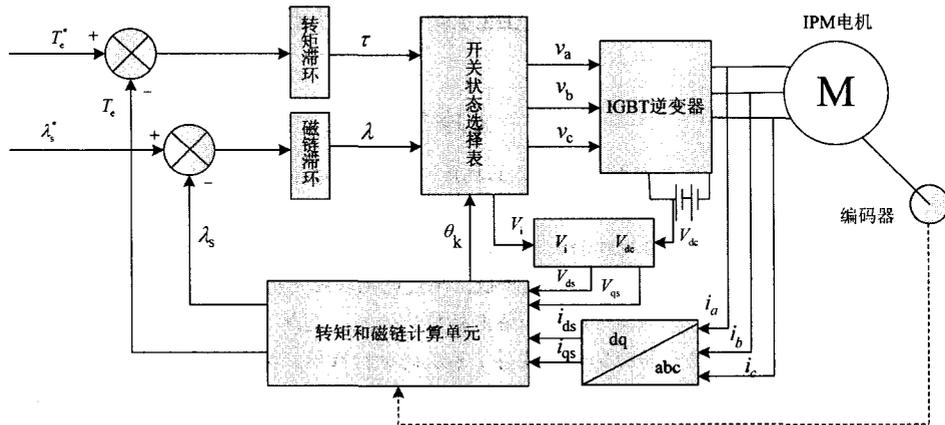


图 1 直接转矩控制系统原理图

Fig.1 Principle schematic of direct torque control system

控制过程如下：电机定子的三相电流 i_a 、 i_b 、 i_c 通过 3/2 变换得到 i_{ds} 、 i_{qs} ；根据逆变器的电压状态与逆变器的开关状态和直流电压 V_{dc} 之间的关系，可以得到 V_{ds} 、 V_{qs} ；根据磁链模型得到磁链在 dq 轴上的分量 λ_{ds} 、 λ_{qs} ；再由 λ_{ds} 、 λ_{qs} 及 i_{ds} 、 i_{qs} 通过转矩模型，得到转矩 T_e ，与速度调节器给出的转矩给定 T_e^* 进行滞环比较，输出结果用来决定开关状态。求 λ_{ds} 、 λ_{qs} 的平方和 $|\lambda_s|^2$ ，得到的 $|\lambda_s|$ 与磁链给定 λ_s^* 进行比较，由滞环比较器输出结果。同时利用 λ_{ds} 、 λ_{qs} 判断磁链所在的区域，确定 θ_k 的值。综合转矩调节器、磁链调节器的输出以及 θ_k 的值，根据开关电压矢量表确定逆变器的开关状态。

2 基于转矩偏差 PI 控制器的直接转矩控制系统

直接转矩控制在很大程度上解决了矢量控制中计算复杂、特性易受电动机转子参数变化的影响、实际性能难以达到理论分析结果等一些问题，但在电机低速运行时，其控制性能不尽人意。另外，永磁同步电机自身就是一个非线性、强耦合及时变的“系统”，加之系统运行时还会受到不同程度的干扰，因此常规控制策略很难满足高性能永磁同步电机伺服系统的控制要求。针对定子电阻对直接转矩控制性能产生的影响，提出一种基于转矩偏差 PI 控制器的直接转矩控制系统，使电机数学模型中的定子电阻由固定值变为随运行环

境变化的动态值。

2.1 PI 控制器设计原理

基于电机数学模型定子磁链、转矩计算公式如下：

$$\lambda_{ds} = \int (v_{ds} - R_s i_{ds}) dt + \lambda_{ds} |_{t=0} \quad (1)$$

$$\lambda_{qs} = \int (v_{qs} - R_s i_{qs}) dt + \lambda_{qs} |_{t=0} \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P (i_{qs} \lambda_{ds} - i_{ds} \lambda_{qs}) \quad (3)$$

定子磁链的相量由下式给出：

$$\lambda_s = \sqrt{(\lambda_{ds}^2 + \lambda_{qs}^2)} \quad (4)$$

$$\angle \theta_s = \tan^{-1} \left(\frac{\lambda_{qs}}{\lambda_{ds}} \right) \quad (5)$$

式中： v_{ds} 、 v_{qs} 分别为直轴和交轴电压； λ_{ds} 、 λ_{qs} 分别为直轴和交轴磁链； i_{ds} 、 i_{qs} 分别为直轴、交轴电流； R_s 为一相定子电阻； P 为电机的极对数； λ_s 为定子磁链， T_e 为电磁转矩； θ_s 为 λ_s 与直轴的夹角。

由以上定子磁链、转矩计算公式可知，定子电阻的变化将影响定子磁链的估算值，而电磁转矩的计算又与定子磁链有关。如果定子电阻有变化，那么实际转矩 T_e 和给定转矩 T_e^* 之间就会存在由于定子电阻的变化引起的偏差。这样将实际转矩和给定转矩之间的偏差 ΔT_e 来估算定子电阻的变化 ΔR_s ，使计算出的定子磁链和电磁转矩尽可能地接近给定

值。考虑将电磁转矩的偏差 ΔT_e 作为 PI 控制器的一个输入，PI 控制器的输出就是由于温度或频率的变化所引起的定子电阻的变化 ΔR_s （即定子电阻的补偿值）。PI 控制器的结构设计如图 2 所示。

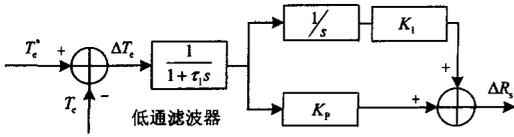


图 2 PI 控制器结构图

Fig.2 PI controller structure

PI 控制器器可由下式描述：

$$\Delta R_s = (K_p + K_I \frac{1}{s}) \Delta T_e \quad (6)$$

这里， τ 是采样时间， ΔR_s 是定子电阻的补偿值。 K_p 和 K_I 是 PI 控制器的比例系数和积分系数， K_p 可以增加控制器的响应输出， K_I 可以消除静态误差。这两个系数是可调的，它们的值要通过不断

观测实验结果并多次尝试得到最优值。

图 2 中的低通滤波器的作用是为了滤去包含在估算电磁转矩中的高频成分。实际转矩 T_e 和给定转矩 T_e^* 之间的偏差要通过一个有截止频率很低的低通滤波器，然后再通过一个 PI 控制器。PI 控制器的输出就是由于温度或频率等的变化所需要的定子电阻的补偿值 ΔR_s 。

2.2 仿真实现

改进的永磁同步电机直接转矩控制系统是在图 1 中加入 PI 控制器。由磁链和转矩计算模块得到电机的实际转矩，将实际转矩与给定转矩的偏差作为 PI 控制器模块的输入。将得到的 ΔR_s 不断地加到前一时刻估计的定子电阻值 $R_s(k-1)$ 上，得到 $R_s(k)$ ，再通过一个低通滤波器获取一个平稳的定子电阻值 \hat{R}_s ，再由定子电阻值 \hat{R}_s 重新计算新的磁链值和转矩值。

对永磁同步电机的传统直接转矩控制和基于 PI 控制器的直接转矩控制系统在 Matlab/Simulink 环境下进行了仿真研究，仿真模型如图 3 所示。

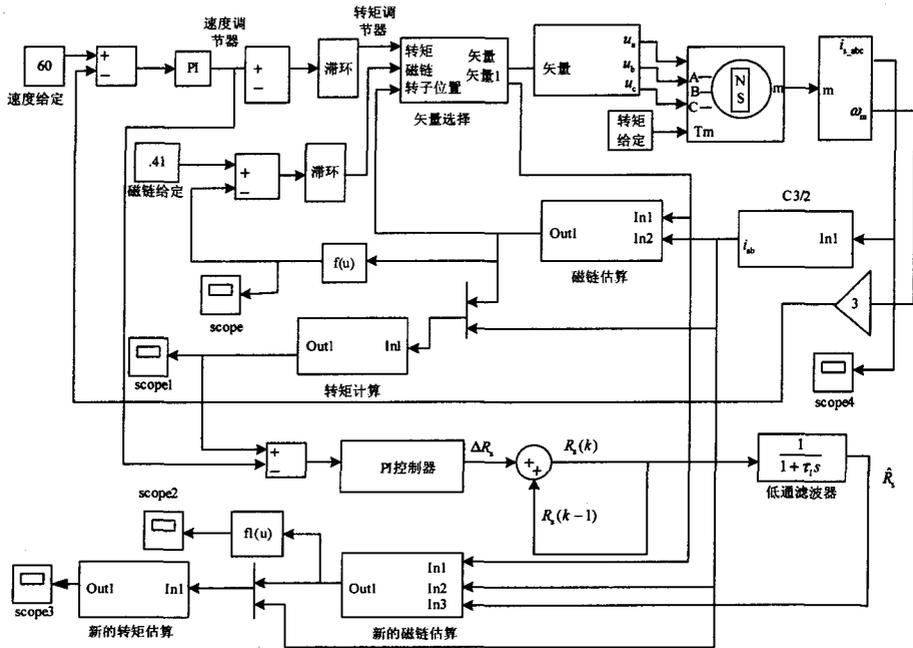


图 3 改进的直接转矩控制系统仿真模型

Fig.3 Simulation model of improved direct torque control system

仿真时电机参数如下：额定功率 0.75 W；额定转速为 2000 r/min；极对数为 3；定子电阻为 0.57 Ω ； L_d 、 L_q 均为 0.0155 H；转动惯量为 0.0015 $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ；转子磁链为 0.41 Wb。采样周期 T_s 取 20 μs 。

仿真中，负载转矩初值为 $-1.5 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，0.05 s 时跳变为 $1.7 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，0.1 s 时又变回 $-1.7 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。电机转速为 60 rad/s。PI 控制器的参数 K_p 为 6.5， K_I 为 0.08。图 4 为永磁同步电机直接转矩控制系统改进

前后的仿真结果。

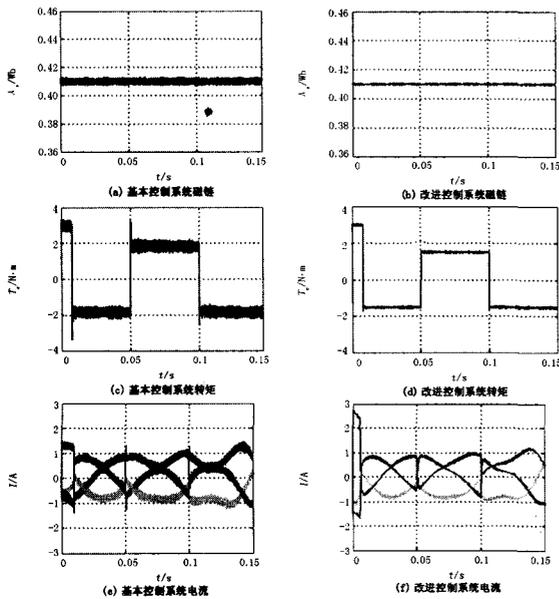


图 4 电机转速为 60 rad/s 时两种控制系统仿真结果
Fig.4 Simulation result of two control systems while the motor is running at 60 rad/s

永磁同步电机直接转矩控制系统改进前后的磁链和转矩脉动情况如图 4 (a)、4 (b)、4 (c)、4 (d) 所示, 通过转矩偏差 PI 控制器补偿定子电阻的方法, 明显降低了磁链和转矩脉动, 大大减小了磁链和转矩误差。从图 4 (c)、4 (d) 比较可以发现, 改进后的系统消除了负载转矩在 0.05 s 跳变时产生的超调。图 4 (e)、4 (f) 显示, 改进后的系统具有更平滑的电流波形, 而平滑的电流波形是减小转矩脉动的基础。

3 结束语

本文提出了由 PI 控制器产生定子电阻补偿值的直接转矩控制系统, PI 控制器的输入为实际转矩

和给定转矩的偏差, 输出为定子电阻的补偿值。该方案算法简单, 实现方便。通过在 Matlab/Simulink 环境下的仿真比较, 改进后的控制系统有效减小了磁链和转矩脉动, 降低了定子电阻变化对系统性能的影响, 大大提高了系统的控制性能。

参考文献

- [1] 李凤. 异步电机直接转矩控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
LI Su. Direct Torque Control for Asynchronous Motor[M]. Beijing: China Machine Press, 1999.
- [2] 李永东. 交流电机数字控制系统[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
LI Yong-dong. Across Current Motor Digital Control System[M]. Beijing: China Machine Press, 2009.
- [3] Zhong L, Rahman M F, Hu W Y, et al. A Direct Torque Controller for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives[J]. IEEE Trans on Energy Conversion, 1999:637-642.
- [4] Zhong L, Rahman M F, Hu W Y, et al. Analysis of Direct Torque Control in Permanent Magnet Synchronous Motor Drives[J]. IEEE Trans on Power Electronics, 1997,12(3):175-179.
- [5] Habetler T G, Profumo F, Griva G, et al. Stator Resistance Tuning in a Stator Flux Field Oriented Drive Using an Instantaneous Hybrid Flux Estimator[A]. in: Conf Record EPE Conf[C]. Brighton(UK):1993.292-299.
- [6] Haque M E, Ahman M F. Influence of Stator Resistance Variation on Direct Torque Controlled Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Drive Performance and Its Compensation[D]. Sydney (Australia): The University of New South Wales, 2002.831-834.

收稿日期: 2009-05-10 修回日期: 2009-08-23

作者简介:

王玲芝 (1981-), 女, 助教, 硕士, 主要从事智能控制、电机控制等方面的研究。E-mail: wlzmary@163.com

(上接第 60 页 continued from page 60)

- [16] Potter M A, De Jong K A. A Cooperative Coevolutionary Approach to Function Optimization[A]. in: Proceedings of the Third Conference on Parallel Problem Solving from Nature[C]. New York(USA):1994.249-257.
- [17] Paredis J. Coevolutionary Computation[J]. Artificial Life, 1995, 2(4): 355-375.
- [18] 赵波, 郭创新, 张鹏翔, 等. 基于分布式协同粒子群优化算法的电力系统无功优化[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(21): 1-7.
ZHAO Bo, GUO Chuang-xin, ZHANG Peng-xiang, et al. Distributed Cooperative Particle Swarm Optimization

Algorithm for Reactive Power Optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(21): 1-7.

收稿日期: 2008-10-25 修回日期: 2009-01-23

作者简介:

吕林 (1963-), 男, 硕士, 副教授, 主要从事配电网自动化方面的研究; E-mail: lvlin@email.scu.edu.cn

王佳佳 (1985-), 男, 硕士研究生, 研究方向为配电网络分析与计算;

刘俊勇 (1963-), 男, 博士, 教授, 主要从事电力市场、电压无功分析等方面的研究。