

# 双曲正切函数在 PMSM 直接转矩控制中的应用

王玲芝

(西安邮电学院 计算机系, 陕西 西安 710061)

**摘要:** 针对永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, 以下简称 PMSM) 直接转矩控制存在较大的转矩脉动问题, 提出了一种基于双曲正切函数的控制方法, 函数的输入是实际磁链值和参考磁链值的偏差, 输出是定子电阻的补偿值。通过仿真, 该方法能够显著减小转矩脉动, 具有更优越的控制性能。

**关键词:** 直接转矩控制; 转矩脉动; 双曲正切函数; 定子电阻; 永磁同步电机

**中图分类号:** TN 341 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2009)04-0032-04

## Application of Hyperbolic Tangent Function to PMSM Direct Torque Control

WANG Ling-zhi

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

**Abstract** With regard to high torque ripple in permanent magnet synchronous motor (PMSM) in direct torque control, a control method based on hyperbolic tangent function is proposed. The input of the function is the error between actual flux value and reference flux value, and its output is the compensation value of stator resistance. Through simulation, the method is able to reduce the torque ripple significantly and is of superior control performance.

**Key words** direct torque control; torque ripple; hyperbolic tangent function; stator resistance; PMSM

### 0 引言

直接转矩控制技术, 用空间矢量的分析方法, 直接计算与控制交流电动机的转矩, 采用定子磁场定向, 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。该控制系统的转矩响应迅速, 限制在 1 拍以内, 且无超调, 是一种具有高静态性能的交流调速方法<sup>[1,2]</sup>。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、实际性能难于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。近年来, 为提高直接转矩控制的动静态性能及其在低速时的性能, 研究人员正在对此进行深入的研究<sup>[3]</sup>。定子电阻的变化是导致低速转矩脉动产生的一个重要原因, 而定子电阻会随环境温度、电流频率变化及电机运行情况等因素而变化。因此, 企图通过减小定子电阻的变化对系统控制性能产生的影响是提高直接转矩控制系统性能的一个重要措施。

收稿日期: 2009-01-15 基金项目: 陕西省自然科学基金项目计划 (项目编号: SJ08-ZT14); 西安市科技计划项目 (项目编号: CXY08017(1))。

作者简介: 王玲芝 (1981-), 女, 硕士, 助教。主要研究方向: 智能控制、电机控制。E-mail: wlk@xupt.edu.cn

随着控制理论的发展, 尤其智能控制的兴起和广泛的应用, 使得从通过改进控制策略的角度着手以提高控制器性能, 进而提高永磁同步电机伺服系统性能已成为广大学者研究的热点<sup>[4]</sup>. 用得比较普遍的有模糊控制器和神经网络控制器, 但是模糊控制器和神经网络控制器往往设计起来比较复杂, 尤其对于比较庞大的复杂系统, 其中的模糊规则、神经网络的节点个数等设计会大大增加工作量和难度. 论文提出一种使用双曲正切函数的 PM SM 直接转矩控制方法, 设计了一种计算定子电阻补偿值的算法函数. 与模糊控制器和神经网络控制器相比, 算法简单并且容易实现.

## 1 算法设计原理

PM SM 直接转矩控制系统根据定子磁链误差、转矩误差和定子磁链位置从开关状态选择表中选取电压空间矢量. 其定子磁链模型和转矩模型在两相定子坐标系中的计算公式为:

$$\varphi_s = \int (v_s - R_s i_s) dt \quad (1)$$

$$T_e = \frac{3}{2} P (i_{qs} \varphi_{ds} - \dot{i}_{ds} \varphi_{qs}) \quad (2)$$

式中,  $\varphi_s$  是定子磁链矢量,  $v_s$  是电源电压矢量,  $i_s$  是定子电流矢量,  $R_s$  是定子电阻,  $T_e$  是电磁转矩,  $P$  是电机的极对数,  $\varphi_{qs}$  和  $\varphi_{ds}$  是  $\varphi_s$  在  $d$  轴和  $q$  轴分量,  $\dot{i}_{ds}$  和  $i_{qs}$  是在  $d$  轴和  $q$  轴分量.

定子磁链是通过输入电压和定子电阻压降之间差值的积分来估算的. 在高速时, 定子电阻压降在反电动势中所占比例较小, 定子电阻变化所引起的压降可以忽略. 但在低速运行时, 电阻压降所占比例较大, 定子电阻的丝毫变化都会对定子磁链的计算产生影响. 所以, 因积分项中的  $R_s i_s$  项的误差致使定子磁链模型精度严重下降, 进而影响电磁转矩和定子磁链矢量的幅值和位置. 控制系统根据不准确的电磁转矩和定子磁链选择错误的开关状态, 可能导致系统不能有效工作. 所以, 有必要采取相应的措施补偿定子电阻的变化. 设实际磁链和参考磁链之间的误差为:

$$E = \varphi_s - \varphi_s^* \quad (3)$$

当实际磁链  $\varphi_s$  大于参考磁链  $\varphi_s^*$  (即  $E > 0$ ) 时, 如果对定子电阻进行补偿使其在  $R_s$  的基础上加上一个正的适当的变化值  $\Delta R_s$  (即  $\Delta R_s > 0$ ), 那么由公式 (1),  $R_s$  增大时,  $\varphi_s$  减小,  $\varphi_s$  是向着接近参考磁链的方向变化的; 当实际磁链  $\varphi_s$  小于参考磁链值  $\varphi_s^*$  (即  $E < 0$ ) 时, 如果使定子电阻在  $R_s$  的基础上加上一个负的变化值  $\Delta R_s$  (即  $\Delta R_s < 0$ ), 那么  $R_s$  减小时,  $\varphi_s$  增大,  $\varphi_s$  也是向着接近参考磁链的方向变化的. 这样通过对定子电阻的补偿, 可以使实际磁链值更加尽可能准确的接近参考磁链值, 从而得到一个更准确的实际转矩值.

通过以上分析, 考虑双曲正切函数  $y = \text{th}x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}}$  的形状及特性, 其曲线形状如图 1 所示. 双曲正切函数在实数范围内连续、可微、可导. 并且在第 1 象限内,  $x > 0$  时  $y > 0$  在第 3 象限,  $x < 0$  时  $y < 0$  这与前面所提出的定子电阻补偿原理是一致的, 即:  $E > 0$  时,  $\Delta R_s < 0$   $E < 0$  时  $\Delta R_s > 0$

利用双曲正切函数的这些特性, 根据实际需要, 将双曲正切函数修正为:

$$f(x) = \alpha \frac{e^{\beta x} - e^{-\beta x}}{e^{\beta x} + e^{-\beta x}} \quad (4)$$

该函数即为定子电阻补偿的算法函数. 式中,  $\alpha$  为比例因子, 调节曲线的上下幅度.  $\beta$  为权重因子, 调节曲线的左右伸展.  $\alpha$  和  $\beta$  的值根据实际情况和反复试验进行赋值. 只需将实际磁链和参考磁链的差值  $E$  作为算法函数的输入, 就可以得到定子电阻的变化, 将  $\Delta R_s$  加到原来电阻  $R_s$  上得到补偿后新的电阻值  $R_s'$ , 由公式 (1), (2) 计算新的实际磁链值  $\varphi_s'$  和实际转矩值  $T_e'$ . 只要实际磁链和参考磁链不相等, 算法

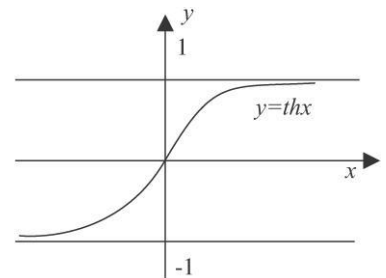


图 1 双曲正切函数的曲线形状  
Fig 1 The curve of hyperbolic tangent function

函数的输入就不为 0 输出的定子电阻的变化值也不为 0 通过这样一个基于双曲正切函数的算法函数, 不断地对定子电阻进行补偿, 直到实际磁链和参考磁链之间的误差达到尽可能地小.

### 2 仿真及结果分析

基于双曲正切函数的 PM SM 直接转矩控制系统如图 2 所示. 在传统直接转矩控制系统的基础上, 该系统中增加了定子电阻补偿部分 Fcn 模块和补偿后的磁链和转矩计算单元. 通过算法函数模块得到定子电阻补偿后的更新值, 利用这个电阻更新值计算电阻补偿后的定子磁链和电磁转矩.

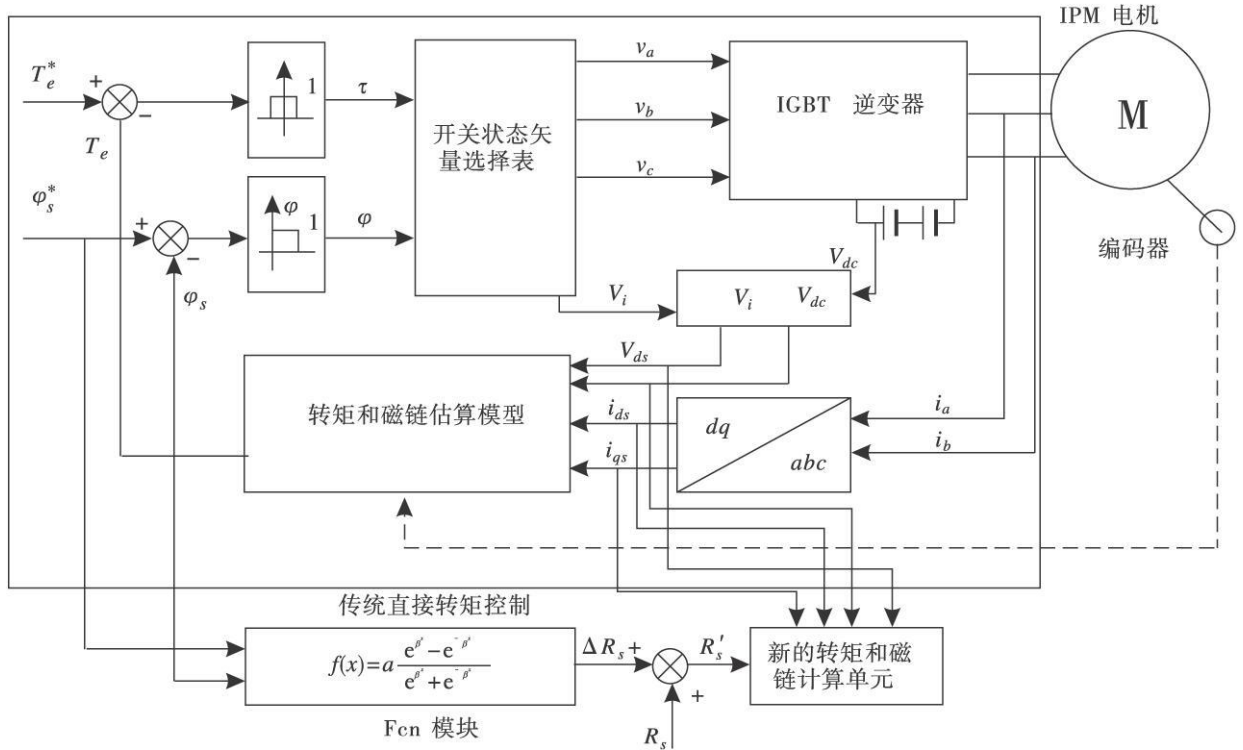


图 2 基于双曲正切函数的 PM SM 直接转矩控制系统

Fig 2 The PM SM direct torch control system based on hyperbolic tangent function

在 Matlab/Simu link 环境下, 对 PM SM 的传统直接转矩控制和基于双曲正切函数的直接转矩控制系统进行了仿真研究. 电机参数如下: 额定功率 0.75 W; 额定转速为 2 000 r/min; 极对数为 3; 定子电阻为 0.57Ω; L<sub>b</sub>, L<sub>q</sub> 均为 0.015 5H; 转动惯量为 0.001 5 kg·m<sup>2</sup>; 转子磁链为 0.41 Wb 采样周期为 20 μs 仿真中, 负载转矩初值为 -1 N·m, 在 0.1 s 时跳变为 1.0 N·m 高速给定为 150 rad/s 低速给定为 20 rad/s 算法函数中常量为 0.5 β 为 3. 图 3 和图 4 分别为传统直接转矩控制和基于双曲正切函数的直接转矩控制电机低速和高速运行时的仿真结果, 从仿真结果可以看出, 不管是在高速还是低速, 通过定子电阻补偿的算法函数, 转矩脉动大大减小. 在负载转矩为 1.0 N·m 稳态运行时, 基于双曲正切函数的直接转矩控制中转矩误差最大只有 0.1 N·m, 仅为传统直接转矩控制转矩误差的 1/7. 同时, 图 3(b) 中在 0.1 s 时的超调很大, 而图 4(b) 中在 0.1 s 处几乎没有超调. 这也是该控制方法优于传统控制方法的一个重要控制性能.

### 3 结论

利用双曲正切函数的性质, 设计了产生定子电阻补偿值的算法函数, 建立了基于双曲正切函数的 PM SM 直接转矩控制系统并进行了仿真. 仿真结果表明, 该控制方法明显减小了转矩脉动, 改善了直接转矩控制性能, 有效解决了 PM SM 直接转矩控制中转矩脉动大的问题.

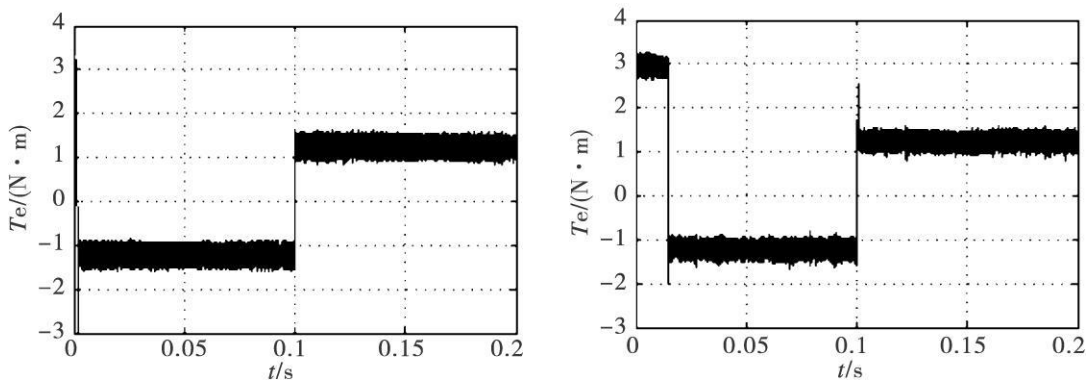


图 3 传统直接转矩控制转矩曲线

Fig 3 The torch of conventinal direct torch control

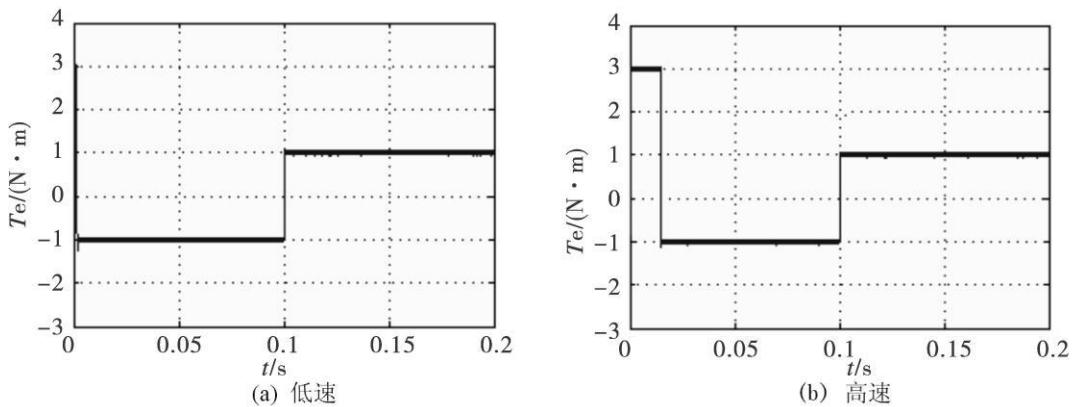


图 4 基于双曲正切函数的直接转矩控制转矩曲线

Fig 4 The torch of direct torch control based on hyperbolic tangent function

## 参考文献:

- [1] 李夙. 异步电机直接转矩控制 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1999 1- 4
- [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 1- 38
- [3] P. Pillay, R. Krishnan. Modeling, Simulation and Analysis of Permanent Magnet Motor Drives, Part I: The Permanent Magnet Synchronous Motor Drive [J]. IEEE Trans on Industry Applications, 1989, 25(2): 265- 273
- [4] R. J. Kekman, B. J. Seiba, T. M. Rowan and D. Schlegel. A new flux and stator resistance identifier for AC drive systems [J]. ZIEEE- IAS annual Meeting, Orlando, Florida, Oct 1995: 310- 318
- [5] 王玲芝, 李春茂, 刘军. 基于定子电阻补偿的 PM SM 直接转矩控制 [J]. 电气传动, 2007, 7(37): 18- 20
- [6] 黄志武, 阳阳光. 直接转矩控制定子电阻影响分析及在线补偿 [J]. 2008, 6(25): 292- 295, 303