

车用内置式永磁电动机转矩多参数统一控制方法*

吴志红¹ 武四辈¹ 朱元² 田光宇³

(1. 同济大学汽车学院, 上海 201804; 2. 同济大学中德学院, 上海 200092;

3. 清华大学汽车安全与节能国家重点实验室, 北京 100084)

【摘要】 提出采用多参数统一方法,把多个参数变化的特性综合到一个参数的变化上,用于在线实时更新永磁同步电动机转矩算法的控制参数。该参数统一方法基于电动机全状态实验同时结合实时转矩辨识控制策略在线补偿,充分考虑了电动机在磁场饱和时多个参数的非线性特性,经过实验验证,不仅实现了低速下的高精度最大转矩电流比控制,而且实现了高速弱磁下的高精度转矩控制,满足了电动汽车的应用要求。

关键词: 内置式永磁同步电动机 磁场饱和 多参数变化 转矩辨识 在线补偿

中图分类号: U463.33 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)06-0030-05

Torque Control Method of Multi-parameter Integrated for IPMSM in Vehicle

Wu Zhihong¹ Wu Sibe¹ Zhu Yuan² Tian Guangyu³

(1. School of Automotive Studies, Tongji University, Shanghai 201804, China

2. Chinese - German School for Postgraduate Studies, Tongji University, Shanghai 200092, China

3. State Key Laboratory of Automotive Safety and Energy, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract

Multi-parameter integrated control method was proposed. Multi-parameter variation's characteristics were integrated into one parameter to update the control parameters of torque algorithm real-timely. This multi-parameter integrated method was on the base of all states experiment of the motor and online search. It made full account of multi-parameter's nonlinear behavior. Experimental results verified that not only the precise torque control of maximum torque-per-ampere in the low speed, but also the precise torque control in the flux-weakening of high speed were carried out, which met the requirements of the electric vehicle applications.

Key words IPMSM, Magnetic saturation, Multi-parameter change, Torque identification, Online compensation

引言

永磁同步电动机具有效率高、能量密度高、起动转矩大等特点。随着铁钕永磁材料性能的日益提高以及矢量控制理论、高性能处理器大功率高开关速度的功率电子元器件的发展,使得永磁同步电动机的控制效果不断提高,现已广泛用于工业控制^[1]。

根据转子的结构,永磁同步电动机可分为面装

式和内置式两种,对于内置式结构,由于交、直轴电感的相等,产生了额外的磁阻转矩,提高了单位电流产生的转矩,使得它非常适合电动汽车的要求,成为电动汽车的首要选择^[2]。为了充分利用磁阻转矩,提高电动机运行的效率,减小逆变器输出容量,在恒转矩范围内,最大转矩/电流(MTPA)控制方法被广泛采用^[1,3]。

传统的MTPA控制算法在工程中是采用查表的方法来完成,具体是设定电动机的各个参数然后

计算每个定子电流 i_s 对应的最佳直、交轴电流分量 i_d 和 i_q , 对电动机的转矩和转速进行控制。

然而, 在运行过程中电动机的参数将随运行工况而变化, 如电流的饱和等因素, 而最大转矩电流比控制与电动机的实际参数有关^[2,4-6], 为了得到最佳的控制效果, 需对电动机参数进行在线辨识^[7-8]。实时辨识的参数结果与预先计算存储的表格所用的参数不完全一致, 所以无法利用查表法来进行控制; 实时计算由于计算复杂度的原因又是不可完成的, 所以有些学者提出以多项式拟合的方法或其他线性函数^[1]来近似替代最优电流算法, 该类方法简化了计算过程, 但却降低了精度^[3], 最重要的是曲线拟合方法不能解决高速弱磁时的情况, 只能解决低速下的转矩控制。

本文提出一种考虑参数变化的最大转矩电流比控制方法, 该方法把电动机的所有参数的变化综合到交轴电感上, 然后根据交轴电流来更新交轴电感, 实现高精度的实时转矩辨识, 从而在线补偿交轴电流。最后在电动机实验台架上进行验证。

1 固定参数最大转矩电流比控制

在忽略铁芯饱和、不计涡流和磁滞损耗、假设三相电流对称、永磁材料电导率为零、转子无阻尼绕组的情况下, 可得到永磁同步电动机在 dq 坐标系下的数学模型^[1]。

电压方程为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q \\ u_q = Ri_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d \end{cases} \quad (1)$$

定子交、直轴磁链方程为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩方程

$$T_e = 1.5 p_n [\psi_f + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad (3)$$

式(3)中 u_d, u_q ——直轴、交轴电压

i_d, i_q ——直轴、交轴电流

L_d, L_q ——定子绕组直轴、交轴电感

R ——定子绕组相电阻

p_n ——电动机极对数

ψ_f ——转子永磁体磁链

式中的第二项是由转子凸极效应引起的磁阻转矩, 在内置式永磁同步电动机组成的驱动系统中, 可以有效地利用这个磁阻转矩。

永磁同步电动机的 dq 轴电流合成空间电流 i_s 为

$$i_s = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (4)$$

i_s 模的最大值受到逆变器容量的限制, 最大转矩/电流控制即在约束条件 T_e 不变的情况下, 计算 i_s 的最小值, 以减少逆变器的输出电流, 同时减小损耗。下面推导传统固定参数的 MTPA 控制算法:

将式(3)代入式(4)中得

$$i_s^2 = i_d^2 + \left\{ \frac{T_e}{1.5 p_n [\psi_f + (L_d - L_q) i_d]} \right\}^2 \quad (5)$$

对式(5)求导且令其等于零, 得

$$\frac{di_s^2}{di_d} = 2i_d + \frac{2T_e}{1.5 p_n [\psi_f + (L_d - L_q) i_d]} - \frac{-1.5 T_e p_n (L_d - L_q)}{\{1.5 p_n [\psi_f + (L_d - L_q) i_d]\}^2} = 2i_d - \frac{2T_e^2 (L_d - L_q)}{(1.5 p_n)^2 [\psi_f + (L_d - L_q) i_d]^3} = 0 \quad (6)$$

这样, 得到了给定 T_e 下的 MTPA 直轴电流分量满足

$$[(L_d - L_q) i_d + \psi_f]^3 i_d = \frac{4 T_e^2 (L_d - L_q)}{9 p_n^2} \quad (7)$$

即

$$(L_d - L_q)^3 i_d^4 + 3(L_d - L_q)^2 \psi_f i_d^3 + 3(L_d - L_q) \psi_f^2 i_d^2 + \psi_f^3 i_d - \frac{4 T_e^2 (L_d - L_q)}{9 p_n^2} = 0 \quad (8)$$

当式中给定一个转矩命令后, 即为含有 4 个根的 4 阶方程, MTPA 算法中 i_d 为其中的负实根, 正根和共轭复根都舍弃。这样就能在任意给定转矩命令的情况下, 根据 MTPA 算法, 计算出相应的直轴和交轴电流命令 i_d, i_q , 这就是通常固定参数的 MTPA 算法。图 1 所示为电动机传统固定参数的 MTPA 轨迹。

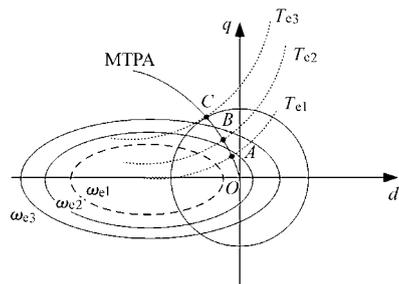


图 1 最大转矩/电流控制轨迹

Fig. 1 Control trajectory of MTPA

2 电动机磁场饱和和参数变化

在电动机运行中, 由于磁场饱和及温度变化等因素的影响, 电动机参数将随着运行状态而变化, 为了更加有效地对电动机进行控制, 需要对参数进行在线辨识^[6,9]和实时校正, 这样才能使电动机运行性能得到保证。

图 2 是使用有限元方法分析出来的交、直轴电

感随交、直流电流的变化规律,另外永磁体的磁通也受到磁场饱和的影响而变化,由于永磁体的变化还受到温度和弱磁的影响,所以本文有限元分析没有将其列入。在此列出交、直流电感的变化仅说明在磁场饱和时电动机的参数发生变化的规律,并不用于控制,具体的控制算法,下文将详细阐述。

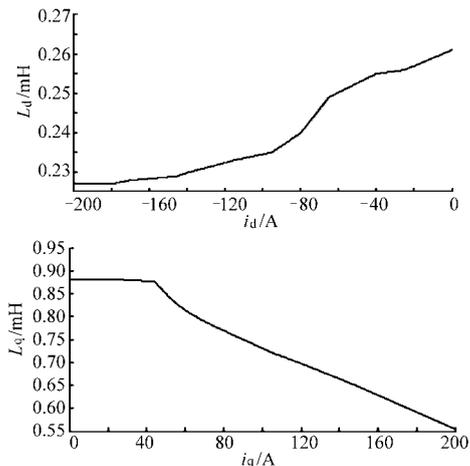


图2 直轴、交轴电感随电流变化曲线

Fig. 2 L_d, L_q vs i_d, i_q

3 考虑磁场饱和的最大转矩电流比控制

3.1 电动机的全状态实验

进入弱磁控制之前,在一个比较低的转速下做电动机的全状态实验(实验转速控制在 200 r/min 匀速),步骤如下:

(1) 设定 $i_d = -10$ A, 从零逐渐加大 i_q , 即 i_q 为 10, 20, ..., 200 A, 记录各实验点转矩测量值 T_e 和电动机定子绕组相电流的有效值。

(2) 改变设定值 $i_d = -20$ A, 重复(1)中的实验,直至 i_q 设定值达到 200 A 时为止,同样记录各实验点的转矩测量值和电动机定子绕组相电流的有效值。

(3) 重复前面的实验,直到给 $i_d = -200$ A, $i_q = 200$ A, 同样记录各实验点的转矩测量值和电动机定子绕组相电流的有效值。

根据 400 组实验数据,找出转矩分别为 10, 20, 30, ..., 150 N·m 输出时的电动机相电流有效值最小的 i_d, i_q , 如图 3 所示,图中 $\beta = \arctan(-i_q/i_d)$ 。这样就能根据这 15 组转矩值找到对应的 MTPA, 即设定转矩命令值,可以找到对应的 i_d, i_q , 这时把 L_d 和 ψ_f 设定为额定值,计算出 L_q , 需要说明的是,虽然在电动机饱和时,电动机参数除 L_q 发生较大变化外, L_d 和 ψ_f 也会变化,本算法虽然把 L_d 和 ψ_f 固定,其实这两个参数的变化已经完全综合到 L_q 中,也就是这时的 L_q 不单包含它自身的变化也包含其他参数的变化,将其定为参数 L'_q 。

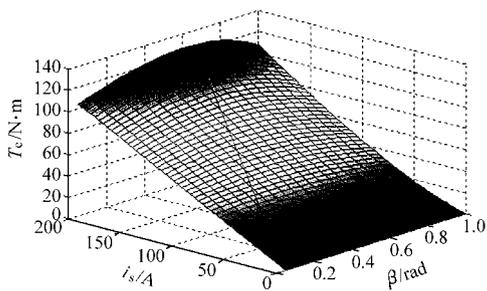


图3 实验得到的 MTPA

Fig. 3 MTPA trajectory by experiment

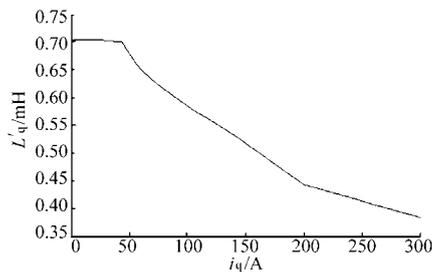


图4 实验得到的 L'_q 随 i_q 变化规律

Fig. 4 Relationship between L'_q and i_q in experiment

3.2 在线补偿控制算法

本文控制算法中电流命令 i_d^* 包含根据转矩命令由 MTPA 轨迹查表得到的 i_d 和弱磁环节的电流 i_{d_fw} , 在进入弱磁控制前,此值一直保持为零。这样在控制器中根据设定的转矩命令查表得到 i_d , 由弱磁环节得到弱磁电流 i_{d_fw} , 则电流命令 $i_d^* = i_d + i_{d_fw}$ 。然后根据转矩公式

$$i_q = \frac{T_e^*}{1.5p_n[\psi_f + (L_d - L_q)i_d^*]} \quad (9)$$

得到此转矩给定下的 q 轴电流 i_q 。

上文中查表的 MTPA 轨迹曲线由实验方法得到,因此这些状态不仅仅考虑了 q 轴电感的非线性,也考虑了 d 轴电感和永磁体磁通的变化,但由于 q 轴电感的变化最大,本方法将其他变化小的参数的非线性一并综合到 q 轴电感的变化中。

转矩实时辨识在线补偿控制算法如图 5 所示,其中 Δi_q 为转矩命令值 T_e^* 与转矩估计值 \hat{T}_e 比较,然后采用 PI 控制器和低通滤波器得到 Δi_q 。图 4 的转矩估计 \hat{T}_e 为

$$\hat{T}_e = 1.5p_n[\psi_f i_q + (L_d - L'_q)i_d i_q] \quad (10)$$

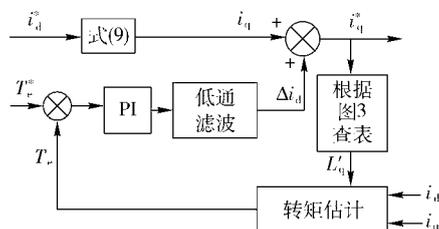


图5 在线补偿控制算法框图

Fig. 5 Diagram of online compensation algorithm

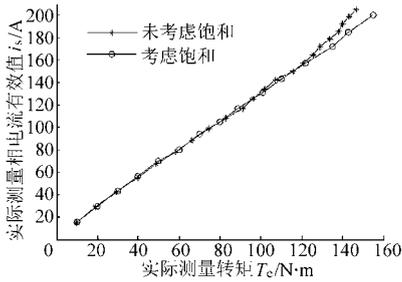


图10 本文方法和固定参数的MTPA有效电流对比

Fig. 10 Current RMS comparison with the proposed method and fixed parameter

制方法,可以根据参数的变化和电磁转矩命令,相应地来调整直轴电流,同时根据非线性的交轴电感来通过转矩实时辨识在线补偿得到交轴电流,由上面的实验验证可以看到本文的方法不仅在电动机的全工作范围能取得高的转矩精度,而且相比固定参数

的MTPA在磁场饱和区域实现相同的转矩需要的有效电流更小,即更接近真实的MTPA。

5 结论

(1) 提出并实现了一种基于多参数统一方法的内置式永磁同步电动机精确转矩方法,在电动机磁场饱和和多参数变化的情况下,依然能保持高的转矩控制精度。

(2) 采用本文参数变化的MTPA控制策略比固定参数MTPA策略在电动机磁场饱和时相同的电流能得到更大的电磁转矩,提高了电动机的工作效率。

(3) 对于不同的电动机,其饱和程度不同,参数变化特性也不同,需对不同电动机进行单独实验得到参数特性,然后应用提出的参数补偿方法来进行转矩控制。

参 考 文 献

- 王成元,夏加宽,杨俊友,等. 电动机现代控制技术[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- 许家群,朱建光,邢伟,等. 电动汽车驱动用永磁同步电动机系统效率优化控制研究[J]. 电工技术学报,2004,19(7): 81~84.
Xu Jiaqun, Zhu Jianguang, Xing Wei, et al. Study of efficiency optimization control of permanent magnet synchronous motor drives for electric vehicle [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(7): 81~84. (in Chinese)
- 郭庆鼎,陈启飞,刘春芳. 永磁同步电动机效率优化的最大转矩电流比控制方法[J]. 沈阳工业大学学报,2008,30(1): 1~5.
Guo Qingding, Chen Qifei, Liu Chunfang. Efficiency optimization control of PMSM based on maximum ratio of torque to current [J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2008, 30(1): 1~5. (in Chinese)
- 胡筋,罗应立,李志强,等. 永磁电动机不同运行条件下的损耗研究[J]. 电动机与控制学报,2009,13(1): 11~16.
Hu Jia, Luo Yingli, Li Zhiqiang, et al. Investigation of losses in permanent magnet synchronous motor under different operation conditions [J]. Electric Machines and Control, 2009, 13(1): 11~16. (in Chinese)
- 程树康,于艳君,柴凤,等. 内置式永磁同步电动机电感参数的研究[J]. 中国电机工程学报,2009,29(18): 94~99.
Cheng Shukang, Yu Yanjun, Chai Feng, et al. Analysis of the inductances of interior permanent magnet synchronous motor [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(18): 94~99. (in Chinese)
- 任雷,崔芮华,王宗培,等. 永磁同步电动机绕组电感的饱和和效应[J]. 电工技术学报,2000,15(1): 21~25.
Ren Lei, Cui Ruihua, Wang Zongpei, et al. Saturation effect of PMSM windings inductance [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(1): 21~25. (in Chinese)
- Bolognani S, Petrella R, Prearo A, et al. Automatic tracking of MTPA trajectory in IPM motor drives based on AC current injection [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2010, 47(1): 105~114.
- Mohamed Y A R I, Lee T K. Adaptive self-tuning MTPA vector controller for IPMSM drive system [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, 21(3): 636~644.
- Hyunbae Kim, Hartwig J, Lorenz R D. Using on-line parameter estimation to improve efficiency of IPM machine drives [C] // 2002 IEEE 33rd Annual Power Electronics Specialists Conference, 2002. PESC'02., 2002, 2: 815~820.
- Sebastian T. Temperature effects on torque production and efficiency of PM motors using NdFeB magnets [J]. IEEE Transactions on Industrial Applications, 1995, 31(2): 353~357.
- 朱焜秋,左文全,吕艳博,等. 密封泵中无轴承永磁同步电动机的试验研究[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(6): 471~476.
Zhu Huangqiu, Zuo Wenquan, Lü Yanbo, et al. Experiment research on bearingless permanent magnet synchronous motor in canned pump [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(6): 471~476. (in Chinese)