

基于改进自适应扰动观测的最大转矩电流比控制

高剑¹,周旺^{1†},张文娟²,黄守道¹

(1. 湖南大学 电气与信息工程学院,湖南 长沙 410082;

2. 长沙学院 电子信息与电气工程学院,湖南 长沙 410022)

摘要:针对内置式永磁同步电机(IPMSM)的最大转矩电流比控制(MTPA)受电机参数变化影响的问题,提出一种改进的自适应扰动观测的 MTPA 控制策略.该方法以定子电流矢量角作为扰动量,比较控制系统前后两个时刻的电流幅值大小,确定搜索方向.将自适应 PI 控制融入扰动观测法中,跟踪系统随机选择相应的扰动步长,解决动稳态性能,提高精度和系统运行效率,克服传统 MTPA 控制方法对电机参数依赖性、提高系统整体效率优化和电流矢量角搜索精度.考虑外界因素对电感和磁链等参数变化的影响,得到内置式永磁电机(IPMSM)dq 轴下最优电流矢量角.仿真和试验结果表明,所提方法具有一定的有效性.

关键词:内置式永磁同步电机;最大转矩电流比控制;扰动观测;搜索精度

中图分类号:TM351

文献标志码:A

Maximum Torque Per Ampere Current Control Based on Improved Adaptive Disturbance Observation

GAO Jian¹,ZHOU Wang^{1†},ZHANG Wenjuan²,HUANG Shoudao¹

(1.College of Electrical and Information Engineering,Hunan University,Changsha 410082,China

2. College of Electronic Information and Electrical Engineering,Changsha University,Changsha 410022,China)

Abstract: Aiming at the problem that the Maximum Torque Per Ampere (MTPA) current control of the Interior Permanent Magnet Synchronous Motor (IPMSM) is affected by the change of motor parameters, this paper proposes an improved adaptive disturbance observation MTPA control strategy. This method uses the stator current vector angle as the disturbance, and compares the current amplitudes before and after the control system to determine the search direction. By integrating adaptive PI control into the disturbance observation method, the tracking system randomly selects the corresponding disturbance step length, thus this method solves the dynamic and steady-state performance, improves the accuracy and system operation efficiency, overcomes the traditional MTPA control method's dependence on motor parameters, and improves the overall efficiency of the system. In addition to the search accuracy of the current vector angle, this paper considers the influence of external factors on the changes of parameters such as inductance and flux linkage to obtain the optimal current vector angle under the dq axis of the built-in permanent magnet

* 收稿日期:2020-08-26

基金项目:国家基础研究项目(JCKY2019110D012),National Basic Research Project(JCKY2019110D012)

作者简介:高剑(1979—),男,湖南长沙人,湖南大学副教授,博士生导师

† 通信联系人,E-mail:zhouwang2018@hnu.edu.cn

motor(IPMSM). The simulation and test results show the effectiveness of the proposed method.

Key words: interior permanent magnet synchronous motor(IPMSM); maximum torque per Ampere current control(MTPA); disturbance observation; search accuracy

近年来,内置式永磁同步电机(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)以其功率密度高、效率高和调速范围宽等优点在汽车电驱动系统、工业机器人及新能源分布式发电等重要工业领域得到广泛应用.不同于表贴式永磁同步电机,内置式永磁同步电机本身具有凸极性,输出转矩包含磁阻转矩.为充分利用磁阻转矩,提高电机运行效率,最大转矩每安培电流控制(Maximum Torque Per Ampere current control, MTPA)^[1]诞生并在领域内受到了广泛的关注.

MTPA 是以铜损最小化为目标,实现最小电流下输出转矩最大化.当前的基本方法主要分为两大类:第一类是基于电机模型的控制算法.它包括公式法,即利用电机系统本身的参数,如磁链、定子电阻和电感等,通过非线性数学模型直接计算 dq 轴电流.然而电机本身参数众多(包括永磁体磁链、定子 dq 轴电感和定子电阻等),并且很容易受到周围环境的影响,如温度升高、磁饱和等因素造成直接用模型计算存在较大偏差,上述方法的准确性受到了很大影响.文献[2]通过迭代对转矩电流曲线进行分段拟合,但始终依赖于模型参数.文献[3]注入高频电压信号辨识 dq 轴电感,通过标幺化处理结合查表法改善磁饱和效应对电感参数的影响,然而查表需要大量的实验测定,增加工作的复杂性.文献[4-6]基于模型参考自适应对磁链和电感参数在线进行辨识,采用 Popov 超稳定性理论模型对自适应规则进行分析和设计.文献[7-8]对在线参数辨识精度问题进行深入研究,消除逆变器非线性因素影响,但辨识收敛速度问题一直未得到有效解决.

第二类是不依赖于电机参数的 MTPA 控制,它主要是通过相关搜索算法在线搜索出最优电流矢量角.文献[9]将二阶 Newton-Raphson 自动搜索法和三维表结合搜索电流角,但构建表格十分繁杂,增加标定等工作细节.文献[10-11]提出了基于扰动观测法的 MTPA 控制策略,通过在线扰动电流角度,可以实时获得控制对应的电流角度,但扰动步长难以选择,系统的动态响应性能和稳态性能难以兼得,扰动步

长的选择没有得到解决.文献[12]采用直接计算法与扰动观察法相结合,通过确定搜索区间范围减少角度波动性.文献[13-14]为消除稳态矢量角度的振荡问题,结合常规 PI 控制器对零稳态误差的跟踪,提出自适应变步长扰动观测法.文献[15]引进 PI 控制调节与搜索相结合,提高自适应性.

本文基于第二类基本控制方法,通过对 IPMSM 在线预测下一刻定子电流幅值,比较控制系统前后两个时刻的电流幅值大小,从而对电流矢量角度施加扰动,确定搜索方向.本文将自适应 PI 控制融入扰动观察法中,它能跟踪系统运行,随机选择相应的扰动步长,既克服了传统方法对电机参数的依赖性问题,又提高了系统运行效率和最终搜索所得的最优定子电流矢量角精确性.最后本文通过仿真和试验验证了该方法的有效性.

1 PMSM 模型

本文以永磁同步电机为载体,为了便于分析,作如下基本假设:

- 1) 磁场空间分布为正弦分布,忽略磁滞和涡流现象.
- 2) 考虑影响电机电感和磁链等参数的外界因素并统一化.
- 3) 其他线路和控制系统人工和非自身引起的因素均忽略.

则永磁同步电机 dq 坐标系下定子电压动态方程可表示为.

$$\begin{cases} u_d = R_0 i_d + L_d p i_d - \omega_e L_q i_q \\ u_q = R_0 i_q + L_q p i_d + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u_d 、 u_q 、 i_d 和 i_q 分别为定子 dq 坐标系下电压和电流, L_d 和 L_q 为 dq 轴下电感, p 代表 $\frac{d}{dt}$, 表示微分算子, R_0 为定子电阻, ψ_f 为永磁体转子磁链, ω_e 为转子角速度.

本文考虑电机凸极情况,即 dq 轴电感不相等,对(1)进行变换可得出最终的数学模型如下:

$$\begin{cases} p i_d = \frac{u_d}{L_d} - \frac{R_0 i_d}{L_d} + \frac{L_q}{L_d} \omega_e i_q \\ p i_q = \frac{u_q}{L_q} - \frac{R_0 i_q}{L_q} - \frac{L_d}{L_q} \omega_e i_d - \frac{\omega_e \psi_f}{L_q} \end{cases} \quad (2)$$

1.1 MTPA 控制原理

在永磁同步电机调速系统中,其运动模型可表示为

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

式中: T_e 为电磁转矩, P_n 为永磁体极对数.

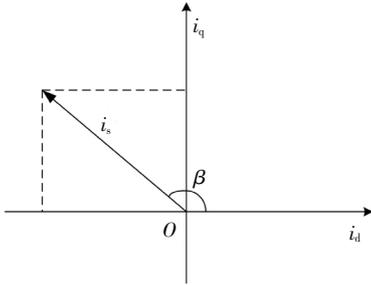


图1 dq轴坐标系下定子电流示意图

Fig.1 Schematic diagram of stator current in dq axis coordinate system

根据图1关系曲线,

$$\begin{cases} i_d = i_s \cos \beta \\ i_q = i_s \sin \beta \end{cases} \quad (4)$$

式中: i_s 为定子电流矢量, β 为矢量角(定子电流矢量方向角).

将(4)代入(3)中,可得输出方程为

$$T_e = \frac{3}{2} P_n i_s [\psi_f \sin \beta + \frac{1}{2} (L_d - L_q) i_s \sin 2\beta] \quad (5)$$

对于MTPA控制来说,关键在于求出最优矢量角,在电磁转矩对电流角的变化区间内寻找到极小值,即对式(5)求偏导并使其等于0.

$$\frac{\partial T_e}{\partial \beta} = \frac{3}{2} P_n i_s [\psi_f \cos \beta + (L_d - L_q) i_s \cos 2\beta] = 0 \quad (6)$$

$$\beta_{\min} = \arccos \frac{\psi_f + \sqrt{\psi_f^2 + 8(L_d - L_q)^2 i_s^2}}{4(L_d - L_q) i_s} \quad (7)$$

由图1所示, β 的取值范围为 $(0^\circ, 180^\circ)$, 引入凸极率, 即

$$\lambda = \frac{L_d}{L_q} \quad (8)$$

而 λ 的取值范围为 $(0, 1)$, L_d 恒小于 L_q (此处考虑内置式情况), 将式(8)代入式(6)中, 可知 β 的取值范围为 $(90^\circ, 180^\circ)$, 对比式(6), $\psi_f \cos \beta$ 为负数, $(L_d - L_q) i_s$ 也为负数, 即 $\cos 2\beta$ 为负数, 则 β 的取值范围为 $(90^\circ, 135^\circ)$ [16].

1.2 扰动观测

但上式求解出的电流角与dq轴电感、永磁体磁链直接相关, 在外界因素发生变化(温度上升或下降、磁饱和等)时, 这些参数容易受到影响. 为了摆脱这些参数的影响, 文献[17]提出了一种基于扰动观测的搜索方法.

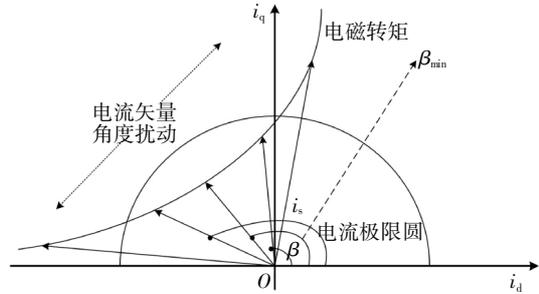


图2 定子矢量电流扰动状况

Fig.2 Current disturbance condition

基于扰动观测的搜索法将前后时刻定子电流幅值的大小比较作为扰动判断, 对矢量角增加或者减少扰动以此寻找到最大电磁转矩电流比下对应的矢量角 β . 由图2可知, 将电流矢量 i_s 和其对应的角度 β 离散化, 在 k 时刻和 $k+1$ 时刻分别记为 $i_s(k)$ 、 $i_s(k+1)$ 、 $\beta(k)$ 和 $\beta(k+1)$, 具体分为如下四种状况.

1) 当 $\beta(k) < \beta_{\min}$, 且 $k+1$ 时刻矢量角有减小趋势(向减小方向扰动), 即 $\beta(k) > \beta(k+1)$, 对照图2电流矢量大小可知 $i_s(k) < i_s(k+1)$, 因此应该增大电流矢量角 β .

2) 当 $\beta(k) < \beta_{\min}$, 且 $k+1$ 时刻矢量角有增大趋势(向增大方向扰动), 即 $\beta(k) < \beta(k+1)$, 对照图2电流矢量大小可知 $i_s(k) > i_s(k+1)$, 因此应该增大电流矢量角 β .

3) 当 $\beta(k) > \beta_{\min}$, 且 $k+1$ 时刻矢量角有增大趋势(向增大方向扰动), 即 $\beta(k) < \beta(k+1)$, 对照图2电流矢量大小可知 $i_s(k) < i_s(k+1)$, 因此应该减小电流矢量角 β .

4) 当 $\beta(k) > \beta_{\min}$, 且 $k+1$ 时刻矢量角有减小趋势(向减小方向扰动), 即 $\beta(k) > \beta(k+1)$, 对照图2电流矢量大小可知 $i_s(k) > i_s(k+1)$, 因此应该减小电流矢量角 β .

综合上述4种情况可实现基于扰动观测的搜索法, 其逻辑图如图3所示, 根据图3便可以实现最大转矩电流比控制.

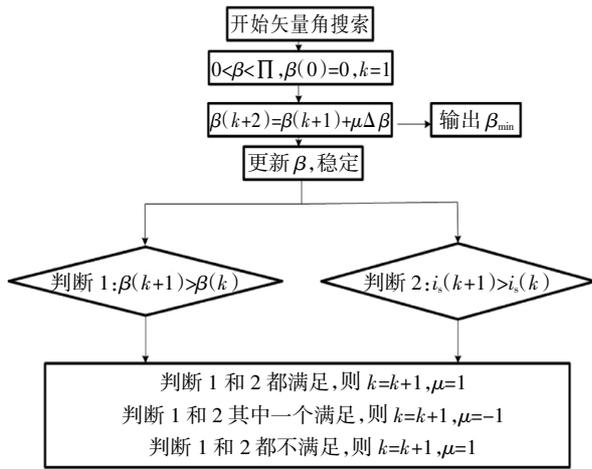


图 3 扰动观测法搜索控制逻辑图
Fig.3 Disturbance observation method search control logic diagram

1.3 预测

对于 $k+1$ 时刻, 本文采用电机 dq 轴电压来预测电流^[8], 数字化系统的同时还可以维持开关频率恒定, 提高动态响应. 由式(2)可知, 当电机稳定运行时, 如下所示:

$$\begin{cases} u_d = R_0 i_d + \omega_e L_q i_q \\ u_q = R_0 i_q + \omega_e (L_d i_d + \psi_f) \end{cases} \quad (9)$$

在大多数内置式永磁同步电机中, 电感和磁链与定子电流有关, 根据式(9)可以得到

$$\begin{cases} L_d - L_q = \frac{u_d - R_0 i_d}{\omega_e i_q} + L_d \\ \psi_f = \frac{u_q - R_0 i_q}{\omega_e} - L_d i_d \end{cases} \quad (10)$$

结合式(5)和(10), 可以得到

$$T_e = \frac{3}{2} P_n i_s \left[\frac{u_q i_s \sin \beta + u_d i_s \cos \beta}{\omega_e} \right] \quad (11)$$

已知转矩和转速的乘积为功率, 即

$$P = T_e \omega_e \quad (12)$$

假定定子电阻 R_0 不变, 则

$$\frac{3P}{2P_n} = i_s (u_q \sin \beta - u_d \cos \beta) - R_0 i_s^2 \quad (13)$$

式中: P 为电机的功率.

根据稳态下功率与电压、电流关系

$$P = i_s (u_q \sin \beta + u_d \cos \beta) \quad (14)$$

联立式(13)和(14), 求导可知

$$\frac{di_s}{d\beta} = \frac{u_d \sin \beta (a+1) - u_q \cos \beta (a-1)}{R_0} \quad (15)$$

式中: $a = \frac{2}{3P_n}$, 为一恒定常数.

将式(15)离散化, 可得到电流预测方程为

$$i_s(k+1) = i_s(k) + \Delta\beta_{ref} \left[\frac{(a+1)u_d(k)\sin\beta(k)}{R_0} - \frac{(a-1)u_q(k)\cos\beta(k)}{R_0} \right] \quad (16)$$

从上述预测方程可知, 该方程不含 dq 轴电感和永磁体磁链等参数, 和其他预测相比较可以避免这些参数因外界因素变化而影响系统电流矢量角精确性.

由于原扰动观测法的扰动步长很难确定, 本文加一 PI 控制器^[12-13], 在 $10 \mu s$ 内, 若电流矢量变化小, 则 PI 控制器输出的扰动步长 $\Delta\beta_{ref}$ 就小, 稳态波动也随之得到改善; 若电流矢量变化大, 则 PI 控制器输出的扰动步长 $\Delta\beta_{ref}$ 就大, 提高了 MTPA 电流追踪能力.

综上所述, 如图 4 所示.

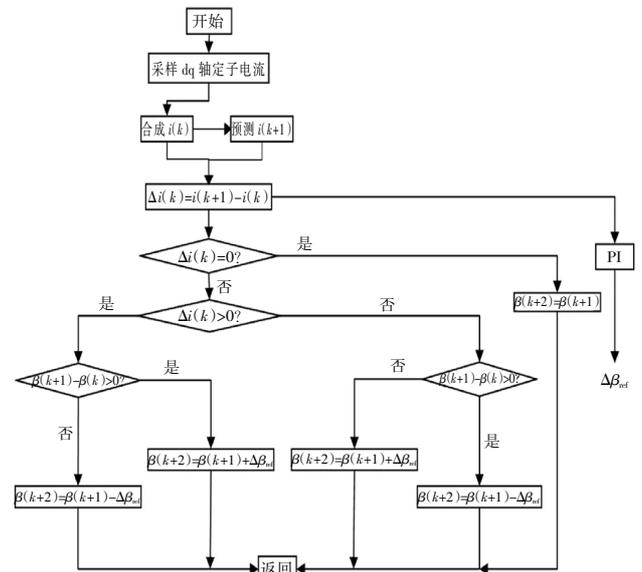


图 4 改进扰动观测 MTPA 控制流程图

Fig.4 Improved disturbance observation MTPA control flow chart

2 仿真及试验

为验证该改进算法的控制性能, 本文使用 Matlab/Simulink 进行仿真研究, 使用 1.5 kW 试验样机进行实际调试. 控制系统结构框图如图 5 所示.

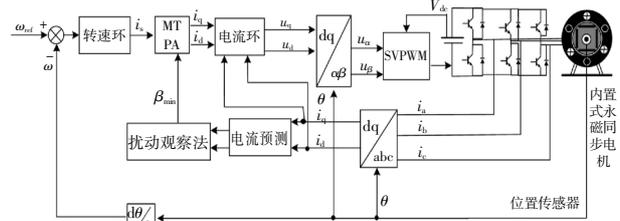


图 5 永磁同步电机矢量控制结构框图

Fig.5 The vector control structure block diagram of permanent magnet synchronous motor

电流环和转速环均采用PI进行调控,试验及仿真所用参数如表1所示.

表1 仿真及试验参数

Tab.1 Simulation and experimental parameters

参数	数值
额定功率/W	1 500
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 000
额定转矩/(N·m)	4.7
额定电流/A	2.7
额定电压/V	311
极对数	4
转动惯量/(kg·m ²)	0.000 2

首先,系统处于空载状态,由图6知,变步长自适应MTPA波动比较小,稳态时定子电流矢量角度维持在(111.9°,112.9°),波动幅度小于1°.另外,如图中虚线所示,直接公式计算法计算出的精度约为115°,而改进的扰动观测法搜索得出的角度十分接近于真实角,最大误差不超过1.67%,说明该方法精确度较高.

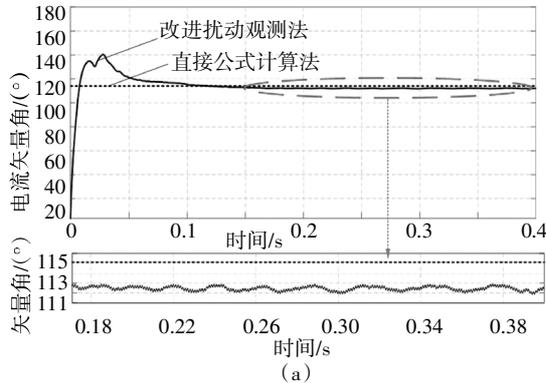


图6 改进扰动观测MTPA最优矢量角搜索图

Fig.6 Improved MTPA optimal vector angle search graph for disturbance observation

其次,本文从电流动态波形验证模型参数对该方法的影响.最初将d轴电感设置为5.25mH,q轴电感设置为12mH,永磁体磁链设置为0.184Wb,图7即为定子电流在该参数设定下波形.

图8将q轴电感增大1.5倍,电流矢量维持在30A上下波动,精确度几乎未受到影响.

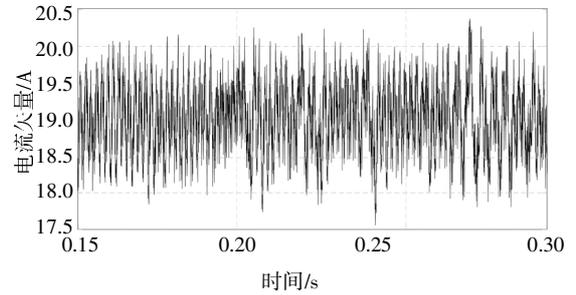


图7 定子电流总矢量

Fig.7 Total stator current vector

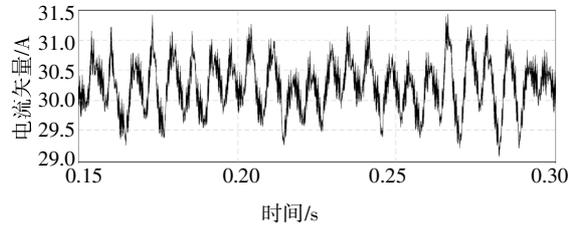


图8 Lq变化下定子电流总矢量

Fig.8 Total stator current vector under Lq change

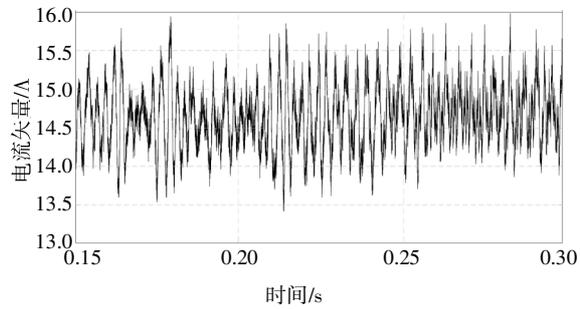


图9 Ld变化下定子电流总矢量

Fig.9 Total stator current vector under Ld change

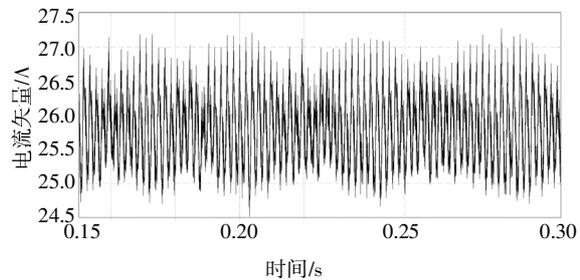
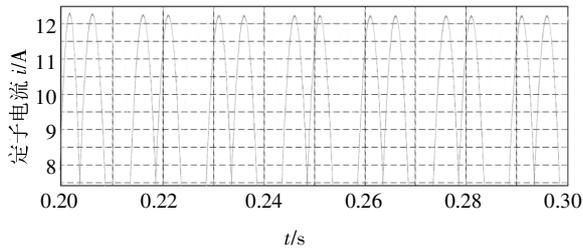


图10 Psi_f变化下定子电流总矢量

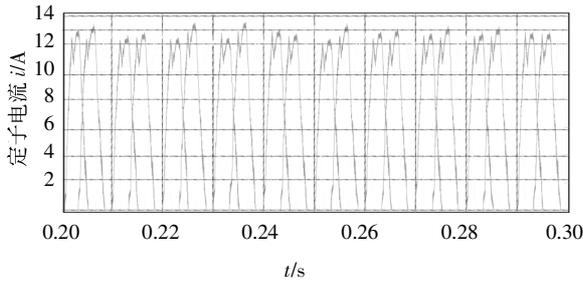
Fig.10 Total stator current vector under Psi_f change

同理,图9将d轴电感增大1.5倍,将磁链也增大1.5倍.图8、图9和图10表明电机参数变化对该

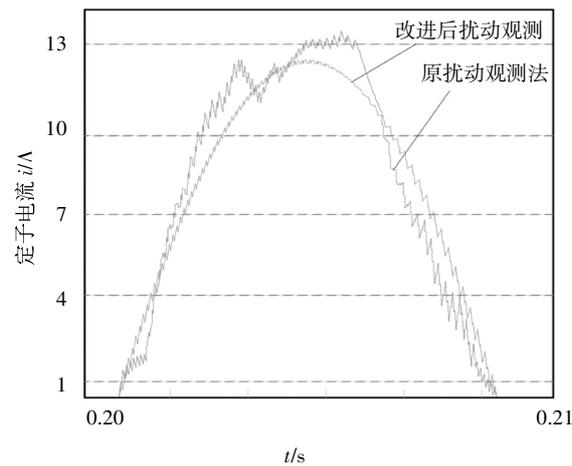
方法精度几乎没有影响。



(a) 自适应改进后扰动观测下三相电流



(b) 原扰动观测下三相电流



(c) 两方法同一时刻单峰电流对比

图 11 三相电流

Fig.11 Three-phase current

对于改进后扰动观测, 本文还对比了改进前后系统整体效率, 从同一负载、相同电压条件下, 由图 11(a)(b)看出改进后三相电流取值在(12 A, 12.5 A)内, 改进前的电流幅值超过 13 A, 证明采用本文所提出的方法后系统运行效率得到改善。

最后, 本文还将改进后的扰动观测法应用在 $i_d = 0$ 控制方法上, 该方法依旧效果较好, 结果接近于 90° , 波动约为 1.2° , 如图 12 所示, 但在同样情况下, 该方法应用在 MTPA 控制的效率更好, 定子矢量电流角搜索精度更高。

从以上图中可以看出, 永磁同步电机在整个运行过程中效率高, 动态性能好, 电流矢量角搜索精度

高, 且几乎不受电机本身参数影响。

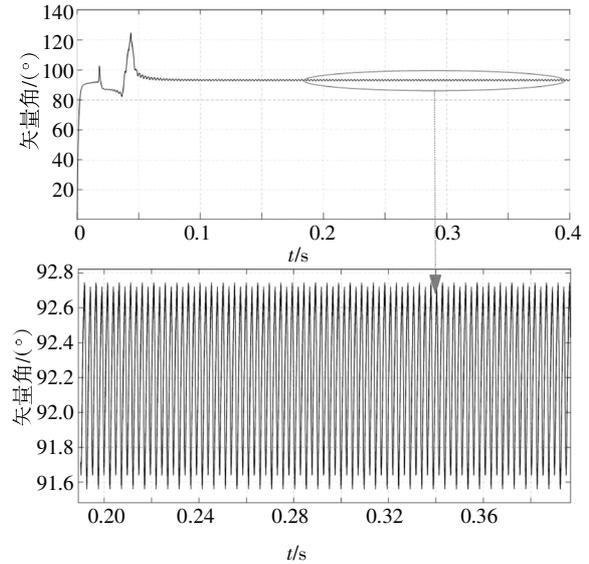


图 12 改进扰动观测 $i_d = 0$ 最优矢量角搜索图

Fig.12 Improved $i_d = 0$ optimal vector angle search graph for disturbance observation

3 结 论

本文提出了一种基于改进自适应扰动观测的最大转矩电流比控制方法, 通过试验和仿真得出如下结论:

- 1) 自适应变步长解决了 MTPA 稳定精度问题。
- 2) 改进后方法与传统方法相比较, 系统的运行效率得到明显的提高。

3) 和预测控制相结合兼顾了系统的静、动态性能, 解决了传统方法对电机本身参数的依赖性问题。

基于改进自适应扰动观测的最大转矩比电流控制方法将电流预测和自适应控制与扰动观察法结合, 并用试验和仿真验证了其有效性。

参考文献

[1] 李翀元. 基于参数自修正的永磁同步电机最大转矩电流比控制 [D]. 天津: 天津工业大学, 2019.

[2] 张文娟, 冯焱径, 黄守道, 等. 基于迭代法的内置式永磁同步电机最大转矩/电流控制 [J]. 电工技术学报, 2013, 28(S2): 402—407.

ZHANG W J, FENG Y J, HUANG S D, *et al.* The maximum torque per ampere control of permanent magnet synchronous motor based on iterative method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(S2): 402—407. (In Chinese)

[3] LI K, WANG Y. Maximum torque per ampere (MTPA) control for

- IPMSM drives using signal injection and an MTPA control law[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, 15(10):5588—5598.
- [4] LI K, WANG Y. Maximum torque per ampere (MTPA) control for IPMSM drives based on a variable-equivalent-parameter MTPA control law [J]. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2019, 34(7):7092—7102.
- [5] 李垣江,董鑫,魏海峰,等. 基于改进模型参考自适应系统的永磁同步电机参数辨识[J]. *控制理论与应用*, 2020, 37(9):1983—1988.
LI Y J, DONG X, WEI H F, *et al.* Parameter identification method of permanent magnet synchronous motor based on improved model reference adaptive system [J]. *Control Theory & Applications*, 2020, 37(9):1983—1988. (In Chinese)
- [6] 张仑仑. 永磁同步电机参数辨识与自适应控制研究 [D]. 西安:西安工业大学, 2019.
ZHANG L L. Research on parameter identification and adaptive control of permanent magnet synchronous motor [D]. Xi'an: Xi'an Technological University, 2019. (In Chinese)
- [7] 李峰,夏超英. 考虑磁路饱和的 IPMSM 电感辨识算法及变参数 MTPA 控制策略[J]. *电工技术学报*, 2017, 32(11):136—144.
LI F, XIA C Y. Inductance identification algorithm and variable-parameters MTPA control strategy for IPMSM considering magnetic circuit saturation [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(11):136—144. (In Chinese)
- [8] 吴春,赵宇纬,孙明轩. 采用测量电压的永磁同步电机多参数在线辨识[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(13):4329—4340.
WU C, ZHAO Y W, SUN M X. Multiparameter online identification for permanent magnet synchronous machines using voltage measurements[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(13):4329—4340. (In Chinese)
- [9] 康劲松,王硕. 基于 Newton-Raphson 搜索算法的永磁同步电机变电感参数最大转矩电流比控制方法 [J]. *电工技术学报*, 2019, 34(8):1616—1625.
KANG J S, WANG S. Newton-raphson-based searching method for variable-parameters inductance maximum torque per ampere control used for IPMSM [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2019, 34(8):1616—1625. (In Chinese)
- [10] LEE D, KIM J W, LEE C G, *et al.* Variable mesh adaptive direct search algorithm applied for optimal design of electric machines based on FEA[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*, 2011, 47(10):3232—3235.
- [11] 刘邦银,段善旭,刘飞,等. 基于改进扰动观察法的光伏阵列最大功率点跟踪[J]. *电工技术学报*, 2009, 24(6):91—94.
LIU B Y, DUAN S X, LIU F, *et al.* Photovoltaic array maximum power point tracking based on improved perturbation and observation method [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2009, 24(6):91—94. (In Chinese)
- [12] 陈吉,商红桃,王剑锋. 一种改进的永磁同步电机最大转矩电流比控制方法[J]. *微特电机*, 2016, 44(12):53—57.
CHEN J, SHANG H T, WANG J F. An improved maximum torque per ampere control method for permanent magnet synchronous motor [J]. *Small & Special Electrical Machines*, 2016, 44(12):53—57. (In Chinese)
- [13] 申中一,吕刚震,王建祥. 基于变步长自适应线性神经网络的 PMSM 参数辨识[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(23):85—90.
SHEN Z Y, LYU G Z, WANG J X. Parameter identification of PMSM based on variable step size Adaline neural network [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2019, 42(23):85—90. (In Chinese)
- [14] 杨勇,朱彬彬,赵方平,等. 一种电流预测控制的自适应变步长最大功率跟踪方法 [J]. *中国电机工程学报*, 2014, 34(6):855—862.
YANG Y, ZHU B B, ZHAO F P, *et al.* An adaptive and variable step MPPT method based on current predictive controllers [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2014, 34(6):855—862. (In Chinese)
- [15] DIANOV A, YOUNG-KWAN K, SANG-JOON L, *et al.* Robust self-tuning MTPA algorithm for IPMSM drives [C]//2008 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics. 2008:1355—1360.
- [16] 张宇. 基于参数辨识的内置式永磁同步电机 MTPA 控制策略研究[D]. 长沙:湖南大学, 2019.
ZHANG Y. Research on parameter identification based maximum torque per ampere control for IPMSM [D]. Changsha: Hunan University, 2019. (In Chinese)
- [17] NIAZI P, TOLYAT H A. Robust maximum torque per amp (MTPA) control of PM-assisted synchronous reluctance motor [C]//Twenty-First Annual IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, APEC'06. Dallas, TX, USA: IEEE, 2006:8.
- [18] 王伟华,肖曦,丁有爽. 永磁同步电机改进电流预测控制[J]. *电工技术学报*, 2013, 28(3):50—55.
WANG W H, XIAO X, DING Y S. An improved predictive current control method for permanent magnet synchronous motors [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2013, 28(3):50—55. (In Chinese)