

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2022.06.007

一种基于积分滑模观测器的永磁同步电机 磁链重构方法

刘晓燕¹, 杨 瑶², 龚事引¹, 李佳俊³

(1. 湖南铁路科技职业技术学院 铁道工程与信息学院, 湖南 株洲 412006;

2. 湖南中医药高等专科学校 护理学院, 湖南 株洲 412012; 3. 湖南工业大学 轨道交通学院, 湖南 株洲 412007)

摘 要: 针对永磁同步电机转子永磁体的失磁故障问题, 提出了一种基于积分滑模观测器的磁链重构方法。首先, 建立 $d-q$ 轴坐标系下永磁同步电机失磁故障时的电流状态方程; 其次, 结合滑模观测器和比例积分观测器的特点构建了积分滑模观测器, 实现了对永磁同步电机磁链信息的在线检测重构; 最后, 基于 Lyapunov 稳定性理论, 证明了积分滑模观测器的稳定性, 并依据滑模等值控制原理重构了永磁体磁链算式。仿真结果表明, 所设计的积分滑模观测器对磁链的观测精度较高, 且具有较好的鲁棒性和快速性。

关键词: 永磁同步电机; 失磁; 积分滑模观测器; 磁链重构

中图分类号: TM351

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2022)06-0042-08

引文格式: 刘晓燕, 杨 瑶, 龚事引, 等. 一种基于积分滑模观测器的永磁同步电机磁链重构方法 [J]. 湖南工业大学学报, 2022, 37(6): 42-49.

PMSM Flux Reconstruction Method Based on Integral Sliding Mode Observers

LIU Xiaoyan¹, YANG Yao², GONG Shiyin¹, Li Jiajun³

(1. College of Railway Engineering and Information, Hunan Vocational College of Railway Technology, Zhuzhou Hunan 412006, China; 2. College of Nursing, Hunan Traditional Chinese Medical College, Zhuzhou Hunan 412012, China;

3. College of Railway Transportation, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China)

Abstract: In view of the demagnetization fault of the permanent magnets of the permanent magnet synchronous motor (PMSM) rotor, a flux reconstruction method has thus been proposed based on the integral sliding mode observer. Firstly, the current state equation is established of the permanent magnet synchronous motor during demagnetization fault in the $d-q$ axis coordinate system. Secondly, an integral sliding mode observer is constructed with the characteristics of the sliding mode observer and the proportional integral observer combined together, thus realizing the on-line detection and reconstruction of flux linkage information of the permanent magnet synchronous motor (PMSM). Finally, the stability of the integral sliding mode observer is verified based on Lyapunov stability theory, with the permanent magnetic flux linkage reconstructed according to the sliding mode equivalent control principle. The simulation results show that the designed integral sliding mode observer is characterized with a high observation accuracy for flux linkage, greatly improved in its robustness and rapidity.

收稿日期: 2022-05-20

基金项目: 湖南省教育厅科学研究基金资助重点项目 (21A0354, 20A162, 18A267); 湖南省自然科学基金资助项目 (2021JJ50052)

作者简介: 刘晓燕 (1974-), 女, 湖南常宁人, 湖南铁路科技职业技术学院副教授, 主要研究方向为计算机信息技术及应用, E-mail: 422328009@qq.com

Keywords: permanent magnet synchronous motor; demagnetization; integral sliding mode observer; flux reconstruction

1 研究背景

永磁同步电机 (permanent magnet synchronous motor, PMSM) 具有高功率因数、高效率、体积小和质量轻等优势, 与异步电机相比, 具有更大的发展潜力^[1-2]。此外, PMSM 具有过载能力强、启动转矩大、可靠性高、转速平稳、噪声低且能在全速范围内提供恒转矩等优点^[3-4]。因此, PMSM 逐步成为轨道交通领域最有发展潜质的电机之一, 成为下一代列车牵引电机的发展方向^[5]。相对于固定场所的永磁电机, 应用于轨道车辆的 PMSM 运行环境显得更加恶劣, 在运行中易受到强电磁干扰、大振动冲击、大温差与大湿度变化等众多不确定因素的影响, 造成转子永磁体极易出现失磁故障^[6]。一旦出现失磁故障, 采用标准数学模型设计的 PMSM 驱动器便与电机实际运行情况不吻合, 而参数失配不可避免会导致 PMSM 驱动器的性能降低, 严重时会导致电机报废。为能够及时降低发生失磁故障的风险, 确保 PMSM 的安全运行, 对其失磁故障的在线检测与重构显得尤为必要。

目前, 针对失磁故障的检测问题, 以观测器对磁链信息进行检测重构来实现对失磁故障的诊断最为普遍。文献[7]基于 PMSM 扩展磁链数学模型, 通过建立状态观测器, 重构了电机电压、反馈电流和转速观测扩展磁链, 进而得到定子磁链信息。文献[8]利用龙伯格观测器与滑模观测器相结合的方法对永磁体磁链进行观测并进行失磁故障重构。文献[9]利用快速终端滑模观测器实现了对永磁体失磁故障的在线检测重构, 但未考虑电机电阻、电感等因素的耦合影响。为进一步提高对磁链信息的观测精度, 文献[10]针对传统方法在电阻参数发生改变时难以准确观测永磁体磁链的问题, 提出了一种基于自适应非奇异终端滑模观测器的永磁体磁链观测策略, 保证了磁链的观测精确度。文献[11]研究了 PMSM 的失磁故障检测问题, 结合自适应和滑模控制方法, 提出了一种在电感扰动下估计失磁故障的自适应滑模观测器, 实现了对永磁体磁链的准确估计。

上述方法均未考虑速度项对磁链观测精度的影响。为实现轨道车辆永磁牵引同步电机失磁时的精确在线检测, 保障轨道车辆的高效稳定运行, 本文结合滑模观测器和比例积分观测器的特点, 提出了一种基于积分滑模观测器的 PMSM 磁链重构方法。所设计

方法消除了速度项对积分滑模观测器的动态影响, 积分与滑模的结合扩展了观测器的自由度, 提高了观测器的动态估计速度, 并增强了对参数变化的鲁棒性。仿真结果表明, 所提观测器能够实现对永磁体磁链的高精度观测。

2 系统模型

理想情况下的 PMSM 在 d - q 坐标系下的电压方程如下^[12-13]:

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\psi_d}{dt} - \omega_e \psi_q, \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\psi_q}{dt} + \omega_e \psi_d, \end{cases} \quad (1)$$

且有:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_{r0}, \\ \psi_q = L_q i_q, \end{cases} \quad (2)$$

式(1)(2)中: u_d (u_q)、 i_d (i_q)、 L_d (L_q)、 ψ_d (ψ_q) 分别为定子绕组 d (q) 轴的电压分量、电流分量、电感分量和磁链分量; ψ_{r0} 为转子永磁体磁链; R_s 为定子电阻; ω_e 为电角速度。

当 PMSM 发生失磁故障时, 永磁体磁链的大小和方向会发生改变, 则对应式(2)的磁链方程可以重写为

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_{rd}, \\ \psi_q = L_q i_q + \psi_{rq}, \end{cases} \quad (3)$$

其中有:

$$\begin{cases} \psi_{rd} = \psi_r \cos \gamma, \\ \psi_{rq} = \psi_r \sin \gamma, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} \Delta\psi_{rd} = \psi_r \cos \gamma - \psi_{r0}, \\ \Delta\psi_{rq} = \psi_r \sin \gamma, \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta\psi_{rd}$ ($\Delta\psi_{rq}$) 分别为 d (q) 轴的磁链扰动分量, 且有 $\Delta\psi_{rd} < 0$, $\Delta\psi_{rq} > 0$; γ 为磁链偏差角, 且 $\gamma \in [0^\circ, 90^\circ)$ 。

由于失磁故障的影响, 若按式(1)所示数学模型设计电机控制器, 将使得控制器的性能与实际运行不匹配, 从而导致控制性能大幅下降。为了实现电机控制器的稳定精确运行, 并且能真实反映 PMSM 的运行状况, 重写 PMSM 在失磁故障下的 d - q 轴数学模型为^[14]

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q + \frac{d(\psi_{r0} + \Delta\psi_{rd})}{dt} - \omega_e \Delta\psi_{rq}, \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \frac{d\Delta\psi_{rq}}{dt} + \omega_e (\psi_{r0} + \Delta\psi_{rd}). \end{cases} \quad (6)$$

失磁故障时, PMSM 在 d - q 坐标系下的电磁转矩方程为

$$T_e = \frac{3}{2} n_p \left[(\psi_{r0} + (L_d - L_q) i_d) i_q + \Delta\psi_{rd} i_q - \Delta\psi_{rq} i_d \right], \quad (7)$$

式中: T_e 为电磁转矩; n_p 为电机极对数。

考虑实际的 PMSM 驱动系统中, 电磁系数对时间的变化率远比机械系数对时间的变化率要小, 故可以认为:

$$\begin{cases} \frac{d(\psi_{r0} + \Delta\psi_{rd})}{dt} \approx 0, \\ \frac{d\Delta\psi_{rq}}{dt} \approx 0. \end{cases} \quad (8)$$

则式 (6) 可重写为

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_e L_q i_q - \omega_e \Delta\psi_{rq}, \\ u_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_e L_d i_d + \omega_e (\psi_{r0} + \Delta\psi_{rd}). \end{cases} \quad (9)$$

对式 (9) 进行以电流为状态量的变换, 可列出 d - q 坐标系下失磁故障时永磁同步电机的电流方程为

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} i_d + \omega_e \frac{L_q}{L_d} i_q + \frac{u_d}{L_d} + \omega_e \frac{\Delta\psi_{rq}}{L_d}, \\ \frac{di_q}{dt} = -\frac{R_s}{L_q} i_q - \omega_e \frac{L_d}{L_q} i_d + \frac{u_q}{L_q} - \omega_e \frac{\psi_{r0} + \Delta\psi_{rd}}{L_q}. \end{cases} \quad (10)$$

$$\text{令: } A = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \omega_e \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_e \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix}, \quad B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 0 \\ -\omega_e \frac{1}{L_q} \end{bmatrix}, \quad F = \begin{bmatrix} 0 & \frac{\omega_e}{L_d} \\ -\frac{\omega_e}{L_q} & 0 \end{bmatrix}, \text{ 选}$$

定 i_d 和 i_q 为一组状态变量, 则根据系统 (10) 可以列出 d - q 坐标系下 PMSM 失磁故障时的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Ff + E\psi_{r0}, \\ y = Cx, \end{cases} \quad (11)$$

式中: x 、 u 、 f 、 y 分别为状态变量、系统输入、失磁故障、系统输出, 且定义 x 、 u 、 f 为

$$x = \begin{bmatrix} i_d & i_q \end{bmatrix}^T, \quad u = \begin{bmatrix} u_d & u_q \end{bmatrix}^T, \quad f = \begin{bmatrix} \Delta\psi_{rd} & \Delta\psi_{rq} \end{bmatrix}^T.$$

3 积分滑模控制器设计及永磁体磁链重构

3.1 积分滑模观测器设计

实际 PMSM 应用中, 永磁体磁链的大小是有界的, 因此有常数 δ , 满足 $\|f\| \leq \delta$ 。根据可测输入 u 和可测输出 y , 基于滑模控制原理和比例积分原理, 设计积分滑模观测器实现对永磁体磁链的在线检测重构。

结合 SMO 的设计原理和比例积分观测器的突出特点, 插入一个解耦系数 ω_e 和积分项 $x_1 = L_1[y - \hat{y}]$, 并保留滑模项 v , 得到积分滑模观测器表达式为

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + E\psi_{r0} + L\omega_e(y - \hat{y}) + Bv + Bx_1, \\ \hat{y} = C\hat{x}, \\ \dot{x}_1 = L_1(y - \hat{y}), \end{cases} \quad (12)$$

式中: $v = \begin{bmatrix} v_d & v_q \end{bmatrix}^T = K \text{sgn}(x - \hat{x})$, 其中 $K = \begin{bmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{bmatrix}$,

$k_1 > 0, k_2 > 0$; L 为待设计的参数。

所设计观测器的方框图见图 1。

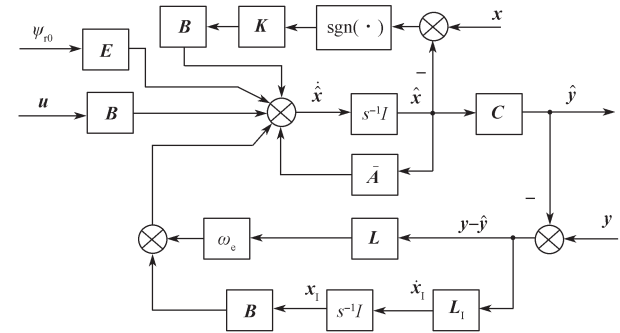


图 1 观测器方框图

Fig. 1 Block diagram of the observer

选取滑模面为

$$e = \begin{bmatrix} e_d & e_q \end{bmatrix}^T = x - \hat{x} = \begin{bmatrix} i_d - \hat{i}_d \\ i_q - \hat{i}_q \end{bmatrix}. \quad (13)$$

对误差 e 求导可得:

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} = Ae + Ff - L\omega_e(y - \hat{y}) - Bv - Bx_1. \quad (14)$$

综合考虑滑模收敛速度及观测器观测精度, 选取合适的参数 K 、 L 和 L_1 , 导数 $\dot{e}$ 在有限的时间内便可趋近于 0。

将式 (14) 得到的误差状态方程 $\dot{e}$ 中的积分项 x_1 的具体表达式写出, 并选定误差项和积分项为一组状态变量, 将其写为如下矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{x}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 + (A_2 - LC)\omega_e & -B \\ L_1C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ x_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix} f - \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} v, \quad (15)$$

式中存在:

$$A_1 + A_2 \omega_e = A, \quad (16)$$

其中有:

$$A_1 = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & 0 \\ 0 & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix}, \quad A_2 = \begin{bmatrix} 0 & \frac{L_q}{L_d} \\ -\frac{L_d}{L_q} & 0 \end{bmatrix}.$$

令

$$A_2 - LC = 0, \quad (17)$$

可以得到:

$$L = A_2 C^+, \quad (18)$$

其中有 $C^+ = (C^T C)^{-1} C^T$.

由此可以得到:

$$\begin{bmatrix} \dot{e} \\ \dot{x}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1 & -B \\ L_1 C & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e \\ x_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} F \\ 0 \end{bmatrix} f - \begin{bmatrix} B \\ 0 \end{bmatrix} v. \quad (19)$$

通过对积分观测器给出的误差状态方程系数矩阵的对比观察可知,若按式(18)选择 L 的取值大小,则积分SMO的误差状态方程系数矩阵中只含有 A_1 ,通过对 A_1 的定义可知,其为一个常数,不含电角速度 ω_e ,这就消除了 ω_e 对积分滑模观测器的动态影响,提高了积分SMO的动态观测性能。同时,积分SMO融合了SMO和比例积分观测器两者的优势,保留了积分项 x_1 和滑模项 v 。积分项 x_1 使得积分SMO拥有和比例积分观测器一致的二阶自由度,提高了积分SMO的动态估计速度;滑模项 v 的保留则增强了积分SMO对参数变化的不灵敏性,增强了系统的鲁棒性。

3.2 积分滑模观测器稳定性分析

定理1 存在小的正常数 η 和 ζ 满足

$$A_1^T + A_1 + \frac{1}{\eta} FF^T + \zeta I \leq 0, \quad (20)$$

式中 I 为单位矩阵。

恰当选取增益 L_1 和 K 的取值,则式(19)所示的积分滑模观测器误差在有限时间收敛并最终稳定。

选择Lyapunov函数为

$$V_1 = e^T e, \quad (21)$$

对其求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= \dot{e}^T e + e^T \dot{e} = \\ & [Ae + Ff - L\omega_e(y - \hat{y}) - Bv - Bx_1]^T e + \\ & e^T [Ae + Ff - L\omega_e(y - \hat{y}) - Bv - Bx_1] = \\ & [A_1 e + (A_2 - LC)\omega_e e + Ff - BK \operatorname{sgn}(e) - BCL_1 \int e]^T e + \\ & e^T [A_1 e + (A_2 - LC)\omega_e e + Ff - BK \operatorname{sgn}(e) - BCL_1 \int e]. \end{aligned} \quad (22)$$

将式(18)代入式(22)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &= [A_1 e + Ff - BK \operatorname{sgn}(e) - BCL_1 \int e]^T e + \\ & e^T [A_1 e + Ff - BK \operatorname{sgn}(e) - BCL_1 \int e] = \\ & e^T A_1^T e + f^T F^T e - [K \operatorname{sgn}(e) + CL_1 \int e]^T B^T e + \\ & e^T A_1 e + e^T Ff - e^T B [K \operatorname{sgn}(e) + CL_1 \int e] = \\ & e^T (A_1^T + A_1) e + 2e^T Ff - \\ & 2e^T B [K \operatorname{sgn}(e) + CL_1 \int e]. \end{aligned} \quad (23)$$

根据杨不等式定理^[15],给定一个小的正常数 η 满足下式:

$$\begin{aligned} 2e^T Ff &\leq \frac{1}{\eta} e^T FF^T e + \eta ff^T = \\ & \frac{1}{\eta} e^T FF^T e + \eta \|f\|^2 \leq \frac{1}{\eta} e^T FF^T e + \eta \delta^2. \end{aligned} \quad (24)$$

根据式(24)和(20),可以得到:

$$\begin{aligned} \dot{V}_1 &\leq e^T \left(A_1^T + A_1 + \frac{1}{\eta} FF^T \right) e + \eta \delta^2 - \\ & 2e^T B [K \operatorname{sgn}(e) + CL_1 \int e] \leq \\ & -e^T \zeta e - 2 \|BK \operatorname{sgn}(e) + BCL_1 \int e\| \|e\| + \eta \delta^2 \leq \\ & -\zeta \|e\|^2 - 2 \left\| (BK \operatorname{sgn}(e) + BCL_1 \int e) |e|^{-1} \|e\|^2 + \eta \delta^2, \end{aligned} \quad (25)$$

则当满足式(26)的条件时,有 $\dot{V}_1 \leq 0$ 成立。

$$\|e\|^2 \geq \frac{\eta \delta^2}{\zeta + 2 \left\| (BK \operatorname{sgn}(e) + BCL_1 \int e) |e|^{-1} \|e\| \right\|}. \quad (26)$$

因此,通过Lyapunov稳定性判据,式(19)所设计的积分滑模观测器误差能在有限时间内收敛。这就完成了对观测器稳定性证明。

3.3 永磁体磁链重构

当系统状态接近滑模面 e 后,由滑模等值原理^[16],有 $e = \dot{e} = 0$,代入式(14)得到:

$$f = F^{-1} B (v_{eq} + x_1), \quad (27)$$

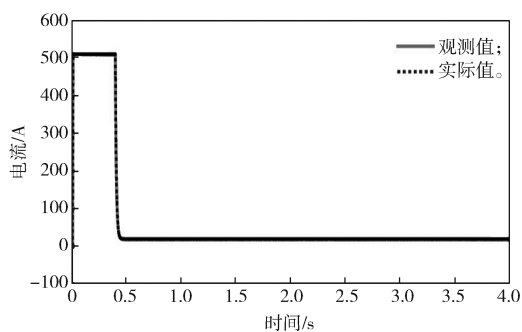
式中, v_{eq} 是滑模项 v 的一个等价输出量。

由式(27)可得永磁体磁链在 $d-q$ 坐标系下的磁链扰动分量的估计表达式为

$$\begin{cases} \Delta \hat{\psi}_{rd} = (-k_2 \operatorname{sgn}(e_q) - L_{12} \int e_q) / \omega_e, \\ \Delta \hat{\psi}_{rq} = (k_1 \operatorname{sgn}(e_d) + L_{11} \int e_d) / \omega_e. \end{cases} \quad (28)$$

为了改善由于滑模项的不连续性带来的大抖振现象,此处以具有连续特性的 $\theta(s)$ 函数来取代具有不连续特性的 $\operatorname{sgn}(s)$ 函数,以达到对抖振现象的有效消除^[16]。故可以将PMSM失磁故障时的重构算法重



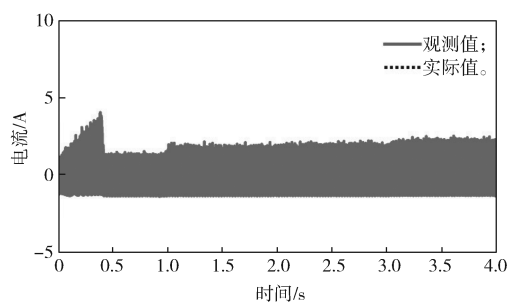
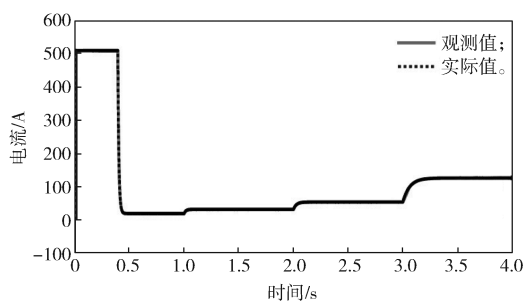
b) q 轴图5 正常运行时的 d - q 轴电流实际值与观测值Fig. 5 Actual and observed values of d - q axis current under normal operative conditions

从图3~5可以看出,在正常运行情况下,电机实际转速能够快速精确地跟踪其参考值, d - q 轴电流观测值能快速精确地跟踪其实际值,从而使得磁链观测值能够准确跟踪上其实际值。

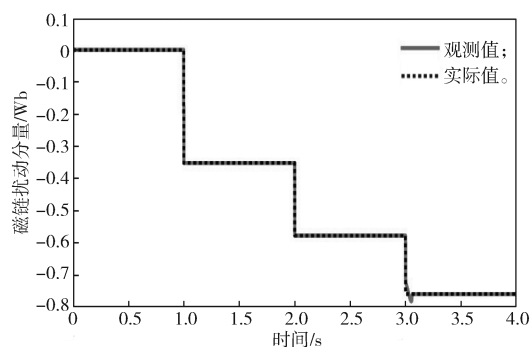
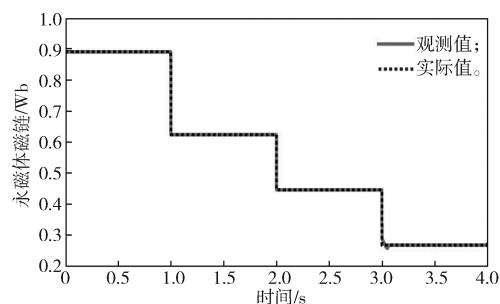
4.2 失磁时的仿真结果分析

在失磁情况下,电机带载起动,设置初始转速为 100 r/min,给定转矩为 100 N·m。在 1 s 时设置 ψ_r 减小为 $0.7\psi_r$, 2 s 时设置 ψ_r 减小为 $0.5\psi_r$, 3 s 时设置 ψ_r 减小为 $0.3\psi_r$; 同时,在 1 s 时设置 γ 为 30° , 2 s 时设置 γ 为 45° , 3 s 时设置 γ 为 60° 。

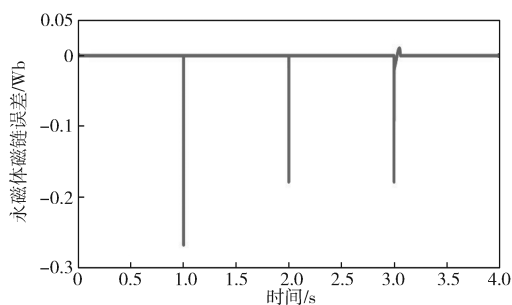
图6~10分别给出了永磁同步电机在同时发生幅值和角度失磁故障时, d - q 轴电流、 d 轴磁链扰动分量、永磁体总磁链、 d - q 轴磁链分量和磁链偏差角的仿真结果。

a) d 轴b) q 轴图6 失磁时 d - q 轴电流实际值与观测值Fig. 6 Actual value and observed values of d - q axis current during demagnetization

从图6可以看出,当永磁体在 1, 2, 3 s 处同时发生幅值失磁和角度失磁时, d 轴电流维持在 0 A 左右, q 轴电流在 1, 2, 3 s 处相应增大。

图7 失磁时 d 轴磁链扰动分量实际值与观测值跟踪结果Fig. 7 Tracking of the actual and the observed values of the d -axis flux linkage disturbance component during demagnetization

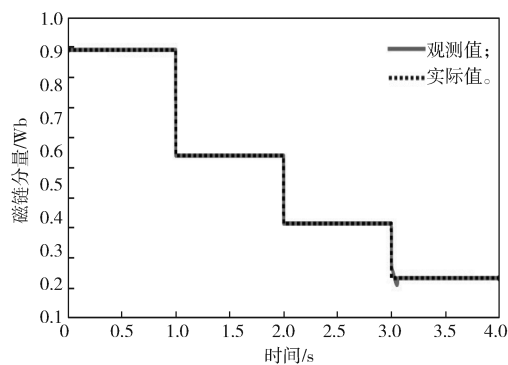
a) 实际值与观测值



b) 误差值

图8 失磁时磁链实际值与观测值及其误差曲线

Fig. 8 Actual and observation values of flux linkage with their errors during demagnetization

a) d 轴

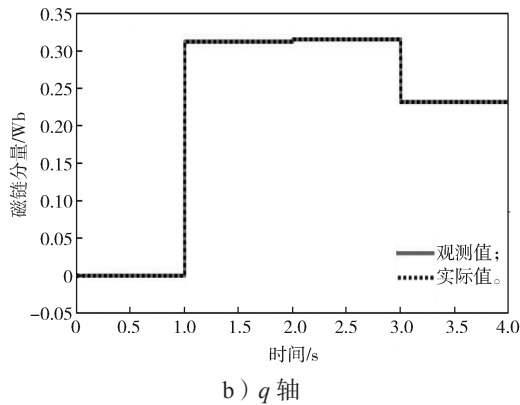


图 9 失磁时 d - q 轴磁链分量实际值与观测值

Fig. 9 Actual and observed values of d - q axis flux linkage components during demagnetization

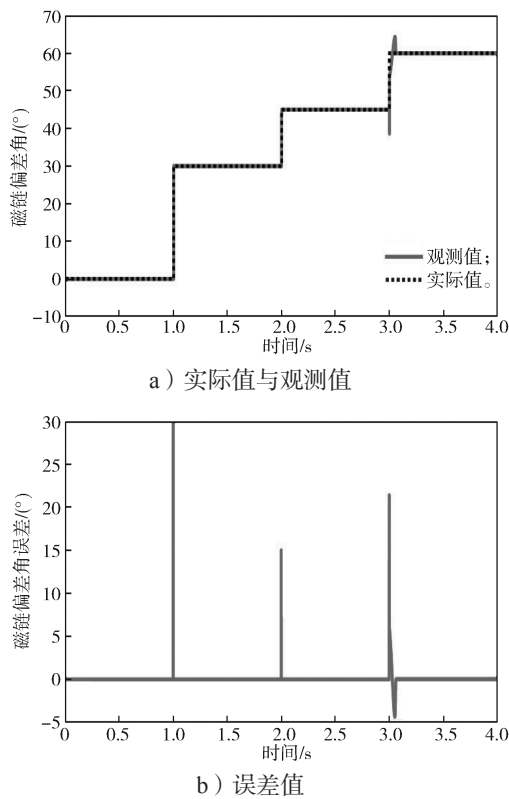


图 10 失磁时磁链偏差角实际值与观测值及其误差跟踪曲线

Fig. 10 Actual and observed values of flux linkage deviation angle with their error tracking during demagnetization

从图 7~10 可以看出,当电机同时发生幅值失磁和角度失磁时, q 轴磁链分量在 1 s 和 2 s 时增大,而在 3 s 时减小; d 轴磁链分量在相应时刻均减小,但在 3 s 时存在一个小的波动,但其观测值也能迅速跟踪其实际值。 d 轴磁链分量在 3 s 时的波动也导致总磁链幅值的观测值和磁链偏差角的观测值在 3 s 时也产生了短时间的跟踪偏差,但其均能快速准确跟踪上实际值。

从上述仿真结果可知, d - q 轴电流、永磁体磁链

大小和磁链偏差角及 d - q 轴磁链分量的观测值都能够准确快速跟踪其实际值,这充分表明所设计的积分滑模观测器可快速准确收敛到永磁体磁链的幅值和方向,实现了对永磁体磁链的在线检测和重构。

5 结语

本文以永磁同步电机转子永磁体为研究对象,提出了一种基于积分滑模观测器的永磁同步电机磁链重构方法。通过建立 d - q 坐标系下的电机失磁故障数学模型,选择定子电流作为系统状态变量,通过加入解耦项和积分项构建了积分滑模观测器,实现了对永磁体磁链的重构与在线检测。仿真结果表明,所提出的积分滑模观测器能够对永磁体磁链进行快速精确地观测辨识,验证了基于积分滑模观测器的磁链重构方法的准确性和有效性。后续将开展在永磁同步电机负载以及参数变化时的磁链重构及其容错控制方面的研究。

参考文献:

- [1] 冯江华. 高速动车组永磁同步牵引系统的研制 [J]. 机车电传动, 2016 (4): 1-5.
FENG Jianghua. Research on the Permanent Magnet Synchronous Motor Drive System for High-Speed EMUs[J]. Electric Drive for Locomotives, 2016(4): 1-5.
- [2] FENG J H, XU J F, LIAO W, et al. Review on the Traction System Sensor Technology of a Rail Transit Train[J]. Sensors, 2017, 17(6): 1356.
- [3] 吴冬华, 孙传铭. 基于永磁电机牵引系统高速动车组的研制 [J]. 机车电传动, 2019(1): 35-39.
WU Donghua, SUN Chuanming. Development of High-Speed EMUs Based on Permanent Magnet Motor Traction System[J]. Electric Drive for Locomotives, 2019(1): 35-39.
- [4] 张志艳, 马宏忠, 陈 诚, 等. 永磁电机失磁故障诊断方法综述 [J]. 微电机, 2013, 46(3): 77-80.
ZHANG Zhiyan, MA Hongzhong, CHEN Cheng, et al. Review of Demagnetization Fault Diagnosis in Permanent Magnet Motor[J]. Micromotors, 2013, 46(3): 77-80.
- [5] BHUIYAN E A, AKHAND M M A, DAS S K, et al. A Survey on Fault Diagnosis and Fault Tolerant Methodologies for Permanent Magnet Synchronous Machines[J]. International Journal of Automation and Computing, 2020, 17(6): 763-787.
- [6] 李红梅, 陈 涛. 电动汽车 PMSM 退磁故障诊断及故障模式识别 [J]. 电工技术学报, 2017, 32(5): 1-8.
LI Hongmei, CHEN Tao. Demagnetization Fault Diagnosis and Fault Mode Recognition of PMSM for

- EV[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(5): 1-8.
- [7] 方晓春, 王婷婷, 杨中平, 等. 城轨列车永磁同步牵引电机全速域转矩闭环矢量控制研究[J]. 铁道学报, 2020, 42(11): 60-67.
FANG Xiaochun, WANG Tingting, YANG Zhongping, et al. Full Speed Range Torque Closed Loop Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Traction Motor for Urban Rail Train[J]. Journal of the China Railway Society, 2020, 42(11): 60-67.
- [8] 何 静, 张昌凡, 贾 林, 等. 一种永磁同步电机的失磁故障重构方法研究[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(2): 8-14.
HE Jing, ZHANG Changfan, JIA Lin, et al. Demagnetization Fault Reconstruction for Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(2): 8-14.
- [9] ZHAO K H, CHEN T F, ZHANG C F, et al. Online Fault Detection of Permanent Magnet Demagnetization for IPMSMs by Nonsingular Fast Terminal-Sliding-Mode Observer[J]. Sensors, 2014, 14(12): 23119-23136.
- [10] 目云奎, 李祥飞, 陈 玄. 自适应高阶滑模永磁同步电机永磁磁链观测[J]. 电子测量与仪器学报, 2020, 34(3): 163-170.
MU Yunkui, LI Xiangfei, CHEN Xuan. Permanent Magnet Flux Linkage Observation for PMSM Based on Adaptive High-Order Sliding Mode[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2020, 34(3): 163-170.
- [11] ZHANG M Y, XIAO F, SHAO R, et al. Robust Fault Detection for Permanent-Magnet Synchronous Motor via Adaptive Sliding-Mode Observer[J]. Mathematical Problems in Engineering, 2020, 2020: 1-6.
- [12] 黄 刚, 罗意平, 张昌凡, 等. 基于扩展磁链的永磁同步牵引电机失磁在线监测[J]. 铁道学报, 2016, 38(2): 48-55.
- HUANG Gang, LUO Yiping, ZHANG Changfan, et al. On-Line Demagnetization Detection of Permanent Magnet Synchronous Traction Motor Based on Extended Flux Linkage[J]. Journal of the China Railway Society, 2016, 38(2): 48-55.
- [13] 张昌凡, 吴公平, 何 静, 等. 一种永磁同步电机失磁故障容错预测控制算法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(15): 100-110.
ZHANG Changfan, WU Gongping, HE Jing, et al. Fault-Tolerant Predictive Control for Demagnetization Faults in Permanent Magnet Synchronous Machine[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(15): 100-110.
- [14] 赵凯辉, 周瑞睿, 冷傲杰, 等. 一种永磁同步电机的有限集无模型容错预测控制算法[J]. 电工技术学报, 2021, 36(1): 27-38.
ZHAO Kaihui, ZHOU Ruirui, LENG Aojie, et al. Finite Control Set Model-Free Fault-Tolerant Predictive Control for Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(1): 27-38.
- [15] HUANG G, LI J J, FUKUSHIMA E F, et al. An Improved Equivalent-Input-Disturbance Approach for PMSM Drive with Demagnetization Fault[J]. ISA Transactions, 2020, 105: 120-128.
- [16] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真: 基本理论与设计方法[M]. 4版. 北京: 清华大学出版社, 2019: 4-5.
LIU Jinkun. MATLAB Simulation of Sliding Mode Variable Structure Control: Basic Theory and Design Methods [M]. 4th Ed. BeiJing: Tsinghua University Press, 2019: 4-5.

(责任编辑: 廖友媛)