

永磁同步电机新型转子磁链滑模观测器

扶文树^{1,2}, 储建华², 王刚²

(1. 南京信息职业技术学院 智能制造学院, 江苏 南京 210036;

2. 江苏开璇智能科技有限公司, 江苏 苏州 215101)

摘要:针对传统永磁同步电机反电势滑模观测器转子位置估计存在的信号抖振和相位滞后问题,提出一种以电机定子电流与转子磁链为状态变量的四阶新型转子磁链滑模观测器。首先,以电机定子电流与转子磁链为状态变量构建四阶状态方程,选取定子电流观测误差为滑模面构建转子磁链滑模观测器。其次,设计一种新型锁相环对转子位置和转速进行进一步估算,避免引入反正切函数和微分运算带来的位置估算不精确问题。实验结果验证了新型滑模观测器在位置估算精度和抖振抑制方面的优势。

关键词:永磁同步电机; 转子磁链滑模观测器; 反电势滑模观测器; 锁相环

中图分类号: TM351 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed21466

New Rotor Flux Sliding Mode Observer for Permanent Magnet Synchronous Motor

FU Wenshu^{1,2}, CHU Jianhua², WANG Gang²

(1. Institute of Intelligent Manufacture, Nanjing Vocational College of Information Technology, Nanjing 210036,

Jiangsu, China; 2. Jiangsu Kaiserdrive Intelligent Technology Co., Ltd.,

Suzhou 215101, Jiangsu, China)

Abstract: In order to solve the problem of signal chattering and phase lag existing in traditional back EMF SMO of PMSM, a new fourth-order SMO of rotor flux with stator current and rotor flux as state variables was proposed. Firstly, the fourth-order state equation was constructed with stator current and rotor flux as state variables, and the stator current observation error was selected as the sliding surface to construct the rotor flux SMO. Secondly, a new PLL was designed to further estimate the rotor position and speed, avoiding the inaccurate position estimation caused by the introduction of anti tangent function and differential operation. Experiment results verify the advantages of new SMO in position estimation accuracy and chattering suppression.

Key words: permanent magnet synchronous motor(PMSM); rotor flux sliding mode observer; back electromotive force sliding mode observer; phase-locked loop

永磁同步电机(permanent magnet synchronous motor, PMSM)以其结构简单、功率密度高等突出优点,在工业和民用领域有着广泛的应用。众所周知,永磁同步电机的精确控制依赖于准确地获取转子的速度和位置信息^[1]。通常转子速度和位置的反馈信息是通过安装的机械传感器(如光电编码器和旋转变压器)获得的。然而,安装机械传感器不仅增加了系统的成本和机械复杂度,而且使得电机容易受到工作环境的影响。机械传感器限制了永磁同步电机在某些特殊场合

的应用。

通过检测电机定子电压、电流等物理量,无位置传感器控制策略可以准确地获得转子的速度和位置信息。因此,永磁同步电机无位置传感器控制策略可以取代传统的机械式传感器,成为未来的发展趋势。目前,永磁同步电机的无位置传感器控制方法很多,包括高频信号注入策略^[2]、定子磁链估计策略^[3]、模型参考自适应估计策略^[4]、Kalman滤波策略^[5]和滑模观测器估计策略^[6]等。其中,滑模观测器以其鲁棒性强、响应速度

基金项目:国家重点研发项目(2017YFB1300600)

作者简介: 扶文树(1978—),男,博士,高级工程师,Email:fuws@njcit.cn

快、结构简单等优点得到了广泛的关注。然而,滑模观测器的一个明显的缺点是滑模固有抖振和低通滤波器引起的相位滞后影响了转子位置和转速观测的精度^[7-8]。除此之外,使用正反切函数提取转子位置的方法将高频抖振引入除法运算中,这将导致抖振误差被放大。抖振和相位滞后问题制约了滑模观测器的应用。

针对上述滑模观测器问题分析,本文提出了一种以电机定子电流与转子磁链为状态变量的四阶新型转子磁链滑模观测器。以电机定子电流与转子磁链为状态变量构建四阶状态方程,选取定子电流观测误差为滑模面,构建转子磁链滑模观测器。在此基础上,设计一种新型锁相环对转子位置和转速进行进一步估算,避免引入反正切函数和微分运算带来的位置估算不精确问题。将新型转子磁链滑模观测器与传统反电势滑模观测器进行对比,实验结果验证了新型转子磁链滑模观测器在位置估算精度和抖振抑制方面的有效性。

1 新型磁链滑模观测器设计

1.1 观测器构建

以 α - β 坐标系下定子电流和转子磁链为状态变量的永磁同步电机状态方程为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} \mathbf{I} & a_{12} \mathbf{J} \\ 0 & a_{22} \mathbf{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_s \\ \Psi_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b \mathbf{I} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中 $\mathbf{i}_s = [i_\alpha \ i_\beta]^T$ $\Psi_r = [\Psi_\alpha \ \Psi_\beta]^T$

$$\mathbf{I} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad \mathbf{J} = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$a_{11} = -R_s/L_s \quad a_{12} = -\omega_e/L_s$$

$$a_{22} = \omega_e \quad b = 1/L_s$$

式中: $\mathbf{i}_s, \Psi_r$ 分别为电机在 α - β 坐标系下的定子电流和转子磁链; u_α, u_β 分别为 α, β 轴定子电压; R_s, L_s 分别为电机定子电阻和电感; ω_e 为转子电角速度。

在不考虑电机定子电阻、电感以及角速度误差时,构建观测器为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}}_s \\ \hat{\Psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} \mathbf{I} & a_{12} \mathbf{J} \\ 0 & a_{22} \mathbf{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}}_s \\ \hat{\Psi}_r \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} \mathbf{u}_{\text{smo}} \quad (2)$$

在考虑电机定子电阻、电感以及角速度误差时,构建观测器为

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}}_s \\ \hat{\Psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{a}_{11} \mathbf{I} & \hat{a}_{12} \mathbf{J} \\ 0 & \hat{a}_{22} \mathbf{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}}_s \\ \hat{\Psi}_r \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} \mathbf{u}_{\text{smo}} \quad (3)$$

其中 $\hat{a}_{11} = -\hat{R}_s/\hat{L}_s \quad \hat{a}_{12} = -\hat{\omega}_e/\hat{L}_s$

$$\hat{a}_{22} = \hat{\omega}_e \quad \hat{b} = 1/\hat{L}_s$$

$$\mathbf{u}_{\text{smo}} = [u_{\text{smo}\alpha} \ u_{\text{smo}\beta}]^T \quad \mathbf{B} = [b \mathbf{I} \ 0]^T$$

式中: $\hat{\mathbf{i}}_s, \hat{\Psi}_r$ 分别为定子电流和转子磁链观测值; $\hat{R}_s, \hat{L}_s, \hat{\omega}_e$ 分别为电机定子电阻、电感和转子电角速度估计值; $\mathbf{u}_{\text{smo}}$ 为滑模控制变量; $\mathbf{T}$ 为待取值的参数矩阵。

定义定子电阻、电感和转子电角速度误差为

$$\begin{cases} \bar{R}_s = \hat{R}_s - R_s \\ \bar{L}_s = \hat{L}_s - L_s \\ \bar{\omega}_e = \hat{\omega}_e - \omega_e \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3),得到

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}}_s \\ \hat{\Psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{a}_{11} \mathbf{I} & \hat{a}_{12} \mathbf{J} \\ 0 & \hat{a}_{22} \mathbf{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}}_s \\ \hat{\Psi}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{b} \mathbf{I} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} \mathbf{u}_{\text{smo}} + \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{H}_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

其中 $\begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{H}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \bar{a}_{11} \mathbf{I} & \bar{a}_{12} \mathbf{J} \\ 0 & \bar{a}_{22} \mathbf{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\mathbf{i}}_s \\ \hat{\Psi}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \bar{b} \mathbf{I} \\ 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_\alpha \\ u_\beta \end{bmatrix} \quad (6)$

$$\bar{a}_{11} = \hat{a}_{11} - a_{11} \quad \bar{a}_{12} = \hat{a}_{12} - a_{12}$$

$$\bar{a}_{22} = \hat{a}_{22} - a_{22} \quad \bar{b} = \hat{b} - b$$

式中: $\mathbf{H}_1, \mathbf{H}_2$ 为参数误差项。

将式(2)与式(5)相减,得到

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{i}}_s \\ \bar{\Psi}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} \mathbf{I} & a_{12} \mathbf{J} \\ 0 & a_{22} \mathbf{J} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{i}}_s \\ \bar{\Psi}_r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{I} \\ \mathbf{T} \end{bmatrix} \mathbf{u}_{\text{smo}} + \begin{bmatrix} \mathbf{H}_1 \\ \mathbf{H}_2 \end{bmatrix} \quad (7)$$

其中 $\bar{\mathbf{i}}_s = \hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s \quad \bar{\Psi}_r = \hat{\Psi}_r - \Psi_r$

式中: $\bar{\mathbf{i}}_s, \bar{\Psi}_r$ 分别为定子电流、转子磁链估计误差。

选取滑模面为

$$\mathbf{s} = \bar{\mathbf{i}}_s = \hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s = 0 \quad (8)$$

滑模控制变量 $\mathbf{u}_{\text{smo}}$ 选取为

$$\mathbf{u}_{\text{smo}} = k_1 \mathbf{I} \text{sgn}(\mathbf{s}) = k_1 \mathbf{I} \text{sgn}(\hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s) \quad (9)$$

式中: k_1 为滑模增益系数。

综上所述,新型转子磁链滑模观测器结构框图如图1所示。

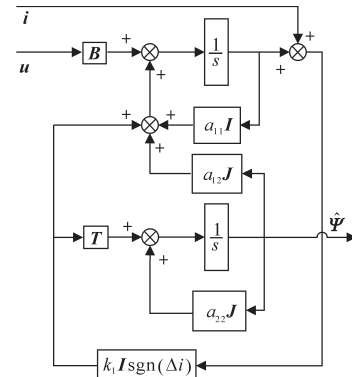


图1 新型转子磁链滑模观测器结构框图

Fig.1 Structure diagram of new rotor flux sliding mode observer

1.2 观测器参数选取

1.2.1 滑模增益系数 k_1 选取

根据 Lyapunov 稳定性理论,滑模观测器收敛等价于

$$\begin{aligned} s^T \cdot \dot{s} &= \bar{i}_s^T \cdot \dot{\bar{i}}_s \\ &= \bar{i}_\alpha [a_{11} \bar{i}_\alpha - a_{12} \bar{\Psi}_{f\beta} + k_1 \operatorname{sgn}(\bar{i}_\alpha) + H_{1\alpha}] + \\ &\quad \bar{i}_\beta [a_{11} \bar{i}_\beta + a_{12} \bar{\Psi}_{f\alpha} + k_1 \operatorname{sgn}(\bar{i}_\beta) + H_{1\beta}] < 0 \quad (10) \end{aligned}$$

式(10)成立的充要条件为

$$\begin{cases} k_1 < -|a_{11} \bar{i}_\alpha| - |a_{12} \bar{\Psi}_{f\beta} + H_{1\alpha}| \\ k_1 < -|a_{11} \bar{i}_\beta| - |a_{12} \bar{\Psi}_{f\alpha} + H_{1\beta}| \end{cases} \quad (11)$$

即滑模增益系数 k_1 的选取范围为

$$k_1 < \min \begin{cases} -|a_{11} \bar{i}_\alpha| - |a_{12} \bar{\Psi}_{f\beta} + H_{1\alpha}| \\ -|a_{11} \bar{i}_\beta| - |a_{12} \bar{\Psi}_{f\alpha} + H_{1\beta}| \end{cases} \quad (12)$$

1.2.2 参数矩阵 T 选取

当滑模观测系统稳定时,电流误差及其导数为零,此时有

$$\frac{d}{dt} \bar{\Psi}_f + (-a_{22} + T a_{12}) \bar{\Psi}_f = H_2 - T H_1 \quad (13)$$

参数矩阵 T 选取值需使得 $\bar{\omega}_e \neq 0$ 时 $\bar{\Psi}_{f\alpha}$ 和 $\bar{\Psi}_{f\beta}$ 相互独立,在 $\bar{R}_s = 0$ 和 $\bar{L}_s = 0$ 情况下,根据式(6),得到

$$\begin{cases} H_{1\omega} = -\frac{\bar{\omega}_e}{L_s} J \hat{\Psi}_f \\ H_{2\omega} = \bar{\omega}_e J \hat{\Psi}_f \end{cases} \quad (14)$$

式中: $H_{1\omega}, H_{2\omega}$ 为只考虑 $\bar{\omega}_e \neq 0$ 时的误差矩阵。

结合式(13)和式(14),得到:

$$\frac{d}{dt} \bar{\Psi}_f - \bar{\omega}_e (J + \frac{1}{L_s} T J) \bar{\Psi}_f = \bar{\omega}_e (J + \frac{1}{L_s} T J) \Psi_f \quad (15)$$

当矩阵 $J + \frac{1}{L_s} T J$ 为对角形式时, $\bar{\Psi}_{f\alpha}$ 和 $\bar{\Psi}_{f\beta}$ 相互独立,设

$$J + \frac{1}{L_s} T J = aI \quad (16)$$

式中: a 为负常数。

设 T 满足

$$T = t_1 L_s I + t_2 L_s J \quad (17)$$

将其代入式(16),得到:

$$J + \frac{1}{L_s} T J = -t_2 I + (t_1 + 1) J \quad (18)$$

取 $t_1 = -1$ 即可使式(18)成立,代入式(15),得到:

$$\frac{d}{dt} \bar{\Psi}_f + t_2 \bar{\omega}_e \bar{\Psi}_f = -t_2 \bar{\omega}_e \Psi_f \quad (19)$$

在 $\bar{R}_s = 0, \bar{L}_s = 0$ 以及 $\bar{\omega}_e = 0$ 情况下,式(19)改写为

$$\frac{d}{dt} \bar{\Psi}_f + t_2 \bar{\omega}_e \bar{\Psi}_f = 0 \quad (20)$$

根据系统稳定性分析,当 $t_2 \bar{\omega}_e > 0$ 时, $\bar{\Psi}_f$ 收敛至零。 t_2 按如下方式取值:

$$t_2 = k_2 \operatorname{sgn}(\bar{\omega}_e) \quad (21)$$

其中

$$k_2 > 0$$

k_2 取值需同时考虑观测响应与系统抖振两方面因素。

1.3 观测器抖振抑制分析

假设 $\bar{\omega}_e = 0$,滑模控制律可表示为

$$c = -k_1 \operatorname{sgn}(s) = a_{12} I \bar{\Psi}_f - c' \quad (22)$$

其中

$$c' = [c'_\alpha \quad c'_\beta]^T$$

式中: c' 为滑模控制系统的抖振信号。

代入磁链误差方程,得到:

$$\frac{d}{dt} \bar{\Psi}_f + t_2 \bar{\omega}_e \bar{\Psi}_f = T c' \quad (23)$$

对式(23)进行拉氏变换,得到磁链观测器抖振信号传递路径以及滤波原理,如图2所示。

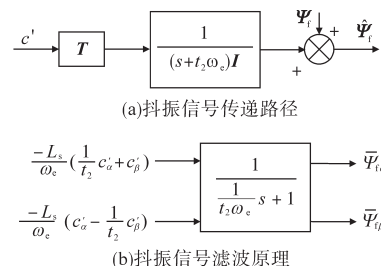


图2 转子磁链滑模观测器抖振信号传递路径

Fig.2 Chattering signal transfer path of rotor flux sliding mode observer

从图2可以看出,与传统反电势滑模观测器不同,新型永磁同步电机转子磁链滑模观测器的系统抖振信号不直接进入观测值中,而是经过等效低通滤波器处理后才进入磁链观测值,抖振信号被有效削弱。

2 基于新型磁链滑模观测器的转子位置估算

设计基于转子磁链信号的锁相环结构图如图3所示。

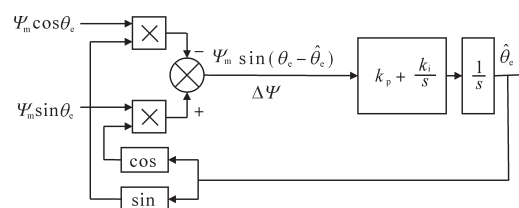


图3 基于转子磁链信号的锁相环结构图

Fig.3 Structure diagram of PLL based on rotor flux signal

图3中, Ψ_m 为电机转子磁链幅值, θ_e 为电机

转子电角度位置, k_p 和 k_i 为锁相环比例和积分系数。当 $|\theta_e - \hat{\theta}_e| < \pi/6$ 时, 可认为 $\sin(\theta_e - \hat{\theta}_e) \approx \theta_e - \hat{\theta}_e$, 根据图3可得:

$$\begin{aligned}\Delta\Psi &= \Psi_m \sin\theta_e \cos\hat{\theta}_e - \Psi_m \cos\theta_e \sin\hat{\theta}_e \\ &= \Psi_m \sin(\theta_e - \hat{\theta}_e) \\ &\approx \Psi_m (\theta_e - \hat{\theta}_e)\end{aligned}\quad (24)$$

此时图3可以等效为图4。

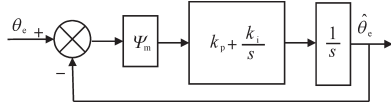


图4 锁相环等效框图

Fig.4 Equivalent block diagram of PLL

根据图4, θ_e 至 $\hat{\theta}_e$ 的传递函数为

$$\begin{aligned}G(s) &= \frac{\Psi_m \frac{k_p s + k_i}{s^2}}{1 + \Psi_m \frac{k_p s + k_i}{s^2}} \\ &= \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}\end{aligned}\quad (25)$$

其中 $\omega_n = \sqrt{\Psi_m k_i}$ $\xi = \frac{k_p}{2} \sqrt{\frac{\Psi_m}{k_i}}$

式中: ω_n 为无阻尼自然角频率; ξ 为系统阻尼系数。

误差传递函数为

$$\begin{aligned}E(s) &= 1 - G(s) \\ &= \frac{s^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2}\end{aligned}\quad (26)$$

根据式(26)可知, 转子位置估计传递函数系统对单位斜坡函数的时域响应为零, 即电机稳态运行时的转子位置估计误差为零。

3 实验结果及其分析

为验证新型转子磁链滑模观测器的优势, 在永磁同步电机交流调速实验平台上, 将本文提出的新型转子磁链滑模观测器与传统反电势滑模观测器作对比实验, 实验平台如图5所示。其中, 被控永磁同步电机安装有2 500线增量式编码器, 用于检测电机实时转子位置以及转速, 将其与估计转子位置和转速进行对比分析。

对应的永磁同步电机参数为: 额定功率1.2 kW, 额定电压220 V, 额定电流6.5 A, 额定转矩4.6 N·m, 额定转速2 500 r/min, 定子电阻0.55 Ω , d, q 轴电感4.43 mH, 极对数4, 转子磁链0.175 Wb。

为了验证新型磁链滑模观测器在电机启动

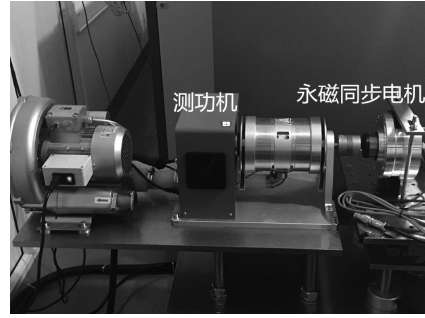


图5 实验平台

Fig.5 Experimental platform

阶段的优势, 给定电机在2 s内由0 rad/s斜坡加速至20.9 rad/s的机械角速度(200 r/min)启动, 图6所示为该阶段的对比实验波形。其中图6a为传统反电势滑模观测器下的 α, β 轴反电势观测值及基于反电势观测值的转子位置估计误差; 图6b为新型转子磁链滑模观测器下的 α, β 轴转子磁链观测值及基于转子磁链观测值的转子位置估计误差。由图6a可知, 电机反电势观测幅值随着转速的升高而升高, 其抖振信号较为明显, 由于使用反正切函数提取的转子位置将高频抖振引入除法运算中, 导致了抖振误差被放大, 转子位置估计误差抖振噪声明显, 幅值达到0.05 rad。对比图6b, 转子磁链观测幅值一直稳定在0.175 Wb左右, 由于使用了新型锁相环结构, 基于转子磁链观测的转子位置估计误差抖振噪声被大幅度削弱, 幅值也由0.05 rad降低至0.025 rad左右。由此验证了新型转子磁链滑模观测器在系统抖振抑制和转子位置估计精度方面的优势。

图7为稳态下给定电机6.28 rad/s机械角速度(60 r/min)运行时的转子机械角速度估计对比, 其中图7a基于传统反电势滑模观测器, 图7b基于新型转子磁链滑模观测器。对比图7a、图7b可知, 传统反电势滑模观测器下转子位置估计抖振噪声明显, 幅值达到1.2 rad/s, 而新型转子磁链滑模观测器下的转子位置估计抖振噪声大幅度削弱, 位置估计更为精确。

图8为给定转速突变下的实验波动对比。图8a为传统反电势滑模观测器下的机械角速度估计及转子位置估计误差; 图8b为新型转子磁链滑模观测器下的机械角速度估计及转子位置估计误差。电机稳态运行于52.3 rad/s(500 r/min), 在0.3 s时刻, 给定电机转速由52.3 rad/s突升至209.3 rad/s(2 000 r/min)。对比图8a、图8b可知, 两种基于观测器的无位置传感器控制策略均能

有效地跟踪参考速度指令。同样,基于新型转子磁链滑模观测器的转子速度估计抖振现象被削弱,其动态性能更优,这与图6、图7所示的实验结果相符。同时,由于新型转子磁链滑模观测器比传统的反电势滑模观测器拥有更小的估计误差,从而保证了转子位置估计的准确性。通过图8中估计转子速度之间的对比,其结果验证了当电机在相对高速范围内运行时,两种转子位置估计策略效果均较理想。

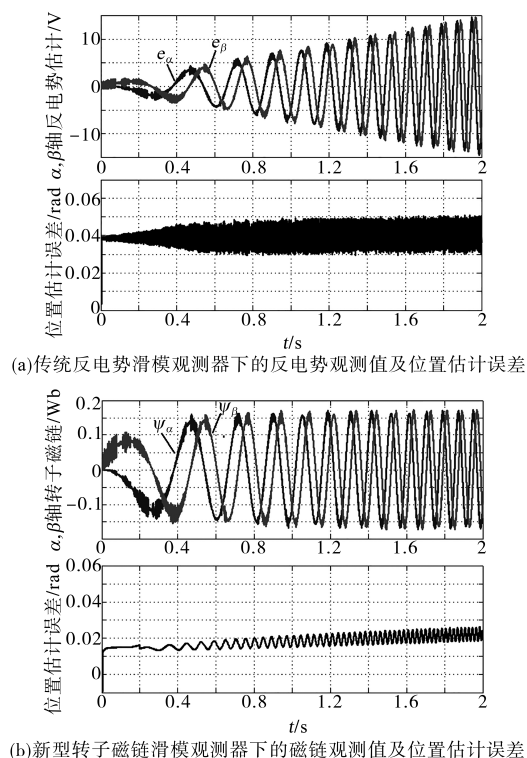


图6 启动阶段的实验波形

Fig.6 Experimental waveforms of starting stage

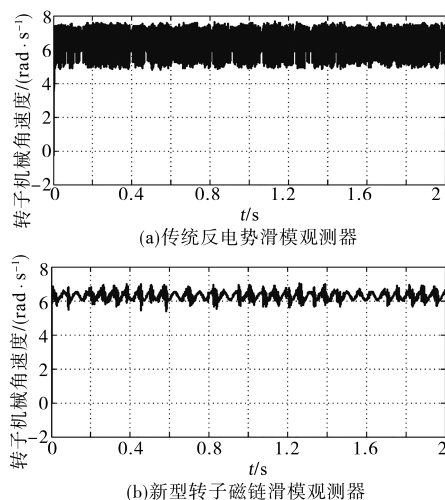


图7 稳态下的转子机械角速度估计

Fig.7 Estimation of mechanical angular speed of rotor in steady state

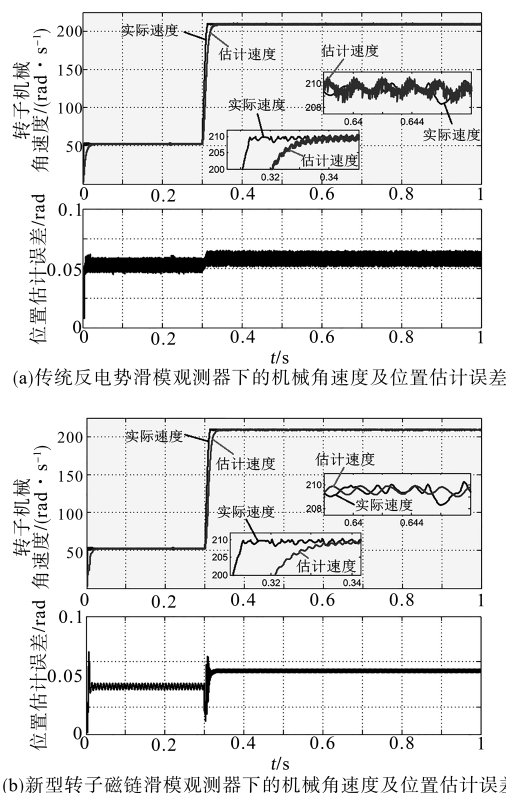


图8 给定转速突变下的实验波形

Fig.8 Experimental waveforms under the given speed sudden change

4 结论

提出了一种以电机定子电流与转子磁链为状态变量的四阶新型转子磁链滑模观测器。以电机定子电流与转子磁链为状态变量构建四阶状态方程,选取定子电流观测误差为滑模面,构建转子磁链滑模观测器。在此基础上,设计了一种新型锁相环对转子位置和转速进行进一步估算,避免引入反正切函数和微分运算带来的位置估算不精确问题。实验将新型转子磁链滑模观测器与传统反电势滑模观测器对比,实验结果验证了新型转子磁链滑模观测器在电机转子位置估算精度和抖振抑制方面的优势。

参考文献

- [1] 杨淑英,刘世园,李浩源,等. 永磁同步电机无位置传感器控制谐波抑制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(20): 6075-6084.
- [2] 杜思宸,全力,朱孝勇,等. 基于高频注入的永磁同步电机零低速下位置传感器失效故障容错控制[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 3038-3046.

(下转第68页)

表 8 预防措施
Tab.8 Related measures

月份	季节特点	重点检查内容	采取措施
1~3月	保护区安全隐患	1. 春运期间,对重要负荷线路及设备进行线路检查及设备接电红外监测; 2. 增加接地装置进行检查次数。	1. 利用配网管控平台,进行台区负荷招测,有针对性的进行现场复测和治理; 2. 进行线路全面巡视,掌握导线弛度变化情况,适时调整弛度和拉线强度。
4~6月	鸟害高发期	1. 重点检查风口、河流附近、污秽严重区域输电线路和绝缘子情况; 2. 对悬垂绝缘子正上方的鸟巢进行清理检查。	1. 有针对性开展防外力破坏特巡和宣传工作; 2. 加强重要线路特巡工作; 3. 对地势低洼区域、河流附近线路进行检查,防止积雪融化造成线路基础冲毁; 4. 及时清除悬垂绝缘子正上方的鸟巢。
7~9月	接地装置易受损	巡视线路周边有无强风造成的故障隐患。	1. 检查接地装置完好性; 2. 检查输电线路各类交叉跨越情况,及时掌握线路交叉跨越现状,对不满足要求的必要时停电处理。
10~12月	锈蚀部位损伤	1. 巡视变压器油位,设备锈蚀及箱门完好情况; 2. 箱式设备凝露巡视,基础通风口巡查等。	1. 对导线弛度进行调整,对重过载、低电压和三相不平衡台区进行治理; 2. 配电线路及设备集中消缺,落实秋检工作; 3. 配变三相不平衡台区进行治理; 4. 箱式设备通风孔清理积雪等; 5. 加强设备检查,对锈蚀及时清除。

4 结论

文中提出了一种基于关联规则的能源互联网输电线路安全分析方法,该方法的提出能在一定程度上提高输电线路应对恶劣天气的能力,同时提高了能源互联网的智能化和安全水平。通过深入分析输电线路易受天气因素影响的问题,收集天气数据和缺陷数据进行分析和处理,然后采用的 Apriori 算法对天气因素下的输电线路故障进行了关联规则挖掘,最后针对关联分析结果采取应对措施,保证输电线路的稳定运行,满足了电网在恶劣天气下的高可靠性需求。

参考文献

- [1] 王继业,蒲天骄,仝杰,等.能源互联网智能感知技术框架与应用布局[J].电力信息与通信技术,2020,18(4):1-14.
- [2] 李朋,钱文姝.输变电设备运行及防灾技术现状分析与发展趋势研究[J].电网与清洁能源,2017,33(12):37-40.
- [3] 陈洋.影响输电线路安全性的因素分析[J].电气技术,2019,

- 20(S1):90-92,98.
- [4] 王川化,余鹏飞.一种基于可靠性分析的输电线路路径设计方法[J].电力工程技术,2017,36(5):149-154.
- [5] Hou K, Shao G, Wang H, et al. Research on practical power system stability analysis algorithm basdon modified SVM[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(11):1-7.
- [6] 李雪,孙霆锴,侯恺,等.极端天气下电力系统大范围随机设备故障的 N-k 安全分析及筛选方法[J].中国电机工程学报,2020(16):5113-5125.
- [7] 肖晗.基于量化关联规则的敏感性分析方法研究与应用[D].成都:西南石油大学,2017.
- [8] 陈勇,李胜男,张丽,等.基于改进 Apriori 算法的智能变电站二次设备缺陷关联性分析[J].电力系统保护与控制,2019,47(20):135-141.
- [9] 林莉,云红艳,贺英,等.基于企业知识图谱构建的可视化研究[J].青岛大学学报(自然科学版),2019,32(1):55-60.
- [10] 谢千焱,高军伟,王飞林,等.计及极端气象条件影响的区域电网安全预警策略研究[J].电气应用,2018,37(23):39-45.
- [11] 李龙,谢大为,汤伟,等.计及气象因素的电网输电线路故障停运概率分析与应用[J].价值工程,2017,36(32):148-150.

收稿日期:2020-07-12

修改稿日期:2020-07-31

(上接第61页)

- [3] Ye S. Design and performance analysis of an iterative flux sliding-mode observer for the sensorless control of PMSM drives[J]. ISA Transactions, 2019, 94: 255-264.
- [4] 周亚宁,胡朝晖,陈曦.基于死区函数的MRAS高精度转子位置估计[J].中国电机工程学报,2019,39(18):5528-5535.
- [5] Feng G, Lai C, Kar N C. Speed harmonic based modeling and estimation of permanent magnet temperature for PMSM drive using Kalman filter[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2019, 15(3): 1372-1382.
- [6] 张海刚,张磊,王步来,等.基于模糊PI滑模观测的PMSM

位置检测[J].电气传动,2017,47(8):7-9.

- [7] 张立伟,李行,宋佩佩,等.基于新型滑模观测器的永磁同步电机无传感器矢量控制系统[J].电工技术学报,2019,34(z1):70-78.
- [8] Liang D, Li J, Qu R, et al. Adaptive second-order sliding-mode observer for PMSM sensorless control considering VSI nonlinearity[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(10): 8994-9004.

收稿日期:2020-02-12

修改稿日期:2020-02-23