

基于滑模观测器的直驱 PMSG 机侧控制算法研究与应用*

许名熠¹, 陶泽安², 郑庆华³

(1. 湖南安全技术职业学院 防灾与救援学院, 湖南 长沙 410151;

2. 湖南机电职业技术学院 汽车工程学院, 湖南 长沙 410151;

3. 江西工埠机械有限责任公司, 江西 宜春 331200)

摘要: 为适应平流水发电水流变化、转速不稳定等外部环境的变化, 提高发电站的发电效率, 在直驱式永磁同步发电机(PMSG)机侧控制算法的基础上, 设计一种带反馈增益自调整算法的滑模观测器(SMO), 对PMSG的转子位置进行估算, 从而改善低速的估计误差。通过设计一套37 kW的PMSG发电机组, 并在现场进行了试验测试, 验证了算法可以有效控制直驱PMSG在低速运行时的转子位置估算误差, 在高速运行时算法能够快速收敛, 满足PMSG控制要求。

关键词: 直驱永磁同步发电机; 转子位置估算; 反馈增益自调整算法; 滑模观测器(SMO)

中图分类号: TM313 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)04-0089-06

doi: 10.12177/emca.2021.211

Research and Application of Generator-Side Control Algorithm for Direct-Drive PMSG Based on Sliding Mode Observer*

XU Mingyi¹, TAO Ze'an², ZHENG Qinghua³

(1. Department of Disaster Prevention and Rescue, Hunan Vocational Institute of Safety Technology,
Changsha 410151, China;

2. Department of Automobile Engineering, Hunan Mechanical & Electrical Polytechnic, Changsha 410151, China;

3. Jiangxi Gong Bu Machinery Co., Ltd., Yichun 331200, China)

Abstract: For small hydropower stations using direct-drive permanent magnet synchronous generators (PMSGs), there exist the needs of adapting to the changes of the external environment such as the change of flow water and the unstable speed of rotation, and improving the efficiency of the power generation. Based on the control algorithm of the direct-drive PMSG on the generator side, a sliding mode observer (SMO) with feedback automatic gain control algorithm is designed to estimate the rotor position of PMSG, so as to improve the estimation error at low speed. We design a set of 37 kW PMSG generator and carry out experiment tests. The results verify that the algorithm can effectively control the rotor position estimation error of the direct-drive PMSG at low speed, and quickly converge at high speed, meeting the control requirements of PMSG.

Key words: direct-drive permanent magnet synchronous generator (PMSG); rotor position estimation; feedback automatic gain control algorithm; sliding mode observer (SMO)

收稿日期: 2021-11-17; 收到修改稿日期: 2022-02-27

* 基金项目: 江西省 2019 年度科技计划立项重点项目(20192ABC01006)

作者简介: 许名熠(1982—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为永磁直驱同步电机控制技术、特种设备安全监测。

陶泽安(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为永磁同步驱动及控制技术。(通信作者)

郑庆华(1977—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为机械电子工程、驱动控制及智能化。

0 引言

平流水发电属于小水电的一种,与传统的水电站相比,具有投资金额小、建设周期短、收益见效快且对生态环境无破坏等优点,同时在低水头和微水头等传统小水电不适合的场合,也能有效利用水资源进行发电,在水生态文明建设和老旧小水电改造等方面提供了一种新的环境友好解决方案^[1-2]。

为适应平流水发电的特点,充分利用水资源,本文采用平流水直驱永磁发电机组进行发电并网。与传统的同步发电机相比,直驱永磁发电机没有减速机、电刷、换向器等繁冗的机械装置,不仅可以提高发电机的效率,而且控制装置及电机功率密度更大,可靠性更强,具有低速高效的特点^[3]。同时由于永磁同步发电机(PMSG)机侧采用变频调速控制,可以根据水头变化等外部环境的变化调节发电机组的转速,使其运行在最佳转速上,优化发电机组的运行,提高发电站的发电效率,同时提高了控制的灵活性^[4]。与传统机组相比,永磁直驱机组的转速与并网的频率不再相关,可以大大提高系统的工作转速范围^[5],从而适应电网以及水头变化的需求。

本文主要研究机侧控制策略及无速度传感器的位置估算算法,将反馈增益自调整算法加入滑模观测器(SMO)当中,从而改善低速的估计误差,使得系统在较宽的范围内都能获得不错的估算性能。该方法的特点是让结构变换开关以较高的频率进行切换,从而对反电动势值进行动态修复,保证估计值和实际值基本吻合。该算法不依赖于PMSG的参数,具有较强的抗扰性和较好的鲁棒性。

1 平流水 PMSG 发电系统

1.1 发电系统结构

在平流水 PMSG 控制系统中,为了实现变速恒频发电,PMSG 产生的交流电经过一个交直变的电能变换后再并入电网,这一过程中全功率变流器实现电能变换的核心任务。PMSG 发电系统的整体框图如图 1 所示。

1.2 PMSG 机侧矢量控制原理

作为平流水发电系统的核心,PMSG 机侧矢

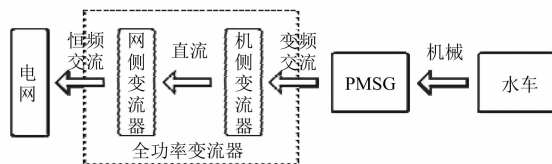


图 1 PMSG 发电系统框图

量控制是实现系统功能的关键。对于整个发电机组,PMSG 的控制要求响应足够快,精度尽可能高,能够具有很高的效率,保证水车上的机械能最大程度地转化为电能,在整个过程中保持较高的功率因数^[6]。对永磁电机的矢量控制,实际上是对解耦后的交直轴电流进行控制。确定了 PMSG 永磁体等效的交直轴励磁磁链和等效的交直轴电感,则 PMSG 的转矩控制集中在电流矢量的控制上,而电流矢量 i_s 的相位和幅值由 d 轴电流 i_d 和 q 轴电流 i_q 决定,所以只需要根据具体的控制方式,给定相应的 i_d^* 和 i_q^* ,然后选择合适的控制策略,让实际的 i_d 和 i_q 能够快速跟踪控制指令 i_d^* 和 i_q^* ,就能够得到较为满意的控制效果,从而实现 PMSG 的矢量控制^[7]。

在本文中,从 PMSG 本体上进行采样得到的电流是其相电流 i_A 、 i_B 、 i_C ,矢量控制所需要的控制指令 i_d^* 和 i_q^* 需要通过下列变换得到:

$$\begin{bmatrix} i_A^* \\ i_B^* \\ i_C^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: θ 为 PMSG 转子永磁体的位置角,也是转子磁链的角度。

本文采用基于反馈增益自调整算法 SMO 的转子位置估算的方法得到转子磁链的角度,同时在转子轴上安装旋转变压器进行验证。

2 基于反馈增益自调整算法 SMO 的转子位置检测

2.1 SMO 算法在 PMSG 的应用

PMSG 通常采用传感器获取转子位置,但是在工程应用中,这种有传感器的控制系统也存在

很多缺点,比如环境适应性差、成本增加、传感器出故障后维护极为不便等等,因此该方式限制了PMSG的应用范围^[8]。在此背景下,无速度传感器的PMSG控制技术成为热点。比较常见的转子位置估算方法有:反电动势法、高频注入法、卡尔曼滤波法、SMO法等^[9]。其中SMO法的实际应用较为广泛。

SMO利用实际控制系统的输入输出值重构得到系统内部一些状态量的估算值,在PMSG无速度传感器研究中得到了较好的应用,可以通过复制扰动的方式实现对转子位置扰动信号的动态补偿,实现估算值接近于真实值。但SMO法也存在一些缺陷,如:PMSG运行到低速区时,需要提高开关增益,而采用高开关增益的SMO法会导致估计的量存在较大的波动,从而造成低速时的估计误差较大^[10]。

平流水发电系统多安装于低水头场合,水车转速受季节及水流影响较大,PMSG机组转速难以稳定,会出现较长时间低速运行的情况。为保证PMSG系统稳定运行,提高发电效率,须解决上述低速时速度估算的问题。本文研究基于反馈增益自调整算法的SMO,改善低速的估计误差,使得系统在较宽的范围内都能获得不错的估算性能。

2.2 基于反馈增益自调整算法 SMO 的位置角估算方法

设计基于SMO的转子位置角估算器,结构如图2所示。

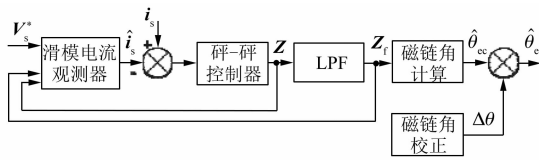


图2 基于SMO的转子位置角估算器

根据表贴式PMSG的数学模型:

$$\dot{\mathbf{i}}_s = -\frac{R}{L}\mathbf{i}_s + \frac{1}{L}(\mathbf{V}_s - \mathbf{e}_s) \quad (2)$$

式中: $\mathbf{i}_s$ 为电流矢量, $\mathbf{i}_s = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$; $\mathbf{e}_s$ 为PMSG的反电动势矢量, $\mathbf{e}_s = \begin{bmatrix} e_{\alpha s} \\ e_{\beta s} \end{bmatrix} = \omega_e \lambda_f \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix}$; $\mathbf{V}_s$ 为机端电

压矢量, $\mathbf{V}_s = \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix}$ 。

$$\begin{bmatrix} \frac{di_\alpha}{dt} \\ \frac{di_\beta}{dt} \end{bmatrix} = -\frac{R}{L} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} - \frac{1}{L} \begin{bmatrix} e_\alpha \\ e_\beta \end{bmatrix} + \frac{1}{L} \begin{bmatrix} v_{s\alpha} \\ v_{s\beta} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中: L 为定子电感; λ_f 为永磁体磁链的幅值; R 代表定子电阻; ω_e 为转子转速; θ_e 转子位置角。

依据上述模型,构造一个电流SMO:

$$\dot{\hat{\mathbf{i}}}_s = -\frac{R}{L}\hat{\mathbf{i}}_s + \frac{1}{L}(\mathbf{V}_s^* + \mathbf{Z} - h\mathbf{Z}\mathbf{Z}_f) \quad (4)$$

式中: $\mathbf{Z} = -k \cdot \text{sign}(\hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s)$, $\hat{\mathbf{i}}_s$ 为估计电流矢量, $\hat{\mathbf{i}}_s = \begin{bmatrix} \hat{i}_\alpha \\ \hat{i}_\beta \end{bmatrix}$; $\mathbf{V}_s^*$ 为电机端电压矢量给定值, $\mathbf{V}_s^* = \begin{bmatrix} V_\alpha^* \\ V_\beta^* \end{bmatrix}$;

$\text{sign}(\hat{\mathbf{i}}_s - \mathbf{i}_s) = \begin{bmatrix} \text{sign}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \\ \text{sign}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \end{bmatrix}$; h 代表等价控制量 $\mathbf{Z}_f$ 的反馈增益值, $h > -1$ 。

PMSG的反电动势 $\mathbf{Z}_f$ 由LPF滤波得到,即砰-砰控制器的开关量:

$$\mathbf{Z}_f = \begin{bmatrix} Z_{f\alpha} \\ Z_{f\beta} \end{bmatrix} = k \begin{bmatrix} \text{sign}(\hat{i}_\alpha - i_\alpha) \frac{\omega_0}{s + \omega_0} \\ \text{sign}(\hat{i}_\beta - i_\beta) \frac{\omega_0}{s + \omega_0} \end{bmatrix} \quad (5)$$

式中: $\omega_0 = 2\pi f_0$, f_0 为LPF的截止频率; $k > 0$ 为砰-砰控制 $\mathbf{Z}_f$ 的开关增益。在设计中,LPF的滤波时间要尽量小,这样才能保证在保留等价控制量 $\mathbf{Z}_f$ 的低频成分基础上,又能将高频干扰成分过滤掉。其中 f_0 值的确定,必须考虑PMSG定子电流的基频分量值。

从式(5)可以看到, $\text{sign}(x)$ 的输出对应着滑模控制信号 $\mathbf{Z}$ 。这种控制方式响应快速,但是由于其具有不连续的特性,因此会带来系统抖动的问题。在实际设计中,采用了饱和函数的方式,当电流误差的绝对值超过一定的阈值时启用砰-砰控制,而在低于该阈值时,采用线性控制,该控制函数可表示如下:

$$\text{sat}(x) = \begin{cases} 1, & x > E \\ \frac{x}{E}, & -E \leq x \leq E \\ -1, & x < -E \end{cases} \quad (6)$$

这种方式比单纯的砰-砰控制具有更好的稳定

性。对于式(6)中 E 的取值,需要根据不同的电机来设定不同的值,通常情况下,可以取为 0.5。

将上述两式相减,假设 $V_s^* = V_s$,可以得到:

$$\dot{S} = -\frac{R}{L}S - \frac{1}{L}(e_s - hZ_f + Z) \quad (7)$$

式中: $S = \hat{i}_s - i_s$ 。

当满足条件 $\dot{S}^T \cdot S > 0$ 时,滑模运动产生,从而可得到

$$e_s = \begin{bmatrix} e_{s\alpha} \\ e_{s\beta} \end{bmatrix} = -(1+h)Z_f \quad (8)$$

从式(8)中可以估计出转子位置角:

$$\hat{\theta}_{ec} = -\arctan(e_{s\alpha}, e_{s\beta}) = \arctan(-Z_{f\alpha}, Z_{f\beta}) \quad (9)$$

2.3 Lyapunov 稳定性判断

利用 Lyapunov 定理来对该 SMO 进行稳定性判断^[11]。选取标量函数 $V = \frac{1}{2}\dot{S}^T \cdot S > 0$, 该函数具有一阶偏导,符合 Lyapunov 的正定条件。而由于 $\dot{V}$ 必须符合负定条件,得到该滑模存在的充分必要条件为 $\lim_{s \rightarrow 0} S^T \cdot \frac{dS}{dt} < 0$ 。

$$\dot{V} = S^T \cdot \dot{S} = S^T A S + S^T B \cdot (\dot{e}_s + h \cdot Z_f + Z) < 0 \quad (10)$$

由式(10)可得:

$$\begin{aligned} \dot{V} &= S^T \cdot \dot{S} = \\ S^T A S + S^T B \cdot \dot{e}_s + k \left(\frac{h}{\sigma s + 1} \right) S^T B \cdot \text{sign}(s) &= \\ E_1 + E_2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$\text{式中: } \sigma = \frac{1}{\omega_0}; A = \begin{pmatrix} -\frac{R}{L} & 0 \\ 0 & -\frac{R}{L} \end{pmatrix}; B = \begin{pmatrix} \frac{1}{L} & 0 \\ 0 & \frac{1}{L} \end{pmatrix}; E_1 =$$

$$S^T A S; E_2 = \frac{1}{L} \left\{ i_\alpha \left[e_{s\alpha} - k \cdot \frac{\sigma s + h + 1}{\sigma s + 1} \text{sign}(i_\alpha) \right] + \right.$$

$$i_\beta \left[e_{s\beta} - k \cdot \frac{\sigma s + h + 1}{\sigma s + 1} \text{sign}(i_\beta) \right] \left. \right\} =$$

$$\frac{1}{L} \left\{ i_\alpha \left[e_{s\alpha} \mp k \cdot \frac{\sigma s + h + 1}{\sigma s + 1} \begin{pmatrix} i_\alpha > 0 \\ i_\alpha < 0 \end{pmatrix} \right] + \right.$$

$$i_\beta \left[e_{s\beta} \mp k \cdot \frac{\sigma s + h + 1}{\sigma s + 1} \begin{pmatrix} i_\beta > 0 \\ i_\beta < 0 \end{pmatrix} \right] \left. \right\}。$$

由式(11)可知, A 矩阵是负定矩阵,而 B 矩

阵是正定矩阵,因此 $E_1 < 0$ 。当 ω_0 值很大时,可以忽略 σ 。如果下式条件满足,则 $E_2 < 0$:

$$\begin{cases} k \cdot \frac{\sigma s + 1 + h}{\sigma s + 1} > |e_{s\alpha}| \\ k \cdot \frac{\sigma s + 1 + h}{\sigma s + 1} > |e_{s\beta}| \end{cases} \Rightarrow k \cdot (1 + h) > |e_s|_{\max} \quad (12)$$

因为 $-\frac{R}{L}i_s^{-2} < 0$, 如果 ω_0 的值比较大,只有满

足以下条件,才能让 E_2 的值为负值:

$$\begin{cases} k \left(\frac{h}{\omega_0} + 1 \right) > |e_{s\alpha}| \\ k \left(\frac{h}{\omega_0} + 1 \right) > |e_{s\beta}| \end{cases} \Rightarrow k \cdot (1 + h) > |e_s|_{\max} \quad (13)$$

由式(13)可以看出,若要满足滑模存在的充分必要条件,必须要保证在 $h > -1$ 时,有足够大的开关增益,同时还要保证 $\dot{V}$ 为负定。这样才可以在很短的时间满足 $S(x) = \hat{i}_s - i_s = 0$, 从而产生滑模运行。

因此,只有当 $k \cdot (h+1) > |\omega_e| \lambda_f$ 时,才能满足如下条件:

$$\lim_{s \rightarrow 0} S^T \cdot \frac{dS}{dt} < 0 \quad (14)$$

假定 h 为转速 ω_e 的函数:

$$h = |\omega_e| - 1 \quad (15)$$

则开关增益 k 必须满足

$$k > \lambda_f \quad (16)$$

反电动势估计值 Z_f 由通过 LPF 滤波得到, LPF 模块的输入则为 Z :

$$Z_f = -\frac{1}{h+1} \omega_e \lambda_f \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} = -\lambda_f \begin{bmatrix} -\sin \theta_e \\ \cos \theta_e \end{bmatrix} \quad (17)$$

而且,最终可以计算出 PMSG 的转子磁链矢量 λ_r 和 Z_f 的关系表达式如下:

$$\lambda_r = \begin{bmatrix} -Z_{f\beta} \\ Z_{f\alpha} \end{bmatrix} = \lambda_f \begin{bmatrix} \cos \theta_e \\ \sin \theta_e \end{bmatrix} \quad (18)$$

2.4 PMSG 最终转速估计值

综合以上分析, Z_f 幅值是恒定的,但是 PMSG 的反电动势的大小会根据 PMSG 的转速变化而发

生较大的变化。此外, Z_r 和 λ_r 的幅值基本相同。因此该方法具备很多优点: 当电机运行在低速区时, PMSG 的反电动势很小, 导致该物理量很难准确估计, 但是 Z_r 的幅值保持恒定, 而且跟转速没有直接关系, 在这种工况下, 可以利用 Z_r 来估计 PMSG 的转子位置。

由式(16)可得, 开关增益 k 较易设置, 且 Z_r 的幅值基本恒定。其中 LPF 模块的主要作用是将开关信号 Z 通过滤波处理变成正弦的反电动势信号, 从而可以采用正切函数来获取 PMSG 的转子位置角。将滤波系数按照下式设置: $K_s = 2\pi f_0 T_s$ (T_s 为采样周期)。通过仿真及试验分析证明, 选择较小的截止频率其控制效果更稳定, 滤波效果更强, 但是同时会带来相位延迟问题, 从而影响角度观测的准确性。所以最终观测的位置角需要增加一个补偿角:

$$\Delta\theta = \arctan(\omega_e, \omega_0) \tag{19}$$

最终的 PMSG 转子位置角估计值为

$$\hat{\theta}_e = \hat{\theta}_{ec} + \Delta\theta \tag{20}$$

从而得到 PMSG 的转速估计值:

$$\hat{\omega}_e = \frac{d\hat{\theta}_e}{dt} \tag{21}$$

3 PMSG 系统的设计和试验测试

3.1 PMSG 发电机组系统设计

在以上基于反馈增益自调整算法 SMO 的转子位置检测原理的基础上, 设计 PMSG 机侧控制结构, 结合并网技术设计平流水 PMSG 的硬件系统, 包括网侧控制器、网侧变流单元、机侧控制器、机侧变流单元, 以及 PMSG 发电机组的核心控制单元、人机界面(HMI)、发电机, 同时配置速度传感器旋转变压器进行发电机的转速校验。在核心控制单元、网侧控制器、机侧控制器完成系统相关软件的设计与开发, 从而实现平流水直驱 PMSG 装置的基本功能, 设计一套测试用 PMSG 发电机组在低水头流水发电现场对功能及性能指标进行试验验证。结构框图如图 3 所示。

3.2 PMSG 系统技术指标

PMSG 发电机组试验测试系统具体指标如表 1 所示。

3.3 平流水发电装置现场并网发电运行试验

为验证平流水 PMSG 发电机组系统实际并网

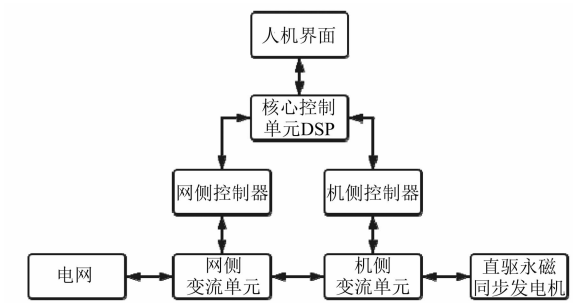


图 3 PMSG 控制系统的整体框图

运行的效果, 在江西省樟树市芡溪河大桥街道水坝出水口搭建了一套验证系统, 利用平流水的流动带动水车转动, 驱动 PMSG 发电, 采用本文设计的控制器对 PMSG 进行发电调节控制。PMSG 发电机组及控制柜如图 4 所示。

表 1 PMSG 系统技术指标

参数名称	参数值
网侧电压/V	380(100%±15%)
网侧频率/Hz	50±0.5
直流母线电压/V	660
发电机额定输出功率/kW	37
发电机额定电压/V	380
发电机额定电流/A	68
发电机额定转速/(r·min ⁻¹)	300
发电机电极对数	10



图 4 平流水 PMSG 系统试验现场

当水流淹没水车的部分叶片并且能够带动叶片进行旋转后系统即能开始发电, 在该试验验证的过程中, 平流水直驱永磁发电机组以 PMSG 转速为控制目标, 现场工作时, 系统根据实时水量的大小来控制发电机在最佳转速, 从而达到最佳的发电效

果。当发生过载、过温以及电机进水故障时,系统会自动停机并将负载箱切入,让发电机带负载运行,防止发电机转速飞逸。根据本文设计的控制算法,通过调节水坝阀门的开度来模拟平流水发电的功率动态调节过程,并记录 PMSG 的转速估算值与旋转变压器实测值波形,如图 5 和图 6 所示。

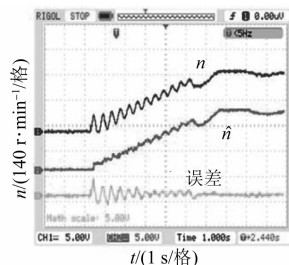


图 5 起动过程中实际转速、估计转速和误差曲线

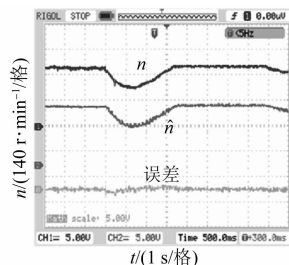


图 6 调节过程中实际转速、估计转速和误差曲线

图 5、图 6 中 n 为旋转变压器检测的实际转速, $\hat{n}$ 为基于反馈增益自调整算法 SMO 的转子估计转速, 误差曲线为 $(n - \hat{n})$ 值。图 5 记录了 PMSG 从静止起动后按照斜坡加速到额定转速附近 (310 r/min) 的变速过程, 转速估计值较好地跟踪了实际转速, 在起动初期 PMSG 发电机组运行不稳定, 电机转速波动较大, 会有一定估计误差, 经过大约 10 s 的时间, 估算误差明显减小, 当电机转速稳定之后, 估算误差逐渐减小并收敛, 趋于 0。图 6 记录了负载突然加大、转速下降的过程, 系统自动调节后转速逐渐恢复到正常, 在速度波动初期会引起估计误差增大, 经过较短的时间 (约 1 s) 估计误差减小, 当 PMSG 转速恢复到正常值时, 估计误差也能够稳定在 0 附近。

通过上述试验, 可以反映无速度传感器 SMO 法能够较为准确地估算转子位置, 在没有转子位置传感器的情况下, 也能实现 PMSG 的转矩矢量控制, 而且由于设计了滑模开关函数, 在实际运行

中不受 PMSG 的参数影响, 能够提高观测器的鲁棒性及动态响应能力。

4 结 语

本文在 PMSG 机侧矢量控制的基础上, 设计了一种带反馈增益自调整算法的 SMO, 对 PMSG 的转子位置进行估算, 并应用在低水头直驱式 PMSG 发电机组系统中。通过设计一套 37 kW 的 PMSG 发电机组在低水头流水发电现场进行了试验测试, 获得试验数据并进行分析, 结果表明该算法可以有效控制直驱 PMSG 在低速运行时的转子位置估算误差, 在高速运行时, 算法能够快速收敛, 避免强烈的振动和抖动。同时算法动态特性表现出色, 对参数具有较强的鲁棒性, 将砰-砰控制器的增益降低, 可以提高转速估计的稳定性。算法得到的转子位置估算值能够满足控制要求。此外, 还通过试验验证了直驱式 PMSG 发电机组的基本功能, 为后续研究及产品化打下基础。

【参考文献】

- [1] 肖惠民, 于波, 蔡维由. 超低水头水轮机在可再生能源开发中的应用进展[J]. 水电与新能源, 2011, (3): 62.
- [2] 陈炳煌, 雷升庆. 一种超低水头水力发电的竖叶式水车[J]. 中国农村水利水电, 2012(11): 60.
- [3] 徐广泰. 55 kW 水斗式半直驱发电系统研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2013.
- [4] 谢聪. 自适应滑模控制的 PMSG 并网逆变系统研究[D]. 湘潭: 湖南科技大学, 2015.
- [5] 彭程. 永磁直驱风力发电系统控制策略及实验系统研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2013.
- [6] 李华柏, 粟慧龙, 谢永超. 基于自抗扰控制的双馈风力发电系统最大功率追踪研究[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(2): 71.
- [7] 唐小琦, 白玉成, 陈吉红. 永磁同步电机高性能电流解耦控制的研究[J]. 电气传动, 2009, 39(10): 18.
- [8] 张宇峰, 高田. 永磁同步电机无位置传感器控制研究[J]. 自动化技术与应用, 2021, 40(10): 22.
- [9] HUANG Z Y, ZHENG X. Research on sensorless control of PMSM based on sliding mode observer[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, 668/669: 637.
- [10] 林自城. 基于滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制方法改进与实现[D]. 重庆: 重庆大学, 2020.
- [11] 陆骏, 杨建国. 永磁同步电机滑模直接转速观测器[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(1): 86.