

DOI: 10.7667/PSPC161428

# 永磁同步电机角度软锁相环估算方法研究

田素立, 赵瑞杰, 李朝锋, 邢珊珊

(许继集团有限公司, 许昌许继风电科技有限公司, 河南 许昌 461000)

**摘要:** 分析了永磁同步电机无传感器控制的研究现状, 设计一种电机角度软锁相环估算方法。在两相静止坐标系下建立永磁同步电机数学模型, 获得包含电机角度和转速信息。通过对反电动势信息的积分、高通滤波及归一化处理, 获得仅包含电机角度正余弦信息。借角度观测器理论, 设计了软锁相环并确定了其关键参数, 最终获得永磁同步电机角度及同步转速。仿真分析及试验结果表明, 此永磁同步电机角度软锁相环能够准确获得电机角度和转速信息, 基于此方法的矢量控制系统稳定且动态特性好。

**关键词:** 永磁同步电机; 无位置传感器; 转子角度; 软锁相环; 角度观测器

## Research of angle soft phase-locked loop estimation method of permanent magnet synchronous motor

TIAN Suli, ZHAO Ruijie, LI Chaofeng, XING Shanshan

(Xuchang XJ Wind Power Science and Technology Co., Ltd., XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China)

**Abstract:** The research status quo of sensor-less control scheme of permanent magnet synchronous motor is analyzed. A motor soft phase-locked loop estimation method is mentioned. In the two-phase stationary system, the mathematical model of PMSM is established to obtain the motor angle and speed information. Through the integration of back EMF information, high-pass filtering and normalized processing, the motor angle sine and cosine information are obtained. The software PLL and its key parameters are designed to get the angle and synchronous speed of PMSM. Simulation analysis and experimental results show that the soft PLL of permanent magnet synchronous motor can accurately obtain the motor angle and speed information. And the vector control system is stable and has a good dynamic characteristics based on the method.

This work is supported by Science and Technology Development Plan of State Grid Corporation of China (No. SGSDDK00KJJS1500155).

**Key words:** permanent magnet synchronous motor; without position sensor; rotor angle; soft phase-locked loop; angle observer

## 0 引言

永磁同步电机(PMSM)具备动态响应快、能量密度高过载能力强等优点。近年来在航天、工业伺服控制、汽车电子行业应用广泛。实现 PMSM 高性能控制一般采用在电机转子轴上安装传感器(测速发电机、旋转变压器和编码器等)方式。通过解算电机角度、转速信息, 实现闭环矢量控制。但传感器的引入会增加系统成本、降低系统可靠性及增加电机尺寸, 并且有些场合受温度、湿度和电机尺寸限制等, 位置传感器无法使用。为了解决此问题, 需要研究无速度传感器矢量控制方案。

PMSM无位置速度传感器控制一般有3种实现方案: 1) 基于电机理想模型的开环计算方法; 2) 基于各种观测模型的闭环算法; 3) 通过叠加激励信号基于电机非理想特性算法。

基于电机理想模型的开环计算方案优点在于实现简单, 但鲁棒性差, 已经不再是研究热点。基于各种观测模型的闭环算法, 因其鲁棒性高且计算准确而成为研究热点。文献[1]提出了一种基于自适应陷波滤波器的内置式永磁电机转子位置观测方法; 文献[2]提出了一种基于中心差分滤波算法的非线性系统角度识别方法; 文献[3-4]提出基于分数阶、双滑模模型参考自适应系统的PMSM无位置传感器控制策略。基于电机非理想模型的叠加激励信号算法提高了系统在低转速条件下锁相精度<sup>[5-6]</sup>。

软锁相环具有锁相准确和鲁棒性好的特点, 在

基金项目: 国家电网公司科技项目资助 (SGSDDK00KJJS 1500155)

电机角度计算中得到广泛应用。文献[7]提出了一种基于有效磁链模型的锁相环的转子位置识别方法; 文献[8]提出了一种基于正弦型软开关滑膜观测器的锁相环转子位置识别方法; 文献[9]提出了一种具有电机电阻和电感参数辨识功能滑膜观测器的锁相环转子位置识别策略。所提及锁相环输入多为广义反电动势分量, 计算复杂且转速和角度耦合; 对于锁相环及关键参数设计不够明确。

在充分借鉴以上文献结论基础上, 提出一种电机角度软锁相环估算方法。即依据Clark坐标变换, 在两相静止坐标系下建立PMSM数学模型, 获得包含电机角度和转速的反电动势信息。通过对反电动势信息的积分、高通滤波及归一化处理, 获得仅包含电机角度正余弦信息。借助角度观测器理论, 设计了软锁相环并确定了其关键参数, 最终获得PMSM电角度及同步转速。仿真分析结果以及试验结果表明, 此PMSM角度软锁相环能够准确获得电机角度和转速信息, 基于此方法的矢量控制系统稳定且动态特性好。

## 1 永磁同步电机无传感器矢量控制

永磁同步电机磁场定量矢量控制由转速外环和转矩(电流)内环构成, 其核心是在转子磁场旋转坐标系中针对励磁电流和转矩电流分别控制。PMSM无传感器矢量控制原理图如图1所示。

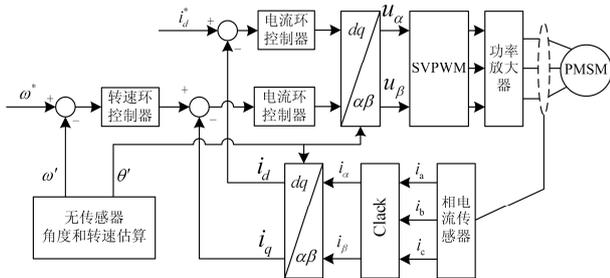


图1 永磁同步电机无传感器矢量控制原理图

Fig. 1 Block diagram of sensorless vector control of PMSM

坐标变换中使用的电角度  $\theta'$  以及转速外环角速度反馈值  $\omega'$  均由无传感器角度、转速估算单元获得。本文采用实现方案为: 使用包含角度信息的PMSM数学模型, 使用角度观测器结合软锁相环估算方法进行锁相, 得到PMSM角度和转速信息。

## 2 永磁同步电机角度软锁相环估算方法

### 2.1 包含角度信息永磁同步电机数学模型

PMSM采用三相交流供电, 具有多变量、强耦

合及非线性的特点, 控制复杂。为简化控制, 在保证输出磁链等效的前提下, 引入坐标变换思想, 将PMSM简化为直流电机进行控制。依据Clark坐标变换,  $\alpha\beta$  坐标系下的PMSM电压方程为

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} \\ u_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 、 $i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$  分别表示定子等效电压和电流在  $\alpha\beta$  轴的分量;  $R_s$  为定子相电阻;  $\psi_{s\alpha}$  和  $\psi_{s\beta}$  为  $\alpha\beta$  轴上的等效磁链分量(式(2))。

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = L_m i_{s\alpha} + \lambda_\alpha \\ \psi_{s\beta} = L_m i_{s\beta} + \lambda_\beta \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $L_m$  为励磁电感;  $\lambda_\alpha$  和  $\lambda_\beta$  分别为永磁体磁链  $\lambda$  在  $\alpha\beta$  轴上的分量。

式(2)代入式(1), 有

$$\begin{cases} u_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_m \dot{i}_{s\alpha} - \omega \lambda \sin \theta \\ u_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_m \dot{i}_{s\beta} + \omega \lambda \cos \theta \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\omega$  为电机同步转速;  $\theta$  为永磁体磁链  $\lambda$  与  $\alpha$  轴夹角, 即电机电角度。

式(3)包含了 PMSM 同步转速及电角度信息。对于 PMSM,  $R_s$  和  $L_m$  是已知信息,  $u_{s\alpha}$ 、 $u_{s\beta}$ 、 $i_{s\alpha}$ 、 $i_{s\beta}$  均可以通过电压及电流传感器测量后再经过计算获得,  $u_{s\alpha}$  和  $u_{s\beta}$  也可以使用图1所示的控制器输出控制量。因此 PMSM 的同步转速及电角度信息可以通过式(3)获取。

### 2.2 软锁相环基本结构及工作原理

软锁相环一般由鉴相器、环路滤波器、压控振荡器三部分组成, 结构框图如图2所示。



图2 基本软锁相环结构图

Fig. 2 Block diagram of basic SPLL structure

其基本工作原理为: 鉴相器用于比较参考相角和锁相环输出相角信号的误差, 经过环路滤波器和压控振荡器的调节作用使得两者的相位差 ( $\theta_{err}$ ) 尽可能地小。当  $\theta_{err} = 0$  时, 锁相环输出相位便是参考相位, 即  $\theta' = \theta$ 。

### 2.3 永磁同步电机角度软锁相环估算方法

通过对式(3)积分, 有

$$\begin{cases} \lambda \cos \theta = \int (u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha} - L_m \dot{i}_{s\alpha}) dt \\ \lambda \sin \theta = \int (u_{s\beta} - R_s i_{s\beta} - L_m \dot{i}_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (4)$$

通常情况下,因数据采集造成的零漂问题,积分后会出现比较大的影响,因此需要对积分后的值进行高通滤波处理,滤波器截止频率尽量低,以保证低转速情况下转速信息的提取。

对式(4)三角函数归一化有

$$\begin{cases} \cos \theta = \frac{1}{\lambda} \int (u_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha} - L_m \dot{i}_{s\alpha}) dt \\ \sin \theta = \frac{1}{\lambda} \int (u_{s\beta} - R_s i_{s\beta} - L_m \dot{i}_{s\beta}) dt \end{cases} \quad (5)$$

式(5)中磁链 $\lambda$ 可以通过 $\sqrt{\lambda^2 \cos^2 \theta + \lambda^2 \sin^2 \theta}$ 求得。因此可以得到两相静止坐标系下,由PMSM电压方程获得电机电角度信息的原理图如图1所示。

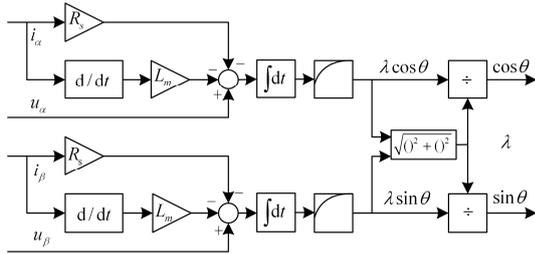


图3 获得永磁同步电机电角度信息原理图

Fig. 3 Schematic diagram for obtaining PMSM angle

结合角度观测器的基本理论及三角函数变换公式,可得

$$\sin(\theta - \theta') = \sin \theta \cos \theta' - \cos \theta \sin \theta' \quad (6)$$

当 $\theta' \rightarrow \theta$ 时相位锁定,有 $\theta' = \theta$ 。应用到PMSM电角度跟踪上,得到改进后<sup>[10]</sup>的软锁相环控制流程图如图4所示。

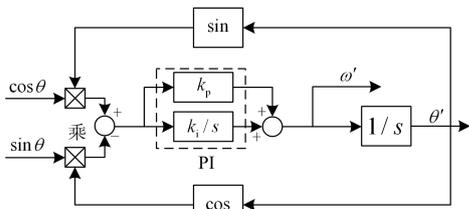


图4 改进后软锁相环控制流程图

Fig. 4 Control diagram of the improved three-phase SPLL

如图4所示,在已知角度正余弦值的情况下,可以得到PMSM角速度及电角度信息。在估算电角度和实际电角度相差很小的情况下,简化后的改进型SPLL控制流程图如图5所示。

PMSM无传感器矢量控制坐标变换中使用的电角度为锁相环估算电角度,锁相环输出转速估算值

除以电机极对数作为电机实际转速值。

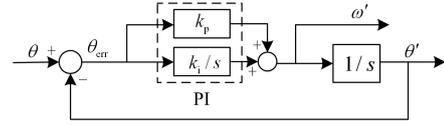


图5 改进后三相软锁相环简化控制流程图

Fig. 5 Simplified control diagram of the improved three-phase SPLL

### 3 角度软锁相环估算的仿真分析

#### 3.1 软锁相环参数确定及仿真电路设计

简化后的SPLL闭环传递函数为

$$H(s) = \frac{sk_p + k_i}{s^2 + sk_p + k_i} \quad (7)$$

典型二阶系统传递函数

$$H(s) = \frac{2\xi\omega_n s + \omega_n^2}{s^2 + 2\xi\omega_n s + \omega_n^2} \quad (8)$$

式中: $\omega_n$ 为闭环系统圆频率; $\xi$ 为阻尼系数。对比标准二阶系统传递函数,确定SPLL中PI调节器参数选择

$$\begin{cases} k_p = 2\xi\omega_n \\ k_i = \omega_n^2 \end{cases} \quad (9)$$

由式(9)可知,通过合理的 $k_p$ 和 $k_i$ 参数的选取能够获得SPLL理想的动态响应及稳态效果。

系统采样及控制周期 $125 \mu s$ ,电机额定转速 $1800 \text{ rpm}$ 时。为了使锁相快速、稳定,软锁相环系统无阻尼振荡圆频率取 $\omega_n = 1000 \text{ rad/s}$ 。锁相环系统不振荡<sup>[11-12]</sup>,取阻尼系数取 $\xi = 1$ 。代入式(9)得到软锁相环PI调节器参数 $k_p = 2000$ , $k_i = 10000$ 。

#### 3.2 软锁相环估算方法仿真分析

使用Matlab软件Simulink进行仿真模型搭建以及仿真分析。仿真分析分开环分析和闭环分析两部分。

开环分析是指使用位置传感器(旋转变压器或者编码器)计算所得转速、角度信号(认为实际值)进行矢量控制,软锁相环角度、转速估算值与之对比。观察软锁相环估算方法所得转速、角度与实际转速、角度是否一致,即验证锁相结果的准确性。

将位置传感器计算所得的转速、角度投入到图1所示的矢量控制模型中,观察锁相环输出稳定性及动态特性。选择额定转速为 $1800 \text{ rpm}$ (极对数3)的PMSM作为控制对象,设计合适的转速及电流环控制器参数及负载扭矩,在给定转速为 $0 \rightarrow 1800 \text{ rpm}$ 时,记录传感器计算所得转速、角度信号及软锁相环估算转速、角度信号曲线如图6所示。

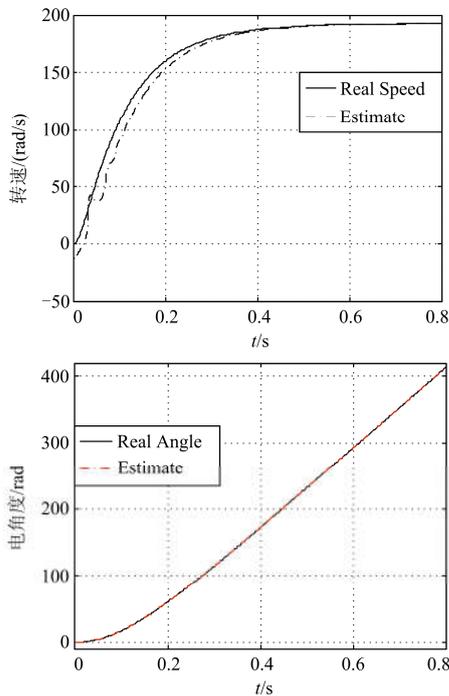


图 6 开环情况下软锁相环估算值与实际值  
Fig. 6 Estimated value of SPLP and real value  
in the case of open-loop

由图 6 可知, 软锁相环估算所得 PMSM 转速、角度与实际值误差很小, 转速、角度输出稳定且动态特性很好。

闭环分析是指使用锁相环估算转速、角度值进行矢量控制, 传感器计算所得转速、角度信号作为实际值与之对比。观察锁相环所得信号参与矢量控制的动态效果。

将图 3、图 4 所示的软锁相环估算角度、转速模块代入到图 1 所示的 PMSM 无传感器矢量控制模型中, 观察控制系统稳定性及动态特性。与开环分析时采用相同的系统参数时, 在给定转速为  $0 \rightarrow 1800 \text{ rpm}$ , 记录传感器计算所得转速、角度信号及软锁相环估算转速、角度信号曲线如图 7 所示。

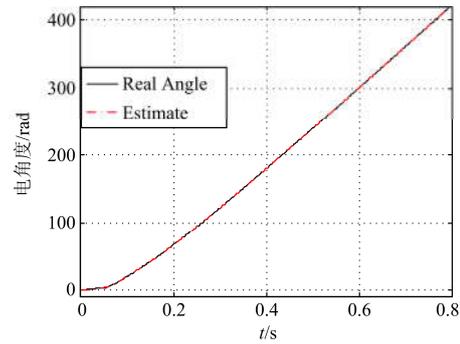
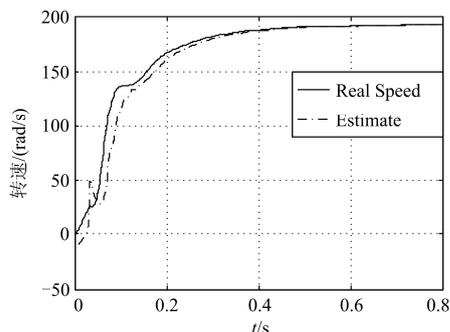


图 7 闭环情况下软锁相环估算值与实际值  
Fig. 7 Estimated value of SPLP and real value  
in the case of closed-loop

给定转速为  $0 \rightarrow 1800 \text{ rpm} \rightarrow 900 \text{ rpm} \rightarrow 1800 \text{ rpm} \rightarrow 900 \text{ rpm}$ , 记录传感器计算所得转速信号及软锁相环估算转速信号曲线如图 8 所示。

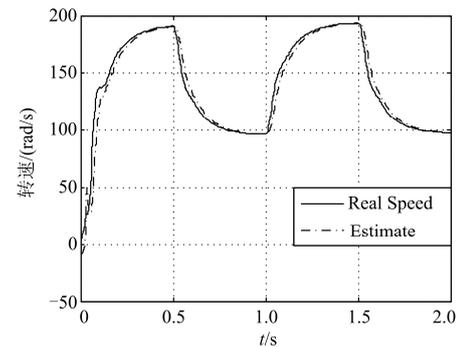


图 8 软锁相环转速估算值与实际值  
Fig. 8 Estimated speed value of SPLP and the real value

由图 7、图 8 可知, 软锁相环估算所得 PMSM 转速、角度在参与闭环矢量控制时, 系统稳定且动态特性很好。

#### 4 实验验证

搭建实验平台, 使用额定转速为  $1800 \text{ rpm}$ 、极对数 3 的永磁同步电机作为拖动对象。使用 TI 公司 TMS320F28335 的浮点 DSP 作为主控制芯片的伺服驱动器对 PMSM 进行软锁相环估算的矢量控制实验。

将软锁相环估算所得角度、转速信息用于 PMSM 矢量控制实验, 给定转速为  $0 \rightarrow 1800 \text{ rpm}$  时, 上位机软件录波方式记录软锁相环估算转速 (rpm) 如图 9 所示。

编程实现给定转速为  $1600 \text{ rpm} \rightarrow 780 \text{ rpm} \rightarrow 1500 \text{ rpm}$ , 考察系统工作动态特性。上位机软件录波方式记录软锁相环估算转速 (rpm) 曲线如图 10 所示。

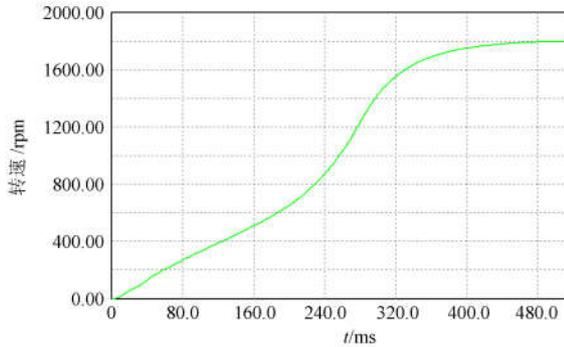


图 9 启动过程软锁相环估算转速

Fig. 9 Estimated speed value of SPLL when starting

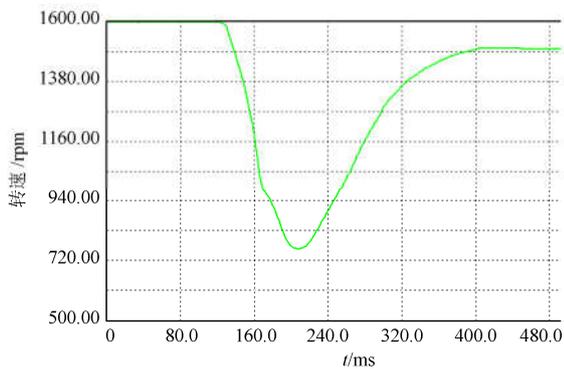


图 10 扰动给定时软锁相环估算转速

Fig. 10 Estimated speed value of SPLL when the disturbance

由图9和图10可知,软锁相环估算所得转速进行闭环矢量控制时,系统稳定且动态特性很好,与仿真结果一致。

给定转速为1000 rpm时,上位机软件录波方式记录软锁相环估算电角度如图11所示。

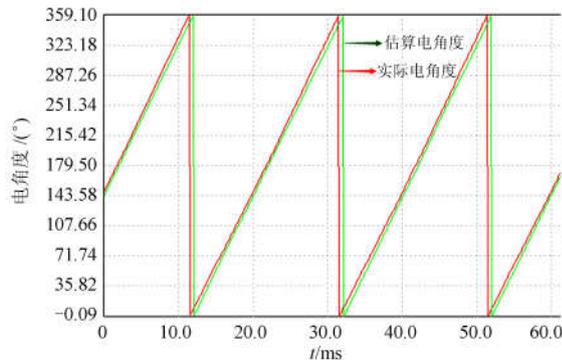


图 11 实际电角度与软锁相环估算电角度

Fig. 11 Estimated electrical angle of SPLL and the real one

图中相位超前为实际值,相位滞后为估算值。软锁相环估算所得电角度与实际电角度误差很小,相位稍微滞后一些,符合软锁相环预定设计。

## 5 结论

永磁同步电机角度软锁相环估算方法研究,通过以下方案实现:

1) 通过对控制对象在两相静止坐标系下建模,获得包含角度信息的PMSM数学模型。

2) 借助角度观测器,使用软锁相环锁相方式获得PMSM角度和转速信息,并通过优化软锁相环参数获得较好的锁相效果。

3) 将软锁相环所得角度、转速信息代入PMSM矢量控制。

系统具备以下突出优点:

1) 两相静止坐标系下PMSM数学模型结构简单,变量意义明确。

2) 使用积分、高通滤波及归一化处理角度信息后,所得角度变量无耦合。

3) 软锁相环所观测电机角度及转速,在合理设计环路参数的情况下,提高了系统的准确性及鲁棒性,因其自身滤波特点无需额外高频滤波器。

通过开环及闭环仿真分析验证了软锁相估算方法的正确性。实验验证结果证明了软锁相估算方法的合理性。仿真及试验结果表明,此软锁相环能够准确获得PMSM角度、转速信息,基于此方法的矢量控制系统稳定且动态特性好。

## 参考文献

[1] 张国强, 王高林, 徐殿国, 等. 基于自适应陷波滤波器的内置式永磁电机转子位置观测方法[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(9): 2521-2527.  
ZHANG Guoqiang, WANG Gaolin, XU Dianguo, et al. Adaptive Notch filter based rotor position estimation for interior permanent magnet synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(9): 2521-2527.

[2] 安小宇, 崔光照, 丁国强, 等. 基于中心差分滤波算法的PMSM无传感器控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 37-42.  
AN Xiaoyu, CUI Guangzhao, DING Guoqiang, et al. The PMSM's sensorless vector control method based on CDKF algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 37-42.

[3] 高远, 刘传国, 文家燕, 等. 基于分数阶自适应转速估计的永磁同步电机无传感器控制研究[J]. 微电机, 2015, 48(5): 85-89, 94.  
GAO Yuan, LIU Chuanguo, WEN Jiayan, et al. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor based on fractional-order adaptive speed estimation[J]. Micromotors, 2015, 48(5): 85-89, 94.

- [4] 王庆龙, 张兴, 张崇巍, 等. 永磁同步电机矢量控制双滑模模型参考自适应系统转速辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 897-902.  
WANG Qinglong, ZHANG Xing, ZHANG Chongwei, et al. Double sliding-mode model reference adaptive system speed identification for vector control of permanent magnet synchronous motors[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 897-902.
- [5] 朱军, 田淼, 付融冰, 等. 基于载波频率成分的永磁同步电机转子定位研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 48-54.  
ZHU Jun, TIAN Miao, FU Rongbing, et al. Research on rotor position of permanent magnet synchronous motor based on carrier frequency component[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(14): 48-54.
- [6] 刘家曦, 李立毅, 杜鹏程, 等. 考虑磁场交叉耦合的内嵌式永磁同步电机初始位置检测技术[J]. 电工技术学报, 2013, 28(7): 32-38.  
LIU Jiayi, LI Liyi, DU Pengcheng, et al. Initial rotor position estimation considering magnetic cross-coupling based on IPMSM[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(7): 32-38.
- [7] 张兴, 郭磊磊, 杨淑英, 等. 永磁同步发电机无速度传感器控制[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(21): 3440-3447.  
ZHANG Xing, GUO Leilei, YANG Shuying, et al. Speed sensorless control of permanent magnet synchronous generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(21): 3440-3447.
- [8] 陆婉泉, 林鹤云, 冯奕, 等. 永磁同步电机无传感器控制的软开关滑模观测器[J]. 电工技术学报, 2015, 30(2): 106-113.  
LU Xiaoquan, LIN Heyun, FENG Yi, et al. Soft switching sliding mode observer for PMSM sensorless control[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(2): 106-113.
- [9] 王悍皋, 刘凌, 吴华伟. 改进型滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制策略[J]. 西安交通大学学报, 2016, 50(6): 104-109.  
WANG Hanxiao, LIU Ling, WU Huawei. Single-phase double-stage photovoltaic grid-connected inverter[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2016, 50(6): 104-109.
- [10] 田素立, 赵瑞杰, 邢珊珊, 等. 永磁同步电机电流环控制器的设计[J]. 微电机, 2015, 48(3): 44-47, 66.  
TIAN Suli, ZHAO Ruijie, XING Shanshan, et al. Design of permanent magnet synchronous motor current-loop controller[J]. Micromotors, 2015, 48(3): 44-47, 66.
- [11] 邢珊珊, 田素立, 王振华, 等. 光伏 MPPT 系统电压控制器的优化设计[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(12): 114-118.  
XING Shanshan, TIAN Suli, WANG Zhenhua, et al. Optimized design of the voltage controller of PV MPPT system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(12): 114-118.
- [12] LI Zhi, YE Lin, ZHAO Yongning, et al. Short-term wind power prediction based on extreme learning machine with error correction[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 8pp.  
DOI 10.1186/s41601-016-0016y

收稿日期: 2016-09-02; 修回日期: 2016-12-13

作者简介:

田素立(1986—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为功率电子变换技术, 光伏系统控制; E-mail: accordance2008@163.com

赵瑞杰(1978—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为分布式发电技术。

(编辑 姜新丽)