

[文章编号] 1003—4684(2020)02-0037-05

基于 SOGI 的 IPMSM 低速转子位置检测方法

赵 云¹, 宋茂良¹, 易 磊²

(1 湖北工业大学 太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430068;

2 华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

[摘 要] 为提高低速时内置式永磁同步电机(IPMSM)转子位置辨识的精度,设计一种新型信号解调方案。当注入旋转高频电压信号后,所采用的新型二阶广义积分器(SOGI)可对响应电流 i_d 和 i_q 进行解调,随后经锁相环(PLL)获取转子位置和转速。经仿真验证,相较传统滤波器法,新型 SOGI 方法有更高的观测精度。

[关键词] 二阶广义积分器; 内置式永磁同步电机; 信号解调; 转子位置检测

[中图分类号] TM301.2 [文献标识码] A

永磁同步电机(PMSM)具有功率密度高、效率高和噪声低等优点,因此在空压机、新能源电动汽车等领域得到广泛应用^[1-2]。机械传感器为系统提供转子位置和转速信息^[3],但其增加设计成本,同时在某些狭小的空间和极端的环境中,机械传感器不适用,因此无位置传感器控制技术具有重要的研究价值^[4-5]。在内置式永磁同步电机(IPMSM)低速状态下,采用旋转高频电压注入法对其进行无位置传感器控制^[6-7],该技术的重难点之一是如何对高频响应电流信号解调。文献[8-14]针对高频响应信号解调的方法取得了一定的成果,但多个滤波器的引入,导致响应信号相位滞后且幅值衰减,从而降低转子位置观测精度。而对响应信号进行调制,增大了系统的计算量,不可避免的给硬件造成负担。本文提出一种新型的 SOGI 结构进行高频电流响应信号解调,并在 Simulink 仿真平台上与传统信号解调方法进行对比研究,以获得更高的观测精度。

1 旋转高频电压注入法

1.1 旋转高频电压注入法基本原理

向电机 $\alpha\beta$ 坐标系中注入高频电压信号,通过信号解调从高频响应电流可获取转子位置和转速信息。如图 1 所示,在 dq 坐标系中,PMSM 参考电流 i_{dqf}^* 与反馈电流 i_{dqf} 比较,并经过 PI 调节器的调节、Park 逆变换后,可得到 $\alpha\beta$ 坐标系下的电压信号 $u_{\alpha\beta f}$ 。给 PMSM 注入高频电压信号 $jU_h e^{j\omega_e t}$,其中 U_h 为高频电压幅值。带有高频成分的电压信号 $u_{\alpha\beta h}$ 经逆变器 VSI 给 PMSM 供电,电流响应 i_{abc} 经

Clark 变换,然后分别通过带阻滤波器(Band Stop Filters,BSF)、带通滤波器(Band Pass Filters,BPF)得到 PMSM 基频电流 $i_{\alpha\beta f}$ 、高频电流 $i_{\alpha\beta h}$ 。基频电流 $i_{\alpha\beta f}$ 经过 Park 变换得到 PMSM 反馈电流 i_{dqf} 作用于闭环系统,高频电流 $i_{\alpha\beta h}$ 通过信号解调模块获取 PMSM 估算转子位置角度 θ_e 。

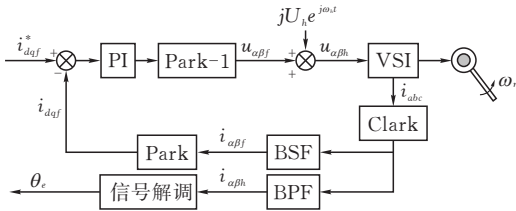


图 1 旋转高频电压注入法原理

1.2 高频注入及其电流响应

在 $\alpha\beta$ 坐标系中给绕组注入高频电压信号,则 PMSM 的高频电压方程为

$$\begin{bmatrix} u_{ah} \\ u_{bh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_0 + L_1 \cos(2\theta_e) & L_1 \sin(2\theta_e) \\ L_1 \sin(2\theta_e) & L_0 - L_1 \cos(2\theta_e) \end{bmatrix} \cdot p \begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_{ah} 、 u_{bh} 和 i_{ah} 、 i_{bh} 分别为 $\alpha\beta$ 坐标系中的高频电压和高频电流; L_0 为共模电感, $L_0 = (L_d + L_q)/2$; L_1 为差模电感, $L_1 = (L_d - L_q)/2$; L_d 和 L_q 分别为直轴电感和交轴电感; p 为微分算子; θ_e 为转子位置电角度。

将式(1)改写为电流的微分形式,则

$$p \begin{bmatrix} i_{ah} \\ i_{bh} \end{bmatrix} = \frac{1}{L_0^2 - L_1^2} \cdot$$

时,输出信号 v' 的反馈值 ϵ 也会含有直流分量。此信号经过增益 k 放大,并且与 qv'' 相减消除 qv' 中的直流分量。当 $k\epsilon$ 引入 qv'' 时,会产生高频谐波,在系统中引入低通滤波器(Low Pass Filter, LPF)滤除高次谐波。

新型 SOGI 的传递函数

$$D(s) = \frac{v'(s)}{v(s)} = \frac{k\omega' s}{s^2 + k\omega' s + \omega'^2} \tag{13}$$

式中: ω' 为该滤波器的中心频率; $v(s)$ 和 $v'(s)$ 分别为输入和输出信号; k 为阻尼系数。

对式(13)进行改写,得

$$D_1(s) = \frac{\frac{\omega'}{Q_D}s}{s^2 + \frac{\omega'}{Q_D}s + \omega'^2} \tag{14}$$

式中: Q_D 为 SOGI 的品质因数。

由式(13)和式(14),该 SOGI 的品质因数

$$Q_{D1} = 1/k \tag{15}$$

对式(15)进行分析可知,新型 SOGI 的信号解调方法比传统滤波器方法的参数设计更简单,仅对 k 值进行调节就可实现系统不同的选频效果,同时也可进行系统的参数在线调试。

SOGI 是先将 $k\epsilon$ 经过的处理,然后与 qv'' 做减法,从而使 qv'' 在 LPF 高频段有较大的衰减,LPF 传递函数为

$$G_{LPF}(s) = \frac{1}{1 + \tau s} \tag{16}$$

式中 τ 与 LPF 的截止频率有关。

4 仿真与分析

为验证本文方法的可行性和优越性,在 MATLAB/Simulink 仿真实验平台上搭建仿真模型,分别采用传统滤波器方法和新型 SOGI 方法进行信号解调,所用 IPMSM 的参数见表 1。在仿真中,注入旋转高频电压的幅值为 20 V,频率为 1 kHz, SOGI 的阻尼系数 k 取 0.1。

表 1 电机参数	
参数	数值
额定功率 P_N /kW	1.5
额定电压 U_N /V	310
极对数 p_n	4
额定转速 n_N /(r/min)	2000
额定转矩 T /(N·m)	7.7
定子电阻 R /Ω	2.864
直轴电感 L_d /mH	0.028
交轴电感 L_q /mH	0.040
转矩常数 K_t /(N·m/A)	1.250
转动惯量 J_m /(g·m ²)	1.489

4.1 电流响应提取

在 MATLAB/Simulink 仿真平台中,给定 IPMSM 转速为 100 r/min 时,如图 5 和图 6 所示,可得 $\alpha\beta$ 坐标系下的电流分量 i_α 、 i_β 和经过新型 SOGI 滤波后的电流分量 i_{dhn1} 、 i_{qhn1} 。从图 5 和图 6 可看出,新型 SOGI 能有效地从 i_α 、 i_β 中提取含有转子位置信息的 i_{dhn1} 、 i_{qhn1} 。

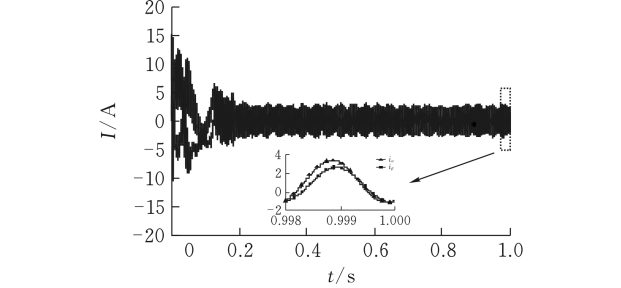


图 5 在 $\alpha\beta$ 坐标系下的电流分量 i_α 、 i_β

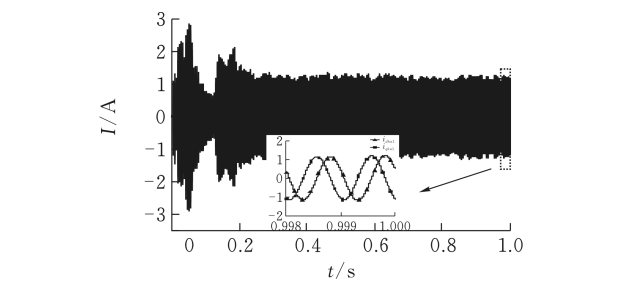


图 6 经新型 SOGI 滤波后的电流分量 i_{dhn1} 、 i_{qhn1}

4.2 稳态误差分析

设置 IPMSM 空载启动,转速为 100 r/min,分别采用传统滤波器法和新型 SOGI 法,得到 100 r/min 时转子位置观测和观测误差波形、转速观测和观测误差波形。由图 7、图 8、图 9 和图 10 可知,传统滤波器法和新型 SOGI 法都能实现转子位置的跟踪,采用传统滤波器法时,转子位置观测误差最大值约为 0.4 rad,大约在 0.3 s 后观测误差趋于稳定,且稳定时误差为 0.2 rad;而采用新型 SOGI 法时,转子位置观测最大误差约为 0.15 rad,稳定时误差为 0.1rad。由图 11、图 12、图 13 和图 14 可知,采用传统滤波器法时,转速观测最大误差约为 38 r/min,稳定时误差为 1 r/min;而采用新型 SOGI 法时,转子位置观测最大误差约为 28 r/min,稳定时误差几乎为 0。

4.3 动态跟踪性能分析

采用新型 SOGI 信号解调法实现动态跟踪性能,设置 IPMSM 空载启动,初始转速为 100 r/min,在 0.5 s 时阶跃至 -100 r/min,得到转子位置观测波形和转速观测波形。从图 15 和图 16 可看出,采用新型 SOGI 信号解调法时,转速突变后瞬间,观测转子位置和观测转速会略偏离实际转子位置和实际转速,待系统稳定后,实现动态跟踪性能。

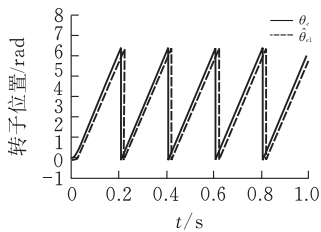


图 7 传统滤波器法转子位置观测波形

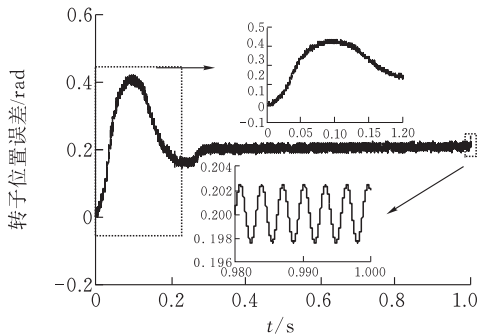


图 8 传统滤波器法转子位置观测误差波形

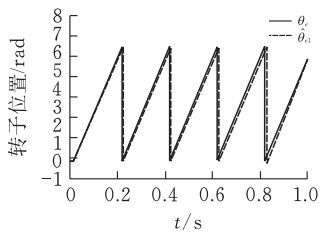


图 9 新型 SOGI 法转子位置观测波形

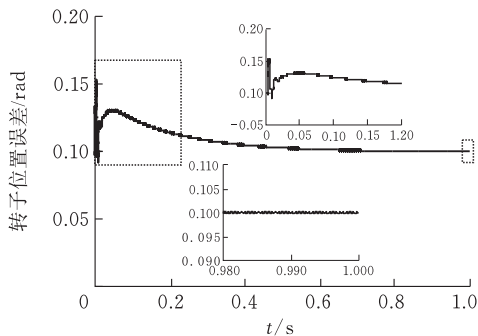


图 10 新型 SOGI 法转子位置观测误差波形

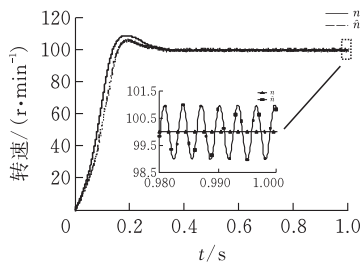


图 11 传统滤波器法转速观测波形

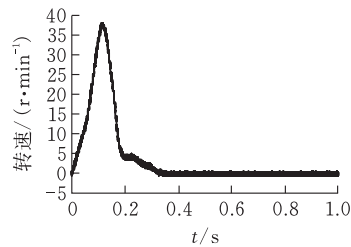


图 12 传统滤波器法转速观测误差波形

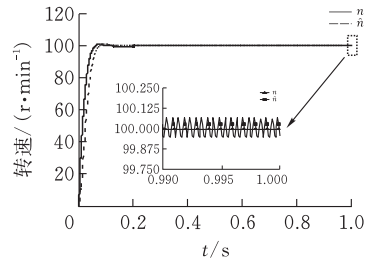


图 13 新型 SOGI 法转速观测波形

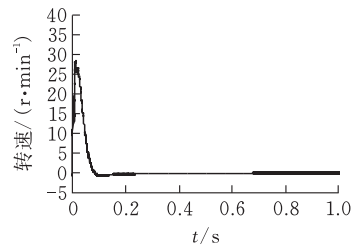


图 14 新型 SOGI 法转速观测误差波形

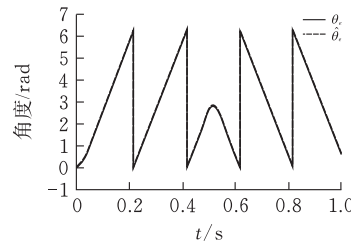


图 15 由 100 r/min 阶跃至 -100 r/min 的转子位置观测波形

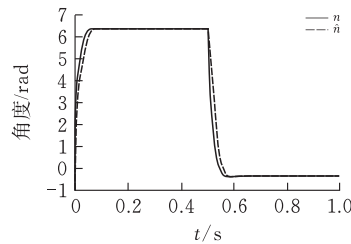


图 16 由 100 r/min 阶跃至 -100 r/min 的转速观测波形

本文提出一种新型 SOGI 结构代替滤波器,将输入量和输出量进行对比的偏差直接引入输出量,并加入低通滤波器以滤除由此产生的高次谐波。此结构避免了因滤波器的引入而带来的相位滞后和幅值衰减,提高转子位置观测的精确性。同时根据估计的转速信息来自适应地改变 SOGI 的中心频率,从而达到提升系统位置辨识的精度和动态特性的效果。

5 结论

在旋转高频电压注入法中,传统信号解调法引入多个滤波器,导致转子位置估算产生较大误差。

仿真实验结果表明,相较于传统方法,所提新型 SO-GI 方法具有更佳的转子位置和转速观测性能。当系统参数突变时,该方法有较强的鲁棒性。

[参 考 文 献]

[1] Seong Kook Cho, Kyung Hun Jung, Jang Young Choi. Design optimization of interior permanent magnet synchronous motor for electric compressors of air-conditioning systems mounted on EVs and HEVs[J].IEEE Transactions on Magnetics, 2018, 54(11): 8204705.

[2] Comanescu M, Keyhani A, Dai Min. Design and analysis of 42-V permanent-magnet generator for automotive applications [J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2003, 18(1): 107-112.

[3] Jonghwa Kim, Seibum Choi, Kwanghyun Cho, et al. Position Estimation Using Linear Hall Sensors for Permanent Magnet Linear Motor Systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2016, 63(12): 7644 - 7652.

[4] 刘计龙,肖飞,沈洋,等.永磁同步电机无位置传感器控制技术综述[J].电工技术学报,2017,32(16): 76-88.

[5] Zhu Z Q, Gong L M. Investigation of Effectiveness of Sensorless Operation in Carrier- Signal-Injection-Based Sensorless-Control Methods. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58(8):3431 - 3439.

[6] Xinhai Jin, Ronggang Ni, Wei Chen,et al. High- Frequency Voltage-Injection Methods and Observer De-

sign for Initial Position Detection of Permanent Magnet Synchronous Machines [J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2018,33(9):7971 - 7979.

[7] 张伯泽,阮毅.基于高频旋转电压注入的永磁同步电机无位置传感器矢量控制[J].电机与控制应用,2016,43(7),12-15.

[8] Raca D, Garcia P, Reigosa D D, et al. Carrier-signal selection for sensorless control of PM synchronous machines at zero and very low speeds[J].IEEE Transactions on Industry Applications,2010,46(1):167-178.

[9] 王高林,杨荣峰,于泳,等.内置式永磁同步电机转子初始位置估计方法[J].电机与控制学报,2010,14(6):56-60.

[10] 秦峰,贺益康,贾洪平.基于转子位置自检测复合方法的永磁同步电机无传感器运行研究[J].中国电机工程学报,2007,27(3):12-17.

[11] 杨健,杨淑英,李浩源,等.基于旋转高频电压注入的永磁同步电机转子初始位置辨识方法[J].2018,33(15): 3547-3555.

[12] 林环城,王志新.高频注入 PMSM 无位置传感器位置观测器设计[J].电机与控制应用,2014,41(4):1-5.

[13] 李文真,刘景林,陈双双.基于高频方波信号注入法的永磁同步电机转子位置检测方法[J].2018,33(24):5821-5829.

[14] Dongouk Kim, Yong C K, Seung K S. Suppression of injectionvoltage disturbanceforhigh-frequency square-waveinjectionsensorlessdrive withregulation ofinduced-high-frequencycurrentripple[J].IEEE TransactionsonI-ndustryApplications,2016,52(1): 302-312.

Position Detection Method of Low Speed Rotor of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor Based on Second Order Generalized Integrator

ZHAO Yun¹, SONG Maoliang¹, YI Lei²

(1 Hubei Key Laboratory for High-Efficiency Utilization of Solar Energy and Operation Control of Energy Storage System , Hubei Univ. of Tech., Wuhan 430068, China ;
2 School of Electrical & Electronic Engin., Huazhong Univ.of Sci.and Tech.,Wuhan 430074,China)

Abstract: In order to improve the accuracy of rotor position identification of interior permanent magnet synchronous motor (IPMSM) at low speed, a new signal demodulation scheme is designed. When the rotating high-frequency voltage signal is injected, the new second-order generalized integrator (SOGI) can demodulate the response currents i_d and i_q , and then obtain the rotor position and speed through a phase-locked loop (PLL). It is verified by simulation that the new SOGI method has higher observation accuracy than the traditional filter method.

Keywords: second order generalized integrator; interior permanent magnet synchronous motor; signal demodulation; rotor position detection

[责任编辑: 张岩芳]