

文章编号:1671-6833(2013)05-0080-05

高频激励下永磁同步电机无传感器控制研究

高 越, 罗映红

(兰州交通大学 自动化与电气工程学院, 甘肃 兰州 730070)

摘 要: 针对以往电机低速运行时转子位置检测不准的问题, 采用了一种新型无传感器控制技术即高频信号注入法, 来检测转子速度和位置信息. 基于高频信号注入法在永磁同步电机无传感器控制理论上做了详细的论述, 设计了滤波环节和外差环节, 并构建转子观测器以获取转子速度和位置信息. 重点对低速情况进行了仿真实验. 仿真结果表明, 高频注入法于低速状态时能够适用, 并且可以准确检测出转子速度和位置信息.

关键词: 永磁同步电机; 无传感器技术; 高频注入; 观测器

中图分类号: TM301 文献标志码: A doi:10.3969/j.issn.1671-6833.2013.05.017

0 引言

永磁同步电动机(PMSM)因其体积小、可靠性好、效率高, 已经在交流调速传动中得到了广泛应用. 传统的运动控制系统中, 一般选用机械式传感器, 对转子速度和位置进行检测. 由于安装了机械式传感器, 不仅降低系统的可靠性, 还提高了系统的成本. 为此, 针对无传感器这一控制技术, 国内外学者开展了广泛的研究<sup>[1]</sup>.

基于高频信号注入的无传感器控制技术, 是通过外加高频激励源以显示电机凸极性, 不受电机运行工况的影响, 对电机参数变化不敏感, 有较好的鲁棒性, 有效地解决了电机在低速及堵转状态下转子位置检测不准的问题, 在电机无传感器控制领域中得到了很好的应用.

文献[2]对高频激励信号做了如下分类: 旋转高频信号和脉振高频信号注入法; 高频电压信号与高频电流信号注入法. 笔者采用旋转高频电压注入法来设计永磁同步电机控制系统, 并通过 Matlab/Simulink 软件作仿真验证, 所得结果证实了该方法的有效性.

1 PMSM 数学模型

为了满足电机控制的要求并准确地估计出磁极位置, 须较精确地建立 PMSM 的数学模型, 在

推导过程中一般做如下假设: (1) 电动机铁心的饱和效应忽略; (2) 转子与永磁体上均无阻尼绕组; (3) 反电动势是正弦的. 在静止坐标系下(用上标 *s* 表示), 永磁同步电机矢量模型如图 1 所示. 感抗  $\omega L_{qds}$  与电机的定子电感相关,  $r_s$  是定电阻, 磁链矢量  $\psi_{qds}^s$  的微分用来表示电机的反电动势.  $i_{qds}^s$  代表静止坐标系下的定子电流矢量,  $v_{qds}^s$  代表电压矢量.

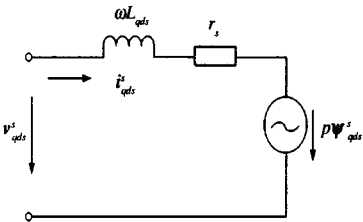


图 1 永磁同步电机矢量模型

Fig. 1 Permanent magnet synchronous motor vector model

转子坐标系下(用上标 *r* 表示)的永磁同步电机电压方程如式(1)所示:

[v\_{qs}^r; v\_{ds}^r] = [r\_s 0; 0 r\_s][i\_{qs}^r; i\_{ds}^r] + [p \omega; -\omega p][\psi\_{qs}^r; \psi\_{ds}^r]. (1)

转子坐标系下的电机定子磁链方程如式(2)所示:

收稿日期:2013-03-20; 修订日期:2013-05-22  
基金项目: 甘肃省自然科学基金资助项目(1112RJZA046)  
通信作者: 罗映红(1961-), 女, 广东汕头人, 兰州交通大学教授, 主要研究领域为电工理论与新技术及电磁兼容, E-mail: lyhdd-321@163.com.

$$\begin{bmatrix} \psi'_{qs} \\ \psi'_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_q & 0 \\ 0 & L_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{qs} \\ i'_{ds} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \psi_m \end{bmatrix}. \quad (2)$$

在静止坐标系中,定子的电压方程如式(3)所示:

$$\begin{bmatrix} v'_{qs} \\ v'_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i'_{qs} \\ i'_{ds} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} p & 0 \\ 0 & p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \psi'_{qs} \\ \psi'_{ds} \end{bmatrix}. \quad (3)$$

定子磁链方程如式(4)所示.

$$\begin{bmatrix} \psi^s_{qs} \\ \psi^s_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L + \Delta L \cos(2\theta_r) & -\Delta L \sin(2\theta_r) \\ -\Delta L \sin(2\theta_r) & L - \Delta L \cos(2\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i^s_{qs} \\ i^s_{ds} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_m \sin\theta_r \\ \psi_m \cos\theta_r \end{bmatrix}. \quad (4)$$

平均电感  $L$  和半差电感  $\Delta L$  由式(5)给出,

$$L = \frac{L_q + L_d}{2}, \Delta L = \frac{L_q - L_d}{2} \quad (5)$$

式中:  $L_d$  为  $d$  轴电感;  $L_q$  为  $q$  轴电感;  $\psi_m$  代表转子相对于定子的耦合磁链;  $\theta_r$  为转子的位置. 通过上述相关公式推导可知,对于具有凸极性的电机而言如内埋式电机,其转子的位置信息包含在了永磁体所产生的定子磁链中;其  $d$  轴电感和  $q$  轴电感有着较为明显的差异,且  $q$  轴要大于  $d$  轴,两轴电感值之比通常在 3 倍及以上. 由于内埋式电机存在明显凸极性,因此高频信号注入法适合对内埋式电机的转子位置进行检测.

## 2 高频电压信号注入法

### 2.1 高频电压信号注入法原理

文献[3]对旋转高频电压信号注入原理做了详细介绍:将对称的三相高频旋转电压信号注入到电机的定子绕组中,通过电压矢量的作用,使电机内部产生一个旋转的磁场. 注入的高频信号频率要远大于转子旋转频率. 当电机的磁路凸极性较明显时,则会对注入的高频载波电压产生调制,电机的定子电流就会包含转子位置信息,然后再去解调这个载波电流,便可获取转子磁极的速度信息和位置信息,闭环控制也由此构成,最终实现永磁同步电机的无传感器控制. 图 2 为旋转高频电压信号注入法原理图.

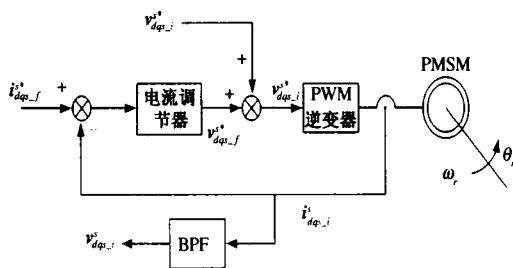


图 2 旋转高频电压信号注入法原理图

Fig. 2 The principle diagram of the rotating high frequency voltage signal injection method

图中的  $v_{qs}^s$  和  $i_{qs}^s$  分别代表静止坐标系下的电压矢量和电流矢量;上标 \* 代表给定量;下标  $i$  代表注入的高频矢量;下标  $f$  代表基波矢量;  $\omega_r$  代表转子角速度;  $\theta_r$  代表转子位置角; BPF 为带通滤波器,其作用是提取电流响应中的高频分量.

### 2.2 高频电压注入下 PMSM 模型和转子位置估计

对于高频信号来说,定子电阻的影响可忽略. 图 3 为注入三相平衡的高频电压后 PMSM 的等效电路. 在静止坐标系下,定子电压可近似表示为

$$\begin{bmatrix} v_{qs,i}^s \\ v_{ds,i}^s \end{bmatrix} \approx p \begin{bmatrix} \psi_{qs,i}^s \\ \psi_{ds,i}^s \end{bmatrix}. \quad (6)$$

式中:  $v_{qs,i}^s$  和  $v_{ds,i}^s$  是高频信号下静止坐标系中的定子电压;  $\psi_{qs,i}^s$  和  $\psi_{ds,i}^s$  是高频信号下两相静止坐标系的定子磁链.

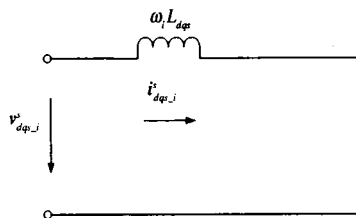


图 3 高频信号注入下的 PMSM 等效电路

Fig. 3 The equivalent circuit of PMSM based on the high frequency signal injection

当注入的高频信号频率远大于转子旋转频率时,对高频信号而言永磁体磁链的影响可以忽略不计<sup>[4]</sup>. 这时,可将磁链方程写为

$$\begin{bmatrix} \psi_{qs,i}^s \\ \psi_{ds,i}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L + \Delta L \cos(2\theta_r) & -\Delta L \sin(2\theta_r) \\ -\Delta L \sin(2\theta_r) & L - \Delta L \cos(2\theta_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs,i}^s \\ i_{ds,i}^s \end{bmatrix}, \quad (7)$$

式中:  $i_{qs,i}^s$  和  $i_{ds,i}^s$  代表高频信号注入下的两相静止坐标系中的电流.

若注入一个三相对称高频电压于电机的定子绕组中,则可将高频电压矢量表达为

$$v_{qs,i}^s \begin{bmatrix} v_{qs,i}^s \\ v_{ds,i}^s \end{bmatrix} = V_{si} \begin{bmatrix} \cos\omega_i t \\ -\sin\omega_i t \end{bmatrix}, \quad (8)$$

式中:  $\omega_i$  代表高频电压的角频率;  $V_{si}$  代表高频电压的幅值.

由此可近似得出高频激励下的定子磁链方程:

$$\begin{bmatrix} \psi_{qs,i}^s \\ \psi_{ds,i}^s \end{bmatrix} = \int \begin{bmatrix} v_{qs,i}^s \\ v_{ds,i}^s \end{bmatrix} dt = \frac{V_{si}}{\omega_i} \begin{bmatrix} \sin\omega_i t \\ \cos\omega_i t \end{bmatrix}. \quad (9)$$

将式(9)带入式(7)中,可得定子电流如下.

$$\begin{bmatrix} i_{qs,i}^s \\ i_{ds,i}^s \end{bmatrix} = \frac{V_{si}}{\omega_i} \begin{bmatrix} L + \Delta L \cos(2\theta_r) & -\Delta L \sin(2\theta_r) \\ -\Delta L \sin(2\theta_r) & L - \Delta L \cos(2\theta_r) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sin(\omega_i t) \\ \cos(\omega_i t) \end{bmatrix}, \quad (10)$$

经化简后可写为:

$$\begin{bmatrix} i_{qs,i}^s \\ i_{ds,i}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ip} \sin(\omega_i t) + I_{in} \sin(2\theta_r - \omega_i t) \\ I_{ip} \cos(\omega_i t) + I_{in} \cos(2\theta_r - \omega_i t) \end{bmatrix}, \quad (11)$$

式中:  $I_{ip}$  和  $I_{in}$  分别为高频电流正序、负序分量的幅值:

$$I_{ip} = \frac{V_{ai}}{\omega_i} \left[ \frac{L}{L^2 - \Delta L^2} \right] \quad (12)$$

$$I_{in} = \frac{V_{ai}}{\omega_i} \left[ \frac{\Delta L}{L^2 - \Delta L^2} \right] \quad (13)$$

通过式(11)可得知,注入三相对称高频信号后,定子电流就会包含了转子的位置信息. 三相高频载波电压矢量所形成的电流矢量由以下两个分量组成:正序分量和负序分量. 若系统是对称的,可将定子电流矢量写作

$$\begin{bmatrix} i_{qs,i}^s \\ i_{ds,i}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_{ip} e^{j(\omega_i t - \frac{\pi}{2})} + I_{in} e^{j(2\theta_r - \omega_i t + \frac{\pi}{2})} \\ \end{bmatrix}. \quad (14)$$

由上式可以看出,转子的位置信息并不包含于高频电流正序分量内,而在高频负序分量中才含有转子位置信息  $\theta_r$ .

为了将转子位置信息从高频负序分量中准确地提取出来,须滤除掉以下几种电流:基频电流分量,PWM 电流谐波分量,以及高频正序电流分量. 由于所注入的高频信号频率远小于逆变器开关频率,却又远大于基频电流频率,因此使用常规的带通滤波器(BPF)便可滤除掉上述两项无关电流[5]. 为了滤除正序电流,根据正、负序电流的旋转方向相反这一特点,可选取同步轴系高通滤波器[6-7](SFF). 即将高频电流信号变换到与高频电压信号同步旋转参考坐标系中,这样高频电流正序分量就等效成直流,再经过一个高通滤波器,则可实现正序电流的滤除. 图4为同步轴高通滤波器的标量形式,图5为静止坐标系下同步轴高通滤波器的标量形式. 其中  $\omega_c$  为同步旋转坐标系下的一阶高通滤波器截止角频率,  $\omega_c$  的值较低,通常只有几赫兹,这样可确保信号失真很小.

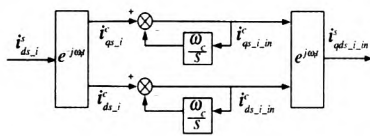


图4 同步轴高通滤波器的标量形式  
Fig.4 Scalar form of SFF

得到负相序电流后,下一步则需要将转子位置信息从载波电流中分离出来,在此利用龙贝格观测器[8]来观测转子的位置信息. 该观测器原理图如图6所示.

笔者使用外差法来获取转子的位置误差信号,将所得到的位置误差项作为观测器的输入量,这样就可通过龙贝格观测器估测出转子的磁极

位置.

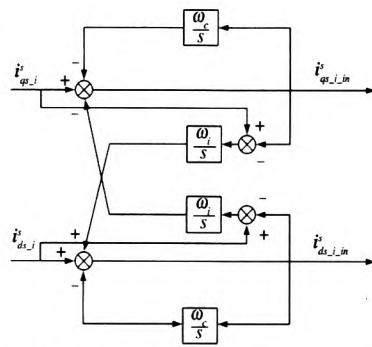


图5 静止坐标系下同步轴高通滤波器的标量形式  
Fig.5 SFF scalar form in the stationary coordinate system

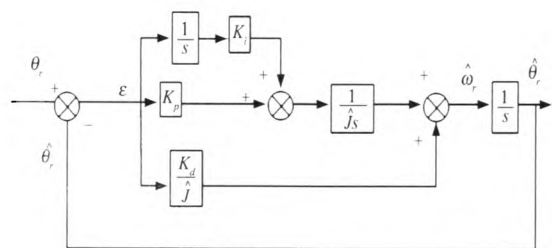


图6 龙贝格观测器原理图  
Fig.6 The Romberg Observer schematic

如果将同步轴高通滤波所得的负序电流  $i_{qs,in}^s, i_{ds,in}^s$  分别乘以  $\cos(2\hat{\theta}_r - \omega_i t)$  和  $\sin(2\hat{\theta}_r - \omega_i t)$ , 可得误差信号如下所示:

$$\epsilon = i_{qs,in}^s \cos(2\hat{\theta}_r - \omega_i t) - i_{ds,in}^s \sin(2\hat{\theta}_r - \omega_i t), \quad (15)$$

式中:  $\hat{\theta}_r$  代表由估算所得到的转子磁极位置, 将式(15)整理后得到式(16):

$$\epsilon = I_{in} \sin[(2(\hat{\theta}_r - \theta_r))] \approx 2I_{in}(\hat{\theta}_r - \theta_r). \quad (16)$$

由式(16)可看出,只要适当调整误差信号  $\epsilon$ , 使之趋近于零,就可确保估测的转子位置  $\hat{\theta}_r$  收敛于真实的位置  $\theta_r$ . 常用的转子位置跟踪观测器如图7所示. 该观测器模型有以下几个特点:对电机的参数变化不敏感;电磁转矩的前馈输入可避免观测跟踪滞后现象;可对一些转矩扰动进行估测,很好地改善整个系统的抗扰动性能.

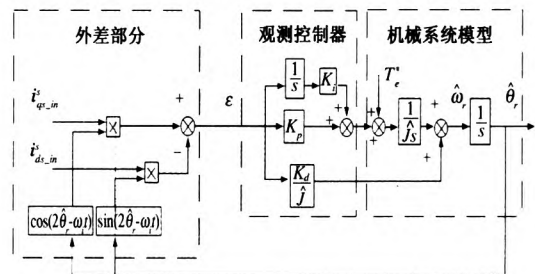


图7 为转子位置观测器原理图  
Fig.7 Rotor position observer schematic

3 控制系统仿真分析

为了验证上述方法的正确与有效性,笔者使用 Matlab 软件在其 Simulink 的环境下,对整个无传感器控制系统进行仿真研究.系统选用经典 PI 调节器来调节转速和电流,采用的控制方法为矢量控制中的  $i_d = 0$  控制<sup>[9-11]</sup>,该控制方法简单并且易于实现.低通滤波器(LPF)的作用是提取出基频电流,实现电流反馈控制;带通滤波器(BPF)用来提取高频载波电流;同步轴高通滤波器实现高频负序电流的提取;转子观测器则实现对转子位置角和速度值的估测,估测所得的转速即能完成速度环的闭环控制.图 8 为高频注入下的 PMSM 无传感器矢量控制系统结构图.

仿真中所采用的永磁同步电机的参数如下:逆变器直流侧电压值  $U = 380\text{ V}$ ,极对数  $P = 4$ ,定子绕组  $r_s = 1.875\text{ }\Omega$ , $d$  轴电感  $L_d = 2.5\text{ mH}$ , $q$  轴电感  $L_q = 9.5\text{ mH}$ ,每极磁通量  $\varphi = 0.175\text{ Wb}$ ,转动惯量  $J = 10^{-3}\text{ kgm}^2$ .笔者给定的高频信号频率为  $1\text{ kHz}$ ,为了避免产生干扰信号,对电机运行造成不良影响,高频电压幅值的选取最好限制在基波幅值的 20% 以内.仿真结果如图 9 所示.为了验证高频注入法在低速下能够准确地实现转速和位置跟踪,系统给定速度为  $150\text{ r/min}$ ,图 9(a)为系统实际转速和估计转速,图 9(b)为转子的实际

位置和估计位置.从图中可看出,不论是估算所得转速还是转子位置都能够很好地跟踪实际值,进一步说明该估算方法具有准确的跟踪性.图 9(c)为电磁转矩,在  $0.05\text{ s}$  时突加  $3\text{ N}\cdot\text{m}$  负载,系统稍有波动,这是外加转矩扰动所引起的,随后转速趋于平稳,说明该系统具有良好的抗干扰性能.图 9(d)为三相定子电流波形,其周期为  $0.1\text{ s}$ .由图可看出,高频电流已注入到电机内,并反映在定子电流中.

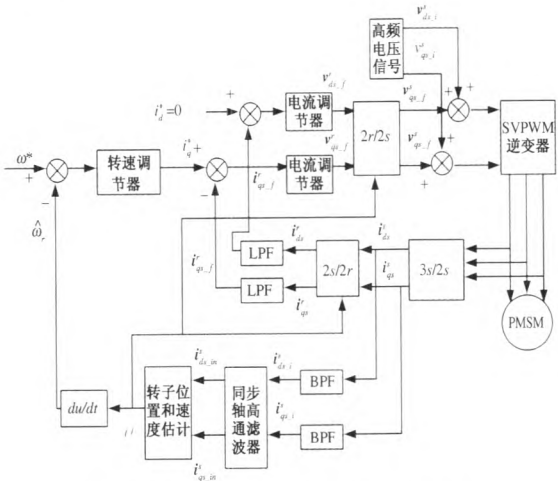


图 8 旋转高频电压注入下 PMSM 无传感器矢量控制系统结构框图

Fig.8 PMSM sensorless vector control system block diagram based on high frequency signal injection

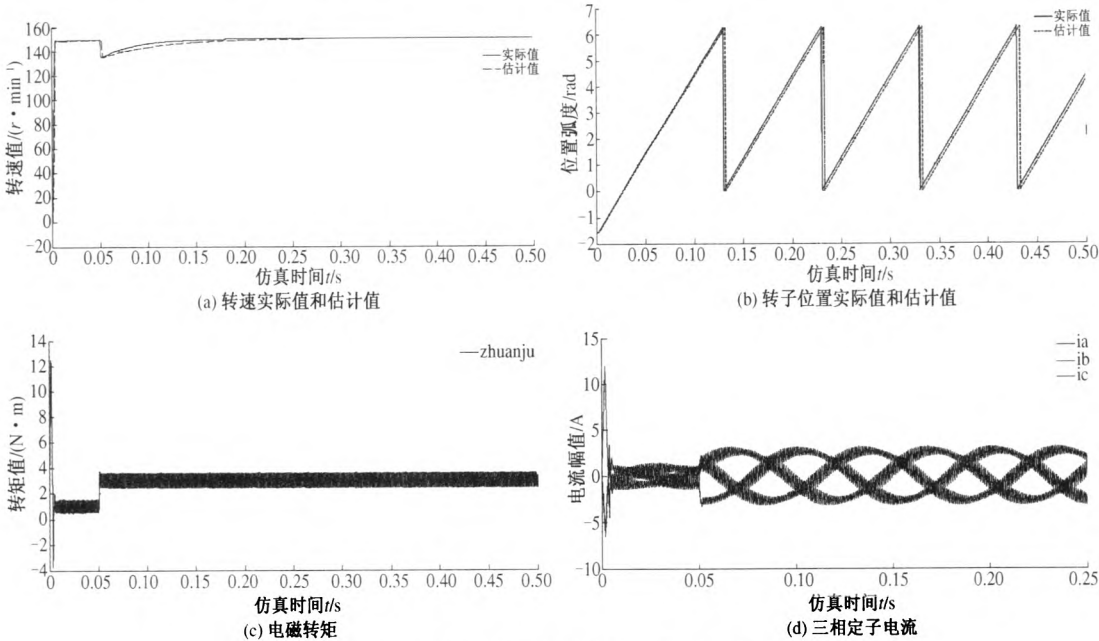


图 9 高频注入下的 PMSM 无传感器矢量控制系统仿真结果

Fig.9 The waveforms simulation of PMSM sensorless vector control system based on high frequency injection

4 结论

笔者针对高频电压信号注入法进行了详细地

分析和研究,该方法对电机参数变化不敏感,鲁棒性较强.以 PMSM 作为控制对象,建立了 PMSM 无传感器矢量控制系统的仿真模型.仿真结果表

明,此种方法能够有效地检测转子速度和位置信息,尤其在低速时,仍能对转子的速度和位置进行准确地跟踪,收敛速度快,并且具有良好的静、动态特性。

### 参考文献:

- [1] 吴奇,程小华. 永磁同步电机的无传感器控制策略[J]. 电机与控制应用,2009,36(8):29-32.
- [2] 秦峰,贺益康,刘毅. 两种高频信号注入的无传感器运行研究[J]. 中国电机工程学报,2005,25(5):116-121.
- [3] 葛永强,马赫. 基于高频电压信号注入凸极 PMSM 无传感器控制的仿真研究[J]. 微电机,2011,44(9):42-47.
- [4] 王丽梅,郑建芬,郭庆鼎. 基于载波注入的凸极永磁同步电动机无传感器控制[J]. 电机与控制学报. 2005,9(4):334-336.
- [5] 王高林,杨荣峰,于泳,等. 内置式永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 中国电机工程学报,2010,30(30):93-98.
- [6] MICHAEL W D, ROBERT D L. Position estimation in induction machines utilizing rotor bar slot harmonics and carrier-frequency signal injection[J]. IEEE Transactions On Industry Applications,2000,36(3):736-742.
- [7] LORENZ R D. Practical issues and research opportunities when implementing zero speed sensorless control[C]. Proceedings of the Fifth International Conference on Electrical Machines and Systems, Shenyang,2001:1-10.
- [8] CHEN Dong,NIAN Heng, HE Yi-kang, et al. Sensorless operation of PMSM by high-frequency signal injection using the field-circuit coupled solution[C]. Proceeding of International Conference on Electrical Machines and Systems, 2007:735-739.
- [9] 何继爱,王惠琴. 永磁同步电机空间矢量控制系统的仿真[J]. 电力系统及其自动化学报,2005,17(6):15-16.
- [10] 程启明,王映斐,胡晓青,等. 基于 SVPWM 的永磁同步电机矢量控制系统的建模与仿真[J]. 上海电力学院学报,2012,28(4):330-335.
- [11] 乔淑云,李德臣. 矿井高压电网防越级跳闸保护系统设计[J]. 徐州工程学院学报:自然科学版,2011,26(4):66-69.

## Research on Permanent Magnet Synchronous Motor Sensorless Control by Using High Frequency Excitation

GAO Yue, LUO Ying-hong

(School of Automation and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

**Abstract:** In view of to the conventional problem that when motor is running at low speed rotor position detection is inaccurate, the method of high frequency signal injection was studied to deal with a new sensorless control technology to detect the rotor speed and position information. High frequency signal injection method in permanent magnet synchronous motor sensorless control theory was discussed in detail, the filter and heterodyne link were designed, and the rotor observer was built to acquire the information of rotor speed and position, a simulation of low speed was focused on. The simulation results show that sensorless control technology based on high frequency signal method is applicable to low speed, and accurately detect the rotor speed and position information.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor; sensorless control technology; high frequency signal injection; observer