

doi:10.3969/j.issn.1673-9833.2012.01.009

MW级永磁同步电机无速度传感器矢量控制研究

秦灿华¹, 刘连根², 曹洋², 彭勃², 南永辉², 阳贵明¹

(1. 湖南工业大学 电气与信息工程学院, 湖南 株洲 412007;
2. 南车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

摘要: 针对电机实验站对永磁同步电机实验电源系统新的控制要求, 研究了MW级永磁同步电机无速度传感器矢量控制方法, 提出了一种基于模型参考自适应的速度辨识方法。该方法仅用 q 轴磁链误差信号构建自适应率辨识转速信息。首先通过Matlab仿真证明了该方法的有效性, 然后进行了半直驱隐极式永磁同步风力发电机对拖实验, 结果证明该方法能较好地辨识电机转速。

关键词: 模型参考自适应; 速度辨识; 无速度传感器; 矢量控制

中图分类号: TM301.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-9833(2012)01-0037-04

Research on Sensorless Vector Control of MW Turbine Permanent Magnet Synchronous Motor

Qin Canhua¹, Liu Liangen², Cao Yang², Peng Bo², Nan Yonghui², Yang Guiming¹

(1. School of Electrical and Information Engineering, Hunan University of Technology, Zhuzhou Hunan 412007, China;
2. CSR Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou Hunan 412001, China)

Abstract: For the new control demands of permanent magnet synchronous motor(PMSM) experimental power supply system, speed sensorless vector control method of MW Turbine PMSM was researched, and a new speed estimation method based on model reference adaptive system (MRAS) was proposed. In the method, the q -axis flux error signal was used to construct adaptive rate and estimate the speed. First by Matlab simulation the validity of the method was proved, then the test of two half-direct permanent magnet synchronous generators towed each other was made. The result of the experiment shows that the method has a good speed estimation effect.

Keywords: MRAS; speed estimation; speed sensorless; vector control

0 引言

自20世纪70年代被提出以来, 矢量控制技术以其优越的转矩控制性能使交流传动控制系统的动态品质得到了显著提高, 其在工程中也几乎得到了普及。在电机矢量控制中, 为了确定定子电流矢量的方向就必须获得电机转速信号。现阶段主要是通过

数字编码器检测转速信息, 这增加了控制系统的成本和复杂性, 同时还增加了系统的维护成本和故障因素。在风力发电行业, 目前大部分MW级永磁电机(特别是永磁直驱和半直驱同步发电机)在设计及生产时, 根本没有预留安装编码器的位置, 这使得电机出厂试验和发电运行都十分不便。因此, 各生产厂家迫切要求实现无速度传感器矢量控制技术。

收稿日期: 2011-11-08

作者简介: 秦灿华(1985-), 男, 湖南益阳人, 湖南工业大学硕士生, 主要研究方向为大功率变流器与交流传动,

E-mail: qincanhua@163.com

近些年,国内外学者对异步电机和永磁同步电机的转速辨识进行了大量研究,并提出了多种方案。文献[1-4]采用了模型参考自适应法(model reference adaptive system, MRAS)、文献[5]采用了扩展卡尔滤波法、文献[6]采用了高频注入法等。因基于MRAS的模型参考自适应法的算法相对简单,易于工程化实现,同时又具有较好的鲁棒性,因此,在无速度编码器变频调速系统中应用较为广泛。而其它几种方法的算法相对较复杂,并对采样和死区时间有较高的要求,而大功率变频器中采样时间和死区时间往往较长,因此,暂时在工程实际中应用还有较大的困难。

文献[3]提出了一种仅利用 q 轴估算电流与实际电流之差估算转速的方法。本文在该方法的基础上,提出了一种仅用 q 轴估计磁链和实际磁链误差信号构建模型参考自适应率辨识转速的方法,并进行了仿真和实验研究。

1 基于MRAS的转速辨识方案

1.1 d - q 轴坐标下永磁同步电机磁链模型

在转子磁场定向控制下,永磁同步电机在 d - q 轴坐标系下的电压和磁链方程如式(1)和式(2)。

$$\begin{cases} u_d = R_s i_d + \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega_r \varphi_q, \\ u_q = R_s i_q + \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega_r \varphi_d, \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_r, \\ \varphi_q = L_q i_q, \end{cases} \quad (2)$$

式中: u_d, u_q, i_d, i_q 分别为电机定子侧电压和电流;

φ_d, φ_q 为 d - q 轴磁链;

R_s 为定子电阻;

ω_r 为转子电角频率;

L_d, L_q 为 d - q 轴电感;

φ_r 为转子永磁体磁链。

将式(2)代入式(1)可得永磁同步电机的磁链模型为

$$\begin{cases} \frac{d\varphi_d}{dt} = -\frac{R_s}{L_d} \varphi_d + \omega_r \varphi_q + u_d, \\ \frac{d\varphi_q}{dt} = -\omega_r \varphi_d - \frac{R_s}{L_q} \varphi_q + u_q. \end{cases} \quad (3)$$

1.2 转速辨识方案

文献[2]采用并联型结构辨识转速,通过实测定

子电流和估计定子电流得到转速估计算法为

$$\hat{\omega}_r = (K_p + K_i/S) * (i_d \hat{i}_q - \hat{i}_d i_q), \quad (4)$$

式中: $\hat{\omega}_r$ 为估算的转子电角频率;

\hat{i}_d, \hat{i}_q 分别为估算的定子侧 d - q 轴电流;

K_p, K_i 为PI调节器参数。

文献[3]在文献[2]的辨识方案基础上,提出了在永磁同步电机采用 $i_d=0$ 的矢量控制策略下,仅用 i_q 和 \hat{i}_q 估算转速的转速辨识新方法,并得到新的转速辨识算法为

$$\hat{\omega}_r = (K_p + K_i/S) * (\hat{i}_q - i_q). \quad (5)$$

文献[2]的方案是在 $i_d=0$ 与 $i_d \neq 0$ 的控制策略下同时满足辨识要求,文献[3]的作者对文献[2]的方案做了简化,仅采用 $i_d=0$ 的矢量控制策略,更易于工程化。

永磁同步电机转子磁链为永磁体提供的恒定磁链,在采用 $i_d=0$ 的矢量控制策略下,式(2)可变为

$$\begin{cases} \varphi_d = \varphi_r, \\ \varphi_q = L_q i_q. \end{cases} \quad (6)$$

从式(6)可看出,此时 φ_d 可近似恒定,则式(3)可变为

$$\begin{cases} 0 = -\frac{R_s}{L_d} \varphi_r + \omega_r \varphi_q + u_d, \\ \frac{d\varphi_q}{dt} = -\omega_r \varphi_r - \frac{R_s}{L_q} \varphi_q + u_q. \end{cases} \quad (7)$$

从式(7)中可看出,此时电机转速只与含有 $\frac{d\varphi_q}{dt}$ 的方程有关。据文献[3],可选取并联型结构转速辨识的参考模型和可调模型分别为:

$$\frac{d\varphi_q}{dt} = -\omega_r \varphi_r - \frac{R_s}{L_q} \varphi_q + u_q, \quad (8)$$

$$\frac{d\hat{\varphi}_q}{dt} = -\hat{\omega}_r \varphi_r - \frac{R_s}{L_q} \hat{\varphi}_q + u_q. \quad (9)$$

定义 $e = \hat{\varphi}_q - \varphi_q$ 为磁链误差,可得其状态方程为

$$\frac{de}{dt} = Ae + \omega, \quad (10)$$

式中: $A = -\frac{R_s}{L_q}, \omega = -\varphi_r (\hat{\omega}_r - \omega_r)$ 。

根据波波夫超稳定定理^[7]可得转速自适应律为

$$\hat{\omega}_r = (K_p + K_i/S) * (\hat{\varphi}_q - \varphi_q) + \hat{\omega}_r(0), \quad (11)$$

此过程在文献[3]中已经进行了较详细的阐述,在此不再赘述。

2 系统仿真研究

为了研究本文控制方案的可行性和可能存在的问题, 利用Matlab7.1/Simulink进行了仿真实验。电机采用隐极式半直驱永磁同步电机, 具体参数如下: 额定功率2.1 MW, 额定电压690 V, 额定频率59.7 Hz, 额定电流1 970 A, 极数3, 功率因数0.9, 定子电阻 $R_s=0.0007\ \Omega$, $L_d=L_q=0.6\ \text{mH}$ 。

仿真给出了永磁同步电机在速度闭环控制下, 转速给定值和估计值及磁场定向角度 θ_r 的实际值与估计值, 其波形如图1~3所示。

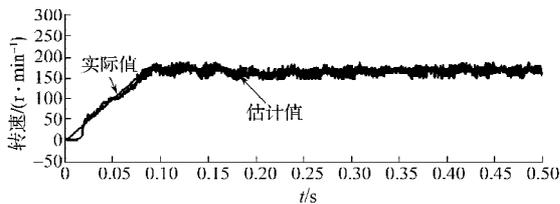


图1 速度实际值与估计值

Fig. 1 The actual and estimated value of speed

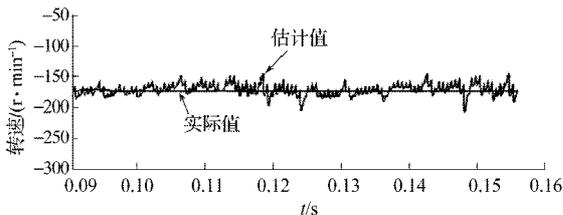


图2 电机速度稳定时速度的实际值与估计值

Fig. 2 The actual and estimated value of speed when motor speed stable

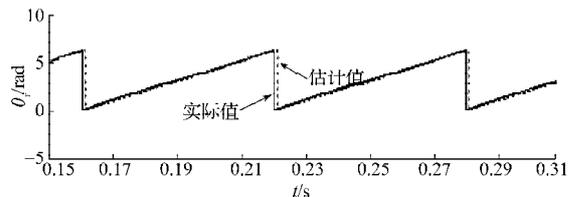


图3 磁场定向角 θ_r 的实际值与估计值

Fig. 3 The actual and estimated value of flux directional angle θ_r

从图1中可看出, 转速在起动过程和稳定在170 r/min情况下都能跟踪准确, 仅在低速(约40 r/min以下)时估计误差较大。从图2中可见, 转速稳定在-170 r/min时跟踪也准确。其中转速估计波形为未滤波处理情况下的波形, 因此存在一些抖动, 同时由于MW级电机在给定 $i_d=0$ 情况下, 励磁电流并非完全为0, 而是在0左右抖动, 而且随电机本身的物理特性及控制准确度波动大小不同, 这同样加大了磁链估计值的抖动, 也就加大了通过磁链估计的转速的抖动, 但这并不影响滤波后转速的反馈效果, 及磁场定向角度反馈值的准确度。从图3中可以清楚地

看到, 转速稳定在170 r/min时, 磁场定向角 θ_r 的实际值与估计值误差较小, 所以磁场定向角 θ_r 的估计值能为矢量控制坐标变换提供较准确的定向角度。

3 实验结果及分析

本方案的研究主要是针对中型电机实验站实验电源系统, 实验内容主要是各种型号永磁电机的出厂实验, 对电机控制的动态性能要求不是很高。本实验采用2台同型号半直驱隐极式永磁同步风力发电机对拖的型式, 一台用做电动机, 另一台用做发电机, 电机参数与上一节仿真中用到的参数相同。对组后的2台永磁同步电机如图4所示。



图4 永磁同步发电机背靠背对拖实验

Fig. 4 Back-to-Back trawling test for synchronous machine

永磁同步电机采用2套MW级变频器驱动, 其中一套用于驱动一台永磁同步电机做电动运行, 拖动相对组的另一台永磁同步电机做发电运行, 发电态的永磁同步电机定子绕组接另一台变频器用于模拟并网做能量回馈。

在变频器输出端接有横河WT1600功率分析仪, 方便对实验结果的观测和分析。采用 $i_d=0$ 的无速度传感器矢量控制算法对变频器进行控制, 通过一定斜坡给定转速参考值来调节拖动电机转速, 使电机在稳定状态下有较好的稳定性能。实验测得电机在稳定后的定子侧电压、电流波形如图5所示, 用无速度编码器算法估计的磁场定向角度波形 $\hat{\theta}_r$ 如图6所示, 同时得到了稳定时采用编码器计算的 θ_r 值与估算值 $\hat{\theta}_r$ 之间的误差 $\Delta\theta_r$ 如图7所示。

从图5中可看到电动态运行的永磁同步电机在额定条件下能稳定运行, 电压和电流波动都较小。图6也能说明转速波动较小。图6和图7是通过监测变频器控制器内存数据变化而输出的数字信号波形, 图7中在水平线下边有许多细线, 这是因为估算的 $\hat{\theta}_r$ 值与编码器计算得到的 θ_r 值均以 2π 为周期输出数值, 在微小波动时2个波形存在微小的相位差, 因此

存在短时间内的小值减大值的情况。这个误差可以通过滤波解决，不影响控制算法及控制系统的正常运行。

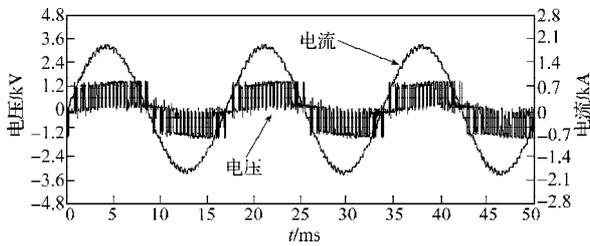


图5 定子电压和电流波形

Fig. 5 The waveforms of stator voltage and current

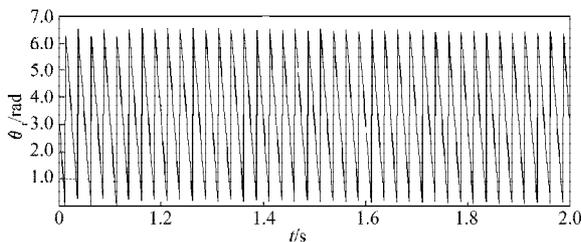


图6 $\hat{\theta}_r$ 估计值波形

Fig. 6 The waveform of estimated $\hat{\theta}_r$

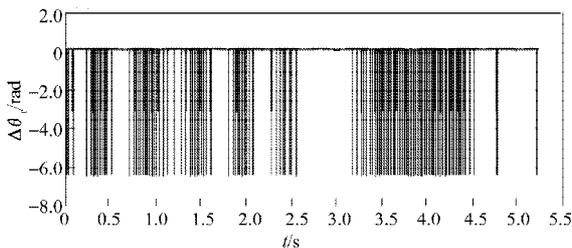


图7 θ_r 与 $\hat{\theta}_r$ 的误差波形

Fig. 7 The error waveform of θ_r and $\hat{\theta}_r$

4 结语

本文提出了一种新的转速辨识自适应控制方案，该方案以永磁同步电机采用 $i_d=0$ 的矢量控制策略为前提，提出了仅用 q 轴磁链误差信号构建模型参考自适应率辨识转速的方法。在理论分析之后，进行了仿真和实验研究，结果表明：该方案在永磁同步电机采用 $i_d=0$ 的矢量控制策略下能准确估算电机转速，尤其是在中高速区域，该方案有较好的稳定性。本文提出的控制方法完全能满足对电机动态性能要求不太高时永磁同步电机无速度传感器矢量控制系统的要求，具有较强的现实意义和工程实践应用价值。

参考文献：

- [1] 李永东, 张猛, 肖曦, 等. 永磁同步电机模型参考自适应无速度传感器控制方法[J]. 电气传动, 2004, 34: 302-306.
Li Yongdong, Zhang Meng, Xiao Xi, et al. Sensorless Control of PM Synchronous Motors Based on MRAS Method[J]. Electric Drive, 2004, 34: 302-306.
- [2] 王庆龙, 张崇巍, 张兴. 基于变结构 MRAS 辨识转速永磁电机矢量控制系统[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(22): 5230-5233.
Wang Qinglong, Zhang Chongwei, Zhang Xing. Variable-Structure MRAS Speed Identification for Vector Control of Permanent Magnet Synchronous Motor[J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(22): 5230-5233.
- [3] 齐放, 邓智泉, 仇志坚, 等. 基于 MRAS 的永磁同步电机无速度传感器[J]. 电工技术学报, 2007, 22(4): 53-58.
Qi Fang, Deng Zhiquan, Qiu Zhijian, et al. Sensorless Technology of Permanent Magnet Synchronous Motors Based on MRAS[J]. Transactions of China Electrochemical Society, 2007, 22(4): 53-58.
- [4] 王庆龙, 张崇巍, 张兴. 基于变结构模型参考自适应系统永磁同步电机转速辨识[J]. 中国电机工程学报, 2008, 29(9): 71-75.
Wang Qinglong, Zhang Chongwei, Zhang Xing. Variable-Structure MRAS Speed Identification for Permanent Synchronous Motor[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 29(9): 71-75.
- [5] Bolognani S, Tubiana L, Zigliotto M. Extended Kalman Filter Tuning in Sensorless PMSM Drives[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(6): 1741-1747.
- [6] 郝雯娟, 邓智泉, 王晓琳. 基于增强型自适应观测器的永磁同步电机无速度传感器[J]. 电工技术学报, 2009, 24(3): 41-46.
Hao Wenjuan, Deng Zhiquan, Wang Xiaolin. Enhanced Adaptive Observer for Sensorless PMSM Drive System [J]. Transactions of China Electrochemical Society, 2009, 24(3): 41-46.
- [7] 吴振顺. 自适应控制原理与应用[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2005: 87-100.
Wu Zhenshun. Adaptive Control Principle and Application[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2005: 87-100.

(责任编辑: 李玉珍)