

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.02.011

基于无位置传感器的永磁同步电机 硬件在环仿真研究

张灵霞¹, 黄 河², 张 凯¹

(1. 上海科梁信息工程股份有限公司, 上海 200233; 2. 联合汽车电子有限公司, 上海 201206)

摘要:针对 DSP 控制器对未安装位置传感器的永磁同步电机的控制效果问题、三相逆变器的功率管发生故障时电机的运行状况变化问题,对永磁同步电机的数学模型、电机的速度和位置估算方法(即模型参考自适应方法 MRAS)进行研究。在没有实体永磁同步电机和逆变器的情况下,提出搭建硬件在环半实物仿真平台的方法。借助 MATLAB/Simulink 以及实时仿真软件 RT-LAB 搭建永磁同步电机数学模型、逆变器模型和硬件接口模型,此模型作为硬件在环系统的被控对象;电机控制器是 TMS320F28027 系列 DSP,在控制器上运行 MRAS 速度位置估算算法和 FOC 磁场定向控制算法;在硬件在环仿真平台上完成无传感器控制算法验证、模拟逆变器发生不同类型故障时电机的工作状况。研究结果表明:硬件在环半实物仿真平台能够用于无位置传感器控制技术的控制功能验证、模拟逆变器故障状态,为优化控制器算法奠定基础。

关键词: RT-LAB; 永磁同步电机; 硬件在环仿真; 无速度传感器

中图分类号: TM351; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2017)02-0156-05

Simulation of hardware-in-loop for PMSM based on speed sensorless

ZHANG Ling-xia¹, HUANG He², ZHANG Kai¹

(1. Shanghai KeLiang Information Tech. & Eng. Co., Ltd., Shanghai 200233, China;

2. United Automotive Electronic Systems Co., Ltd, Shanghai 201206, China)

Abstract: Aiming at verifying the performance and reliability of the sensorless drive and testing the running state of PMSM under different types of the inverter's fault, the hardware-in-the-loop simulation was proposed when we didn't have a real machine and an inverter. First of all, the mathematical model of permanent magnet synchronous motor and the speed/position estimator based on model reference adaptive system were researched. Then, a mathematical model including a PMSM, an inverter, and the hardware-interface was built as the controlled object with MATLAB/Simulink and RT-LAB. And TMS320F28027 was chosen as the controller of the PMSM, which was used to run the algorithmic logic-MARS(model reference adaptive system) and FOC. On the basis of this HIL platform, the control effect of sensorless drive was verified and different types of fault was simulated. The results indicate that this hardware-in-the-loop simulation platform provides an effective way for the validation of sensorless control algorithm and fault simulating of inverters, and lays a good foundation for further research about the optimization of control algorithm.

Key words: RT-LAB; permanent magnet synchronous machine (PMSM); hardware-in-loop simulation; sensorless

0 引 言

高性能的交流调速系统一般需要在电动机的转子上安装机械式传感器以测量转子的速度和位置。同步电机的高性能控制和稳定、可靠的运行离不开转子

的位置信息。机械式传感器可以提供控制电动机所需的转子信号,但也给传动系统带来一系列问题:增加了电动机转轴上的转动惯量,加大了电机的空间尺寸与体积;由于受到使用条件(温度、湿度和振动)的限制,传动系统无法广泛应用于各种场合;传感器及其辅助

收稿日期: 2016-09-27

作者简介: 张灵霞(1986-),女,山东滨州人,硕士研究生,主要从事永磁同步电机半实物仿真方面的研究. E-mail: lingxia.zhang@keliangtek.com

电路增加了传动系统的成本^[1]。

同步电机的高性能控制与稳定、可靠运行离不开转子位置信息。采用电压型逆变器对电动机供电时,在逆变器的输出侧安装传感器可以测量到电动机的定子电压与电流。无位置传感器控制技术通过测量这些信息^[2-3],采用软件估算出转子的位置而无需使用机械式位置传感器,有利于降低系统的成本,拓宽电动机的应用场合。

无传感器控制技术中常用的估算方法有:采用定子端电压和电流直接估算转子速度和位置、基于观测器的估算方法、模型参考自适应方法(model reference adaptive system, MRAS)、扩展卡尔曼滤波法、基于电动机结构特征的位置与速度估算方法等。其中模型参考自适应法的算法易于实现、抗干扰性能好、稳态性好、能保证参数估计的渐进收敛性等优点而广泛应用于永磁同步电机无传感器矢量控制^[4]。

硬件在环(hardware-in-loop)是实时仿真技术的一种新颖的工程应用形式,便于进行方案验证与设计,能够缩短开发周期、减少开发成本。本研究将搭建基于RT-LAB的永磁同步电机硬件在环仿真平台,通过观察永磁同步电机的运行特性以及电压电流等波形,以验证基于无传感器技术的电动机控制策略的性能,并且仿真逆变器的不同类型故障时电机的工作状况。

1 永磁同步电机数学模型

1.1 转子坐标系下 PMSM 动态数学模型

D轴定位在转子磁极轴线上,PMSM在两相旋转坐标系下的数学模型如下^[5]:

定子电压方程:

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

定子磁链方程:

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2)$$

电磁转矩方程:

$$T_e = 1.5 n_p (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (3)$$

机械运动方程:

$$T_e - T_L = \frac{J}{n_p} \frac{d\omega_r}{dt} \quad (4)$$

式中: R_s —定子绕组电阻; ω_r —转子角速度; i_d, i_q —定

子绕组电流在 d, q 轴上的分量; u_d, u_q —定子绕组电压在 d, q 轴上的分量; ψ_d, ψ_q —定子磁链在 d, q 轴上的分量; L_d, L_q — d 轴电感、 q 轴电感; ψ_f —永磁体产生的磁链; n_p —转子极对数; T_e —电磁转矩; T_L —负载转矩; J —转子转动惯量值。

1.2 速度和位置估算方法

本研究采用模型参考自适应方法(MRAS)进行电动机转速和位置的估算^[6-8]。该方法使用两个模型,其一为不含有待观测变量(如电动机转速)的参考模型,另一个是包含待观测变量的可调模型。两个模型均输出同一个变量,利用两个模型输出变量的差值对可调模型中的待观测变量进行快速调节,通过设计出合适的调节规则,就可以在足够短的时间内观测出未知变量。

根据式(1)和式(2),PMSM的定子电压方程可以改写成如下形式:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d + \frac{\psi_f}{L_d} \\ i_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \omega_r \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_r \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d + \frac{\psi_f}{L_d} \\ i_q \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_d} u_d + \frac{R_s}{L_d} \psi_f \\ \frac{1}{L_q} u_q \end{pmatrix} \quad (5)$$

$$\text{令 } i_d^* = i_d + \frac{\psi_f}{L_d}, i_q^* = i_q, u_d^* = u_d + \frac{R_s \psi_f}{L_d}, u_q^* = u_q,$$

可得:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \omega_r \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_r \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_d^* \\ i_q^* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_d} u_d^* \\ \frac{1}{L_q} u_q^* \end{pmatrix} \quad (6)$$

根据式(5),得到以角频率为可调参数的可调模型状态方程如下:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} e_d \\ e_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \omega_r \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_r \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \hat{i}_d^* \\ \hat{i}_q^* \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{L_d} u_d^* \\ \frac{1}{L_q} u_q^* \end{pmatrix} \quad (7)$$

定子电流矢量误差方程为:

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} e_d \\ e_q \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \omega_r \frac{L_q}{L_d} \\ -\omega_r \frac{L_d}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_d \\ e_q \end{pmatrix} - J(\omega_r - \hat{\omega}_r) \begin{pmatrix} \hat{i}_d^* \\ \hat{i}_q^* \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\text{式中: } J = \begin{pmatrix} 0 & \frac{L_q}{L_d} \\ -\frac{L_d}{L_q} & 0 \end{pmatrix}.$$

根据李雅普诺夫定理可以得到转速的自适应律为:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_r = & \left(K_p + \frac{K_i}{p} \right) \left[\frac{L_q}{L_d} \hat{i}_d \hat{i}_q - \frac{L_d}{L_q} \hat{i}_q \hat{i}_d - \frac{\psi_f}{L_d} (\hat{i}_q - \hat{i}_q) + \right. \\ & \left. \hat{i}_d \hat{i}_q \left(\frac{L_d}{L_q} - \frac{L_q}{L_d} \right) \right] + \hat{\omega}(0) \end{aligned} \quad (9)$$

转子位置估计值:

$$\hat{\theta} = \int \hat{\omega}_r dt \quad (10)$$

式中: i_d, i_q —电机实测值, $\hat{i}_d$ 和 $\hat{i}_q$ 由可调模型计算得到。

2 PMSM 硬件在环仿真平台

整个系统的控制系统原理框图如图 1 所示。

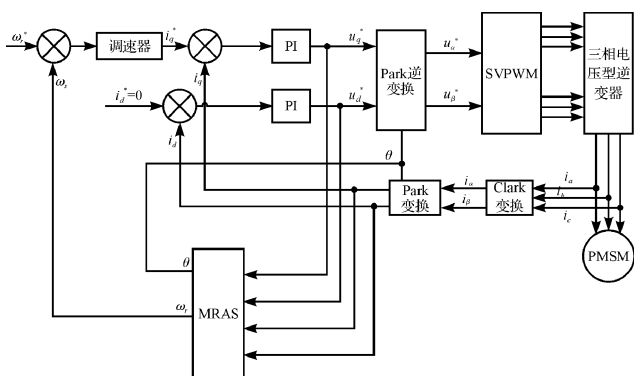


图 1 永磁同步电机无传感器控制系统框图

永磁同步电机采用无速度传感器算法-模型参考自适应方法 (MRAS), 根据电机实时运行时反馈的电压信号与电压信号, 实时解算出电机的转速信号与角度信号, 这两个信号参与电机的闭环控制。笔者采用转速外环和电流环双环控制, 根据空间矢量脉宽调制 (SVPWM) 方法生成 PWM 波传递给逆变器。这种方式易于数字控制器实现, 且有输出电流波形好, 直流环节电压利用率高等优点^[9]。

2.1 硬件在环平台工作原理

永磁同步电机硬件在环仿真平台主要由一台实时仿真机 OP5600, 一块 TMS320F28027 为主控芯片的控制器、模拟量与数字量信号调理板 (模拟量输出 OP5330、模拟量输入 OP5340、数字量输出 OP5354 和数字量输入板卡 OP5353)、信号转接板 DB37 等组成。

实时仿真机用于运行永磁同步电机和逆变器的仿真模型; 仿真机借助模拟量输出板卡输出模拟信号给 DSP 控制器, 包括三相电压 (V-U, V-V, V-W)、三相电流信号 (I-U, I-V, I-W) 等。控制器输出的 PWM 信号经过调理电路后数字信号的高电平由 3.3 V 转换成 5 V, 再输入仿真机的数字信号输入端, 控制电机模型运行, 形成闭环。工作原理如图 2 所示。

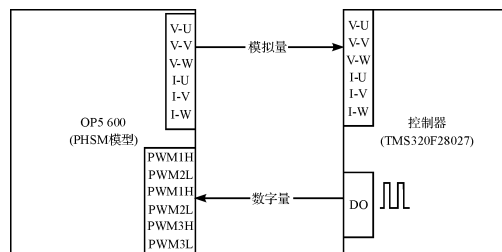


图 2 硬件在环仿真平台工作原理

硬件在环仿真平台中, 实时仿真机 OP5600 采用 CPU + FPGA 的硬件架构, 集成 intel i7 多核处理器, FPGA 型号为 ML605_2 (vertex 6); 提供一系列高速 IO, I/O 采样精度高达 20 ns, FPGA 片上仿真可达 250 ns。支持多种 PCI 和 PCIe 的通讯接口卡。OP5600 仿真机作为 MATLAB 模型的实时运行平台, 能够满足电机控制与电力电子领域对高精度实时仿真的严格要求^[10]。

2.2 被控对象模型

硬件在环仿真平台的被控对象模型采用 MATLAB/Simulink 软件与 RT-LAB/ eFPGAsim 等搭建, 包括永磁同步电机、三相电压型逆变器和接口定义模块。被控对象模型如图 3 所示。

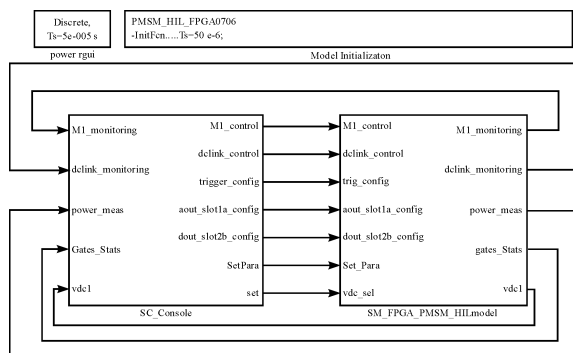


图 3 永磁同步电机仿真模型

图 3 中 SM_子系统中主要包括永磁同步电机模型、逆变器模型, SC_子系统中包括示波器、数字显示模块和参数调节模块。SM 子系统在实时仿真机上运行, SC 子系统在上位机运行, 主要用于显示实时波形和设置负载\转速。

RT-LAB 软件是由加拿大 OPAL-RT 开发,广泛应用于电力系统、电力电子和新能源的实时仿真领域的一款实时仿真管理软件。它拥有专用的电力电子模型库 Artemis、RT-Events、RT-eDrive 与 eFPGAsim 等。其中 eFPGAsim 模块库主要提供基于 FPGA 的电机模型(包括电压方程、磁链方程和转矩计算)和逆变器模型,解算步长可达 250 ns。

3 仿真分析

在基于 RT-LAB 的永磁同步电机硬件在环仿真平台上,可以进行正常工作条件下以及故障状态的仿真,从而验证控制器中控制算法的控制性能,为控制器控制策略的优化提供依据^[11]。

3.1 调速性能

永磁同步电机负载为 10 N·m,电机的转速由 720 r/min 上升到 1 000 r/min。电机的调速过程中的转矩与转速波形如图 4 所示。

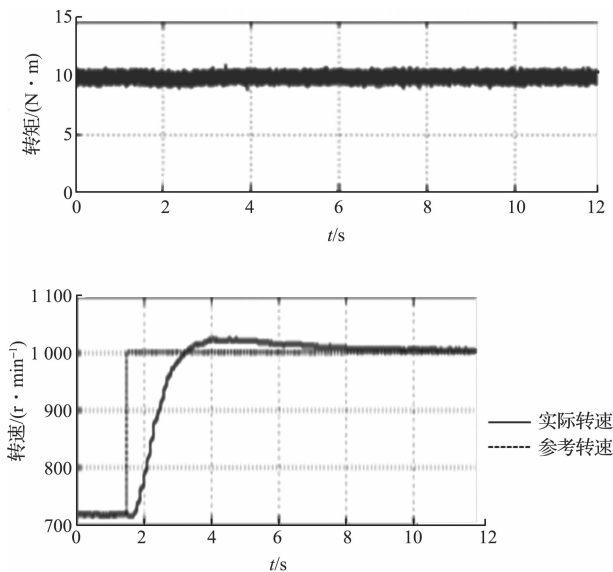


图4 电机调速时的转速与转矩波形

上图实线—电机转矩 N·m;下图实线—实际转速, r/min;虚线—参考转速, r/min

3.2 负载调节性能

永磁同步电机转速为 1 000 r/min,电机的负载转矩由 5 N·m 上升到 10 N·m。电机的负载转矩调节过程中的转矩与转速波形如图 5 所示。

由图 5 可以看出:在 1.5 s 时负载转矩突然由 5 N·m 增至 10 N·m,电机转速由 1 000 r/min 升高到 1 150 r/min。再经过约 7 s 时间调整,电机转速稳定在 1 000 r/min。调整负载,电机仍然可以恢复稳态运行。

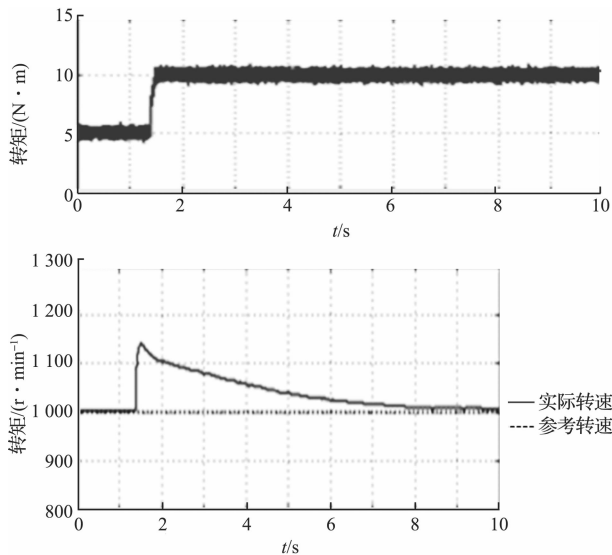


图5 负载转矩调节时的转速与转矩波形

上图实线—电机转矩, N·m;下图实线—实际转速, r/min,虚线—参考转速, r/min

3.3 故障测试

在模型中可以设置逆变器中的 IGBT 与二极管故障类型,测试电机的相应运行情况。该实验中测试同一桥臂上的开关管同时短路、同一桥臂上的所有开关管同时开路两种故障情况。相电压如图 6 所示。

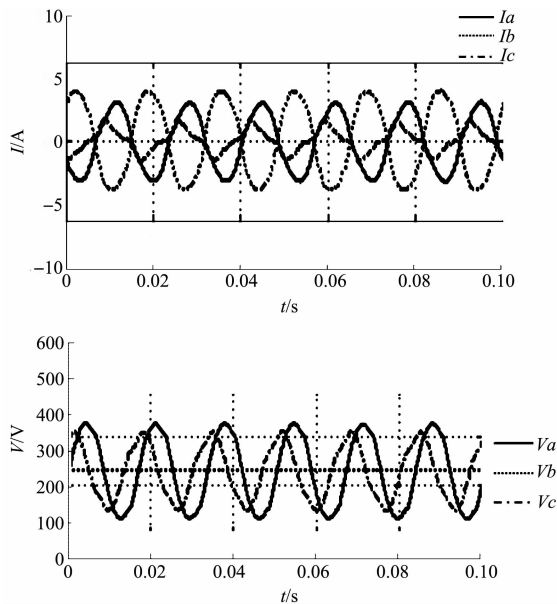


图6 同一桥臂上的开关同时短路

由图 6 可知,当设置同一桥臂上的开关管同时短路时,相当于直流源短路故障。此时短路相的电压稳定在 257 V 左右。相电流波形如图 7 所示。

由图 7 可知,当设置同一桥臂上的开关管(包括二极管)同时开路时,开路相的电流为 0,对地的相电

压波形是正弦波,其幅值明显高于其他两相的相电压。

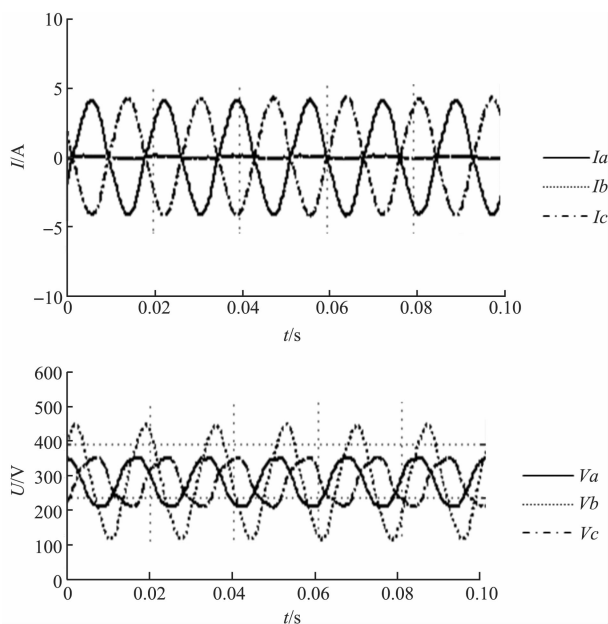


图 7 同一桥臂上的所有关管同时开路

该硬件在环仿真平台,便于在 Simulink 模型中设置逆变器桥的功率管处于不同类型的故障状态,比如短路或者开路,为故障保护算法研究奠定基础。

4 结束语

本研究根据永磁同步电机的数学方程搭建电机仿真模型、建立逆变器模型,该模型经过实时化可以在仿真机上高速运行,选择加拿大 OPAL-RT 公司的实时仿真机,模型解算步长为 250 纳秒,能够用于模拟真实的永磁同步电机;DSP 控制器上运行模型参考自适应算法(MRAS)获取电机的转速、角度信号,实现电机转速和电流双闭环控制。在此硬件在环仿真平台上实现仿真机与控制器之间的接口设计,模拟逆变器发生不同类型故障时永磁同步电机的运行情况。

研究表明,搭建硬件在环仿真平台可以用于验证控制器控制算法的控制性能,便于设置逆变器故障,为以后短路保护与缺相保护的设计、控制算法的优化设计提供参考。

参考文献 (References):

- [1] 赵信杰,李瑞华,胡波,等. 无速度传感器的永磁同步电机滑模控制[J]. 电机与控制应用,2012,39(1):22-25.
- [2] 李建功. 基于滑模观测器的永磁同步电机无速度传感器控制[D]. 上海:上海发电设备成套设计研究院,2010.
- [3] 李雪恺,陈勇,张鑫彬,等. 自适应滑模观测器的永磁同步电机无位置传感器控制[J]. 兵工自动化,2016,35(9):73-77.
- [4] 袁登科,徐延东,李秀涛. 永磁同步电机变频调速系统及其控制[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
- [5] 刘虎. 永磁同步电机转子位置自检测方法研究[D]. 杭州:浙江理工大学机械与自动控制学院,2015.
- [6] 欧阳叙稳. 基于 DSP 的永磁同步电机滑模变结构控制系统研究[D]. 广州:华南理工大学电力学院,2012.
- [7] 贾永峰,谷立臣. 基于永磁同步电机驱动定量泵的恒压变流量控制系统[J]. 液压气动与密封,2014(9):42-44.
- [8] 谭建民,刘华,张治平. 永磁同步变频离心式冷水组的研制及性能分析[J]. 流体机械,2015,43(7):82-87,46.
- [9] (美)沙欣·弗利扎德著,杨立永译. 电机及其传动系统:原理、控制、建模和仿真[M]. 北京:机械工业出版社,2015.
- [10] 邱华静,李鸿彪,邹毅军. 基于 RT-LAB 的永磁同步电机硬件在环实时仿真平台的实现[J]. 电气自动化,2013,35(6):39-52.
- [11] 孙倩,林辉,王志远. 永磁同步电机 HIL 仿真研究[J]. 电子测量技术,2009,32(1):24-27.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

张灵霞,黄河,张凯. 基于无位置传感器的永磁同步电机硬件在环仿真研究[J]. 机电工程,2017,34(2):156-160.

ZHANG Ling-xia, HUANG He, ZHANG Kai. Simulation of hardware-in-loop for PMSM based on speed sensorless[J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2017,34(2):156-160.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn