



引用格式:杨存祥,刘树博,张志艳. 矢量控制永磁同步电机失磁故障诊断方法研究[J]. 轻工学报,2017,32(4):58-65.

中图分类号:TM351 文献标识码:A

DOI:10.3969/j.issn.2096-1553.2017.4.009

文章编号:2096-1553(2017)04-0058-08

矢量控制永磁同步电机失磁故障诊断方法研究

Research on the diagnosis method of demagnetization fault of permanent magnet synchronous motor based on vector control

杨存祥¹,刘树博^{1,2},张志艳¹

YANG Cun-xiang, LIU Shu-bo, ZHANG Zhi-yan

- 1. 郑州轻工业学院 电气信息工程学院,河南 郑州 450002;
- 2. 河南省科学院 同位素研究所有限责任公司,河南 郑州 450015
- 1. College of Electric and Information Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450002, China;
- 2. Isotope Institute Co., Ltd., He'nan Academy of Sciences, Zhengzhou 450015, China

关键词:

永磁同步电机; 矢量控制; 失磁故障

Key words:

permanent magnet synchronous motor (PMSM); vector control; demagnetization fault

摘要:基于 Matlab/Simulink 平台搭建了永磁同步电机矢量控制系统失磁故障仿真模型,提出了一种永磁同步电机在采用 $i_d=0$ 控制方式时失磁故障诊断方法:以电机输出电磁转矩与定子电流有效值之比作为失磁故障因子,以正常运行状态下的电机输出电磁转矩与定子电流有效值之比作为阈值,若失磁故障因子小于阈值,可以判断永磁同步电机发生了失磁故障,并可根据失磁故障因子与阈值之差的大小对故障程度作出判断. 仿真结果验证了该失磁故障诊断方法的有效性.

收稿日期:2016-01-15;修回日期:2016-09-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51507156);河南省科技计划基金项目(112300410146);郑州轻工业学院研究生科技创新基金资助项目

作者简介:杨存祥(1966—),男,河南省台前县人,郑州轻工业学院教授,博士,主要研究方向为电机故障诊断和电气测量.

Abstract: Based on the fact that the simulation model of permanent magnet synchronous motor (PMSM) vector control system of demagnetization fault was built based on Matlab/Simulink platform, the diagnosis method of demagnetization fault of PMSM was presented using the control mode of $i_d = 0$. The ratio of the electromagnetic torque and the stator current was used as the magnetic failure factor, the ratio of the electromagnetic torque and the stator current in normal operation was used as the threshold. If the magnetic failure factor was less than the threshold, the magnetic field could be judged demagnetization fault. And according to the magnitude of the magnetic failure factor and the threshold value, the magnetic field could be judged the severity of the loss. The simulation results verified the validity of the method.

0 引言

永磁同步电机 PMSM (permanent magnet synchronous motor) 采用高性能永磁体替代传统电机的转子励磁绕组,具有低惯性、快响应、高功率密度、低损耗、高效率等优点,已广泛应用于数控机床主轴驱动系统、电动汽车驱动系统等伺服驱动系统^[1-2]。

永磁同步电机构成的永磁交流伺服系统在运行中受到电磁、热、机械、周围环境等各种因素的作用,有可能诱发永磁体失磁故障,从而导致永磁同步电机性能的剧变,如电流增大引起的电机发热和电机输出转矩性能变差等,甚至会导致整个伺服系统瘫痪。因此,建立永磁同步电机失磁故障仿真模型,以探索失磁故障诊断方法,已成为电机设计人员亟需解决的问题。

永磁同步电机失磁故障模型大致分为两种,一种是依据永磁材料退磁曲线建立的失磁故障模型^[3-6],另一种是基于 Matlab 建立的失磁故障模型^[7-9]。第一种失磁故障模型在业内已经得到普遍关注,而对第二种失磁故障模型的研究还鲜见。鉴于此,本文拟基于 Matlab 建立永磁同步电机矢量控制系统失磁故障仿真模型,提出一种永磁同步电机在采用 $i_d = 0$ 控制方式时的失磁故障诊断方法,并验证其有效性。

1 永磁同步电机数学模型

永磁同步电机本身是一个非线性、多变量、强耦合的复杂系统,为了简化对问题的分析,在

建立电机数学模型时做出一些简化假设,即“理想电机假设”:

- 1) 磁路为线性,即不考虑饱和、剩磁、磁滞和涡流效应对磁路的影响,可以利用叠加原理;
- 2) 在电流频率较低和电机运行温度变化不显著的情况下,将线圈绕组的电阻视为常量;
- 3) 电机内的磁场为正弦分布;
- 4) 忽略齿谐波磁场;
- 5) 电机在直轴和交轴是对称结构。

永磁同步电机数学模型用向量形式表示为

$$\begin{cases} \mathbf{U} = \mathbf{R}\mathbf{I} + \frac{d\boldsymbol{\Psi}}{dt} \\ \boldsymbol{\Psi} = \mathbf{L}\mathbf{I} + \boldsymbol{\Psi}_r \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\mathbf{U} = \begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \end{bmatrix} \quad \mathbf{I} = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad \mathbf{R} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Psi} = \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{\Psi}_r = \begin{bmatrix} \Psi_{PM} \sin \theta_r \\ \Psi_{PM} \sin \left(\theta_r - \frac{2}{3} \pi \right) \\ \Psi_{PM} \sin \left(\theta_r + \frac{2}{3} \pi \right) \end{bmatrix}$$

式中, \mathbf{U} 是定子绕组端电压矩阵; \mathbf{I} 是定子绕组电流矩阵; \mathbf{R} 是定子绕组电阻矩阵; $\boldsymbol{\Psi}$ 是定子绕组磁链矩阵; \mathbf{L} 是定子绕组电感矩阵; L 是定子绕组的自感; M 是定子绕组的互感; $\boldsymbol{\Psi}_r$ 是

永磁体磁链矩阵; θ_r 是电角度, 即永磁体转子轴线比定子绕组 α 轴超前的电角度; Ψ_{PM} 为永磁体磁链的幅值。

然后, 在 d - q 旋转两相坐标系下, 将式①进行 Park 变换, 得到永磁同步电机在 d - q 旋转两相坐标系下对应的电压方程、磁链方程和电机电磁转矩方程, 分别为

$$\begin{cases} u_d = Ri_d - \omega_r \Psi_q + \frac{d\Psi_d}{dt} \\ u_q = Ri_q + \omega_r \Psi_d + \frac{d\Psi_q}{dt} \end{cases}$$

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d i_d + \Psi_{PM} \\ \Psi_q = L_q i_q \end{cases}$$

$$T_e = \frac{3}{2} p (\Psi_d i_q - \Psi_q i_d) =$$

$$\frac{3}{2} p [\Psi_{PM} i_q + (L_d - L_q) i_d i_q]$$

式中, ω_r 为转子角速度, p 为电机极对数。

假如永磁同步电机是表贴式转子结构, 则电机的直轴电抗 L_d 和交轴电抗 L_q 相等, 电机电磁转矩方程可表示为

$$T_e = \frac{3}{2} p \Psi_{PM} i_q \quad (2)$$

2 失磁故障诊断依据

假设永磁同步电机采用 $i_d = 0$ 控制方式, 即永磁同步电机的定子电流直轴分量始终为 0, 则其输出电磁转矩在 d - q 旋转两相坐标系下的方程见式②。

当永磁同步电机正常运行时, 永磁体 Ψ_{PM} 为常值, 即永磁同步电机输出电磁转矩的大小正比于定子电流的大小, 从而可以把高阶、非线性、强耦合的多变量系统成功转化为电枢电流与转子磁链两个单变量线性子系统。通过改变三相逆变器输出电流, 使电枢电流发生改变, 进而获得所需的转矩。

假设三相逆变器输出电流为三相对称电

流, 在 q 轴将其合成为电流矢量, 则三相电流可表示为

$$\begin{aligned} i_a &= -I_s \sin\theta \\ i_b &= -I_s \sin(\theta - 2\pi/3) \\ i_c &= -I_s \sin(\theta + 2\pi/3) \end{aligned}$$

式中, I_s 为三相逆变器输出的定子电流幅值, θ 为转子位置角。则三相定子合成电流为

$$i_q = i_a + \alpha i_b + \alpha^2 i_c = \frac{3}{2} I_s e^{j(\theta + \frac{\pi}{6})} \quad (3)$$

将式③代入式②, 可得永磁同步电机在 $i_d = 0$ 控制方式下的输出电磁转矩为

$$T_e = \frac{9}{4} p \Psi_{PM} I_s$$

则永磁体磁链可表示为

$$\Psi_{PM} = \frac{4}{9 p I_s} T_e$$

永磁同步电机发生均匀失磁故障和局部失磁故障, Ψ_{PM} 都会减小。据此, 可提出永磁同步电机在采用 $i_d = 0$ 控制方式时的故障诊断方法: 令永磁同步电机正常运行过程中电机输出电磁转矩与定子电流有效值之比为阈值, 若失磁故障因子 λ 小于阈值, 则可以判断永磁同步电机发生了失磁故障; 且 λ 越小, 说明永磁同步电机失磁故障越严重。

3 矢量控制原理

永磁同步电机矢量控制本质上是对电机的定子电流矢量加以控制, 即控制磁链的幅值和方向, 从而实现对永磁同步电机的控制。

永磁同步电机矢量控制系统如图 1 所示, 矢量控制的大致过程是: 通过位置传感器计算出的反馈转速 n 和给定转速 n_{ref} 的偏差, 经速度 PI 调节器计算, 得到定子电流参考输入 i_{qref} ; 通过相电流检测电路得到定子相电流 i_a, i_b, i_c , 然后经 Clark 变换将其转化为两相都静止的 α - β 坐标系的 i_α 和 i_β , 再通过 Park 变换将其转化为 d - q 旋转坐标系的 i_q 和 i_d , 将参考输入 i_{dref} 和 i_{qref}

与 $d-q$ 旋转坐标系的电流信号进行比较,其中 $i_{dref} = 0$,通过电流 PI 控制器获得控制量 v_{dref} 和 v_{qref} ;通过 Park 逆变换得到控制量 $v_{\alpha ref}$ 和 $v_{\beta ref}$,经过 SVPWM 输出 PWM 信号并经过逆变器产生频率和幅值可变的三相正弦电压控制永磁同步电机的转矩和转速,从而构成完整的双闭环控制系统^[12].

4 仿真模型搭建

Matlab 2014a 下的 Simulink 和 SimPower Systems 包括丰富的功能模块,可以搭建永磁同步电机模块、坐标转换模块、逆变器模块、速度控制器模块等.根据永磁同步电机矢量控制系统的工作原理,对上述模块进行整合,即为永磁同步电机控制系统仿真模型.永磁同步电机矢

量控制系统仿真模型框图如图 2 所示.

4.1 永磁同步电机模块

永磁同步电机仿真模型框图如图 3 所示,其中输入为电机负载 T_L ,三相电压 u_{abc} 和永磁体转子磁链 Ψ_{PM} ;输出为三相电流 i_{abc} ,电机转速 w_r 和电机转矩 T_e 等.

4.2 SVPWM 模块

SVPWM 控制的作用是使电机获得理想的圆形磁链轨迹.其基本思路是:对参考电压进行控制,首先要确定参考电压所处的扇区.扇区中矢量 V 用边界的两个相邻特定矢量 V_x, V_y 和零矢量 V_z 来等效表示.调控 V 的大小和相位,则在时间很短的一个开关周期 T_s 中,矢量 V 存在时间就由组成这个区域的非零矢量 V_x 存在时间 T_x, V_y 存在时间 T_y 和零矢量 V_z 存在时间

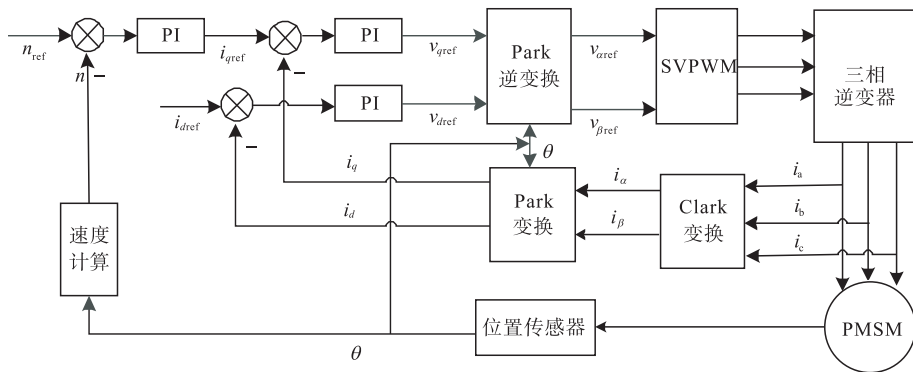


图 1 永磁同步电机矢量控制系统原理图

Fig. 1 Principle diagram of PMSM vector control system

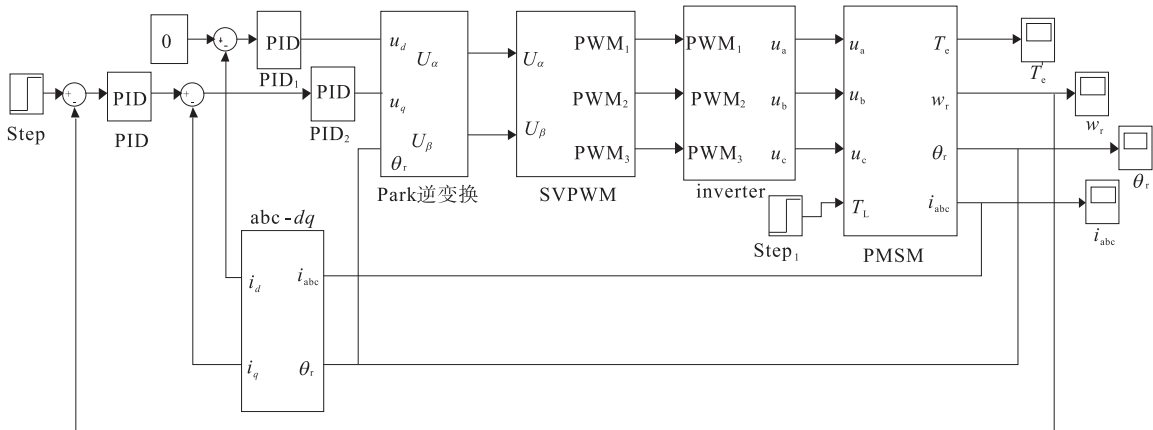


图 2 永磁同步电机矢量控制系统仿真模型框图

Fig. 2 Block diagram of PMSM vector control system

T_0 来等效表示,即

$$\mathbf{V}_x T_x + \mathbf{V}_y T_y + \mathbf{V}_z T_0 = \mathbf{V} T_s = \mathbf{V}(T_x + T_y + T_0)$$

将 $\mathbf{V}_x = 2/3\mathbf{V}_d$, $\mathbf{V}_y = 2/3\mathbf{V}_d$, $\mathbf{V}_z = 0$ 代入上式,得

$$\frac{T_x}{T_s} = \sqrt{3} \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{V}_d} \sin(2/3\pi - \theta)$$

$$\frac{T_y}{T_s} = \sqrt{3} \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{V}_d} \sin\theta$$

$$\frac{T_0}{T_s} = 1 - \sqrt{3} \frac{\mathbf{V}}{\mathbf{V}_d} \cos(1/3\pi - \theta)$$

永磁同步电机两相静止 α - β 坐标系上两个正交电压向量 U_α 和 U_β , 若 $U_\beta > 0$, 则 $A = 1$, 否则 $A = 0$; 若 $\sqrt{3}U_\alpha - U_\beta > 0$, 则 $B = 1$, 否则 $B = 0$; 若 $\sqrt{3}U_\alpha - U_\beta < 0$, 则 $C = 1$, 否则 $C = 0$. 由 $N = A + 2B + 4C$ 可得扇区编号. SVPWM 仿真框图如图 4 所示.

4.3 逆变器模块

该模块将 SVPWM 模块产生的 PWM 信号转换成三相电压, 其仿真模型如图 5 所示.

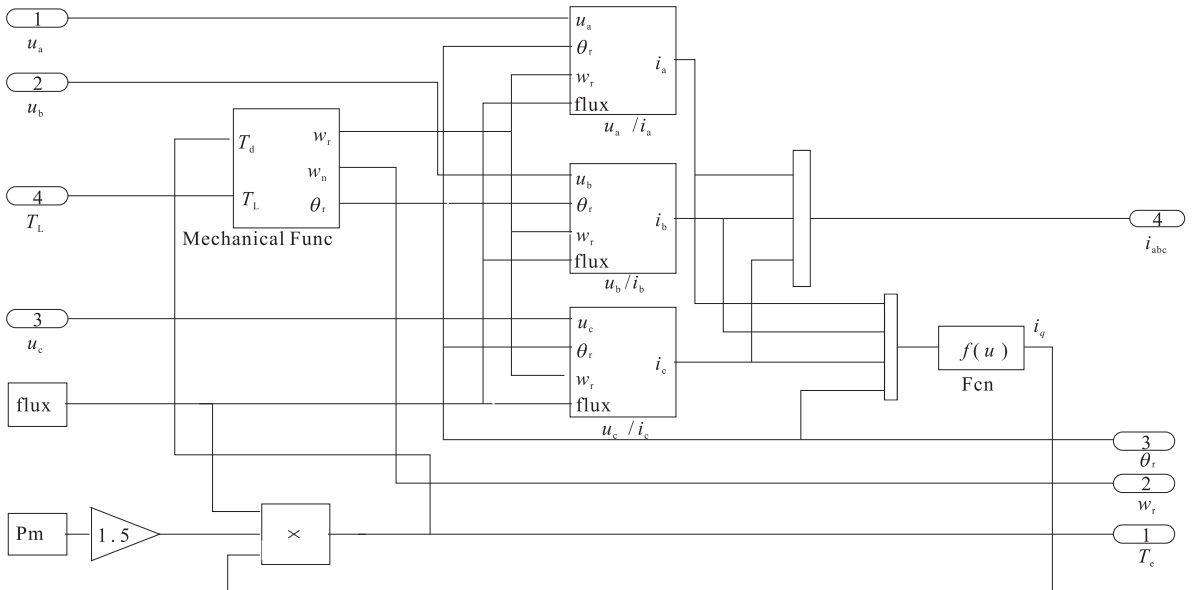


图 3 永磁同步电机仿真模型框图

Fig. 3 Block diagram of simulation model for PMSM

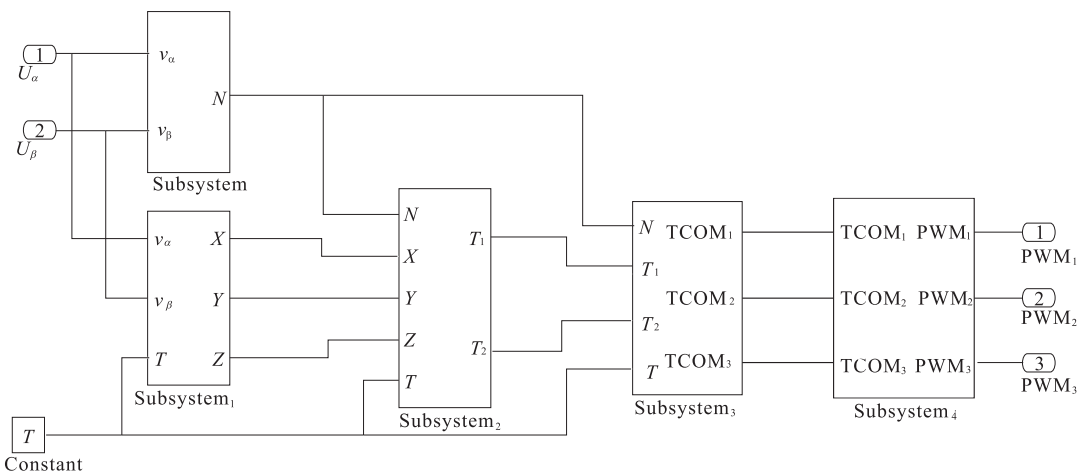


图 4 SVPWM 仿真模型图

Fig. 4 Block diagram of simulation model for SVPWM

5 仿真结果与分析

本文基于 Matlab/Simulink 建立 PMSM 仿真模型,仿真参数设置为 $p = 4$, $\Psi_f = 0.175 \text{ Wb}$, 转动惯量 $J = 0.0008 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, 定子电阻 $R_s = 2.875 \Omega$, $L = 0.0085 \text{ H}$. 给定转速 100 r/s , 负载 $T_L = 5 \text{ N} \cdot \text{m}$, 仿真时间 0.09 s . 仿真结果如图 6—图 8 所示.

从图 6 可以看出,电机转速迅速达到给定值 100 r/s . 从图 7 可以看出,定子电流经过短暂波动,很快回到稳态. 从图 8 可以看出,电机在通电以后,转矩很快回到稳定值 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$.

磁链参数的大小代表永磁体运行状态,通过改变 PMSM 仿真模型中磁链的大小,可以实现永磁同步电机不同失磁状况的模拟. 设定磁链参数为 $0.875 \Psi_{PM}$,用以模拟永磁同步电机工作过程中失磁 12.5% 的状况,电流和输出转矩波形分别如图 9 和图 10 所示.

图 7 与图 9 对比表明,永磁同步电机发生失磁后,定子电流会增大;图 8 与图 10 对比表明,永磁同步电机发生失磁后,转矩会发生轻微波动,但最后还是回到了稳定值 $5 \text{ N} \cdot \text{m}$.

同理,改变磁链参数的大小,使其分别为

$0.750 \Psi_{PM}$, $0.625 \Psi_{PM}$, $0.500 \Psi_{PM}$, $0.375 \Psi_{PM}$ 和 $0.250 \Psi_{PM}$,用以模拟永磁同步电机失磁 25.0% , 37.5% , 50.0% , 62.5% 和 75.0% 的不同状况. 对永磁同步电机正常和不同程度失磁故障时的定子电流和输出转矩进行数据采集,得到其有效值,以输出转矩的稳定值作为分析对象,分析结果见表 1.

从表 1 可以看出,随着故障程度的逐渐增加,永磁同步电机失磁故障因子越来越小,说明可以根据故障因子 λ 的大小来判断故障是否发生及其严重程度. 失磁故障程度超过 37.5% 时,失磁故障因子有明显的下降,已很难保持永磁同步电机稳定运行状态.

6 结论

本文基于 Matlab/Simulink 对永磁同步电机矢量控制系统进行失磁故障诊断方法研究. 选取永磁同步电机不同运行状态时的转矩和定子电流作为分析参数,对永磁同步电机正常和不同失磁故障状态进行仿真分析,得到以下结论.

1) 所构建的永磁同步电机矢量控制系统失磁故障仿真模型能够稳定运行,具有响应快、

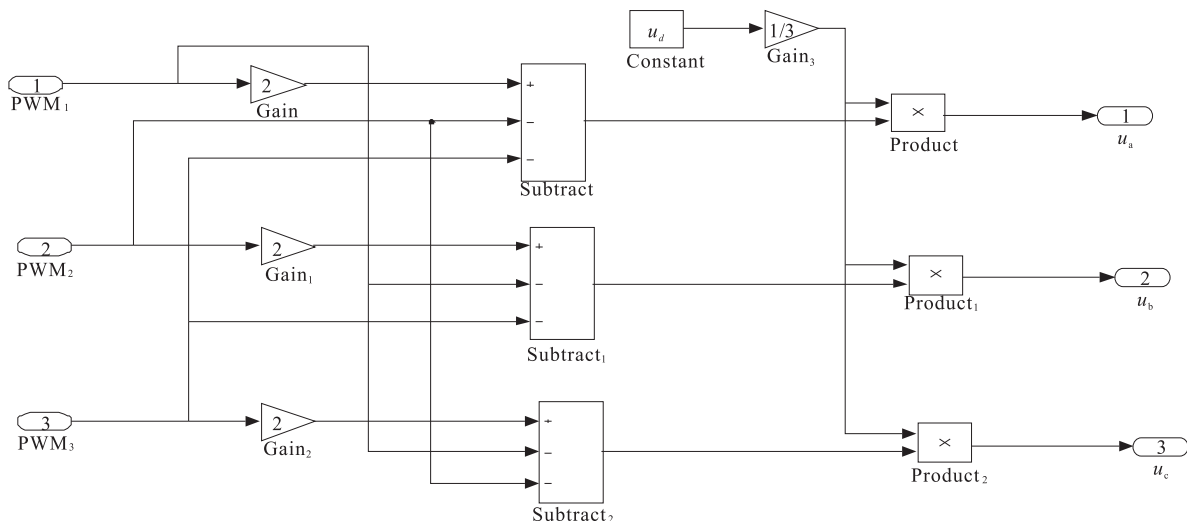


图 5 逆变器仿真模型图

Fig. 5 Block diagram of simulation model for inverter

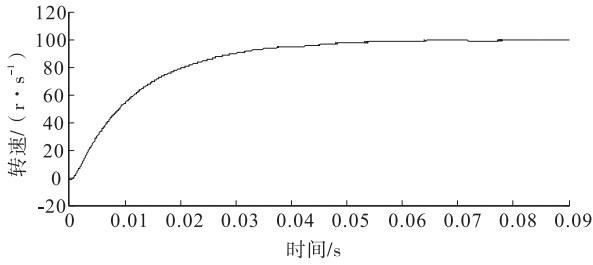


图6 电机转速波形

Fig. 6 Waveform of speed

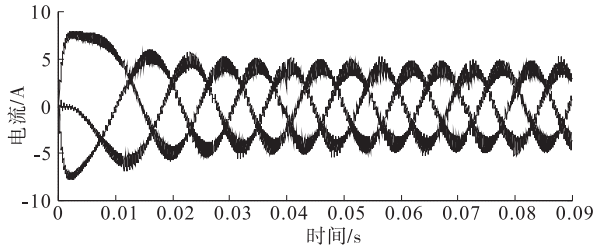


图7 电机电流波形

Fig. 7 Waveform of current

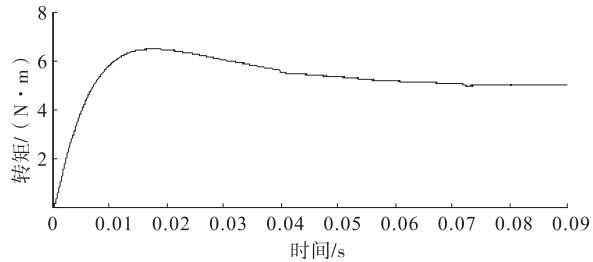


图8 电机电磁转矩波形

Fig. 8 Waveform of electromagnetic torque

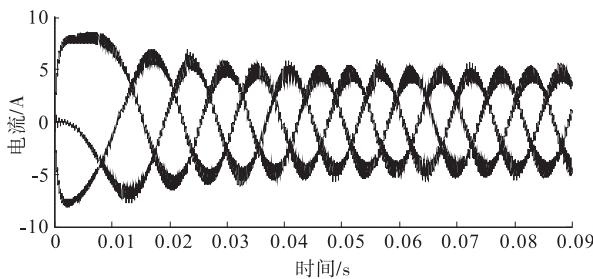


图9 电机失磁12.5%电流波形

Fig. 9 Waveform of current with 12.5% demagnetized

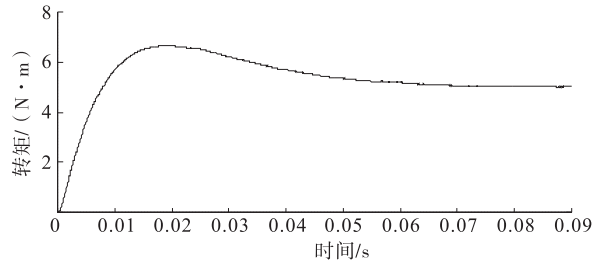


图10 电机失磁12.5%电磁转矩波形

Fig. 10 Waveform of electromagnetic torque with 12.5% demagnetized

表1 永磁同步电机失磁故障因子

Table 1 Loss factor of permanent magnet synchronous motor

工作状态	电流/A	转矩/(N·m)	λ
正常	4.47	5	1.12
失磁 12.5%	5.06	5	0.99
失磁 25.0%	5.52	5	0.91
失磁 37.5%	7.06	5	0.71
失磁 50.0%	10.74	5	0.47
失磁 62.5%	15.58	5	0.32
失磁 75.0%	19.34	5	0.26

故障因子减小,该失磁故障诊断方法是有效的.

3)该失磁故障诊断方法是以数学方程为基础的一种基于电路模型的分析方法.虽然其运算速度快,且能定性得到失磁故障对永磁同步电机矢量控制系统的影响,但不能明确区分模拟的是均匀失磁故障还是局部失磁故障,也无法确认失磁故障的准确位置,这将是今后研究工作中需要解决的问题.

参考文献:

[1] 王秀和. 永磁电机[M]. 北京:中国电力出版社,2007.

[2] 王鑫,李伟力,程树康. 永磁同步电动机发展展望[J]. 微电机,2007,40(5):69.

[3] PRIETO M D, ESPINOSA A G, RUIZ J R R, et al. Feature extraction of demagnetization faults in permanent-magnet synchronous motors based on box-counting fractal dimension [J].

抗干扰能力强等优点.

2)随着失磁程度的增加,定子电流增大,

- IEEE Transactions on Industry Electronics, 2011, 58(5):923.
- [4] 肖曦,张猛,李永东. 永磁同步电机永磁体状况在线监测[J]. 中国电机工程学报,2007,27(24):43.
- [5] 张志艳,马宏忠,陈诚,等. 永磁电机失磁故障诊断方法综述[J]. 微电机,2013,46(3):77.
- [6] 李三东,薛花,纪志成. 基于 Matlab 永磁同步电机控制系统的仿真建模[J]. 江南大学学报(自然科学版),2004,3(2):115.
- [7] 谢运祥,卢柱强. 基于 MATLAB/Simulink 的永磁同步电机直接转矩控制仿真建模[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2004,32(1):19.
- [8] 王沫然. Simulink 4 建模及动态仿真[M]. 北京:电子工业出版社,2002.
- [9] 龚云飞,富历新. 基于 MATLAB 的永磁同步电机矢量仿真研究[J]. 微电机,2007,40(2):33.
- [10] 崔胜民,柏睿,崔淑梅. PMSM 在 *abc* 坐标下的建模及故障仿真[J]. 机械设计与制造,2011(7):178.
- [11] 张红生,胡炳娇. 永磁同步电机本体数学模型在 MATLAB 中的仿真[J]. 自动化与仪器仪表,2012(2):134.
- [12] 张金利,景占荣,张玉瑞,等. 基于 SVPWM 的永磁同步电动机控制系统仿真与实验研究[J]. 微电机,2008,41(3):48.

本刊数字网络传播声明

本刊已许可万方数据资源系统、维普网、博看网、超星、中国科技论文在线、中教数据库、91阅读网等,以及中国学术期刊(光盘版)电子杂志社在中国知网及其系列数据库产品中,以数字化方式复制、汇编、发行、信息网络传播本刊全文. 其相关著作权使用费与本刊稿酬一并支付. 作者向本刊提交文章发表的行为即视为同意我刊上述声明.