

# 基于反电动势数学模型分析电动汽车永磁同步电机失磁故障

钟 钦<sup>1</sup>, 马宏忠<sup>2</sup>, 张志艳<sup>3</sup>, 丁 凡<sup>1</sup>, 成华义<sup>1</sup>

(1. 国网浙江省电力公司湖州供电公司, 浙江 湖州 313000; 2. 河海大学能源与电气学院, 南京 211100;  
3. 郑州轻工业学院电气信息工程学院, 郑州 450002)

**摘要:** 以V型磁路结构的8极42 kW内置式永磁同步电机为研究模型, 推导出了任意磁极或任意多个磁极发生不同程度的不可逆失磁故障下单槽和单相的空载反电动势数学模型。利用有限元方法仿真验证了该模型是正确的。该模型简单有效且计算量小, 考虑了转子磁场谐波的影响。结合该模型与有限元仿真对失磁故障进行了分析, 结果表明: 单槽反电动势波形能反映失磁磁极的具体位置和失磁严重程度, 单相反电动势波形不能辨别失磁磁极的具体位置, 只能反映所有磁极的整体失磁程度, 且不含有故障谐波分量, 监测故障谐波分量诊断永磁同步电机的失磁故障须考虑绕组的连接型式。

**关键词:** 永磁同步电机; 失磁故障; 故障诊断; 反电动势; 数学模型; 有限元方法

中图分类号: TM351

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2014)09-0035-06

## Analysis of Demagnetization Fault for PMSM of Electric Vehicle Based on Back-EMF Mathematical Model

ZHONG Qin<sup>1</sup>, MA Hongzhong<sup>2</sup>, ZHANG Zhiyan<sup>3</sup>, DING Fan<sup>1</sup>, CHENG Huayi<sup>1</sup>

(1. Huzhou Power Company, Electric Power Company of Zhejiang Province, Zhejiang Huzhou 313000, China;  
2. College of Energy and Electrical Engineering, Hehai University, Nanjing 211100, China;  
3. College of Electrical Information Engineering Zhengzhou University of Industry, Zhengzhou 450002, China)

**Abstract:** Taking an 8-pole 22 kW inside permanent magnet synchronous motor (PMSM) with V-shaped rotor structure as a model, a single-slot single-phase no-load back-EMF mathematical model is presented in the case of different degree of irreversible demagnetization fault occurring on any magnetic pole or multiple magnetic poles. Finite element method (FEM) is adopted to verify the correctness of the mathematical model. The present model is simple and effective with small computation quantity. And it takes the impact of rotor magnetic field harmonics into account. The demagnetization faults are analyzed with the present model and FEM simulation, and the results show that the waveform of single-slot back-EMF can reflect the location and the demagnetization degree of the demagnetized magnetic pole, however the waveform of single-phase back-EMF cannot distinguish the location of the demagnetized magnetic pole but can reflect the overall demagnetization degree of whole magnetic poles without fault harmonic components. It is necessary to consider the connection type of windings in diagnosing demagnetization failure of PMSM via monitoring fault harmonic components.

**Key words:** permanent magnet synchronous motor; demagnetization failure; fault diagnosis; back-EMF; mathematical model; finite element method

## 0 引言

永磁同步电机因其结构紧凑、体积小、重量轻、

效率高、高转矩、功率密度高、工作可靠、噪声低等性能特点, 具有电动汽车驱动的最优综合指标, 非常适用于电动汽车驱动领域<sup>[1-6]</sup>。而驱动电机是电动汽车的重要核心部件, 其可靠性不仅会直接影响整

收稿日期: 2014-03-21; 修回日期: 2014-04-08

基金项目: 上海汽车工业科技发展基金会基金(1106)。

Project Supported by Science and Technology Development Foundation of Shanghai Automotive Industry(1106).

车性能,甚至危及到人的生命安全<sup>[7]</sup>。但其运行环境恶劣,运行工况复杂,转子永磁体受到电磁、热、机械等应力会产生退磁<sup>[8-9]</sup>,一旦永磁体发生不可逆失磁故障,会导致永磁电机性能指标下降、发热和转矩性能变差,严重情况下电机可能失控和报废<sup>[10-13]</sup>。因此,在电动汽车、航空航天、国防装备等使用环境恶劣、可靠性要求高的场合,永磁电机应用又受到了很大的限制<sup>[14]</sup>。

目前针对永磁体发生失磁故障对电机运行性能影响及其诊断的研究较多,多以永磁材料的退磁曲线建立模型研究失磁故障<sup>[15-17]</sup>,但对失磁故障数学模型的研究较少。文[5]仅给出了表面式永磁同步电机一个磁极发生不可逆失磁 50%故障下单槽的空载反电动势数学模型。笔者在此基础上,以 1 台 42 kW 内置式永磁同步电机为例进行失磁故障研究,建立了失磁故障下空载反电动势数学模型,并采用有限元方法对失磁故障进行了仿真,结合该数学模型与有限元仿真分析了反电动势波形,幅值及其频谱的变化。

## 1 永磁同步电机失磁故障计算模型

笔者以电动汽车驱动电机为例进行失磁故障研究,该电机为 42 kW 内置式永磁同步电机,具体参数见表 1,定子绕组为整距对称分布串联连接,每相绕组匝数为 144 匝,每槽绕组匝数为 9 匝,则每极每相槽数为  $q=2$ ,转子采用内嵌式 V 型磁路结构,见图 1,图 1 中正负代表电流方向。

表1 内置式永磁同步电机参数

Tab. 1 Parameters of IPMSM

| 设计参数                        | 数值      |
|-----------------------------|---------|
| 额定转速/(r·min <sup>-1</sup> ) | 4 000   |
| 额定频率/Hz                     | 800/3   |
| 定子槽数/个                      | 48      |
| 极对数/对                       | 4       |
| 气隙/mm                       | 0.73    |
| 永磁体材料                       | Ne-Fe-B |

## 2 永磁体失磁故障单槽反电动势数学模型

永磁体发生失磁故障后,定子电流中会产生如下故障谐波分量<sup>[5,10]</sup>

$$f_F = f(1 \pm \frac{k}{p}) \quad k=1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

式(1)中: $f_F$ 为发生失磁故障时谐波频率; $f$ 为供电频率; $p$ 为极对数。

仅考虑电机空载额定转速下反电动势的基波

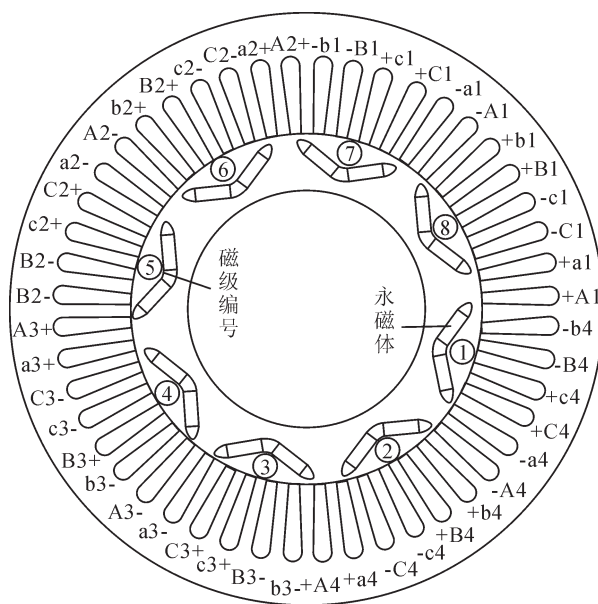


图1 永磁同步电机计算模型

Fig. 1 Calculating model of PMSM

分量,可以得到电机额定转速空载运行时单个槽绕组的反电动势  $e_s$ 。图 1 中设定编号为 1 的磁极发生不可逆失磁 20%故障,即磁极的剩磁磁密变为原来的 80%,当该磁极转过槽 A1 时该槽绕组的反电动势幅值减小,波形发生改变,可看成是归一化后的正弦波  $e_s(t)/E_s$  减去波  $y(t)$  的结果,  $E_s$  为单个槽的空载基波反电动势幅值,则磁极 1 发生失磁故障后槽 A1 的空载基波反电动势波形的变化情况见图 2,文中反电动势波形都为归一化处理后的波形。

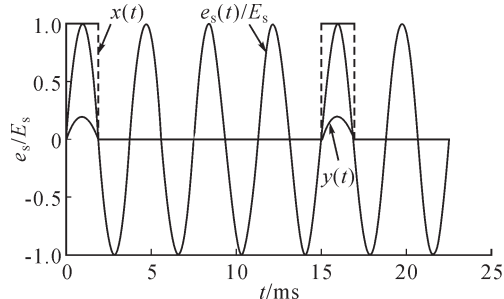


图2  $x(t)$ 、 $y(t)$  和  $e_s(t)/E_s$  的波形

Fig. 2 Waveforms of  $x(t)$ 、 $y(t)$  and  $e_s(t)/E_s$

图 2 中,  $x(t)$  对应磁极 1 发生失磁故障时槽 A1 的方波,表示磁极 1 转过槽 A1 时方波的幅值为 1,其他磁极转过槽 A1 时方波的幅值为零。一般周期信号可以分解成一系列正弦信号之和的形式<sup>[18]</sup>,可得到方波  $x(t)$  的傅里叶级数为

$$x(t) = \frac{1}{2p} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{k\pi} \sin(\frac{k\pi}{2p}) \cos[\frac{2k\pi f_e t}{p} - \frac{k\pi}{2p}] \quad (2)$$

式(2)中: $p$ 为极对数; $f_e$ 为额定频率。

图 2 中波  $y(t)$  是由  $K$ 、正弦基波和方波  $x(t)$  得到的,表示磁极 1 转过槽 A1 时该槽的空载基波反电

动势波形幅值减小  $K$  (不可逆失磁程度), 而其他磁极转过槽 A1 时该槽的空载基波反电动势波形幅值不变, 其形式为

$$y(t) = K \sin(2\pi f_e t) \left[ \frac{1}{2p} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{k\pi} \sin\left(\frac{k\pi}{2p}\right) \cos\left(\frac{2k\pi f_e t}{p} - \frac{k\pi}{2p}\right) \right] \quad (3)$$

式(3)中:  $K$  为温度恢复后磁密不能回复到原有值的部分与原有值的百分比<sup>[1]</sup>, 表示不可逆失磁程度。

式(3)经过代数运算后, 得到

$$y(t) = \frac{K}{2p} \sin(2\pi f_e t) + K \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k\pi} \sin\left(\frac{k\pi}{2p}\right) \times \left\{ \sin\left[2\pi f_e t \left(1 + \frac{k}{p}\right) - \frac{k\pi}{2p}\right] + \sin\left[2\pi f_e t \left(1 - \frac{k}{p}\right) + \frac{k\pi}{2p}\right] \right\} \quad (4)$$

为简化表达式, 式(4)记为

$$y(t) = \frac{K}{2p} \sin(2\pi f_e t) + K \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k\pi} \sin\left(\frac{k\pi}{2p}\right) \sin\left[2\pi f_e t \left(1 \pm \frac{k}{p}\right) \pm \frac{k\pi}{2p}\right] \quad (5)$$

由上述可知, 正常情况下单槽的空载基波反电动势正弦波减去失磁故障对应的波  $y(t)$  即为故障下该槽的空载反电动势。因此, 磁极 1 发生不可逆失磁故障下 A 相的槽 A1 绕组的空载反电动势数学模型为

$$e_{s,A1}(t)/E_s = \sin(2\pi f_e t) - y(t) \quad (6)$$

式(6)中:  $E_s = 2\pi f_e N \Phi_1$ ,  $N$  为槽绕组匝数;  $\Phi_1$  为空载每极基波主磁通<sup>[9]</sup>, 结合永磁同步电机结构、永磁体材料参数及永磁体几何参数、设计的永磁体空载工作点及漏磁系数等进行磁路计算得到。

将式(5)代入式(6), 磁极 1 发生不可逆失磁故障下 A 相的槽 A1 绕组的空载反电动势可表示为

$$e_{s,A1}(t) = E_s \left(1 - \frac{K}{2p}\right) \sin(2\pi f_e t) - E_s K \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k\pi} \sin\left(\frac{k\pi}{2p}\right) \sin\left[2\pi f_e t \left(1 \pm \frac{k}{p}\right) \pm \frac{k\pi}{2p}\right] \quad (7)$$

从式(7)的第 1 项因式可以看出, 磁极失磁后反电动势基波幅值减小为正常时的  $1 - K/2p$ , 而第 2 项因式中含有与式(1)相同的谐波分量, 可见该模型是有效的。

图 1 中已对 8 个磁极进行了编号, 记为  $i$ , 相应的不可逆失磁程度记为  $K_i$ , 这里不考虑磁极的磁化方向反向的情况, 只考虑  $0 \leq K_i \leq 1$  的情况, 磁极失磁时对应槽 A1 的方波记为  $x_i(t)$ , 则  $x_i(t)$  的傅里叶级数为

$$x_i(t) = \frac{1}{2p} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{k\pi} \sin\left(\frac{k\pi}{2p}\right) \cos\left[\frac{2k\pi f_e t}{p} - \frac{(2i-1)k\pi}{2p}\right] \quad (8)$$

式(8)中,  $i=1, 2, 3, \dots, 2p$ 。

则任意磁极或任意多个磁极发生不可逆失磁故障下槽 A1 绕组的空载反电动势为

$$e_{s,A1}(t) = E_s \left(1 - \sum_{i=1}^{2p} \frac{k_i}{2p} \sin(2\pi f_e t) - E_s \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k\pi} \sin\left(\frac{k\pi}{2p}\right) \times \sum_{i=1}^{2p} K_i \sin\left[2\pi f_e t \left(1 \pm \frac{k}{p}\right) \pm \frac{(2i-1)k\pi}{2p}\right]\right) \quad (9)$$

式(9)中:  $I=(I_1, \dots, I_i, \dots, I_{2p})$ ;  $i=1, 2, 3, \dots, 2p$ ;  $0 \leq K_i \leq 1$ , 当  $K_i=0$  时,  $I_i=0$ , 否则  $I_i=1$ 。

由图 1 可知, 槽 A1 与槽 a1 相差电角度  $30^\circ$ , 则在式(8)的基础上可推导出磁极  $i$  失磁时对应槽 a1 的方波  $X_i$ , 其傅里叶级数为

$$X_i(t) = \frac{1}{2p} + \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2}{k\pi} \sin\left(\frac{k\pi}{2p}\right) \cos\left[\frac{2k\pi f_e t}{p} - \frac{(3i-1)k\pi}{3p}\right] \quad (10)$$

式(10)中,  $i=1, 2, 3, \dots, 2p$ 。

则任意磁极或任意多个磁极发生不可逆失磁故障下槽 a1 绕组的空载反电动势为

$$e_{s,a1}(t) = E_s \left(1 - \sum_{i=1}^{2p} \frac{K_i}{2p} \sin(2\pi f_e t) - \frac{\pi}{6} - E_s \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k\pi} \sin\left(\frac{k\pi}{2p}\right) \times \sum_{i=1}^{2p} K_i \sin\left[2\pi f_e t \left(1 \pm \frac{k}{p}\right) \pm \frac{(3i-1)k\pi}{3p} - \frac{\pi}{6}\right]\right) \quad (11)$$

由图 2 可将 A 相所有的槽分为两组: 将 A1+、A1-、 $\dots$ 、A4+、A4- 这 8 个槽分为一组, 分别记为 A1、A2、 $\dots$ 、A8, 剩下的 8 个槽分为另一组, 分别记为 a1、a2、 $\dots$ 、a8。每一组相邻的两个槽相差电角度为  $\pi$ , 则任意磁极或任意多个磁极发生不可逆失磁故障下与槽 A1 一组的每个磁极下槽的反电动势为

$$e_{s,A_m}(t) = (-1)^{m-1} E_s \left(1 - \sum_{i=1}^{2p} \frac{K_i}{2p} \sin[2\pi f_e t - \pi(m-1)] - (-1)^{m-1} E_s \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k\pi} \sin\left(\frac{k\pi}{2p}\right) \sum_{i=1}^{2p} K_i \times \sin\left[2\pi f_e t \left(1 \pm \frac{k}{p}\right) \pm \frac{(2i-1)k\pi}{2p} - \pi(m-1) \left(1 \pm \frac{k}{p}\right)\right]\right) \quad (12)$$

式(12)中,  $m=1, 2, 3, \dots, 2p$ 。

同理可得任意磁极或任意多个磁极发生不可逆失磁故障下与槽 a1 一组的每个磁极下槽的反电动势为

$$e_{s,a_m}(t) = (-1)^{m-1} E_s \left(1 - \sum_{i=1}^{2p} \frac{K_i}{2p} \sin[2\pi f_e t - \pi(m-1) - \frac{\pi}{6}] - (-1)^{m-1} E_s \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k\pi} \sin\left(\frac{k\pi}{2p}\right) \sum_{i=1}^{2p} K_i \times \sin\right)$$

$$[2\pi f_e t(1 \pm \frac{k}{p}) \pm \frac{(3i-1)k\pi}{3p} - \frac{\pi}{6} - \pi(m-1)(1 \pm \frac{k}{p})]。 (13)$$

### 3 永磁体失磁故障单相反电动势数学模型

从图2可知,该电机定子绕组为串联连接,任意磁极或任意多个磁极发生不可逆失磁故障下A相空载反电动势为

$$e_A(t) = \sum_{m=1}^{2p} (e_{s,A,m} + e_{s,a,m})。 (14)$$

将式(12)、(13)代入式(14)中,得

$$e_A(t) = E_s(1 - \sum_{i=1}^{2p} \frac{K_i}{2p}) \sum_{m=1}^{2p} (-1)^{m-1} \times \{ \sin[2\pi f_e t - \pi(m-1)] + \sin[2\pi f_e t - \pi(m-1) - \frac{\pi}{6}] - E_s \sum_{m=1}^{2p} (-1)^{m-1} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k\pi} \sin(\frac{k\pi}{2p}) \sum_{i=1}^{2p} K_i \times \{ \sin[2\pi f_e t(1 \pm \frac{k}{p}) \pm \frac{(2i-1)k\pi}{2p} - \pi(m-1)(1 \pm \frac{k}{p})] + \sin[2\pi f_e t(1 \pm \frac{k}{p}) \pm \frac{(3i-1)k\pi}{3p} - \frac{\pi}{6} - \pi(m-1)(1 \pm \frac{k}{p})] \} \}。 (15)$$

改变式(15)右边第2项的求和顺序,得

$$e_A(t) = E_s(1 - \sum_{i=1}^{2p} \frac{K_i}{2p}) \sum_{m=1}^{2p} (-1)^{m-1} \times \{ \sin[2\pi f_e t - \pi(m-1)] + \sin[2\pi f_e t - \pi(m-1) - \frac{\pi}{6}] - E_s \sum_{i=1}^{2p} K_i \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{k\pi} \sin(\frac{k\pi}{2p}) \sum_{m=1}^{2p} (-1)^{m-1} \times \{ \sin[2\pi f_e t(1 \pm \frac{k}{p}) \pm \frac{(2i-1)k\pi}{2p} - \pi(m-1)(1 \pm \frac{k}{p})] + \sin[2\pi f_e t(1 \pm \frac{k}{p}) \pm \frac{(3i-1)k\pi}{3p} - \frac{\pi}{6} - \pi(m-1)(1 \pm \frac{k}{p})] \} \}。 (16)$$

简化式(16)右边两项,可证明

$$\sum_{m=1}^{2p} (-1)^{m-1} \{ \sin[2\pi f_e t - \pi(m-1)] + \sin[2\pi f_e t - \pi(m-1) - \frac{\pi}{6}] \} = 2p [\sin(2\pi f_e t) + \sin(2\pi f_e t - \frac{\pi}{6})]。 (17)$$

$$\sin(\frac{k\pi}{2p}) \sum_{m=1}^{2p} (-1)^{m-1} \times \{ \sin[2\pi f_e t(1 \pm \frac{k}{p}) \pm \frac{(2i-1)k\pi}{2p} - \pi(m-1)(1 \pm \frac{k}{p})] + \sin[2\pi f_e t(1 \pm \frac{k}{p}) \pm \frac{(3i-1)k\pi}{3p} - \frac{\pi}{6} - \pi(m-1)(1 \pm \frac{k}{p})] \} = 0。 (18)$$

式(18)中,  $i=1, 2, \dots, 2p$ 。

由式(16)–(18)得到简化后的A相空载反电动势

$$e_A(t) = 2p E_s (1 - \sum_{i=1}^{2p} \frac{K_i}{2p}) [\sin(2\pi f_e t) + \sin(2\pi f_e t - \frac{\pi}{6})]。 (19)$$

对式(12)、(13)与式(19)进行比较,有如下结论:

当任意磁极或任意多个磁极发生不可逆失磁故障,单相反电动势波形不会发生改变,不能反映失磁磁极的具体位置,其基波分量的幅值也减小,但这只能反映转子上所有永磁体的整体失磁严重程度,并不能反映单个磁极失磁的严重程度;单相反电动势数学模型不含有与式(1)相同的故障谐波分量。文[20]对3种不同对称分布绕组形式的永磁同步电动机失磁故障分析也得到类似的结果,另外与式(1)相同的定子电流谐波也用做诊断永磁同步电机转子其他故障的特征量<sup>[21-22]</sup>,例如转子静态、动态偏心等。因此通过监测反电动势故障谐波分量来永磁同步电机失磁故障须考虑定子绕组的连接型式。

### 4 有限元仿真对比

笔者采用有限元方法(FEM)对上述内置式永磁同步电机在空载额定转速4000 r/min运行,编号为1的磁极发生不可逆失磁20%故障下进行仿真计算,将槽A1、a1的反电动势有限元仿真结果分别与式(7)、(11)得到的结果进行比较,见图3。

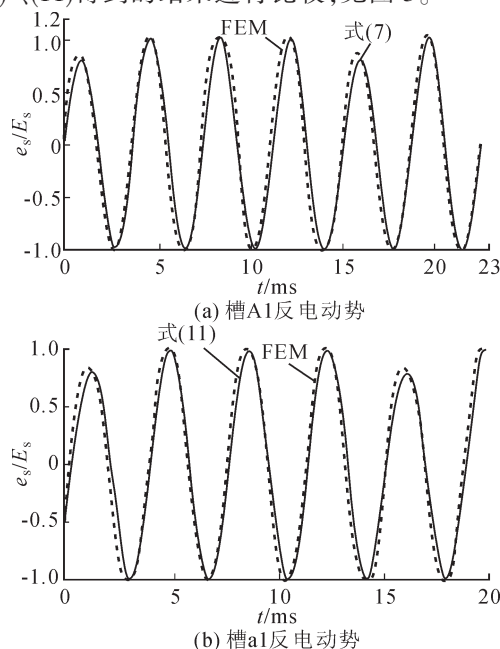


图3 磁极1失磁20%单槽反电动势波形

Fig. 3 Back-EMF in single slot with 20% demagnetized pole 1

同理可得到电机在空载额定转速4000 r/min运行,磁极1与磁极2分别发生不可逆失磁20%、40%故障下,槽A1、a1的反电动势的有限元仿真结果,分别与式(12)、(13)进行对比,见图4。

图3中,当磁极1发生不可逆失磁20%故障后,该磁极转过槽A1、a1时槽绕组的反电动势幅值与正常时相比都减小了20%;图4中,当磁极1与磁极2分别发生不可逆失磁20%、40%故障后,磁极1转

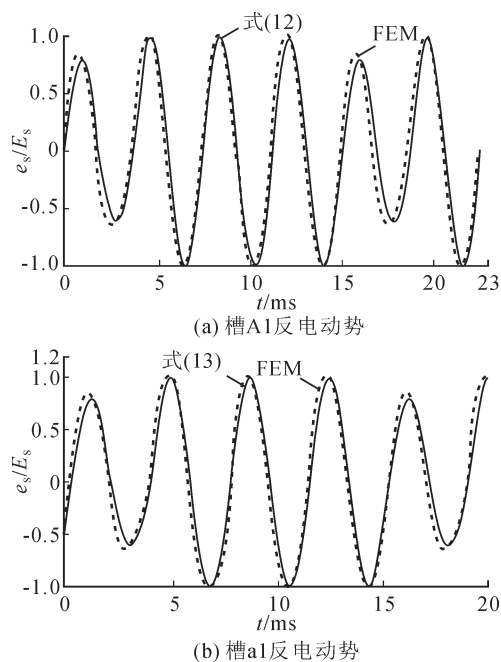


图4 磁极1、2分别失磁20%、40%单槽反电动势波形  
Fig. 4 Waveform of back-EMF in single slot with 20%、40% demagnetized pole 1、2

过槽 A1、a1 时槽绕组的反电动势幅值与正常时相比都减小了 20%，而磁极 2 转过槽 A1、a1 时槽绕组的反电动势幅值与正常时相比都减小了 40%。因此，有限元仿真的结果与上述数学模型得到的结果非常吻合，验证了该模型是正确的。

结合图 3、4 可知，当失磁的磁极转过槽时该槽绕组感应的反电动势幅值减小，减小的大小与磁极失磁严重程度一致，导致该槽的反电动势波形不再对称，磁极发生失磁故障对单槽的反电动势的影响是很明显的。

综上所述，磁极失磁故障下，单槽的反电动势数学模型与有限元仿真结果表明：单槽的反电动势波形能反映失磁磁极的具体位置，幅值的减小大小能反映磁极失磁的严重程度。

## 5 考虑转子磁场谐波的影响

PMSM 由于永磁体制造及工艺上的限制，永磁体产生的转子磁场存在大量的奇数次谐波，实际转子磁场不是理想正弦分布<sup>[23]</sup>，要得到更为准确的失磁故障反电动势数学模型，必须考虑磁场的谐波分量。

由式(19)得忽略磁场谐波电机正常情况下 A 相空载反电动势为

$$e_A(t) = 2pE_s[\sin(2\pi f_e t) + \sin(2\pi f_e t - \frac{\pi}{6})] = 4\pi f_e Np \Phi_1 [\sin(2\pi f_e t) + \sin(2\pi f_e t - \frac{\pi}{6})] \quad (20)$$

计及磁场谐波 A 相正常空载反电动势为

$$e_A(t) = 4\pi f_e Np \{ \Phi_1 [\sin(2\pi f_e t) + \sin(2\pi f_e t - \frac{\pi}{6})] + \sum_{v=2k+1} \Phi_v [\sin(2\pi f_e t v - \varphi_v) + \sin(2\pi f_e t v - \frac{\pi}{6} - \varphi_v)] \} \quad (21)$$

式(21)中： $k$  为正整数； $\Phi_v$  为每极磁通  $v$  次谐波分量的幅值； $\varphi_v$  为  $v$  次谐波相位。

当电机任意磁极或多个磁极发生不可逆失磁故障，并计及磁场谐波，电机 A 相空载反电动势为

$$e_{A1}(t) = 4\pi f_e Np (1 - \sum_{i=1}^{2p} \frac{K_i}{2p}) \{ \Phi_1 [\sin(2\pi f_e t) + \sin(2\pi f_e t - \frac{\pi}{6})] + \sum_{v=2k+1} \Phi_v [\sin(2\pi f_e t v - \varphi_v) + \sin(2\pi f_e t v - \frac{\pi}{6} - \varphi_v)] \} \quad (22)$$

图 5 为电机在空载额定转速 4 000 r/min 运行，有限元仿真得到的正常与磁极 1 与磁极 2 分别发生不可逆失磁 20%、40%故障时 A 相反电动势及其频谱。

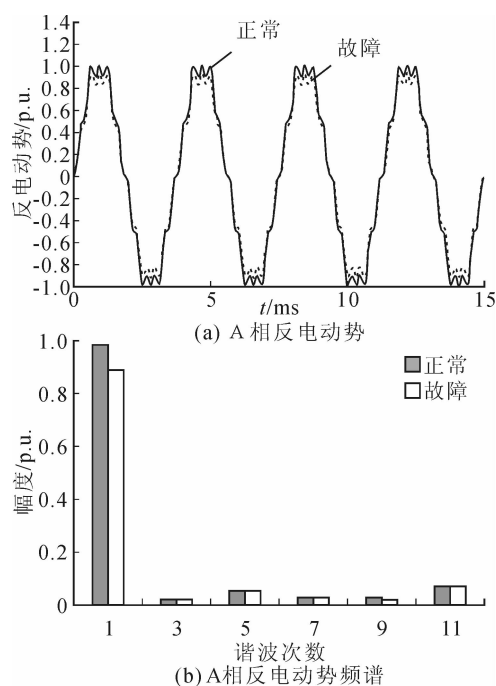


图5 磁极1、2分别失磁20%、40% A相反电动势及其频谱  
Fig. 5 Back-EMF and its spectrum of phase A with 20%、40% demagnetized pole 1、2

由图 5 可明显看出，失磁故障时 A 相反电动势波形没有发生变化，峰值整体减小，也没出现故障谐波，与第 4 章分析的结论一致。

## 6 结论

笔者对电动汽车驱动电机失磁故障进行研究，以内嵌式永磁同步电机为计算模型，推导出了任意

磁极或任意多个磁极发生不同程度的不可逆失磁故障下单槽和单相的空载反电动势数学模型,该模型与转子磁钢结构没有关系。该模型简单、计算量小,并对失磁故障进行了有限元仿真。当磁极发生不可逆失磁故障时,有以下结论:

1)单槽的反电动势波形发生改变,其幅值减小的波峰或波谷对应失磁磁极,减小大小能反映磁极失磁的严重程度;

2)单相反电动势波形不会发生改变,不能反映失磁磁极的具体位置,其基波分量的幅值也减小,但这只能反映转子上所有永磁体的整体失磁严重程度,不能反映单个磁极失磁的严重程度;

3)单相反电动势波形不含有故障谐波分量,通过监测故障谐波诊断永磁同步电机须考虑定子绕组的连接型式。

### 参考文献:

- [1] 唐任远. 现代永磁电机理论与设计[M]. 北京:机械工业出版社,1997:185-188.  
TANG Renyuan. Modern permanent magnet machines-theory and design[M]. Beijing: China Machine Press, 1997:185-188.
- [2] 王秀和. 永磁电机[M]. 北京:中国电力出版社,2007:7-8.  
WANG Xiuhe. Permanent magnet machines[M]. Beijing: China Electric Power Press,2007:7-8.
- [3] PARSA L,TOLİYAT H A. Fault-tolerant interior-permanent-magnet machines for hybrid electric vehicle applications[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology,2007,56(4): 1546-1552.
- [4] JORDI-ROGER R R,JAVIER A R,ESPINOSA A G,et al. Detection of demagnetization faults in permanent-magnet synchronous motors under nonstationary conditions[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2009,45(7):2961-2969.
- [5] URRESTY J,RIBA RUIZ J R,DELGADO M,et al. Detection of demagnetization faults in surface-mounted permanent magnet synchronous motors by means of the zero-sequence voltage component[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2012,27(1):42-51.
- [6] ESPINOSA A G,ROSETO J A,CUSIDO J,et al. Fault detection by means of hilbert-huang transform of the stator current in a PMSM with demagnetization[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion,2010,25(2):312-318.
- [7] 朱显辉,崔淑梅,师楠,等. 电动汽车电机故障时间的粒子群优化灰色预测[J]. 高电压技术,2012,38(6): 1391-1396.  
ZHU Xianhui,CUI Shumei,SHI Nan,et al. Grey prediction model of electric vehicle motor based on particle swarm optimization[J]. High Voltage Engineering,2012,38(6): 1391-1396.
- [8] HONG J, HYUN D, LEE Sangbin, et al. Automated monitoring of magnet quality for permanent-magnet synchronous motors at standstill[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2010,46(4):1397-1405.
- [9] TORREGROSSA D,KHOOBROO A,FAHIMI B. Prediction of acoustic noise and torque pulsation in PM synchronous machines with static eccentricity and partial demagnetization using field Reconstruction method[J]. IEEE Transactions on Industry Applications,2012,59(2):934-944.
- [10] RAJAGOPALAN S,ROUX W L,HABETLER T G,et al. Dynamic eccentricity and demagnetized rotor magnet detection in trapezoidal flux (brushless DC) motors operating under different load conditions[J]. IEEE Transaction on Power Electron,2007,22(5):2061-2069.
- [11] PRIETO M D,ESPINOSA A G,RUIZ J,et al. Feature extraction of demagnetization faults in permanent-magnet synchronous motors based on box-counting fractal dimension [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics,2011,58 (5):1594-1605.
- [12] RUOHO S,KOLEHMAINEN J,IKAEIMO J,et al. Interdependence of demagnetization, loading, and temperature rise in a permanent-magnet synchronous motor [J]. IEEE Transactions on Magnetics,2010,46(3):949-953.
- [13] 卢伟甫,刘明基,罗应立,等. 自启动永磁同步电机启动过程退磁磁场的计算与分析[J]. 中国电机工程学报,2011, 31(15):53-60.  
LU Weifu,LIU Mingji,LUO Yingli,et al. Demagnetization field analysis and calculation for line-start permanent magnet synchronous motor during start process[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering,2011,31 (15):53-60.
- [14] 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):43-47.  
XIAO Xi,ZHANG Meng,LI Yongdong. On-line estimation of permanent-magnet flux linkage ripple for PMSM[J]. Proceedings of the CSEE,2007,27(24):43-47.
- [15] ROSU M,SAITZ J,ARKKIO A. Hysteresis model for finite element analysis of permanent demagnetization in a large synchronous motor under a fault condition[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2005,41(6):2118-2123.
- [16] RUOHO S,DLALA E,ARKKIO A. Comparison of demagnetization models for finite-element analysis of permanent-magnet synchronous machines[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2007,43(11):3964-3968.
- [17] KRAL C,SPRANGERS R,WAARMA J,et al. Modeling demagnetization effects in permanent magnet synchronous machines[C]//XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM). Rome:[s.n.],2010:1-6.

(下转第46页)

- discharge coils for high voltage shunt capacitors[J]. Zhejiang Electric Power, 2000(5):7-10.
- [10] GB/T 11024.1—2010 标称电压 1 000 V 以上交流电力系统用并联电容器[S]. 2010.
- GB/T 11024.1—2010 Power systems having a rated voltage above 1 000 V[S]. 2010.
- [11] DL/T 628—2011 集合式高压并联电容器订货技术条件[S]. 2011.
- DL/T 628—2011 Specification of collective high-voltage shunt capacitor for order[S]. 2011.
- [12] JB/T 7112—2000 集合式高电压并联电容器[S]. 2000.
- JB/T 7112—2000 High voltage shunt capacitor of the assembling type[S]. 2000.
- [13] 黄 玲, 黄有祥. 温度对集合式全膜并联电容器使用寿命影响的研究[J]. 电力电容器, 2006, 27(2):35-39.
- HUANG Ling, HUANG Youxiang. Research for influence of temperature on the operation life of assembled all-film shunt capacitor[J]. Power Capacitor, 2006, 27(2):35-39.
- [14] 沈文琪. 温度、电压、谐波、涌流等对电容器寿命的影响[J]. 电力电容器, 2005, 26(2):6-8.
- SHEN Wenqi. Influence of temperature, voltage, harmonic and inrush transient current on power capacitor life expectancy[J]. Power Capacitor, 2005, 26(2):6-8.
- [15] 机械工程手册机电工程手册编辑委员会. 电机工程手册第五卷输变电设备, 变压器[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [16] 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [17] DL/T 653—2009 高压并联电容器用放电线圈使用技术条件[S]. 2009.
- DL/T 653—2009 Specification of discharge coils for high voltage shunt capacitor for order[S]. 2009.
- 廖一帆(1987—), 男, 工程师, 从事高电压技术的试验研究工作。
- 庞美钦(1964—), 男, 工程师, 从事电力电容器研究设计工作。
- 顾凤彪(1981—), 男, 助理工程师, 从事高电压试验方面工作。
- 李锐海(1964—), 男, 高级工程师, 从事特高压输电技术方面的研究和管理。

(上接第 40 页)

- [18] 吴大正. 信号与线性系统分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 1986:123-128.
- WU Dazheng. Signal and linear system analysis[M]. Beijing: Higher Education Press, 1986:123-128.
- [19] 马宏忠. 电机学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- MA Hongzhong. Electrical machines[M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [20] CASADEI D, FILIPPETTI F, ROSSI C, et al. Magnets faults characterization for Permanent magnet synchronous motors [C]/IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines. France: [s.n.], 2009:1-6.
- [21] WIEHAN L R, RONALD G H, THOMAS G, et al. Detecting rotor faults in low power permanent m-agnet synchronous machines[J]. IEEE Transaction on Power Electronics, 2007, 22(1):322-328.
- [22] EBRAHIMI B M, FAIZ J, ROSHTKHARI M J. Static, dynamic, and mixed-eccentricity fault diagnoses in permanent-magnet synchronous motors[J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2009, 56(11):4727-4739.
- [23] 李景灿, 廖 勇. 考虑饱和及转子磁场谐波的永磁同步电机模型[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(3):60-66.
- LI Jingcan, LIAO Yong. Model of permanent magnetsynchronous motor considering saturation and rotor flux harmonics[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(3):60-66.
- 钟 钦(1989—), 男, 硕士, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断、永磁同步电机故障诊断等。
- 马宏忠(1962—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气设备状态监测与故障诊断、新能源发电等。