

基于反电动势谐波分析的 FSCW-PMSM 失磁故障诊断

徐蕴缪¹, 李天乐², 余军威¹, 黄旭聪¹

(1. 国网宁波供电公司, 浙江 宁波 315000;

2. 华中科技大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074)

摘要: 为避免永磁体局部失磁对永磁电机(PMSM)控制精度和安全运行带来影响,提出了一种基于反电动势(EMF)谐波分析的分数槽集中绕组永磁同步电机(FSCW-PMSM)局部失磁故障诊断方法。在推导出的FSCW-PMSM局部失磁时磁动势(MMF)和单槽反电动势的数学模型基础上,根据单槽反电动势各谐波分量的幅值和特征绕组系数得到单相反电动势各谐波幅值的定量变化关系,并验证利用单相反电动势谐波变化诊断失磁故障的可行性。最后,基于一台20极24槽内置式永磁同步电机的样机参数建立二维有限元模型开展电磁仿真分析,获得单相反电动势特征谐波的变化规律。结果表明单相反电动势特征谐波的大小随故障数量增大呈周期性变化。

关键词: 分数槽集中绕组永磁同步电机; 局部失磁故障; 谐波分析; 反电动势

中图分类号: TM315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)06-0092-06

doi: 10.12177/emca.2022.020

Diagnosis of Demagnetization Fault for FSCW-PMSM by Harmonic Analysis of Back EMF

XU Yunliu¹, LI Tianle², YU Junwei¹, HUANG Xucong¹

(1. State Grid Ningbo Power Supply Company, Ningbo 315000, China;

2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: To avoid the influence of partial demagnetization of permanent magnet on the control accuracy and safe operation of permanent magnet synchronous motors (PMSMs), a method to monitor partial demagnetization faults for fractional slot concentrated winding (FSCW) PMSM based on back electromotive force (EMF) harmonic analysis is proposed. After theoretical derivation, the mathematical models of magneto motive force (MMF) and single-slot back EMF under demagnetization are obtained. Then, with the amplitude of each harmonic component of the single-slot back EMF and winding coefficients of FSCW-PMSM, the variation of each harmonic amplitude of the single-phase back EMF can be deduced. The theoretical derivation above can verify the feasibility of judging the demagnetization fault by the variation of single-phase back EMF's harmonics. Finally, using the prototype parameters, taking a 20-pole 24-slot interior PMSM to build a finite element model, a 2D electromagnetic simulation model is established to obtain the variation of the characteristic harmonics of the single-phase back EMF. The results show that the characteristic harmonic of single-phase back EMF changes periodically with the increase of the number of faults.

Key words: fractional slot concentrated winding permanent magnet synchronous motor; partial demagnetization fault; harmonic analysis; back electromotive force

收稿日期: 2022-03-12; 收到修改稿日期: 2022-04-27

作者简介: 徐蕴缪(1996—),女,硕士,助理工程师,研究方向为永磁电机故障诊断。

0 引言

随着永磁同步电机(PMSM)的广泛应用,电机失磁故障已成为业界重点关注的问题。当电机的永磁体遭受物理损伤、高温应力、反向磁场和老化时,都将导致永磁体材料强度降低,进而引发失磁故障。一旦失磁故障发生在运行的设备上,将带来巨大的经济损失和安全威胁^[1]。例如,对于电动汽车的轮毂电机,失磁故障会导致汽车失控;对于大型发电机组的励磁机,失磁故障会降低发电机组输出功率的质量,同时影响供电的可靠性。

针对永磁电机的失磁问题,目前最常采用的解决方法是从电机设计与磁路优化角度出发^[2-4],降低失磁风险。但对于运行电机发生的失磁故障,则往往要等故障产生恶劣影响了才会停机检查。为尽快消除故障隐患,确保电机的安全运行,有必要开展永磁电机失磁故障在线监测与诊断研究^[5]。

为实现失磁故障监测与诊断,国内外学者在电气特征分析、智能算法、磁链观测器等方面开展了大量研究。文献[6]通过零序电压分量监测失磁故障,但需额外引出中性点;文献[7]利用零序电流分量监测三角形连接的永磁同步电机,但其分析结论难以有效解释故障现象;文献[8]对电机注入额外信号以区分失磁故障和气隙偏心故障;文献[9]提出一种基于 Vold-Kalman 阶次追踪滤波器的转子故障监测方法,但只能监测整体失磁;文献[10-11]利用深度学习、神经网络等智能算法诊断电机失磁故障;文献[12-13]则提出通过搭建磁链观测器来监测永磁体状态。

近年来,分数槽集中绕组(FSCW)PMSM因其转矩密度高、弱磁性能好、齿槽转矩小和效率高等特点,在电动汽车、航空航天等工程领域受到了广泛关注^[14-16]。为实现 FSCW-PMSM 局部失磁故障监测与诊断,需要准确获得其单槽反电动势和单相反电动势特征谐波的变化规律。本文首先建立了电机磁动势和单槽反电动势在失磁故障下的数学模型,接着结合单槽反电动势的谐波幅值特征和分数槽集中绕组的绕组系数,推导得到单相反电动势各谐波分量的幅值特征,验证了利用

单相反电动势谐波变化特征诊断失磁故障的可行性。最后,基于一台 20 极 24 槽内置式永磁同步电机(IPMSM)的样机参数建立二维有限元模型开展电磁仿真分析,获得单相反电动势特征谐波的变化。

1 电机关键设计参数

本文分析使用的 FSCW-PMSM 参数如表 1 所示,其基本结构如图 1 所示。

表 1 FSCW-PMSM 的关键设计参数

参数名称	参数值
槽数	24
极数	20
定子外径/mm	380
定子内径/mm	260
定子长度/mm	90
永磁体厚度/mm	8
永磁体宽度/mm	28
气隙长度/mm	1

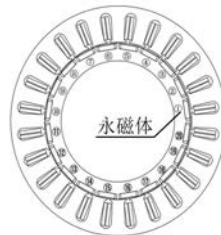


图 1 电机基本结构

对于三相电机,通常定义其每极每相槽数 q 如下式所示:

$$q = \frac{Z_s}{6p} = \frac{N}{D}, D \neq 1 \quad (1)$$

式中: Z_s 为槽数; p 为极对数; N 和 D 互素。在本文中, $q=2/5$, $N=2$, $D=5$ 。

同时定义单元电机数量 N_t 如下:

$$N_t = \frac{p}{D} = 2 \quad (2)$$

2 数学模型

2.1 失磁模型

正常运行电机的理想磁动势可由下式表示:

$$F_r(\theta, t) = F_{rm}(2\pi f_e t - \theta) \quad (3)$$

式中: F_{rm} 为磁动势基波幅值; f_e 为电机基频; θ 为初始电角度。

假定其中一块永磁体发生失磁, 磁动势波形可看作从正弦波中减去特定波形, 如图 2 所示^[17]。

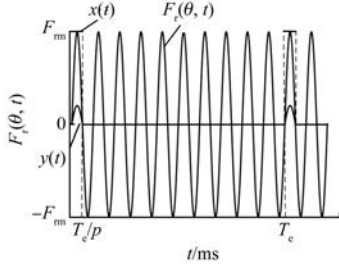


图 2 局部失磁故障下的磁动势波形

发生失磁故障后, 磁动势变为

$$F'_r(\theta, t) = F_r(\theta, t) - y(t) \quad (4)$$

式中: $y(t)$ 为永磁体失磁导致的磁动势消除部分。

$y(t)$ 又可看作一正弦波与脉冲波 $x(t)$ 的乘积。对 $x(t)/F_{rm}$ 进行傅里叶展开得到:

$$x(t)/F_{rm} = \frac{1}{2p} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{2}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2p}\right) \cos\left(\frac{2n\pi f_e t}{p} - \frac{n\pi}{2p}\right), \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

因此, $y(t)/F_{rm}$ 可展开为

$$y(t)/F_{rm} = \frac{K}{2p} \sin(2\pi f_e t) + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{K}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2p}\right) \sin\left[2\pi f_e t\left(1 \pm \frac{n}{p}\right) \pm \frac{n\pi}{2p}\right] \quad (6)$$

式中: K 为剩余磁密与正常磁密之比。

根据式(6)可推导出发生局部失磁故障时的单槽反电动势如下:

$$e_{\text{slot, demag}}(t) = E_{\text{slot}} \left(1 - \frac{K}{2p}\right) \sin(2\pi f_e t) - \sum_{n=1}^{\infty} \frac{KE_{\text{slot}}}{n\pi} \sin\left(\frac{n\pi}{2p}\right) \sin\left[2\pi f_e t\left(1 \pm \frac{n}{p}\right) \pm \frac{n\pi}{2p}\right] \quad (7)$$

式中: E_{slot} 为正常情况下单槽反电动势的基波幅值。

根据式(7), 可以得到新增单槽反电动势谐波频率如下^[18]:

$$f_{\text{demag}} = f_e \left(1 \pm \frac{n}{p}\right), n = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

此外, 当不止一块永磁体发生失磁故障时, 新增单槽反电动势谐波频率仍满足式(8)。

2.2 绕组系数影响

相比单槽反电动势的变化结论, 工程中人们更关心单相反电动势在故障下的变化规律。为获得单相反电动势谐波分量的特性, 需要考虑包括绕组分布系数和绕组节距系数在内的绕组系数。

绕组分布系数和绕组节距系数通常分别由以下公式计算得到^[19-20]:

$$k_{qv} = \frac{\sin\left(q \cdot \frac{v\theta_0}{2}\right)}{q \sin\left(\frac{v\theta_0}{2}\right)} \quad (9)$$

$$k_{yv} = \sin\left(v \frac{y_1}{\tau} \frac{\pi}{2}\right) \quad (10)$$

式中: v 为谐波极对数; θ_0 为相邻槽的电角度; τ 为极距; y_1 为节距。

基于单槽反电动势的谐波幅值和分数槽集中绕组的特征绕组系数, 即可计算得到单相反电动势谐波的具体数值:

$$E_{\text{phase}, v} = k_{yv} k_{qv} p q E_{\text{slot}, v} \quad (11)$$

式中: $E_{\text{phase}, v}$ 和 $E_{\text{slot}, v}$ 分别为单相反电动势和单槽反电动势谐波分量的幅值。

为获得分数槽集中绕组系数的确切表达式, 图 3 给出单元电机中正槽的空间分布情况, 图中 $1, J_2, J_3, \dots$ 为正槽编号, X 为一整数, $X\theta_0$ 表示单元电机中相邻极下的槽间距。

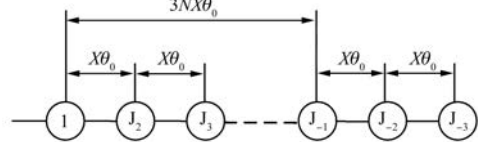


图 3 各槽号的空间分布情况

X 可由下式描述^[21]:

$$X = \frac{6N(n-1) + 1}{D}, n = 1, 2, \dots, D \quad (12)$$

显然, D 和 X 同为奇数。因此绕组分布系数可改写为如下形式:

$$k_{qv} = \sin\{vDX \cdot 30^\circ + [1 + (-1)^{vD}] \cdot 45^\circ\} \cdot \cos\{[1 + (-1)^{vD}] \cdot 45^\circ\} / N \sin\left(v \frac{D}{N} X \cdot 30^\circ\right) \quad (13)$$

式(13)中, v 为

$$v = \frac{v'}{D}, v' = 1, 2, 3, \dots \tag{14}$$

据式(13)可知,若 vD 为偶数,则 k_{qv} 为 0。因此,当局部失磁故障发生时,新增单相反电动势谐波频率仅为

$$f_{\text{demag}} = v f_e \tag{15}$$

$$v = \frac{1}{D}, \frac{3}{D}, \frac{5}{D}, \frac{7}{D}, \frac{9}{D}, \frac{11}{D}, \frac{13}{D}, \dots \tag{16}$$

根据前述各计算参数的计算过程得到文中分析使用的 20 极 24 槽 FSCW-PMSM 的关键计算参数,见表 2。

表 2 FSCW-PMSM 的关键计算参数

参数名称	参数值
计算参数 N	2
计算参数 D	5
计算参数 X	5
每极每相槽数 q	2/5
单元电机数量 N_t	2
谐波频率 f_{demag}	$v f_e, v = (1, 3, 5, \dots)/D$

3 有限元分析

在有限元仿真软件中开展单个永磁体在不同失磁程度下的电机反电动势分析,运行工况假定为额定转速 2 500 r/min 的空载情况。

图 4 为正常运行工况和单个永磁体 80% 局部失磁故障下的磁密云图对比。图 4(b) 所示方框内为失磁永磁体,可以明显看出气隙磁密低于圆周其他位置。图 5 分别为气隙磁密、单槽反电动势和单相反电动势在 80% 局部失磁下的谐波频谱情况,可以看出磁密谐波频率和单槽反电动势谐波频率为 $f_e(1 \pm n/p)$,与式(8)推导结论一致,而单相反电动势谐波频率为 $v f_e, v = (1, 3, 5, \dots)/D$,与式(15)、式(16)推导结果一致。

通过有限元分析和理论推导分别得到单槽反

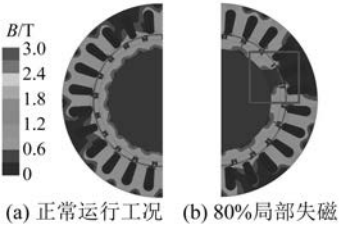


图 4 磁密云图对比

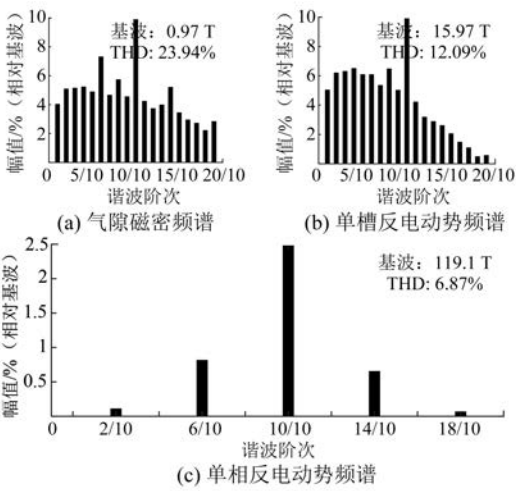


图 5 局部失磁下的谐波频谱

电动势,其波形对比如图 6 所示,结果证明单槽反电动势公式推导的准确性。

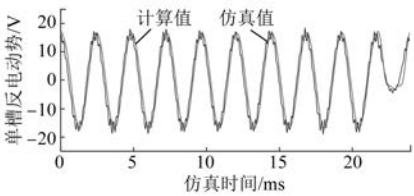


图 6 有限元分析和理论推导下的单槽反电动势对比

80% 失磁故障和正常状态下的单相反电动势波形对比如图 7 所示。由图 7 可知难以凭幅值区分正常态和故障态,也说明了谐波分析的必要性。

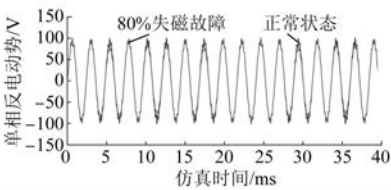


图 7 80% 失磁故障和正常状态下的单相反电动势波形对比

结合单槽反电动势各分量幅值和绕组系数,可通过式(11)得出单相反电动势各分量。表 3 为单相反电动势各分量的计算结果和仿真结果,其对比结果证明了由式(11)计算得到的单相反电动势谐波与通过有限元仿真得到的结果一致,验证了式(9)~式(11)的正确性。

为监测故障的严重程度,对不同故障程度下的单相反电动势谐波进行了分析。表 4 为不同失磁故障程度下单相反电动势的特征谐波大小。

表 3 单相反电动势各分量理论计算和仿真结果对比

谐波频率	理论计算值/V	仿真值/V	误差/%
$1/5f_e$	0.53	0.52	1.89
$3/5f_e$	3.90	3.89	0.26
f_e	119.20	119.10	0.08
$7/5f_e$	3.12	3.11	0.32
$9/5f_e$	0.31	0.30	3.13

表 4 不同失磁程度下单相反电动势特征谐波幅值 V

失磁程度	谐波频率				
	$1/5f_e$	$3/5f_e$	f_e	$7/5f_e$	$9/5f_e$
0%	0.007	0.352	124.800	0.123	0.053
20%	0.149	1.299	123.400	0.927	0.089
40%	0.299	2.277	121.900	1.757	0.205
60%	0.429	3.216	120.300	2.558	0.283
80%	0.516	3.900	119.100	3.108	0.301

随着故障的加剧,单相反电动势特征谐波显著增加,基波分量则线性减小。图 8 和图 9 为故障程度加深时各谐波分量和基波分量的拟合曲线。

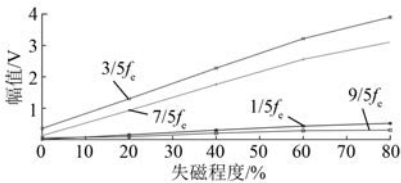


图 8 故障程度加深时各谐波分量的拟合曲线

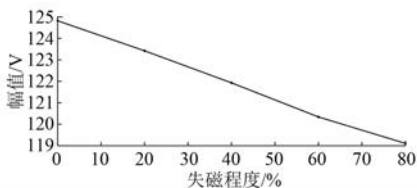


图 9 故障程度加深时基波分量的拟合曲线

此外,对不同数量永磁体失磁时的单相反电动势进行分析,假定失磁永磁体相邻。表 5 为不同数量永磁体发生失磁故障下的特征谐波幅值,图 10 为单相反电动势谐波分量随失磁永磁体数量增加的变化情况,图 11 为基波分量的变化情况。

单相反电动势的特征谐波的大小随故障数量增大呈周期性变化。当失磁永磁体的数量为 5 (即第 2 节中定义的 D) 的倍数时,各谐波幅值最

低。同时,当失磁永磁体数量接近 5 的倍数间的中间数时,各谐波幅值最高。而基波幅值则随失磁永磁体数量的增大而几乎线性下降。

表 5 不同数量永磁体失磁故障下的谐波幅值 V

失磁永磁体数量	谐波频率				
	$1/5f_e$	$3/5f_e$	f_e	$7/5f_e$	$9/5f_e$
0	0.007	0.352	124.800	0.123	0.053
1	0.516	3.900	119.100	3.108	0.301
2	0.383	6.635	113.800	5.368	0.517
3	0.297	6.193	108.400	5.258	0.196
4	0.609	3.811	102.800	3.312	0.764
5	0.053	0.158	97.300	0.062	0.257
6	0.603	4.222	91.700	3.353	0.732
7	0.410	6.465	86.400	5.316	0.478
8	0.374	6.499	80.600	5.263	0.429
9	0.644	3.922	75.400	3.139	0.572
10	0.008	0.121	69.700	0.062	0.064
11	0.629	4.012	63.600	3.269	0.541
12	0.378	6.540	58.800	5.310	0.508
13	0.381	6.445	53.600	5.321	0.328
14	0.602	3.996	47.700	3.272	0.756
15	0.042	0.042	42.600	0.065	0.201
16	0.593	4.008	36.600	3.311	0.717
17	0.412	6.461	31.500	5.318	0.457
18	0.365	6.513	25.500	5.150	0.437
19	0.657	4.132	20.500	3.144	0.615
20	0.002	0.116	14.700	0.075	0.008

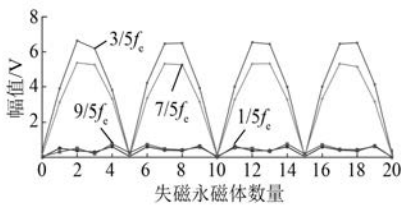


图 10 失磁永磁体数量增大时谐波拟合曲线

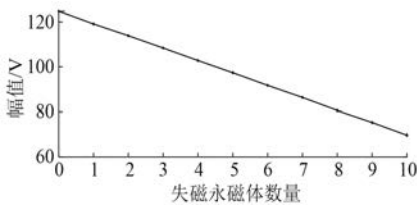


图 11 失磁永磁体数量增大时基波拟合曲线

综上,单相反电动势谐波分析能被有效用于 FSCW-PMSM 的失磁故障诊断。

4 结 语

通过对局部失磁故障下等效气隙磁密开展傅里叶分析,从理论上得到单槽反电动势的特征谐波。结合单槽反电动势的特征谐波和绕组分布系数的推导结论,获得 FSCW-PMSM 局部失磁的单相反电动势的特征谐波理论求解方法。

在不同数量永磁体发生失磁故障时,对电机单相反电动势进行谐波分析,明确了单相反电动势各特征谐波的幅值随失磁永磁体数量增大呈周期性变化。

【参考文献】

- [1] 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.
- [2] 马霁旻,万梓灿,刘光华,等. 电动汽车用混合永磁辅助同步磁阻电机的转子优化设计[J]. 微特电机,2021,49(1): 18.
- [3] 卢伟甫. 自起动永磁同步电机退磁机理及抑制退磁方法研究[D]. 北京:华北电力大学,2013.
- [4] 史进飞,胡余生,陈彬,等. 铁氧体永磁辅助同步磁阻电机抗退磁设计优化[J]. 微特电机,2021,49(5): 21.
- [5] 何静,张昌凡,贾林,等. 一种永磁同步电机的失磁故障重构方法研究[J]. 电机与控制学报,2014,18(2): 8.
- [6] URRESTY J, RIBA J, 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.
- [7] DING S, HANG J, LI H, et al. Demagnetisation fault detection in PMSM using zero sequence current components[J]. Electronics Letters, 2017, 53(3): 148.
- [8] MOON S, JEONG H, LEE H, et al. Detection and classification of demagnetization and interturn short faults of IPMSMs[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(12): 9433.
- [9] ZHU M, YANG B, HU W, et al. Vold-Kalman filtering order tracking based rotor demagnetization detection in PMSM[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2019, 55(6): 5768.
- [10] 张周磊,李垣江,李梦含,等. 基于深度学习的永磁同步电机故障诊断方法[J]. 计算机应用与软件, 2019, 36(10): 123.
- [11] 张志艳,张皓宇,岳廷树,等. 基于模糊神经网络的永磁同步发电机失磁故障程度诊断[J]. 微电机, 2019, 52(11): 27.
- [12] 张昌凡,张森滢,张发明,等. 一种检测永磁同步电机失磁的级联观测器[J]. 电机与控制学报, 2017, 21(2): 45.
- [13] 黄刚,罗意平,张昌凡,等. 基于扩展磁链的永磁同步牵引电机失磁在线监测[J]. 铁道学报, 2016, 38(2): 48.
- [14] 王艾萌,田义. 定子模块化分数槽集中绕组电机性能分析[J]. 微电机, 2020, 53(1): 35.
- [15] 姜仁华,刘闯,宁银行,等. 分数槽集中绕组永磁同步电机设计与分析[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(3): 329.
- [16] 江景成,施振川,林晓刚,等. 基于定子磁障的分数槽集中绕组永磁同步电机应用设计与分析[J]. 电机与控制应用, 2021, 48(7): 68.
- [17] 钟钦,马宏忠,张志艳,等. 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[J]. 高压电器, 2014, 50(9): 35.
- [18] 赵向阳,葛文韬. 基于定子电流法监测无刷直流电动机转子动态偏心的故障模型仿真研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(36): 124.
- [19] 辜承林,陈乔夫,熊永前. 电机学[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2009.
- [20] 许实章. 电机学[M]. 北京:机械工业出版社, 1980.
- [21] 许实章. 交流电机的绕组理论[M]. 北京:机械工业出版社, 1985.