

永磁同步电机稳态短路试验

王迎春, 李祥成, 柴群康, 冯 璐
(中车永济电机有限公司, 山西 永济 044502)

摘 要: 通过对永磁同步电机(PMSM)稳态短路工况中短路电流和短路转矩进行理论分析,得到了PMSM 稳态短路电流和电磁转矩的解析表达式。结合二维有限元法对某型号 180 kW PMSM 短路工况下的短路电流和短路转矩进行仿真分析计算,确定 PMSM 在稳态短路试验时短路电流、短路转矩随电机转速的变化规律。采用 1 台 PMSM 进行三相稳态短路试验验证,记录了短路试验时不同转速下的短路电流和短路转矩。对试验结果与理论分析、仿真分析结果进行对比分析,验证了短路电流、短路转矩随转速的变化规律。

关键词: 永磁同步电机; 稳态短路试验; 短路电流; 短路转矩; 有限元

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2019)04-0082-05

Steady-State Short-Circuit Test of Permanent Magnet Synchronous Motor

WANG Yingchun, LI Xiangcheng, CHAI Qunkang, FENG Lu
(CRRC Yongji Electric Co., Ltd., Yongji 044502, China)

Abstract: Through the theoretical analysis of short-circuit current and short-circuit torque in the steady-state short-circuit condition of permanent magnet synchronous motor (PMSM), the analytical expressions of steady-state short-circuit current and electromagnetic torque of PMSM were obtained. Combined with two-dimensional finite element method, the short-circuit current and short-circuit torque of a 180 kW PMSM under short-circuit condition were simulated and calculated. The variation law of short-circuit current and short-circuit torque versus speed of the PMSM during the steady-state short-circuit test was determined. The three-phase steady-state short-circuit test was carried out for a PMSM. The short-circuit current and short-circuit torque at different speeds were recorded during the short-circuit test. The test results were compared with theoretical analysis and simulation analysis results to verify the variation law of short-circuit current and short-circuit torque versus the speed.

Key words: permanent magnet synchronous motor; steady-state short-circuit test; short-circuit current; short-circuit torque; finite element

0 引 言

永磁同步电机(PMSM)具有结构简单、效率高、弱磁调速性能优良等优点,在牵引电机行业应用广泛^[1]。PMSM 的电气性能稳定性取决于永磁材料。永磁材料在过高温度、冲击电流电枢反应或剧烈的机械振动作用下,都可能发生不可逆退磁,使电机的性能下降,甚至无法使用^[2]。永磁电

机在三相短路时,短路电流产生直轴电枢磁动势对永磁体去磁,在三相突然短路时去磁能力最强。为了避免永磁体在发电机短路过程中发生不可逆退磁,设计中必须进行最大去磁工作点校核计算,应保证此工作点在最高工作温度时回复线的线性段,或者说高于回复线的拐点。研究三相短路特性有助于完善和补充电机在线检测理论,为失磁电机的检测提供依据^[3]。同时,稳态短路是进行

作者简介: 王迎春(1986—),女,工程师,研究方向为电机测试技术。

李祥成(1986—),男,工程师,研究方向为特种电机设计。

柴群康(1969—),男,高级工程师,研究方向为电机测试技术。

永磁电机负载电流试验的重要方法之一。稳态短路电流和短路转矩的理论计算,是试验线路和试验设备选择的前提条件^[4-5]。突然短路电流通常大于稳态短路电流,计算过于复杂,试验具有破坏性,难以检验,且根据经验由暂态过渡到稳态的时间非常短。工程上根据稳态短路特性,再通过经验修正系数修正后评估突然短路特性^[1]。因此稳态短路试验后的短路电流为进行电机突然短路时的失磁能力验证试验提供了必要的理论依据。文献[6-7]通过场路耦合有限元法和研究突然短路时电枢绕组磁链变化的方法给出了不同的短路电流计算方法,但并未分析短路电流随电机转速的变化规律,未对短路转矩进行论证。本文采用正弦波 PMSM dq 轴数学模型对 PMSM 稳态短路电流和稳态短路转矩进行了理论分析,得到 PMSM 稳态短路电流和电磁转矩的解析表达式。结合二维有限元法对某型号永磁电机进行仿真分析,并进行了现场试验检测,验证了 PMSM 稳态短路电流、稳态短路转矩随电机转速的变化规律。

1 短路电流和电磁转矩

dq 轴数学模型是分析正弦波 PMSM 最常用的方法之一,不仅可以分析正弦波 PMSM 稳态运行性能,还可以用来分析 PMSM 瞬态运行性能。根据正弦波 PMSM dq 轴数学模型,稳态电压方程、电磁转矩方程如下^[1]:

$$U_d = R_s i_d - \omega_e L_q i_q \quad (1)$$

$$U_q = R_s i_q + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_m \quad (2)$$

$$T_e = \frac{3}{2} p [\psi_m i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (3)$$

式中: U_d —— d 轴定子电压分量;

R_s ——定子相电阻;

i_d —— d 轴定子电流分量;

ω_e ——电角速度;

L_q —— q 轴电感分量;

i_q —— q 轴定子电流分量;

U_q —— q 轴定子电压分量;

L_d —— d 轴电感分量;

ψ_m ——永磁体磁链;

T_e ——电磁转矩;

p ——极对数。

永磁电机三相稳态短路时, $U_d = 0$, $U_q = 0$, 其

电压方程和稳态电流为

$$0 = R_s i_d - \omega_e L_q i_q \quad (4)$$

$$0 = R_s i_q + \omega_e L_d i_d + \omega_e \psi_m \quad (5)$$

$$I_k = \sqrt{i_d^2 + i_q^2} \quad (6)$$

式中: I_k ——稳态短路电流。

根据式(4)、式(5),可得稳态短路时的 d 、 q 轴电流分量为

$$i_d = -\frac{\omega_e L_q \psi_m}{R_s^2 + \omega_e^2 L_d L_q} \quad (7)$$

$$i_q = -\frac{R_s \omega_e \psi_m}{R_s^2 + \omega_e^2 L_d L_q} \quad (8)$$

将式(7)、式(8)代入式(3)和式(6),可得稳态短路时的电磁转矩和短路电流为

$$T_e = \frac{3p}{2} \cdot \frac{-R_s^3 \omega_e \psi_m - \omega_e^3 L_q^2 R_s \psi_m^2}{(R_s^2 + \omega_e^2 L_d L_q)^2} \quad (9)$$

$$I_k = \frac{\sqrt{\omega_e^4 L_q^2 \psi_m^2 + R_s^2 \omega_e^2 \psi_m^2}}{R_s^2 + \omega_e^2 L_d L_q} \quad (10)$$

电角速度与转速的关系为

$$\omega_e = p \frac{2\pi n}{60} \quad (11)$$

式中: n ——转速。

将式(11)代入式(9),并令 $\frac{dT_e}{dn} = 0$,可得最大扭矩点发生时的转速为

$$n = \frac{60}{2\pi} \frac{R_s}{L_q} \cdot \sqrt{\frac{L_q - 2L_d}{L_d}} \quad (12)$$

由式(9)和式(12)可知,永磁电机三相短路时的电磁转矩是制动转矩,是转速 n 的函数,且发生最大扭矩时的速度点与永磁体磁链无关。转速在 $\left[0, n = \frac{30}{\pi} \frac{R_s}{L_q} \cdot \sqrt{\frac{L_q - 2L_d}{L_d}}\right]$ 区间时,制动电磁转矩随转速增大而增大,在超过最大扭矩点后制动转矩值随转速增大逐渐减小。

对于内置式 PMSM,由于 $L_q > L_d$,由式(10)和式(11)可知, $\frac{dI_k}{dn} > 0$,则函数 I_k 为单调递增函数。短路电流随速度升高迅速增大至最大值并趋于稳定,最大电流值为

$$I_k = \frac{\psi_m}{L_d} \quad (13)$$

永磁电机三相短路时,稳态电流随着转速的增大而增大,增大到最大点后电流趋于稳定。由式(13)可知,最大电流值仅与永磁磁链 ψ_m 和 d 轴电感分量 L_d 有关。

2 工程实例分析

本文研究的某型号 180 kW PMSM 参数如表 1 所示。

表 1 PMSM 参数			
参数名称	参数值	参数名称	参数值
额定功率/kW	180	额定电压/V	1 000
额定电流/A	116	额定转速/(r·min ⁻¹)	2 000
额定频率/Hz	133	极对数	4
定子相电阻/Ω	0.034 8	永磁磁链/Wb	0.93
直轴电感/mH	2.75	交轴电感/mH	6.75

将电机的定子相电阻、永磁磁链、直轴电感、交轴电感值代入式(9)和式(12)可得永磁电机三相短路时的电磁转矩随转速 n 变化的曲线,如图 1 所示。将电机参数代入式(10)和式(12)可得永磁电机三相短路时的短路电流随转速 n 变化的曲线,如图 2 所示。

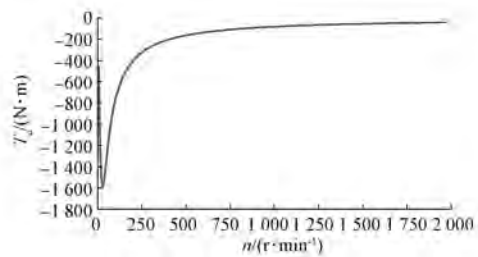


图 1 电磁转矩 T_e 随转速 n 变化的曲线

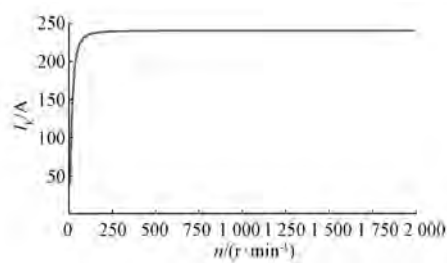


图 2 短路电流 I_k 随转速 n 变化的曲线

由图 1 可知,电磁转矩为制动转矩,转速小于 25 r/min 时,短路电磁转矩随转速增大而增大,转速大于 25 r/min 时,短路电磁转矩随转速增大而

减小。由图 2 可知,稳态短路电流随转速增大而增大,当转速大于 110 r/min 时,稳态短路电流趋于稳定,最大短路电流为 240 A。

3 仿真分析

为了验证上述理论推导的正确性,对上述型号的 180 kW PMSM 进行建模分析。电机的 1/8 模型如图 3 所示。

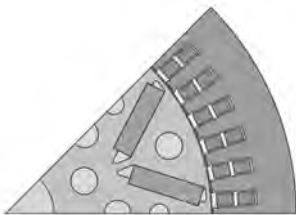


图 3 电机的 1/8 模型图

对电机进行三相稳态短路分析。永磁电机在转速为 65 r/min 时的稳态短路电流如图 4 所示,电磁转矩如图 5 所示。由分析可知,在转速为 65 r/min 稳态短路时电流有效值为 234 A,电磁转矩为制动转矩,电磁转矩平均值为-1 016 N·m。

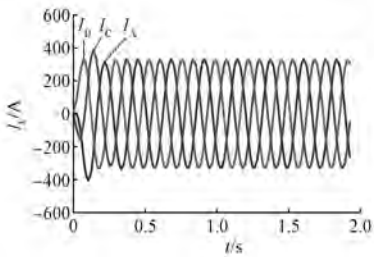


图 4 65 r/min 时的稳态短路电流

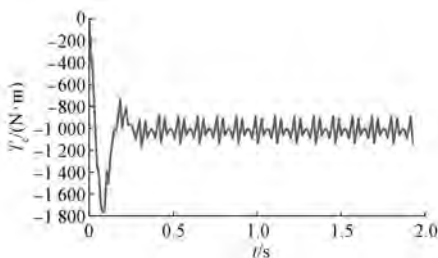


图 5 65 r/min 时的稳态短路电磁转矩

对转速进行参数化扫描分析,可得电机稳态短路电流随转速变化的曲线,如图 6 所示,电磁转矩随转速变化的曲线如图 7 所示。

由图 6 可知,稳态短路电流随转速增大而增

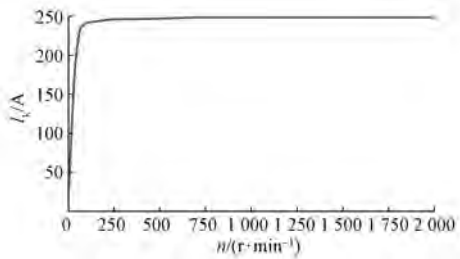


图6 短路电流随转速变化曲线

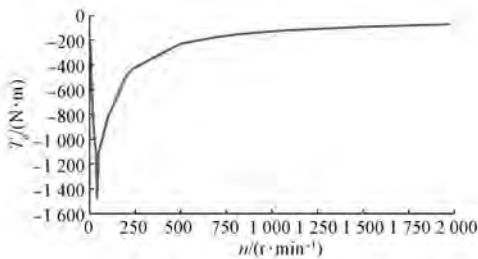


图7 电磁转矩随转速变化曲线

大,转速大于 110 r/min 时,稳态短路电流趋近于稳定,最大短路电流为 248 A。由图 7 可知,电磁转矩为制动转矩,短路制动电磁转矩随转速增大先增大后减小。

4 试验验证

采用上述 PMSM,在电机冷态下,将电机三相引出线短接,采用 WT1600 功率分析仪测量电机三相引线端电参数,采用 NJ3-5000 扭矩仪测量电机的输入扭矩。扭矩仪安装在永磁电机输入端,电机在拖动机的拖动下由静止开始运行,转速不断升高,测得不同转速下 PMSM 的稳态短路电流和电磁转矩。电机转速为 65 r/min 时,稳态电流如图 8 所示,电磁转矩如图 9 所示。



图8 65 r/min 稳态短路电流

冷态下不同转速的稳态短路电流和电磁转矩如表 2 所示。

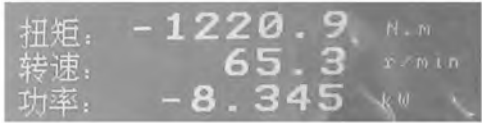


图9 65 r/min 电磁转矩

表 2 冷态下不同转速的稳态短路电流和电磁转矩

转速/(r·min ⁻¹)	电流/A	电磁转矩/(N·m)
10	40	-350
30	75	-1 610
45	105	-1 405
65	120	-1 220
100	180	-998
200	251	-596
323	266	-345
370	268	-292
500	268	-232
800	269	-163
1 000	269	-140
1 500	268	-100
2 015	268	-83

对测量的数据与理论分析和有限元分析 (FEA)的结果进行对比。短路电流对比如图 10 所示,电磁转矩对比如图 11 所示。

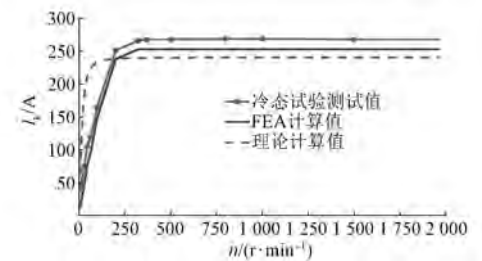


图10 短路电流实测值与 FEA 和理论计算值对比

由图 10 可知,稳态短路电流试验测量值与理论计算值和 FEA 计算值基本吻合;试验测量值比理论计算值偏高,是由于理论计算的永磁磁链、直轴电感分量等参数与电机实际值间存在一定的误差。由图 11 可知电磁转矩试验测量值与理论计算值和 FEA 计算值基本吻合;试验测量值比理论计算值偏高,是由于理论计算时未考虑电机的轴承摩擦转矩、转子风摩擦转矩等因素。

电机完成温升试验后,在热态下重新进行上

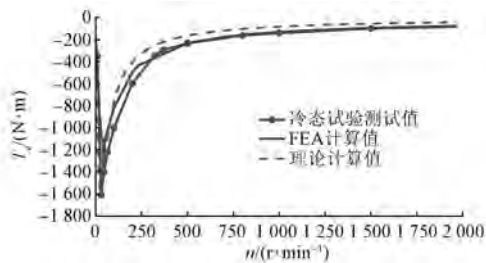


图 11 电磁转矩实测值与理论计算对比

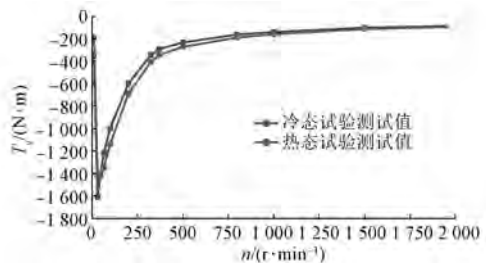


图 13 热态和冷态电磁转矩实测值对比

述短路试验,测得不同转速下的稳态短路电流和制动电磁转矩。试验数据如表 3 所示。

表 3 热态下不同转速的稳态短路电流和电磁转矩		
转速/(r·min ⁻¹)	电流/A	电磁转矩/(N·m)
10	15	-189
30	48	-1 419
45	75	-1 429
65	97	-1 347
100	148	-1 140
200	238	-688
323	253	-405
370	253	-345
500	253	-271
800	253	-188
1 000	253	-160
1 500	253	-113
2 015	253	-93

将电机冷态与热态稳态的短路电流和电磁转矩测量值进行对比。短路电流对比如图 12 所示,电磁转矩对比如图 13 所示。

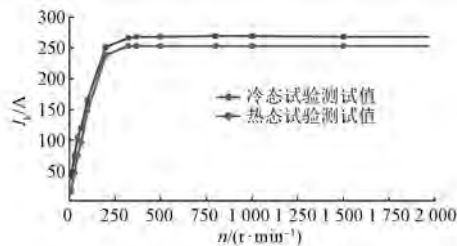


图 12 热态和冷态短路电流实测值对比

由图 12 可知,在同一转速下,热态时实测稳态短路电流值比冷态时小。这是由于热态时永磁体磁链 ψ_m 比冷态时小,定子相电阻 R_s 比冷态时大。由图 13 可知,随着转速升高,在达到最大电

磁转矩前,热态短路电磁转矩值小于冷态值,达到最大电磁转矩后,随着转速升高,热态短路电磁转矩值大于冷态值。最大短路转矩点发生时的转速比冷态时大,是由定子相电阻 R_s 比冷态时大而引起的。

5 结 语

对 PMSM 稳态短路电流和电磁转矩进行理论分析,得到 PMSM 稳态短路电流和电磁转矩的解析表达式。对 180 kW PMSM 的稳态短路电流和电磁转矩进行有限元仿真分析,然后对 PMSM 进行三相稳态短路试验,测量不同转速下的稳态短路电流和电磁转矩。最后对测量值、理论计算值和 FEA 计算值进行对比分析。稳态短路电流和电磁转矩试验测量值与理论计算值、FEA 计算值基本吻合,验证了理论分析的正确性。通过理论分析和试验测试结果可知,永磁电机三相稳态短路时,稳态短路电流随转速增大而增大,增大到最大点后电流趋于稳定,最大电流值仅与永磁磁链 ψ_m 和 d 轴电感分量 L_d 有关。永磁电机短路电磁转矩是制动转矩,是转速 n 的函数,且发生最大转矩时的速度点与永磁体磁链无关。转速在 $\left[0, n = \frac{30 R_s}{\pi L_q} \cdot \sqrt{\frac{L_q - 2L_d}{L_d}}\right]$ 区间时,制动电磁转矩随转速增大而增大,超过最大电磁转矩点后电磁转矩随转速增大逐渐减小。本文的研究对于电机设计以及工程应用中稳态短路电流和电磁转矩的计算具有一定的参考意义。

【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.

(下转第 114 页)

波成分,避免故障边频受到强大基频的影响。

(2) 结合旋转滤波和矩阵束可以对 0.3 s 短数据进行信号分析,识别转子断条故障特征频率和幅值,解决了 FFT 算法对短时数据分辨率偏低的缺点。

(3) 仿真算例和试验均表明,本文所提旋转滤波-矩阵束算法在短时数据时仍具有高分辨率能力,可有效识别异步电机转子断条故障。其采集数据时间短,有利于故障的在线监测。

【参考文献】

- [1] 许伯强,朱明飞.基于 ESPRIT 和扩展 Prony 算法的异步电机转子断条故障检测方法[J].电机与控制应用,2016,43(5): 59.
- [2] 方芳,杨士元,侯新国.基于改进多信号分类法的异步电机转子故障特征分量的提取[J].中国电机工程学报,2007,27(30): 72.
- [3] 向玲,朱永利,唐贵基.HHT 方法在转子振动故障诊断中的应用[J].中国电机工程学报,2007,27(35): 84.
- [4] 牛发亮,黄进,杨家强.基于电磁转矩小波变换的感应电机转子断条故障诊断[J].中国电机工程学报,2005,25(24): 122.
- [5] 贾朱植,杨理践,祝洪宇,等.基于瞬时频率分析的笼型电机转子断条故障诊断[J].电机与控制应用,2017,44(8): 74.
- [6] 刘振兴,尹项根,张哲,等.基于瞬时功率信号频谱分析的鼠笼式异步电动机转子故障在线诊断方法[J].中国电机工程学报,2003,23(10): 148.
- [7] 刘振兴,尹项根,张哲.基于 Hilbert 模量频谱分析的异步电动机转子故障在线监测与诊断方法[J].中国电机工程学报,2003,23(7): 158.
- [8] KIM B, LEE K, YANG J, et al. Automated detection of rotor faults for inverter-fed induction machines under standstill conditions [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2011, 47(1): 55.
- [9] 梁霖,徐光华,刘弹,等.小波-奇异值分解在异步电机转子故障特征提取中的应用[J].中国电机工程学报,2005,25(19): 111.
- [10] 刘振兴,尉宇,赵敏,等.基于 RELAX 频谱分析方法的鼠笼式异步电动机转子故障诊断[J].中国电机工程学报,2006,26(22): 146.
- [11] 史丽萍,王攀攀,胡泳军,等.基于骨干微粒群算法和支持向量机的电机转子断条故障诊断[J].电工技术学报,2014,29(1): 147.
- [12] 李宽,李兴源,赵睿.基于改进矩阵束的高压直流次同步振荡检测[J].电网技术,2012,36(4): 128.
- [13] 党杰,李勇,徐友平,等.基于 WAMS 和奇异熵矩阵束方法的电网低频振荡仿真分析[J].电力系统自动化,2010,34(15): 14.

收稿日期: 2018-10-11

(上接第 86 页)

- [2] 暴杰,赵慧超,董秀辉,等.电动车用永磁同步电机的三相短路稳态分析与应用[J].微特电机,2014,42(3): 17.
- [3] 况金园,殷强.永磁同步电机稳态短路电流的形成及试验方法[J].现代制造技术与装备,2016(2): 72.
- [4] 国家铁路局.电力牵引 轨道机车车辆和公路车辆用旋转电机: 第 4 部分 与电子变流器相连的永磁同步电机: GB/T 25123.4—2015[S].北京: 中国标准出版社,2016.
- [5] 蒋文选.永磁同步电机的电枢反应电抗和同步电抗[J].贵州科学,1998(1): 52.
- [6] 杨松,石婷婷.永磁电机短路计算研究[J].船电技术,2011,31(11): 19.
- [7] 王北社,田德见.永磁同步发电机三相突然短路过渡过程的分析与探讨[J].东方电机,2013,41(1): 36.

收稿日期: 2018-11-04