

线间补偿型匝间短路故障自动容错永磁同步电机故障位置检测方法^{*}

景少勇, 王旭平, 白崧儒, 李 渊

(太原理工大学 电气与动力工程学院, 山西 太原 030024)

摘 要: 定子绕组匝间短路故障是永磁同步电机(PMSM)最常见的故障之一。该故障会造成三相电流不平衡, 输出转矩剧烈波动, 输出能力下降。故障严重时, 过大的短路电流会烧毁绕组。为了解决匝间短路故障产生的问题, 课题组此前提出了一种具有匝间短路故障自动容错能力的 PMSM。针对该特种电机, 提出了一种匝间短路故障位置的检测方法。介绍了电机的特殊结构, 并通过数学模型推导出利用电机漏磁路特性和原有定子线圈判别故障线圈所在相的方法。使用 ANSYS 软件建立电机有限元模型, 对电机不同匝间短路情况进行仿真, 验证了该检测方法的正确性。

关键词: 永磁同步电机; 匝间短路故障; 短路电流抑制; 故障位置检测

中图分类号: TM 351 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2020)12-0087-05

doi: 10.12177/emca.2020.161

Fault Location Detection Method for Inter-Line Compensation Permanent Magnet Synchronous Motor with Automatic Inter-Turn Short Circuit Fault Tolerance^{*}

JING Shaoyong, WANG Xuping, BAI Yinru, LI Yuan

(College of Electrical and Power Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

Abstract: The stator winding inter-turn short circuit fault is one of the most common faults of permanent magnet synchronous motor (PMSM). This fault will cause unbalanced three-phase currents, leading to violent fluctuation of output torque and decreasing the output capacity. When the fault is serious, excessive short-circuit current will burn the winding. In order to solve the above problems caused by inter-turn short circuit faults, a PMSM with automatic inter-turn short circuit fault tolerance has been proposed. A detection method for inter-turn short circuit fault location is proposed for this special motor. The special structure of the motor is introduced, and then the method of judging the phase of the fault coil by the characteristics of the magnetic leakage circuit and the original stator coil is deduced through the mathematical model. Finally, the finite element model of the motor is established by ANSYS software, and the simulation of different inter-turn short circuit cases of the motor verifies the correctness of the detection method.

Key words: permanent magnet synchronous motor (PMSM); inter-turn short circuit fault; short circuit current suppression; fault location detection

收稿日期: 2020-09-16; 收到修改稿日期: 2020-10-16

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目(51477110); 中国博士后科学基金项目(2018M640250); 山西省应用基础研究项目面上青年基金项目(201701D221145)

作者简介: 景少勇(1996—), 男, 硕士研究生, 研究方向为特种电机理论与控制技术。

王旭平(1976—), 女, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为特种电机理论与控制技术。

白崧儒(1983—), 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为特种电机理论与控制技术。

0 引言

匝间短路故障会使电机输出电流不平衡,输出转矩剧烈波动,输出容量下降,严重时甚至烧毁绕组^[1]。目前,关于永磁同步电机(PMSM)匝间短路电流抑制的研究成果很多,但均是设计很大的绕组电感来抑制电流,抑制效果不显著。因此,本课题组此前提出了一种具有匝间短路故障自动容错能力的PMSM。该特种电机利用线间补偿结构可以有效抑制短路电流,使各相电流平衡,进而稳定输出转矩,实现电机的不降容输出^[2]。同时,该电机能够在大多数匝间短路情况下实现自动容错。少匝短路时,需要在线检测故障发生的位置,进而采取控制策略针对性的抑制故障线圈短路电流。为此,本文针对该特种电机提出了一种匝间短路故障位置检测方法。

针对容错电机匝间短路故障在线检测,学者们做了很多的研究。主要包括对检测得到的定子电压、电流构建状态观测器的方法^[3],基于频域分析定子电流特征的方法^[4],检测磁密的方法^[5]。文献[4]提出了通过分析 q 轴电流二次谐波分量来检测匝间短路故障的方法。文献[6]利用安装在绕组端部的高精度罗戈夫斯基线圈监测电机漏磁,从而检测匝间短路故障。文献[7]利用一种新型探测线圈,通过检测附加电动势来探测匝间短路故障。虽然学者们对同步电机匝间短路故障检测做了较多的研究,但无论是添加检测设备还是对电机信号进行算法处理,均涉及所有线圈的检测,导致检测设备增多和算法的复杂程度增加。

针对以上问题,设计了一种适用于该电机的基于漏磁路的磁信号检测方法,能够先行检测出故障线圈所在相。通过PMSM数学模型理论推导了检测故障线圈发生在哪一相的方法,使用ANSYS软件对不同短路情况仿真,并对试验结果进行了分析讨论。

1 电机模型及容错理论

图1为具有匝间短路故障容错能力的背绕式PMSM样机实物图。该电机为6极27槽结构,定子内外侧同时开槽,定子绕组背绕式缠绕,所有线圈绕向相同。三相绕组每相包含9个线圈串联连

接。短路匝数比 λ 为0表示无短路,为1/9表示一个线圈整体短路。

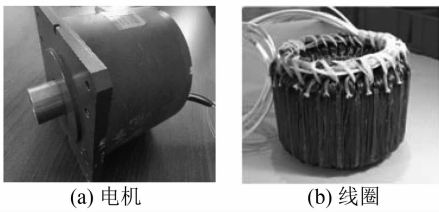


图1 三相电机样机实物图

电机主要设计参数如表1所示。

表1 电机主要设计参数

参数名称	参数值
额定输出功率/kW	1
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 000
额定电压/V	55
定子内径/mm	67
定子铁心轴向长度/mm	80
每相绕组串联匝数	153
定子铁轭高度/mm	20

图2为具有匝间短路故障容错能力的背绕式PMSM有限元仿真模型。

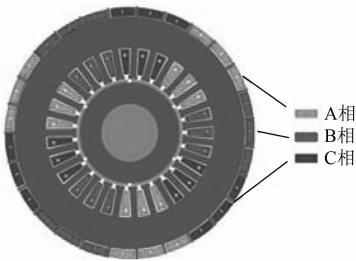


图2 三相电机有限元仿真模型

电机匝间短路故障容错原理:电机正常运行时,三相绕组在并联漏磁路(定子绕组环绕的圆形磁路)中产生的磁通和为零,能够像普通永磁电机一样利用主磁通工作。当匝间短路故障发生时,短路线圈上的电流包含2部分:绕组相电流和短路环流。对于普通电机,短路环流很大,通常为额定电流的20倍以上,该电机并联漏磁路的磁导远远大于通过气隙的磁导,能够有效地抑制短路电流。图3所示为只有A相通电时,定子并联漏磁路的环形磁通(为了简明,未画出主磁通),该磁通完全匝链B相和C相。

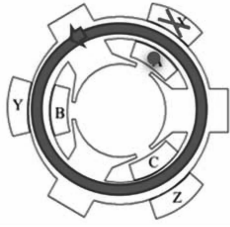


图3 并联漏磁路的磁通示意图

2 故障位置检测方法理论分析

短路故障发生时,绕组连接如图4所示。以a1线圈为例, λ 为短路匝数比,即a1线圈的短路匝数与A相所有线圈匝数之比。

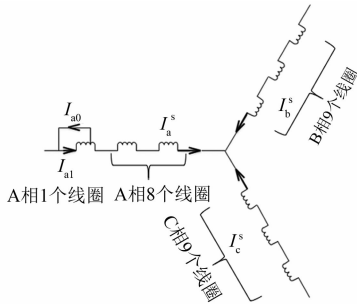


图4 绕组连接示意图

根据图4推导出a1线圈发生匝间短路故障时的稳态短路电压方程为

$$\begin{aligned} & \lambda E_a + (j\omega\lambda^2 L + \lambda r)I_{a1} + \\ & j\omega\lambda(1-\lambda)LI_a^s + j\omega\lambda M(I_b^s + I_c^s) = \\ & E_a + [j\omega(L-M) + r]I_a^s + (j\omega\lambda L + r)I_{a0} = 0 \end{aligned} \quad (1)$$

式中: E_a 为A相的空载反电动势; L 、 M 分别为定子绕组的自感和互感; r 为每相绕组内阻; I_{a1} 为短路故障后短路线圈中的电流; I_a^s 、 I_b^s 、 I_c^s 为短路故障后A、B、C三相的相电流; I_{a0} 为短路故障后短路线圈中产生的附加电流。

由于环形漏磁路磁导远大于通过气隙磁导,因此 L 、 M 可以看作是仅通过漏磁路的电感。由于该漏磁路完全匝链ABC三相,因此 $L \approx M$ 。

由此推导出短路电流:

$$I_{a0} = -\frac{E_a + rI_a^s}{r + j\omega\lambda L} \quad (2)$$

大电感 L 能够有效抑制短路电流。

设相电流在短路发生后产生如下变化,即:

$$\begin{cases} I_a^s = I_a + \Delta_{x1} \\ I_b^s = I_b + \Delta_{x2} \\ I_c^s = I_c + \Delta_{x3} \end{cases} \quad (3)$$

式中: Δ_x 表示电流变化量。

根据KCL定律,有:

$$\begin{cases} I_a^s + I_b^s + I_c^s = 0 \\ I_a + I_b + I_c = 0 \end{cases} \quad (4)$$

$$\Delta_{x1} + \Delta_{x2} + \Delta_{x3} = 0 \quad (5)$$

由于电机端电压不变,可知:

$$U_b^s - U_c^s = U_b - U_c \quad (6)$$

$$U_a^s - U_b^s = U_a - U_b \quad (7)$$

式中: U_a^s 、 U_b^s 、 U_c^s 为短路故障后A、B、C三相的端电压。

联立式(1)~式(7),求解可得:

$$\begin{cases} \Delta_{x1} = -\frac{2\lambda I_{a0}}{3} \\ \Delta_{x2} = \Delta_{x3} = \frac{\lambda I_{a0}}{3} \end{cases} \quad (8)$$

由式(2)可知该电机短路故障发生后,短路附加电流比传统电机大大减小。式(8)中 λ 最大取值为1/9,由此可知短路附加电流对相电流影响很小,可以忽略。在考虑电机漏磁路的磁通时分成2部分:(1)三相相电流产生的合成为零的磁通;(2)短路线圈附加电流产生的磁通。

短路故障发生后,定子并联漏磁路中会产生一个附加磁通,根据这一磁信号的特征,能够在检测出短路故障发生在哪一相绕组。以a1线圈发生故障为例,短路电流在漏磁路中产生的磁动势如下:

$$F_a = \lambda \cdot N \cdot I_{a0} \approx -\lambda N \frac{E_a}{j\omega\lambda L} \quad (9)$$

式中: F_a 为a1线圈短路后在漏磁路中产生的磁动势; N 为每个线圈总匝数。

根据表达式可知,漏磁路中的磁动势与线圈的短路匝数无关。该磁动势产生的磁通完全匝链A、B、C三相:

$$\Phi_a = \Phi_b = \Phi_c = \frac{F_{a1}}{R_m} = -\frac{NE_a}{j\omega LR_m} \quad (10)$$

式中: Φ_a 、 Φ_b 、 Φ_c 为匝链A、B、C三相绕组的磁通。

该磁通会在每相绕组中产生附加感应电动势。该电动势计算如下:

$$\begin{cases} E_{a,a1} = -\frac{(1-\lambda)N^2E_a}{LR_m} \\ E_{b,a1} = E_{c,a1} = -\frac{N^2E_a}{LR_m} \end{cases} \quad (11)$$

式中： $E_{a,a1}$ 、 $E_{b,a1}$ 、 $E_{c,a1}$ 为附加磁通在 A、B、C 三相绕组中产生的感应电动势。

A 相表达式中,短路匝数比 λ 的取值范围为 0~0.111,对感应电动势的幅值影响较小,因此 $E_{a,a1}$ 近似等于 $E_{b,a1}$ 和 $E_{c,a1}$ 。附加电动势的相位取决于 E_a 的相位,每相绕组上的电动势相同,在星型连结方式下相互抵消。同理,其他两相发生短路故障同样会在三相绕组中产生各自相位的感应电动势。因此只用检测 A 相绕组的附加感应电动势,就可以判别故障发生于哪一相。A、B、C 三相分别发生匝间短路对 A 相产生的附加感应电动势如下:

$$\begin{cases} E_{a,a} \approx -\frac{N^2E_a}{LR_m} \\ E_{a,b} = -\frac{N^2E_b}{LR_m} \\ E_{a,c} = -\frac{N^2E_c}{LR_m} \end{cases} \quad (12)$$

式中： $E_{a,a}$ 、 $E_{a,b}$ 、 $E_{a,c}$ 为附加磁通在 A 相绕组中产生的感应电动势。

将式(12)的感应电动势相位与 A 相电源电压相位比较。当故障在 A 相绕组时, $E_{a,a}$ 与 E_a 相差 180° , E_a 与 U_a^s 同相,因此 $E_{a,a}$ 与 U_a^s 相差 180° 。同理,故障发生在 B、C 相时, $E_{a,b}$ 、 $E_{a,c}$ 分别比 U_a^s 相位超前 60° 和滞后 60° 。

检测故障时,采集 A 相绕组两端相电压,该相电压由 2 部分组成:供电电源在 A 绕组上产生的电压 U_a^s ;短路故障产生的附加电动势 $E_{a,x}$ (x 为 a、b、c 其中一项)。因此,检测相位时要分离出附加电动势部分 $E_{a,x}$ 。

故障发生后,定子绕组接电源电压,因此线电压保持不变,但相电压发生改变,由上述 2 部分组成。为了从相电压中提取出单独的附加电动势波形,必须先通过还原中性点测量出 U_a^s 。因为线电压不变,所以可以通过对电机并联星型连接的外电阻,如图 5 所示,测量 A 绕组端口到外电阻中性点之间的电压,该电压即 U_a^s 。再用测量的 A 绕

组相电压减去该 U_a^s 就得到单独的故障产生的附加电动势。最后将附加电动势相位与该 U_a^s 相位比较,即可判断出故障发生在哪一相。

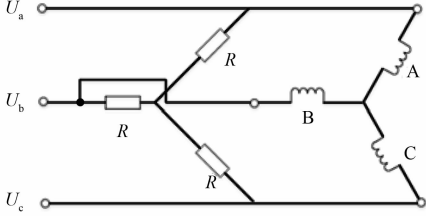


图 5 电机绕组并联星接外电阻

3 故障位置检测方法仿真分析

为了验证理论,在电机运行稳定时,分别对 a1 线圈发生 1 匝、4 匝短路故障;b1、c1 线圈发生 4 匝短路故障进行了仿真试验。电机仿真模型参数如表 2 所示。

表 2 电机仿真模型参数

参数名称	参数值
定子相绕组主自感/mH	1.33
定子线圈漏自感/mH	19.35
定子线圈漏互感/mH	19.35
定子相绕组电阻/ Ω	0.124
额定电压/V	55
额定频率/Hz	50
额定转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 000

表 2 中,主自感为通过气隙的主磁通对应电感分量;漏自感、漏互感为通过环形漏磁路的漏磁通对应电感分量。

试验结果如图 6~图 11 所示。图 6 为 a1 线圈 1 匝短路时测量得到的 A 绕组相电压。图 7 为 a1 线圈 1 匝短路时测量的电压 U_a^s 。图 6 波形减去图 7 波形后再进行数字滤波,并与数字滤波后

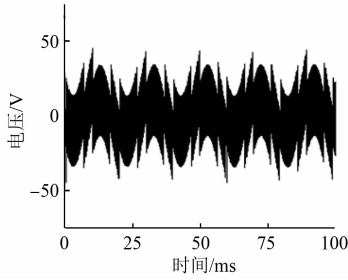


图 6 a1 线圈 1 匝短路故障时 A 相电压

的 U_a^s 相比较得到的波形如图 8 所示。图 8 中, A 相附加电动势 $E_{a,a}$ 与 A 相外电阻电压 U_a^s 波形时间相差 10 ms, 对应相位差 180° , 与理论推导结果相一致。图 9 为 a1 线圈 4 匝短路时的 $E_{a,a}$ 和 U_a^s 波形对比, 两者时间差 10 ms, 对应相位差 180° , 与图 8 结果相同, 说明该方法适用于不同短路匝数, 验证了位置检测方法适用于任意匝短路情况。图 10 和图 11 分别为 B 相、C 相发生 4 匝短路故障时的 $E_{a,b}$ 和 U_a^s 、 $E_{a,c}$ 和 U_a^s 波形对比。 $E_{a,b}$ 时间超前 U_a^s 3.3 ms, 对应相位为超前 60° ; $E_{a,c}$ 时间滞后 U_a^s 3.3 ms, 对应相位为滞后 60° 。该结果与理论分析结果相一致, 说明该方法能有效检测出短路故障发生在哪一相。

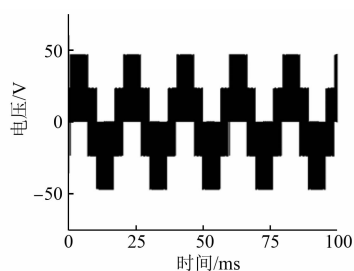
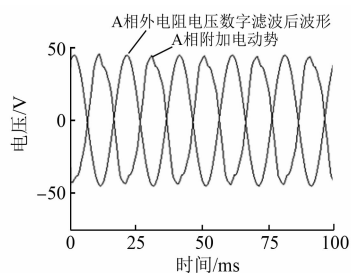
图 7 A 相并联外电阻电压 U_a^s 波形

图 8 a1 线圈 1 匝短路故障波形对比

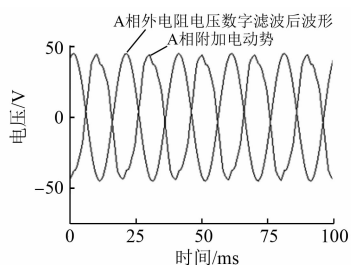


图 9 a1 线圈 4 匝短路故障波形对比

4 结 语

本文针对课题组之前提出的具有匝间短路故障自动容错能力的 PMSM, 提出了一种匝间短路

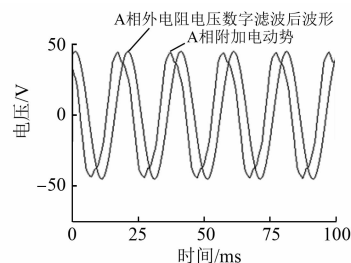


图 10 b1 线圈 4 匝短路故障波形对比

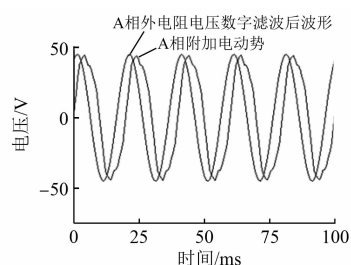


图 11 c1 线圈 4 匝短路故障波形对比

故障位置的检测方法。通过理论推导出电机故障发生后, A 相绕组中产生的附加感应电动势相位随故障相的不同而改变, 判别故障发生在哪一相绕组的方法。采用有限元仿真对不同匝数、相绕组短路情况进行仿真。仿真结果表明, 该检测方法能够只用检测 A 相绕组的相电压变化就可以判断出故障发生在三相绕组中的哪一相。

【参考文献】

- [1] HAYLOCK J A, MECROW B C, JACK A G, et al. Operation of fault tolerant machines with winding failures[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 1999, 14(4): 1490.
- [2] BAI Y, WANG S, ZHANG A, et al. A novel concept of permanent magnet synchronous generators with automatic turn-to-turn short-circuit fault-tolerance capability[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(1): 98.
- [3] DE ANGELO C H, BOSSIO G R, GIACCONE S J, et al. Online model-based stator-fault detection and identification in induction motor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009, 56(11): 4671.
- [4] KIM K H. Simple online fault detecting scheme for short-circuited turn in a PMSM through current harmonic monitoring[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(6): 2565.

(下转第 104 页)

的转子车间优化也可以使用,在考虑不改变原铸铝套轴区域,改变其他机床的顺序使按照工艺流程顺序而布置,按照这种布置方法,可以减少转子的搬运时间和距离,避免转子的重复交叉运输,提高了转子的生产效率和产能。同样,对于电动机零部件其他车间的布置也有很强的适应性。

电机制造企业通过将工序分析法和这种转子车间布置方法相结合,可以为企业解决复杂转子车间流程化问题时提供运营更稳定、信息传递更快、库存更低、效率更快的优化方案。

【参考文献】

[1] 王昀睿. 基于 IE 的微型电动机装配生产现场改善

[J]. 现代制造工程, 2015(9): 38.

[2] 张学龙. 基于工序分析方法的企业生产流程优化研究[J]. 工业工程与管理, 2012, 17(1): 40.

[3] 朱耀祥, 朱立强. 设施规划与物流[M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[4] 陆云, 邱胜海, 王志亮, 等. 某轴承制造企业设施规划及仿真[J]. 中国制造业信息化, 2011, 40(23): 27.

[5] MEYERS F E, STEPHENS M P. 制造设施设计和物料搬运[M]. 2 版. 蔡临宁, 译. 北京: 清华大学出版社, 2002.

[6] 陈勇, 汤科峰, 林飞龙, 等. 企业 CD 段流水线的瓶颈分析与平衡改善[J]. 工业工程与管理, 2008(1): 112.

(上接第 42 页)

[12] 张冷, 于霜, 丁力. 永磁同步电机的神经网络左右逆协同解耦控制[J]. 控制工程, 2016, 23(10): 1482.

[13] 王新英, 何亚屏, 余栋, 等. 一种新型 PMSM 矢量控制系统速度辨识方案[J]. 控制工程, 2016, 23(6): 884.

[14] 孙明江, 王兴松. 机器人永磁同步电机控制器的控制策略设计[J]. 控制工程, 2014, 21(4): 596.

[15] 赵峰, 罗雯, 高峰阳, 等. 考虑滑模抖振和扰动补偿的永磁同步电机改进滑模控制[J]. 西安交通大学学报, 2020, 54(6): 28.

[16] 张晓光, 赵克, 孙力, 等. 永磁同步电动机滑模变结构调速系统新型趋近率控制[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(24): 77.

[17] 兰志勇, 王波, 王琳, 等. 基于滑模观测器的永磁同步电机无传感器控制[J]. 微电机, 2018, 51(9):

32.

[18] 苗敬利, 周重霞, 郑大伟. 永磁同步电机调速系统变指数趋近律控制[J]. 电气传动, 2019, 49(11): 18.

[19] 王要强, 冯玉涛, 秦明, 等. 表贴式永磁同步电机全阶滑模观测与控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(24): 5688.

[20] 刘京, 李洪文, 邓永停. 基于新型趋近律和扰动观测器的永磁同步电机滑模控制[J]. 工程科学学报, 2017, 39(6): 933.

[21] 李永恒, 刘陵顺, 闫红广. 基于积分滑模控制的对称六相永磁同步电机调速系统研究[J]. 电机与控制应用, 2018, 45(12): 1.

[22] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.

(上接第 91 页)

[5] ROMARY R, JELASSI S, BRUDNY J F. Stator inter laminar fault detection using an external flux density sensor[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(1): 237.

[6] GHANBARI T, FARJAH A. A magnetic leakage flux-based approach for fault diagnosis in electrical

machines[J]. IEEE Sensors Journal, 2014, 14(9): 2981.

[7] 孙宇光, 余锡文, 魏锟, 等. 发电机绕组匝间故障检测的新型探测线圈[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 917.