

双馈风力发电机定子绕组匝间短路诊断与实验研究

魏书荣¹, 符杨¹, 马宏忠²

(1. 上海电力学院电力与自动化工程学院, 上海 200090; 2. 河海大学电气工程学院, 江苏 南京 210098)

摘要: 当双馈风力发电机定子绕组发生轻微匝间短路时, 三相定子电流的时域波形变化比较微小, 而三相电流 Park' 矢量轨迹随着故障变化明显。对双馈电机采用多回路理论进行仿真, 并进行动模实验测试, 得出了正常及匝间故障情况下的 Park' 矢量轨迹, 通过对 Park' 矢量轨迹的形状和椭圆环的宽度比较来确定是否短路并估计匝间短路的严重程度。

关键词: 双馈电机; 定子绕组; 匝间短路; Park' 矢量轨迹; 实验研究

Stator winding inter-turn short-circuit diagnosis and experimental research on doubly-fed wind generator

WEI Shu-rong¹, FU Yang¹, MA Hong-zhong²

(1. School of Electric Power and Automation Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;
2. School of Electric Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: When occurrence of doubly-fed wind generator stator winding slight inter-turn short circuit, the three-phase stator current changes very little, but the Park' vector figure of three-phase stator current has obvious changes in fault. The paper simulates doubly-fed machine based on multi-loop theory and makes test mode of action to draw the Park' vector figure between normal and inter-turn short circuit conditions. Through the shape and the width of comparison of the Park' vector track, this paper determines whether it has inter-turn short circuit or not and estimates the severity of short-circuit.

Key words: doubly-fed machine; stator-winding; inter-turn short circuit; Park' vector track; experimental research

中图分类号: TM711 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)11-0025-04

0 引言

现阶段对风力发电系统的故障的研究, 国内外的很多专家都集中在对风力发电机传动系统、液压系统或者齿轮箱的故障诊断上。利用监测齿轮箱的振动信号对增速齿轮箱的故障情况进行检测和诊断的技术已经发展的较为成熟^[1]。双馈电机作为风力发电系统的核心设备, 由于风速的频繁变化和机组运行环境的恶劣, 发电机的故障将会随着机组运行时间的增长而增加^[2]。因此, 对双馈型异步发电机的故障特征进行研究, 掌握它的故障机理和故障特性, 将会为双馈风力发电机内部故障诊断提供良好的理论基础。

目前国内外不少学者对双馈风力发电机内部故障的诊断方法已开展了一定的研究工作。由于双馈型交流励磁风力发电机的转子侧功率流动可以是双向的, 因此它具有与一般的异步发电机和同步发电

机不同的特点。一般异步发电机在转子转速低于同步转速时处于电动状态, 当转子转速高于同步转速时处于发电状态。所以在故障诊断方法上也与两种运行状态下的诊断方法类似。其中定子的故障诊断方法和鼠笼型异步电动机的定子故障诊断有相类似的地方。而对转子上的故障的诊断方法, 由于双馈型异步发电机的转子为绕线式转子, 在结构上和同步发电机有相同之处, 因此可以使用同步电机转子故障诊断的方法进行相类似的诊断。

当双馈风力发电机发生定子绕组匝间短路时, 如果故障比较轻微, 三相定子电流的变化非常微小, 此时仅从时域波形无法识别出是否存在定子匝间短路故障。本文采用多回路理论进行仿真, 结合动模实验测试, 利用 Park' 矢量法^[3-4]的椭圆环轨迹的形状和环的宽度比较来确定是否短路并估计匝间短路的严重程度。

1 Park' 矢量法

派克变换是分析电机数学模型常用的一种变换方法, 它是根据磁势相等的原理, 将三相轴系(abc

基金项目: 上海市科技攻关计划项目资助(08dz1200600), 上海市教育委员会重点学科建设项目资助(J51301)

轴系)变换为二相轴系(dq轴系)分析电机的一种数学方法,其变换原理如图1所示。

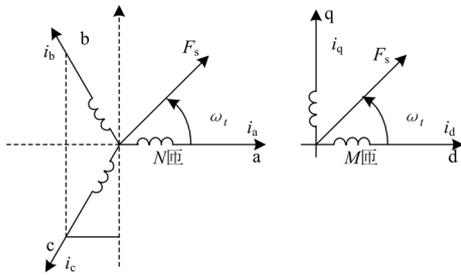


图1 轴系变换图

Fig.1 Shaft convert graphs

在(abc)轴系和(dq)轴系中,绕组匝数分别为 N 与 M ,两轴系绕组分别通以正弦交流电(角频率为 ω),产生的合成磁势为 F_s ,两坐标系都以 ω 进行旋转,按两者任何时刻合成磁势相等的原则,假定 d 轴与 a 轴重合,则有如下 Park' 矢量变换方程成立^[5-6]:

$$\begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

根据上述 Park' 变换原理,在电机故障检测与诊断中,将电机定子三相电流 i_a, i_b, i_c 从(abc)坐标下转换成(dq)坐标下的电流 i_d, i_q , 即由 Park' 变换公式可得:

$$\begin{cases} i_d = \sqrt{\frac{3}{2}} i_a - \frac{1}{\sqrt{6}} i_b - \frac{1}{\sqrt{6}} i_c \\ i_q = \frac{1}{\sqrt{2}} i_b - \frac{1}{\sqrt{2}} i_c \end{cases} \quad (2)$$

其中: i_a, i_b, i_c 分别为电机定子三相电流。对于理想情况下的电机,忽略制造过程中的不可避免的结构不对称,外加三相对称电压的情况下,定子三相基波电流中将只有基波电流成分且按正弦规律变化,假设:

$$\begin{cases} i_a = i_m \cos(\omega_1 t) \\ i_b = i_m \cos(\omega_1 t - \frac{2\pi}{3}) \\ i_c = i_m \cos(\omega_1 t + \frac{2\pi}{3}) \end{cases}$$

将三相定子电流转换到定子正交坐标系(d, q)中,则(2)可简化为如下形式:

$$\begin{cases} i_d = \sqrt{3/2} i_m \cos(\omega_1 t) \\ i_q = \sqrt{3/2} i_m \sin(\omega_1 t) \end{cases} \quad (3)$$

式中: I_m 为基波电流的幅值(A); ω_1 为供电频率(rad/s);

从式(3)可得到:理想情况下,正常电机的 Park' 矢量轨迹为一以原点为中心的圆。当电机发生故障时,则电流信号的相应关系发生变化,不再对称,从而导致矢量发生变化,会偏离圆环轨迹,变成椭圆环。长短轴的长度和偏转方向的变化,与电机故障类型和程度有一定联系。采用 Park' 矢量变换方法,避免了复杂的谱分析技术,通过对 Park' 矢量图的对比及分析,使电机故障一目了然,为进一步采取相应诊断措施提供了条件。

2 定子绕组内部故障仿真

采用多回路理论^[7-11]仿真双馈电机正常及故障后的运行状态。由于双馈电机运行的特殊性,仿真过程中做了一些简化和近似,并且在研究过程中都是把变频器作为一个整体进行考虑的,没有考虑变频器内部的情况。图2分别为仿真的正常及定子绕组第一个线圈匝间短路情况下电机的 Park' 矢量轨迹图。根据仿真结果首先得到三相电流,再根据 park 变换公式得到 i_d, i_q , 对 i_d, i_q 采用二维坐标画图即可得到 Park' 矢量轨迹图。

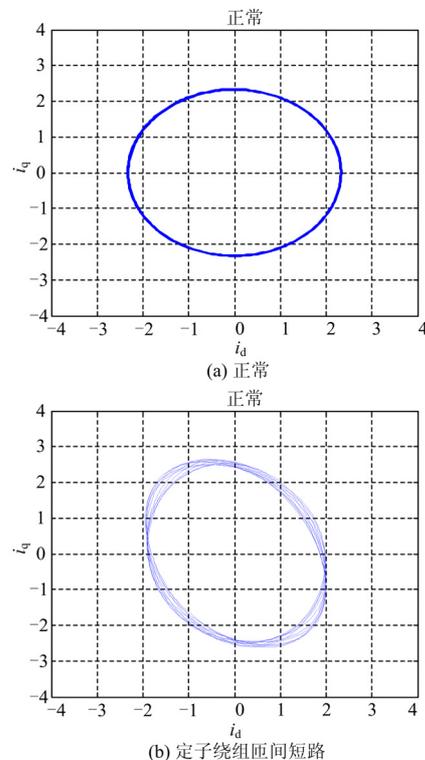


图2 双馈电机的 Park' 矢量轨迹

Fig.2 Park' vector figure of doubly-fed machine

3 实验测试与研究

在动模实验室搭建双馈风力发电机定子内部故障实验装置, 风力机由直流电动机模拟, 通过调节直流电源控制直流电动机转速; 通过连轴器连接直流电动机和双馈风力发电机。双馈风力发电机的定子出线端分别与可调节负载和 DF1024 录波仪连接。通过 DF1024 连接 PC 机记录、分析处理故障信号。

这里的双馈电机为异步绕线式电动机, 所谓“双馈”, 就是指把绕线转子异步电机的定子绕组与交流电网连接, 转子绕组与变频器相连以实现对风力发电系统的变速恒频控制。这里异步绕线式电动机的主要参数如下: 额定功率: 5.5 kW, 额定转速: 1 399 r/min, 频率: 50 Hz, 额定电压: 380 V, 额定电流: 11.6 A, 转子电压: 249 V, 转子电流: 15.4 A。

发电机的定子在设计阶段就已经安装好抽头, 通过抽头的连接, 可以实现定子绕组内部一匝、二匝和三匝短接, 实现对定子内部短路故障的模拟。实验接线图如图 3 所示。

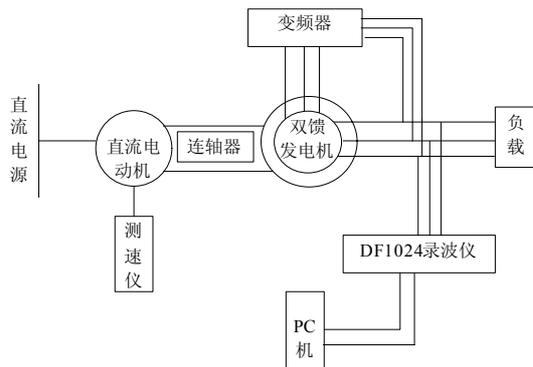


图 3 动态模拟实验接线图

Fig. 3 Experimental wiring diagram of dynamic simulation

通过录波仪对发电机的运行情况进行监测, 记录发电机正常运行和发生故障瞬间的电流特性。

在双馈电机半载情况下, 进行定子绕组发生不同匝数的匝间短路试验。从采集到的三相定子电流实测波形图中, 可以发现当故障比较微弱的时候, 三相定子电流的变化非常微小, 此时仅从时域波形无法识别出是否存在定子匝间短路故障。

图 4 (a)~4(d)为试验测得的双馈电机定子绕组发生不同匝数的匝间短路时的 Park' 矢量的轨迹。

在理想情况下, 正常电机的 Park' 矢量图应为圆, 定子匝间短路的电机的 Park' 矢量图为椭圆; 而实际情况中, 由于制造、安装、材料等方面原因, 正常电机的矢量轨迹只能接近圆。当电机出现匝间

短路故障时, 电机的 Park' 矢量轨迹为不规则的椭圆环。可以比较椭圆的变化情况并得出一定规律来判断匝间短路的故障严重程度。

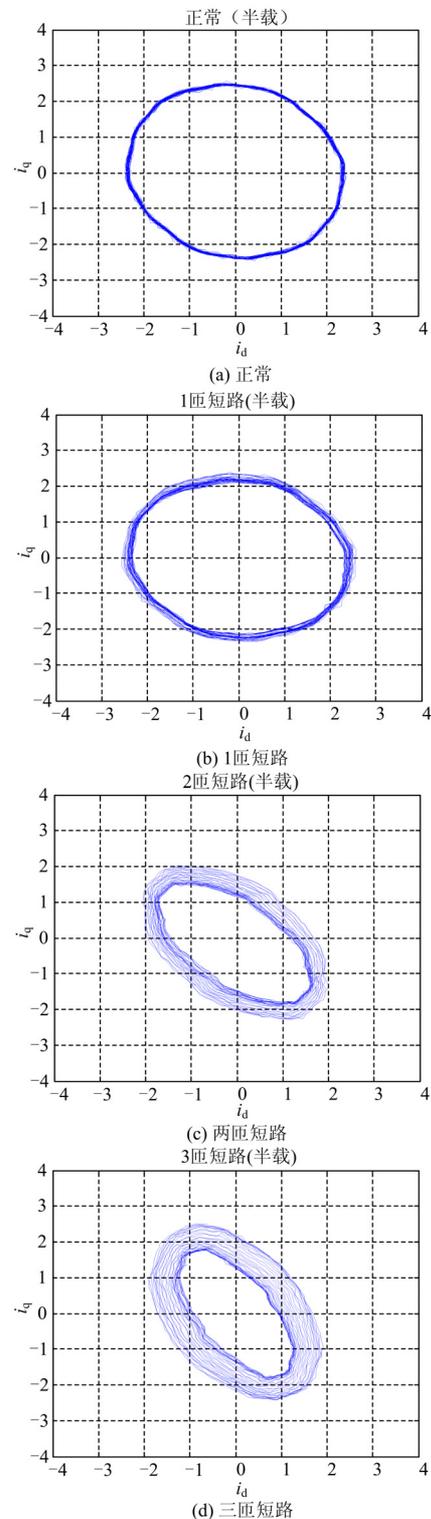


图 4 实验测得双馈电机的 Park' 矢量轨迹

Fig.4 Experimentally measured Park' vector figure of doubly-fed machine

将实验结果与仿真结果进行比较发现仿真的 1 匝短路的 Park' 矢量轨迹与实验的有一定差别, 仿真结果的故障特征量相比实验结果要更明显, 椭圆的倾斜角度更大些, 这主要是由于仿真过程对电机做了一些简化^[7], 并且没有考虑变频器的影响, 导致了仿真结果的差别。

由图 4 纵向比较可知, 定子电流的 Park' 矢量轨迹形状随着短路绕组匝数的增加而变化, 当匝间短路越来越严重, 椭圆环的长短轴之比变大, 其椭圆环宽度也越来越大, 椭圆的倾斜角度也越来越大。另外, 由于电机绕组结构的对称性, 在同一绕组的不同空间位置发生相同匝数的匝间短路, 所得到的 Park' 矢量轨迹基本相同, Park' 矢量轨迹只能判断电机是否发生内部故障以及估计故障的严重程度, 但是无法对故障位置进行精确定位。

4 结论

本文基于多回路数学模型, 对双馈电机定子绕组匝间短路故障的瞬变过程做了仿真, 并完成了相关实验。由于在匝间故障比较微弱的时候, 三相定子电流的变化非常微小, 此时仅从时域波形无法识别出是否存在定子匝间短路故障。通过对时域波形进行 park 变换, 综合仿真与实验分析结果, 可以发现定子电流的 Park' 矢量轨迹形状随着短路绕组匝数的增加而变化, 可以将采集到的电流信号与正常的电流信号进行比较, 从而判断双馈电机是否发生故障并估计故障的严重程度。

参考文献

- [1] 唐新安. 600KW 风力发电机组故障诊断 (硕士学位论文) [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2004.
- [2] 苏绍禹. 风力发电机设计与运行维护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003.
- [3] Marques Cardoso A J, Cruz S M A, Carvalho J F S, et al. Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors, by Park's vector approach[C].//Proceedings of the 1995 IEEE IAS Annual Meeting. San Diego (USA) : 642-646.
- [4] Cruz S M A, Marques Cardoso A J. Rotor cage fault diagnosis in three-phase induction motors by extended Park's vector approach[J]. Electric Machines and Power System, 2000, 28: 289-299.
- [5] Cruz S M A, Marques Cardoso A J. Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by the extended Park'[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2001, 37 (5): 1227-1233.

- [6] 蒋建东, 蔡泽祥. 用 Park 变换方法检测感应电动机转子故障[J]. 电力自动化设备, 2004, 24 (5): 55-60. JIANG Jian-dong, CAI Ze-xiang. Detection of induction motor rotor cage fault based on Park transformation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2004, 24 (5): 55-60.
- [7] 高景德, 王祥珩, 李发海. 交流电机及其系统的分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [8] 王祥珩. 发电机内部短路分析研究最新进展[J]. 电力系统自动化, 1999, 23 (11): 10-12. WANG Xiang-heng. New development of research on internal short in generator[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23 (11): 10-12.
- [9] 欧阳蓓, 王祥珩, 孙宇光. 凸极同步发电机定子内部故障瞬态的仿真模型[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2001, 41 (3): 9-12. OUYANG Bei, WANG Xiang-heng, SUN Yu-guang. Transient behavior of internal faults in stator windings of salient-pole synchronous machines[J]. Tsinghua Univ: Sci & Tech, 2001, 41(3): 9-12.
- [10] 张琦雪, 王祥珩. 大型同步发电机单相接地故障的暂态多回路分析——数学模型[J]. 电力系统自动化, 2003, 27 (6): 59-65. ZHANG Qi-xue, WANG Xiang-heng. Transient multi-loop analysis on the stator ground fault of large synchronous generator Mathematical model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27 (6): 59-65.
- [11] 魏书荣, 马宏忠. 基于多回路理论的同步电机定子绕组内部故障仿真的谐波分析[J]. 电力自动化设备, 2008, 28 (4): 32-36. WEI Shu-rong, MA Hong-zhong. Harmonic analysis of synchronous generator stator winding internal fault simulation based on multi-loop theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28 (4): 32-36.

收稿日期: 2009-07-13; 修回日期: 2009-08-14

作者简介:

魏书荣 (1980-), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断; E-mail: wsrmail@163.com

符 杨 (1965-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为风力发电监控优化设计, 电力设备状态监测与故障诊断;

马宏忠 (1962-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为电力设备状态监测与故障诊断, 电能质量监控等。