

双馈异步发电机定转子绕组过热故障监测方法^{*}

李思源, 马宏忠

(河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100)

摘 要: 双馈异步发电机 (DFIG) 在长期运行中很容易发生定转子绕组过热故障。以绕组温度为研究对象, 在分析绕组过热故障成因的基础上, 分别从电机热性能和参数辨识两方面进行检测。使用参数辨识法时, 首先利用电机电磁数学模型辨识定转子绕组电阻, 再根据电阻与温度之间的关系计算定转子温度, 从而判断绕组是否过热。最后基于 MATLAB 软件仿真验证了定转子绕组参数辨识法的正确性, 为 DFIG 诊断绕组过热故障提供理论支撑。

关键词: 双馈异步发电机; 定转子绕组; 过热故障; 参数辨识

中图分类号: TM 315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)11-0121-05

Monitoring Method for Overheat Fault of Stator and Rotor Windings of Doubly-Fed Induction Generator^{*}

LI Siyuan, MA Hongzhong

(College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: The doubly-fed induction generator (DFIG) was prone to overheat faults of stator and rotor windings in long term operation. The winding temperature was taken as the object of study. Based on the analysis of the causes of winding overheat fault, tests were carried out from two aspects of motor thermal performance and parameter identification. Using parameter identification method, resistance was identified for the stator and rotor windings based on the electromagnetic mathematical model of motor, and then the temperature was calculated according to the relationship between resistance and temperature to judge whether the windings were overheated. Finally, the correctness of the identification method of stator and rotor winding parameters was verified by MATLAB simulation, which provided theoretical support for the diagnosis of DFIG overheat fault.

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); stator and rotor winding; overheat fault; parameter identification

0 引 言

双馈异步发电机 (Doubly-Fed Induction Generator, DFIG) 由于通风孔道堵塞或是用于冷却的风扇断裂引起冷却系统故障以及过负荷运行等因素都会导致绕组温度异常升高, 超出允许值而发生过热故障^[1-2]。对此以绕组温度为研究对象进行实时监测, 将故障抑制在发生初期。因为转子绕组和定子绕组的温度变化密切相关, 所以

对二者的研究在通常情况下可同时开展^[3-4]。

对电机绕组过热故障的监测涉及到电机的保护问题。随着过电压、过电流、过负荷等保护技术的日益成熟, 很多重要场合需要增加热保护^[5]。对电机热性能的研究分析方法主要分为 3 类: (1) 利用电阻电容网络模型模拟热流过程; (2) 通过装配温度传感器直接测量绕组温度; (3) 采用有限元法模拟温度场。但这些方法与实际对象差别比较大, 或难以在工程实践中运用^[6]。

^{*} 基金项目: 国家自然科学基金项目 (51177039)

作者简介: 李思源 (1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为双馈异步风力发电机状态监测与故障诊断。

马宏忠 (1962—), 男, 博士, 教授, 研究方向为电力设备状态监测及故障诊断。

基于此,本文以绕组温度为研究对象,在分析绕组过热故障成因的基础上,分别从电机热性能和参数辨识两方面进行检测。使用参数辨识法时,首先利用电机电磁数学模型辨识定转子绕组的电阻,再根据电阻与温度之间的关系计算定转子温度,从而判断绕组是否过热。最后基于 MATLAB 软件仿真验证定转子绕组参数辨识法是否正确可行,以便为 DFIG 诊断绕组过热故障提供可靠的理论支撑。

1 基于电机热性能分析的绕组过热故障检测法

1.1 DFIG 热模型

典型的热保护策略首先依据定转子电流的正负序分量形成定转子热损耗,再将该热损耗传送到基于微处理器的电机热模型,从而实现反时限过热保护^[7]。DFIG 热模型如图 1 所示。

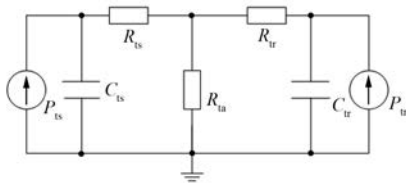


图 1 双馈异步发电机热模型

图 1 中, P_{ts} 、 P_{tr} 分别为定转子热损耗,其大小主要取决于绕组及铁心的损耗量; R_{ts} 、 R_{tr} 分别为定转子热电阻,用于模拟定转子与外界环境之间的热传递; C_{ts} 、 C_{tr} 分别为定转子热电容,表示定转子热容量; R_{ta} 为附加热电阻,用于模拟电机内冷却气体与外界气体之间的温差。

1.2 电机热监测及热模型参数调整基本原理

电机正常运行时, R_{ta} 、 R_{ts} 和 R_{tr} 之间的比例为 1:14:20,即 R_{ta} 相对于 R_{ts} 、 R_{tr} 而言非常小,定转子热模型相互独立且热时间常数不大;电机冷却系统出现故障时, R_{ta} 的值将明显增加,势必影响热模型的准确性,最终波及到绕组过热故障检测的准确性。

文献[8]提出一种重新计算 R_{ta} 并调整电机热

模型的方法。其基本原理如图 2 所示。

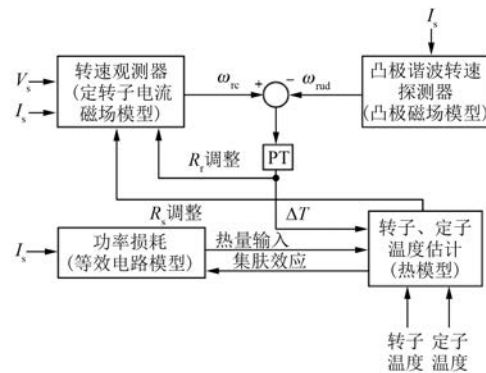


图 2 电机热监测及热模型参数调整基本原理

图 2 中的等效电路模型建立在综合考虑集肤效应的前提下,用于计算电机运行中的损耗;热模型用于估算定转子温度,检测过热故障;定转子磁场模型用于转速估计;通过凸极磁场模型计算转子转速;通过计算转速之差调整电机 R_{ta} 的数值大小,从而实现定转子温度的准确估算。

由图 2 可知,该检测方法主要基于电机的热模型,其参数难以确定且检测方法过于复杂,不适用于实际的工程运行环境。

2 基于参数在线辨识技术的绕组过热故障监测法

基于参数在线辨识技术的过热故障监测法将在线辨识技术直接用于辨识电机电阻等相关参数,再依据金属电阻阻值与其表面温度的大范围线性相关原理计算得出电机温度,从而实现对电机绕组过热故障的诊断^[9]。该方法重点在于选取合适的定转子电阻辨识算法。文献[10]将蚁群优化算法用于风力发电机的参数辨识,具有一定的指导意义。本文基于 DFIG 的电磁数学模型,通过公式推导得出电机处于稳态运行时的定转子电阻辨识算法。

2.1 定转子电阻辨识算法

DFIG 在 d, q 坐标系下的电磁数学模型为

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} pL_s + r_s & -\omega_1 L_s & pL_m & -\omega_1 L_m \\ \omega_1 L_s & pL_s + r_s & \omega_1 L_m & pL_m \\ pL_m & -(\omega_1 - \omega_r)L_m & pL_r + r_r & -(\omega_1 - \omega_r)L_r \\ (\omega_1 - \omega_r)L_m & pL_m & (\omega_1 - \omega_r)L_r & pL_r + r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u, i ——电压和电流;

下标 d —— d 轴分量;

下标 s ——定子量;

下标 q —— q 轴分量;

下标 r ——转子量;

p ——微分算子;

L_s —— d, q 坐标下电机定子自感;

r_s ——定子电阻;

ω_1 —— d, q 坐标系相对于定子的旋转速度;

L_m ——定转子互感;

L_r —— d, q 坐标下电机转子自感;

r_r ——转子电阻;

ω_r ——转子旋转速度。

各参数中, r_s, r_r 为待辨识参数, 在电机对称稳态运行时, ω_1, L_s, L_r 及 L_m 均为常数, ω_r 可测。在 DFIG 实际运行中, 互感 L_m 是个变化量, 需在辨识 r_s, r_r 之前对互感 L_m 进行预辨识, 详细方法见文献[9]; 定子侧电压、电流及有功功率和无功功率可测, 所以在对 r_s, r_r 辨识之前必须先求出 $u_{ds}, u_{qs}, u_{dr}, u_{qr}, i_{ds}, i_{qs}, i_{dr}, i_{qr}$ 这些未知量。

定义 $\omega_{s1} = \omega_1 - \omega_r$, 电机对称稳态运行的电磁数学模型简化为

$$\begin{bmatrix} u_{ds} \\ u_{qs} \\ u_{dr} \\ u_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & -\omega_1 L_s & 0 & -\omega_1 L_m \\ \omega_1 L_s & r_s & \omega_1 L_m & 0 \\ 0 & -\omega_{s1} L_m & r_r & -\omega_{s1} L_r \\ \omega_{s1} L_m & 0 & \omega_{s1} L_r & r_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (2)$$

在双馈电机实际运行中, 定子侧电压、电流及有功功率和无功功率与定子侧 d, q 坐标系下电压电流的关系如式(3)~式(6)所示:

$$u_{ds}^2 + u_{qs}^2 = U_m^2 \quad (3)$$

$$i_{ds}^2 + i_{qs}^2 = I_m^2 \quad (4)$$

$$u_{ds} i_{ds} + u_{qs} i_{qs} = P_s \quad (5)$$

$$u_{qs} i_{ds} - u_{ds} i_{qs} = Q_s \quad (6)$$

转子侧有功功率和无功率与转子侧 d, q 坐标系下电压电流的关系如式(7)、式(8)所示^[11]:

$$u_{dr} i_{dr} + u_{qr} i_{qr} = P_r \quad (7)$$

$$u_{qr} i_{dr} - u_{dr} i_{qr} = Q_r \quad (8)$$

式中: U_m, I_m ——定子电压和电流的幅值;

P_s, Q_s ——定子侧有功功率和无功率;

P_r, Q_r ——转子侧有功功率和无功率。

将旋转坐标系 d 轴按定子磁链方向定向, 由式(3)~式(6)可以推出式(9)~式(12):

$$i_{ds} = I_m \quad (9)$$

$$i_{qs} = 0 \quad (10)$$

$$u_{ds} = \frac{P_s}{I_m} \quad (11)$$

$$u_{qs} = -\frac{Q_s}{I_m} \quad (12)$$

由式(7)、式(8)可以推出式(13)、式(14):

$$u_{dr} = \frac{P_r i_{dr} - Q_r i_{qr}}{i_{dr}^2 + i_{qr}^2} \quad (13)$$

$$u_{qr} = \frac{P_r i_{qr} + Q_r i_{dr}}{i_{dr}^2 + i_{qr}^2} \quad (14)$$

由于转子侧 d 轴和 q 轴的电流分量存在 $I_2 = \sqrt{i_{dr}^2 + i_{qr}^2}$ 关系(其中 I_2 为转子电流且为可测量), 根据式(2)中的第三组等式和式(13)可得出 i_{dr} 和 i_{qr} 的关系:

$$i_{qr} = \frac{P_r - r_r I_2^2}{Q_r - \omega_{s1} L_r I_2^2} i_{dr} \quad (15)$$

将式(9)~式(12)代入式(2)中的第二组等式, 可得 i_{dr} 的表达式为

$$i_{dr} = -\frac{Q_s}{\omega_1 L_m I_m} - \frac{L_s I_m}{L_m} \quad (16)$$

将 $u_{qr}, i_{ds}, i_{dr}, i_{qr}$ 的表达式代入式(2)中的第四组等式, 可以推导出转子电阻的表达式为

$$r_r = \frac{P_r}{I_2^2} - \left(\frac{Q_r - \omega_{s1} L_r I_2^2}{I_2^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{\omega_1 \omega_{s1} L_m^2 I_m^2 I_2^2}{(Q_s + \omega_1 L_s I_m^2)(\omega_{s1} L_r I_2^2 - Q_r)}} - 1 \quad (17)$$

将 $u_{ds}, i_{ds}, i_{qr}, r_r$ 的表达式代入式(2)中的第一组等式, 可以推导出定子电阻的表达式为

$$r_s = \frac{P_s}{I_m^2} - \left(\frac{Q_s + \omega_1 L_s I_m^2}{I_m^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{\omega_1 \omega_{s1} L_m^2 I_m^2 I_2^2}{(Q_s + \omega_1 L_s I_m^2)(\omega_{s1} L_r I_2^2 - Q_r)}} - 1 \quad (18)$$

至此, 完成定转子绕组辨识公式的推导。

2.2 定转子绕组温度计算

金属铜除了绝对零度和熔点两处, 其电阻与温度存在如下严格的线性关系^[12]:

$$R = R_0[1 + \alpha(T - T_0)] \quad (19)$$

式中： R ——温度 T 下的金属电阻；
 R_0 ——参考温度 T_0 下的金属电阻；
 α ——电阻温度系数，选用铜质材料则取 $\alpha = 3.93 \times 10^{-3}$ 。

在辨识出电机定转子电阻后，根据式(19)计算出定转子温度作为判别 DFIG 绕组是否发生过热故障的依据。

3 仿真结果

利用 MATLAB 编程对 1 台 1.5 MW 的 DFIG 进行仿真^[13-14]，程序流程如图 3 所示。

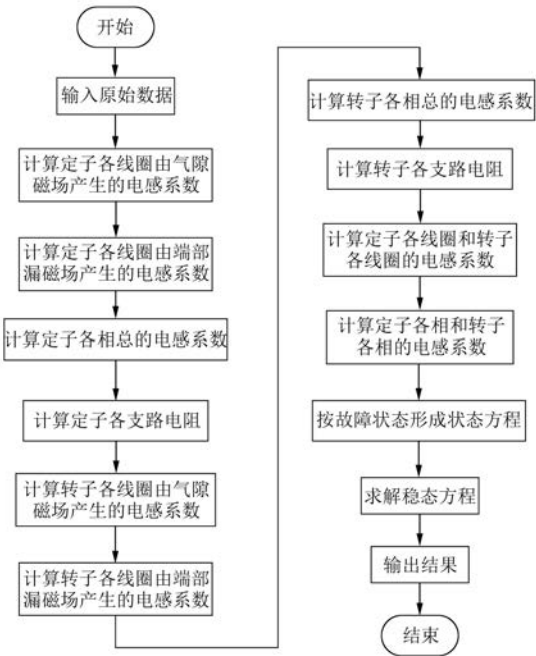


图 3 DFIG 仿真流程

按照图 3 进行仿真。仿真中的 DFIG 参数如表 1 所示。

表 1 DFIG 详细参数			
参数名称	参数值	参数名称	参数值
P_N/MW	1.5	$R_n/\text{m}\Omega$	1.401
U_N/V	690	L_s/mH	0.001 15
I_N/A	1 255	L_r/mH	0.001 6
$R_s/\text{m}\Omega$	1.548	L_m/mH	0.062 3

DFIG 定转子绕组阻值辨识仿真结果如图 4 所示。

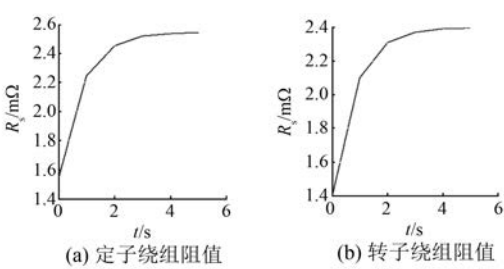


图 4 DFIG 定转子绕组阻值辨识仿真结果

由图 4 可知，在起动过程中，电机定转子绕组阻值随时间不断增大，电机温度不断上升；当电机逐渐步入稳态运行后，转子绕组阻值不再发生明显变化。该曲线变化符合电机的实际运行工况，因此可验证对定转子绕组阻值的辨识方法正确可行。

依据式(19)中金属电阻阻值与温度间的关系，计算定转子温度随时间的变化情况。将室温 20℃ 设置为参考温度。DFIG 定转子绕组温度仿真结果如图 5 所示。

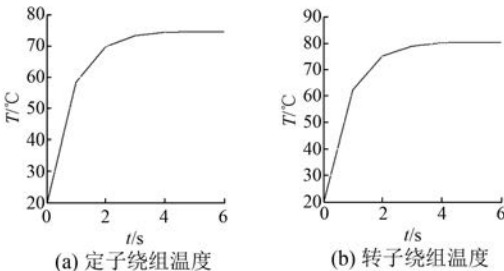


图 5 DFIG 定转子绕组温度仿真结果

由图 5 可知，电机不工作时定转子绕组温度均为室温 20℃；随着电机的起动，绕组温度逐渐上升；当电机步入稳态运行时，绕组温度基本维持恒定且定子绕组正常保持在 75℃，转子绕组正常保持在 80℃，因此可验证对定转子绕组温度的辨识方法正确可行。在实际工程中，参考仿真结果可以设置电机定转子绕组温度的安全阈值，便于绕组在发生过热故障初期的监测预警。若出现温度异常升高情况，则说明发电机产生负载异常、通风系统故障、机内积灰甚至绕组短路等一个或多个故障，需要进一步采取具体措施判定故障类别，从而减少不必要的损失。

4 结 语

本文对 DFIG 定转子绕组过热故障进行研究

分析。首先阐述绕组过热故障的产生原因并分别从电机热性能和参数辨识两方面进行故障检测。基于热性能原理建立电机热模型的方法较为复杂且准确性较差;基于参数在线辨识的方法先是通过DFIG在 d,q 坐标系下的电磁数学模型辨识定转子绕组电阻,再根据电阻与温度之间的函数关系计算出绕组温度,从而判断绕组是否过热。最后基于MATLAB软件仿真,不仅验证了定转子绕组参数辨识法正确可行,还为实际工程中设置电机定转子绕组温度的安全阈值提供了理论参考,便于绕组在发生过热故障初期的监测预警和后期的故障类别判定。

【参考文献】

- [1] 马宏忠.电机状态监测与故障诊断[M].北京:机械工业出版社,2008.
- [2] 沈标正.电机故障诊断技术[M].北京:机械工业出版社,1996.
- [3] 邓小凌,冯志文.我国风力发电产业发展的现状、问题与对策[J].电力环境保护,2001,17(3): 48-50.
- [4] 陈长征,梁树民.兆瓦级风力发电机故障诊断[J].沈阳工业大学学报,2009,31(3): 277-280.
- [5] 张国新.风力发电并网技术及电能质量控制策略[J].电力自动化设备,2009,29(6): 130-132.
- [6] 达夫勒 P J,彭曼 J.电机的状态监测[M].姜建国,史家燕,译.北京:水利电力出版社,1992.
- [7] 艾德胜. MPR-1 型综合式电动机保护装置的研制[J].电力自动化设备,1993,13(4): 42-50.
- [8] HURST K D, HABETLER T G. A thermal monitoring and parameter tuning scheme for induction machines [C] // Conference Record of the 1997 IEEE Industry Applications Conference Thirty-Second IAS Annual Meeting, 1997: 136-142.
- [9] 杜斌.基于参数在线辨识技术的交流异步电动机热保护系统[J].中国电机工程学报,1996,16(5): 328-331.
- [10] 金宇清,赵泽,鞠平,等.双馈感应风力发电机的参数辨识分析[J].高电压技术,2011,37(7): 1700-1705.
- [11] 鞠平.电力系统建模理论与方法[M].北京:科学技术出版社,2010.
- [12] 吴思诚,虞宝珠.热敏电阻温度补偿回路计算方法及其在电导仪中的应用[J].仪器仪表学报,1980(3): 40-45.
- [13] ALBIZU I, ZAMORA I, MAZON A J. Techniques for online diagnosis of stator shorted turns in induction motors[J]. Electric Power Components and Systems, 2006,31(1): 97-114.
- [14] 王兴武,张照彦,武勇利.变速恒频双馈异步风力发电机建模与仿真分析[J].计算机仿真,2009,26(10): 294-298.

收稿日期: 2018-05-31

(上接第 49 页)

- [11] 邓先明,姜建国.无刷双馈电机的工作原理及电磁设计[J].中国电机工程学报,2003,23(11): 126-133.
- [12] GORGINPOUR H, ORAEE H, MCMAHON R A. A novel modeling approach for design studies of brushless doubly fed induction generator based on magnetic equivalent circuit[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2013,28(4): 902-912.
- [13] 张凤阁,贾广隆,郑阳,等.无刷电励磁同步电机不同转子的对比分析[J].电工技术学报,2016,31(7): 41-49.
- [14] JIA L. Equivalent circuit parameters calculation of a wound rotor brushless doubly-fed machine based on finite element analysis [C] // IEEE International Magnetism Conference, 2015.
- [15] WILLIAMSON S, BOGER M S. Impact of inter-bar currents on the performance of the brushless doubly-fed motor [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 1999,35(2): 453-460.
- [16] 王秀平,张凤阁.新型转子无刷双馈电机电磁设计[J].电机与控制应用,2012,39(7): 12-15.

收稿日期: 2018-07-21

中文核心期刊 / 中国科技核心期刊
专业缔造权威 服务创造价值
高效节能 绿色电机

我们专注于 电机技术的研究
电机系统节能的解决方案
电机与控制技术

电机智能制造
电机绿色制造

.....

《电机与控制应用》

创刊于1959年，是上海电器科学研究所（集团）有限公司主办的具有专业权威的电工技术类科技期刊。每月10日出版，国内外公开发行，邮发代号4-199。

杂志集合了上电科在技术研发、产品检测、标准制定及专业人才等各方面
的优势资源，专业服务于行业与用户，为我国中小型电机行业的技术
进步与发展做出了巨大贡献，在电机及控制应用领域享有很高的
荣誉，具有很大的影响力。

编辑部地址：上海市武宁路505号9号楼6楼
电话：021-62574990-745
E-mail: 392483864@qq.com

邮编：200063
传真：021-62432316



扫码关注电机与控制应用