

基于 FEM 的双馈发电机定子匝间短路 表征因子研究*

何水龙, 沈徐红, 蒋占四, 王衍学

(桂林电子科技大学 机电工程学院, 广西 桂林 541004)

摘要: 为了研究电机定子匝间短路故障时电磁特性的表征, 基于 Ansys Maxwell 建立双馈发电机有限元模型, 实现空载、并网和不同程度定子绕组匝间短路故障 3 种工况的模拟仿真。根据表征量理论计算方程式, 基于能量角度定量分析 3 种工况下的气隙磁密畸变的振动、电流和温度特性。通过对比各表征量优缺点及诊断可行性分析, 最终确定电流作为反映定子绕组匝间短路故障时气隙磁场的表征因子, 而振动和温度作为故障检测的补充和验证, 为发电机故障诊断的信号特征选择提供了理论基础。

关键词: 定子匝间短路; 双馈风力发电机; 磁密; 表征因子

中图分类号: TM 315 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2018)07-0109-07

Research on Characteristic Factor of Inter-Turn Short Circuit Faults of Stator Winding for DFIG Based on FEM*

HE Shuilong, SHEN Xuhong, JIANG Zhansi, WANG Yanxue

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Guilin University of Electronic Technology,
Guilin 541004, China)

Abstract: In order to study the electromagnetic properties of double fed induction wind generator (DFIG) with the ITSCFSW, a finite element model based on Ansys Maxwell was established. Then the simulations under three operations conditions such as no-load operation conditions, grid-connected operation and varying degrees of the stator winding inter-turn short circuit fault were completed. According to theoretical formulas of characterization, quantitative analysis of vibration, current and temperature characterization of air gap flux density distortion in three working conditions was done based on energy perspective. Finally, the advantages and disadvantages of each characterization were compared, and the feasibility analysis of diagnosis was carried out. The stator current was determined as the characteristic factor to reflect the air gap magnetic field of the ITSCFSW, and the vibration and temperature were complement and verification for fault detection, which would provide a theoretical basis for the signal feature selection of generator's fault diagnosis.

Key words: inter-turn short circuit fault; double fed induction wind generator (DFIG); flux density; characteristic factor

0 引言

近年来, 发改委提出并实施新能源发展战略, 使我国风电产业步入跨越式发展的快车道, 新增

装机容量连续多年位居世界第一。风力发电正在向规模化和大型化发展。双馈风力发电机(Double Fed Induction Wind Generator, DFIG)作为主流机型应用日益广泛, 然而风电产业超常规发展速度和

* 基金项目: 国家自然科学基金项目(51565008); 广西教育厅科研项目(2017KY0207); 广西制造系统与先进制造技术重点实验室主任基金项目(16-380-12-004Z, 16-380-12-011K); 广西高校高水平创新团队及卓越学者计划

作者简介: 何水龙(1983—), 男, 博士研究生, 研究方向为动力学系统建模、信号处理、电机控制技术。

沈徐红(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为建模仿真等。

恶劣运行环境将加速凸显双馈式发电机质量和可靠性问题,给该行业安全带来隐忧。定子绕组匝间短路故障作为电机最常见故障之一,被视为绝缘故障的早期阶段,对其诊断备受关注。

目前,研究人员在该类故障的建模、仿真和试验等方面做了诸多工作。建模方法主要包括 2 种:一种是基于多回路理论建立三相静止坐标系下的数学模型,在 MATLAB/Simulink 平台中搭建;另一种是基于有限元理论建立的二维电磁场模型,在 Ansys Maxwell 中搭建。特征提取研究大多基于发电机的电流、电压和功率等特征因子的频率和相序方面。文献[1-3]提出一种改变短路匝数和短路阻值实现绕组匝间短路故障的建模方法。文献[4]提取了电压不平衡时匝间故障的定子三相电流频谱实现匝间故障的定性判断。文献[5]分析了转子三相电流的负序电流,并将其作为故障特征进行故障诊断。文献[6]提出负序阻抗法,对电压不平衡和单故障引起的定子三相电流的负序电流进行了区分。文献[7-8]监测正常工况和不同匝间短路故障下定子电流和转子电流,并对 3 相电流 Park 矢量轨迹和相位角进行分析。文献[9]通过 HHT 分析电机电流信号并与 3 种传统的非线性非稳态信号处理方法进行比较,验证了 HHT 在电流分析中的优势。

针对上述电流法中仅分析谐波频谱与电流相序计算而缺乏表征因子选择的理论依据及能量计算的不足,本文通过理论推导和表征计算以及构建空载运行、并网运行和定子匝间短路故障 3 种运行工况下 DFIG 有限元模型进行仿真验证。基于气隙磁密表征因子角度对电流特征的能量表征形式进行定量分析和计算,从磁场角度对电流信号用于故障分析做出诠释,获取发电机故障诊断的最佳表征因子。

1 理论分析

DFIG 在空载、并网和定子绕组匝间短路故障 3 种工况下运行,电机气隙磁场均会出现不同的表现特性,而基于能量形式通过振动、电流和温度 3 种表征量可实现该影响的表征。其中,电流表征直接通过理论公式计算能量值获取,而振动和温度表征则分别通过转矩能量和铜损能量获得。

发电机振动通过转矩能量可表示为

$$Q_T = P\Delta t = \frac{T \cdot n}{9\,550} \cdot \Delta t \quad (1)$$

式中: P ——发电机电磁功率;

T ——转子电磁转矩;

n ——发电机转速;

Δt ——选定时间段。

电流转化成能量值,则可用式(2)表示:

$$Q_I = I^2 R \Delta t \quad (2)$$

式中: I ——定子电流;

R ——转子绕组电阻;

Δt ——计算振动能量时选定时间段。

电流通过使发电机定子产生铜耗和铁耗。这些损耗将产生热量导致发电机温度升高。文献[10-11]对电机多状态温度场进行计算并分析其温升参量特性对电机运行的影响。由于铜耗产生热量大于铁耗,本文取铜耗的能量值为 Q_L ,由有限元软件 Ansys Maxwell 计算得到单位是 W 的铜耗值,本文转换成单位为 kW 的值再乘以选定的时间段 Δt 得到,可表示为

$$Q_L = 10^{-3} L \Delta t = 10^{-3} \frac{1}{\sigma_{vol}} \int J^2 \cdot \Delta t \quad (3)$$

式中: L ——发电机铜耗;

J ——材料的导电率;

Δt ——计算振动能量时选定时间段。

通过计算不同工况下的表征量,进行对比和分析,从而确定最为合适的气隙磁密变化表征因子 Z_i (i 可以为转矩 T 、电流 I 和损耗 L)。

2 有限元模型建立

2.1 有限元基础理论

有限元法是一种基于变分原理和离散化求解近似解的数值计算方法,广泛应用于各领域。

发电机运行过程相当于 1 个电感元件,电流通过绕组产生复杂分布的磁场,基于磁场实现机电能量转换,而麦克斯韦电磁场方程为该过程电磁场的研究和分析提供了新的理论依据。

由于发电机存在涡流效应和集肤效应,为了综合分析 DFIG 的正常与定子绕组匝间短路故障区别,所以将发电机轴向截面作为求解域,通过矢量磁位求解。 A_z 表示矢量磁位轴向分量,在磁场中的边值问题,可表示为

$$\begin{cases} \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{1}{\mu}\frac{\partial A_z}{\partial y}\right) = -J_z \\ A_z|_{\overline{AB}, \overline{CD}} = 0 \\ A_z|_{\overline{AD}} = -A_z|_{\overline{BC}} \end{cases} \quad (4)$$

式中： J_z ——电流密度矢量的轴向分量；
 μ ——材料磁导率。

式(4)等同于变分问题,可用式(5)表示:

$$\begin{cases} W(A_z) = \iint \left\{ \frac{1}{2} \cdot \mu \left[\left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right)^2 \right] - A_z J_z \right\} dx dy = \min \\ A_z|_{r_1 r_2} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中： 0 —— A_z 在定子外圆边界 r_1 和转子内圆边界 r_2 的给定值。

二维有限元方法可从式(5)出发求解。由于求解域的离散性,本文在离散单元中构造矢量磁位插值函数,运用差分法将式(5)的变分问题离散成多元函数极值问题。转换成每个节点矢量磁位的系列代数方程,进而获得矢量磁位的数值解。

2.2 DFIG 模型

本文以 0.55 kW 的绕线式三相双馈异步发电机为对象进行了建模分析。该发电机具体参数如表 1 所示,其中运行温度为 75 ℃。

表 1 发电机参数

参数名称	参数值 (定子/转子)	参数名称	参数值 (定子/转子)
极数	4/4	并联支路	1/1
槽数	30/24	额定功率因数	0.95
联结方式	Y/Y	额定功率/kW	0.55
外径/mm	180/120	额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500
内径/mm	121/50	额定电压/V	220
轴长/mm	65	频率/Hz	50
绕组层数	2/2	摩擦损耗/W	12

根据表 1 参数,通过 Ansys Maxwell 中常用的电机设计和分析模块——旋转电机设计专家 (RMxpert) 建立电机物理模型,并将该模型导入 Ansys Maxwell 2D 中,如图 1 所示。

图 1 中包括正常运行状态下的模型(a)和发生故障状态下的模型(b)。其中图 1(a)模型适用于空载运行和并网运行两种工况。双馈发电机空

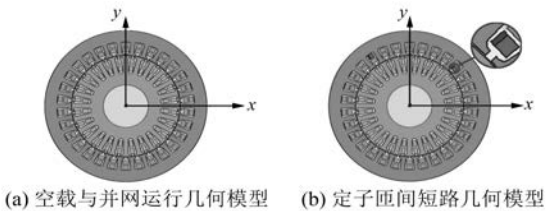


图 1 DFIG 物理模型

载运行采用定子开路运行,同时转子侧绕组施加三相交流电流源激励模拟。当发电机并网运行时,考虑定子的端部存在漏感现象,本文通过外电路设置实现定子绕组激励,电路具体如图 2 所示。

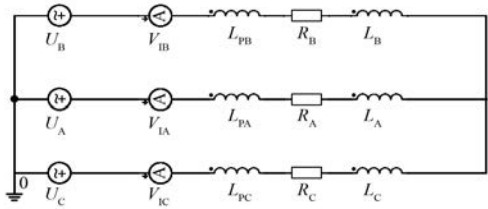


图 2 并网运行时外电路设置

常见的绕组短路故障有单支路匝间短路与多并联支路间匝间短路两种。本文采用单支路匝间短路分析,物理模型如图 1(b)所示,以 C 相第一槽为例,分为短路绕组和非短路绕组 2 部分。通过有限元模型与外部电路模型形成场路耦合实现定子绕组匝间短路故障设置。短路相两部分绕组的阻值 R 和端部漏感 L 根据短路匝数与 C 相匝数比进行分配。定子匝间短路外电路设置如图 3 所示。

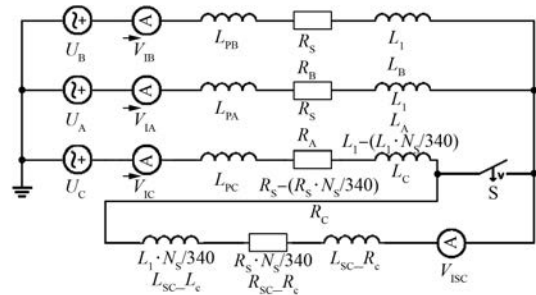


图 3 定子匝间短路外电路设置

3 仿真及分析

本文所设计的 DFIG 同步转速为 1 500 r/min, Ansys Maxwell 仿真分析的 3 种工况为 1 660 r/min。运行转速高于同步转速,即发电机处于超同步状态。并网运行与定子匝间短路故障下运行的电网频率为 50 Hz,根据变速恒频原理,转子侧通过的

三相电流频率为-5.3 Hz。

发电机仿真总时长为 0.6 s,在 $t = 0.3$ s 时通过控制短路开关形成新回路,实现定子匝间短路。为分析短路程度对表征量的影响,本文设置短路匝数为 12 匝和 20 匝,并与正常状态下的空载运行和并网运行形成 3 种运行状态的仿真样本。

3.1 电机损耗与温度表征量分析

根据上述初始条件完成仿真计算,获得各运行工况的铜耗,如图 4 所示。

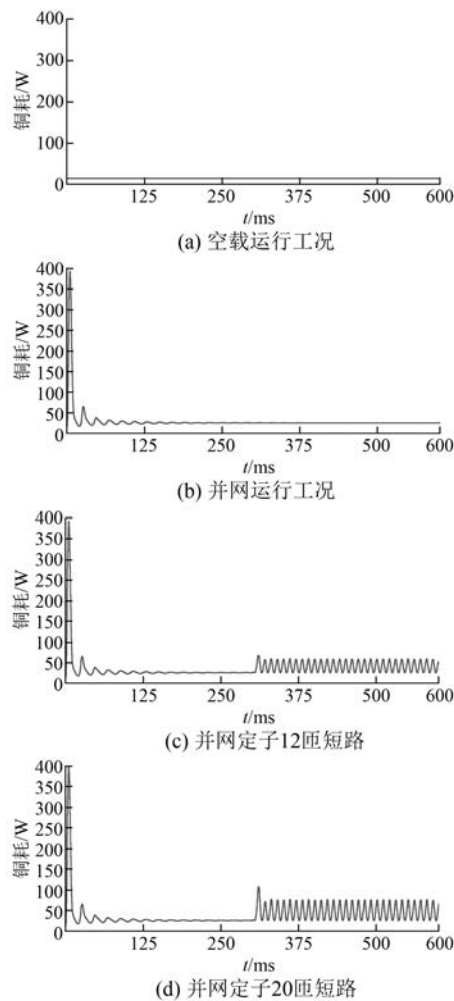


图4 电机铜耗波形曲线

对比各工况铜耗曲线可见,定子发生匝间短路故障后的铜耗较空载与正常状态明显增加,从 0.3 s 开始有短路故障的铜耗出现正弦的波形曲线,并且随着短路匝数的增加,波动峰峰值增加。20 匝短路状态下的铜耗从 26 W 的稳定值升至高达 108 W 的瞬时值。根据理论分析和计算,损耗能量计算值如表 2 所示。

表 2 损耗能量计算值

项目	空载	并网	12 匝短路	20 匝短路
铜耗/J	0.004	0.008	0.013	0.015

从表 2 可知,由铜耗导致的能量值从空载时的 0.004 J 上升至故障后的 0.015 J,并随着短路匝数的增加损耗能量增大。发电机电能转变成热能,随时间增加温升变大。因此,发电机铜耗可作为发电机故障的前期预警。

3.2 电机转子转矩与振动表征量分析

振动作作为故障分析最常用的特征之一,被广泛应用于故障诊断领域。发电机发生振动时常伴随转矩波动,本文取瞬时电磁转矩波形作为研究对象,通过分析 Ansys Maxwell 有限元模型的转子力矩了解电机受力情况,结合转矩时域和频域特性分析发电机振动特性。转矩时域波形如图 5 所示。

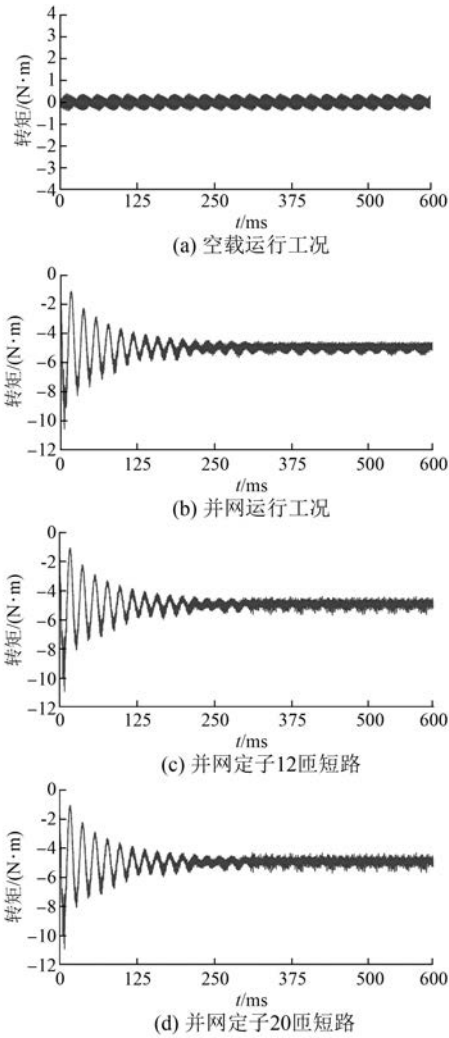


图5 电机转子电磁转矩波形曲线

由图 5 可见,空载工况与其他 3 种工况明显不同,而并网情况下,正常与故障工况转矩稳定值变化不大,只是发生故障后转矩波形毛刺更多,即时域上难以提取故障特征。

为了全面了解转矩波动隐藏的信息,对并网状态工况下的发电机转子电磁转矩信号进行 FFT 变换,得到频域信息如图 6 所示。

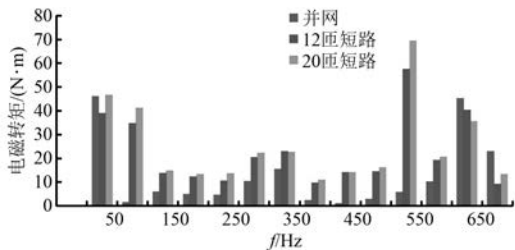


图 6 电机转子电磁转矩频谱图

由图 6 可见,并网正常运行状态下转矩成分主要集中在 1 阶谐波,而高阶成分较少。当发生定子绕组短路后,2 阶和高阶谐波成分含量显著增加,并随着故障程度加深而增加,同时 11 阶高次谐波 550 Hz 增幅最为明显。

根据前面能量表达式计算出振动的转矩能量如表 3 所示。

表 3 振动能量计算值

项目	空载	并网	12 匝短路	20 匝短路
转矩/J	0.001	0.261	0.261	0.261

从表 3 中可以看出,空载时通过电磁转矩得到的振动能量几乎为零,验证了模型的正确性。正常运行时能量稳定在 0.261 J,即通过转矩能量无法判断定子匝间短路故障。

3.3 电机定子电流表征量分析

电流在电机故障诊断领域应用广泛,本文深入分析上述 3 种运行工况下的电流特征状态,对电流特征的时域、相位和能量 3 个方面进行研究和分析。对上述各工况下定子的三相电流进行仿真分析,仿真结果曲线如图 7 所示。

同时对并网和匝间短路故障下的电流幅值进行统计,如表 4 所示。

图 7(a) 可见,空载状态下电流为 0 A,定子处于开路状态,验证了该发电机模型建立的正确性。

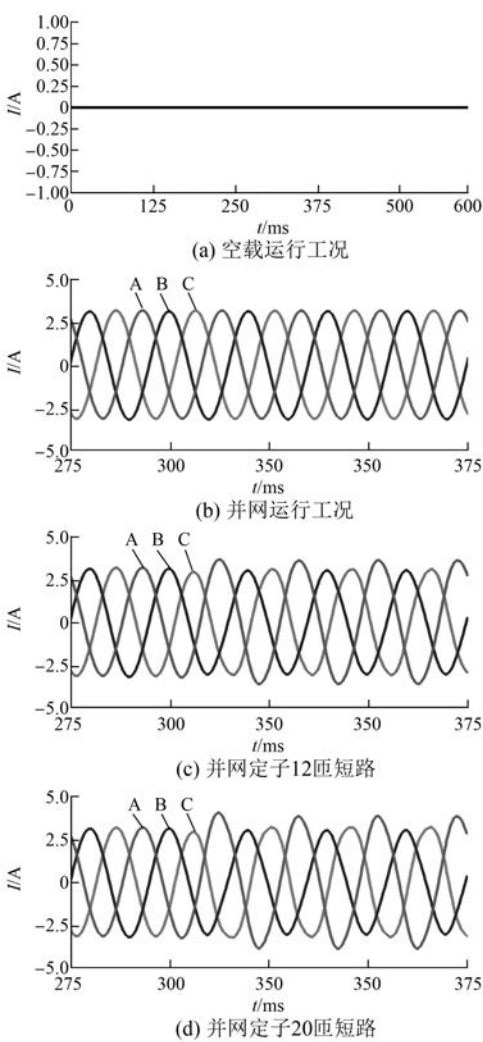


图 7 电机定子电流波形曲线

表 4 不同运行状态下的定子电流幅值

项目	I_A/A	I_B/A	I_C/A
并网	3.180	3.180	3.180
12 匝短路	3.613	3.029	3.099
20 匝短路	3.850	3.031	3.212

其他状态下,取 $t = 275 \sim 375$ ms 的电流稳定波形,如图 7(b)~图(d)所示。从图 7 中明显可见,发电机正常状态下并网运行的定子波形均匀,呈对称的正弦曲线,结合表 4 数据可知,三相电流幅值均为 3.18 A;故障发生后,电流明显畸变,不再呈对称状态,12 匝短路运行下电机定子 A 相电流的幅值明显增大至约 3.6 A。随着故障程度的加深,20 匝短路工况时的 A 相电流瞬时值增至 4 A,并稳定在约 3.8 A。

由电流波形过零点位置对应时间差与网侧频率 50 Hz 和 1 个电周期 360°乘积可得到相位角的数据。本文计算正常并网运行和两种匝间短路故障状态下定子电流相位角,如表 5 所示。

表 5 不同运行状态下的定子电流相位角

项目	AB 相/(°)	BC 相/(°)	CA 相/(°)
并网	120	120	120
12 匝短路	125.220	107.748	127.031
20 匝短路	125.917	103.924	130.159

从表 5 可见,当定子 C 相发生匝间短路后,AB 相、CA 相的相位差都大于 120°,BC 相的相位差小于 120°。随着故障程度的加深,该变化趋势更加明显。因此,定子匝间短路故障会对相位差的对称性造成破坏,且破坏程度与故障程度相关。

通常发电机中性点不接地,当三相电流不对称时,零序电流为零,只存在正序电流与负序电流。本文基于 MATLAB 分别计算出正常并网运行和两种匝间短路故障状态下的负序电流 I_2 和正序电流 I_1 ,如表 6 所示。

表 6 不同运行状态下的定子电流负序电流与正序电流

项目	I_2/A	I_1/A	$I_2/I_1/\%$
并网	0	2.248 6	0
12 匝短路	0.268 5	2.287 6	11.74
20 匝短路	0.363 8	2.364 2	15.39

从表 6 可知,发电机正常并网运行时,定子的负序电流值为零;当发生定子匝间短路故障后,该值明显增大,且负序电流值与正序电流的比值随着故障程度的加深而增大。

根据理论计算出电流能量如表 7 所示。从表 7 中可见,电流能量在故障前为 0.781 J,故障后电流表征能量突变为 1.125 J,并随着故障程度的加深成倍增加,因此由电流表征的特性在能量方面得以体现。

表 7 电流能量计算值

项目	空载	并网	12 匝短路	20 匝短路
电流表征能量/J	0	0.781	1.125	1.389

3.4 表征量变化率分析

对并网与故障状态运行的 3 种表征量的变化

率进行计算,如表 8 所示。表 8 中 a 为 12 匝定子短路与并网状态时数值差的变化率,b 为 20 匝定子短路与并网状态时数值差的变化率。

表 8 表征量变化率计算值

项目	并网/ J	12 匝短路/ J	20 匝短路/ J	比率 a/%	比率 b/%
铜耗	0.008	0.013	0.015	61.5	92.3
转矩	0.261	0.261	0.261	0	0
电流	0.781	1.125	1.389	44.0	77.7

当 DFIG 发生定子匝间短路时,内部气隙磁密发生明显畸变。从表 8 中可见铜耗和电流表征量变化率明显,而振动特征的转矩能量方面基本没发生变化。

综上所述,以铜耗表示温度特性的表征量变化率最大,可选为气隙磁密畸变的表征因子参考量。但通过对部分匝间短路故障和完全匝间短路故障进行热场基础分析,结合本文设置的部分匝间短路故障情况,发现故障状态下的最高温度接近正常运行的最高温度,且难以全方位直接测量电机温度场,所以热场分析难以发现和识别故障。故温度特性不适合作为由匝间短路故障引起的气隙磁密度畸变的特征因子。从能量角度来看,振动引起的转矩能量变化基本不变,不适合被选为表征因子,但频域特征发生了明显变化,可以从频域方面作为补充和验证。电流因子克服了上述两个表征因子的不足,能较好地反映故障的变化,因此,在进行匝间短路判断时可选择定子电流作为气隙磁通密度畸变的特征因子。

4 结 语

本文从能量角度出发,通过理论分析计算发电机振动、电流和温度 3 种特征因子对定子匝间短路故障诊断影响,并基于 Ansys Maxwell 建立某 0.55 kW 双馈风力发电机的有限元模型。在该模型上对发电机正常空载、并网和匝间短路故障 3 种工况进行仿真,并计算铜耗、转子电磁转矩和定子电流等参量,分析其变化规律。结果表明:发生定子绕组匝间短路故障时,铜耗和定子电流不再稳定,即出现故障温度特性与电流特性的变化,振动方面则在频域上发生了变化。结合分析 3 种表征量的优缺点,选择电流作为最为适合的表征因子。本文提出的分析方法和研究结论为 DFIG 定

子匝间短路故障的电磁场分析提供理论依据。

【参考文献】

- [1] LI J Q, WANG X M. FEM analysis on interturn fault of rotor winding in DFIG [C] // International Conference on Electrical Machines and Systems, IEEE, 2013: 797-802.
- [2] CHEN Y, WANG L, WANG Z, et al. FEM simulation and analysis on stator winding inter-turn fault in DFIG [C] // Properties and Applications of Dielectric Materials, IEEE, 2015: 244-247.
- [3] 张志新, 马宏忠, 钱雅云, 等. 基于有限元分析的双馈异步发电机定子绕组匝间短路故障诊断研究[J]. 高压电器, 2012, 48(8): 24-27.
- [4] 李俊卿, 康文强, 沈亮印. 不平衡电压下双馈异步发电机定子绕组匝间短路故障的稳态仿真分析[J]. 电机与控制应用, 2017, 44(4): 86-92.
- [5] 李俊卿, 何龙, 王栋. 双馈式感应发电机转子匝间短路故障的负序分量分析[J]. 大电机技术, 2014(2): 14-18.

- [6] 李俊卿, 康文强, 沈亮印. 不平衡电压下基于负序电流法的双馈感应发电机定子绕组匝间短路故障仿真研究[J]. 电机与控制应用, 2016, 43(11): 80-85.
- [7] 魏书荣, 符杨, 马宏忠. 双馈风力发电机定子绕组匝间短路诊断与实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 25-28.
- [8] 李俊卿, 王栋, 王喜梅. 双馈感应发电机定子绕组匝间短路时电磁特征[J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2015, 42(1): 15-21.
- [9] 戴志军. 基于改进 HHT 的双馈风力发电机定转子故障诊断研究与实现[D]. 上海: 上海电机学院, 2015.
- [10] 何山, 王维庆, 董新胜, 等. 双馈风力发电机多种故障状态温度场仿真研究[J]. 计算机仿真, 2014, 31(2): 170-173.
- [11] 宋国强, 张新燕, 王维庆, 等. 1.5 MW 双馈风力发电机电磁场和温度场分析[J]. 电源技术, 2015, 39(5): 1053-1056.

收稿日期: 2018 -01 -15

(上接第 88 页)

3 结 语

绿色工厂的推广目前在全国范围内还刚刚开始, 对于带有行业特点的绿色制造研究基本处于空白状态。本文从电机生产企业建设绿色工厂的目标出发, 针对电机生产企业建设绿色工厂、进行绿色制造产业升级的共性问题 and 个性问题做了分析和阐述, 希望对于电机生产企业的绿色制造升级带来一些启发; 也希望本文能为将来的电机生产行业绿色工厂评价相关标准的制订及评价体系的建立, 完善我国绿色制造相关标准体系和评价体系起到添砖加瓦的作用, 从而为电机生产行业全面推行绿色制造、加快电机生产行业绿色改造

升级、构建电机生产行业绿色制造体系, 提高我国电机生产行业的国际竞争力作出积极贡献。

【参考文献】

- [1] 中华人民共和国国务院. 中国制造 2025 [OL]. www.gov.cn, 2015-05-19.
- [2] 中华人民共和国工业和信息化部. 工业和信息化部办公厅关于开展绿色制造体系建设的通知 [OL]. www.miit.gov.cn, 2016-09-03.
- [3] 中华人民共和国工业和信息化部. 绿色工厂评价要求 [OL]. www.miit.gov.cn, 2016-09-03.
- [4] 绿色工厂评价通则: GB/T 36132-2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.

收稿日期: 2017 -12 -12

(上接第 108 页)

- [13] 胡耀华, 贾欣乐. 广义预测控制综述[J]. 信息与控制, 2000, 29(3): 248-256.
- [14] 符晓玲. 一种隐式广义预测控制算法及仿真研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2011, 27(2): 7-9.
- [15] 张敏杰. 改进广义预测控制算法的研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2012.
- [16] 刘旭东, 李珂, 孙静, 等. 基于广义预测控制和扩展状态观测器的永磁同步电机控制[J]. 控制理论与应用, 2015, 32(12): 1613-1619.
- [17] 李立刚, 张朝晖. 基于改进自适应广义预测控制的

- 天然气分输站压力控制[J]. 信息与控制, 2014, 43(5): 637-640.
- [18] 张建桃, 张铁民, 梁莉. 超声电机非线性建模和广义预测控制[J]. 电机与控制学报, 2011, 15(6): 50-56.
- [19] ELIASI H, MENHAJ M B, DAVILU H. Robust nonlinear model predictive control for a PWR nuclear power plant[J]. Process in Nuclear Energy, 2012, 54(9): 177-185.

收稿日期: 2018 -01 -03