

DOI: 10.7667/PSPC171136

基于 HHT 的双馈异步发电机电刷滑环烧伤故障诊断

李思源¹, 马宏忠¹, 陈涛涛²

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 211100; 2. 江苏省电力公司检修分公司, 江苏 宿迁 223815)

摘要: 在实际工程应用中, 双馈异步发电机电刷滑环故障发生较为频繁, 对电机励磁稳定性影响也较大, 严重时还会导致发电机组的解列。因此提出一种基于 HHT 的双馈异步发电机电刷滑环烧伤故障诊断方法。首先通过 PSCAD/EMTDC 电力系统仿真软件模拟滑环烧伤故障, 得到故障前后流经电刷滑环的励磁电流。然后基于希尔伯特-黄变换理论提取故障特征量, 并将仿真结果与实测励磁电流信号所得 Hilbert 谱图进行对比分析, 验证了故障特征量诊断法的可行性。最后提出能量商的诊断特征值概念, 计算不同故障等级下特征量的能量商值, 并与红外测温探头测量滑环表面的温度值进行对比。分析二者变化趋势, 发现高于 100 Hz 的周期性高频分量不但可以作为故障特征量, 而且其能量商在诊断滑环发生轻微烧伤故障时具有更高的精度和灵敏度。该方法为实际工程研究提供了一定的指导意义。

关键词: 双馈异步发电机; 电刷滑环; 希尔伯特-黄变换; 烧伤; 故障

Diagnosis method based on HHT of burn fault of doubly-fed induction generator brush ring

LI Siyuan¹, MA Hongzhong¹, CHEN Taotao²

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. Jiangsu Electric Power Company Maintenance Branch, Suqian 223815, China)

Abstract: In practical engineering, the fault of brush slip ring of Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) occurs frequently, and the excitation stability of the motor is also greatly affected, which will lead to the disconnection of the generator set. Therefore, this paper proposes a fault diagnosis method of burn of doubly-fed induction generator brush slip ring based on Hilbert Huang Transform (HHT). First it uses the PSCAD/EMTDC power system simulation software to simulate the slip ring burn fault and obtain excitation current through the brush and slip ring before and after fault. Then fault features are extracted based on HHT theory, and the simulation results and the Hilbert spectra gotten from the measured excitation current signal are compared and analyzed to verify the feasibility of fault feature diagnosis method. Finally, the concept of energy quotient diagnostic features is proposed, the energy quotient of features of different fault levels calculated and then compared with the slip ring surface temperature value measured by the infrared temperature measuring probe. Their variation trend is analyzed, finding that the periodic frequency the components which is higher than 100 Hz can be used as the fault feature, and its energy quotient has higher accuracy and sensitivity in diagnosing minor burn of slip ring. This method provides some guiding significance for practical engineering research.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177039 and No. 51577050).

Key words: doubly-fed induction generator (DFIG); brush ring; Hilbert-Huang transform (HHT); burn; fault

0 引言

双馈异步发电机(DFIG)凭借其自身转速调节灵

敏、功率变换双向、变频控制灵活等特点广泛应用于风电事业^[1]。作为发电机的动静转换器件, 运行中的电刷滑环系统发生故障会导致发电机无法稳定运行, 甚至出现发电机电刷冒火并形成环火而造成机组减负荷后停机的问題^[2]。同时, 电刷滑环系统日常维护工作量大, 处于恶劣环境下的风电机组将加大其维护修理工作的难度和更多人力、物力和财力的投入^[3-5]。

基金项目: 国家自然科学基金项目“双馈异步发电机电气故障及其诊断技术基础研究”(51177039)、“双馈异步发电机内部故障的振动(声学)机理分析与机电(声)融合诊断研究”(51577050)

截至目前, 对滑环烧伤故障的研究仍未构成体系。常用的诊断方法有: 电刷滑环间火花电弧量诊断、电刷滑环温度变化诊断和振动量诊断。文献[6]定量分析了电刷滑环不稳定接触对转子电流的影响, 但受电机本身和外界干扰太大, 具有一定的局限性。文献[7-9]将热电偶嵌入距接触面 0.15~0.25 mm 深度的电刷内测量电刷和滑环的接触温度, 实际操作工艺复杂, 精准度要求高。文献[10]采用红外测温探头非接触测量滑环表面温度, 经通信总线实时传输温度数据并设置过热报警功能, 但精度不高, 不能稳定实时反映电机在滑环处的烧伤故障程度。

综上所述, 为提高故障诊断的简易性、精确性和可靠性, 论文提出基于 HHT 的双馈异步发电机电刷滑环烧伤故障诊断方法, 通过仿真软件 PSCAD/EMTDC 模拟滑环烧伤故障, 得到故障前后流经电刷滑环的励磁电流, 基于 HHT 变换理论提取故障特征量, 并将仿真结果与实测励磁电流信号所得 Hilbert 谱图进行对比分析, 为滑环烧伤故障提供一种新的诊断思路。

1 双馈异步发电机电刷滑环烧伤故障机理

本文针对发电机电刷滑环表面发生的不同程度烧伤现象, 侧重于故障早期的诊断和判定, 因此主要研究滑环的单相烧伤故障。

滑环烧伤时会对流经故障环的励磁电流产生较大影响。由于烧伤部位表面粗糙凹凸不平, 当滑环旋转到其烧伤处与电刷接触时, 二者接触面平稳性大大降低, 接触点数急剧减少。故此时电刷滑环的接触电阻较滑环正常运行时大大增加。

2 滑环烧伤故障建模仿真与分析

2.1 滑环运行电阻基本概念

双馈异步发电机的滑环装置通过联轴器与其电机转轴相连, 经转轴带动做高速旋转。电刷触头与滑环引线触头间的轴向距离做周期性变化^[11], 从而产生环圈电阻的周期性变化, 如图 1 所示。

由图 1(b)可得滑环运行电阻为

$$R_{\text{tot}} = \frac{R_1(\delta) \cdot R_2(\delta)}{R_1(\delta) + R_2(\delta)} \quad (1)$$

式中, δ 为电刷与滑环引线触头的夹角。

用这两段滑环弧长表示 R_1 、 R_2 的电阻大小。

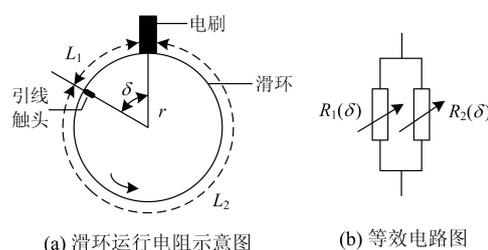


图 1 电刷滑环运行电阻示意图及其等效电路图

Fig. 1 Schematic diagram of resistance schematic and equivalent circuit diagram of the brush slip ring

$$\begin{cases} R_1(\delta) = \rho \cdot \frac{L_1(\delta)}{A} \\ R_2(\delta) = \rho \cdot \frac{L_2(\delta)}{A} \end{cases} \quad (2)$$

式中: A 为滑环径向截面积; ρ 为滑环电阻率; L_1 、 L_2 分别为滑环两部分弧长(电刷触头到引出线); $L_1(\delta)$ 、 $L_2(\delta)$ 与滑环转动的角速度有关, 记作

$$\begin{cases} L_1(\delta) = \pi \cdot r \cdot \frac{\delta}{180} \\ L_2(\delta) = \pi \cdot r \cdot (2 - \frac{\delta}{180}) \end{cases} \quad (3)$$

式中: r 为滑环半径; δ 由滑环旋转频率 f 和运行时间 t 共同决定, 如式(4)。

$$\delta(t) = f \cdot t \cdot 360 \quad (4)$$

一个旋转周期内滑环运行电阻的瞬时表达式为

$$R_{\text{tot}}(t) = 2\pi r \cdot \frac{\rho}{A} \cdot f(t - ft^2) \quad (5)$$

由式(5)可知, 滑环运行电阻以抛物线形式做周期性变化, 变化频率等于滑环的转动频率。

2.2 电刷滑环电阻数值建模

电刷滑环电阻为滑环运行电阻与二者接触电阻的总和。将两个电阻串联, 在 PSCAD/EMTDC 仿真平台上建立如图 2 所示的滑环电阻故障模型^[12-13]。

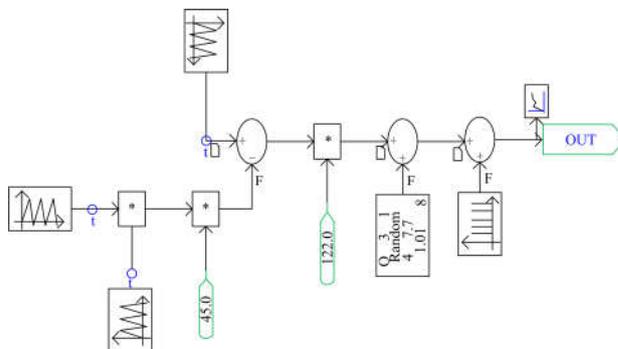


图 2 电刷滑环总电阻数值模型图

Fig. 2 Total resistance value model of the brush slip-ring

由图 2 可知, 在 PSCAD 软件平台上利用软件自带的随机函数发生器模拟包括电刷电阻的电刷滑环接触电阻; 基于式(5)运用系统函数构造运行电阻; 通过三角函数触发模拟电刷滑环运行时间; 采用脉冲函数发生器设置滑环烧伤后接触电阻的周期性突变。仿真结果如图 3 所示。

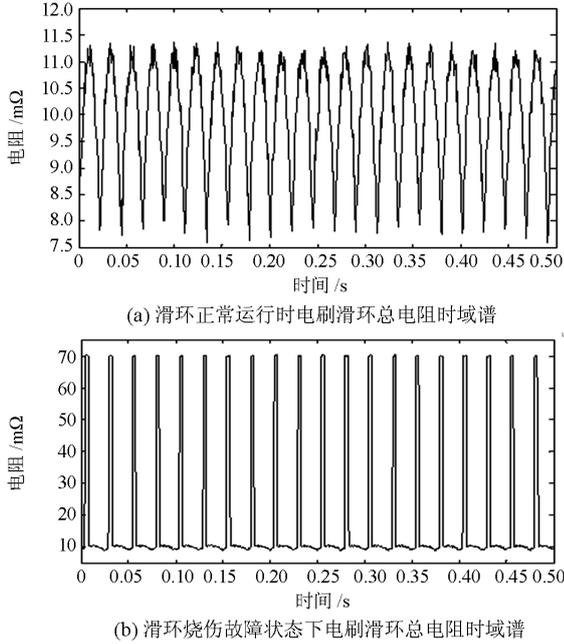


图 3 电刷滑环总电阻时域谱

Fig. 3 Brush slip-ring total resistance time domain spectrum

电机正常运行时, 滑环与电刷接触面光滑平整, 二者接触电阻值很小, 与其运行电阻值相比可以忽略不计; 滑环发生烧伤故障时, 电刷滑环间接触电阻骤增; 与之相比滑环运行电阻相对较小而可以计为常数。

2.3 电刷滑环电阻电路建模

根据谐波理论, 周期性且含突变量的负载运行中将产生间谐波^[14]。本文着重分析双馈异步发电机励磁电流是否能提取一定的变化规律作为滑环烧伤故障的特征量; 同时为突显故障特征, 避免电机受定转子阻抗、转子漏抗的分压分流、定子互感效应及转子侧变频器产生谐波等其他因素干扰, 直接在电刷滑环处施加励磁电压(具体实验方案见下文第 4 节)。在生产中, 电刷滑环系统运行涉及机械、电气等多方面因素, 目前没有任何软件能完全模拟其实际运行状况。因此本文在 PSCAD/EMTDC 平台上建立如图 4 所示的电刷滑环电阻电路简易模型, 主要研究电刷电流量。

由图 4 可知, 样机参考 YKYF1500-4 空冷型双馈异步发电机, 椭圆虚线处为电刷滑环系统的安装

位置。由图 3(b)可得, 滑环发生烧伤故障前后的动态电阻峰值分别接近 12 mΩ、70 mΩ, 符合工程实际, 于是基于软件自带的双馈异步发电机及并网系统模块, 在转子侧变流器及控制器的内嵌模块 A、B、C 三相中分别串入 R1、R2、R3 作为转子三相上的电刷-滑环装置。将 C 相作为滑环的故障相。

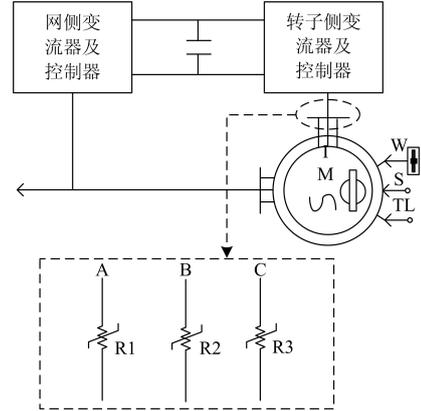


图 4 PSCAD 双馈风机及电刷滑环等效电路图

Fig. 4 PSCAD DFIG and brush slip ring equivalent circuit

3 基于 HHT 方法诊断滑环烧伤故障

3.1 希尔伯特-黄变换优势

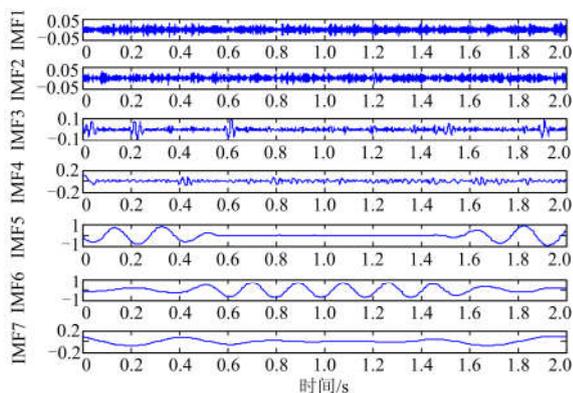
通常在分析频率有变化的信号时, 可以使用小波分析法挑选正确的小波基来提取信号的故障特征分量。但是由于小波以 FFT 为基础, 因此在发生滑环烧伤故障的初期, 流经电刷滑环的励磁电流变化微小, 其产生的故障频率几乎无法识别, 利用小波变换分解出的各个量无法反映故障特征; 而希尔伯特-黄变换(HHT)方法依据信号的包络分解出高频分量, 而包络涵盖了信号对应幅值变化的故障信息。基于 EMD 分解提取出 IMF 分量的瞬时幅值在故障发生和排除时刻都发生了突变, 可以有效地提取相应的故障信息。

由于 HHT 的频率分辨率能自适应调节, 时间分辨率有很高的精度且不会改动, 因此在处理早期滑环烧伤故障的励磁电流非平稳信号时, HHT 方法比小波分析方法的适应性更强。

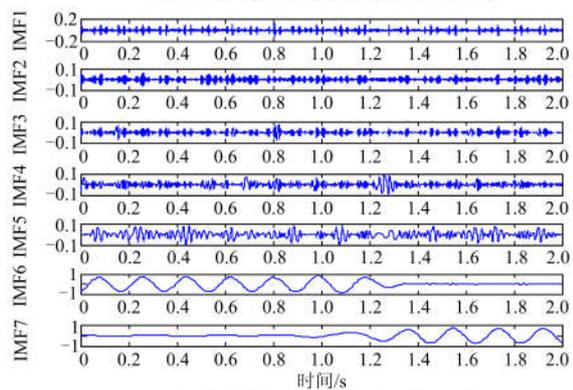
综上所述, 相比于传统的傅里叶变换以及小波变换, HHT 方法能更加有效、准确地诊断电气设备故障, 具体步骤参考文献[15-17]。

3.2 基于 HHT 方法提取滑环烧伤故障特征量

从时域、频域两方面同时反映电流信号特征, 对仿真得到的 C 相滑环烧伤故障前后电流信号进行 HHT 变换, 得到如图 5 所示的电刷电流在滑环烧伤故障前后的 7 层经验模态函数 IMF 分解图。



(a) 滑环良好运行时励磁电流7层IMF分解



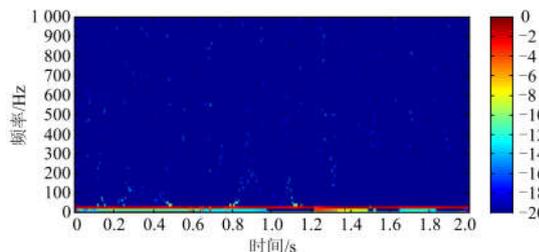
(b) 滑环烧伤故障下励磁电流7层IMF分解

图5 滑环烧伤故障前后励磁电流7层IMF分解图

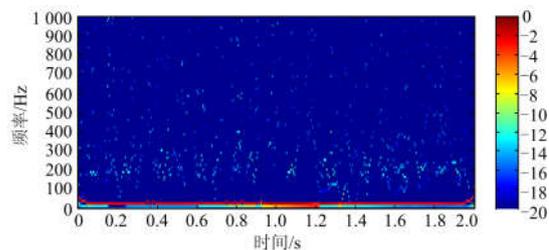
Fig. 5 Breakdown diagram of the seven layers of excitation current before and after the failure of the slide ring burn

根据 HHT 理论, 7 层经验模态分解从第一层到第七层的频带范围顺次减小。由图 5 可得, 滑环发生烧伤故障后, 比较 IMF1-IMF3 发现电流高频分量幅值明显增加; 比较 IMF4-IMF6 发现电流低频分量较正常值变化不大。为准确直观地反映故障前后励磁电流时频变化, 获取如图 6 所示的滑环烧伤故障前后励磁电流的 Hilbert 谱。

由图 6 可知, 滑环正常运行时, 流经滑环的励磁电流的主要能量集中在低频分量 50 Hz 以内; 滑环发生烧伤故障时, 流经滑环的励磁电流的主要能量仍集中在低频分量 50 Hz 以内且幅值较大、稳定性较高, 构成励磁电流的基波分量, 而高频分量部分则变化较为显著: 100 Hz 以上频率分量明显增加, 其中 100~300 Hz 频段更具有代表性且呈现周期



(a) 滑环良好运行时励磁电流Hilbert谱



(b) 滑环烧伤故障下励磁电流Hilbert谱

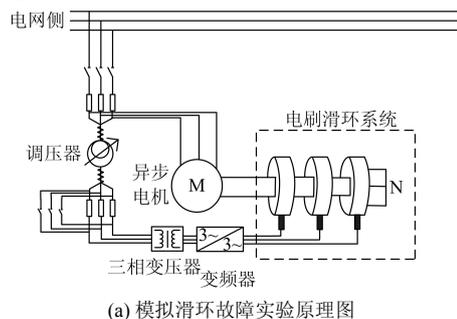
图6 滑环烧伤故障前后仿真电流 Hilbert 谱

Fig. 6 Simulation current Hilbert spectrum before and after burn failure of slip ring

性变化。因此可将励磁电流希尔伯特谱中高于 100 Hz 的周期性高频分量作为滑环烧伤故障的重要特征量进行研究。

4 实验分析与方法可行性认证

在学校动态模拟实验室搭建实验平台, 定制轴系加长的三相异步发电机。在电机转轴上固定滑环装置, 由电机驱动滑环旋转, 通过刷架固定电刷并与滑环面紧密接触。基于上文理论分析, 为具体研究滑环烧伤故障而规避双馈异步发电机工作时其他因素的干扰, 在电刷滑环处直接施加励磁电压形成特定分支回路。三根滑环引线接成 Y 形; 对 10 kV/4 kV 变压器进行低压侧短路, 获取短路电流来模拟电机励磁电流。电流采集装置由电流传感器、稳压源、多通道尼高采集仪、微处理器等组成, 为测取流经三相电刷的电流而新增三组电流互感器, 实验平台搭建如图 7 所示。



(a) 模拟滑环故障实验原理图



(b) 直接励磁的滑环故障实验装置图

图7 双馈异步发电机电刷滑环装置故障诊断实验平台

Fig. 7 Fault diagnosis experiment platform for the DFIG with slip-ring device

采用锉刀、烙铁等工具设置滑环表面的故障。选取具有代表性的三种不同程度烧伤故障进行研究，依次为滑环面一处轻度烧伤、一处重度烧伤和两处重度烧伤。如图 8 所示，实际生产中双馈异步发电机滑环故障大多发生在一相滑环上。



图 8 滑环一处重度烧伤故障模拟实物图

Fig. 8 A heavy burn fault simulation of a physical object

设置滑环转速为 1 350 rad/min，通过尼高采集仪实时采集流经电刷滑环的三相励磁电流时域波形图。如图 9 所示分别为电刷滑环良好运行时和 C 相发生两处重度烧伤故障时的三相励磁电流时域谱图。

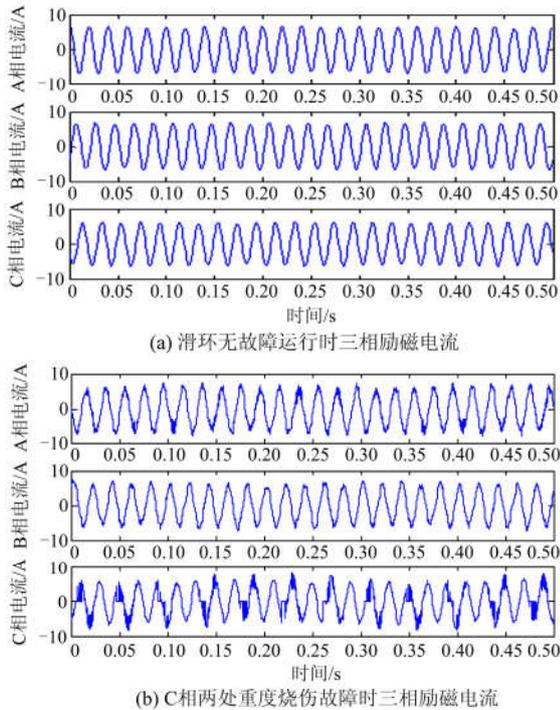


图 9 滑环烧伤故障前后三相励磁电流时域谱

Fig. 9 Time domain spectrum of three phase excitation current before and after burn failure of slip ring

由图 9 可知，滑环单相烧伤故障也会干扰其他相，从而影响三相励磁电流的平衡度；严重的烧毁故障可以在电流波形中观察出来，但这样不适用于轻度烧伤故障，不能应对滑环的早期烧伤故障。因此对故障相励磁电流进行 HHT 变换处理并绘制如图 10 所示的 Hilbert 谱。

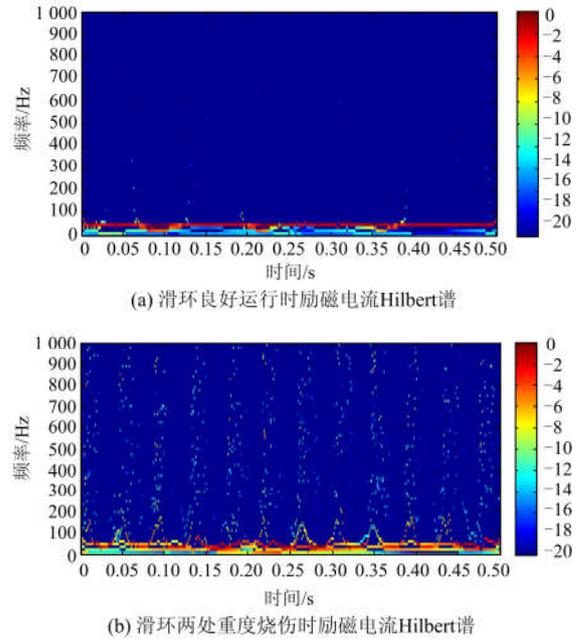


图 10 滑环烧伤故障前、后实测电流 Hilbert 谱

Fig. 10 Hilbert spectrum of the measured current before and after the failure of the slip ring burn

由图 10 可知，滑环烧伤时，流经故障滑环的电流会在电刷与滑环烧伤点接触时刻衍生出很多 100 Hz 以上的间歇性周期高频分量；滑环良好运行时不会产生明显的周期性谐波。因此可将高于 100 Hz 的周期性高频分量作为判断滑环是否发生烧伤故障的依据。该实验分析结果与 PSCAD 仿真结果一致，验证了 HHT 法的可行性。

此外，由图 10(b)可以看出，滑环在良好运行状态下的频带能量主要集中在 50 Hz 以内，可以定义该频带范围内的能量为总波能量 P_z ；滑环出现烧伤故障后会产生大于 50 Hz 的高频分量，可以定义这个频带范围内的能量为谐波能量 P_i 。因为滑环烧伤故障的严重程度越深，谐波能量所占的比重就会越大，故引入“能量商”的概念表征滑环烧伤故障的严重程度(P_z 与 P_i 的比值)，用 B_f 表示。为了验证大于 50 Hz 的特征高频分量诊断滑环烧伤故障的灵敏度，参考文献[10]采用目前最常用的红外测温探头非接触测量法实测滑环表面温度，设置滑环面由轻到重的故障程度为：一处轻度烧伤、一处重度烧伤、两处轻度烧伤、一处轻度+一处重度、两处重度烧伤；故障等级依次为 0.5 级、1 级、1.5 级、2 级、2.5 级。采集多组不同故障等级下能量商和滑环表面温度实验数据，如表 1 所示。

根据表 1 结果绘制滑环烧伤故障等级与能量商 B_f 的离散对应关系图，利用反正切函数对离散点进

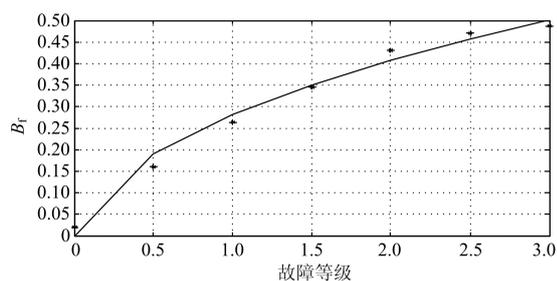
行拟合，得到能量商 B_f 与故障等级 L 的对应关系图，如图 11 所示。

行曲线拟合。离散点对应关系及拟合曲线如图 11(a) 所示; 同理绘制滑环烧伤故障等级与滑环表面温度的离散对应关系图, 利用平滑样条对离散点进行曲线拟合(平滑参数取 $p=0.986\ 301\ 37$)。离散点对应关系及拟合曲线如图 11(b) 所示。

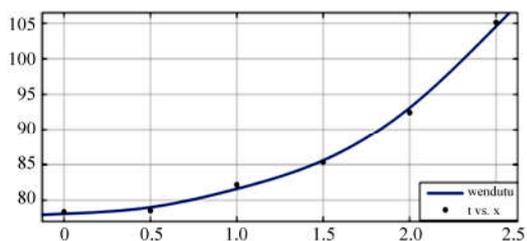
表 1 不同故障等级下能量商值和温度值表

Table 1 Energy quotient and temperature table at different fault levels

故障等级	P_z /p.u.	P_f /p.u.	B_f	温度/°C
良好	0.921	0.0184	0.02	78.36
0.5级	0.923	0.148	0.16	78.54
1.0级	0.911	0.239	0.263	82.16
1.5级	0.930	0.400 1	0.431	85.35
2.0级	0.928	0.436	0.47	92.41
2.5级	0.933	0.453	0.486	105.12



(a) 能量商与滑环烧伤故障等级的关系曲线



(b) 滑环表面温度与滑环烧伤故障等级的关系曲线

图 11 能量商与滑环表面温度对应滑环烧伤故障等级的关系曲线

Fig. 11 Relation curve between energy quotient and slip surface temperature corresponding to the fault grade of slip ring burning

由图 11 可以看出, 滑环烧伤故障下励磁电流“能量商”和温度值都随着故障等级的增加而增大。不同之处在于 B_f 的变化率会随着故障等级的升高而逐渐减缓, 温度的变化率会随故障等级的升高而逐渐增加, 但在烧伤故障的发生前期, 温度值的检测精度和灵敏度并没有能量商高, 因此可见发生轻微烧伤故障时, 能量商值的变化更具有诊断优势, 这为我们实时监测双馈异步电机滑环轻微烧伤故障提供了理论依据。同时通过实验分析也可以拟置 $B_f \in (0, 0.15)$ 为滑环良好运行阈值区间, 该值也符合工程实践认证标准。

5 结语

本文主要研究双馈异步发电机电刷滑环烧伤故障的诊断方法。通过 PSCAD/EMTDC 仿真软件模拟滑环烧伤故障, 得到故障前后流经电刷滑环的励磁电流。基于 HHT 变换理论提取故障特征量并将仿真结果与实测励磁电流信号所得 Hilbert 谱图对比分析, 确定了高于 100 Hz 的周期性高频分量作为滑环烧伤故障诊断特征量的可行性; 同时提出能量商的诊断特征值概念, 计算不同故障等级下特征量的能量商值, 并与红外测温探头测量的滑环表面的温度值进行对比, 分析二者变化趋势, 确定了高于 100 Hz 的周期性高频分量的能量商在诊断滑环发生轻微烧伤故障时具有更高的精度和灵敏度, 具有实际的工程研究意义。

由于本文在实验分析中对电刷滑环直接施加励磁电压构成特定回路, 规避了电机内部构造产生的各种影响因素, 故在实际工程中该励磁电流特征高频分量仍保持周期性只是波动幅值较理想值偏小, 但作为故障特征量其变化依然显著, 因此具有进一步研究的价值。

参考文献

- [1] 吕勇, 雷涛, 黄国华, 等. 并网双馈风力机感应发电机效应研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(24): 154-158.
LÜ Yong, LEI Tao, HUANG Guohua, et al. Induction generator effect analysis of doubly-fed wind generator connected to the power system[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(24): 154-158.
- [2] 陈涛涛, 马宏忠. 双馈异步发电机电刷滑环系统状态监测技术研究现状与发展[J]. 电工电能新技术, 2013, 32(3): 89-94.
CHEN Taotao, MA Hongzhong. Survey of diagnosis method for brush and slip ring system of doubly-fed induction generators[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2013, 32(3): 89-94.
- [3] 高骏, 王磊, 周文, 等. 双馈风电机组电网背景谐波运行与谐波抑制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(23): 164-169.
GAO Jun, WANG Lei, ZHOU Wen, et al. Study on operating behavior and suppression strategy of doubly-fed induction generators wind turbine under harmonic grid voltage conditions[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(23): 164-169.
- [4] 苏咏梅, 王振宇, 易善明. 不同风力发电机组同时并网稳定性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(6):

101-107.
SU Yongmei, WANG Zhenyu, YI Shanming. Stability analysis for wind power integration with different WTGS[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(6): 101-107.

[5] 朱建军. 电刷的运行原理与维护方法浅析[J]. 碳素, 2015(4): 34-38.
ZHU Jianjun. Analysis on work principle and maintenance methods of the brush[J]. Carbon, 2015(4): 34-38.

[6] WURFEL M, HOFMANN W. Monitoring of the transmission properties of the rotor slip ring system of doubly-fed induction generators[J]. IEEE International Conference on Electric Machines and Drives, May 15-15, 2005, San Antonio, USA: 295-299.

[7] 龚中良, 彭远征. 界面温度对摩擦学过程激活机制研究[J]. 润滑与密封, 2014, 39(4): 30-34.
GONG Zhongliang, PENG Yuanzheng. Study on the activation mechanism of temperature to interfacial friction process[J]. Lubrication Engineering, 2014, 39(4): 30-34.

[8] 黄健萌, 高诚辉. 粗糙面变形特性对摩擦温度与接触压力的影响[J]. 农业机械学, 2012, 43(4): 203-207.
HUANG Jianmeng, GAO Chenghui. Influence of deformation characteristic of rough surface on frictional temperature and contact pressure[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(4): 203-207.

[9] 俞建卫, 魏巍, 尤涛. 滑动摩擦温度场的非线性分析[J]. 润滑与密封, 2011, 36(7): 5-8.
YU Jianwei, WEI Wei, YOU Tao. Nonlinear analysis of temperature field of sliding friction[J]. Lubrication Engineering, 2011, 36(7): 5-8.

[10] 陈碧辉, 曾旭. 发电机滑环温度的红外在线监测[J]. 云南水力发电, 2006, 22(5): 80-82.

[11] HOLZAPFEL C. Selected aspects of the electrical behavior in sliding electrical contacts[C] // 2011 IEEE 57th Holm Conference on Electrical Contacts (Holm), September 11-14, 2011, Minneapolis, USA: 1-9.

[12] ZHENG D H, ESEYE A T, ZHANG J H, et al. Short-term wind power forecasting using a double-stage hierarchical ANFIS approach for energy management in microgrids[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2017, 2(2): 136-145. DOI: 10.1186/s41601-017-0041-5.

[13] 王晓兰, 刘军. 双馈风力发电机电流谐波分析[J]. 兰州理工大学学报, 2012, 38(2): 68-72.
WANG Xiaolan, LIU Jun. Harmonic analysis of current in double-fed wind generator[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2012, 38(2): 68-72.

[14] 闫珺, 邢立华, 付红伟. 风电滑环电刷接触压力精密测试技术与试验研究[J]. 计测技术, 2013(6): 55-58.
YAN Jun, XING Lihua, FU Hongwei. Research on contact pressure precise measurement technology and test for brush probe of wind-power slip-ring[J]. Metrology & Measurement Technology, 2013(6): 55-58.

[15] 田振果, 傅成华, 吴浩, 等. 基于HHT的电能质量扰动定位与分类[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(16): 36-42.
TIAN Zhenguo, FU Chenghua, WU Hao, et al. Power quality disturbance for location and classification based on HHT[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(16): 36-42.

[16] WU Z, HUANG N E. A study of the characteristics of white noise using the empirical mode decomposition method[J]. Proceedings Mathematical Physical & Engineering Sciences, 2004, 460(2046): 1597-1611.

[17] 任志玲, 张媛媛. 基于改进的HHT变换和信心度的配电网故障选线[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(10): 8-13.
REN Zhiling, ZHANG Yuanyuan. Fault line selection of distribution network based on improved Hilbert-Huang transform and identification confidence degree[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(10): 8-13.

收稿日期: 2017-07-27; 修回日期: 2017-10-30

作者简介:

李思源(1994—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为双馈异步电机状态监测与故障诊断; E-mail: 1505326149@qq.com

马宏忠(1959—), 男, 教授, 研究方向为电力系统自动化设备在线监测及故障诊断; E-mail: hhmhz@163.com

陈涛涛(1991—), 男, 硕士研究生, 研究方向为双馈异步电机电刷滑环系统状态监测与故障诊断。E-mail: 619938873@qq.com

(编辑 魏小丽)