

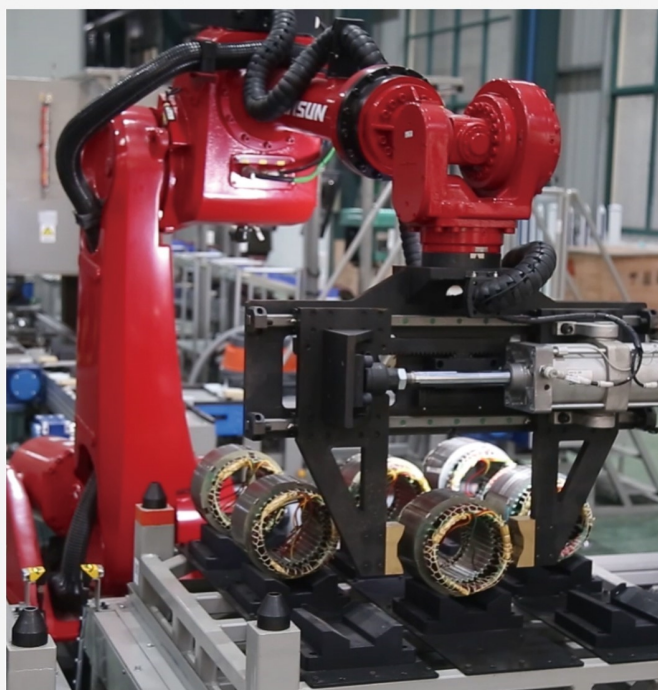
本文全文线上首发由
上海电器科学研究所
(集团) 有限公司
支持

刘繁, 崔江, 林华.
一种航空发电机旋转整流器故障在线
诊断技术.
电机与控制应用, 2022, 49(2): 104.



中国智能制造系统解决方案供应商联盟 (成员)
上海智能制造系统解决方案供应商 (首批)

电机·智能制造



咨询服务

规划设计

设计制造

信息化系统

项目实施



扫码联系
我们

联系人: 黄先锋 手机: 13501892388
上海电器科学研究所 (集团) 有限公司
上海电机系统节能工程技术研究中心有限公司
上海市武宁路505号9号楼6层

一种航空发电机旋转整流器故障在线诊断技术^{*}

刘 繁, 崔 江, 林 华

(南京航空航天大学 自动化学院, 江苏 南京 211106)

摘 要: 利用快速傅里叶变换(FFT)研究了一种角度轨迹监测技术,并将其用于航空发电机旋转整流器故障特征提取及在线诊断应用中。首先,连续采集发电机交流励磁机励磁电流信号,每相邻两次数据采集间隔同样的时间。其次,对每次采集的数据均进行FFT处理以获取故障特征信息,该过程在每两次数据采集的间隔内完成。每次处理得到的故障特征信息会形成连续的变化轨迹,通过对该轨迹的研究可以在线监测并诊断旋转整流器的故障模式。最后,通过试验对所提方法进行了验证。

关键词: 航空发电机; 旋转整流器; 快速傅里叶变换; 在线诊断

中图分类号: TM341 文献标志码: A 文章编号: 1673-6540(2022)02-0104-05

doi: 10.12177/emca.2021.175

An Online Diagnosis Technology of Aero Generator Rotating Rectifier Fault^{*}

LIU Fan, CUI Jiang, LIN Hua

(College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China)

Abstract: An angle trajectory monitoring technology is studied using fast Fourier transform (FFT) and applied to the fault feature extraction and online diagnosis of the rotating rectifier of aero generator. Firstly, the excitation current signal of the AC exciter of the generator is continuously collected, and the interval between two sampling points is kept constant. Secondly, FFT processing is performed on the data collected to obtain fault characteristic information, and this process is completed in the sampling intervals. The fault characteristic information obtained by each processing can form a continuous change trajectory, and the fault of the rotating rectifier can be monitored and diagnosed online through studying the trajectory. Finally, the proposed method is verified by experiments.

Key words: aero generator; rotating rectifier; fast Fourier transform (FFT); online diagnosis

0 引 言

航空三级式同步发电机是飞机电源系统的重要构件之一,其正常运行和飞机的安全息息相关^[1]。经国内外研究,位于此类发电机转子上的旋转整流器容易发生故障,影响发电机的工作甚至对飞机安全造成严重隐患,因此需要对旋转整流器进行故障诊断分析^[2-4]。目前该领域的诊断方法主要集中在信号处理上,或者采用将信号处理与人工智能相结合的方法。例如,文献[5]针

对旋转整流二极管开路故障,采用频谱分析对其电压和电流信号进行了研究;文献[6]研究了一种基于深度置信网络(DBN)的改进方法,先使用快速傅里叶变换(FFT)提取励磁电流信号的频谱信息,而后采用DBN对该信息进行自适应诊断处理。

目前对旋转整流器的故障诊断主要是在离线条件下进行的,但其一旦发生故障,会在短时间内对飞机安全造成影响,因此对故障的在线诊断尤为重要。一些学者提出了相关思路,例如,文献

收稿日期: 2021-11-09; 收到修改稿日期: 2021-12-28

^{*} 基金项目: 中央高校基本科研业务费项目(NS2021021); 航空科学基金项目(201933052001)

作者简介: 刘 繁(1995—),男,硕士研究生,研究方向为健康监测与故障诊断。

崔 江(1977—),男,博士,副教授,研究方向为健康监测与故障诊断。

[7]采用转子电流的二次谐波与基波的幅值比进行故障诊断,经离线和在线试验证明均能对单个旋转二极管实现故障定位,但在线诊断时存在动态响应延迟的问题;文献[8]提出了一种动态 FFT 技术,针对发电机输出电压信号采用 FFT 进行动态处理,得到其主频幅值的动态曲线,以该曲线的斜率作为故障特征进行诊断。但文献[8]中的斜率是通过曲线上某两点形成连线计算而得,这样处理导致特征的抗干扰能力较弱,其诊断结果也因此存在一定的误差。针对这一现象,本文在其基础上进行了进一步研究,提出了一种角度轨迹监测技术,所提取的故障特征抗干扰能力强,经试验证明能够快速检测出不同的故障模式,具有更好的诊断效果。

1 角度轨迹监测技术简介

1.1 幅值变化轨迹实现原理

本文采用 FFT 对交流励磁机的励磁电流信号进行处理^[9]。当发电机旋转整流器出现故障时,谐波电枢反应会在交流励磁机上感应出相应的电流分量,引起励磁电流的变化^[10]。这一现象可用图 1 表示,其中纵轴为励磁电流信号大小,横轴为采样时间,励磁电流信号按故障发生前后可分为 $x(n)$ 和 $y(n)$, $x(n)$ 表示正常状态, $y(n)$ 表示发生了故障。从图 1 中可以看出,故障后的信号也分为刚发生时短暂的过渡期和之后的稳定期。

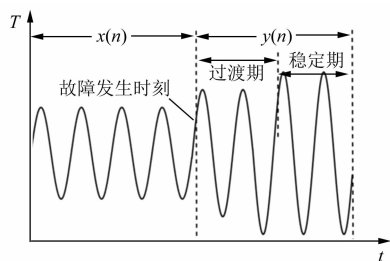


图 1 故障前后励磁电流波形

一般情况下,一个或多个二极管故障都会导致励磁电流本身产生波动,因此,原始信号在经过 FFT 处理后的频域幅值大小在故障前后也会时刻产生变化。本文针对 FFT 处理后谐波的幅值变化轨迹进行进一步研究,其幅值轨迹的提取思路与文献[8]中所用技术相近,先使用该技术对故

障前后的励磁电流信号进行处理。经研究,励磁电流经 FFT 处理后,其直流分量的幅值大小在故障前后具有非常明显的变化,其变化过程可用图 2 进行表示。

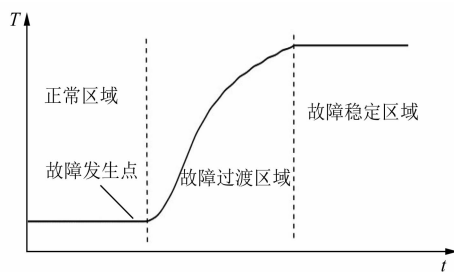


图 2 直流分量幅值轨迹变化

可以看出,在正常状态励磁电流的直流分量幅值大小一直保持稳定。而在故障发生后,幅值逐渐增大,进入故障过渡期,直到一段时间后再达到新的稳定,即维持在故障稳定状态。

1.2 角度变化轨迹实现原理

采用图 2 中直流分量的幅值变化轨迹可初步监测整流器二极管的健康状况,但该轨迹的变化趋势比较平缓,不太明显。在试验中,由于器件本身存在的误差,励磁电流信号大小会同样产生一定的误差,只通过该幅值轨迹来进行区分很容易造成错误诊断,因此要实现精准的在线诊断必须寻找变化更为明显的故障特征。观察图 2 轨迹,可以发现在故障点及以后很短的时间内,曲线的陡峭程度突然增大,因此可以通过监测该幅值轨迹各点处的角度变化来实施更为快速和精准的诊断。且监测角度变化还在一定的程度上抵消了试验所带来的误差现象。该角度变化轨迹的具体提取流程如图 3 所示。

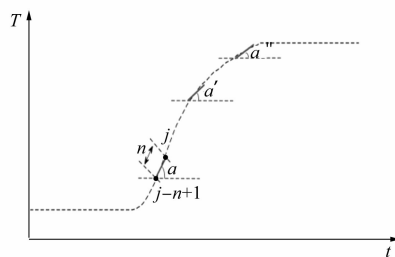


图 3 角度轨迹提取流程

对任意一点处的角度进行计算首先要选取一定长度的点进行直线拟合。图 3 中针对 j 点,选

取该点及其前 $n-1$ 个点一起构成直线拟合的区间,即每次直线拟合的点长为 n ,然后以拟合出的直线和水平轴形成夹角并计算其值,即为 j 点处的角度。再针对下一点 $j+1$ 和 $j-n+2$ 之间的 n 点进行直线拟合并计算角度,以此类推,最终得到连续的角度变化轨迹。由于直流分量幅值轨迹的变化趋势是先上升再不变,角度轨迹的变化趋势是先增大再下降,其变化的响应速度更快,变化过程更加明显。采用该角度轨迹作为一组故障特征,记为 f_a 。另外经研究,基波的幅值轨迹跟直流分量的角度轨迹有着相似的变化趋势,因此再采用基波幅值轨迹作为第二组故障特征,记为 f_T ,采用这两组故障特征实现旋转整流器的在线诊断具有更好的效果。

其中,直线拟合采用最小二乘法进行线性拟合,对满足直线方程的 x 和 y 有如下关系:

$$y = kx + b \tag{1}$$

式中: k 为斜率; b 为截距。

对于 n 组数据 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, n$, 其中 x_i 均间隔相同的长度,因此 x_i 值认定无误,所有误差只与 y_i 相关,则利用最小二乘法进行直线拟合时要求观测值 y_i 偏差的加权平方和为最小,需满足如下方程:

$$\hat{b}N + \hat{k} \sum x_i = \sum y_i \tag{2}$$

$$\hat{b} \sum x_i + \hat{k} \sum x_i^2 = \sum x_i y_i \tag{3}$$

式中: $\hat{k}$ 和 $\hat{b}$ 分别为 k 和 b 的最佳估计值。

在试验中,由于存在噪声的干扰,还要对角度轨迹进行相应的滤波操作。本文采用多种滤波方案进行对比,最终选取卡尔曼滤波进行去噪,具有良好的效果。

1.3 特征提取和诊断流程

将该角度轨迹监测技术应用于航空发电机旋转整流器故障特征提取和诊断中,具体流程如下:

(1) 采集发电机的励磁电流数据样本集,并对数据样本集进行划分:一份作为训练样本产生故障字典,另一份作为测试样本评估方法的效果。

(2) 对不同故障模式下的训练样本采用 FFT 进行连续处理,提取出 f_a 和 f_T 作为故障特征信息,并存入故障字典。

(3) 把测试样本同样采用本文方法进行处理并提取故障特征信息,然后采用故障字典方法进

行匹配完成故障诊断。

2 试验验证

2.1 试验平台介绍

利用一台三级式交流同步发电机作为试验平台,其结构组成如图 4 所示。平台主要由变频器、三相异步调速电机(模拟原动机)、民用三级式无刷同步交流发电机、电流霍尔传感器、阻性负载与数据采集系统等部分组成。

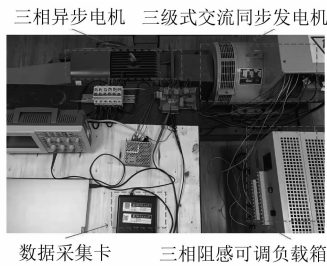


图 4 试验平台组成

为了实现对试验平台中旋转整流器的任意一个二极管开路故障的人为控制,本文对旋转整流器做了一些改装,改装后二极管的故障可通过开关控制,方便了试验。发电机和电动机的详细参数如表 1 所示。

表 1 试验平台主要参数

发电机参数	参数值	电机参数	参数值
额定功率/kW	7.5	额定功率/kW	11
额定电压/V	400	额定线电压/V	380
额定转速/(r·min ⁻¹)	1 500	额定转矩/(N·m)	70
极对数	2	极对数	2
额定频率/Hz	50	额定电流/A	22.5

试验中,分别在空载、0.34 kW 阻性负载、1.48 kW 阻性负载、0.38 kW 阻性和 0.36 kVA 感性混合负载、0.64 kW 阻性和 0.68 kVA 感性混合负载下对故障特征信号进行采集。得到不同负载下各故障模式下的励磁电流波形如图 5 所示。在每种负载条件下均得到 500 个样本,将其中 250 个作为训练样本,另外 250 个作为测试样本进行诊断。

2.2 试验结果分析

首先根据文献[8]中幅值轨迹的提取技术,对每个数据样本进行定长为 256 点、每次间隔长

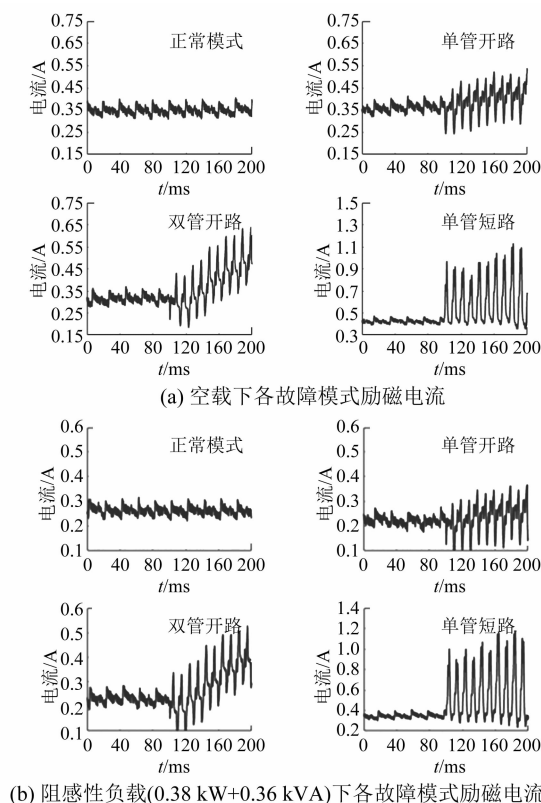


图5 不同负载下各故障模式励磁电流

度为 10 个数据点的连续 FFT 处理。对每一个包含 2 000 点的数据样本共进行了 180 次连续 FFT 处理,得到其直流分量幅值变化轨迹。

再对直流分量幅值轨迹进行直线拟合并提取角度特征。经多次研究分析,采取每次长度为 10 个数据点的直线拟合处理效果较好。再计算每次拟合所得的直线与水平轴的角度。由于试验存在噪声的干扰,其幅值轨迹的误差波动较大,这样在进行直线拟合后计算得到的角度轨迹是存在较大误差的,因此最后要进行滤波操作。以空载情况为例,本文将计算出的角度轨迹采用中值滤波、小波滤波和卡尔曼滤波等多种滤波方案进行对比研究,具体对比如图 6 所示。

由图 6 可见卡尔曼滤波的效果最好。经过卡尔曼滤波后的角度轨迹在旋转整流器不同的故障模式下有着明显的区分度,由此提取的 $f_{\max}$ 可以作为一个故障特征来实现旋转整流器的在线诊断。另外,对基波的幅值轨迹同样进行卡尔曼滤波处理,处理结果如图 7 所示,可见基波的幅值轨迹同样有着较大的区分度,由此提取的 $T_{\max}$ 可以

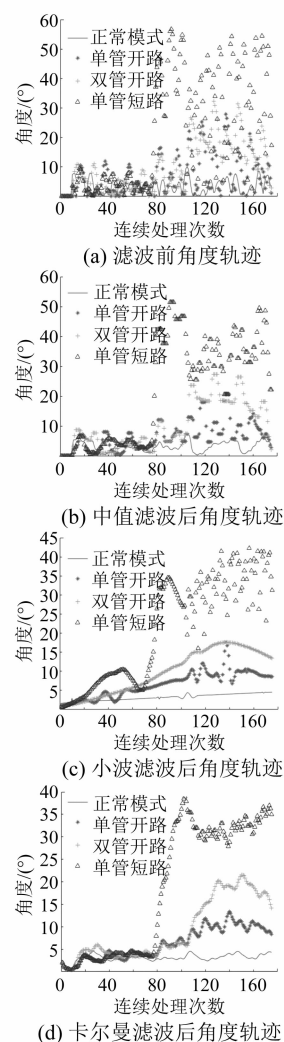


图6 多种滤波方案对比

作为另一组故障特征。

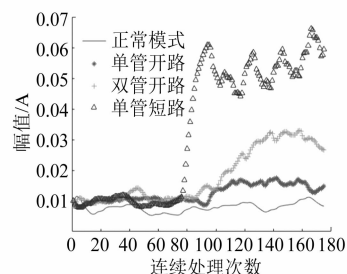


图7 卡尔曼滤波后基波幅值轨迹

在不同的阻性负载条件下,上述两种变化轨迹依然与空载条件下保持一致,均具有良好的区分度,提取出的故障特征均可以快速检测出故障。再进行故障分类,提取测试样本的故障特征并通

过训练样本生成的故障字典进行模式识别,具体操作过程以图 8 为例,其中测试样本轨迹是使用单管短路样本处理形成的。由图 8 可见,该测试样本的轨迹与单管短路轨迹之间的距离最近,因此故障匹配时采用欧氏距离法(ED)来计算轨迹间的距离。该测试样本轨迹经 ED 方法计算后与单管短路轨迹间的距离最小,因此判定为单管短路故障。

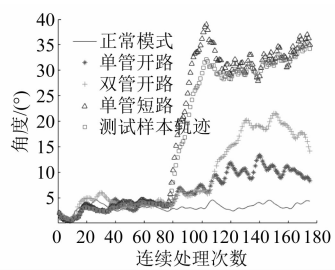


图 8 故障分类操作过程

具体的故障诊断结果如表 2 所示。此处,仿真软件为 Matlab2019a,计算机主频为 2.9 GHz,内存为 16 GB,操作系统为 Windows 10,其中故障分析时间是 FFT 处理和卡尔曼滤波的时间之和。可见本文所提出的角度轨迹在线诊断技术不仅在特征提取上速度快,而且诊断正确率高,具有良好的效果。

表 2 不同工况下诊断正确率

负载类型	故障分析时间/ms	诊断正确率/%
空载	0.3	100
0.34 kW	0.3	100
0.38 kW+0.36 kVA	0.3	100
0.64 kW+0.68 kVA	0.3	100
1.48 kW	0.3	100

3 结 语

本文利用 FFT 实现了一种角度轨迹监测技术,并将其应用于航空发电机旋转整流器的在线诊断应用中。通过试验可以得出如下结论:

(1) 该角度轨迹监测技术是可行和有效的,可以应用于航空发电机旋转整流器的故障诊断技术中。

(2) 通过该技术提取的故障特征区分度高,特征提取速度快,完全可以实现故障的在线诊断,并取得良好的效果,为航空发电机旋转整流器的快速诊断提供了新思路。

【参考文献】

[1] 刘海港,董芷岑. 航空发电机综合故障诊断技术研究[J]. 电子测量技术,2014,37(3): 125.

[2] KELLER K, SWEARINGEN K, SHEAHAN J, et al. Aircraft electrical power systems prognostics and health management [C] // 2006 IEEE Aerospace Conference, 2006.

[3] BATZEL T D, SWANSON D C. Prognostic health management of aircraft power generators [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2009,45(2): 473.

[4] PAN H, DONG E, JIANG Y, et al. Prognostic and health management for aircraft electrical power supply system [C] // Proceedings of the IEEE 2012 Prognostics and System Health Management Conference (PHM-2012 Beijing), 2012.

[5] STEVEN J, JUDITH A. Open-circuit fault analysis of diode rectified multiphase synchronous generator for DC aircraft power systems [C] // IEEE International Electric Machines and Drives Conference, 2013.

[6] 崔江,郭瑞东,张卓然,等. 基于改进 DBN 的发电机旋转整流器故障特征提取技术[J]. 中国电机工程学报,2020,40(7): 2369.

[7] PANG J, LIU W G, WEI Z H, et al. Online diode fault detection in rotating rectifier of the brushless synchronous starter generator [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2020,16(11): 6943.

[8] FENG S, CUI J, ZHANG Z. Fault diagnosis method for an aerospace generator rotating rectifier based on dynamic FFT technology [J]. Metrology and Measurement Systems, 2021,28(2): 269.

[9] 蒋刚,肖建,郑永康,等. 一种改进的快速傅里叶变换算法及其在故障诊断中的应用[J]. 计算机应用,2006,26(2): 448.

[10] 王瑾,严仰光. 旋转整流器式无刷交、直流发电机谐波电枢反应研究[J]. 南京航空航天大学学报, 2000,32(3): 257.