

基于 DST 的调相机转子轻微匝间短路故障诊断*

张玉良^{1,3}, 马宏忠¹, 蒋梦瑶¹, 蔚超², 林元棣²

(1. 河海大学能源与电气学院 南京, 211100)

(2. 国网江苏省电力有限公司电力科学研究院 南京, 211103)

(3. 徐州重型机械有限公司 徐州, 221000)

摘要 转子绕组匝间短路故障是调相机的一种常见故障,一旦就会出现直接影响调相机在系统中的无功输出。由于调相机在运行过程中时常要对无功功率进行调节,仅用单独的特征量难以准确地对故障进行诊断,极易出现误判。针对此问题,提出一种基于 DS 证据理论(DS evidence theory,简称 DST)的调相机转子轻微匝间短路故障的诊断方法,综合利用振动信号和励磁电流中的感应谐波对故障进行诊断。首先,通过随机森林计算单独特征量下的故障概率;其次,通过 DST 的组合规则将二者的结果进行综合诊断;最后,通过实验进行验证。实验结果表明,该方法诊断的正确率均高于单独特征量的诊断,可以有效提高调相机转子轻微匝间短路故障识别的准确性。

关键词 调相机;转子匝间短路;振动分析;随机森林;DS 证据理论;故障诊断

中图分类号 TM342

引言

近些年在电网中应用的大容量同步调相机^[1-4]结构复杂,易发生故障,其中转子绕组匝间短路是常见的故障之一^[5-6]。国内外学者对同步调相机转子绕组匝间短路故障的诊断进行了研究。文献[7]通过调相机电枢电流与励磁电流的变化来判断故障情况,结果表明该方法仅能对故障进行定性分析,无法进行定量描述。文献[8]通过振动信号对调相机的部分结构故障进行诊断,没有考虑到一些电磁故障产生的影响。文献[9]利用气隙磁密、转子不平衡磁拉力和定子环流等特征分析了故障的变化规律,从而准确判断了调相机转子气隙偏心故障。文献[10]利用无功功率、转子和定子的振动信号对转子绕组匝间短路故障进行诊断,有效提高了故障识别率。目前,通过异类信息融合对于调相机转子绕组匝间短路故障的诊断方法研究较少^[11]。

笔者提出一种基于 DST 的调相机转子轻微匝间短路的故障诊断方法,通过融合异类信息来提高转子轻微匝间短路的识别率。首先,在故障特征中融合机械与电气特征信号,即调相机定子振动信号 2 倍频和励磁电流信号 1 倍频分量;其次,利用随机森林算法得到二者单独的故障概率,通过 DST 进行融合诊断,获取较高置信度结果;最后,通过对实验

同步电机设置 6 种短路故障,采集各种短路故障诊断所需信号,验证了该方法在调相机转子匝间短路故障中应用的可靠性。将结果与单特征的故障识别率对比分析,可以发现该方法减少了单一特征及传感器产生的偶然性和识别不准性,提高了对调相机转子匝间短路故障诊断的正确率。

1 定子振动特性分析

在常规的振动故障诊断方法中,对于调相机转子绕组匝间短路故障一般主要分析转子振动信号,忽略定子振动信号,但是诸如转子不平衡、转子短路故障引起的转子振动特征大多相似,因此仅靠转子的振动特征不能准确地对这些故障进行判别^[12]。在实际中调相机作为一个整体,转子绕组出现匝间短路故障将会使气隙磁场发生畸变,在转子上发出不平衡磁拉力,引起转子周期性不平衡振动,同时在定子上发出脉振电磁力,使定子产生周期性不平衡振动。转子不平衡故障会对气隙磁场和定子振动产生不同的影响,因此对调相机的振动监测应同时考虑其定子径向的振动,这将有利于调相机转子匝间短路故障的诊断。

调相机处于正常运转状态时,其气隙磁动势可表示为

* 国网江苏省电力公司科技资助项目(J2019114);111 引智计划资助项目(B14022);国家自然科学基金资助项目(51577050)

收稿日期:2020-11-25;修回日期:2020-12-30

$$f(\theta_s, t) = F_r \cos(\omega t - \theta_s) + F_s \cos(\omega t - \theta_s - \phi - \pi/2) \quad (1)$$

其中： ω 为转子机械角频率， $\omega = 2\pi f$ ； θ_s 为定子机械角度； ϕ 为发电机内角。

在转子发生匝间短路故障时，该故障点所在的磁极安匝数会减小，其对电枢磁场会产生等价于在正常的气隙磁场中增加了反向运行磁场的影响。令故障点处的槽间机械角 $\alpha \in (0, \pi)$ ，则短路匝绕组产生的反向磁动势可表示为

$$F_d(\theta_r) = \begin{cases} -\frac{I_f N (2\pi - \alpha)}{2\pi} \left(-\frac{\alpha}{2} \leq \theta_r \leq \frac{\alpha}{2} \right) \\ I_f N \alpha / 2\pi \quad (\text{其他}) \end{cases} \quad (2)$$

其中： θ_r 为转子机械角度； I_f 为励磁电流； N 为在同一槽中出现匝间短路故障的绕组匝数。

把 $F_d(\theta_r)$ 进行傅里叶展开，即

$$F_d(\theta_r) = -\frac{2NI_f}{\pi} \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{\sin(n\alpha/2)}{n} \cos(n\theta_r) \right] \quad (3)$$

当 $\alpha \neq \frac{2k\pi}{n}$ ($k=1, 2, \dots$)时，调相机内部气隙主磁场将会产生各次谐波，令 $n=1, 2$ ， $\theta_r = \omega t - \theta_s$ ，则

$$F_d(\theta_s) = -F_{d1} \cos(\omega t - \theta_s) - F_{d2} \cos(2\omega t - 2\theta_s) \quad (4)$$

其中： $F_{d1} = \frac{2NI_f}{\pi} \sin \frac{\alpha}{2}$ ； $F_{d2} = \frac{NI_f}{\pi} \sin \alpha$ 。

因此，在调相机出现转子绕组匝间短路故障时，其气隙磁动势可改写为

$$f'(\theta_s, t) = f(\theta_s, t) + F_d(\theta_s) = F_p \cos(p\omega_r t - p\theta_s - \beta) - F_{d1} \cos(p\omega_r t - \theta_s) - F_{d2} \cos(2\omega_r t - 2\theta_s) \quad (5)$$

在理想状态下，调相机转子匝间短路故障将会使气隙磁导出现改变，此时气隙磁导可写为

$$\Lambda(\theta_s, t) = \Lambda_0 + \Lambda_e \cos(\omega t - \theta_s) \quad (6)$$

其中： Λ_0 为气隙磁导的常值部分； Λ_e 为气隙磁导的偏心部分。

通常状况下 $\Lambda_e \ll \Lambda_0$ ，此处不考虑纯偏心故障，忽略 Λ_e 部分。

调相机转子匝间短路故障会引起气隙 f_r 、 $2f_r$ 的附加谐波磁动势。由式(5)、式(6)可得，由气隙磁密引起的电磁力频率及幅值如表1所示(忽略较小项 F_{d2} 和 Λ_e)。

由调相机的振动特性，定子因低频电磁力发生形变时邻近节点间隔较远，整体刚度较低，因而振幅较大；反之，定子因高频电磁力发生形变时邻近节点间隔较近，整体刚度较高，因而振幅较小，因此常规

表1 调相机电磁力的频率及幅值

Tab.1 Frequency and amplitude of the synchronous condenser magnetic force

频率	电磁力幅值
f_r	$(2\Lambda_0^2 F_{d1} F_{d2} + \Lambda_0 \Lambda_e F_{d1}^2) / 8\mu_0$
$2f_r$	$\Lambda_0^2 F_{d1}^2 / 4\mu_0$
$3f_r$	$(2\Lambda_0^2 F_{d1} F_{d2} + \Lambda_0 \Lambda_e F_{d1}^2) / 8\mu_0$
$4f_r$	$(2\Lambda_0 F_{d2} + \Lambda_0 F_{d1})^2 / 8\mu_0$

状况下仅考虑低频振动信号，即 f_r 和 $2f_r$ 频率振动。由于 F_{d2} 和 Λ_e 值过小，导致 f_r 变化不明显，因此转子出现匝间短路故障时，仅有 $2f_r$ 频率的振动会出现较大变化，且 F_{d1} 的幅值在故障时又会一定程度上增加，即 $2f_r$ 频率的电磁力幅值会增加。

综上所述，基于调相机产生的电磁力及振动特性，并结合文献[13]，可以确定对于同步调相机，其转子出现匝间短路故障时，定子 $2f_r$ 频率的振动幅值会显著增大。

2 励磁电流谐波特性分析

当调相机处于正常状态下，其励磁磁场和电枢磁场的极对数均为 p ，此时转子和电枢磁场同步旋转，其转速为 $60f/p$ ，励磁电流中不会出现由电枢磁场感应出的谐波。但转子绕组出现匝间短路故障后，气隙主磁场中便会同步出现 nf_r ($n=1, 2, \dots$)谐波，并在定子绕组中感应出相应频率的电动势^[14-16]。对于定子绕组中的谐波 nf_r ，相当于转子极对数为 n 、转子旋转机械角频率为 ω 时，在定子绕组中感应的电势，同时转子绕组将感应出谐波电流。

若 $n \neq pm$ ($m=1, 2, \dots$)，则调相机定子绕组内三相电动势不对称，出现对应频率的椭圆形旋转磁场，并可以分为2种，即转速为 $60nf_r/p$ 的正序磁场与转速为 $-60nf_r/p$ 的负序磁场。定子绕组的构造确定了主磁场的极对数，励磁磁场的极对数变化不会对其产生影响，即电枢磁场的极对数始终为 p ，不受谐波影响。若 $n = pm$ ($m=1, 2, \dots$)，则调相机定子绕组内三相电动势对称，出现对应频率的圆形旋转磁场，转速为 $60nf_r/p$ 。调相机励磁电流谐波分析如表2所示。

综上所述，由于线电流 f_r 频率谐波电流较小，因此当调相机转子出现匝间短路故障时，励磁电流中会产生 nf_r ($n > 1$)频率的感应谐波，且变化较为明显。

表2 调相机励磁电流谐波分析

Tab.2 Harmonic analysis of excitation current of synchronous condenser

特性	电枢电流谐波 f_s	
	$nf_r (n \neq pm)$	$nf_r (n = pm)$
三相电流是否对称	否	是
电枢反应磁场极对数	p	p
电枢反应磁场转速 n_s	$\pm 60nf_r/p$	$60nf_r/p$
转子转速 n_r	$60f_r$	$60f_r$
谐波电流频率 f_i	$ n-p f_r$ $(n+p)f_r$	$ n-p f_r$

3 多信号结合的故障诊断方法

传统的故障诊断方法均是先利用传感器采集到单一的信号数据,然后提取故障特征进行分类诊断,直接得出结论。笔者将传统的故障诊断方法进行改进,将2种信号分别提取故障特征后,通过随机森林算法得到故障概率,再通过DST将2种结果相结合,从而实现调相机转子绕组匝间短路故障的最终诊断,基于DST的调相机转子绕组匝间短路故障诊断流程如图1所示。

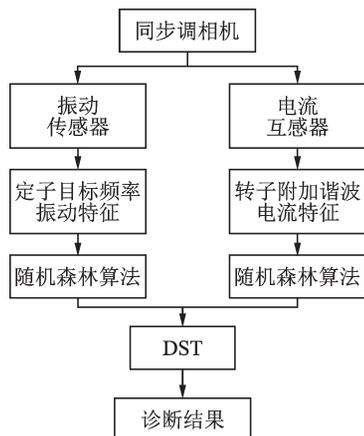


图1 基于DST的调相机转子绕组匝间短路故障诊断流程图

Fig.1 The flow chart of fault diagnosis of rotor winding inter-turn short-circuit of synchronous condenser based on DST

该方法相较于传统的故障诊断方法减少了误判的情况,提升了调相机转子绕组匝间短路故障诊断的准确性。

4 随机森林算法

随机森林算法^[17-19]是机器学习中常用的一种算法,其主要包含决策树构造和集成投票两个步骤,具

有强抗噪力、运算速度快及较强的鲁棒性等优点。

4.1 决策树构造

决策树的实质是一种归纳法,在无序的训练样本中归纳出树状分类器,C4.5是目前较为常用的一种决策树构造算法。C4.5算法是对指定数据样本进行递归映射来完成决策的,并选择信息增益作为特征量。假设 D 为指定样本训练集, A 为决策特征, n 为 A 的属性数量, m 为样本类别, D_i 为按特征将 D 分类后的子集, p_i 为各类的概率,则样本训练集的信息熵为

$$\text{Info}(D) = -\sum_{i=1}^m p_i \log_2 p_i \quad (7)$$

样本训练集的经验条件熵为

$$\text{Info}(D|A) = \sum_{i=1}^n \frac{|D_i|}{|D|} \text{Info}(D_i) \quad (8)$$

其中: $\text{Info}(D_i)$ 为子集 D_i 的信息熵。

样本训练集在 A 下的惩罚系数为

$$\text{Info}_A(D) = \sum_{i=1}^n \frac{|D_i|}{|D|} \log_2 \frac{|D_i|}{|D|} \quad (9)$$

样本训练集的信息增益为

$$\text{Gain}(A) = \frac{\text{Info}(D) - \text{Info}(D|A)}{\text{Info}_A(D)} \quad (10)$$

4.2 改进集成投票

集成投票通过不同的分类器对同一问题进行决策,可以大幅提高整体分类的准确性。常规的投票方法为简单投票,即最终得票多的为分类结果,但这种方法分配了同样的权重给不同的分类器,无法辨别强弱分类器之间的差异,会降低整体的准确性。因此,将投票方法稍作改进,调整权重分配。

将准确率大于阈值,且漏报率小于阈值的决策树放入A组;将准确率大于阈值,且漏报率不小于阈值的决策树放入B组。令A组各元素的权重为其自身漏报率,B组各元素的权重为其自身准确率,则某样本的最终分类结果如下:

1) 若B组的元素在权重加成后仍判断为故障样本,则将该结果认定为最终分类结果;

2) 若B组的元素在权重加成后判断为正常样本,则将A组对该元素的权重加成认定为最终分类结果。

随机森林算法利用决策树构造和集成投票得到输出量,最终的投票结果表示了对某样本的支持率,因而可将该投票结果作为DST的证据,即各故障结果的得票数占总数的比值可作为DST的基本概率分配(basic probability assignment,简称BPA)。

5 DS证据理论

DST是一种通过证据和组合来解决具有不确定性问题的数学方法^[20-22]。假设某识别框架集合 $\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$,则该集合中的各个元素互斥。集合 Θ 中的所有子集总称为 Θ 的幂集 2^Θ 。DST包含如下3种基本定义:

1) 假设函数 m 和幂集 2^Θ 中的所有子集均有一一对应的关系,且满足

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0 \\ \sum_{A \subseteq \Theta} m(A) = 1 \end{cases} \quad (11)$$

其中: \emptyset 表示空集。

此时函数 m 为 Θ 的BPA,也称为mass函数,其中 $m(A)$ 为证据对 A 的支持率。

2) 假设在 Θ 中,满足

$$\text{Bel}(A) = \sum_{B \subseteq A} m(B) \quad (12)$$

则 $\text{Bel}(A)$ 为 A 的信任函数,即对 A 的信任度。

3) 假设在 Θ 中,满足

$$\text{Pl}(A) = 1 - \text{Bel}(A) \quad (13)$$

则 $\text{Pl}(A)$ 为 A 的似然函数,即对否定 A 的信任度。

$\text{Pl}(A)$ 的计算公式为

$$\text{Pl}(A) = 1 - \sum_{A \cap B = \emptyset} m(B) = \sum_{A \cap B \neq \emptyset} m(B) \quad (14)$$

令 U 表示样本空间,则 $\forall A \subseteq U$,在样本空间 U 中的 n 个mass函数的Dempster组合规则为

$$(m_1 \oplus m_2 \oplus \dots \oplus m_n)(A) = \frac{1}{K} \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = A} m_1(A_1) m_2(A_2) \dots m_n(A_n) \quad (15)$$

其中: K 为归一化常数。

K 的计算公式为

$$K = \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n \neq \emptyset} m_1(A_1) m_2(A_2) \dots m_n(A_n) = 1 - \sum_{A_1 \cap A_2 \cap \dots \cap A_n = \emptyset} m_1(A_1) m_2(A_2) \dots m_n(A_n) \quad (16)$$

对于同一命题的多个BPA,需要满足如下规则才能进行相应的结合。

假设 $A_1, A_2 \subset \Theta$,且

$$\begin{cases} m(A_1) = \max \{m(A_i), A_i \subset \Theta\} \\ m(A_2) = \max \{m(A_i), A_i \subset \Theta \text{ 且 } A_i \neq A_1\} \end{cases} \quad (17)$$

若满足如下条件

$$\begin{cases} m(A_1) - m(A_2) > \epsilon_1 \\ m(\Theta) < \epsilon_2 \\ m(A_1) > m(\Theta) \end{cases} \quad (18)$$

则 A_1 为最终结果。

式(18)说明,需要进行判定的目标命题与其他命题的BPA之差大于阈值 ϵ_1 ,不确定性函数的BPA

小于阈值 ϵ_2 ,目标命题概率大于不确定性函数概率。

6 调相机转子轻微匝间短路实验

6.1 实验平台

本次实验是基于河海大学电力系统动态模拟实验室的同步电机进行的故障模拟实验。对实验电机转子绕组设置不同的短路匝数及过渡电阻,并在额定过励状态下运行,模拟不同程度的调相机转子绕组匝间短路状况,实验原理图见图2。实验平台包括振动传感器、采集卡、同步电机及其控制系统,同时为记录振动信号,在实验电机定子外壳上不同位置安装了振动传感器。现场实验及振动传感器分布如图3所示,在不同位置共布置了5个振动传感器。其中:5号传感器测量的是轴向振动;4号传感器下方因有电机的散热风扇,实测波形中含有较大噪声分量;1号传感器处于定子外部边缘位置。因此,笔者选取2,3号位置的振动信号作为诊断数据。

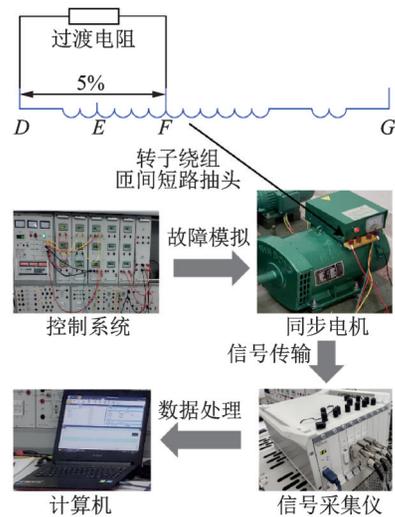


图2 实验原理图

Fig.2 Schematic diagram of experimental

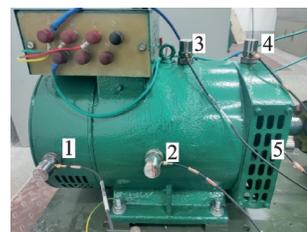


图3 现场实验及振动传感器分布

Fig.3 Field experiment and vibration sensor distribution

6.2 实验结果及分析

为模拟调相机的工作状态,使实验同步电机空

载运行于额定过励状态,通过调整使得功率因数低于 0.1,让电机接近于纯无功状态,实验同步电机参数如表 3 所示。

图 4 为正常运行振动信号,图 5 为转子匝间短路 1.79% 振动信号,其中采样频率为 10 kHz。由图可知,去噪后的振动波形没有明显区别,无法直接通过

表 3 实验同步电机参数

Tab.3 Parameters of experiment synchronous motor

参数	数值	参数	数值
额定功率/kW	2	极对数	2
额定电压/V	400	转子绕组总电阻/ Ω	150
额定电流/A	3.6	转子绕组总匝数	4 640

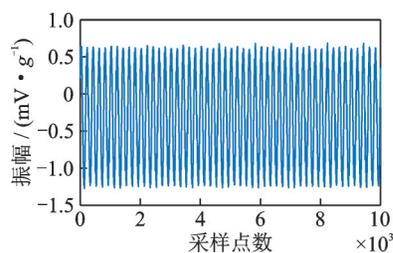


图 4 正常运行振动信号

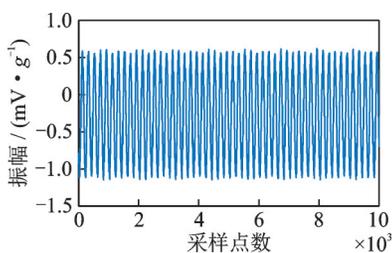


图 5 转子匝间短路 1.79% 振动信号

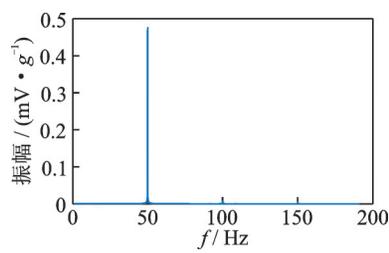


图 6 正常运行振动信号频谱图

Fig.4 Vibration signal of normal operation Fig.5 Vibration signal of rotor inter-turn short-circuit fault 1.79% Fig.6 Spectrum diagram of vibration signal in normal operation

为确定调相机转子匝间短路故障的同时分析其故障程度,在实验同步电机转子绕组 0% 抽头与 5% 抽头之间串联不同阻值的过渡电阻,以模拟不同百分比的匝间短路状况。在额定过励状态下,总励磁电流 $I_f = 0.88 \text{ A}$,过渡电阻支路电流为 I'_f ,即可模拟调相机转子绕组匝间短路 $I'_f/I_f \times 5\%$ 的故障。实验同步电机处于调相机运行状态下,在正常运行与不同程度的转子匝间短路故障时,定子 2 倍频的振动幅值如表 4 所示。

在实际设置中,故障程度的差值较小,且由于过渡电阻的存在,励磁电流不断小幅下降不易稳定,导

表 4 定子 2 倍频振动幅值

Tab.4 Amplitude of stator vibration

过渡电阻/ Ω	支路电流/A	故障程度/%	$2f_r$ 振幅/ ($\text{mV} \cdot \text{g}^{-1}$)
—	0	0	0.476 5
20.00	0.315	1.79	0.547 5
10.00	0.430	2.44	0.666 5
8.20	0.480	2.73	0.760 5
5.00	0.580	3.29	0.864 0
1.00	0.800	4.55	0.911 0
0.25	0.864	4.91	1.009 5

电机定子外壳径向振动的幅值来判断转子绕组匝间短路故障。因此,需要对振动信号进行预处理并提取有效特征量。

将上述 2 组波形先送入带通滤波器,再进行快速傅里叶分析得到频谱图,正常运行振动信号频谱图如图 6 所示,转子匝间短路 1.79% 振动信号频谱图如图 7 所示。两对极调相机定子振动基波为 25 Hz,其 2 倍频为 50 Hz,由图可看出,调相机定子 2 倍频在发生转子匝间短路故障时明显增加,电机正常运行时定子 2 倍频幅值为 95.3,发生匝间短路故障时定子 2 倍频幅值增至 109.5,其变化结果与前述理论分析相符。

致采集到的振动信号也在不断变化,上下偏差较大,极易造成误判。另外,工程实践中引起调相机振动变化的因素很多,单纯利用振动特征还不能诊断转子匝间短路故障,因此还需考虑其他电气特征进行综合诊断。

图 8 为转子匝间短路 1.79% 励磁电流 PSD 图,图 9 为转子匝间短路 1.79% 励磁电流频谱图。由图可知,在转子匝间短路时转子绕组出现了 f_r (25 Hz), $4f_r$ (100 Hz), $8f_r$ (200 Hz), $12f_r$ (300 Hz) 的感应谐波电流,以及较小的 $2f_r$ (50 Hz), $6f_r$ (150 Hz), $10f_r$ (250 Hz) 频率的谐波成分。考虑到 $2f_r$, $6f_r$ 及 $10f_r$ 频率谐波电流过小,因此选取 f_r , $4f_r$, $8f_r$ 及 $12f_r$ 谐波电流作为转子匝间短路故障的征兆。

表 5 为转子绕组感应谐波电流幅值。由表可知,在转子绕组发生匝间短路故障后,励磁电流会出现感应谐波电流,与前述理论推导一致,但励磁电流谐波的幅值波动较大,特别是 $4f_r$, $8f_r$ 及 $12f_r$ 频率的谐波电流,极易出现误判。因此,选取励磁电流中频率 f_r 的感应谐波作为一种转子匝间短路故障的特征。

设 $\text{RF}_1 \sim \text{RF}_7$ 分别代表电机正常、过渡电阻 20, 10, 8.2, 5, 1 及 0.25 Ω 的转子匝间短路情况。为减少

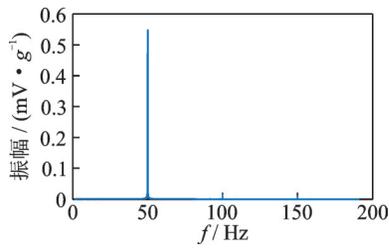


图 7 转子匝间短路 1.79% 振动信号频谱图

Fig.7 Spectrum diagram of vibration signal in rotor inter-turn short-circuit fault 1.79%

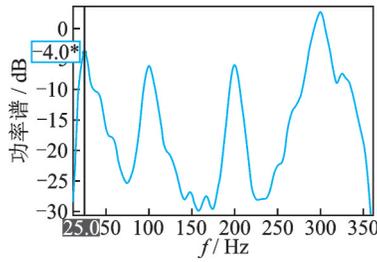


图 8 转子匝间短路 1.79% 励磁电流功率谱密度图

Fig.8 Power spectral density diagram of excitation current in rotor inter-turn short-circuit fault 1.79%

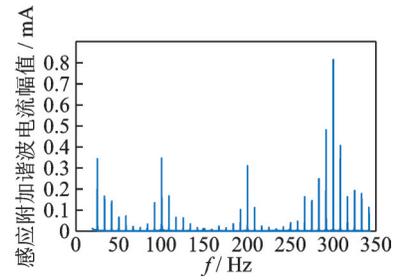


图 9 转子匝间短路 1.79% 励磁电流频谱图

Fig.9 The spectrum diagram of excitation current in rotor inter-turn short-circuit fault 1.79%

表 5 转子绕组感应谐波电流幅值

Tab.5 The amplitude of the rotor winding induced harmonic current

过渡电阻/ Ω	I/mA			
	f_r	$4f_r$	$8f_r$	$12f_r$
—	0	0	0	0
20.00	0.345	0.348	0.312	0.816
10.00	0.399	0.947	0.403	0.938
8.20	0.425	0.389	0.118	1.690
5.00	0.549	0.424	0.204	2.598
1.00	0.592	0.794	0.279	1.090
0.25	0.663	1.168	0.276	2.008

样本的偶然性并便于计算,振动信号取每 8 192 个点为 1 组样本,并同步提取励磁电流交流分量。实验采集上述电机每种状态下振动和电流信号各 120 组样本,共计 1 680 组数据作为训练样本,并额外再提取 70 组数据作为测试样本。在诊断过程中,先对故障的振动特征利用随机森林得到分类概率,再对故障的电流特征利用随机森林得到分类概率,最后通过 DST 对故障进行综合诊断得到最终结果。表 6 为部分样本综合诊断过程。

由表 6 可见,当调相机转子绕组发生轻微匝间短路故障时,由不同的特征量对故障进行诊断可能会有不同的结果。当转子匝间短路 2.73% 时,由振

表 6 部分样本综合诊断过程

Tab.6 The comprehensive diagnosis process of partial samples

实际故障	诊断特征	RF ₁	RF ₂	RF ₃	RF ₄	RF ₅	RF ₆	RF ₇	诊断结果
RF ₁	振动	0.915 0	0.085 0	0	0	0	0	0	RF ₁
	电流	0.841 0	0	0	0.006 0	0.142 0	0.011 0	0	RF ₁
	DST	0.998 8	0.001 2	0	0	0	0	0	RF ₁
RF ₂	振动	0.003 0	0.746 0	0.251 0	0	0	0	0	RF ₂
	电流	0	0.599 0	0.001 0	0	0.384 0	0.016 0	0	RF ₂
	DST	0.000 1	0.990 7	0.009 2	0	0	0	0	RF ₂
RF ₃	振动	0	0	0.868 0	0.093 0	0.039 0	0	0	RF ₃
	电流	0	0	0.633 0	0.037 0	0.330 0	0	0	RF ₃
	DST	0	0	0.971 2	0.006 1	0.022 7	0	0	RF ₃
RF ₄	振动	0	0.304 0	0	0.654 0	0.042 0	0	0	RF ₄
	电流	0.234 0	0.003 0	0.083 0	0	0.680 0	0	0	RF ₅
	DST	0	0.030 9	0	0.969 1	0	0	0	RF ₄
RF ₅	振动	0	0	0	0	0.373 0	0.616 0	0.011 0	RF ₆
	电流	0.002 0	0.263 0	0	0.080 0	0.646 0	0.009 0	0	RF ₅
	DST	0.001 4	0.188 3	0	0.057 3	0.746 5	0.006 4	0	RF ₅
RF ₆	振动	0	0	0	0	0.070 0	0.907 0	0.023 0	RF ₆
	电流	0.035 0	0.245 0	0.009 0	0	0.009 0	0.623 0	0.079 0	RF ₆
	DST	0.036 1	0.252 6	0.009 3	0	0.059 6	0.642 4	0	RF ₆
RF ₇	振动	0	0.004 0	0	0.099 0	0.240 0	0.041 0	0.616 0	RF ₇
	电流	0	0.243 0	0	0.080 0	0	0	0.677 0	RF ₇
	DST	0	0.010 4	0	0.008 1	0	0	0.981 5	RF ₇

动信号诊断为匝间短路2.73%的概率为0.654,与实际故障相符;由励磁电流信号诊断为匝间短路2.73%的概率为0,诊断为匝间短路3.29%的概率为0.680,与实际故障不符,出现了误判。同样,在转子匝间短路3.29%时,由励磁电流信号诊断为匝间短路3.29%的概率为0.646,与实际故障相符;由振动信号诊断为匝间短路3.29%的概率为0.373,诊断为匝间短路4.55%的概率为0.616,与实际故障不符,出现了误判。通过DST将2种单独的故障特征进行综合诊断,则可以大幅降低误判率,提高调相机转子轻微匝间短路故障的诊断精度。

对额外提取的70组测试样本分别利用单独的特征量及DST进行诊断,测试样本诊断结果见表7。

表7 测试样本诊断结果

Tab.7 The diagnostic results of the test sample

诊断特征	正确样本/组	正确率/%
振动	61	87.14
电流	58	82.86
DST	69	98.57

由表7可知,利用DST将振动与励磁电流信号进行综合诊断,可以大幅提高仅用单一特征量诊断的正确率。因此,该方法对实际工程中大型调相机转子轻微匝间短路故障诊断可以提供一定的指导。

7 结束语

转子匝间短路对调相机是一种严重故障,直接影响系统整体的无功输出,而仅用单独的特征量难以准确地对故障进行监测诊断。笔者提出通过DST将2种没有直接关联的振动信号和励磁电流信号综合进行故障诊断,实验结果表明该方法可提高调相机转子轻微匝间短路故障诊断的正确率,且该方法使用的特征量均可由现阶段调相机制造过程中在内部集成的传感器采集,无需额外改动电路,不会影响调相机的正常运行。本研究提出的基于DST的调相机转子轻微匝间短路诊断方法可以更为精确地识别故障并对故障的严重程度做出评判,尤其在故障初期就可以对转子匝间短路故障进行识别,对调相机的安全运行具有重要意义。

参 考 文 献

[1] 索之闻,刘建琴,蒋维勇,等.大规模新能源直流外送系

统调相机配置研究[J].电力自动化设备,2019,39(9):124-129.

SUO Zhiwen, LIU Jianqin, JIANG Weiyong, et al. Research on synchronous condenser configuration of large-scale renewable energy DC transmission system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(9):124-129. (in Chinese)

[2] 王梦玲,陈刚,张超峰,等.新一代大容量调相机在电网中的应用[J].电工技术,2020(8):52-53,56.

WANG Mengling, CHEN Gang, ZHANG Chaofeng, et al. Application of a new generation of large capacity synchronous condenser in power grid [J]. Electric Engineering, 2020(8):52-53,56. (in Chinese)

[3] 刘春晖,钱文晓,杨朋威,等.新一代300Mvar调相机失磁运行特性及保护研究[J].电力工程技术,2019,38(6):154-159.

LIU Chunhui, QIAN Wenxiao, YANG Pengwei, et al. Loss-of-excitation operation of new generation 300Mvar synchronous condenser and its relay protection [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(6):154-159. (in Chinese)

[4] 程明,田伟杰,王伟,等.新型同步调相机的关键技术及研究进展[J].电力工程技术,2020,39(2):2-9.

CHENG Ming, TIAN Weijie, WANG Wei, et al. Review on key technologies and latest development of new synchronous condenser [J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(2):2-9. (in Chinese)

[5] 王聪.同步调相机故障特性分析与诊断技术研究[D].武汉:华中科技大学,2019.

[6] 李天辉,唐明,贾伯岩,等.发电机转子匝间短路故障的建模仿真及诊断分析[J].高电压技术,2019,45(12):3932-3940.

LI Tianhui, TANG Ming, JIA Boyan, et al. Modeling simulation and diagnosis analysis of inter-turn short circuits fault in generator rotor [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12):3932-3940. (in Chinese)

[7] 李永刚,姜猛,马明晗.基于V型曲线偏移的大型调相机定子绕组匝间短路故障诊断方法[J].大电机技术,2019(6):1-6.

LI Yonggang, JIANG Meng, MA Minghan. Fault diagnosis method of stator winding interturn short circuit in large synchronous compensator based on V-shaped curve offset [J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2019(6):1-6. (in Chinese)

[8] 管弋兵,文耀华,黄金军,等.双水内冷调相机故障远程诊断技术[J].电机技术,2020(1):19-22.

GUAN Yibin, WEN Yaohua, HUANG Jinjun, et al. Remote diagnosis technology on the failure of double-water inner-cooled condensers [J]. Electrical Machinery

- Technology, 2020(1):19-22. (in Chinese)
- [9] 李永刚,姜猛,马明哈,等.大型调相机转子气隙偏心故障的复合特征分析[J/OL].电测与仪表, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200827.1814.048.htm>
LI Yonggang, JIANG Meng, MA Minghan, et al. Composite characteristic analysis of rotor air gap eccentricity fault of large scale condenser[J/OL]. Electrical Measurement & Instrumentation, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/23.1202.TH.20200827.1814.048.htm> (in Chinese)
- [10] 李永刚,王罗,李俊卿,等.基于多源信息融合的同步发电机转子绕组匝间短路故障识别[J].电力系统自动化, 2019, 43(16):162-167, 191.
LI Yonggang, WANG Luo, LI Junqing, et al. Identification of inter-turn short-circuit fault in rotor windings of synchronous generator based on multi-source information fusion[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(16):162-167, 191. (in Chinese)
- [11] 李学军,李平,蒋玲莉,等.基于异类信息特征融合的异步电机故障诊断[J].仪器仪表学报, 2013, 34(1): 227-233.
LI Xuejun, LI Ping, JIANG Lingli, et al. Fault diagnosis method of asynchronous motor based on heterogeneous information feature fusion[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2013, 34(1): 227-233. (in Chinese)
- [12] 马宏忠.电机状态监测与故障诊断[M].北京:机械工业出版社, 2008:927-978.
- [13] 袁浚峰.大型汽轮发电机转子匝间短路故障分析与诊断[D].保定:华北电力大学, 2017.
- [14] 李俊卿.汽轮发电机励磁绕组动态匝间短路故障的定位研究[J].中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1775-1781.
LI Junqing. Research on dynamic interturn short circuit fault location of exciting winding in turbine generators [J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1775-1781. (in Chinese)
- [15] 马明哈.汽轮发电机励磁绕组匝间短路故障复合特征分析与诊断[D].保定:华北电力大学, 2019.
- [16] 马宏忠,时维俊,韩敬东,等.计及转子变换器控制策略的双馈风力发电机转子绕组故障诊断[J].中国电机工程学报, 2013, 33(18):119-125.
MA Hongzhong, SHI Weijun, HAN Jindong, et al. Double-fed induction generator rotor fault diagnosis considering control strategies of rotor-side converters [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 119-125. (in Chinese)
- [17] 李兵,韩睿,何怡刚,等.改进随机森林算法在电机轴承故障诊断中的应用[J].中国电机工程学报, 2020, 40(4):1310-1319, 1422.
LI Bing, HAN Rui, HE Yigang, et al. Applications of the improved random forest algorithm in fault diagnosis of motor bearings[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(4):1310-1319, 1422. (in Chinese)
- [18] 黄良韬,赵志诚,赵亚群.基于随机森林的密码体制分层识别方案[J].计算机学报, 2018, 41(2):382-399.
HUANG Liangtao, ZHAO Zhicheng, ZHAO Yaqun. A two-stage cryptosystem recognition scheme based on random forest[J]. Chinese Journal of Computers, 2018, 41(2):382-399. (in Chinese)
- [19] 张欣,张静,高旭,等.采用局部时-频奇异值与优化随机森林的高压断路器机械故障诊断[J].高压电器, 2020, 56(6):225-231.
ZHANG Xin, ZHANG Jing, GAO Xu, et al. High voltage circuit breaker mechanical fault diagnosis with local time-frequency singular value and the optimal random forest[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(6): 225-231. (in Chinese)
- [20] 郑日晖,岑健,陈志豪,等.基于EMD样本熵与改进DS证据理论的故障诊断方法[J].自动化与信息工程, 2020, 41(2):19-26.
ZHENG Rihui, CEN Jian, CHEN Zhihao, et al. Fault diagnosis method based on EMD sample entropy and improved DS evidence theory[J]. Automation & Information Engineering, 2020, 41(2):19-26. (in Chinese)
- [21] 胡青松,程勇.信标漂移场景下基于加权DS证据理论的目标定位[J].中国矿业大学学报, 2019, 48(5): 1162-1168.
HU Qingsong, CHENG Yong. Target localization based on weighted DS evidence theory under beacon drifting scenarios[J]. Journal of China University of Mining & Technology, 2019, 48(5): 1162-1168. (in Chinese)
- [22] 刘石磊.基于D-S证据融合的风力发电机组的故障预测[D].沈阳:沈阳工业大学, 2017.



第一作者简介:张玉良,男,1997年1月生,硕士。主要研究方向为大型电力设备故障诊断。

E-mail:13905206751@163.com