基于振荡波多特征融合的变压器绕组故障诊断方法

周利军,周 猛,李沃阳,陈田东,吴振宇,王东阳 (西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 611756)

摘要:为了获取更多变压器绕组的状态信息,提高绕组故障诊断的准确性,提出了一种基于振荡波多特征融合的变压器绕组故障诊断方法,该方法联合波形特征和小波包时频图的颜色特征判断故障类型、故障程度和故障位置,结合粒子群优化-支持向量机(PSO-SVM)算法实现变压器绕组状态的智能识别。最后搭建变压器故障模拟试验平台验证方法可行性。结果表明:波形特征、颜色矩、颜色聚合向量特征分别针对故障类型、故障程度及故障位置的空间分布具有分离和聚类特性,且通过PSO-SVM识别的准确率高达95%以上,故所提方法能够准确辨识变压器绕组的状态,为现场变压器绕组状态检测提供参考。

0 引言

牵引变压器是高速铁路牵引供电系统的核心设备之一,其运行状态与轨道交通运行的安全稳定性密切相关^[1-3]。根据国际大电网委员会的统计,绝缘破损和绕组变形是造成变压器损坏的常见故障,其中绕组变形故障约占26.6%^[4]。变压器绕组变形在短路冲击力的作用下具有累积效性,会造成绕组屈曲、绕组移位、短路等故障,甚至会造成安全事故。因此,有效诊断变压器绕组状态,从而为变压器检修提供参考,对牵引供电系统的安全可靠运行具有重大意义^[5]。

目前,国内外学者陆续提出了多种变压器绕组 状态检测方法,例如测量绕组等效阻抗的短路阻抗 法^[6]、监测变压器箱壁振动信号的振动法^[7]以及通 过变压器绕组网络响应特性判断绕组变化情况的频 率响应法 FRA (Frequency Response Analysis)^[8-10]。 其中,短路阻抗法能够简单直观地反映绕组的状态, 但其能够诊断的信息较为有限,对于绕组的故障类 型、故障位置等较难作进一步的深入分析;振动法能 够实现变压器状态在线监测,不干扰牵引供电系统 的正常运行,但传感器的布置、变压器运行环境等在 一定程度上会影响信号的采集和分析;相比于其他 方法,基于 FRA 的绕组状态检测技术发展较为成 熟,国内外已形成相关标准,其通过幅频曲线在低、 中、高3个频段的相似系数综合判断绕组的故障程

收稿日期:2021-11-03;修回日期:2022-03-14

在线出版日期:2022-05-10

基金项目:国家自然科学基金高铁联合基金资助项目 (U183420005)

Project supported by the High Speed Rail Joint Fund Project of the National Natural Science Foundation of China (U183420005) 度。为了进一步提高FRA故障诊断的准确性,学者 们提出了多种维度提取特征参数的方法,例如极坐 标图^[8]、二值化图像^[9]、传递函数^[10]方法等。上述研 究工作为实现变压器绕组变形的有效检测做出了重 要的贡献。

为了进一步提高绕组变形检测的效率,近年来 学者们提出了一种基于开关过电压和脉冲频率响应 的振荡波法^[11-14],该方法不仅能够反映绕组状态变 化,而且易实现高压等级测试,拥有较强的抗干扰 能力,是现有检测方法的一种有效补充。已有研究 建立 220 kV变压器试验平台,开展高压振荡波试 验,试验结果表明:振荡波法抗干扰能力强、测试重 复性高。在此基础上探究了不同电源参数下振荡波 的演变规律,明确了该检测方法下的最优测试技 术^[11-12]。基于有限元仿真建模开展了不同绕组状态 下等效电路参数与振荡波变化规律的关联性研究, 同时搭建绕组故障模拟平台,验证了该方法对绕组 故障的高灵敏性^[13-14]。但针对振荡波特征提取及故 障诊断的系统研究尚未开展。

为此,本文针对变压器绕组的振荡波信号特征 提取以及故障诊断方法进行研究与讨论。首先基于 振荡波曲线特点提取波形特征;然后通过小波包变 换将振荡波转化为时频图,提取颜色矩特征和颜色 聚合向量CCV(Colour Coherence Vector)特征;结合 故障属性相关特征,通过多特征融合进行绕组故障 类型、故障程度以及故障位置的识别;最后在一台等 比例牵引变压器模型上模拟轴向移位故障、饼间电 容故障以及饼间短路故障,使用提出的多特征融合 方法进行分析,并通过粒子群优化-支持向量机 PSO-SVM(Particle Swarm Optimization-Support Vector Machine)算法识别绕组故障验证了方法的可行 性。本文所提方法可为进一步的牵引变压器绕组故 障诊断提供参考。

1 振荡波原理

当频率大于1kHz时变压器绕组可视为由电 阻、电容、电感等分布参数构成的无源非线性电路网 络,如附录A图A1所示。振荡波法是在绕组一端连 接高压直流电源对系统进行充放电,在绕组间电容 电感效应下电荷无法立即储存或释放,可在绕组另 一端获取振荡波信号^[11-12]。

振荡波测试原理图如图 A1 所示。图中高压直 流电源电源系统由高压电容、高压直流电源、限流电 阻以及绝缘栅双极型晶体管 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)高频开关组成,具体的充电和放 电过程如下^[13-14]。

1)充电过程:IGBT高频开关断开,高压直流电 源通过高压电容与绕组形成充电回路产生振荡波, 一旦充满电,采集端电压就会稳定。

2)放电过程:IGBT高频开关接通,高压直流电源 和限流电阻对地短路;高压电容的一个端口直接接 地,与电源形成直流回路,另一个端口与变压器绕组 串联形成放电回路产生振荡波。根据IEC 60071-2 标准可知,相同激励下的暂态响应(即振荡波)与变 压器绕组自身属性相关^[15],因此,振荡波可用于变压 器绕组的故障诊断。

现场试验所得振荡波如图1所示。由图可见,变 压器在周期性的充放电过程中会产生规律性的振荡 波,充电与放电过程中的振荡波形具有良好的对称 性。本文只针对放电过程的振荡波信号开展研究。



图 1 现场试验所得振荡波 Fig.1 Oscillating waves of field test

2 多特征融合故障诊断方法

振荡波法是一种比较方法,其利用不同状态下 振荡波特征的变化作为故障诊断的依据,为了消除电 压等级影响,根据式(1)对振荡波进行归一化处理。

$$x_{\rm std} = \frac{X}{U} \tag{1}$$

式中:x_{std}为归一化处理后的振荡波信号;X为测试的振荡波信号;U为电源幅值。

2.1 波形特征

波形特征能够准确描述振荡波曲线特征^[16],如 谐振点的振幅、波形形状等,可以有效提取振荡波 信息。

1)峰峰值。

峰峰值V_w是振荡波信号最高值和最低值的差

值,它描述了振荡波谐振点振荡的变化范围,具体如 式(2)所示。

$$V_{\rm pk} = \max\left(x_{\rm std}\right) - \min\left(x_{\rm std}\right) \tag{2}$$

2)峰值因子。

峰值因子 V_c是振荡波信号峰峰值与有效值的 比值,它描述了振荡波振幅在波形中的极端程度,具 体如式(3)所示。

$$V_{\rm C} = \frac{V_{\rm pk}}{V_{\rm rm}} \tag{3}$$

$$V_{\rm rm} = \sqrt{\sum x_{\rm std}^2} \tag{4}$$

式中: V_m为振荡波的有效值。

3)波形因子。

波形因子*V*_s是有效值与平均值的比值,它描述的是振荡波整体幅值的变化情况,具体如式(5) 所示。

$$V_{\rm S} = \frac{V_{\rm rm}}{V_{\rm av}} \tag{5}$$

$$V_{\rm av} = \frac{\sum \left| x_{\rm std} \right|}{n} \tag{6}$$

式中:n为采样点数;Vav为振荡波的平均值。

2.2 颜色特征

振荡波是一种非平稳暂态信号,当变压器绕组 的故障程度或故障位置发生改变时,振荡波不仅时 域波形发生改变,频域信息也会发生相应的变化,联 合时域和频域2个维度进行分析,可以进一步提取 振荡波的有效特征。

小波包变换是一种精细、灵活的信号分析技术, 可以同时对信号的低频部分和高频部分进行分解, 拥有良好的时频分析能力,能够有效提取非平稳暂 态信号的时频特征^[17]。绕组正常情况下的小波包时 频图见附录A图A2,振荡波信号各频带的能量分布 情况可通过颜色的深浅反映,且随着频率的升高,各 频段的颜色变化逐渐强烈,能够反映振荡波时频 信息。

小波包时频图体现为颜色深浅以及颜色分布情况,由图像颜色特征能有效提取小波包时频图信息。 颜色特征的优势在于对图像尺寸、方向以及视角的 依赖性较弱,具有较高的稳定性,常用的颜色特征有 颜色矩、颜色聚合向量特征^[18-19]。

颜色矩能够全面描述图像的整体信息,图像颜 色信息主要集中在一阶矩、二阶矩和三阶矩,一阶矩 描述颜色平均程度,二阶矩描述颜色方差,三阶矩描 述颜色偏斜度^[18]。

综合图像3个颜色通道的颜色矩定义特征参数 *C*_i如式(7)—(9)所示。

$$C_1 = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{3} E_j \tag{7}$$

$$C_{2} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{3} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (p_{ij} - E_{j})^{2} \right]^{1/2}$$
(8)

$$C_{3} = \frac{1}{3} \sum_{j=1}^{3} \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} (p_{ij} - E_{j})^{3} \right]^{1/3}$$
(9)

$$E_{j} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N} p_{ij}$$
(10)

式中: p_{ij} 为第j种颜色分量的第i个像素值;N为图像 总像素数; E_i 为第j种颜色分量的像素平均值。

颜色聚合向量根据像素间的连通性划分连通区域,然后通过比较每个独立的连通区域总像素数与 定义阈值划分聚合和非聚合像素,从而构建聚合向 量,具体计算步骤如下^[19]。

1)量化:针对任一颜色分量均匀量化为k个颜 色区间,得到k级颜色像素值矩阵。

2)划分连通区域:将重新量化的颜色像素值矩 阵根据像素间的连通性划分成若干个连通区域,即 如果一个区域C中所有像素的量化值相等,且区域 C中任意2个像素点P和P'之间都存在1条通路,则 称C为连通区域。

3)判断聚合性:将颜色像素矩阵划分为多个连 通区域,统计每个独立的连通区域C中的像素数 N_c , 根据阈值 $\varepsilon(\varepsilon - 般为1\%N)$ 判断连通区域C中像素 的聚合性,具体如式(11)所示。

$$\begin{cases} N_c \ge \varepsilon & 聚合像素 D \\ N_c \le \varepsilon & 非聚合像素 W \end{cases}$$
(11)

4)聚合向量:根据上述判断依据统计各连通区 域中的聚合像素 *D*和非聚合像素 *W*,则该颜色分量 的C可以表示为<(*D*₁,*W*₁),(*D*₂,*W*₂),…,(*D*_k,*W*_k)>。

5)特征参数:对图像的多个颜色分量进行颜色 聚合向量计算,定义距离参数*D*_{std}和*W*_{std}表示不同图 像的颜色聚合向量之间的差异,即:

$$D_{\text{std}} = \frac{\sum_{j=1}^{3} \sum_{i=1}^{k} \left(\left| D_{ij} - d_{ij} \right| + \left| W_{ij} - w_{ij} \right| \right)}{3 \sum_{j=1}^{3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{k} \left| D_{ij} + W_{ij} \right|}$$
(12)

$$W_{\rm std} = \frac{\sum_{j=1}^{N} \sum_{i=1}^{k} \left| D_{ij} + W_{ij} \right| - \sum_{i=1}^{k} \left| d_{ij} + w_{ij} \right|}{3 \sum_{j=1}^{3} \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{k} \left| D_{ij} + W_{ij} \right|}$$
(13)

式中: d_{ij} 为参考图像第j个颜色分量第i级的聚合像 素; D_{ij} 为比较图像第j个颜色分量第i级的聚合像 素; w_{ij} 为参考图像第j个颜色分量第i级的非聚合像 素; W_{ij} 为比较图像第j个颜色分量第i级的非聚合 像素。

2.3 故障诊断方法

本文为实现变压器绕组故障类型、故障程度以 及故障位置的识别,采用多特征融合的方法进行绕 组故障诊断。

变压器绕组发生故障时等效电气参数会发生改 变,在振荡波信号中体现为波形的相应移动,例如谐 振点偏移、振荡幅值变化等。不同故障影响下的等 效电气参数变化趋势不同,使得各故障下振荡波波 形差异明显,而波形特征能够准确描述曲线形状,因 此本文选择波形特征分辨绕组故障类型。

振荡波随着绕组故障程度的加深呈现规律性偏 移^[13],在小波包时频图中表现为颜色的整体变化。 颜色矩的计算无需对颜色进行量化处理,保证了图 像颜色的完整性,从而能够描述图像颜色整体分布 情况^[18],因此本文选择颜色矩特征区分绕组故障 程度。

变压器绕组的不同位置发生故障时,在小波包 时频图中表现为颜色分布位置的改变。颜色聚合向 量根据连通区域的划分以及聚合性的判断,能够描 述图像颜色分布的空间信息^[19],因此本文选择颜色 聚合向量特征识别绕组故障位置。

综上所述,波形特征、颜色矩特征和颜色聚合向 量特征分别能够反映绕组故障类型、故障程度和故 障位置的信息变化情况,基于振荡波多特征融合的 绕组故障诊断流程如图2所示,具体步骤如下:

1)根据振荡波曲线提取波形特征峰峰值、峰值 因子和波形因子识别绕组故障类型;

2)根据振荡波小波包时频图提取颜色矩特征*C*_i 识别绕组故障程度;

3)根据振荡波小波包时频图提取颜色聚合向量特征 *D*_{std}和 *W*_{std}识别绕组的故障位置。



图2 故障诊断流程图

Fig.2 Flowchart of fault diagnosis

为验证本文所提方法用于变压器绕组故障诊断的有效性,选择识别精度高的PSO-SVM算法对算法的每一步骤进行智能识别^[20]。

3 试验平台

3.1 试验平台搭建

本文搭建了等比例牵引变压器绕组模拟平台, 如附录A图A3所示。该绕组结构为牵引变压器结构,每相铁芯的芯柱为三绕组结构,铁芯的直径和高 度分别为53、530mm。从铁芯向外分别为牵引绕组 (T)、馈电绕组(F)和高压绕组(HV)。试验变压器的 各绕组均为18个双饼,每饼匝数为32匝,线饼高度为 20mm。双饼两端采用铜鼻子焊接,饼与饼之间通 过高导电黄铜螺母连接以实现不同绕组故障的模拟。

为了验证本文所提变压器绕组故障诊断方法的 有效性,针对牵引绕组HV轴向移位故障、饼间电容 故障和饼间短路故障和进行模拟,试验变压器绕组 故障设置如附录A图A4所示。

1)轴向移位故障通过在饼间增加一定数量的垫 块实现,轴向移位故障程度Δ如式(14)所示^[21]。

$$\Delta = \frac{\Delta h}{h} \times 100 \% \tag{14}$$

式中: Δh 为轴向移位高度;h为绕组总高度,约为 450 mm。

垫块厚度约为1.5 mm,模拟1%轴向移位故障 需在饼间添加3个垫块。绕组从顶部到底部的各饼 序号分别为1—18,在18个位置均模拟了故障程度 为1%、2%、…、7%的轴向移位故障,共进行126组 试验。

2)变压器绕组发生饼间间距变化、鼓包等故障 会引起饼间纵向等值电容变大^[22],可通过在变压器 模型的饼间并联电容进行模拟。根据文献[23]提供 的解析式计算饼间电容正常值,选取100、150、200、 250、300 pF的电容值模拟饼间间距、屈曲等故障的 不同变化程度,共进行90组试验。

3) 饼间短路故障通过短接线连接对应饼的铜鼻 子接头实现,每种饼间短路故障重复试验5次,共进 行90组试验。

本文将对绕组故障程度以及故障类型开展分析,因此将绕组故障位置分为上端(1—9饼)和下端(10—18饼)这两部分,将轴向移位故障程度分为 轻微(移位1%、2%)、中度(移位3%、5%)和严重(移位6%、7%),将饼间电容故障程度分为轻微(并联 电容为100、150 pF)、中度(并联电容为200、250 pF) 和严重(并联电容为300 pF)。

3.2 数据解析

基于搭建的变压器绕组故障模拟平台开展振荡波试验,振荡波电源系统参数如下:充电电压为 10 V,充电时间为100 µs,开关时间为1 µs,高压电 容为2.2 µF。振荡波测试结果如附录A图A5所示, 图中标记1—3分别代表故障发生在绕组第1、9和 18 饼。与绕组正常状态下的振荡波形相比,3种绕 组故障下的振荡波形有着明显的变化,且变化趋势 不一致:饼间短路故障的振荡波中后部分幅值的变 化显著,波形轻微地向左偏移;饼间电容故障体现为 波形向右偏移以及幅值的降低,轴向移位故障表现 为谐振点从向左偏移逐渐变为向右偏移,同时幅值 也有略微降低。由上述分析可以看到绕组在不同故 障下的振荡波变化差异性较大,说明振荡波波信号 对绕组状态有较高的灵敏性,可通过波形特征进一 步描述故障类型。 3种变压器绕组故障的小波包时频图见附录A 图A6,图中红色虚线框内为各故障下的主要变化区 域。由图可见:发生饼间电容故障时,在小波包时频 图中主要体现为高频段颜色变浅以及能量分布改 变;发生轴向移位故障时,小波包时频图集中在低频 段发生改变;发生饼间短路故障时,小波包时频图的 低频段能量分布变化明显,同时高频段也有一定程 度的变化。小波包时频图能较好地描述绕组状态变 化,可根据图像进一步提取特征对变压器绕组故障 程度、故障位置进行分析。

4 试验结果分析

为了比较绕组在正常和故障状态下的差异性, 按照式(15)处理波形特征和颜色矩特征。

$$F = F_{\rm f} - F_{\rm h} \tag{15}$$

式中:F₁、F_h分别为绕组在故障、正常状态下的特征值。

4.1 故障分类

由图A5可以看出,不同故障类型的时域振荡波曲线形状区别明显,通过波形特征可以有效识别绕组故障类型,绕组故障类型特征分类图如附录A图A7所示。由图可见,饼间短路故障与其他故障差别明显,饼间短路故障的峰峰值和峰值因子最小值分别为1.54和1.52,波形因子最大值为1.01,其他故障的峰峰值小于0.92,峰值因子小于1.46,波形因子大于1.20。

根据故障波形特征分析可知,3种故障在波形 特征的三维分布空间具有聚类和分类特性,饼间短 路故障属于严重故障,与其他故障区分度明显,轴向 移位和饼间电容故障在单一特征值的分布区域具有 一定重叠,需通过3种波形特征所表征的空间位置 进行区分。

4.2 故障程度

基于颜色矩特征分析绕组故障程度,结果如附录A图A8所示,具体分析如下。

1)轴向移位故障程度:轻微故障下 C_1 的最大值 为-0.02,其他故障程度下 $C_1 \ge 0$;中度故障下 C_1 的最 小值为0.01, C_3 的最小值为-0.19;严重故障下 C_3 的 最大值为-0.23,其他故障程度下 $C_3 \ge -0.20$ 。

2) 饼间电容故障程度: 轻微故障下 C_1 的最大值 为 0.71, 其他故障程度下 $C_1 \ge 0.72$; 中度故障下 C_2 的 最小值为 0.44, 其他故障程度下 $C_2 \le 0.43$; 严重故障 下 C_3 的最大值为 0.46, 其他故障程度下 $C_3 \ge 0.46$ 。

根据以上分析可知,不同故障程度的颜色矩特 征在三维空间的分布呈现聚类性和一定的分离性, 绕组故障程度区分的初步界限如表1所示。由表可 见:轴向移位故障的轻微、严重故障程度可分别通过 *C*₁、*C*₃识别,中度轴向移位故障可结合*C*₁和*C*₃与其 他故障程度进行区分;饼间电容故障的轻微、中度、 严重故障程度可分别通过*C*₁—*C*₃进行识别。

表1 故障程度界限表

Table 1 Threshold of fault degrees

故障类型	故障程度	特征参数		
		C_1	C_2	C_3
轴向移位	轻微	≤-0.02	—	≥-0.20
	中度	≥0.01	_	≥-0.19
	严重	≥0	_	≤-0.23
饼间电容	轻微	≤0.71	≤0.43	>0.46
	中度	≥0.72	≥0.44	>0.46
	严重	≥0.72	≤0.43	≤0.46

4.3 故障定位

基于颜色聚合向量分析绕组故障位置,结果如 图3所示。由图可见:饼间短路故障发生在上端时 W_{std}>0.6,发生在下端时 W_{std}<0.4;饼间电容故障以 W_{std}=0.4为分界线,轴向移位故障以 D_{std}=-0.02为分 界线,从而由颜色聚合向量可识别大部分绕组故障 位置。





Fig.3 Characteristic analysis of winding fault position

根据上述分析可知:不同故障位置的颜色聚合向量特征的分布都具有可分离性,通过W_{std}可识别饼间短路和饼间电容故障位置,轴向移位故障位置则通过D_{std}进行识别;饼间电容和轴向移位故障对绕 组等效参数的影响有限,不同故障位置的分布有一 定的重叠。

4.4 故障诊断

根据以上分析,本文所提取的振荡波特征对绕 组故障类型、位置、程度都表现出良好的识别性。将 试验模拟的306个案例通过PSO-SVM算法进行故障 诊断,训练集和测试集的比例为3:1,故障识别率取 5次故障诊断的平均值,如表2所示,由表可见,绕组 故障类型、故障程度、故障位置的识别率均在95% 以上。

表2 故障诊断结果 Table 2 Results of fault diagnosis

		8
故障属性	故障类型	平均故障识别率 / %
故障分类	—	100
壮陪把庙	轴向移位	95.4
以降性反	饼间电容	97.2
故障定位	饼间短路	100
	饼间电容	96.7
	轴向移位	07.3

本文所提方法可有效识别变压器绕组故障类型、故障程度、故障位置,为牵引变压器绕组故障检测提供参考。

5 结论

本文提出了一种基于振荡波多特征融合的变压 器绕组故障诊断方法,该方法综合了振荡波的时域 波形特征和小波包时频图颜色特征,提升了故障诊 断的灵敏度,最后搭建变压器平台对所提方法进行 试验验证,所得结论如下。

1)轴向移位、饼间电容和饼间短路3种绕组故 障下的振荡波时域波形相比健康绕组的振荡波时域 波形呈现出一定的变化规律,轴向移位故障引起波 形轻微偏移、幅值小幅下降,饼间电容故障引起波形 整体向右下偏移,饼间短路故障使波形出现明显偏 移、幅值的变化显著,因此通过波形特征的数值变化 可以反映绕组故障类型。

2)3种绕组下,故障振荡波小波包时频图呈现 出差异性,轴向移位故障下小波包时频图以低频段 变化为主,饼间电容故障下小波包时频图主要体现 为高频段变化,而饼间短路故障下小波包时频图在 全频段变化明显,颜色矩和颜色聚合向量特征分别 反映了绕组的故障程度与故障类型。

3)波形特征、颜色聚合向量、颜色矩分别针对故 障类型、故障程度、故障位置的空间分布具有分离和 聚类特性,基于 PSO-SVM 算法的绕组故障诊断准确 率都在 95% 以上。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 唐治平,彭敏放,李光明,等. 基于重复脉冲法的变压器绕组匝

间短路故障诊断[J]. 电力自动化设备,2018,38(10):153-158. TANG Zhiping, PENG Minfang, LI Guangming, et al. Diagnosis of inter-turn short circuit fault of transformer winding based on repetitive surge oscillograph[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(10):153-158.

 [2]杨毅,刘石,张楚,等. 基于振动分布特征的电力变压器绕组故 障诊断[J].振动与冲击,2020,39(1):199-208.
 YANG Yi,LIU Shi,ZHANG Chu, et al. Winding fault diagnosis of power transformer based on vibration distribution features[J]. Journal of Vibration and Shock,2020,39(1):199-208.

196

[3]高国强,万玉苏,刁超健,等.高速动车组断路器操作过电压 在车体的传播特性与影响机制[J].高电压技术,2018,44(2): 655-663.

GAO Guoqiang, WAN Yusu, DIAO Chaojian, et al. Propagation characteristics and influence mechanism of vacuum circuit breaker switching overvoltage on high-speed electric multiple unit[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(2):655-663.

- [4] WANG M, VANDERMAAR A J, SRIVASTAVA K D. Review of condition assessment of power transformers in service[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(6); 12-25.
- [5] WANG Shuang, WANG Shuhong, ZHANG Naming, et al. Calculation and analysis of mechanical characteristics of transformer windings under short-circuit condition [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2019, 55(7):1-4.
- [6] 李振华,蒋伟辉,喻彩云,等. 基于短路阻抗及ΔU-I₁轨迹特征 联合分析的变压器绕组变形故障在线检测方法[J]. 电力自动 化设备,2021,41(7):203-209,217.
 LI Zhenhua, JIANG Weihui, YU Caiyun, et al. Online detection method of transformer winding deformation based on combined analysis of short circuit impedance and ΔU-I₁ locus characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021,41(7):203-209,217.
- [7] 李莉,朱永利,宋亚奇.变压器绕组多故障条件下的振动信号 特征提取[J].电力自动化设备,2014,34(8):140-146.
 LI Li,ZHU Yongli,SONG Yaqi. Feature extraction for vibration signal of transformer winding with multiple faults[J].
 Electric Power Automation Equipment,2014,34(8):140-146.
- [8] ALJOHANI O,ABU-SIADA A. Application of DIP to detect power transformers axial displacement and disk space variation using FRA polar plot signature[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(4): 1794-1805.
- [9]赵仲勇,唐超,李成祥,等.基于频率响应二值化图像的变压器 绕组变形故障诊断方法[J].高电压技术,2019,45(5):1526-1534.

ZHAO Zhongyong, TANG Chao, LI Chengxiang, et al. Diagnostic method of transformer winding deformation faults based on frequency response binary image [J]. High Voltage Technology, 2019, 45(5):1526-1534.

- [10] PRAMANIK S, SATISH L. Localisation of discrete change in a transformer winding: a network-function-loci approach[J]. IET Electric Power Applications, 2011, 5(6): 540-548.
- [11] WU Zhenyu, ZHOU Lijun, LIN Tong, et al. A new testing method for the diagnosis of winding faults in transformer[J].
 IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2020, 69(11):9203-9214.
- [12] 吴振宇,周利军,周祥宇,等. 基于振荡波的变压器绕组故障诊断方法研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(1):348-357,401.
 WU Zhenyu,ZHOU Lijun,ZHOU Xiangyu, et al. Research on fault diagnosis method of transformer winding based on oscillatory wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1):348-357,401.
- [13] 周利军,周祥宇,吴振宇,等. 变压器绕组振荡波建模及轴向移

位故障分析[J]. 电力自动化设备,2021,41(3):157-163,188. ZHOU Lijun,ZHOU Xiangyu,WU Zhenyu, et al. Oscillation wave modeling and axial shift fault analysis of transformer winding[J]. Electric Power Automation Equipment,2021,41(3): 157-163,188.

- [14] WU Zhenyu, ZHOU Lijun, WANG Dongyang, et al. Feature analysis of oscillating wave signal for axial displacement in autotransformer[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 1-13.
- [15] The International Electrotechnical Commission. Insulation coordination in part 2: application guidelines: IEC 60071-2 [S]. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2018.
- [16] 付强,宁文瑶,刘代飞. 基于多指标融合的绕组混合故障分析 方法[J]. 高电压技术,2021,47(2):537-545.
 FU Qiang, NING Wenyao, LIU Daifei. Analysis method for mixed faults in winding based on multi-index fusion[J]. High Voltage Engineering,2021,47(2):537-545.
- [17] 甘醇,吴建华,杨仕友. 基于小波包能量分析的开关磁阻电机 功率变换器故障诊断[J]. 中国电机工程学报,2014,34(9): 1415-1422.
 GAN Chun,WU Jianhua,YANG Shiyou. Fault diagnosis of power converters for switched reluctance motors based on wavelet packet energy analysis[J]. Proceedings of the CSEE,2014, 34(9):1415-1422.
- [18] GE Haixiao, XING Haitao, MA Fei, et al. Estimating plant nitrogen concentration of rice through fusing vegetation indices and color moments derived from UAV-RGB images [J]. Remote Sensing, 2021, 13(9):1620.
- [19] AL-HAMAMI A, AL-RASHDAN H. Improving the effectiveness of the color coherence vector [J]. International Arab Journal of Information Technology, 2010, 7(3): 324-332.
- [20] 张小龙,张氢,秦仙蓉,等. 基于 ITD 复杂度和 PSO-SVM 的滚动 轴承故障诊断[J]. 振动与冲击,2016,35(24):102-107,138.
 ZHANG Xiaolong, ZHANG Qing, QIN Xianrong, et al. Rolling bearing fault diagnosis based on ITD Lempel-Ziv complexity and PSO-SVM [J]. Journal of Vibration and Shock, 2016, 35 (24):102-107,138.
- [21] HASHEMNIA N, ABU-SIADA A, ISLAM S. Improved power transformer winding fault detection using FRA diagnosticspart 1: axial displacement simulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1):556-563.
- [22] USHA K, USA S. Inter disc fault location in transformer windings using SFRA[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(6):3567-3573.
- [23] ABEYWICKRAMA N,SERDYUK Y V,GUBANSKI S M. Highfrequency modeling of power transformers for use in Frequency Response Analysis(FRA)[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2008, 23(4): 2042-2049.

作者简介:



周利军(1978—),男,教授,博士研究 生导师,主要从事电气设备状态检测与故障 诊断方面的研究(E-mail:zhoulijun@home. swjtu.edu.cn);

周 猛(1999—),男,硕士研究生,主 要从事电气设备状态检测与故障诊断方面 的研究(**E-mail**:794586136@qq.com)。

周利军

(编辑 任思思)

(下转第203页 continued on page 203)

type arc model based on current-zero measurements [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(2): 580-584.

- [16] 黄绍平,杨青,李靖. 基于 MATLAB 的电弧模型仿真[J]. 电力 系统及其自动化学报,2005(5):64-66,70.
 HUANG Shaoping,YANG Qing,LI Jing. Simulation of arc model based on MATLAB[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005(5):64-66,70.
- [17] 王晓军,刘天佐,夏天东,等. 厚板焊接温度场解析解分析[J]. 兰州理工大学学报,2007,33(4):27-30.
 WANG Xiaojun, LIU Tianzuo, XIA Tiandong, et al. Analysis of analytic solution of temperature field of welded thick plate
 [J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2007, 33
 - (4):27-30.

作者简介:



龚 衡

 臻 (前1997—),男,硕士研究生,主
 要研究方向为发电机定子铁芯烧损仿真分
 析(E-mail:gongh19@mails.tsinghua.edu.cn);
 桂 林(1974—),男,副教授,博士,主
 要研究方向为大机组保护及故障分析
 (E-mail:guilin99@mails.tsinghua.edu.cn);
 周光厚(1970—),男,教授级高级工程

师,硕士,主要研究方向为大型发电机分析 计算及试验(E-mail:Zghdfem@163.com)。

(编辑 任思思)

Arc burning process of stator core under stator single-phase grounding fault of generator

GONG Heng¹, GUI Lin¹, ZHOU Guanghou², YANG Yong², WANG Xiangheng¹

(1. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power Systems and Generation Equipment,

Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. Dongfang Electrical Machinery Company Limited, Deyang 618000, China)

Abstract: Aiming at the phenomenon of arc burning stator core under stator single-phase grounding fault, a simulation analysis method based on arc model and stator core temperature field model is proposed. Firstly, the arc model is built according to the single-phase grounding equivalent circuit, and the influence of circuit parameters on arc voltage and arc power is analyzed. Secondly, the temperature field model of the stator core is established, and the core melting volume of the core with different parameters such as arc power and fault time is calculated by finite element method. The simulative results show that the relationship between arc power and grounding fault current is approximately linear, so as the relationship between core melting volume and arc power. Finally, the arc power model is modified. The relationship between core melting volume and grounding fault current is clarified. The effectiveness of the simulation analysis method is verified by comparing with the test. Combined with the simulation and test results and the core repair level of the motor manufacturer, it can be determined that the maximum permissible value of grounding fault current of large generator is 25 A.

Key words: large generator; stator grounding fault; stator core burning process; arc power; core melting volume

(上接第196页 continued from page 196)

Transformer winding fault diagnosis method based on oscillating wave multi-feature fusion

ZHOU Lijun, ZHOU Meng, LI Woyang, CHEN Tiandong, WU Zhenyu, WANG Dongyang

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China)

Abstract: In order to obtain more state information of transformer windings and improve the accuracy of winding fault diagnosis, a transformer winding fault diagnosis method based on oscillating wave multi-feature fusion is proposed. In this method, the fault type, fault degree and fault location are judged by the waveform characteristics of oscillating wave and the colour characteristics of time-frequency graph, and the automatic recognition of transformer winding state is realized by PSO-SVM(Particle Swarm Optimization-Support Vector Machine). The proposed method is verified by transformer fault simulation test platform. The results show that waveform feature, colour moment and colour coherence vector have the characteristics of separation and clustering respectively for the spatial distribution of fault type, fault degree and fault location, and the recognition accuracy of PSO-SVM is higher than 95%, so the proposed method can accurately identify the state of transformer winding, and provide a reference for on-site transformer winding status detection.

Key words: electric transformers; oscillating wave; winding fault; waveform features; colour features; PSO-SVM





Fig.A1 Principle diagram of oscillation wave test

图 A1 中: *C_g*为对地电容; *C_k*为饼间电容; *C_t*为纵向等值电容; *G_g*为对地电导, *G_k*为饼间电导, *G_t*为纵向等值电导; *M*为线饼互感; *L*为线饼自感, *R_s*为线饼自阻。



Fig.A2 Time-frequency diagram of wavelet packet



(a)试验平台

(b)牵引变测试原理图

图 A3 振荡波测试连接图

Fig.A3 Connection diagram of oscillating wave test







(a)轴向移位故障
 (b)饼间短路故障
 (c)饼间电容故障
 图 A4 试验变压器绕组故障模拟图
 Fig.A4 Simulation diagram of winding fault of

test transformer



图 A5 不同状态下绕组的振荡波信号 Fig.A5 Oscillating wave signals of winding under

different states



图 A6 绕组故障小波包时频图





● 饼间短路故障,● 饼间电容故障,● 轴向移位故障

图 A7 绕组故障类型特征分析





