

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.06.008

基于改进峭度图和 GoogLeNet 的 GIS 内置互感器 铁磁谐振辨识

何龙, 朱咏明, 马金财

(国网新疆电力有限公司昌吉供电公司, 新疆 昌吉 831100)

摘要: 针对气体绝缘开关设备 GIS 内置罐式电磁式电压互感器(PT)铁磁谐振带来的设备过热、绝缘开裂甚至互感器损坏等问题,提出 GIS 内置互感器铁磁谐振故障辨识的方法。首先,针对铁磁谐振故障易被不确定噪声干扰造成信号特征淹没的问题,对快速谱峭度的频谱带进行插值细化,利用子带增强高频部分的分解,使信号的高频部分,在峭度图中表达的更为充分,并用图片的形式保留铁磁谐振信号的特征。其次,在此基础上,对 GoogLeNet 卷积神经网络的结构进行两方面调整:一方面增加卷积操作,增强网络提取潜在特征的能力;另一方面降低采样层数,解决实测数据不足的问题。最后,利用仿真模拟和实验室监测数据对方法加以验证,结果表明了所提方法在提高故障辨识准确率和节省训练时间的有效性。

关键词: GIS; 电磁式电压互感器(PT); 铁磁谐振; 参数匹配

Ferromagnetic Resonance Identification of Built-in Instrument Transformer for GIS Based on Improved Kurtosis Graph and GoogLeNet

HE Long, ZHU Yongming, MA Jincai

(State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Changji Electric Power Supply Company,
Xinjiang Changji 831100, China)

Abstract: In view of overheating, insulation cracking and even damage of instrument transformer due to ferromagnetic resonance of the dead tank electromagnetic potential transformer (PT) in the gas insulated metal enclosed switchgear (GIS), a method for identifying the ferromagnetic resonance of the instrument transformer in GIS is proposed. Firstly, aiming at the problem that ferroresonance fault is easily disturbed by uncertain noise and causes signal feature drowning, the frequency band of fast spectral kurtosis is refined by interpolation, the sub bands is used to enhance of decomposition of the high-frequency part, and keep the expression of the high frequency part of the signal in the kurtosis graph more sufficient, and the characteristics of the ferromagnetic resonance signal is preserved in the form of images. Then, on this basis, the structure of GoogLeNet convolutional neural network is adjusted in two aspects: on the one hand, the convolution operation is added to enhance the network's ability to extract potential features; on the other hand, reducing the number of sampling layers solves the problem of insufficient measured data. Finally, the method is verified by using simulation and laboratory monitoring data, and the results show its effectiveness in improving fault identification accuracy and saving training time.

Keywords: GIS; electromagnetic voltage transformer; ferromagnetic resonance; parameter matching

收稿日期:2023-12-29

基金项目:合肥市关键共性技术研发项目(2021GJ039);国家电网公司科技项目(5230CJ220001)。

0 引言

为了监测母线电压,气体绝缘开关中除了断路器、阻尼避雷器等设备外,还会封装有罐式电磁式电压互感器(potential transformer, PT),由于PT励磁电感具有明显的非线性饱和特性,当发生设备停运、甩负荷或者故障等外部发生大干扰时,所产生的过电流会造成PT饱和、等值电感下降^[1-2],此时若与GIS中断路器均压电容、母线对地电容等参数互相匹配时,则会激发产生铁磁谐振现象。铁磁谐振带来的暂态过电压或过电流,不仅会造成熔断器的烧断,还会造成GIS站内PT由于温升而受到铁磁谐振的热损伤而最终造成绕组绝缘击穿故障,危害系统运行安全^[3]。

国内外学者在GIS发生铁磁谐振方面开展了机理分析^[4]、铁磁谐振辨识^[5-9]以及消除抑制等相关研究^[10-12],其中,铁磁谐振故障机理方面已经取得了激发谐振的参数条件及其谐振频率范围划分等研究成果^[13-14],为抑制和辨识铁磁谐振奠定了基础。抑制铁磁谐振方法方面的成果较为丰富^[15-17],按照安装位置可分为一次侧消谐装置和二次侧消谐装置,在现场实际和仿真分析中也得到了验证^[18-22]。不过,有效、准确辨识铁磁谐振故障仍然是启动消谐装置的前提^[23-24],对铁磁谐振故障辨识的思路一般是先对过电压信号进行分解、特征提取^[25-27],再进行模式识别;其中分解和特征提取往往是利用铁磁

谐振故障信号的频谱特征与其他故障信号有所区分进行实现的^[28],这样虽然能够为铁磁谐振故障特征提取提供重要的参考,但都存在一定的局限性。此外,现有研究多针对配电系统单相接地引起的铁磁谐振,对GIS内置互感器铁磁谐振特性及其识别方面的研究偏少^[29]。

有鉴于此,提出一种基于改进峭度图和GoogLeNet的GIS内置互感器铁磁谐振故障的辨识方法,在现有的快速峭度图基础上增加子带,增强对铁磁谐振故障的图像样本的特征表达,再对GoogLeNet中的Inception结构加以改进,加宽卷积层的同时增加了辅助分类器,实现了对铁磁谐振故障的辨识。最后,利用ATP-EMTP软件对GIS铁磁谐振故障进行多工况模拟获取故障样本,对所提方法加以验证,并与同类算法加以对比,证明所提方法的优越性。

1 GIS铁磁谐振分析

1.1 GIS铁磁谐振特征分析

GIS主要由断路器、互感器、隔离开关、接地开关、母线、避雷器和连接线等构成,当系统发生大扰动,电磁式电压互感器铁芯饱和、进而导致其互感器等值电抗下降后,与GIS的电容参数形成不利配合,铁磁谐振现象随之发生。以某用户电厂66 kV系统GIS组合电器为例分析发生铁磁谐振时的影响因素,GIS接线图(左)及铁磁谐振等值电路(右)见图1。

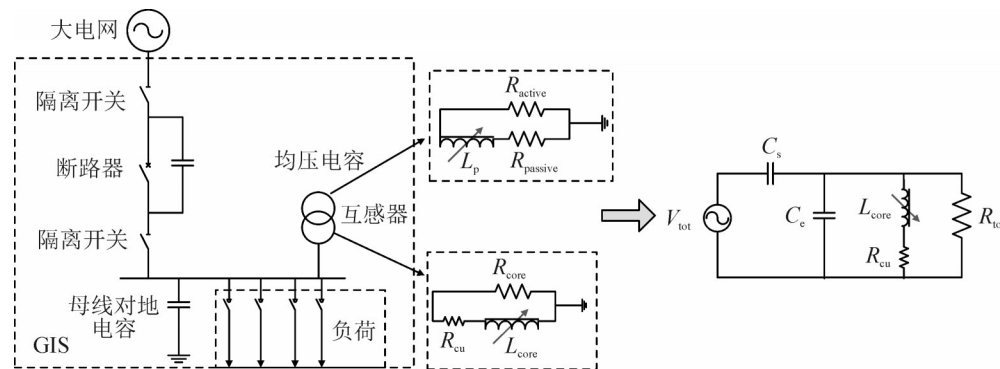


图1 GIS接线图(左)及铁磁谐振等值电路(右)

Fig. 1 Wiring diagram of GIS (left) and ferromagnetic resonance equivalent circuit (right)

图1(左)中,PT一次侧线圈由非线性电感 L_{core} 和电阻 R_{core} 组成,PT二次侧绕组等效电路则由无源阻尼 $R_{passive}$ 和有源阻尼 R_{active} 构成。GIS铁磁谐振一般发生在馈线断路器打开之后和隔离开关段开之前,即在母线和PT完全断电之前。发生铁磁谐振时,对应的等值电路见图1(右),图中: V_{tot} 为电源电压; C_s 为断路器均压电容; C_e 为GIS母线短引线部分对地电容; R_{cu} 为PT一次绕组电阻。在不同上述参数条件下,存在不同类型铁磁谐振^[30]。

1.2 基于改进峭度图的铁磁谐振故障特征提取

GIS铁磁谐振存在高频、工频和低频谐振3种,甚至还存在混沌状态,因此无法提前预测其中心频率,进行频谱分析时,需要将频谱范围尽可能扩大。将铁磁谐振故障电压波形离散化为 $u(k)$,其中 $k=1,2,\dots,N$, N 为离散数据点个数,为了有效提取所有类型谐振故障的频段信息,在快速谱峭度(fast kurtogram, FK)基础上,无序划分谐波子带,构建谐波子带无序的快速峭度图,具体做法如下:

先构建带通滤波器如下:

$$W_{k,i}(e^{jw}) = H_{1n0}(e^{jw}) \left[\prod_{u=1}^{N_1} H_{n_u}(e^{j2^u w}) \right] \left[\prod_{v=N_1+1}^{k-1} F_{n_v}(e^{j2^v w}) \right] \quad (1)$$

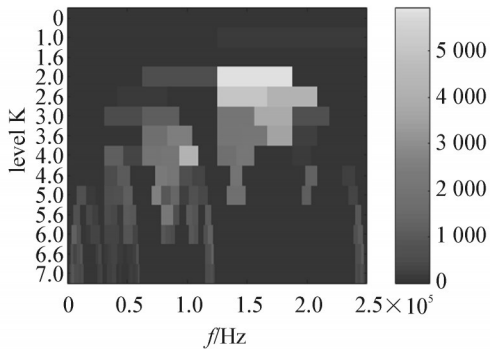
式中: k 为分解层数, i 为子带序号; $[n_0, n_1, \dots, n_{k-1}]$ 为整数 $(i-1)$ 的二进制形式; N_1 为序列中第 1 个非零位序号, 即 $n_{N_1} = 1, n_{N_1+1} = 0$; $H_1(e^{jw})$ 和是周期为 π 的函数, 表征高通或低通滤波器。

再将 $u(k)$ 进行波包分解, 设置均分数为 m , 得到的子带数目为 $m \times 2^k$ 个, 将子带插入所分解的第 $k+1$ 和 $k+2$ 层之间, 这样就可以将高频信号部分的频谱带划分的更密集, 更易凸显弧光接地高频分量特征; 再以其中心频率递减顺序重新排列子带,

得到无序子带 $\{d_{k,r} | r = 1, 2, \dots, 2^k\}$ (k 为层数, r 为划分频带数), 采用各子带的小波系数估计各个子带中心频率的谱峭度, 这样即使存在不同频率的谐振或者混沌状态, 也能够将其特征完全提取。

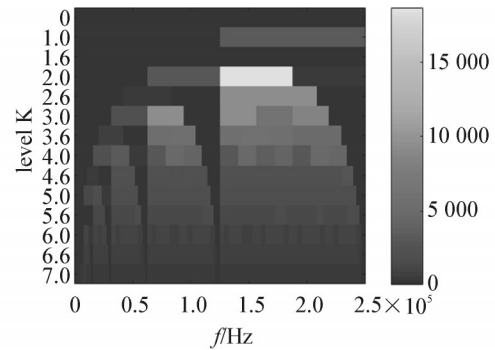
处理后, 可绘制出改进峭度图和计算最大的谱峭度, 据此可确定故障信号的最优频带及其包络以及对应的包络谱, 进而表达故障信号特征, 通过快速峭度图的颜色表征不同频带的能量分布。利用上述改进峭度图, 得到不同类型铁磁谐振故障信号特征提取结果, 见图 2, 为了体现所提方法的抗噪性, 以高频铁磁谐振波形为例, 将不同信噪比 (signal-noise ratio, SNR) 的特征提取结果也一并给出。

$K_{\max} = 5\,929.4$ level=2, Bw=62 500 Hz, $f_c = 156\,250$ Hz



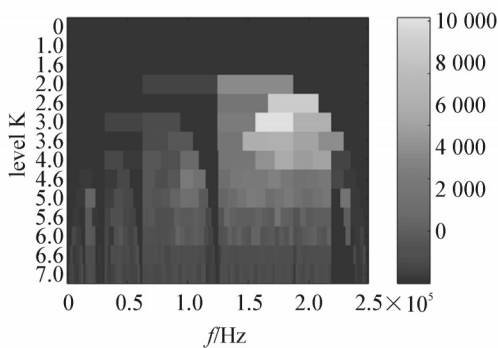
(a) 分频谐振

$K_{\max} = 18\,706.9$ level=2, Bw=62 500 Hz, $f_c = 156\,250$ Hz



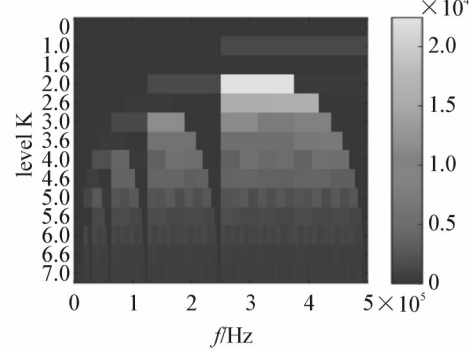
(b) 工频铁磁谐振

$K_{\max} = 10\,108.5$ level=3, Bw=31 250 Hz, $f_c = 171\,875$ Hz



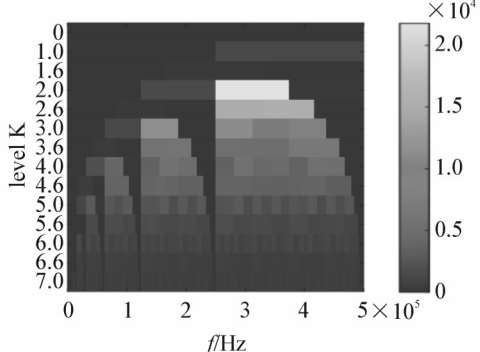
(c) 混沌状态

$K_{\max} = 22\,441.3$ Level=2, Bw=125 000 Hz, $f_c = 312\,500$ Hz



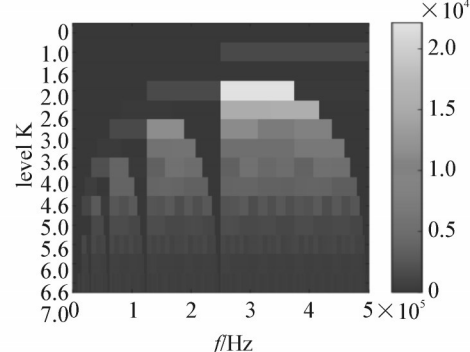
(d) 原始高频谐振信号

$K_{\max} = 21\,758.9$ Level=2, Bw=125 000 Hz, $f_c = 312\,500$ Hz



(e) SNR=60(高频谐振)

$K_{\max} = 22\,143.9$ Level=2, Bw=125 000 Hz, $f_c = 312\,500$ Hz



(f) SNR=40(高频谐振)

图 2 不同铁磁谐振及含噪声高频谐振特征提取结果

Fig. 2 Results of feature extraction for different ferroresonance and high-frequency resonances with noise

图2可见,加入噪声后,利用改进峭度图进行信号图像化后,虽然有频带有所变化,但整个图片的色块分布基本保持不变,表明改进后,图像化后的结果仍能提取信号边缘特征,而不受噪声的影响。

2 基于改进 GoogLeNet 的铁磁谐振辨识

2.1 GoogLeNet 改进结构

为了充分挖掘各类铁磁谐振故障信息,改进 GoogLeNet 的 Inception 结构以适应铁磁谐振故障样本特征提取结果,对不同频带的色块分布及其边缘特征进行辨识,具体 Inception 结构及改进见图3

所示。

铁磁谐振故障信号快速峭度图,包含工频谐振、低频谐振、高频谐振和混沌等4种故障类型,存在频谱宽度不确定、特征更加复杂的问题,为此在 GoogLeNet 的 Inception 模块中增加 7×7 卷积操作,以便增强提取峭度图中分布色块边缘信息的能力,更准确地获取所包含的频谱特征,由于增加了 7×7 卷积操作,在对色块边缘信息获取后,还需要采用相应的降采样层,这样既可以利用改进后的 GoogLeNet 宽结构获取更多的频谱信息,还可以避免训练梯度弥散。

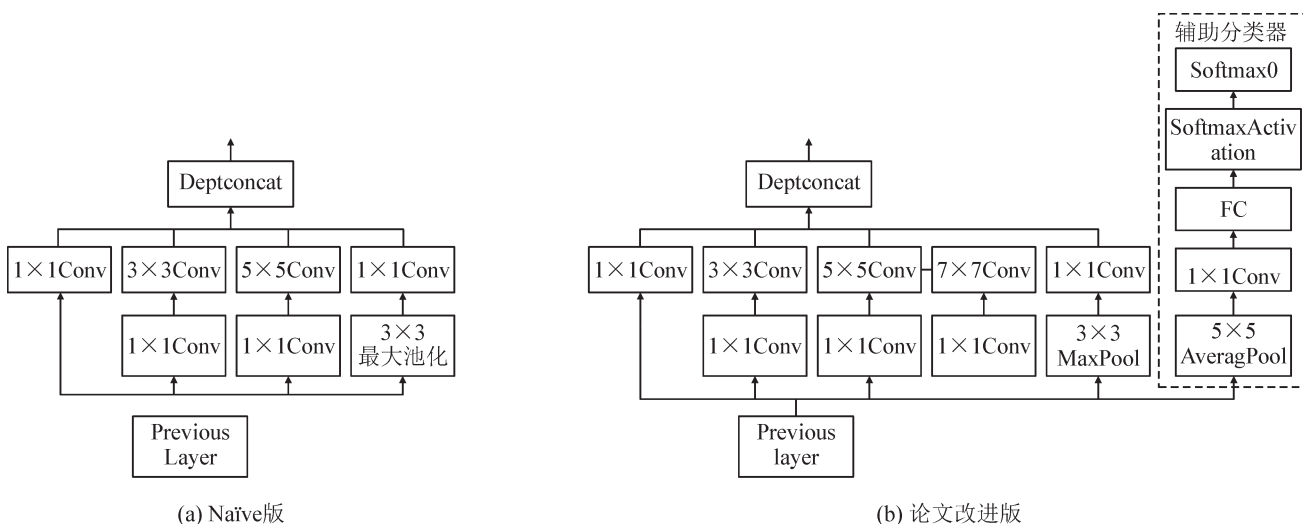


图3 GoogLeNet 结构及改进
Fig. 3 Structure and improvement of GoogLeNet

此外,在4b和4e层网络中,增加了2个辅助分类器模块,辅助分类器由平均池化层、卷积层、全连接层和激活层,增加辅助分类器模块后,两层可以直接输出故障分类,并将分类结果取较小权重,作为最后分类辨识的一部分,其作用类似于模型融合,增加了反向传播信号。此外,改进 GoogLeNet 的部分的正则化过程如下:

假定每次处理的数据 mini-Batch 中向量为 $f = \{f_1, f_2, \dots, f_n\}$ 时,则有

$$\hat{f}_i = \frac{f_i - \mu}{\sqrt{\sigma^2 + \theta}} \quad (2)$$

式中: μ, σ^2 为向量均值和方差; θ 为偏置,可取固定值,则辅助分类输出为

$$\hat{y}_i = \gamma \hat{x}_i + \beta \quad (3)$$

式中, γ 和 β 为学习参数。

改进后 GoogLeNet 网络架构的最后一层包含了自适应平均池化层(adapt-avgpool)和全连接层(fully-connected, FC),分类结果可通过 GoogLeNet 网络全

连接层经过 ReLu 函数激活后输出。

图3(b)所示 Inception 中,未改进的部分与原 GoogLeNet 网络结构的工作原理类似,不再赘述。

2.2 基于改进 GoogLeNet 的铁磁谐振辨识流程

利用改进 GoogLeNet 网络对 GIS 铁磁谐振诊断流程见图4。

第1步,按照1.2小节所介绍的方法,将所获得的铁磁谐振故障电压信号 $u(k)$ 转换为分辨率为 $(224, 224, 3)$ 的图像集合,并按比例分为测试集和训练集,定义损失目标函数,定义分类效果评估函数及其可接受阈值等初始参数。

第2步,将图像样本输入改进 GoogLeNet 网络,网络第一次层卷积采用 7×7 的卷积核,取滑动补偿为2, padding 为3,经过最大池化后,按照图3(b)中模块继续对输入图像样本进行训练和测试。

第3步,检验训练和测试的故障分类结果,如果满足最大迭代次数和要求的精度阈值,则返回,否则需要对返回第1步,调整预测参数。

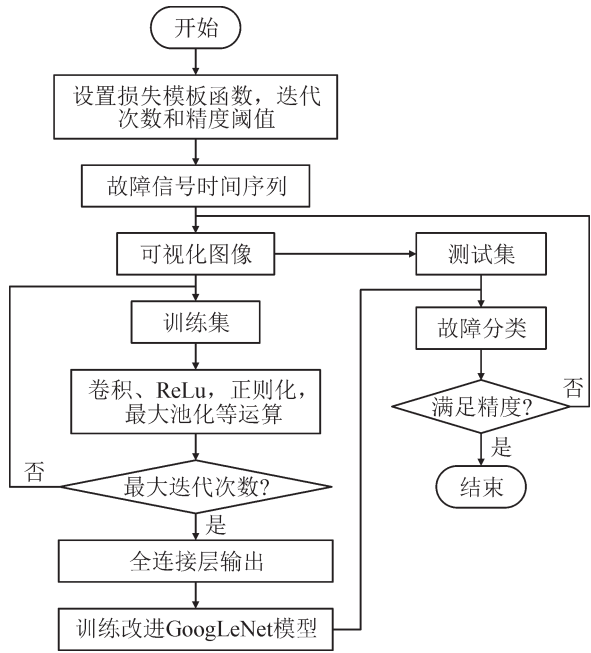


图4 基于改进 GoogLeNet 网络的铁磁谐振辨识流程
Fig. 4 Ferromagnetic resonance identification process based on improved GoogLeNet network

3 算例分析

3.1 GIS铁磁谐振样本数据介绍

在 ATP-EMTP 仿真平台搭建如图 1(右)所示的仿真模型,模拟铁磁谐振故障。其中 GIS 型号为 ZF-145,共有 4 条负荷出线,内置 PT 型号为 JSQX2-72.5,一次侧绕组直接接地。根据实际可能工况,取母线对地等值电容为 $C_e=78\sim4\ 680\text{ pF}$;取 GIS 内置断路器均压电容 C_s 在 $0.9\sim2\ \mu\text{F}$ 之间;内置 PT 励磁饱和励磁系数取 $n=3\sim5$,转化为标么值后系数 $a=0.583\ 9$, $b=0.044\ 3$,忽略 PT 阻尼电阻值。遍历均压电容 C_s 、母线的对地等值电容 C_e 和 PT 饱和励磁系数所有可能取值,遍历各参数的取值生成故障样本共 1 200 组。

3.2 基于仿真数据的故障辨识

先利用 1.2 小节所述的改进峭度图提取铁磁谐振故障样本的特征,并生成图像样本组成样本集合,将样本集合划分为规模为 4×900 的训练集和规模为 4×300 的测试集。分别选取 ResNet、VGG、AlexNet 以及 GoogLeNet 作为预训练网络,迭代次数设置均为 150,得到下述结果。

不同网络分类效果见图 5,AlexNet 网络对训练集的故障综合诊断准确率最高,但对测试集合的综合诊断准确率却低于 GoogLeNet,为此选择 GoogLeNet 网络作为预测模型加以改进。

构建 16 层加宽 GoogLeNet 模型,包括二维卷

积、ReLU、二维最大池化和跨通道归一化等环节,其中特征学习器在 14 层,分类输出器在 16 层,学习率取 0.004,迭代取 100 次,根据上述参数初始化故障诊断网络,软件平台采用 Matlab2022a,改进前后模型的训练过程见图 6。

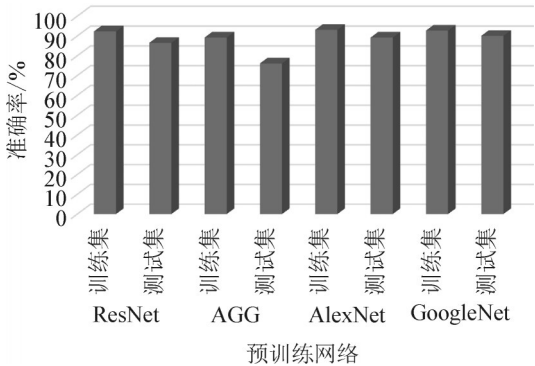


图5 不同网络分类效果
Fig. 5 Classification effect of different networks

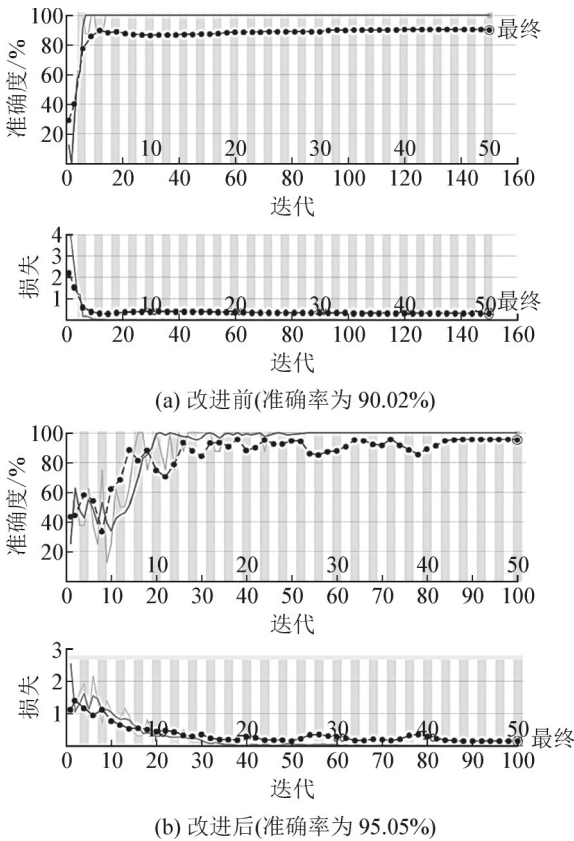


图6 GoogLeNet 改进前后训练过程
Fig. 6 Training process before and after GoogLeNet improvement

从图 6 可见,改进后的 GoogLeNet 在 100 次迭代后,对铁磁谐振故障的辨识综合准确率可达 95.05%,综合故障诊断率提高了 5 个百分点。改进前后方法对各类铁磁谐振故障诊断准确率及模型性能指标见图 7。

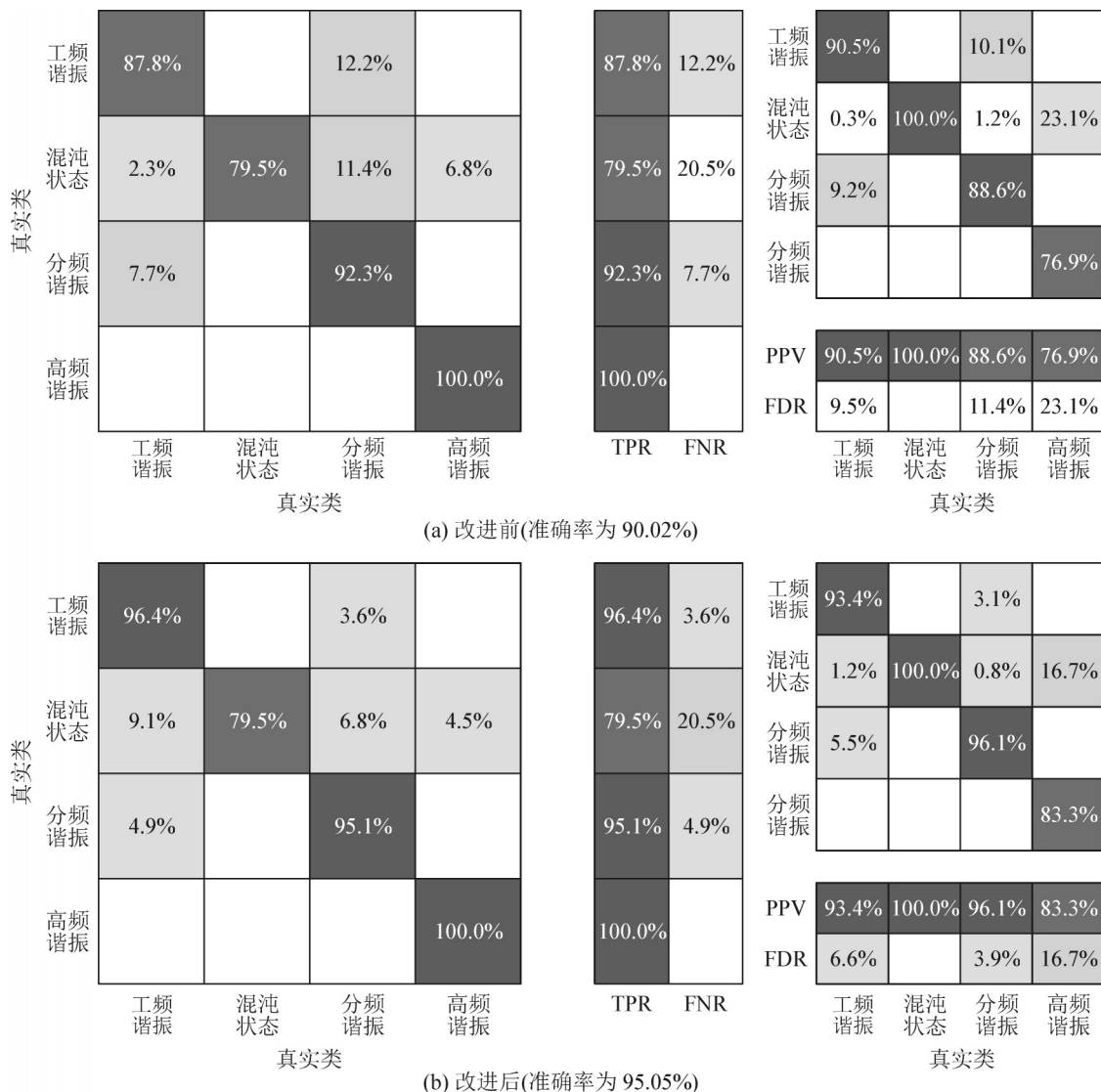


图7 GoogLeNet 改进前后对各类铁磁谐振故障诊断结果

Fig. 7 Diagnostic results of various ferromagnetic resonance faults before and after GoogLeNet improvement

图7中,TPR和FNR为故障诊断结果的真正类和假负类;PPV和FDR分别为正预测值和假发现率。其中TPR和PPV数值越大表明模型对故障分类的性能越好。图7可见,采用改进后方法对工频、分频和高频铁磁谐振的诊断指标PPV均比改进前高;其中,工频和分频的评价指标TPR要比改进前高,表明所提改进方法能够提升GoogLeNet故障分类的性能。

从图7可见,采用加宽卷积层和增加辅助分类器的方式对GoogLeNet网络后,对工频谐振和分频谐振的故障辨识准确率分别从87.8%和92.3%提高到了96.4%和95.1%,可见对于加宽卷积层后能够增强GoogLeNet挖掘这两类故障图像样本色块和轮廓的特征的能力,有效的提高辨识准确率。

3.3 基于GIS试验数据的故障辨识

搭建图1(左)所示的GIS(型号为ZF23-126)实

验室平台,其中,电源侧由调频谐振装置(型号为TSJA-380 V-250 kVA)代替,内置电磁式电压互感器,电压互感器一次额定电压为110 kV,二次额定电压为100 V,额定输出容量为100 VA。故障录波软件采用CAAP2008X,采样频率为5 000 Hz。通过倒闸操作模拟负荷的投切,得到4条出线负荷的不同投切组合、不同投切时刻等工况下的各类故障波形样本均为60个。在各种故障信号中加入非高斯噪声,得到信噪比(SNR)分别为60 dB、40 dB样本,综合起来的样本规模扩充至4×180个,分为训练集和测试集,模型参数选择与上一小节相同。随机选取含噪声样本集合中的不同规模样本,利用改进模型进行铁磁谐振故障诊断,为了对比,将ResNet、VGG、AlexNet以及改进前GoogLeNet诊断结果一并给出。

从加入噪声后辨识准确度见表2。从表2可见,

与仿真所得到的样本数据相比,利用改进前峭度图进行图像化后,采用实测数据,利用峭度图进行图像化后,各算法对故障诊断的准确率均有所下降,分析原因有两个,一个是实测数据因传感器原因存在不同程度噪声,另一个原因则是实测样本数据偏少,训练不够充分。且随着加入噪声信噪比下降和比例增大,准确率下降更为明显,不过当原始样本与不同 SNR 样本混合时,虽然含噪声比例增大,但样本规模也有所增大,准确率尽管有所回升,但仍然与原始信号有所区别,表明了随机噪声对辨识准

表 2 加入噪声后辨识准确度
Table 2 Identification accuracy after adding noise

样本规模	峭度图				
	ResNet	VGG	AlexNet	GoogLeNet	改进 GoogLeNet
4×60(原始样本)	80.38	74.16	86.21	86.91	90.31
4×120(原始样本与 SNR60 dB 混合)	79.56	68.41	64.42	80.29	89.76
4×120(原始样本与 SNR40 dB 混合)	76.37	71.54	84.11	81.57	88.64
4×180(原始样本与不同 SNR 的混合)	78.12	73.01	85.76	86.43	90.42

样本规模	改进峭度图				
	ResNet	VGG	AlexNet	GoogLeNet	改进 GoogLeNet
4×60(原始样本)	80.38	74.156	86.21	86.91	90.31
4×120(原始样本与 SNR60 dB 混合)	85.26	75.33	90.39	89.02	94.23
4×120(原始样本与 SNR40 dB 混合)	87.06	77.76	90.85	90.12	94.94
4×180(原始样本与不同 SNR 的混合)	89.23	84.23	90.65	90.43	95.78

确率仍然存在一定的影响。

从表 2 还可见,利用改进后峭度图进行去噪图像化后,各算法对故障诊断受噪声影响相比峭度图处理的样本而言较为不明显,当采用原始样本时,所提方法的诊断准确率最高,达到了 90.31%,即使在各类掺杂有噪声的样本情况下,所提方法诊断准确率也均在 94%以上,均比其他几种方法准确率高,表明了较好的鲁棒性。

4 结语

针对 GIS 铁磁谐振故障信号容易受到电磁干扰而存在随机噪声的问题,提出一种改进的故障样本特征提取与故障诊断的方法:利用子带重排序的快速峭度图中色块分布来提取 PT 监测的故障信号特征,解决信号微弱问题;加宽 GoogLeNet 网络,并增加辅助辨识分类器,增强故障信息的特征融合。取得了下述成果。

- 1)所提出的改进快速峭度图增加了子带的表述,在信号含有不同程度的随机噪声时,所生成的图像化样本能够其色块分布轮廓,并能在信噪比下降时仍保证对信号特征的表达能力,利用改进前后峭度图故障样本分类,结果验证了所提改进方法进行能够有效抑制噪声对信号的影响。
- 2)将 GoogLeNet 卷积层加宽,并增加辅助分类器,与改进峭度图所提取的特征相结合,对铁磁谐振故障仿真数据和实测信号进行诊断,结果表明,

与改进前相比,GoogLeNet 能够将仿真故障的诊断准确率提高 5 个百分点左右;利用含噪声的实测数据进行验证时,与 ResNet、VGG、AlexNet 以及改进前 GoogLeNet 方法相比,对铁磁谐振各类故障辨识的准确率最高,表明了方法的鲁棒性。

虽然尽可能全面模拟了 GIS 出线负荷倒闸操作和各种工况,并将其纳入样本数据,但铁磁谐振信号采样过程会受到周围电磁环境影响,采样信号受到随机性噪声影响,为此当存在较大比例的低 SNR 样本数据时,所提方法辨识准确率有可能会下降;此外,对混沌谐振的故障诊断率总体偏低,为此可考虑将模型参数未知的元关系纳入辨识模型,进行学习迁移则有望提高辨识准确率,这也将是下一步研究的工作。

参考文献

[1] 高一壹,咸日常,咸日明,等.一起 35 kV 电磁式电压互感器爆炸事故案例及仿真分析[J].变压器,2019,56(4):81-86.
GAO Yiyi, XIAN Richang, XIAN Riming, et al. Simulation analysis of a 35 kV electromagnetic potential transformer explosion accident[J]. Transformer, 2019, 56(4): 81-86.

[2] 钟立国,阎秀格,任旭东,等.电磁式电压互感器本体参数对铁磁谐振过电压影响分析[J]. 变压器,2021,58(4): 51-56.
ZHONG Liguo, YAN Xiuke, REN Xudong. Analysis on influence of electromagnetic-type voltage transformer body parameters on ferromagnetic resonance overvoltage[J]. Transformer, 2021, 58(4): 51-56.

[3] HOSSEINI S, YASERTOGHANI HOLARI. Ferroresonance

- study on the VT in the karoon 4 power plant 400 kV GIS substation[J]. Research Journal of Applied Sciences Engineering&Technology, 2014, 7(9): 1721-1728.
- [4] 陈琳,刘娟,李爽. GIS内PT铁磁谐振仿真计算与分析[J]. 高压电器, 2019, 55(6): 242-246.
- CHEN Lin, LIU Juan, LI Shuang. Simulation calculation and analysis of a ferroresonance case caused by PT in GIS[J]. High Voltage Apparatus, 2019, 55(6): 242-246.
- [5] 詹花茂,项祖涛,滕文涛,等.特高压变电站铁磁谐振及其防护研究[J]. 变压器, 2021, 58(9): 33-37.
- ZHAN Huamao, XIANG Zutao, TENG Wentao, et al. Study on ferromagnetic resonance and its suppression in ultra high voltage substations[J]. Transformer, 2021, 58(9): 33-37.
- [6] S. AREF, A. S. ANARAKI, D. A. ZARCHI, Probability evaluation of occurrence of ferroresonance in montazer qaem 63 kV Substation[C]//2020 14th International Conference on Protection and Automation of Power Systems (IPAPS), Tehran, Iran, 2019: 7-13.
- [7] 袁韬,何艳坤,孙瑛,等.4PT防铁磁谐振的措施中二次开口角短接时易出现烧毁的原因[J].变压器, 2019, 56(5): 35-37.
- YUAN Tao, HE Yankun, SUN Ying, et al. Analysis on causes of burning when secondary opening angle is shorted in 4PT anti - ferroresonance measures[J]. Transformer, 2019, 56(5): 35-37.
- [8] 邱成蛟. 乌东德电站GIS电压互感器铁磁谐振风险分析及对策研究[J]. 电力设备管理, 2022(z1): 123-125.
- QIU Chengjiao. Risk analysis and countermeasure research on ferromagnetic resonance of GIS voltage transformer in wudongde power station[J]. Electric Power Equipment Management, 2022(z1): 123-125.
- [9] I. HERNANDO-GIL, H. SHI, F. LI, et al. Evaluation of fault levels and power supply network impedances in 230/400 V 50 Hz generic distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(2): 768-777.
- [10] BUSLAEV D K, OCHKOVSKAYA J K, ZILES L D. Ferroresonance occurrence conditions in a simple nonlinear circuit[C]//2021 3rd International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE). [S. l.]: IEEE, 2021: 1-5.
- [11] WISNIEWSKI J, ANDERSON E, KAROLAK J. Search for network parameters preventing ferroresonance occurrence [C]//2007 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation. [S. l.]: IEEE, 2007: 1-6.
- [12] JÓZEF W, ANDERSON E, KAROLAK J. Sensitivity of power station auxiliary network to the possibility of ferroresonance occurrence[J]. Acta Energetica, 2014, 21(21): 171-177.
- [13] 陈钦柱,张涵,赵海龙,等. 基于FSWT-SSAEs的配电网内部过电压自动提取与分类识别[J]. 高压电器, 2020, 56(7): 166-172.
- CHEN Qinzhu, ZHANG Han, ZHAO Hailong, et al. Automatically extracting and classification recognition internal overvoltage measured in distribution networks based on FSWT-SSAEs[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(7): 166-172.
- [14] 王盛阳. 配电网铁磁谐振过电压的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
- [15] GUO Moufa, YANG N C, CHEN Weifan. Deep-learning-based fault classification using hilbert-huang transform and convolutional neural network in power distribution systems [J]. IEEE Sensors Journal, 2019, 19(16): 6905-6913.
- [16] MOKRYANI G, SIANO P, PICCOLO A. Identification of ferroresonance based on s-transform and support vector machine[J]. Simulation Modelling Practice and Theory, 2010, 18(9): 1412-1424.
- [17] 曾祥君,杨先贵,王文,等. 基于零序电压柔性控制的配电网铁磁谐振抑制方法[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(7): 1666-1673.
- ZENG Xiangjun, YANG Xiangui, WANG Wen, et al. Zero-sequence voltage flexible control based ferroresonance suppressing method for distribution networks[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(7): 1666-1673.
- [18] 刘凡,孙才新,司马文霞,等. 铁磁谐振过电压混沌振荡的理论研究[J]. 电工技术学报, 2006, 21(2): 103-107.
- LIU Fan, SUN Caixin, SIMA Wenxia, et al. Theoretical analysis of chaotic oscillation of ferroresonance overvoltage in power systems[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(2): 103-107.
- [19] YU Yuhong, ZHOU Hao. Study on simulation of ferroresonance elimination in 10 kV power system[C]//2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific. [S. l.]: IEEE, 2005: 1-7.
- [20] SARAVANASELVAN R, RAMANUJAM R, AL A K, et al. Ferroresonant oscillations in a transformer terminated line due to an energised parallel line on the same right-of-way[J]. IEE Proceedings. Generation, Transmission and Distribution, 2005, 152(4): 475-482.
- [21] 李云阁,施围. 应用解析法分析中性点接地系统中的工频铁磁谐振-谐振判据和消谐措施[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(9): 141-145.
- LI Yunge, SHI Wei. Study of fundamental ferroresonance on neuaral-grounded systems by using analytical method-criterion and elimination[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(9): 141-145.
- [22] 黄艳玲,司马文霞,杨鸣,等. 实测铁磁谐振时间序列的非线性动力学分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(5): 126-134.
- HUANG Yanling, SIMA Wenxia, YANG Ming, et al. Non-

- linear dynamic analysis of the measured ferroresonance time series[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(5): 126-134.
- [23] 刘凡, 司马文霞, 孙才新, 等. 多重分形在铁磁谐振过电压信号分析中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(18): 138-142.
- LIU Fan, SIMA Wenxia, SUN Caixin, et al. Application of multifractal spectrum to analyze ferroresonance overvoltage signals in neutral grounded system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(18): 138-142.
- [24] 谢家安, 王玉荣. SST在铁磁谐振过电压模态参数辨识中的应用[J]. 广东电力, 2020, 33(4): 82-89.
- XIE Jiaan, WANG Yurong. Application of SST for extracting model parameters of ferroresonance over-voltages in power systems[J]. Guangdong Electric Power, 2020, 33(4): 82-89.
- [25] 蔡晋, 林榛, 高伟, 等. 基于HHT及信号注入的配电网谐振与单相接地故障识别[J]. 电气技术, 2015(12): 31-35, 51.
- CAI Jin, LIN Zhen, GAO Wei, et al. Distinguish resonance from single-phase earth fault of distribution network based on the method of HHT and signal injection[J]. Electrical Engineering, 2015(12): 31-35, 51.
- [26] 黄雁, 廖华年, 肖荣洋, 等. 消谐器引起PT 3次谐波失真的励磁特征分析[J]. 变压器, 2020, 57(12): 55-60.
- HUANG Yan, LIAO Huanian, XIAO Rongyang, et al. Analysis of excitation characteristics of PT third harmonic distortion caused by harmonic eliminator [J]. Transformer, 2020, 57(12): 55-60.
- [27] 金铭, 杨定, 洛君婷, 等. 变压器的励磁涌流及抑制方法[J]. 变压器, 2019, 56(11): 36-39.
- JIN Ming, YANG Ding, LUO Juntong, et al. Magnetizing inrush current of transformer and suppression method[J]. Transformer, 2019, 56(11): 36-39.
- [28] 金涛, 许立彬, 高伟, 等. 一种基于LCD-Hilbert变换和奇异谱熵的配电网暂时过电压类型识别方法[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(11): 26-36.
- JIN Tao, XU Libin, GAO Wei, et al. Temporary overvoltage classification and recognition method of distribution network based on LCD-Hilbert transform and singular-spectrum entropy[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(11): 26-36.
- [29] 王申华, 王旭杰, 夏圆, 等. 配网开关用PT在不停电作业工况下铁磁谐振特性与识别研究[J]. 电网技术, 2022, 46(11): 4534-4540.
- WANG Shenhua, WANG Xujie, XIA Yuan, et al. Ferromagnetic resonance characteristics and identification of PT for distribution network switchgear under uninterrupted working condition[J]. Power System Technology, 2022, 46(11): 4534-4540.
- [30] 罗立波, 朱咏明, 杨振, 等. 基于ATP-EMTP的铁磁谐振过电压影响因素灵敏度仿真与分析[J]. 西安科技大学学报, 2020, 40(6): 1088-1095.
- LUO Libo, ZHU Yongming, YANG Zhen, et al. Simulation and analysis of sensitivity of factors affecting ferroresonance overvoltage based on ATP-EMTP[J]. Journal of Xi'an University of Science and Technology, 2020, 40(6): 1088-1095.

作者简介:

何龙(1988—), 男, 高级工程师, 研究方向为高压电气设备故障诊断研究。E-mail: helong69@126.com。

朱咏明(1973—), 男, 高级工程师, 研究方向为电气设备智能化、数字化。

马金财(1975—), 本科, 主要从事变电高压设备状态检修、故障诊断工作。E-mail: 860731525@qq.com。