

基于频谱分析与支持向量机的绕组检测分析方式比较研究

秦培浩¹
QIN Peihao

摘要

电力系统中绕组工频交流耐压试验能够有效检验绕组的绝缘强度和耐压水平,通过检测数据以及相关技术分析手段发现绕组内部是否存在缺陷,确保绕组在运行过程中能够承受规定的工频交流电压。对电力行业常用的电力设备检测方式与频谱分析、支持向量机分析手段进行了比较分析,并在算法框架搭建方面给出了进一步的优化方向。

关键词

电气;绕组检测;频谱分析;支持向量机;人工智能

doi: 10.3969/j.issn.1672-9528.2024.09.037

0 引言

电气检测试验作为各行业电力系统的重点工作内容,流程严谨性和成果准确性至关重要。目前行业中的一般检测试验工作多以人工检测配合兆欧表、耐压器以及工频谐振试验装置等设备完成测试与分析工作,方法简便易行,培训和操作周期较短,但设备投入成本较高,运维等工作较为频繁,这也是一般检测试验的缺点。文章以红石电站4号发电机定子绕组交流耐压试验为样本参考,综合现有的较为先进的检测手段,与一般检测试验方式进行对比分析。

1. 国网新源松花江水力发电有限公司吉林白山发电厂
吉林吉林 132000

1 一般检测试验方式

1.1 试验背景及目的

2022年红石电站4号发电机依据规程要求,需要进行定子绕组交流耐压试验,对绕组的绝缘强度、耐压水平等参数进行异常判定,对表面缺陷进行全方面检查,针对闪络、放电、绝缘击穿等异常情况进行收集整理。

1.2 仪器选用及接线图设计

FLUKE1550C兆欧表、ZGSIII-60/5型直流耐压器以及GXZ-1200kVA工频谐振试验装置。红石4号发电机铭牌参数如表1所示,试验接线如图1所示。

- [4] Muhammad M, FRANCESCO G, SONIA L, et al. Comparison of echo state network and feed-forward neural networks in electrical load forecasting for demand response programs[J]. Mathematics and computers in simulation, 2021, 184: 282-293.
- [5] 向传娇. 进化算法优化回声状态网络的时间序列预测研究[D]. 赣州: 江西理工大学, 2023.
- [6] 樊江川, 于昊正, 王冬生, 等. 基于PLESN和LESQRN概率预测模型的短期电力负荷预测[J]. 燕山大学学报, 2024, 48(1): 54-61.
- [7] 刘鑫. 基于改进回声状态网络的时间序列预测[D]. 吉林: 吉林化工学院, 2023.
- [8] GARDNER S D, HAIDER M R, MORADI L, et al. A modified echo state network for time independent image classification[C]//2021 IEEE International Midwest Symposium on Circuits and Systems (MWSCAS). Piscataway: IEEE, 2021: 255-258.

- [9] 张琪. 基于演化回声状态网络的时间序列预测研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2022.
- [10] 王苑卉. 面向深度回声状态网络的参数优化方法研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2023.

【作者简介】

李秋迪(2000—), 女, 河北沧州人, 硕士研究生, 研究方向: 全光型储备池计算时间尺度优化。

陈家豪(2001—), 男, 河北邯郸人, 硕士研究生, 研究方向: 全光型储备池计算。

侯玉双(1979—), 女, 河北唐山人, 博士, 教授, 研究方向: 储备池计算。

岳殿佐(1982—), 通信作者(email: yuedianzuo@163.com), 男, 河北唐山人, 博士, 高级工程师, 硕士生导师, 研究方向: 储备池计算。

(收稿日期: 2024-06-19)

表 1 红石 4 号发电机铭牌参数表

项目	型号	定子接法	绝缘等级	额定频率/Hz	功率因数	额定电压/kV	额定功率/MW	额定电流/A	额定励磁电流/A	额定励磁电压/A
参数	SF50-56-9000	2-Y	B	50	0.875	10.5	50	3142	1174	255

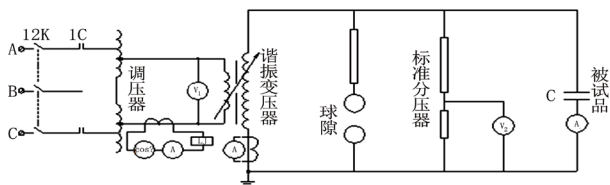


图 1 试验接线示意图

1.3 试验筹备、方法及注意事项

筹备内容。试验电压 $1.5 U_n=15.75 \text{ kV}$ ；过压保护的整定值 $1.11 U_{\text{试}}=17.5 \text{ kV}$ ；低压过流整定值 100 A ；转子绕组短路接地；发电机出口及中性点母线接地、距离满足试验要求；试验前完成被试相绝缘电阻及吸收比，定子绕组泄漏电流和直流耐压试验，试验正常，方可进行交流耐压试验。

交流试验方法。待设备及安全措施整备完善后，按顺序需要进行的试验包括：空载升压试验；校验过流保护；校验过压限制器；带被试品，进行调谐；继续升压到耐压值，启动时间继电器（升压前预置为 1 min ），到 1 min 调压器自动降压至 0 。

注意事项。现场需要设置遮栏，并悬挂危险标识牌；加压环节需要配备专人监护，并随时通知加压情况；试验时需要控制电源容量；要关注机组的冷热状态，选择合适的操作方式进行试验；对各种异常情况需要查明原因后再进行试验。

1.4 一般检测试验优缺点解析

对于一般检测试验方式采用的设备及操作流程，需要确定更为具体的应用场景，来选择匹配的试验检测仪器，以满足试验设计流程，具有选择方式单一、流程简单、操作易行等优势。工频谐振试验装置和直流耐压器都属于高压试验装置，工频谐振试验装置试验电压高、电流小、时间短、安全可靠，但造价较高、占地面积大、谐振条件要求高且波形畸变。而直流耐压器具有输出电压高、电流小、试验时间短、波形简单且安全可靠的优点，但设备体积大，结构复杂，纹波系数高，上升时间长，应用范围相对有限。

2 基于频谱分析的绕组工频交流耐压试验方法

作为能够将信号分解成不同频率的技术手段，频谱分析能够有效显示数据的幅度和相位信息，分析测试信号的频谱特性，进而评估耐压能力。

2.1 快速傅里叶变换（FFT）

快速傅里叶变换是离散傅里叶变换（DFT）的高效算法，用于计算离散信号的频谱。DFT 可以直接通过公式计算，但其计算量与信号长度的平方成正比，当信号长度较大时，计算量会非常巨大。FFT 利用信号的周期性和对称性等性质，将 DFT 的计算分解成多个小规模的 DFT 运算，大幅度降低了计算量。而在 FFT 的基础上增加窗函数，能够有效提升检测精度^[1]。

快速傅里叶变换的计算公式如下。

给定长度为 N 的复数序列 $x_0, x_1, \dots, x_{n-1}$ ，其中 DFT X_k 的计算公式为：

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j2\pi kn/N} \quad (1)$$

式中： j 是虚数单位； e 是自然对数的底。

快速傅里叶变换算法将式（1）计算过程分解为多个步骤，充分利用对称性、周期性变化特质进行优化，以达到加速计算的目的。

虽然在运算环节增加不同算法能够对检测结果进行不同精度的提升，但在算法提升过程中，不宜过分追求精度而损失频谱分辨率，简而精是 FFT 实现高质量测算和成图的方法内核，还需要根据特定工况引入适宜的提升算法，此处提供简易的运算代码：

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
# 生成模拟电压和电流信号
t = np.linspace(0, 1, 1000) # 时间序列
f1 = 50 # 信号频率为 50 Hz
f2 = 150 # 添加一个频率为 150 Hz 的谐波
voltage_signal = np.sin(2 * np.pi * f1 * t) + 0.5 * np.sin(2 * np.pi * f2 * t) # 电压信号
current_signal = np.cos(2 * np.pi * f1 * t) + 0.2 * np.cos(2 * np.pi * f2 * t) # 电流信号
# 进行 FFT 计算
voltage_fft = np.fft.fft(voltage_signal)
current_fft = np.fft.fft(current_signal)
freq = np.fft.fftfreq(len(t), t[1] - t[0])
# 绘制频谱图
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.subplot(2, 1, 1)
plt.plot(freq, np.abs(voltage_fft), label='Voltage')
plt.title('FFT of Voltage Signal')
plt.xlabel('Frequency (Hz)')
plt.ylabel('Amplitude')
```

```
plt.legend()
plt.subplot(2, 1, 2)
plt.plot(freq, np.abs(current_fft), label='Current')
plt.title('FFT of Current Signal')
plt.xlabel('Frequency (Hz)')
plt.ylabel('Amplitude')
plt.legend()
plt.tight_layout()
plt.show()
```

代码生成了模拟的电压和电流信号，利用 `np.fft.fft` 函数进行 FFT 计算，并绘制电压和电流信号的频谱图。此段代码中，可以根据实际的电压与电流情况，修改代码中的信号部分，以充分适应试验环境。代码并不具备技术局限性，可操作难度中等，检测成果精度较高。

2.2 短时傅里叶变换（STFT）及其应用

短时傅里叶变换（STFT）是一种时频分析方法，用于分析非平稳信号的时频特性。与传统的傅里叶变换（DFT）不同，DFT 只能分析信号的整体频谱特性，而无法反映信号随时间的变化。STFT 通过将信号划分为多个短时片段，并对每个片段进行傅里叶变换，从而获得了信号的时频谱^[2-3]。

STFT 的公式表示为：

$$X[m, n] = \sum_{k=0}^{N-1} x[n+k] \cdot w[k] \cdot e^{-j\frac{2\pi}{N}mk} \quad (2)$$

式中： $X[m, n]$ 是第 m 个频率 bin 在第 n 个时间窗口的幅度和相位（bin 指短时傅里叶变换（STFT）中，频谱上的一个频率分量）； $x[n]$ 是输入信号在时间域的值； $w[k]$ 是窗口函数，通常使用汉宁窗或汉明窗等； N 是窗口的长度； e 是自然对数的底； j 是虚数单位。

传统的短时傅里叶变换只提供全局信号解析，不能对局部的信号做出有效表现^[4]。在短时傅里叶变换中引入谱峭度能够弥补局部信号的瞬态成分。此处根据基础运算逻辑引入高压环境的检测试验，简要运算代码如下：

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.signal import stft
# 生成模拟信号
fs = 1000 # 采样率
t = np.linspace(0, 1, fs) # 时间序列
f1 = 50 # 信号频率为 50 Hz
f2 = 150 # 添加一个频率为 150 Hz 的谐波
x = np.sin(2 * np.pi * f1 * t) + 0.5 * np.sin(2 * np.pi * f2 * t)
# 信号
# 设置高电压阈值
```

```
high_voltage_threshold = 0.8
# 假设高电压阈值为 0.8
# 计算 STFT
f, t, Zxx = stft(x, fs, nperseg=100) # 使用 100 个点的窗口
# 计算谱峭度
spectral_kurtosis = np.mean(Zxx**4, axis=0) / (np.
mean(Zxx**2, axis=0)**2) - 3
# 检测高电压
high_voltage_indices = np.where(np.max(np.abs(Zxx),
axis=0) > high_voltage_threshold)[0]
if len(high_voltage_indices) > 0:
    print("High voltage detected at time indices:", high_
voltage_indices)
# 在此处可以添加相应的高电压处理逻辑，例如触发报警或记录数据等
# 绘制频谱和谱峭度
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.subplot(2, 1, 1)
plt.pcolormesh(t, f, np.abs(Zxx), shading='gouraud')
plt.title('STFT Magnitude')
plt.xlabel('Time [s]')
plt.ylabel('Frequency [Hz]')
plt.colorbar().set_label('Magnitude')
plt.subplot(2, 1, 2)
plt.plot(t, spectral_kurtosis)
plt.title('Spectral Kurtosis')
plt.xlabel('Time [s]')
plt.ylabel('Kurtosis')
plt.grid(True)
plt.tight_layout()
plt.show()
```

此段代码中，优先生成模拟信号 x ，利用 `scipy.signal.stft` 函数计算 STFT，根据运算结果计算谱峭度 `spectral_kurtosis`。为了适应高压试验环境，在调整代码后引入高压环境检测逻辑，通过计算 STFT 结果的幅度，找到各时间窗口的最大值，并与预先设置的高电压阈值进行比较，运算完成后绘制 STFT 的幅度图和谱峭度随时间的变化。

如果存在超过阈值的高电压信号，则输出相应的时间索引，并可以在代码中添加适当的处理逻辑，例如触发报警或记录数据等。相比之下，尽管 STFT 仍存在需要大规模数据为前提的弊端，但从技术手段和技术发展前景方面出发，依旧是电力行业及电气检测试验未来的发展方向，应用场景也更加宽阔。

3 基于频谱分析的绕组工频交流耐压试验方法

支持向量机作为以统计理论和结构风险原则为基础的人工智能算法,是指将输入空间的样本通过变换映射到高维特征空间,并在高维特征空间中求得将输入空间分开的最优分界面^[5]。

在绕组工频交流耐压试验环节, SVM 可形成对正常和异常绕组的分类判断,完成试验任务。

SVM 与 STFT 同样,需要一定的训练数据集以支持逻辑完成数据判别,且核函数类型以及相关参数、不敏感损失函数 ϵ 、错误惩罚因子 C 对符合预测精度影响较大。一般地,参数的选取以实际经验为主,但此做法不利于 SVM 的推广与进一步开发应用,所以 SVM 的相关参数选择尤为重要。本文对 SVM 还处于应用研究阶段,参数选取还需进一步深入研究。此处仅针对负荷预测及电机数据检测两方面进行简易代码展示,运行代码如下:

```
from sklearn import svm
from sklearn.model_selection import train_test_split
from sklearn.metrics import accuracy_score, classification_report
import numpy as np
# 假设已经有了绕组工频交流耐压试验的数据和额外的
# 负荷预测、电机数据检测数据
# 示例数据仅用于演示目的,需要替换为实际数据
X_test = np.random.rand(100, 3) # 假设有 100 个样本,每个
# 样本有 3 个特征(绕组数据、负荷预测数据、电机数据检测
# 数据)
y_test = np.random.randint(0, 2, 100) # 假设有 100 个样本
# 的分类标签(0 表示正常绕组,1 表示异常绕组)
# 将数据集分为训练集和测试集
X_train, X_test, y_train, y_test = train_test_split(X_test, y_test,
test_size=0.2, random_state=42)
# 创建 SVM 分类器
clf = svm.SVC(kernel='linear')
# 在训练集上训练模型
clf.fit(X_train, y_train)
# 在测试集上进行预测
y_pred = clf.predict(X_test)
# 计算准确率
accuracy = accuracy_score(y_test, y_pred)
print("Accuracy:", accuracy)
# 输出分类报告
print("Classification Report:")
print(classification_report(y_test, y_pred))
```

此处,额外引入的负荷预测和电机数据检测成果已经合并至绕组工频交流耐压试验数据中,形成全新的数据集,并根据数据集进行训练与测试,进而利用 SVM 模型完成分类绘制。

应用此模型能够获得精准的分类成果,且在完善参数调整和内核函数配置后,分类效果会更加优良。

4 结语

绕组检测在电力系统和电气设备维护中至关重要。传统的试验方法如高压绝缘测试、部分放电测试和介质损耗角测试简单易实现,但灵敏度和准确性有限,且造价较高,无法进行定量分析。相较而言,频谱分析具有更高的灵敏度和准确性,而支持向量机则通过大量样本数据训练,准确识别绕组故障。尽管目前的人工智能仍需要大量样本堆加,且存在解释性略显不足的情况,但未来的绕组检测技术在提高灵敏度、实时性和智能化方面势在必行。

在优化频谱分析方面,可以尝试开发高效算法、研究基于深度学习的方法或是结合其他检测手段。而优化支持向量机可通过改进训练算法、研究解释性机器学习等完成进一步优化。绕组检测技术的发展将通过优化传统方法结合人工智能与计算机算力提供更优质高效的检测成果,更好地应对实际需求。

参考文献:

- [1] 陈和洋,吴文宣,郑文迪,等.电力系统谐波检测方法综述[J].电气技术,2019,20(9):1-6.
- [2] 胡丽莹,肖蓬.快速傅里叶变换在频谱分析中的应用[J].福建师范大学学报(自然科学版),2011,27(4):27-30.
- [3] 黄建明,李晓明.结合短时傅里叶变换和谱峭度的电力系统谐波检测方法[J].电力系统保护与控制,2017,45(7):43-50.
- [4] 何闰丰,黄莺.一种改进支持向量机的电力负荷预测方法研究[J].红水河,2022,41(2):94-99.
- [5] 谭风雷,陈梦涛,汪龙龙.基于积温效应和优化支持向量机的短期电力负荷预测[J].电力需求侧管理,2018,20(5):33-36.

【作者简介】

秦培浩(1986—),男,吉林省吉林市人,本科,中级工程师,电气试验检修技师,研究方向:电气试验。

(收稿日期:2024-06-04)