

[信号分析]

基于振动信号分析的变电设备运行状态监测与检修策略

文/闫静¹ 刘凯²

1. 国网江苏省电力有限公司超高压分公司; 2. 国网江苏省电力有限公司扬州市江都区供电公司

提出一种基于振动信号分析的变电设备运行状态监测与检修策略, 通过对变电设备振动信号的实时采集和分析, 能够有效检测设备运行中的异常状态, 提前预警潜在故障, 提升设备的可靠性与运行效率。基于傅里叶变换对振动信号进行频域分析, 提取关键特征信息, 并结合周期截断、非周期截断、加窗技术等方法, 优化振动信号的频谱特性, 减小分析误差。实验验证了该方法在异常信号监测准确率和检修过程数据完整性方面的显著优势。

振动信号作为设备运行状态的重要反映之一, 具有较高的灵敏度和准确性。变电设备在运行过程中会产生不同频率的振动信号, 而这些信号的变化能够反映设备内部的健康状况。通过对振动信号的实时监测和分析, 能够有效识别设备的早期故障迹象, 并为设备状态检修提供可靠依据^[2]。近年来, 随着振动信号分析技术的不断发展, 尤其是傅里叶变换、功率谱密度分析等技术的应用, 基于振动信号的监测与诊断已经在变电设备的运行状态监测中得到广泛应用。

基于振动信号分析的变电设备运行状态监测

1. 振动级值预测

振动级值预测是基于机组的机械动态特性, 通过实时监测设备的振动信号, 分析其运行状态发展趋势的重要方法。机组的振动信号反映了其内部机械动态特性, 包括振动烈度和振动分量级值, 能够提供关于设备健康状态的实时信息。振动级值的变化具有一定的规律性, 通常在设备发生故障时, 振动级值的变化会显著增大。因此, 监测振动级值的变化趋势, 能够有效揭示设备的潜在故障风险。通

过“级值-时间趋势图”来描述振动级值随时间的变化, 能够直观地展示机组的运行状态与故障发展的关系。级值-时间趋势图如图1所示。

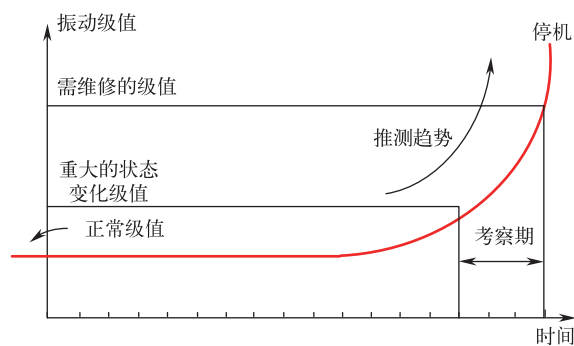


图1 级值-时间趋势图

设定振动级值为 $A(t)$, 则振动级值随时间的变化表示为

$$A(t) = A_0 + kt \quad (1)$$

式中, A_0 为初始振动级值; k 为振动级值的增长率; t 为时间变量。

随着故障的逐渐发展, 振动级值会逐步增加, 且增幅呈现出一定的线性趋势。通过对这些数据的拟合, 可以得到故障发生前的振动级值变化趋势^[3-4]。

通过对振动级值时间序列数据的分析,应用曲线拟合法来外推未来的振动级值变化。假设振动级值的变化符合一定的指数规律,使用指数拟合模型来描述振动级值随时间的变化,公式为

$$A(t) = A_0 e^{\alpha t} \quad (2)$$

式中, α 为指数增长系数,反映了振动级值增长的速度。

通过该模型,可以预测在未来某个时间点,机组的振动级值将达到危险阈值,从而为后续的设备维护提供依据。

在频域中,振动信号的频率分量反映了不同故障模式下机组的振动特性。振动信号可以表示为一系列正弦波的叠加,公式为

$$X(f) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (3)$$

式中, $X(f)$ 为振动信号在频域中的表示; $x(t)$ 为时域中的振动信号; f 为频率变量。

通过分析不同频率分量的变化,识别出可能的故障信号,并进一步预测振动级值的变化趋势。

通过上述方法,结合历史数据和实时监测,能够为机组的运行状态趋势预测提供可靠依据。当振动级值达到预定的警戒水平时,可以提前安排设备检修,避免设备故障对系统运行造成影响。

2. 功率谱与密度分析

变电设备在正常运行时会产生一定的机械振动,这些振动通过传感器转化为时间域信号,功率谱和功率谱密度则是对这些信号进行频域分析的结果。功率谱反映了信号在不同频率成分上的能量分布情况,是振动信号分析中的重要工具。通过对信号进行频域分析,揭示设备运行状态的频率特征,进而帮助识别潜在故障^[5]。

功率谱 $P(f)$ 描述了信号在频域中的能量分布,通过傅里叶变换将时域信号转换为频域信号来获得。设定时域信号为 $x(t)$, 其对应的功率谱 $P(f)$ 通过傅里叶变换公式表示为

$$P(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left| \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \right|^2 \quad (4)$$

式中, f 是频率变量; T 是观测时间。

通过计算功率谱,可以得到不同频率分量的能量大小,从而分析变电设备的运行特征和可能的故障模式。

与功率谱相关的概念是功率谱密度 (Power

Spectral Density, 简称 PSD), 它描述了单位频率带宽内信号的功率分布情况,是功率谱的一种归一化形式。功率谱密度 $S(f)$ 与功率谱之间的关系为

$$S(f) = \frac{P(f)}{\Delta f} \quad (5)$$

式中, Δf 为频率分辨率,表示信号在频域上被离散化的频率间隔。

功率谱密度的单位是功率与频率的比值,通常以 dB/Hz 为单位,反映了信号在单位频率带宽内的能量分布。功率谱如图2所示。

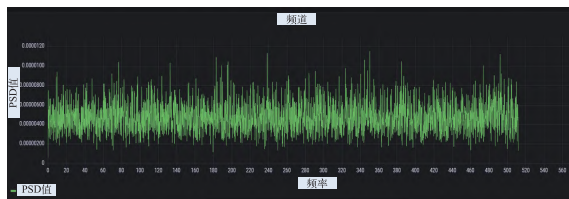


图2 功率谱

在变电设备的状态监测中,功率谱与功率谱密度的分析可以帮助识别振动信号中的异常频率成分。通过对设备振动信号的功率谱密度分析,能够有效地识别出设备内部故障(如齿轮磨损、轴承故障等)所产生的特征频率。例如,当振动信号中的特定频率分量的能量大幅度增加时,可能表示某一部件的机械损伤。

为了更好地捕捉振动信号中的频率特征,本文采用短时傅里叶变换 (STFT) 对信号进行时频分析。短时傅里叶变换可以将振动信号分解为短时间窗口内的频率成分,从而捕捉到频率随时间变化的动态特性。综合运用功率谱和功率谱密度分析,可以在频域中揭示变电设备的运行状态及其变化趋势^[6]。

振动信号异常的变电设备运行状态检修

1. 基于傅里叶变换的振动信号泄露与畸变检测

信号在频域表示中由于不完整或不准确的采样、窗函数效应和噪声干扰等原因,导致频谱出现失真或频率成分丢失的现象,会出现振动信号的泄露与畸变,进而影响故障诊断的精度,因此,准确检测信号的泄露与畸变对于故障预测和设备维护至关重要。对周期信号进行傅里叶变换时,信号的频率成分无法完全在有限的频率分辨率下表示,导致频谱中的能量“泄露”到其他频率上。其主要原因是频谱的离散化,特别是在信号不完全周期内采样

时^[7]。由于不当的信号处理（如过度滤波或噪声干扰）导致的频域信息的丢失或改变。频谱畸变表现为频率成分的失真，导致原本应在特定频率范围内的信号能量分布发生变化。为检测信号畸变，本文通过对频域信号的逆变换来恢复时域信号，并比较恢复后的信号与原始信号之间的差异。如果差异较大，说明信号已经发生畸变。通过傅里叶变换后的信号与原始信号之间的误差，可以定量评估信号的畸变程度。

2. 基于傅里叶变换的变电设备运行异常状态处理

(1) 周期截断

在对信号进行傅里叶变换时，截取的信号的时间长度为原始信号周期的整数倍，从而实现周期截断。周期信号具有周期性，且在一个周期内的起始和结束幅值相等，因此周期截断后的信号仍能较好地保留原始信号的频率成分^[8]。假设原始信号为一个单频正弦波，其频率为 f ，周期为 $T_0 = \frac{1}{f}$ ，截取的时间长度 $T = kT_0 = \frac{k}{f}$ ，其中 k 为整数。信号的采样点数 N 表示为

$$N = f_s T = \frac{f_s k}{f} \quad (6)$$

式中， f_s 为采样频率。频率分辨率 Δf 为

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{f}{k} \quad (7)$$

当信号时间长度 T 为原始信号周期的整数倍时，傅里叶变换的结果能够准确反映信号的频谱成分，避免了频谱泄漏和畸变现象的出现。

(2) 非周期截断

与周期截断不同，现实中的大多数信号分析往往属于非周期截断。非周期截断发生在信号的截取时间长度内，未能完整捕捉到一个或多个完整周期，导致信号波形的失真，进而影响频谱分析。假设截取信号时，信号的周期长度不能整除截取时间 T ，则傅里叶变换的频谱将出现“拖尾”现象。此时，频率成分的能量会从原始频率散布到其周围频率上，造成频谱的泄漏。泄漏现象通过公式来描述为

$$X(f) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} X_k e^{-j2\pi k f / T} \quad (8)$$

这种现象会导致频谱图出现宽广的旁瓣，影响频率分辨率和准确性。

(3) 信号加窗

为了减小非周期截断所带来的泄漏现象，本文采用加窗技术。通过引入窗函数来平滑信号两端的突变，避免因截断产生不连续点，从而减少频谱泄漏的影响。假设原始信号为 $x(t)$ ，窗函数为 $w(t)$ ，则加窗后的信号为

$$x_w(t) = x(t)w(t) \quad (9)$$

通过加窗处理，信号在傅里叶变换后的频谱图将表现出较小的旁瓣和更平滑的主瓣，能够有效地减少泄漏现象。加窗后的信号频谱比非加窗信号的频谱更为精确。虽然加窗技术不能完全消除泄漏，但它显著提高了频谱分析的准确性，尤其在信号的频率成分较为复杂时尤为重要。

(4) 能量修正

信号加窗虽然能够减少泄漏现象，但由于窗函数的引入，信号的幅值和能量可能发生变化，导致频谱的幅值失真。因此，进行傅里叶变换后，需要对幅值和能量进行修正。为补偿窗函数带来的影响，使用修正因子来校正窗函数带来的幅值失真。假设加窗后的信号为 $x_w(t)$ ，其傅里叶变换结果为 $x_w(f)$ ，则修正后的幅值 $x'_w(f)$ 通过如下公式进行修正

$$X'_w(f) = X_w(f)C_w \quad (10)$$

式中， C_w 为窗函数的修正因子，不同的窗函数具有不同的修正因子。

根据帕塞瓦尔定理，时域能量等于频域能量，即

$$\int_{-\infty}^{\infty} |x(t)|^2 dt = \int_{-\infty}^{\infty} |X(f)|^2 df \quad (11)$$

然而，由于窗函数的应用，频谱中的能量不再完全守恒，因此需要对能量进行修正。能量修正通常使用窗函数的能量系数进行调整，公式为

$$E_w = E_x C_w \quad (12)$$

式中， E_x 为原始信号的能量； C_w 为窗函数的能量修正系数。

通过这种方式，可以使得能量谱或功率谱分析的结果更加准确。

实验研究

为验证本文提出的基于振动信号分析的变电设备运行状态监测与检修方法的实际应用效果，选用本文方法与传统方法进行实验对比，对比异常信号

监测准确率, 得到的实验结果如图3所示。

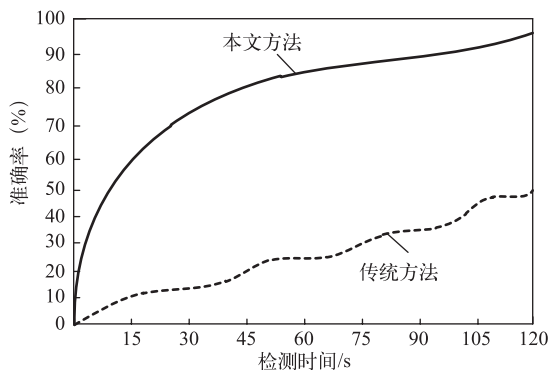


图3 监测准确率实验结果

根据图3可知, 基于振动信号的监测方法能够更加敏锐地捕捉到设备的运行异常。振动信号中蕴含着设备运行的关键动态特征, 通过精准的信号分析, 能够有效区分正常与异常状态, 进而提高故障监测的准确性。这表明本文方法能够更早、更准确地发现潜在的设备故障, 降低了因故障发生而造成的设备停运风险。传统方法的准确率明显低于本文提出的方法, 说明传统方法过于依赖经验或基于某些特定阈值的判定规则, 导致其在处理复杂的运行状态或微弱的异常信号时不够敏感。因此, 本文提出的振动信号分析方法在准确性上表现更为优越, 能有效弥补传统方法的不足。

进一步比较检修过程的丢包率, 得到的实验结果如图4所示。

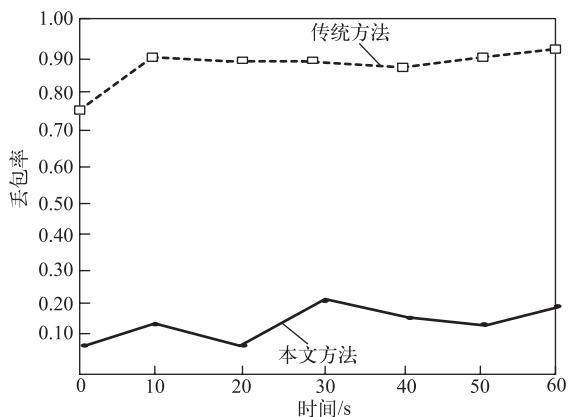


图4 丢包率实验结果

根据图4可知, 基于振动信号分析的检修方法的丢包率明显低于传统方法, 本文提出的振动信号分析方法在数据分析和传输过程中, 能够更有效地减少信息丢失, 从而保证了信号的完整性。

综上所述, 基于振动信号分析的监测与检修方法在变电设备的运行状态监测与检修中具有更高的应用价值, 不仅提升了设备故障检测的准确性, 还确保了数据传输过程的稳定性, 为实际运维提供更为精确的决策支持。

结束语

随着电力系统的不断发展和对电网设备运行可靠性的要求日益提高, 变电设备的健康状态监测和及时检修显得尤为重要。通过基于振动信号的变电设备运行状态监测技术, 可以实现对设备运行状态的实时监控、故障早期预警与精准诊断, 显著提高设备的运行效率和安全性。EA

(收稿日期: 2025-08-25)

参考文献

- [1] 邹阳, 俞豪奕, 金涛. 融合模糊K近邻及证据理论的变压器油纸绝缘状态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(14): 55-63.
- [2] 冯英, 李旭, 钟尧, 等. 基于多层融合振动数据分析的GIS设备机械缺陷诊断方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(14): 5797-5809.
- [3] 李翼翔, 田震, 唐英杰, 等. 考虑构网型与跟网型逆变器交互的孤岛微电网小信号稳定性分析[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(8): 11-18.
- [4] 胡利鸿, 王东伟, 郭涛. 某核级后备盘台设备地震响应分析与振动台试验研究[J]. 地震研究, 2024, 47(4): 635-646.
- [5] 刘会兰, 许文杰, 赵书涛, 等. 基于振动信号时间历程和自适应谱融合的断路器操动机构状态辨识方法[J]. 高电压技术, 2023, 49(5): 1860-1869.
- [6] 王扬程, 关向雨, 陈志鹏, 等. 基于结构声强法的GIS机械振动传递特性[J]. 电工技术学报, 2024, 39(16): 5162-5171.
- [7] 张超, 买买提热依木·阿布力孜. 基于EOE_LMD和阶次跟踪分析的变转速轴承故障诊断[J]. 振动与冲击, 2024, 43(7): 308-316.
- [8] 纳虎. 基于遥测信号的变电站设备运行信息远程监测系统[J]. 机械设计与制造工程, 2024, 53(7): 70-74.