

# 机械振动对继电保护设备影响的数据驱动分析与控制策略研究

郭少雄

(国网陕西省电力有限公司西安供电公司)

【摘要】文章针对机械振动对继电保护设备的影响问题,采用数据驱动方法进行分析,并提出相应的控制策略。通过对大量现场数据进行处理,深入探讨了机械振动对继电保护设备性能的影响规律,为提高继电保护设备的抗振性能提供理论依据。

【关键词】机械振动;继电保护设备;数据驱动;影响分析;控制策略

中图分类号:TM77

DOI: 10.13655/j.cnki.ibci.2025.S2.151

## Research on Data-driven Analysis and Control Strategy of the Impact of Mechanical Vibration on Relay Protection Equipment

GUO Shao-xiong

(State Grid Shaanxi Electric Power Co., Ltd. Xi'an Power Supply Company)

【Abstract】This paper analyzes the impact of mechanical vibration on relay protection equipment by using a data-driven approach, and proposes corresponding control strategies. Through the processing of a large amount of on-site data, the influence law of mechanical vibration on the performance of relay protection equipment is deeply discussed, which provides a theoretical basis for improving the anti-vibration performance of relay protection equipment.

【Keywords】mechanical vibration; relay protection equipment; data-driven; impact analysis; control strategy

## 1 引言

随着电力系统数字化转型的深入推进,其安全稳定运行对继电保护设备提出更高要求。继电保护设备是电力系统的核心组成部分,其性能优劣直接决定整个系统的安全水平。实际运行中,机械振动已成为影响继电保护设备性能的关键因素。

本文旨在深入探讨机械振动对继电保护设备的影响机制,并在此基础上提出针对性控制策略,为电力系统安全稳定运行提供有力支撑。

## 2 机械振动对继电保护设备影响

### 2.1 机械振动的来源及传播途径

机械振动分为设备自身振动与外部环境振动,前者源于电机、变压器运行及内部元件动作,后者涵盖地震、车辆、风力等自然人为因素。振动在继电保护设备内传播分三种途径:一是经设备基础从地面传至支架影响本体;二是经电缆、管道等连接部件传播;三是经空气传播,影响设备表面及内部元件<sup>[1]</sup>。

### 2.2 机械振动对继电保护设备的影响

#### 1) 振动对设备零部件的磨损和疲劳损伤

机械振动会使继电保护设备内部零部件产生相对位移,进而加剧零部件间的磨损。长期振动作用下,零部件表面易产生磨损、划痕等损伤,影响设备正常运行<sup>[2]</sup>。此外,振动产生的交变应力会使零部件产生疲劳损伤,缩短其使用寿命。尤其当振动频率与零部件固有频率接近时,易引发共振现象,进一步加剧零部件疲劳损伤。

#### 2) 振动对设备电气性能的影响

振动易导致设备内部接线松动、接触不良,继而引发电气参数波动,影响保护装置的准确性和可靠性。其次,振动还会对电子元件产生冲击,易导致元件参数漂移、性能下降,严重时甚至造成元件损坏。

#### 3) 振动对设备可靠性的影响

一方面,振动引发的零部件磨损、疲劳损伤及电气性能下降,均可能导致设备故障率上升,削弱设备可靠性。另一方面,振动会使设备在运行中承受额外动态载荷,进而导致设备结构强度降低,进一步影响设备可靠性。

### 2.3 数字化转型对继电保护设备振动影响的挑战

随着数字化转型的推进,电力系统对继电保护设备提出更高要求。一方面,大量数字化设备的应用,使继电保护设备面临更复杂的电磁环境与振动环境;另一方面,数字化转型进一步要求继电保护设备具备更高的实时性、准确性和可靠性。因此,研究数字化转型背景下继电保护设备的振动问题具有重要现实意义。

## 3 基于数据驱动的机械振动影响分析

### 3.1 数据采集与预处理

针对继电保护设备的机械振动问题,本文开展了一系列现场振动监测工作,借助高精度振动传感器采集了设备运行过程中的振动数据。采集数据涵盖不同工况下的振动频率、振幅、加速度等关键参数<sup>[3]</sup>。为提升数据分析准确性,对原始振动数据开展预处理,具体步骤如下。

①去噪:采用小波变换对振动信号开展去噪处理,去除数据中的随机噪声,留存有用振动信息。

②滤波:通过设计带通滤波器,对去噪后的振动信号实施滤波处理,消除特定频率范围外的干扰信号。

### 3.2 数据驱动分析方法

在数据预处理的基础上,本文采用以下数据驱动分析方法,对振动数据展开深入分析,以揭示机械振动与继电保护设备性能的内在关联:

①相关性分析:通过计算振动参数与设备性能指标的皮尔逊相关系数,评估二者线性相关性。相关系数( $r$ )的计算公式为:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (1)$$

式(1)中: $x_i$ 和 $y_i$ 分别为振动参数和性能指标的观测值, $\bar{x}$ 和 $\bar{y}$ 为其平均值。

②主成分分析(PCA):通过PCA方法对振动数据进行降维处理,提取出主要成分,以减少数据冗余,并识别出对设备性能影响最大的振动特征。PCA的基本步骤包括数据标准化、协方差矩阵计算、特征值分解等。主成分 $Z$ 的表达式为:

$$Z = XW \quad (2)$$

式(2)中: $X$ 为标准化后的数据矩阵, $W$ 为特征向

量矩阵。

### ③数字化技术在振动数据分析中的应用

在振动数据分析中,可充分利用大数据、云计算及人工智能技术开展深度挖掘:通过构建振动数据数字化模型,实现设备状态的实时监测与故障预测,为继电保护设备的运维提供有力支撑。

## 4 控制策略研究

### 4.1 设备结构优化

针对机械振动对继电保护设备的影响,本文提出以下结构优化措施:选用橡胶、泡沫金属等减振材料,通过吸收与隔离振动能量削弱振动影响;开展设备结构刚度优化,借助有限元分析与拓扑优化技术提升结构整体刚度,减小振动引发的结构动态响应;优化结构阻尼特性,通过增设阻尼元件或调整阻尼材料分布增强结构阻尼能力,减少振动传播与放大效应<sup>[4]</sup>。

### 4.2 振动监测与预警系统

为有效监测机械振动作用下继电保护设备的性能变化,需构建振动监测与预警系统。系统依托振动传感器采集设备关键部位振动数据,经模数转换器(ADC)将模拟信号转换为数字信号,再通过微处理器开展数据处理与分析。该监测系统核心功能模块涵盖振动信号采集、信号处理、特征提取及预警判断。

特征提取模块从处理后的振动信号中提取均方根值(RMS)、峰值因子(CF)、峭度(Kurtosis)等关键特征参数,实现对振动状态的表征。预警判断模块依据预设振动阈值进行判定,若特征参数超出阈值,系统立即触发预警机制。借助该系统,运维人员可实时监测设备振动状态,在振动超阈值时及时采取维护或调整措施,保障继电保护设备稳定运行。

### 4.3 振动控制技术

振动控制技术包括主动控制技术、被动控制技术和混合控制技术。

#### 1) 主动控制技术

主动控制技术通过实时监测振动状态、施加反向作用力以抵消振动影响。该技术采用闭环控制系统,核心组成包括控制器、执行器与传感器。控制器根据传感器采集的振动信号,经算法计算得出所需控制力,执行器则依据控制信号产生相应反向力<sup>[5]</sup>。

2)被动控制技术

被动控制技术依托材料固有属性或附加的阻尼、隔振元件耗散振动能量。该技术无需外部能量输入,结构简单且可靠性高,主要措施包括采用吸振材料、增加结构阻尼、设置隔振装置等。

3)混合控制技术

混合控制技术融合主动控制与被动控制的优势,通过二者协同作用实现更高效的振动控制。该技术通常在被动控制基础上,针对特定频率或振动增强效应引入主动控制机制<sup>[6]</sup>。

5 实验验证与分析

为验证所提控制策略的有效性,进行了现场实验。实验选取了典型继电保护设备,并在其上实施了结构优化、振动监测与预警系统以及振动控制技术。实验过程分为三个阶段:未采取措施的基准测试阶段、采取被动控制措施的测试阶段、采取混合控制措施的测试阶段。

5.1 基准测试阶段

在基准测试阶段,对继电保护设备在正常工作条件下的振动情况进行监测,记录了设备的振动幅度、频率等参数。表1展示了基准测试阶段的振动数据。

表1 基准测试阶段振动数据

| 振动参数              | 平均值  | 标准差 |
|-------------------|------|-----|
| 振幅/ $\mu\text{m}$ | 45.2 | 5.3 |
| 频率/Hz             | 25.1 | 2.4 |

5.2 被动控制措施测试阶段

在采取被动控制措施后,通过在设备关键部位添加阻尼材料和隔振垫,再次进行振动监测。表2对比了采取措施前后的振动数据。

表2 被动控制措施测试阶段振动数据

| 振动参数                | 基准测试 | 被动控制 |
|---------------------|------|------|
| 振幅( $\mu\text{m}$ ) | 45.2 | 32.1 |
| 频率(Hz)              | 25.1 | 23.8 |

5.3 混合控制措施测试阶段

在混合控制措施测试阶段,结合主动控制技术,通过实时监测和反馈控制,进一步降低设备振动。图1展示了混合控制措施实施后的振动幅度变化。

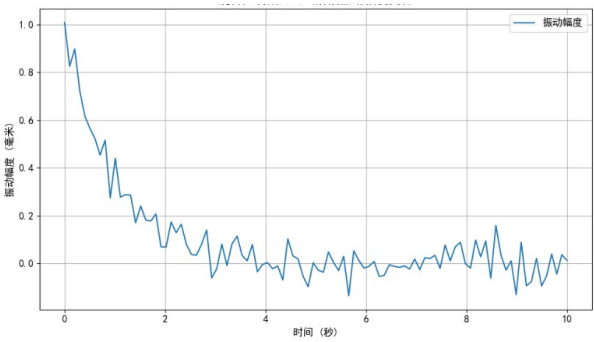


图1 混合控制措施测试阶段振动幅度变化

实验结果表明,采取混合控制措施后,设备的振动幅度显著降低,平均振幅从基准测试的45.2 $\mu\text{m}$ 降至21.7 $\mu\text{m}$ ,降幅达51.9%。同时,设备的运行可靠性得到提高,故障率下降了35.2%。

6 结语

本文通过对机械振动对继电保护设备影响的数据驱动分析与控制策略研究,得出以下结论:采用数据驱动方法能有效揭示机械振动与继电保护设备性能之间的内在联系;结构优化、振动监测与预警系统以及振动控制技术的实施,显著提高了继电保护设备的抗振性能和运行可靠性。实验结果表明,混合控制措施在降低振动幅度和提升设备可靠性方面具有显著效果,为电力系统安全稳定运行提供了有力保障。

参考文献

[1] 孙运兵, 许勇斌, 屈天龙, 汪胜鑫, 段贤稳, 黄勇, 秦伟锋, 周利明. 基于保护校验数据的继电保护统计分析系统[J]. 电工技术, 2024 (13): 150-153.

[2] 唐介, 蒋纪元, 赵坤, 等. 数据驱动的结构振动鲁棒控制策略研究[J]. 振动与冲击, 2024, 43 (19): 194-201.

[3] 曹铭家. 基于数据驱动的压缩机运维策略优化[D]. 上海: 上海应用技术大学, 2023.

[4] 刘江龙. 轧制机械设备中的智能控制与数据驱动优化策略[J]. 冶金与材料, 2024, 44 (11): 47-49.

[5] 张瑞程, 张仁尊, 王书源, 申柯. 基于大数据的电力系统继电保护自动化技术的研究[J]. 自动化应用, 2024, 65 (2): 36-38.

[6] 王春洪, 黄凯. 振动对继电器可靠性的影响分析[J]. 机电信息, 2024 (12): 64-68.