

基于波形分解的电能质量诊断系统设计与实现

韩义钦

辽宁科技大学

DOI:10.32629/acair.v4i2.20385

[摘要] 针对复合扰动背景下电压暂降诊断中存在的抗噪能力不足、特征提取精度不高和系统集成性较弱等问题,本文设计并实现了一种基于波形分解的电能质量诊断系统。系统采用CEEMDAN-VMD联合分解方法实现目标暂降波形提取,结合瞬时DQ变换与极值点分析完成暂降幅值、起止时刻及持续时间等参数检测,并基于Vue3+Vite和Flask构建前后端分离平台,实现数据导入、自动分析、结果展示与报告输出。实验结果表明,该系统能够较准确地完成复合扰动环境下的电压暂降诊断,具有较好的鲁棒性和应用价值。

[关键词] 电能质量; 电压暂降; 波形分解; CEEMDAN; VMD; 诊断系统

中图分类号: R363.1+24 **文献标识码:** A

Design and Implementation of a Power Quality Diagnosis System Based on Waveform Decomposition

Yiqin Han

Liaoning University of Science and Technology, Anshan

[Abstract] To address the problems of poor noise immunity, low feature extraction accuracy, and weak system integration in voltage sag diagnosis under composite disturbance conditions, this paper designs and implements a power quality diagnosis system based on waveform decomposition. The system adopts a hybrid CEEMDAN-VMD decomposition method to extract target voltage sag waveforms, and combines instantaneous DQ transformation with extreme-point analysis to detect key parameters, including sag magnitude, start time, end time, and duration. A front-end/back-end separated platform based on Vue3 + Vite and Flask is developed to realize data import, automatic analysis, result visualization, and report generation. Experimental results demonstrate that the proposed system can accurately diagnose voltage sag under composite disturbance conditions, showing good robustness and application value.

[Key words] Power quality; Voltage sag; Waveform decomposition; CEEMDAN; VMD; Diagnosis system

引言

在“双碳”目标与能源结构转型推进背景下,风电、光伏及大规模电动汽车充电负荷加速接入配电网,电网运行方式和负荷特性显著变化,电能质量问题呈现多样性与耦合性。其中电压暂降因高频发、高危害、成因复杂等特点,易引发设备误动作、生产中断、充电异常等问题^[1],在新能源汽车充电场景中还会影响充电效率、加剧电力电子装置老化,故快速准确诊断电压暂降具有重要意义。

传统电能质量诊断方法依赖时域统计、频域分析等单一技术,在单一扰动环境下有效,但面对含噪声、谐波等复合成分的信号时,常出现特征提取不充分、参数检测误差大等问题^[2];且现有研究多关注单一算法,对其工程化集成、平台化应用考虑不足,因此需研究兼顾波形分解精度、参数检测能力与系统实用性

的诊断系统。

本文围绕复合扰动下的电压暂降诊断问题,结合波形分解方法与系统开发技术,构建了集数据导入、信号分离、参数检测、成因识别及可视化展示于一体的电能质量诊断系统,具体开展以下工作:(1)分析复合扰动信号特征与诊断需求,明确电压暂降检测关键任务;(2)提出CEEMDAN-VMD波形分解方法,提升目标暂降信号提取精度;(3)结合瞬时DQ变换等实现电压暂降关键参数自动检测,构建成因识别流程;(4)基于前后端分离架构完成系统开发,实现数据导入、算法调用等功能;(5)经实验验证,系统在波形分解、参数检测等方面有效性良好,具备工程应用潜力。

1 基于波形分解的电能质量诊断方法

1.1 电能质量扰动信号分析

电能质量扰动信号通常具有非线性、非平稳和多分量叠加等特征,特别是在实际配电网运行环境中,电压波形往往同时受到谐波、噪声、瞬时冲击和故障扰动的影响。电压暂降表现为电压有效值在短时间内下降到额定值的一定比例范围内,并在较短时间后恢复正常。与稳态电压偏差不同,电压暂降具有明显的时变性和突发性,其特征主要体现在幅值突变、持续时间有限以及局部波形畸变等方面。

然而,在复合扰动背景下,电压暂降往往不是孤立出现的。一方面,采样噪声会削弱波形边界特征,导致参数检测结果偏差;另一方面,谐波与其他暂态分量会掩盖目标暂降信息,使得传统阈值法或均方根法难以准确识别起止点。此外,不同成因引起的电压暂降在波形形态、持续时间和恢复过程上也存在差异,例如短路故障型暂降通常表现为较明显的突变边缘,而电动机启动引起的暂降则可能更平滑、更具渐变特征。

因此,对电能质量扰动信号进行分析时,不能仅依赖单一域特征,而应通过波形分解手段将复合信号中的多尺度成分进行有效分离,从而突出与电压暂降相关的有效信息,为后续参数检测和成因识别提供可靠输入。

1.2 CEEMDAN-VMD波形分解方法

为了提高复合扰动信号中电压暂降特征的提取精度,本文采用CEEMDAN与VMD相结合的分层波形分解方法。该方法的基本思想是:先利用CEEMDAN对原始信号进行自适应分解,获得多个本征模态分量;再根据各模态与目标暂降特征的相关性,选取关键分量输入VMD进行二次精细分解;最后通过模态筛选与重构获得更纯净的暂降波形。

CEEMDAN是一种针对EMD模态混叠问题提出的改进方法。其通过向信号中加入自适应白噪声,并对多次分解结果进行集合平均,能够在较大程度上提升模态分解的稳定性。对于含噪、含谐波的电能质量信号,CEEMDAN能够较好地高频噪声分量、谐波分量和低频趋势分量进行区分,为目标特征提取创造条件。

具体流程如下:首先将原始电压波形输入CEEMDAN,得到若干本征模态分量;其次计算各分量的能量分布、频率特征或相关系数,筛选出与电压暂降相关的模态;然后将筛选后的模态输入VMD进行二次分解,提取主要有效分量并去除残余噪声;最后对目标模态进行重构,得到用于后续分析的暂降波形。该方法兼具CEEMDAN的自适应分解优势与VMD的精细重构能力,能够较好地适应复杂配电网环境下的复合扰动信号处理需求。

1.3 电压暂降参数检测与成因识别

在获得相对纯净的电压暂降波形后,需要进一步完成关键参数检测与成因识别。参数检测的核心在于准确获取电压暂降的幅值、开始时刻、结束时刻及持续时间等指标,这些指标不仅直接决定了电压暂降等级评价结果,也为成因识别提供重要依据。

本文在参数检测部分采用瞬时DQ变换与局部极值分析相结合的方法。首先,将处理后的单相信号重构为三相信号表示形式,并进行瞬时DQ变换,从而将原始时变交流量映射到直流和交流

分量中。相较于直接在原始时域波形上进行阈值判断,DQ变换后的特征更有利于突出波形突变位置。随后,通过对暂降过渡段进行极值点分析与差分处理,确定电压变化最显著的时刻,进而识别暂降开始点与结束点。对于暂降幅值,则通过稳定阶段有效值估计与突变区间特征提取相结合的方式进行计算;持续时间由起止点差值确定。

总体来看,本文构建的诊断方法以波形分解为基础,以参数检测为核心,以成因识别为拓展,形成了较完整的电能质量诊断技术链条,为系统设计与工程实现提供了算法支撑。

2 电能质量诊断系统设计与实现

2.1 系统总体架构

为了实现电能质量诊断方法的工程化应用,本文设计了一种前后端分离的电能质量诊断系统。系统前端采用Vue3与Vite进行开发,负责用户交互、数据展示与结果可视化;后端采用Flask框架实现服务接口与任务调度,并借助Python和Matlab完成核心算法处理。前后端通过HTTP接口进行通信,前端利用Axios向后端发送数据请求和任务触发指令,后端接收波形数据后调用相应算法模块完成分析,再将处理结果返回前端页面展示。

从逻辑上看,系统总体架构可分为四个层次:数据输入层、算法处理层、服务交互层和结果展示层。数据输入层负责接收用户上传的波形文件;算法处理层完成信号分离、参数检测和成因识别;服务交互层负责请求解析、任务控制和结果封装;结果展示层通过图表、文本和表格等形式向用户输出诊断结果。该架构具有模块清晰、耦合度低和扩展性较好的特点,既有利于后续算法升级,也方便系统功能拓展。

2.2 功能模块设计

结合实际诊断需求,系统主要由数据导入模块、诊断分析模块和可视化展示模块构成。

数据导入模块主要用于读取电能质量监测设备采集到的电压波形数据,并完成基础格式解析与预处理。该模块支持用户上传本地文件,也支持加载系统内置样例数据。导入完成后,系统能够对采样点序列进行校验,为后续分析提供统一格式的数据输入。

诊断分析模块是系统的核心部分,主要包括信号分离、参数检测和成因识别三个子模块。其中,信号分离模块调用CEEMDAN-VMD算法,从复合扰动信号中提取电压暂降有效波形;参数检测模块基于分离后的暂降波形,对幅值、开始时间、结束时间和持续时间等关键指标进行计算;成因识别模块则结合波形特征和参数信息,对暂降成因进行判别。通过模块化设计,系统不仅能够实现自动诊断,还保留了对单一模块独立优化的空间。

可视化展示模块用于向用户直观呈现分析结果。系统通过Echarts图表和表格组件展示原始波形、分解结果、重构波形、参数信息和诊断结论,并支持结果汇总与报告下载。相较于单纯输出数值结果,这种可视化方式更有利于用户理解诊断过程,提升系统实用性。

2.3 系统实现流程

系统的典型运行流程如下:首先,用户进入系统后上传待分析的电压波形文件,或选择样例数据进行测试;其次,前端完成文件传输并调用后端分析接口,后端在接收到数据后启动预处理流程;然后,系统依次执行波形分解、参数检测和成因识别等算法任务,并将各阶段结果进行结构化封装;最后,前端根据返回结果完成图表绘制和结论展示,用户可进一步查看数据总结信息并下载诊断报告。

在交互设计方面,系统尽量简化操作流程。用户只需完成数据选择与任务启动,即可由系统自动执行后续分析过程。随着各模块处理完成,页面按照诊断流程逐步展示中间结果与最终结论,增强了使用的连贯性与可解释性。此外,为提高系统稳定性,后端对任务执行过程中的异常情况进行了基本处理,如文件格式错误、数据长度异常和算法运行失败等,避免用户因单次处理异常而中断整体使用。

本文设计的系统不仅实现了波形分解方法的可视化落地,也初步形成了从原始波形到诊断报告的完整应用闭环,为电能质量在线分析平台建设提供了可行思路。

3 结果与分析

3.1 测试环境与数据来源

为验证系统有效性,本文在统一软硬件环境下开展测试:操作系统Windows 11,处理器AMD Ryzen 9 7945HX,显卡NVIDIA GeForce RTX 4060 Laptop GPU,内存16GB,开发工具含Visual Studio Code、PyCharm、MATLAB,浏览器Microsoft Edge,可满足前端渲染、后端处理及算法调用需求。

测试采用电能质量波形样例与实验构造数据结合的方式,包含电压暂降及与噪声、谐波、瞬态扰动叠加的复合波形,模拟配电网复杂场景;通过设置不同暂降幅值、时长及扰动背景,从波形分解效果、参数检测精度、诊断结果合理性三方面分析,验证系统多工况诊断性能。

3.2 波形分解效果分析

复合扰动下原始电压波形含多种成分,直接定位暂降易受干扰。本文采用CEEMDAN-VMD组合法,先自适应模态分解原始信号,再提取关键分量,可有效分离暂降特征与干扰成分。

测试显示:CEEMDAN将原始波形分解为多模态分量,高频对应噪声、局部瞬变,中低频保留暂降相关能量;经VMD精细分解后,暂降边界特征更清晰,过渡段噪声抑制良好,重构波形贴近实际暂降过程。

该方法优势:有效抑噪降干扰,突出暂降起止突变特征以提升定位准确性,适配复合扰动波形重构;相较单一方法,在平滑性与特征保真度间达到较好平衡。

3.3 参数检测与诊断结果分析

参数检测方面,系统自动输出电压暂降起止时刻、时长、幅

值,前后端联动使参数与重构波形直观对应,提升可解释性;基于瞬时DQ变换与极值点分析的方法,结合预处理后对复合扰动样本的检测误差可控,波形分解与参数检测协同性良好。

诊断结果方面,系统可区分不同类型暂降:故障型具陡降沿与清晰恢复边界,负荷冲击型变化缓和、持续时间长;通过整合波形分解、参数信息及成因分析,形成完整诊断链路,满足工程“可分析、可解释、可输出”需求。系统交互流畅,支持从数据导入到结果输出的自动化离线处理,应用便利。

需指出,系统存在局限:复合扰动更复杂、暂降边界模糊或样本增多时,成因识别准确性有待提升;当前适配离线场景,大规模在线实时诊断需优化。

4 结语

本文围绕复合扰动背景下的电压暂降诊断问题,设计并实现了一种基于波形分解的电能质量诊断系统。首先,针对电能质量信号非线性、非平稳及多成分叠加的特点,构建了基于CEEMDAN-VMD的波形分解方法,实现了复合扰动中目标暂降波形的有效提取;其次,结合瞬时DQ变换、极值点分析和分段处理思想,完成了电压暂降幅值、起止时刻及持续时间等关键参数的检测,并实现了成因识别流程;最后,基于Vue3+Vite和Flask开发了前后端分离的诊断系统,完成了数据导入、自动分析、结果展示和报告输出等功能。

实验结果表明,本文方法在复合扰动环境下具有较好的信号分离能力和参数检测效果,所实现系统具备较强的实用性和可视化能力,能够为电能质量监测与分析提供一定的技术支撑。总体来看,本文工作实现了从算法研究到系统落地的有机结合,对提升电能质量诊断的自动化和工程化水平具有积极意义^[3]。

后续研究可从以下几个方面进一步展开:一是扩充测试数据集与实际场景样本,提高系统对更多电能质量扰动类型的适应能力;二是进一步优化成因识别模型,增强复杂工况下的泛化性能;三是提升系统的实时处理能力,推动其向在线监测和边缘部署方向发展。随着算法持续优化和应用场景拓展,该系统有望在配电网监测、新能源接入分析及电动汽车充电系统保障等领域发挥更大作用。

[参考文献]

[1]张宁,艾鑫,王泽峰.电压暂降对工业厂房内敏感负荷影响研究[J].智能建筑电气技术,2024,18(03):80-84.

[2]曹云轩,张捷,许宏.一起电压暂降过程的案例分析[J].华中电力,2012,25(03):31-32+36.

[3]刘军成.电能质量及其监测评估标准综述[J].中国标化,2010,(12):33-37.

作者简介:

韩义钦(2005--),男,汉族,河南省濮阳市人,本科,从事信号处理、分类识别方面研究。