

基于双流特征融合与注意力机制的电压暂降成因识别方法

韩义钦

辽宁科技大学

DOI:10.32629/jsse.v4i2.19946

[摘要] 针对复合扰动背景下电压暂降成因识别过程中存在的特征表达不足、类别间差异不明显以及复杂工况下识别精度受限等问题,提出一种基于双流特征融合与注意力机制的电压暂降成因识别方法。该方法以原始电压信号和增强辅助信号构建双流输入结构,其中原始支路保留完整时序波形信息,辅助支路则通过CEEMDAN-FFT提取重构基波,并结合FFAM幅值调制策略对暂降区间进行特征增强,从而突出波形边沿变化和局部幅值突变特征。在特征提取阶段,采用InceptionTime作为主干网络提取多尺度时序特征,并引入SE通道注意力机制对融合特征进行自适应重标定,以强化与暂降成因相关的关键通道响应。基于不同输入形式、不同主干网络以及是否引入注意力机制构建多组对比模型,通过消融实验对各模块作用进行验证。实验结果表明,所提方法在复合扰动条件下具有较高的识别准确率和较好的鲁棒性,测试准确率达到98.80%,优于多组对比模型,能够为电压暂降成因自动识别提供有效支持。

[关键词] 电能质量; 电压暂降; 成因识别; 双流特征融合; InceptionTime; SE注意力机制

中图分类号: TM60 **文献标识码:** A

A Voltage Sag Cause Identification Method Based on Dual-Stream Feature Fusion and Attention Mechanism

Yiqin Han

Liaoning University of Science and Technology

[Abstract] To address the problems of insufficient feature representation, weak inter-class separability, and limited identification accuracy in voltage sag cause recognition under composite disturbance conditions, a voltage sag cause identification method based on dual-stream feature fusion and attention mechanism is proposed. The method constructs a dual-stream input architecture using raw voltage signals and enhanced auxiliary signals. The raw branch preserves the complete temporal waveform information, while the auxiliary branch extracts reconstructed fundamental components through CEEMDAN-FFT and further enhances the sag interval by using the FFAM amplitude modulation strategy, thereby highlighting edge variations and local amplitude mutation features. In the feature extraction stage, InceptionTime is employed as the backbone network to capture multi-scale temporal features, and the SE channel attention mechanism is introduced to adaptively recalibrate the fused features, so as to strengthen the channel responses closely related to sag causes. Multiple comparative models are designed based on different input forms, backbone networks, and attention configurations, and ablation experiments are conducted to verify the contribution of each module. Experimental results show that the proposed method achieves high identification accuracy and good robustness under composite disturbance conditions. The test accuracy reaches 98.80%, outperforming several comparative models, which demonstrates its effectiveness for automatic voltage sag cause identification.

[Key words] power quality; voltage sag; cause identification; dual-stream feature fusion; InceptionTime; SE attention mechanism

引言

随着新能源并网规模扩大及电力电子设备广泛接入,配电网运行环境日趋复杂,电压暂降因发生频繁、影响广、危害大受

广泛关注,它会导致工业敏感负荷停机、控制系统误动作等,不利供电可靠性与用电安全性^[1]。

电压暂降常见成因包括线路短路、变压器投切、电动机启

动等,不同成因的暂降波形特征存在差异,有效识别成因可为故障分析、调度及治理提供依据。电压暂降是指电压有效值短时间内降至额定值一定范围后恢复的电能质量事件,但实际中它常伴谐波、噪声等复合扰动,掩盖波形差异,增加识别难度。

传统识别方法基于时域统计、小波变换等,在规则或单一扰动下有一定效果,但复合扰动时易出现特征提取不足等问题^[2]。近年来深度学习凭自动特征学习能力受到关注,相关模型应用于时序信号分类,但仅以原始波形为输入易受冗余、干扰信息影响,削弱对关键判别特征的关注。

针对上述问题,本文提出基于双流特征融合与注意力机制的电压暂降成因识别方法:以原始电压信号和增强辅助信号为输入,通过双流结构提取全局波形与局部增强特征,结合InceptionTime多尺度建模及SE注意力机制强化关键特征通道表达。经实验验证,该方法能有效提升复合扰动背景下识别的准确率与鲁棒性。

1 电压暂降成因识别方法

1.1 方法总体框架

本文方法面向复合扰动条件下的电压暂降成因识别任务,整体流程包括信号预处理、辅助信号构建、双流特征提取、注意力融合和分类输出五个环节。首先,以原始电压波形作为主输入,保留完整的时序变化和扰动信息;其次,采用CEEMDAN-FFT对原始信号进行分解和基波重构,并在此基础上利用FFAM策略生成增强辅助信号,以突出暂降区间的幅值变化与边沿特征;随后,将原始信号和增强信号分别输入双流特征提取网络进行多尺度时序特征学习;最后,在特征融合阶段引入SE通道注意力机制,对不同通道的重要性进行自适应重标定,并通过分类器输出暂降成因类别。

1.2 辅助信号构建

为了减弱噪声与高频干扰对模型识别性能的影响,本文首先采用完全自适应噪声集合经验模态分解方法对电压信号进行分解。CEEMDAN通过向信号中加入自适应噪声并进行多次集合平均,可以有效缓解传统EMD中的模态混叠问题,使不同频率成分得到较为稳定的分离。在获得若干本征模态分量后,结合FFT对各模态进行频域判定,提取与工频基波最相关的分量并完成基波重构,从而得到较为平滑的基波信号。

在重构基波的基础上,进一步引入FFAM幅值调制策略生成增强辅助信号。其主要目标是突出暂降发生阶段与恢复阶段的局部幅值变化,使暂降边沿、波形转折及包络变化特征更加明显。经过增强处理后,辅助支路中的判别信息更加集中,稳态段冗余成分得到一定抑制,因此能够为后续分类模型提供更具针对性的特征表达。

1.3 双流特征提取与融合

在输入结构设计上,本文采用双流输入方式。第一支路输入原始电压信号,主要保留复合扰动背景下的全局时序信息;第二支路输入增强辅助信号,主要承担局部判别特征强化任务。双流结构能够在不同表示空间中学习互补信息,从而提升模型对复

杂暂降成因的区分能力。

在主干网络选择上,本文采用InceptionTime作为时序特征提取器。InceptionTime通过并行多尺度卷积分支对不同感受野下的时间特征进行建模,能够有效捕捉突变、振荡、缓变等不同尺度的波形信息。与普通一维卷积网络相比,该结构更适合处理电压暂降这类具有明显多尺度时序特性的电能质量信号^[3]。

在特征融合阶段,考虑到不同通道对成因识别的重要程度并不一致,本文引入SE通道注意力机制。该机制通过全局压缩获得通道描述,再利用映射函数学习通道间依赖关系,最终对特征通道进行自适应加权。通过这种方式,模型能够强化与暂降成因密切相关的关键特征,抑制背景噪声及冗余信息,从而提升融合特征的有效性和分类稳定性。

2 实验设计

2.1 实验环境与训练设置

所提方法基于PyTorch框架实现。模型训练过程中采用Adam优化器,以实现不同参数的自适应学习率调整。综合训练效率和识别性能,批量大小设置为32。为提高模型训练稳定性并抑制过拟合,训练过程中引入学习率自适应衰减策略和早停机制。当验证集性能在一定轮数内无明显提升时,自动降低学习率;当验证集准确率在连续若干轮内未继续改善时,提前终止训练,并保存验证性能最佳的模型参数。

在性能评价方面,本文选取测试准确率、最优迭代轮次、单样本推理时间和模型参数量作为主要指标。测试准确率反映模型分类性能,最优迭代轮次反映模型收敛情况,单样本推理时间体现实时性,模型参数量则用于评价复杂度和工程部署开销。

2.2 数据集说明

根据电能质量事件的不同复合形式,本文将仿真样本划分为四个数据集,以验证模型在不同数据环境下的识别能力。样本类别共覆盖27类典型电能质量扰动事件,包括电压暂降、短时中断、频率偏移、电压暂升,以及多种伴随谐波、暂态和缺口扰动的复合电压暂降事件。其中,部分典型类别包括线路故障引起的电压暂降、变压器投切引起的电压暂降、电动机启动引起的电压暂降,以及与其他扰动叠加后的复合事件。

2.3 对比模型设置

为了系统验证本文方法中各关键模块的有效性,围绕输入信号形式、双流结构设计、注意力机制以及主干网络选择四个方面开展消融实验。在相同数据集、相同训练策略和相同超参数条件下,构建A0至A4及Proposal共6组对比模型。

A0为仅以原始信号为输入的单流InceptionTime基准模型。A1在A0基础上加入SE注意力机制,用于分析通道注意力在单流结构中的作用。A2采用原始信号与重构基波构成双通道输入,用于验证引入基波辅助支路后双流结构的增益作用。A3在A2基础上,以FFAM增强信号替代重构基波,用于考察增强支路相较传统基波支路能否提供更具判别性的补充信息。A4在与本文模型相同的输入条件下,将主干网络由InceptionTime替换为TCNN-BiGRU,用于比较不同特征提取框架在本任务中的适用性。Proposal则

为本文提出的完整模型,即在原始信号支路和FFAM增强信号支路组成的双流输入基础上进一步引入SE注意力机制。

3 结果与分析

3.1 不同数据条件下的识别结果

实验结果表明,所提方法在不同噪声背景 and 不同复合扰动数据集上均表现出较高的识别准确率。从已有结果看,在多组数据集测试中,模型准确率总体维持在较高水平,说明双流输入结构能够较好地提升类别间可分性。对于仅以单一原始信号作为输入的模型而言,由于原始波形中包含大量稳态信息和伴随噪声,模型对关键扰动特征的关注容易被稀释;而本文方法通过引入增强支路,使局部变化特征在输入阶段即得到强化,因此在复杂背景下仍能保持较强的识别能力。

已有对比结果显示本文方法的识别准确率达到98.87%,高于其他多组对比模型。在Dataset 4中,所提方法准确率达到98.80%,同样优于多数对比模型。这说明所提模型在全类别复合扰动识别场景中具有较好的鲁棒性和泛化性。

3.2 消融实验分析

为进一步分析各模块对模型性能的贡献,本文在Dataset 4上开展消融实验。各组成模块均对模型性能提升具有积极作用。首先,在单流结构中引入SE注意力机制后,A1的测试准确率由A0的95.38%提升至96.45%,说明通道注意力机制能够在原始信号输入条件下强化有效特征、抑制冗余通道响应,对模型分类性能具有一定提升作用。其次,当模型从单流扩展为双流结构,并引入重构基波作为辅助输入后,A2的测试准确率达到97.73%,较A0提高了2.35个百分点。这表明在原始波形之外增加辅助支路,有助于提高模型对复合扰动背景下成因差异的感知能力。再次,当辅助支路由重构基波替换为FFAM增强信号后,A3准确率进一步提升至98.55%。该结果表明,增强信号相较于单纯的基波重构信号,能够更有效地突出暂降边沿、幅值调制和局部转折等判别特征,从而提高类别区分能力。最后,在与完整模型相同输入条件下,采用TCNN-BiGRU作为主干网络的A4虽然具有较低的参数量和更短的推理时间,但测试准确率仅为97.23%,低于Proposal的98.80%。这说明在本任务中,InceptionTime对于多尺度时序特征的刻画能力更强,更适合电压暂降成因识别。综合来看,Proposal在准确率方面取得最优结果,同时在参数量和推理时间方面仍保持较好的平衡,说明所提方法在性能和工程应用之间具备较好的兼顾性。

3.3 方法优势与讨论

从实验结果可以看出,本文方法的优势主要体现在三个方

面。其一,双流输入结构实现了全局波形信息与局部增强信息的协同建模,使模型能够同时关注整体趋势和关键细节。其二,FFAM增强支路能够有效突出与暂降成因相关的局部特征,提高不同类别之间的可分性。其三,SE注意力机制对通道特征进行自适应重标定,进一步增强了特征融合后的判别能力。

当然,本文研究仍存在一定局限。当前实验主要基于仿真数据和构造样本开展,实际现场监测数据可能包含更复杂的非理想扰动,模型在真实场景中的适应性仍需进一步验证。此外,辅助信号增强策略的参数设置仍具有一定经验性,未来可考虑引入更自适应的增强机制。另一方面,本文主要聚焦于电压暂降成因识别,对于多类电能质量事件的联合诊断与在线部署问题,还需要进一步研究。

4 结论

针对复合扰动背景下电压暂降成因识别中存在的特征表达不足和分类精度受限问题,本文提出了一种基于双流特征融合与注意力机制的识别方法。该方法利用原始电压信号和经CEEMDAN-FFT与FFAM处理后的增强信号构建双流输入结构,在此基础上采用InceptionTime提取多尺度时序特征,并利用SE通道注意力机制提升关键特征响应能力。

实验结果表明,双流输入结构能够有效提升模型对复杂暂降成因的识别能力,增强支路相较重构基波支路具有更强的判别特征表达能力,SE注意力机制也能够进一步改善融合特征质量。在Dataset 4上的消融实验中,本文完整模型测试准确率达到98.80%,优于多组对比模型,验证了所提方法的有效性。

总体而言,本文方法较好地实现了电压暂降信号增强、双流特征建模和注意力融合识别的统一,为复杂电能质量场景下的电压暂降成因自动识别提供了可行思路。未来可进一步结合真实监测数据开展验证,并在模型轻量化、边缘部署和多扰动联合识别等方面继续深入研究。

[参考文献]

- [1]彭雪枫.基于深度学习的电压暂降溯源与定位[D].东南大学,2023.
- [2]朱毅.基于电压dq变换的电压暂降特征量检测法[J].河北能源职业技术学院学报,2015,15(02):55-58+65.
- [3]刘军成.电能质量及其监测评估标准综述[J].中国标准化,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。