

Research on Power System Fault Diagnosis Methods in Smart Grid

Jianfeng Shi

Beijing Huairou Power Supply Company Beijing Electric Power Company, Beijing, 101400, China

Abstract

With the large-scale construction of smart grids, power systems have evolved from traditional high-proportion conventional energy systems to complex systems featuring high-proportion new energy integration and multi-source information interaction. The characteristics of randomness and concealment in fault occurrence have become increasingly evident, and traditional diagnostic methods have been unable to meet the requirements for safe and stable system operation. To address the main issues of low fault location accuracy, poor robustness in waveform recognition, and low utilization of multi-source information in power systems, a comprehensive diagnostic system encompassing fault feature extraction, location identification, fusion diagnosis, and threshold optimization has been established. Through theoretical analysis and simulation testing, the real-time performance and reliability of diagnostic algorithms have been improved, breaking through the bottleneck of traditional methods in complex operating conditions and providing technical support for rapid fault handling and safety protection in smart grids.

Keywords

Smart grid; Power system; Fault diagnosis; Deep learning; Multi-source information fusion

智能电网下电力系统故障诊断方法研究

史剑锋

北京市电力公司怀柔供电公司, 中国 · 北京 101400

摘要

随着智能电网大规模建设, 电力系统由原来的高比例常规能源系统向高比例新能源接入、多源信息交互的复杂系统转变, 故障发生具有随机性和隐蔽性的特点越来越明显, 传统的诊断方法已经不能满足系统安全稳定运行的要求。针对电力系统故障定位精度低、波形识别鲁棒性差、多源信息利用率低等主要问题, 创建包含故障特征提取、定位识别、融合诊断、阈值优化的全流程诊断体系, 借助理论分析和仿真检验, 改善诊断算法的实时性和可靠性, 冲破传统方法在复杂工况下应用的瓶颈, 给智能电网故障迅速处置和安全守护赋予技术助力。

关键词

智能电网; 电力系统; 故障诊断; 深度学习; 多源信息融合

1 引言

智能电网依靠先进的传感测量技术、通信技术和控制技术, 对电力生产、传输和分配全过程进行智能化的控制, 但是由于它的内部结构比较复杂以及运行工况的波动性, 造成故障演化路径具有非线性特点, 单一故障很容易引起连锁反应, 从而危及整个系统的安全。新能源高比例接入使得故障特征更加复杂, 传统的诊断方法依靠固定的阈值和单个的测量数据, 不能捕捉到故障暂态过程中微小的变化, 容易造成误判或者漏判。故障诊断是电力系统安全防护的重要环节, 其性能好坏直接影响到系统故障处理的速度和效率, 现有的故障诊断方法在复杂的工况下适应性较差, 不能满足智

能电网对故障诊断的实时性、准确性、鲁棒性等严格要求, 因此开展智能电网下电力系统故障诊断方法的研究, 解决目前的技术瓶颈, 完善诊断理论和技术体系。

2 故障诊断理论基础

2.1 智能电网故障特征分析

智能电网故障特征同系统运行工况、故障类型以及新能源接入比例存在关联, 故障产生之时, 系统电压、电流这些电气量会表现出明显的畸变现象, 伴随着暂态分量和谐波分量出现异常变动。暂态分量是故障初期的主要特征, 它的幅值和频率的变化可以体现故障的严重程度以及发展趋向, 但是它持续的时间短、幅值小, 容易受到系统噪声的干扰, 造成特征提取的困难^[1]。新能源发电设备接入系统后, 会使系统故障电流幅值和相位发生改变, 造成传统的故障特征出现畸变, 产生多维、非线性特征集合, 不同故障类型的特征

【作者简介】史剑锋(1971—), 男, 中国北京人, 本科, 高级技师, 从事电气、电力研究。

差别变得越来越小,诊断难度也越来越大。故障特征提取要冲破噪声干扰和特征畸变的双重束缚,准确把握故障暂态过程中关键的信息,给后续诊断识别赋予可靠支撑,现有的特征提取办法很难兼顾特征完整性和抗干扰性,致使诊断精确度受限制。

2.2 传统诊断方法局限性

传统的电力系统故障诊断方法主要是基于模型的诊断方法和基于信号处理的诊断方法,前者依靠准确的系统数学模型,用模型预测值和实际测量值之间的差异来完成故障诊断,但是它对于模型精度的要求很高,智能电网复杂的工况和参数波动会使得模型失配,从而产生诊断误差。后者通过滤波、分解等方式对电气量信号进行处理,提取故障特征并完成诊断,但是它大多依靠单一的信号源,不能利用多源信息的互补性,在故障特征微弱或者畸变的时候,容易出现误判的情况^[2]。

2.3 数据驱动诊断机理

数据驱动诊断机理把电力系统运行过程中产生的大量监测数据当作核心,用机器学习、深度学习这些算法去完成故障特征的自动提取、识别和诊断工作,而不需要依靠精确的系统数学模型,适合智能电网复杂多变的运行情况。其基本思路就是通过学习和训练历史故障数据来建立故障特征和故障类型、位置之间的映射关系,当系统出现故障的时候,用实时监测的数据输入到已经训练好的模型中,得到故障诊断结果。数据驱动诊断方法可以捕捉到故障特征的非线性变化,适合于新能源接入造成的特征畸变问题,而且可以将多源监测数据结合起来,利用不同数据之间的互补性来提高诊断精度,但是它的性能取决于数据的质量和算法的合理性,数据缺失、噪声干扰都会影响到诊断的效果,目前的数据驱动方法存在着特征提取不够充分、模型泛化能力差等缺点。

3 关键诊断方法设计

3.1 基于广域测量的故障定位

广域测量技术就是对电力系统各个节点上的同步相量测量装置进行部署,从而获得全系统的电气量信号,并且将这些信号同步地传送到控制中心,以此来实现故障定位。根据广域测量故障定位方法,把各个节点同步测量的电压、电流信号结合起来,利用故障暂态分量传播的特点来建立故障定位模型,准确找到故障点。其核心就是用同步相量技术消除测量数据的时间误差,保证各个节点测量数据的一致性,利用暂态分量的传播速度和相位变化来确定故障区,克服传统定位方法在复杂电网结构中定位精度低的难题。故障定位时要结合电网拓扑结构,对测量数据实施降噪处理,剔除系统噪声和干扰信号的影响,并考虑新能源接入对故障暂态分量产生的影响,改良定位算法,保证定位结果的准确性和可靠性,防止由于拓扑复杂或者特征畸变造成定位误差^[3]。

3.2 深度学习波形识别算法

深度学习波形识别算法以故障暂态波形的特征提取和识别为研究重点,利用深度学习模型的非线性拟合特性,可以自动地从暂态波形中找出微小的特征,从而达到对故障类型进行准确识别的目的。选择适合暂态波形处理的深度学习模型,用历史故障波形数据进行训练,建立波形特征和故障类型的映射关系,可以很好地适应新能源接入引起的波形畸变问题,克服传统波形识别方法对特征提取的限制。波形识别之前先对采集到的暂态波形做预处理,用滤波、归一化等方式去除噪声干扰和数据冗余,得到波形的时域、频域特征,然后把特征输入训练好的深度学习模型中,实现故障类型快速识别。模型训练过程中需要对网络结构和超参数进行调节来提高模型的泛化性能和计算效率,防止由于单一故障造成过度拟合的情况发生,保证各种故障场景下都能够得到比较稳定的识别效果,能够迅速地完成任务,满足实时诊断的需求。

3.3 多源信息融合诊断模型

多源信息融合诊断模型把广域测量数据、设备状态监测数据、环境监测数据等各类数据融合起来,采用信息融合技术来弥补各个数据源之间的不足,从而提高诊断方法的准确性以及鲁棒性。不同的监测数据从不同的角度反映系统的故障状态,广域测量数据关注的是故障的电气量特征,设备状态监测数据反映的是设备运行的状态以及存在的故障隐患,环境监测数据反映的是外部工况对系统故障的影响,利用信息融合技术把各种数据融合起来,消除单一数据源的不足,提高故障特征提取的完整性、准确性。融合时用分层融合策略,先对单个类型的数据做预处理和特征提取,再将不同类型的特征融合起来,得到多维融合特征向量,输入诊断模型中进行故障诊断,加入权重分配机制,根据各个数据源的可靠性和相关性给不同的数据源分配不同的权重,保证融合结果的合理性,防止无效数据影响诊断结果。

3.4 自适应阈值判据构建

自适应阈值判据克服了传统固定阈值不能适应智能电网工况动态变化的缺点,根据系统的运行工况和故障特征来建立动态调节的阈值判据,提高诊断方法的鲁棒性和适应性。阈值判据的建立是以系统正常工作时电气量的波动范围为依据,根据故障特征变化的规律,在系统运行过程中不断监测系统的运行参数,动态地改变阈值范围,使系统处于正常工作状态和故障状态之间能够准确地区分出来。自适应阈值的调整要联系深度学习模型的输出结果和实时监测数据,经由反馈机制,及时改良阈值参数,防止因为工况变动而产生误判或者漏判情况出现,还要顾及噪声干扰的因素,设置合适的阈值冗余,从而在保证诊断准确度的同时,维持系统的实时运行状态。阈值判据要适应各种故障类型的特点差别,对不同的故障类型采取不一样的自适应调节办法,

从而保证故障诊断的精确性和针对性，冲破传统固定阈值的束缚。

4 方法验证与优化策略

4.1 典型故障场景仿真验证

搭建智能电网仿真平台，模拟各种类型的故障场景，即线路短路、设备故障和新能源出力波动引起的故障等，根据实际电网拓扑结构和运行参数来设置仿真工况，采集故障过程中各个方面的监测数据。用仿真环境来试验所设计的故障诊断方法，把仿真得到的结果同实际故障情况比较，检验不同类型的故障识别准确率以及定位正确率。在仿真过程中主要模拟复杂的工况下出现的各种故障情况，例如极端气象条件下、多故障叠加、新能源占比高的情况等，来考查诊断方法的适用性，并且记录诊断响应时间，考察实时性能，利用仿真结果来确定诊断方法的优势和不足，为之后的优化提供依据。

4.2 诊断准确率对比分析

选择传统的故障诊断方法和所设计的诊断方法，在相同的仿真场景下做对比测试，主要从诊断准确率、误判率、漏判率这三个方面来分析不同的方法之间的性能差别。传统方法选择以信号处理为基础的诊断方法和传统的数据驱动方法，用对比试验来确定所设计的诊断方法在故障识别准确率方面优于其他方法，在复杂的工况以及有特征畸变的情况下也表现良好。排除测试工况差异的影响，保证测试结果的客观性、公正性，深入剖析差异产生的原因，明确所设计方法在特征提取、信息融合等各方面的优势，为方法优化指明方向，验证所设计方法相比传统方法更加先进、实用。

4.3 实时性与鲁棒性测试

实时性测试主要考察的是诊断方法的响应速度，采用仿真测试和实际场景测试的方式，记录故障出现到诊断完成所需要的时间，评价诊断方法能否达到智能电网故障快速处置的要求，对于响应时间过长的问题进行改进，提高算法运算速度和特征提取速度，从而缩短诊断时间。鲁棒性测试采用模拟系统参数波动、新能源出力波动、噪声干扰等各种复杂的工况，检验诊断方法在各种工况下诊断性能的好坏，观察诊断准确率的变化情况，针对鲁棒性不足的问题，改进特征提取算法和信息融合策略，提高方法的抗干扰能力。测试

时主要关注极端工况的诊断性能，保证诊断方法在各种复杂的环境下都能保持稳定，防止由于工况的变化而造成诊断性能的降低。

4.4 轻量化部署优化方案

考虑到智能电网现场设备的计算资源有限，对于所设计的故障诊断方法，提出轻量化部署优化方案，在保证诊断性能的基础上，简化算法结构，降低计算复杂度，满足现场设备的部署要求。在优化过程中，对深度学习模型进行轻量化处理，裁剪冗余的网络结构，优化参数设置，减小模型计算量和存储空间，改进特征提取算法，简化数据处理过程，缩短运算时间。采用边缘计算技术把诊断算法放到边缘节点上，完成故障数据的本地处理和诊断，削减数据传输延迟，加强诊断的实时性，缩减对云端计算资源的依赖，改善系统独立性和可靠性。优化方案要兼顾诊断性能和部署成本，保证轻量化处理之后，诊断方法的精度、实时性和鲁棒性不会受到太大的影响，满足现场部署的要求。

5 结语

智能电网环境下电力系统故障诊断方法研究，关键之处在于冲破传统方法的束缚，契合系统复杂多变的运行状况和故障特性，加强诊断的准确性，即时性以及鲁棒性。设计出基于广域测量的故障定位方法、深度学习波形识别算法、多源信息融合诊断模型和自适应阈值判据，形成了一条完整的故障诊断链路，经过仿真验证并加以改进，较好地克服了以往诊断手段在恶劣工况中出现的精度不高、鲁棒性差等缺陷，可以准确找到故障种类及其所在之处，并且迅速作出反应以满足故障的要求。故障诊断方法的改进和提高，给智能电网的安全稳定运行赋予了可靠的科技支持，助力新能源高比例接入环境下电力系统安全防护和高效运转。

参考文献

- [1] 金文杰. 新能源配电网电力调度优化方法研究 [J]. 中国设备工程, 2025, (21): 106-108.
- [2] 陈帝宁. 电力系统配电网自动化实现技术研析 [J]. 电力设备管理, 2025, (20): 50-52. DOI:10.26977/j.cnki.dlsbgl.2025.20.057.
- [3] 马骁. 基于声发射技术的配电网电力智能运维检修方法研究 [J]. 电声技术, 2025, 49 (10): 208-210. DOI:10.16311/j.audioe.2025.10.064.