

[继电保护]

面向复杂电力网络的继电保护技术集成与故障特性研究

文/刘晓东 孔德群 李哲群 邢奥
国网山东省电力公司日照供电公司

随着电力系统的规模和复杂性不断增加，传统的继电保护技术面临着许多挑战，尤其是在复杂电力网络中故障检测与定位的准确性和效率方面。为了提升电力系统的安全性和可靠性，提出一种面向复杂电力网络的继电保护技术集成与故障特性分析方法。从复杂电力网络的继电保护需求出发，分析当前系统面临的挑战，并基于深度学习和数据融合技术提出相应的技术集成方案。

随着现代电力系统规模的持续扩大和电力网络结构的日益复杂化，电力系统的稳定运行和安全性面临越来越多的挑战。复杂电力网络中不仅存在大规模发电、输电和配电设备的协同运行，还涉及分布式电源、储能装置及新能源接入等多种新兴技术。这些因素的叠加使得电力系统故障的特性更加复杂多变，对继电保护技术提出了更高的要求。传统的继电保护技术在应对简单电力网络故障时表现出良好的可靠性和精准性，但在面对复杂电力网络中多点故障、非线性动态行为以及快速波动等问题时，显得力不从心。因此，如何将先进的数据采集与处理技术、智能算法和现代化保护装置相结合，实现继电保护技术的集成创新，已成为学术界和工程界关注的热点问题。

本文围绕复杂电力网络的继电保护技术集成与故障特性展开研究，首先分析复杂电力网络对继电保护的需求，并探讨适应复杂环境的数据采集与保护技术集成策略；其次，通过特征参数提取、故障信号识别等技术手段，对复杂故障特性进行深入分析；最后，通过实验验证相关技术的有效性，为复杂电力网络的继电保护设计和优化提供科学依据。

面向复杂电力网络的继电保护技术集成

1. 复杂电力网络的继电保护需求分析

复杂电力网络的特点包括多层次、多节点、多种电源接入以及网络拓扑的高度复杂性，这使得故障的发生、传播和隔离过程变得更加复杂。在复杂电力网络中，除传统的单一故障源外，还可能存在多种故障源，例如并联故障、双点短路及交直流混合系统中的故障等。这些故障源使得继电保护的判断变得更加困难。不同类型的故障具有不同的电流、电压特性，传统的保护算法往往无法有效识别多种故障类型，导致保护的滞后或误动作。

假设在一个复杂电力网络中，故障点 F 对应的短路电流为 $I_f(t)$ ，则在标准的保护判断中，继电保护装置需要利用短路电流的幅值、相位等信息来判断故障的类型和位置。具体的电流波形表达式可为

$$I_f(t) = I_0 + I_1 \sin(\omega t + \phi_1) + I_2 \sin(2\omega t + \phi_2) + \dots \quad (1)$$

式中， I_0 为直流分量； I_1 和 I_2 为交流分量； ω 为系统频率； ϕ_1 和 ϕ_2 为相位角。通过频域分析和时域分析，结合电流幅值的变化规律，继电保护系统可以有效判断故障点和故障类型。

电力网络的行为呈现出高度的非线性特点。随

着负荷波动、风能发电和光伏发电的随机性，电力系统的动态行为变得更加难以预测。

例如，考虑到风电场和光伏电站在发生故障时，短路电流会随着风速、辐射强度等外部条件的变化而发生显著波动。在这种情况下，利用传统的幅值判别方法进行继电保护往往会导致误动作或失灵。因此，本文采用更为先进的非线性系统建模方法，基于神经网络进行保护，提高系统对复杂故障的辨识能力。

在继电保护系统内部设置多级保护策略，包括过流保护、距离保护和频率保护等多种保护机制，在不同的故障情境下，选择最合适的保护策略。结合智能化技术继电保护系统可以实时分析电力网络中的运行状态，预测潜在故障，并提前采取预防措施。

2. 复杂电力网络数据采集

数据采集的核心任务是准确捕获复杂电力网络中的运行状态。针对电力网络的多样化需求，关键采集参数包括暂态与稳态参数、谐波与次同步振荡以及动态拓扑变化信息。

暂态与稳态参数如电流 $I(t)$ 、电压 $V(t)$ 、功率 $P(t)$ 等。这些参数是分析网络运行状态和识别故障的基础。

复杂电力网络中存在非线性设备和电力电子装置，导致谐波和次同步振荡的产生。为捕获此类信息，数据采集系统需监测电流谐波分量 $\hat{I}_h(t)$ 和电压谐波分量 $\hat{V}_h(t)$ ，其一般形式为

$$\hat{I}_h(t) = \sum_{h=2}^{\infty} I_h \sin(h\omega t + \phi_h) \quad (2)$$

$$\hat{V}_h(t) = \sum V_h \sin(h\omega t + \theta_h) \quad (3)$$

式中， h 为谐波次数； I_h 和 V_h 为各次谐波幅值， ϕ_h 和 θ_h 为相位角。

动态拓扑变化信息是指复杂电力网络中的动态拓扑变化，如断路器动作和线路接入/切除等，对继电保护具有直接影响。实时记录拓扑变化信息能够帮助系统及时调整保护方案。

电力系统中的数字化采集装置以高频率采样电气参数，并通过高速通信网络传输至中央控制系统。

在功率测量中，除了传统的视在功率 S 、有功功率 P 、无功功率 Q 之外，还需要实时监控负序功率和

零序功率，用于识别不平衡运行和故障特征。视在功率计算公式为

$$S = |V| |I| \quad (4)$$

有功功率计算公式为

$$P = |V| |I| \cos \phi \quad (5)$$

无功功率计算公式为

$$Q = |V| |I| \sin \phi \quad (6)$$

式中， $|V|$ 和 $|I|$ 为电压与电流的有效值； ϕ 为相角差。

复杂电力网络的动态行为要求数据采集系统具有较高的实时性和同步性。通过GPS时间同步技术，可以将各采集点的时间偏差控制在微秒级，为后续的故障定位和保护决策提供高精度的时间基准。

在检测线路故障时，线路两端的电流差异可以表示为

$$\Delta I = I_1(t) - I_2(t) \quad (7)$$

式中， $I_1(t)$ 和 $I_2(t)$ 分别为线路两端测量的电流值。如果数据同步误差较大，将导致 ΔI 计算结果不准确，进而影响故障判断的精度。

3. 复杂电力网络继电保护

继电保护的基本任务是快速、准确地检测网络故障，并在必要时切除故障设备以保障系统的安全。复杂电力网络的特点需要保护系统提供高灵敏度、高选择性和高实时性的继电保护，从而检测小扰动和隐蔽性故障，故障切除必须限制在最小范围内，避免对非故障区域的影响，保护动作需在毫秒级完成，以防止故障扩大。

继电保护通常基于故障电流 I_f 、电压 V_f 和阻抗 Z_f 的变化进行判别。阻抗继电保护的判据可表示为

$$Z_f = \frac{V_f}{I_f} \quad (8)$$

当 Z_f 落入保护设定范围时，即可判定为故障。

通过PMU（相量测量单元）设备实时监测广域范围内的电气参数，获取电压相量 $V_p = |V|e^{j\theta}$ 和电流相量 $I_p = |I|e^{j\phi}$ 。基于广域信息的保护策略可以更全面地反映网络运行状态。

为避免保护装置之间的相互干扰，复杂网络继电保护采用多层次协调机制。例如，在发生区域故障时，主保护装置先行动作；若主保护失效，则后备保护进入动作状态。

复杂电力网络的继电保护技术集成故障特性分析

1. 特征参数提取

特征参数提取是故障分析中的重要步骤，通过从电力系统的实时运行数据中提取相关特征参数，可以有效识别故障类型、定位故障位置和评估故障严重性。

故障发生时，电流和电压的波形会发生明显的瞬态变化。通过分析电流和电压波形的幅度、相位及频率等参数，可以有效判断是否发生了故障。过流保护的基本原则是根据电流幅度的变化来判定故障，故障电流 I_f 表示为

$$I_f(t) = I_0 + \Delta I(t) \tag{9}$$

式中， I_0 为正常运行时的电流； $\Delta I(t)$ 为故障引起的电流突变。

在特征参数提取过程中，信息维数和关联维数是评估故障特征有效性的重要指标。它们衡量的是故障信号的复杂程度和特征之间的相关性。

信息维数是衡量故障信号所携带信息量的一个指标。在复杂电力网络中，信息维数可以通过计算故障信号在相空间中的分布来评估。相空间的构建通常使用状态空间重构法，信号的嵌入维度 m 和时间延迟 τ 需要根据实际信号进行优化选择。信号的嵌入维度与其信息维数相关，较高的信息维数表明该信号包含更多的故障信息。电流信号 $I(t)$ 的相空间嵌入形式为

$$\mathbf{X}(t) = [I(t), I(t + \tau), I(t + 2\tau), \dots, I(t + (m - 1)\tau)] \tag{10}$$

式中， τ 为时间延迟， m 为嵌入维度。通过这种方式，可以将时间序列转化为相空间中的点，进而提取出故障信号的主要特征。

关联维数反映了系统中各特征之间的关联程度。在电力网络中，各类故障信号常常表现出高度的时间和空间相关性。通过计算不同电压和电流信号之间的相关性，可以提取出与故障相关的关键特征。利用关联维数公式，量化不同信号之间的相依性

$$D_{\text{corr}} = \frac{\log(N_{\text{corr}})}{\log(N)} \tag{11}$$

式中， N_{corr} 为信号之间具有显著相关性的点的数量； N 为信号点的总数。较高的关联维数表明，系统中各信号之间存在较强的关联性，这有助于提高

故障检测的准确性。

2. 故障特性分析

在故障发生时，电力系统中电流、电压及功率等参数会发生明显的变化。通过对这些参数进行分析，可以有效判断故障的特性。

故障发生时，电流和电压的幅值通常会发生剧烈变化，尤其是短路故障时，电流会急剧增大。对幅值的分析能够帮助判断故障类型。在短路故障中，电流的幅值通常会超过正常范围，因此可以通过设定合适的阈值来进行识别。故障还会导致电压和电流相位的异常变化，尤其是在开路或接地故障中，电流的相位会出现突变。相位的变化常常是判断故障类型和位置的重要依据。

故障信号的频率成分通常与系统的正常运行状态存在差异。通过对频率特征的分析，可以有效区分故障信号与正常信号。在故障发生时，频率特性通常表现出明显的异常，如瞬时频率的跃变或频带的扩展。

实验研究

为了验证本文提出的面向复杂电力网络的继电保护技术集成与故障特性进行实验研究，选用传统的研究技术与本文技术进行分析，设定实验参数见表1。

表1 实验参数

项目	参数
输出精度/级	0.5
最大负载电压/V	20
谐波次数/次	1~2
基波频率范围/Hz	20~1 000
电流输出/A	0~10
相电压输出功率/(V·A)	70
开关量输入/路	7

按照上述设计实验步骤进行实验操作，实时监控两种故障分析方法的故障诊断过程，得到以下分析效率对比结果，如图1所示。

图1展示了故障分析效率的对比，清晰地表明了本文提出的继电保护技术集成与故障特性分析方法在故障分析效率上的显著优势。实验结果显示，采用传统故障诊断方法时，分析过程相对较长，尤其是在多种故障类型并存的情况下，传统方法由于依赖手动设定阈值和较为简单的特征提取，导致了较

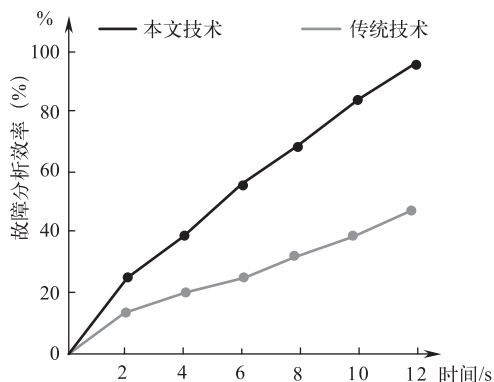


图1 故障分析效率对比图

长的响应时间和较低的诊断准确性。相较之下，本文提出的故障分析方法，能够在更短的时间内完成故障诊断并准确识别故障类型与位置。其分析效率明显高于传统方法，尤其在复杂电力网络环境下，能够快速应对多变的故障信号。该方法通过智能算法提高了对故障信号的处理能力，减少了因复杂性引起的分析误差，使得系统在出现故障时能更迅速地采取有效的保护措施，从而提高了整体电力网络的安全性与可靠性。图1中的对比结果证明了本文方法在故障诊断领域的优越性，尤其是在大规模电力系统中，能大幅提升诊断效率并缩短系统恢复时间。

得到的故障电流检测结果如图2所示。

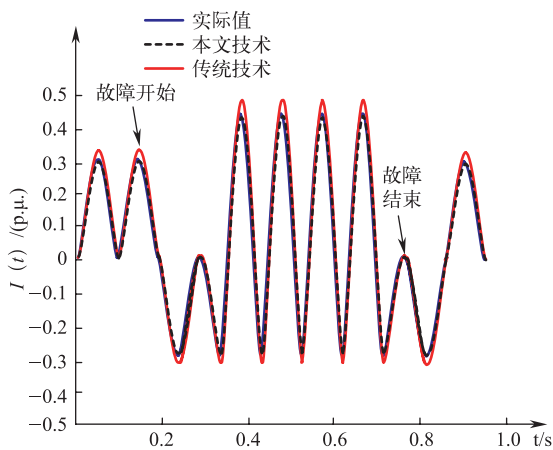


图2 故障电流检测结果

图2中的对比结果还显示，传统方法在一些复杂故障情况下，由于其基于阈值的检测策略，容易产生误检或漏检现象，导致检测到的电流波形与实际情况存在一定偏差。相反，本文方法通过智能化的数据分析和深度学习算法，能够实时分析电流的动态变化并进行精确预测，有效减少了传统方法中常

见的误差和滞后现象。

此外，本文方法在检测电流的变化幅度、时间响应等方面也表现出优异的性能，能够更好地适应复杂电力网络中多种故障模式的变化。这一结果进一步验证了本文方法在复杂电力系统故障检测中的应用潜力，特别是在快速故障隔离和电力网络安全保障方面，具有显著的技术优势。

结束语

本文针对复杂电力网络中的继电保护技术集成与故障特性进行了深入研究，提出了一种基于多层数据融合与深度学习的智能化故障诊断方法。通过对复杂电力网络中故障信号的采集、特征提取、信号分析和故障定位等方面的研究，本文不仅提高了故障检测的精度和诊断效率，还实现了更快速、精准的故障响应和恢复。实验结果表明，本文提出的方法在故障诊断速度、准确性以及故障定位精度方面均优于传统的继电保护技术，尤其在面对复杂的电力网络和多种类型故障时，展现了较强的适应性和鲁棒性。通过与传统方法的对比，本文方法能够在更短的时间内提供准确的故障识别和定位，大幅提高了电力系统的可靠性和安全性。EA

(收稿日期：2025-07-25)

参考文献

- [1] 贺馨仪, 董明, 刘文君, 等. 面向调控领域多源数据融合的电力变压器态势感知与预警方法研究[J]. 电工电能新技术, 2023, 42(4): 48-58.
- [2] 胡正伟, 王志红, 畅瑞鑫, 等. 基于改进Noise2Noise算法的电力线信号去噪[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(9): 32-45.
- [3] 廉霄兴, 宋勇, 朱军, 等. 基于双通道理论的通信认知增强技术研究[J]. 电信科学, 2024, 40(1): 123-135.
- [4] 游新冬, 刘陌村, 葛昊杰, 肖刚, 吕学强. 面向武器装备领域的复杂三元组抽取方法[J]. 小型微型计算机系统, 2024, 45(3): 521-528.
- [5] 程秋云, 刘京菊, 杨国正, 等. 一种启发式的互联网多层网络模型构建方法[J]. 计算机科学, 2022, 49(S02): 673-678.