

[故障处理]

低压配电网电弧故障电压差分检测技术的应用

文/安佳琪 罗楚军 王贤田 张癸滨 袁野
中国葛洲坝集团股份有限公司三峡电力职业学院

随着分布式电源渗透率提高和用电负荷多元化发展，配电网故障特征呈现复杂化趋势，其中电弧故障因其隐蔽性强、随机性大等特点，成为引发电气火灾的主要诱因之一。探讨电压差分检测技术在低压配电网电弧故障中的应用潜力，结合实际应用场景，验证所提方法的有效性和实用性，为推动电压差分检测技术在电力系统中的广泛应用奠定基础。

近年来，随着分布式电源渗透率提高和用电负荷多元化发展，配电网故障特征呈现复杂化趋势，其中电弧故障因其隐蔽性强、随机性大等特点，成为引发电气火灾的主要诱因之一。我国每年因电弧故障引发的电气火灾占比超过30%，传统基于电流幅值检测的保护装置对串联型电弧的检出率不足65%，暴露出明显的技术短板。电压差分检测技术作为电弧故障诊断的新兴研究方向，其核心在于利用故障电弧导致的电压波形畸变特征进行识别。与常规电流检测法相比，该方法对高阻抗电弧具有独特的检测优势：一方面，电弧燃烧时产生的非线性电阻特性会在系统阻抗上形成特征性电压跌落；另一方面，差分测量方式能有效抑制共模干扰，提高信噪比。然而，该技术在低压配电网中的应用仍处于探索阶段，尤其是在复杂负载条件下的适应性和可靠性方面，仍需进一步研究。本研究旨在深入探讨电压差分检测技术在低压配电网电弧故障中的应用潜力，结合实际应用场景，验证所提方法的有效性和实用性，为推动电压差分检测技术在电力系统中的广泛应用奠定基础。

低压配电网电弧故障类型及特点

1. 串联电弧故障

主要源于线路接线端子松动、绝缘层破损及导

体损伤等。故障电流数值小于线路负荷电流，导致传统基于过电流保护原理的断路器和依据剩余电流动作的保护器难以对其做出及时响应。故障电流波形与非线性负荷电流相似，如微波炉、吸尘器等非线性负荷设备正常运行时，因内部功率电子器件作用，电流波形明显畸变，与串联电弧故障时因电弧非线性导电特性引发的电流波形畸变存在诸多重叠，增加了故障检测的复杂性。不同负荷工况下，电弧电压波形因负载特性差异而有所不同。例如，电暖气、电磁炉、微波炉和吸尘器在电流过零时刻的燃弧与熄弧尖峰表现各具特点，但总体近似于方波。大量实验与实际测量数据统计表明，燃弧电压一般稳定在15~20 V的直流电压范围，这为基于电压信号分析的故障检测技术提供了关键判别依据。

2. 并联电弧故障

主要是由于线路绝缘在长期运行过程中受电气、热、机械等多种应力作用而损坏，导致相线与相线、相线与中性线之间发生直接放电现象。故障发生瞬间，故障电流急剧增大，远远超过线路正常负荷电流值，极易引发线路导体温度迅速升高，导致绝缘材料加速老化、熔化，甚至引发短路故障，对电气设备绝缘性能造成毁灭性破坏。在实际运行场景中，并联电弧故障放电过程释放巨大能量，会

产生强烈弧光、高温等明显物理现象，相较于串联电弧故障，在视觉、热感等方面更容易被察觉。但其造成的破坏范围和损失程度可能更为严重，对低压配电网供电可靠性与安全性构成极大威胁。

电压差分检测技术关键参数及算法

1. 核心参数

电压差分检测技术是低压配电网电弧故障检测的核心，其关键在于精准分析参数和运用高效算法，从而实现快速且准确的故障识别。在众多参数中，差分电压尤为关键。当低压配电网线路发生串联电弧故障时，根据电路原理，检测回路中的差分电压 Δu 是线路压降 u_{line} 与电弧电压 u_{arc} 的叠加，即

$$\Delta u = u_{line} + u_{arc} \quad (1)$$

通过对大量电网监测数据的长期统计分析发现，在正常运行状态下，差分电压幅值通常不超过额定电压的5%。以常见的220 V低压配电网为例，正常运行时差分电压幅值一般处于0~11 V区间。线路压降 u_{line} 的特性受到多种因素综合影响。从负荷类型角度来看，线性负荷（如普通白炽灯泡、电阻加热设备）的电流与电压呈现良好的线性关系，其线路压降波形接近标准正弦波，在线路电阻为 R 、电流为 I 的情况下，线路压降可通过公式 $u_{line}=IR$ 进行简单计算。

在实际测试中，当某线性负荷回路电流为5 A，线路电阻为0.2 Ω 时，计算得到的线路压降为1 V，且波形在示波器上显示为平滑的正弦曲线。现代智能家电、工业变频设备等非线性负荷，因内部电力电子器件的开关动作，致使电流波形严重畸变。以开关电源为例，其整流桥和开关管使输入电流呈尖峰脉冲状。这种畸变电流会使线路压降波形在电源峰值附近叠加低次谐波，近似三角波。实际工业园区监测显示，大量非线性设备同时运行时，线路压降波形畸变率可达22%。串联电弧故障发生时，具有非线性伏安特性、波形近似方波的电弧电压开始作用。实验室测试表明，故障瞬间差分电压幅值显著跃升，轻载时从8 V骤升至30 V，重载时超60 V。同时，故障时差分电压上升沿变得极为陡峭，上升时间缩短至5 μs 以内，且在交流电流过零点附近出现10~20 μs 的零休期，这些时域特征成为判断故障的重要依据。

谐波参数在电压差分检测技术中也十分关键。电弧电压波形近似方波，根据傅里叶级数展开，方波主要含1~7次奇次谐波成分，经实验数据统计，3、5、7次谐波含量占工频外谐波总含量的比例超60%。本文聚焦差分电压的3、5、7次谐波参数，谐波因数（某次谐波幅值与基波幅值之比）和谐波初相角是关键指标。对于线性负荷而言，其产生的线路压降波形接近正弦波，谐波含量较低，通常谐波因数小于5%，且各次谐波的初相角呈现随机分布状态。在对某居民区的线性负荷线路进行监测时发现，3次谐波因数仅为2%，5次谐波因数为1.5%，7次谐波因数为1%，初相角在0~360°范围内无规律波动。非线性负荷产生的线路压降波形与方波差异明显。利用这一特性，构建数学模型，对比差分电压谐波参数与理想方波谐波参数的相似程度，为故障检测提供基于谐波特性分析的有效手段。一种常用的方法是计算两者之间的欧几里得距离，通过设定合理的阈值来判断是否发生电弧故障。此外，还可以采用余弦相似度算法，从向量夹角的角度衡量谐波参数之间的相似性。在实际应用中，结合这两种算法，能够有效提高故障检测的准确性和可靠性。

2. 串联电弧故障检测算法

基于差分电压谐波参数相似性测度的串联电弧故障检测算法是该技术的核心。该算法首先利用方波3、5、7次谐波的谐波因数和初相角构建参考向量 H_{ref} 和 P_{ref} ，即 $H_{ref}=[1/3, 1/5, 1/7]$ ， $P_{ref}=[0^0, 0^0, 0^0]$ ，代表理想方波的谐波特征基准。接着，从差分录波数据中按采样定理提取一个周波数据 S_x ，运用快速傅里叶变换（FFT）等信号处理算法精确计算其谐波因数和初相角，构建谐波因数特征向量 H^x 和谐波初相角特征向量 P^x 。然后，通过欧式距离公式分别计算 H^x 与 H_{ref} 、 P^x 与 P_{ref} 的欧式距离 D_H^x 和 D_P^x 。欧式距离能精确反映波形 S_x 与理想方波的相似程度，距离越小， S_x 与方波相似度越高，发生电弧故障的可能性越大。考虑到实际采集过程中截取 S_x 的初相角具有随机性，在计算 D_H^x 和 D_P^x 前，需对谐波初相角进行归一化处理，公式为

$$P_n^{x'} = P_n^x - nP_1^x, \quad n=3,5,7$$

消除初相角随机性影响，使不同采样数据可在同一基准下比较。

由于实际电弧电压的熄弧-起弧上升沿并非理想方波的瞬间跳变,存在过渡过程,可能导致基波初相角计算误差,使归一化后的谐波初相角与理想方波存在整体偏差。因此,还需对归一化后的谐波初相角进行去中心化处理,公式为 $P_n^{x*} = P_n^{x'} - \sum P_n^{x'} / 3$, $n=3,5,7$, 进一步提高特征向量与理想方波特征的匹配准确度。

最后,根据大量实际故障数据统计分析得到的故障差分电压特征分布特点,以 α 、 β 作为经优化计算得到的分界阈值,构建分类策略:当 $D_H^x \leq \alpha$ 且 $D_P^x \leq \beta$ 时,判定为电弧故障;当 $D_H^x > \alpha$ 且 $D_P^x > \beta$ 时,判定为非故障,实现对串联电弧故障的准确识别。

3. 异步采样差分电压获取算法

在实际工程中,上下游监测点难以实现同步数据采集,基于相位信息的异步采样差分电压获取方法成为重要补充。该方法以下游监测点 N 的电压波形畸变越限作为检测启动条件,这是基于大量实际故障案例分析得出的,串联电弧故障发生时,下游电压波形会因电弧影响而明显畸变。检测启动后,下游监测点迅速启动本地1 s录波,并通过高速可靠通信链路向上游监测点 M 发送录波命令。监测点 M 接收到命令后,立即启动本地1 s录波。录波完成后,监测点 N 将录波数据通过优化的数据传输协议发送至 M 监测点或二者均将数据发送至集中计算节点。为实现异步采样波形的差分电压准确获取,该方法巧妙利用工频成分初相角作为同步依据。

具体步骤为:以周波为单位,运用数字信号处理算法获取 $u_M(n)$ 和 $u_N(n)$ 的频域相量,通过精确相量计算方法得到它们工频成分的初相角差 $\Delta\theta$,进而根据采样频率等参数精确计算得到 $u_N(n)$ 向 $u_M(n)$ 对齐的移位个数 ΔN ,将 $u_N(n)$ 按照数字信号处理中的循环移位算法循环右移 ΔN 位,有效消除相位差。由于故障时 $u_{arc}(t)$ 的工频成分会对下游电压 $u_N(t)$ 故障前后的工频幅值和相位产生影响,根据故障支路功率因数 $\cos\varphi$ 的不同, $u_N(t)$ 故障前后的工频初相角会产生 $0^\circ \sim 3^\circ$ 的变化。为进一步提高检测精度,需对引入的相位误差进行补偿。通过运用边缘检测等数字图像处理算法,利用差分电压波形的上升沿精准定位电弧的熄弧-起弧相位,得到电弧熄弧-起弧时刻的归一化相位 P_φ' ,利用 P_φ' 对异步同相差分电压进行相位补偿,通过复杂数学运算和信号调整,

使补偿后的差分波形与同步采样差分波形达到较高相似度,从而在异步采样条件下实现对电弧故障的准确检测。

应用案例分析

为全面、深入地验证电压差分检测技术在实际低压配电网复杂运行环境下的有效性与实用性,选取某典型高层建筑配电系统作为应用案例展开详细分析。该高层建筑配电网络结构复杂且庞大,涵盖30个楼层,接入多种类型用电负荷,具体用电负荷分布情况见表1。不同类型的用电负荷为测试电压差分检测技术在各类实际运行场景下的性能表现,提供了理想实验环境。

表1 高层建筑用电负荷分布情况

负荷类型	数量	占比 (%)	功率范围/kW
照明系统负荷	5 000	40	0.05~0.2
空调系统负荷	300	25	1.5~5
电梯负荷	10	15	10~20
其他负荷(办公设备等)	2 000	20	0.1~1

在案例实施中,严格按研究技术要求,在各级配电柜内采用分布式部署安装低压监测终端。这些终端集成先进功能模块,除具备常规SCADA(数据采集与监视控制系统)功能,能运用高精度传感器实时采集并通过复杂通信协议监控配电系统电压、电流和功率等基本运行参数外,还创新性集成基于电压差分检测技术的电弧故障监测功能。终端采用增强机器类通信(Enhanced Machine-Type Communication, eMTC)物联通信方式,基于先进无线通信技术,传输距离1~2 km、传输速率1 000 Kbit/s、传输时延小于1 s,确保监测数据在复杂电磁环境下快速、准确传输,满足电弧故障检测对数据实时性的严苛要求,为后续故障分析处理争取宝贵时间。

当配电线路因长期运行出现接线端子松动、导线受外力损伤等情况产生串联电弧故障时,根据电路理论及实际监测经验,故障相各下游监测点电压会发生明显畸变越限现象。以某楼层照明线路为例,在一次实际故障事件中,接线端子因长期振动及温度变化出现松动,引发串联电弧故障。下游监测点通过高精度电压传感器实时采集的电压数据显

示，电压畸变系数迅速上升，短时间内超过预先根据大量历史数据及理论分析设定的3%启动阈值。

在故障识别过程中，网关对采集到的差分电压数据进行深度分析。从谐波因数角度来看，在故障发生前，该照明线路由于主要接入线性照明负荷，其差分电压谐波因数与理想方波的谐波因数存在较大差异，例如3次谐波因数距离（通过欧式距离等算法计算得到）为0.8。而在故障发生后，由于电弧电压的作用，差分电压的谐波因数发生显著变化，3、5、7次谐波因数与理想方波的谐波因数更为接近，谐波因数距离通过精确计算减小至0.2。从谐波初相角方面分析，故障前，由于线路中主要为线性负荷，谐波初相角呈现较大的随机性，各次谐波初相角之间的一致性较低，相角距离（通过复杂的相角分析算法计算得到）为30°；故障后，受到电弧电压方波特征的影响，各次谐波初相角的一致性明显提高，相角距离减小至10°。通过融合谐波因数距离和初相角距离这两个关键特征，利用精心构建的双特征判据进行综合判断，能够准确无误地识别出该照明线路发生了串联电弧故障，大大提高了故障识别的准确率。故障前后的谐波因数与初相角变化对比，详见表2。

表2 故障前后谐波因数与初相角变化对比

状态	3次谐波因数距离	5次谐波因数距离	7次谐波因数距离	谐波初相角距离（°）
故障前	0.8	0.7	0.6	30
故障后	0.8	0.3	0.4	10

在故障定位方面，网关根据其掌握的详细网络拓扑信息，结合各监测点上传的录波数据，运用

基于人工智能算法优化的故障定位方法，确定故障发生在该楼层照明线路的某一具体分支上。这一定位结果为后续的故障修复工作提供了极为准确的依据，维修人员能够根据定位信息迅速到达故障现场，采用专业工具和技术进行针对性处理，极大地缩短了停电时间，有效减少了对用户正常用电的影响，显著提高了供电可靠性。通过对该高层建筑配电系统为期1年的长期实际监测和多起故障事件的成功处理，充分验证了电压差分检测技术在复杂低压配电网环境下的可行性和有效性。在这1年期间，共检测到15起串联电弧故障，成功定位14起，故障平均定位时间为5 min，停电时间较未采用该技术前缩短了80%，具体实施效果分析见表3。

表3 电压差分检测技术实施效果分析

监测周期	检测到故障数/起	成功定位故障数/起	故障平均定位时间/min	停电时间缩短比例（%）	用户用电受影响次数
1年	15	14	5	80	5

结束语

综上所述，本研究围绕电压差分检测技术在低压配电网电弧故障中的应用展开，全面剖析了低压配电网电弧故障的类型与特点，深入探讨了电压差分检测技术的关键参数及算法，并通过实际应用案例验证了该技术的有效性与实用性。在复杂负载的低压配电网环境下，电压差分检测技术能够准确检测和定位串联电弧故障，大幅缩短停电时间，显著提升供电可靠性。EA

（收稿日期：2025-07-25）

