DOI:10.20033/j.1003-7241.(2025)02-0132-04.

配网不停电作业工程电缆漏电预警技术

杨东宁[1]，孙 建[2]，史建云[2]

（1.云南电网有限责任公司信息中心，云南 昆明 650000；
2.南方电网深圳数字电网研究院有限公司，广东 深圳 518000）

摘 要：针对目前方法存在漏电故障检测时间长、预警性能差的问题，提出配网不停电作业工程电缆漏电预警技术。该方法首先提取电缆漏电故障传播特性并对漏电位置信号进行模态分解获取电缆故障分布情况；再对漏电故障的严重度指标进行获取，建立漏电严重程度等级；最后通过评价向量确定漏电的严重程度等级，完成电缆漏电预警。实验结果表明，运用该方法进行漏电预警时，能够有效测试出漏电严重等级，漏电故障检测时间短、预警性能好。

关键词：配电网；不停电作业；电缆漏电；预警方法；故障检测
中图分类号：TP183；TM732 文献标识码：A 文章编号：1003-7241(2025)02-0132-04

Cable Leakage Early Warning Technology for Uninterrupted Power Work in Distribution Network

YANG Dong-ning[1], SUN Jian[2], SHI Jian-yun[2]

(1. Information Center of Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650000 China;
2. China Southern Power Grid Shenzhen Digital Grid Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000 China)

Abstract: Aiming at the problems of long detection time and poor warning performance of current methods for leakage faults, a cable leakage warning technology for distribution network uninterrupted operation engineering is proposed. This method first extracts the propagation characteristics of cable leakage faults and performs modal decomposition on the leakage position signal to obtain the distribution of cable faults. It obtains the severity indicators of leakage faults and establish a leakage severity level. Finally, the severity level of cable leakage is determined through evaluation vectors to complete cable leakage warning. The experimental results show that using this method for leakage warning can effectively test the severity level of leakage, with short detection time for leakage faults and good warning performance.

Keywords: distribution network; non-stop operation; cable leakage; early warning method; fault detection

0 引言

电力行业作为维系国家发展运行的基本能源供应行业，是国家重点关注的行业之一。由于城市配电网电力供应在整个电力负荷系统[1]中占据较大部分，所以配电网在出现故障时，需要通过不停电作业方式，完成故障修复工作。基于配电网的不停电方式，针对配电网工程的电缆漏电预警就成为电力行业急需解决的问题。早于1988年，加拿大学者Sachdev与英国学者Agarval首次提出基于双端信息的故障定位方法，为电缆的漏电预警方法奠定坚实的基础。尹振东等人[2]提出增广时频域反射法在电缆复合故障检测中的应用。基于信号的视频交叉相关特性获取故障信息，通过布谷鸟搜索算法消除反射信号，评估故障位置类型程度，实现故障预警。但是，该方法未能在故障预警前提取电缆故障的传播特性。张起等人[3]利用动态主元分析法分析故障前后的信号数据，检测故障的类型，完成故障预警。该方法由于在建立故障检测模型时存在问题，导致该方法无法有效地检测出电缆的故障严重程度。刘一铭等人[4]对配电网电缆故障位置的放电声波进行特征分析，提取故障位置以及非故障位置波形特征，建立训练集，由此实现预警。该方法在进行故障识别时存在问题，导致该方法的预警性能差。Qu等人[5]提出了一种基于自漏磁原理的沿电缆圆周方向的断线漏电检测方法。通过自漏磁曲线的凹面位置可以有效地判断漏电在电缆截面上的位置，对并联线束的漏电进行了检测实验。

为解决上述电缆故障预警过程中存在的问题，提出配网不停电作业工程电缆漏电预警技术。

1 故障信号分解

配电网不停电工程在进行电缆漏电预警前，需要对

收稿日期：2023-12-08

配电网电缆的传播特性以及故障信号模态进行全方位分解。

1.1 传播特性

相比正常的配电网电缆工频信号，电缆在出现故障时产生的初始行波存在频率高、分布广的特性。配电网电缆线路的长度会大于故障产生时的初始行波波长，所以需要使用分布式的参数模型对初始波长进行具体分析。由于行波信号分布较广，所以要基于电缆的线路损耗获取电缆的三相线路波动方程，过程如下式所示：

$$\begin{cases} -\dfrac{d^2}{dx^2}V(\omega)=Z'(\omega)Y'(\omega)V(\omega) \\ -\dfrac{d^2}{dx^2}I(\omega)=Y'(\omega)Z'(\omega)I(\omega) \end{cases} \tag{1}$$

式中，电流波动方程用$-\dfrac{d^2}{dx^2}I(\omega)$标记、电压波动方程用$-\dfrac{d^2}{dx^2}V(\omega)$表示，单位长度的线路阻抗矩阵标记$Z'(\omega)$形式，线路的并联矩阵标记$Y'(\omega)$形式，波形长度标记$d$形式，信号宽度标记$x$形式。

将电缆首尾两端设定为m和n，对线路阻抗矩阵以及并联矩阵进行解耦变换，获取电缆模量的传播特性，结果如下式所示：

$$\begin{cases} Z_c(\omega)=\sqrt{\dfrac{R'+j\omega L'}{G'+j\omega C'}} \\ \gamma(\omega)=\sqrt{(R'+j\omega L')(G'+j\omega C')}=\alpha+j\beta \end{cases} \tag{2}$$

式中，行波阻抗标记$Z_c(\omega)$形式，传播系数标记$\gamma(\omega)$形式，相位常数标记β形式，衰减常数用α表示，波长用L表示，角频率函数标记ω，电缆阻抗标记R形式，电容标记C形式，解耦系数标记G形式，电缆数量为j。依据上述计算结果可知，随着角频率的增加高波电缆波速加快，衰减常数变大。

1.2 模态分解

信号的经验模态分解实质上就是电缆原始信号的分解过程，过程中具备下列两个特征：

(1) 电缆极值点数量与过零点数量之间相差1。

(2) 极大值与极小值数值点的包络线均值设定为0。

设定原始信号为$s(t)$，上包络线标记$g_1(t)$形式，下包络线用$l_1(t)$表示，拟合均值标记$m_1(t)$形式。通过原始信号与拟合值之间的差，可获取信号的经验模态特征，当完成k次迭代计算时，从信号[6]经验模态特征中分离出模态分量值$c_1(t)$。

在原始信号中去除模态分离量获取残余分量值$r_1(t)$，再将残余分量值代替原始信号，分解出其他信号的剩余分量，当原始信号模态值为下式时：

$$s(t)=\sum_{i=1}^{n}c_i(t)+r(t) \tag{3}$$

式中，原始信号标记$s(t)$形式，模态分量用$c_i(t)$表示，残余分量用$r(t)$进行表示，常数为n和i。

将获取的模态分量进行希尔伯特变换，过程如下式所示：

$$\hat{c}_i(t)=\frac{1}{\pi}\int_{-\infty}^{+\infty}\frac{c_i(\tau)}{t-\tau}d\tau \tag{4}$$

式中，信号的冲击响应系数标记$\dfrac{1}{\pi}$，变换函数标记$\hat{c}_i(t)$形式，振幅为τ，频域为d。

设定电缆的解析信号为$z(t)$，幅值为$a_i(t)$，相位标记$\theta_i(t)$，频率为$f_i(t)$，通过计算完成电缆初始信号的三维频谱结构，过程如下式所示：

$$h(\omega)=\int_{-\infty}^{+\infty}H(\omega,t)dt \tag{5}$$

式中，获取的三维频谱结构标记$h(\omega)$，高频域分解系数标记$H(\omega,t)$，分解时间标记t形式。基于上述获取的信号三维频谱，可以有效地表述信号在时域、频域中的分布情况。

2 电缆漏电预警

在对电缆漏电故障进行预警前，需要对漏电故障的严重度指标进行获取，再基于获取的指标建立漏电严重程度等级，最后通过建立的评价向量计算漏电的严重程度，从而实现电缆漏电预警。

2.1 获取严重度指标

电缆漏电故障分为小幅漏电和大幅度漏电两个阶段，若工作人员无法在电缆小幅度漏电时及时找出故障原因，则会导致整个配电网出现大面积停电的隐患。在获取漏电严重度指标时，需要从以下几个方面进行考量：

2.1.1 过负荷

绝缘体老化会导致电缆线路[7]负载变大，出现电缆过负荷现象，通常情况下电缆线路的负载率为90%，出于考量设定电缆线路的负荷严重程度指标如下式所示：

$$S_{OLi}=\begin{cases} L_i-0.9, L_i>0.9 \\ 0, 0\le L_i\le 0.9 \end{cases} \tag{6}$$

式中，第i条配电网电缆的线路负载率标记L_i形式，第i条配电网电缆过负荷严重程度标记S_{OLi}形式。设定漏电故障的过负荷严重程度为S_{OL}，计算过程如下式所示：

$$S_{OL}=\frac{\sum_{i=1}^{t}S_{OLi}}{t} \tag{7}$$

式中，故障导致的过负荷线路数量标记为t，常数为i。

2.1.2 低电压

配电网的绝缘套悬挂方式错误，就会导致电缆母线出现低电压现象，从而导致电缆漏电，低电压的严重程度如下式所示：

$$\begin{cases} S_{Vi}=\begin{cases}1-U_i, 0\le U_i\le 1\\ 0, U_i>1\end{cases} \\ S_V=\dfrac{\sum_{i=1}^{h}S_{Vi}}{h}\end{cases} \tag{8}$$

式中，第i条电缆母线的电压最低值标记U_i、低电压严重程度标记S_{Vi}，由于漏电导致的低电压电缆数量标记h形式。

依据国家对配电网电缆的相关要求，将电缆的低电压程度分为[0,0.055]、[0.045,0.07]、[0.065,0.095]以及[0.085,1]几种等级。

2.1.3 失负荷

电缆漏电后，电缆会出现负荷损失，设定电缆漏电后负荷损失率为S_{LL}，计算过程如下式所示：

$$S_{LL}=\frac{\Delta S}{S} \tag{9}$$

式中，电缆漏电的事故损失负荷标记△S形式，系统容量用S表示。失负荷严重等级范围分别为[0,0.055]、[0.045,0.07]、[0.065,0.095]以及[0.085,1]四个等级。

2.2 漏电严重程度分级

依据模糊推理理论建立电缆漏电的严重程度分级。将电缆漏电的模糊规则设定成$IFx_1isA_{1j}ANDx_2isA_{2j}ANDx_3isA_{3j}$以及$THENyisB_j$，规则中由于电缆漏电导致的过负荷、低电压以及失负荷用x_1、x_2、x_3来表示，发生事故前的模糊集合用A表示，发生事件后的模糊规则用B表示，三种严重指标综合评价值为y，数量为j。

设定电缆漏电严重指标变量为y，B区域上的模糊集合为$Y=v_B(y)$，该集合在模糊化后的结果如下式所示：

$$y_c=\frac{\int_B y\cdot v_B(y)dy}{\int_B v_B(y)dy} \tag{10}$$

式中，漏电程度综合评价隶属度函数标记y_c，综合评价值为y，严重指标的隶属度为v，常数为d。

依据获取的隶属度函数完成对配电网电缆漏电[8-9]指标的综合严重程度评价向量，过程如下式所示：

$$V=[v_1,v_2,v_3,v_4] \tag{11}$$

式中，获取的综合评价向量标记V形式，严重指标预警的隶属度等级分别为v_1、v_2、v_3以及v_4。

2.3 预警流程

配电网不停电作业工程的电缆漏电预警流程如图1所示。

3 实验结果及分析

为了验证上述配电网电缆漏电预警方法的整体有效性，需要对此方法进行测试。

分别采用配网不停电作业工程电缆漏电预警技术(本文所提方法)、增广时频域反射法在电缆复合故障检测中的应用(文献[2]所提方法)、基于动态核主元分析的电缆接头故障检测方法(文献[3]所提方法)进行测试；

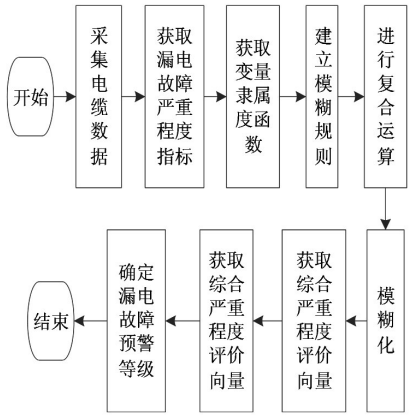


图1 电缆漏电预警流程

在对电缆漏电故障进行预警时，预警的耗时与预警性能的优劣都会对漏电预警的方法带来影响。基于上述三种电缆故障预警方法，选定500条配电网电缆，设定不同的预警时刻，对固定的电缆节点进行测试：

(1) 漏电检测耗时对比

在对电缆进行漏电预警前，需要对配电网电缆进行常规漏电检测，采用本文所提方法、文献[2]方法以及文献[3]方法对配电网电缆进行漏电检测，针对三种方法所需检测时间进行测试，测试结果如图2所示。

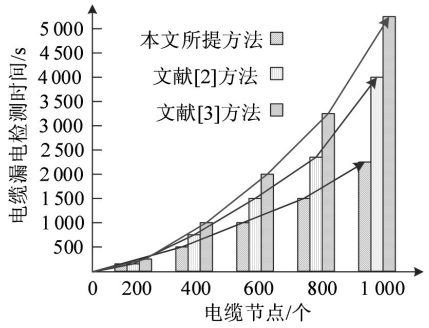


图2 不同漏电预警方法的漏电检测时间对比结果

分析图2可知，电缆的漏电检测时间会随着电缆节点的增加而出现上升趋势。在电缆节点不超过200个时，三种漏电预警方法测试出的检测时间并无太大差距，但是当电缆节点数量上升至400时，三种方法测试出的结果逐渐开始出现差距，并且随着节点的增加差距逐渐变大。本文所提方法测试出的电缆漏电检测时间低于其他两种方法，这主要是因为本文所提方法在进行漏电检测前，对电缆的传播特性进行了具体分析，所以本文所提方法在电缆漏电故障检测时所花费的检测时间较低。

(2) 预警阶段检测

在完成电缆漏电检测后，正式进入漏电预警流程，采用三种漏电预警方法对电缆漏电预警中的过负荷严重程度为S_{OL}、失负荷严重程度为S_{LL}、低电压严重程度标记S_V以及综合评价值V进行测试，测试结果如图3所示。

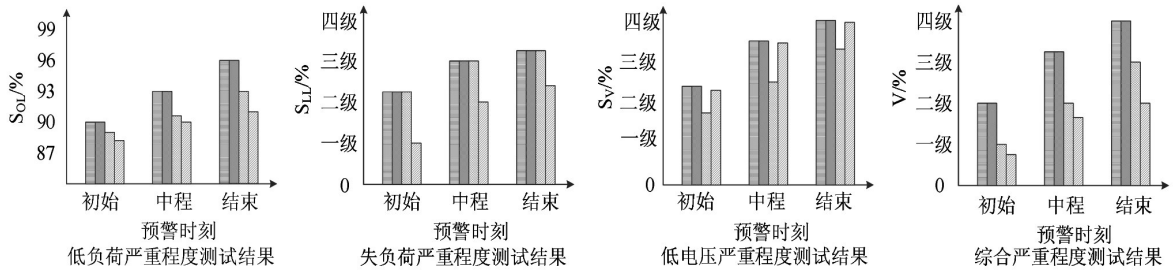


图3 预警过程中各类严重指标测试结果

分析图3可知，本文所提方法测试出的低负荷、失负荷、低电压以及综合指标评分严重程度均与实际配电网电缆漏电严重程度相一致，而文献[2]所提方法仅能在测试失负荷严重程度时有效地检测出电缆漏电的失负荷严重程度，其他指标严重程度检测结果均不理想。文献[3]所提方法在进行低电压严重程度检测时，可以有效地检测出电缆的低电压严重程度，而在其他指标测试过程中，均低于本文所提方法和文献[2]所提方法，测试结果最差。

(3) 预警效果检测

基于上述测试结果，采用三种方法对电缆漏电节点进行预警时，对三种方法的预警性能进行测试，测试结果如表1所示。

表1 不同预警方法的预警性能测试结果

测试内容	三种方法的预警性能测试结果		
	本文所提方法	文献[2]方法	文献[3]方法
是否成功预警	是	是	是
是否阻断电缆漏电	是	是	否
是否修复漏电缺陷	是	否	否

分析表1可知，本文所提方法能够成功完成漏电预警，从而有效阻断漏电，修复漏电位置故障。文献[2]所提方法也能够及时完成漏电预警，并对电缆漏电位置进行短期阻断，但是该方法未能对该处漏洞进行及时整修，所以该方法的预警性能较本文所提方法来说，略低于本文所提方法。而文献[3]所提方法的预警性能测试结果远低于本文所提方法以及文献[2]所提方法。由此可知，本文所提方法在进行配电网电缆漏电预警时的预警性能好。

综上所述，本文所提方法在进行电缆漏电预警时，能够有效地测试出电缆漏电各项严重程度等级，电缆漏电检测时间短，预警性能高。

4 结束语

随着配电网的飞速发展，配电网的电缆结构愈加复杂，漏电情况时有发生。当传统的电缆漏电预警方法无法有效地检测出电缆漏电节点时，提出配网不停电作业工程电缆漏电预警技术。该方法首先漏电位置信号进行模态分解，生成漏电严重程度指标以及综合评价向量；最后通过输出的综合评价向量确定漏电等级，完成报警。该方法由于在获取低电压严重程度指标时出现些许误差，今后会针对该项问题继续对该方法进行优化处理。

参考文献：

[1] 王爱囡，袁麓，丁长波，等.一种非侵入式电力负荷监测系统的设计与实现[J].西安理工大学学报，2019，35(3)：343-351.

[2] 尹振东，王莉，陈洪圳，等.增广时频域反射法在电缆复合故障检测中的应用[J].中国电机工程学报，2020，40(23)：289-302.

[3] 张起，李学渊，李鹏，等.基于动态核主元分析的电缆接头故障检测方法[J].大连理工大学学报，2020，60(3)：300-305.

[4] 刘一铭，李峰，徐丙垠.电力电缆故障放电声自动识别与起点标定算法[J].南方电网技术，2020，14(3)：41-47.

[5] Qu Y，Zhou J，Liu R，et al.Research on the Detection of the Broken Wire Damage of a Cable in the Circumferential Directions Based on Self-magnetic Flux Leakage[J].KSCE Journal of Civil Engineering，2021，25(3)：879-890.

[6] 朱敏，段志善，郭宝良.EEMD结合小波包的振动筛轴承信号降噪效果分析[J].机械设计与制造，2020，351(5)：70-74.

[7] 李西明，赵斌，杨一帆，等.基于泛在电力物联网技术的配电网故障诊断方法优化[J].内蒙古电力技术，2020，38(1)：4.

[8] 陈经纬，郝帅华，王成，等.联合收割机脱粒状态监测及故障诊断系统设计[J].农机化研究，2024，46(7)：115-120.

[9] 段长春.交联聚氯乙烯铠装电缆漏电故障诊断技术优化[J].煤炭工程，2019，51(S1)：85-87.

作者简介：杨东宁(1986-)，男，硕士，高级工程师，研究方向：信息化。