

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.04.002

# 基于护套电流的高压电缆金属护套接地系统故障诊断判据综述

赵洋<sup>1</sup>, 马宪伟<sup>1</sup>, 程养春<sup>2</sup>, 黄子健<sup>2</sup>, 周戈<sup>1</sup>, 郭甜<sup>1</sup>

(1. 国网北京市电力公司电缆分公司, 北京 100031; 2. 华北电力大学, 北京 102206)

**摘要:** 高压电缆金属护套接地系统对电缆安全运行至关重要,同时故障占比较高。金属护套接地电流的监测结果能够反映电缆金属护套接地系统健康状态,是评价高压电缆线路运行状态的重要依据。解释了金属护套环流的形成机理,介绍了金属护套接地系统的常见缺陷,对国内外应用金属护套电流诊断金属护套接地系统缺陷的判据进行了全面梳理,并通过现场案例比较了现行判据的效果,为进一步提出更准确和全面的诊断判据提供参考。

**关键词:** 高压电缆; 护套电流; 故障诊断; 综述

## Overview of Fault Diagnosis Criteria for High Voltage Cable Metal Sheath Grounding System Based on Sheath Current

ZHAO Yang<sup>1</sup>, MA Xianwei<sup>1</sup>, CHENG Yangchun<sup>2</sup>, HUANG Zijian<sup>2</sup>, ZHOU Ge<sup>1</sup>, GUO Tian<sup>1</sup>

(1. State Grid Beijing Power Supply Company Cable Branch, Beijing 100031, China; 2. North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The metal sheath grounding system of high-voltage cables is critical to the safe operation of cables and, at the same time, its fault rate is high. The monitoring results of metal sheath grounding current can reflect the health status of the cable metal sheath grounding system and is an important basis for assessing the operation status of high-voltage cable lines. In this paper the formation mechanism of the metal sheath current is explained. The common defects of the metal sheath grounding system is also described briefly. Finally, the criteria for diagnosing the defects of metal sheath grounding system by using metal sheath current both at home and abroad are comprehensively sorted out, and the effect of the existing criteria is compared through field cases to provide reference for proposing more accurate and comprehensive diagnostic criteria further.

**Key words:** HV cables; sheath current; fault diagnosis; overview

## 0 引言

随着中国经济的快速发展,城市现代化水平的不断提高,电力电缆作为城市电网中的重要设备,发展速度极快<sup>[1]</sup>。相关工作报告显示,截至2022年底,国家电网公司在运高压电缆22 149回,回路长度42 435.2公里,同比增长9.9%。交流电缆输电工程中,交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)

绝缘电缆的电气性能和耐热性能优良,并且具有良好的机械特性,便于安装,目前已经被大量推广和应用<sup>[2-3]</sup>。2020年的国际大电网会议(international council on large electric systems, CIGRE)B1.57工作组汇总的744起陆地电缆系统故障中,XLPE电缆发生故障406起,内部故障占比71%,且40%的内绝缘故障是由外护套缺陷引发的<sup>[4]</sup>。2018年至2022年,国家电网公司报告的高压电缆故障回次从82次降至

收稿日期:2025-09-20; 修回日期:2025-12-04

基金项目:北京电力公司项目(520246220003)。

Project Supported by Project of Beijing Electric Power Company(520246220003).

46次,故障多发生于110 kV及以上电压等级的电缆系统,故障位置集中在电缆终端、接头及本体上。尽管国内高压电缆故障率整体呈下降趋势,但未来电网电缆化率会继续攀升。为了满足高压电缆及通道规模提速增长的需求,就要在缺陷隐患评判、健康水平预估等运维环节上进一步提升。针对金属护套环流检测技术开展深入研究具有重要的工程应用价值<sup>[5]</sup>。

根据电力安全规程规定,单芯高压电缆金属护套必须进行接地处理<sup>[6-7]</sup>。CIGRE一项关于维护和诊断电缆系统方法的问卷调查中,36%的受访者会对电缆接地系统进行检查和测试,以确保电缆系统可靠运行<sup>[8]</sup>。可见金属护套接地系统的安全可靠运行是确保高压电缆系统健康运行的重要因素。

金属护套中的电流主要由磁场感应电流和泄漏电流两部分组成。其中磁场感应电流在金属护套两端接地后形成闭合回路中流动,也称为护套环流。护套电流通常在护套的接地线上进行测量,因此也称为接地电流。它是电缆线路状态评价的重要状态量。金属护套接地系统故障可能会引起环流异常增大,导致电缆升温,降低电缆载流量,缩短电缆使用寿命。通过监测和分析环流,能够诊断金属护套接地系统缺陷,降低电缆事故率,提高电缆运行可靠性。

目前国内外针对高压单芯交流电缆金属护套电流检测和缺陷诊断的研究开展时间相对不长,尚无明确统一的判据。国际上,IEEE 575:2014标准给出了电缆金属护套感应电势和感应电流的计算方法,尚未颁布金属护套环流检测和缺陷判定方面的标准<sup>[9]</sup>。国内方面,国家电网公司企业标准中提出了接地电流测试周期的要求以及单芯电缆线路接地电流的阈值<sup>[9]</sup>,以及金属护套接地缺陷的诊断判据<sup>[10]</sup>,但在工程实践中存在诊断判据笼统、诊断结果不准确的问题。因此,需要提出更加准确和全面的诊断判据,促进电缆金属护套接地系统状态评价,最终降低电缆故障率。

文中总结了国内外基于护套电流的高压电力电缆金属护套接地系统故障诊断判据研究成果;并结合现场案例分析,形成对现有判据以及应用效果的整体认识,为建立更加准确的诊断判据提供参考。

## 1 金属护套接地系统简介

### 1.1 金属护套接地方式

给出了一种单芯高压电缆结构示意图1,电缆外护层是在电缆主绝缘层(图1中的XLPE绝缘)外

面所施加的保护覆盖层,用以确保绝缘层电场分布、防止绝缘层受潮和化学侵蚀、增强电缆机械强度,主要包括阻水带、皱纹铝护套、绝缘外护套(聚乙烯或者橡胶材质)等,是电缆的重要组成部分<sup>[11]</sup>。其中金属护套指皱纹铝护套或者其他金属材质的护套。对于110 kV及其以上的电压等级的单芯电缆,金属护套作为主绝缘层的地电极必须接地,避免在电缆外护套中出现电场感应高压。国内相关标准也对金属护套接地作出要求<sup>[12]</sup>。目前,电缆金属护套接地方式主要有单端接地、双端接地和交叉互联接地。

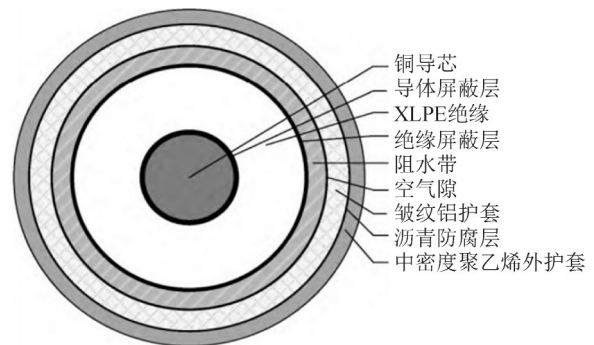


图1 高压电缆结构示意图

Fig. 1 High voltage cable structure diagram

1)单端接地,即每一段单相电缆金属护套的一端直接接地,另一端通过过电压保护器接地。一整条电缆仅在一端接地的方式常用于500 m以下的线路。当单芯电缆的芯线导线通过电流时,其周围产生的一部分磁力线将与金属护套交链,使金属护套产生磁场感应电压,见图2。磁场感应电压的大小与负荷电流成正比;且随着与接地点的距离逐渐增大,在距离接地端最远的地方达到最大值。因此,护套必须通过有效的绝缘外护套与地面充分绝缘。当线路发生不对称短路故障或遇受内部过电压、雷电过电压等情况时,金属护套上会形成很高的磁场感应电压,可能使绝缘外护套击穿。因此,这段电缆的另一端金属护套需要经由过电压限制器(一种具有非线性电阻性质的小型避雷器)接地<sup>[13]</sup>。

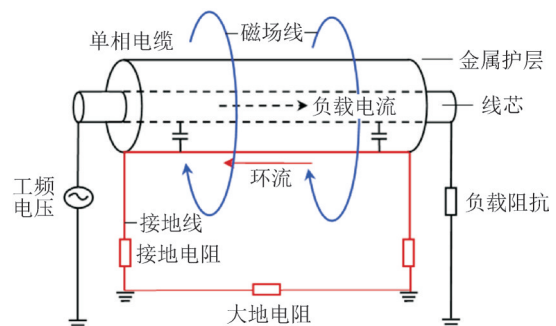


图2 线芯与金属护套之间的电磁耦合回路

Fig. 2 Electromagnetic coupling loop between core conductor and metal sheath

此时,金属护套没有形成连续的闭环电路,不存在沿护套纵向流动的环流(除非过电压保护动作形成接地点)。但是,线芯导体和金属护套可看作一个中间介质为电缆绝缘层的圆柱电容器,线芯与金属护套的电位差会使主绝缘上流过泄漏电流(包括容性电流和阻性电流)<sup>[14]</sup>。由于主绝缘电阻远大于容抗,因此单端接地时护套电流主要是电缆主绝缘容性泄漏电流<sup>[15]</sup>。

2)双端接地,即电缆金属护套在两个终端位置直接接地,仅在有特殊要求的短线路上应用。这种接线方式下,金属护套与大地形成完整回路,护套上各位置所承受的电压为护套阻抗与大地回路电阻和两端接地电阻之和的分压,整体上比单点接地方式下护套电压低。此时,线芯导体和金属护套间可看作一种单匝变压器的初级绕组与次级绕组(次级绕组两端通过大地短路),因此在金属护套中存在幅值巨大的环流。

3)交叉互联接地,为了达到同时降低金属护套电压和环流的目的,比较长的电缆普遍采用交叉互联接地方式。对于三相单芯电缆,3个线芯与3个金属护套之间均存在电磁耦合,见图3。

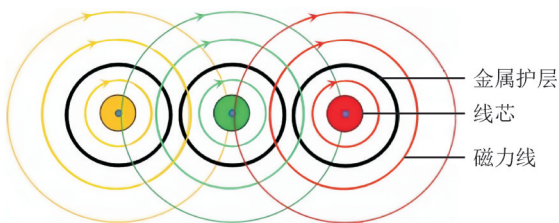
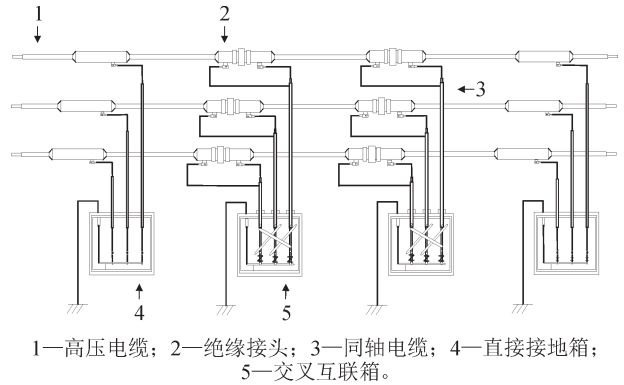


图3 三相线芯电流产生的磁场及其与金属护套交链示意

Fig. 3 Magnetic field generated by three-phase core current and its cross chain with metal sheath

典型交叉互联接地方式见图4,将电缆线路划分成若干交叉互联段,其中每一个交叉互联段又划分成长度基本相等的3个小段。在两个交叉互联小段的分界点,通过绝缘接头将同一相电缆的金属护套断开,并在交叉互联箱内实现电缆金属护套换位连接(为了限值护套中的感应过电压,该处护套经由过电压限制器接地);而交叉互联段两端金属护套在直接接地箱内接地。

因此,1个交叉互联段内三相电缆金属护套形成了以大地为共同部分的3个回路,使得护套对地电压较低。但是每个回路中均包含了三相负载电流产生的感应电势,基本相互抵消,使得回路中的环流接近于零<sup>[16]</sup>。同时,三相电缆对地泄漏电流也会部分抵消。此时,金属护套中的电流包括未完全抵消的电磁感应电势产生的环流,和未完全抵消的三相电缆芯线对地泄漏电流。



1—高压电缆; 2—绝缘接头; 3—同轴电缆; 4—直接接地箱; 5—交叉互联箱。

图4 1个交叉互联段的交叉互联接地方式

Fig. 4 Cross bonding ground system in a section

## 1.2 常见金属护套接地系统故障概况

电缆接头主绝缘、金属护套接线箱和电缆终端是电缆故障多发点<sup>[17]</sup>。XLPE电缆系统中的大多数故障发生在运行后的前10年内,且前10年大多数故障发生在电缆附件中<sup>[4]</sup>。文[18]统计的2004年至2011年国内某地31起高压电缆故障中,18起故障发生在电缆接头上。2022年国家电网统计的各电压等级高压电缆故障部位分布见图5,其中220 kV电缆故障部位主要集中在电缆接头。

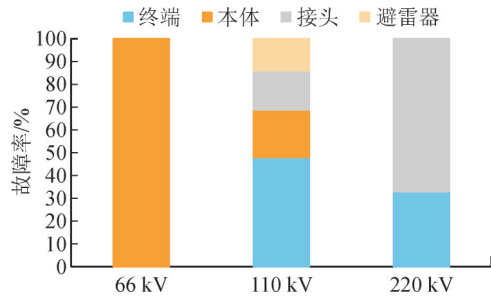


图5 各电压等级高压电缆故障部位分布

Fig. 5 Distribution of fault locations of high-voltage cables at different voltage levels

电缆的生产、敷设、附件质量、运行条件等任何环节的疏漏都会埋下故障的隐患。电缆故障原因主要包括绝缘老化、工艺差、制造缺陷、第三方损坏、恶劣环境等<sup>[19-20]</sup>。常见的金属护套接地系统故障有护套回路开路(接地线因腐蚀而断开、连接线螺丝松动等)、交叉互联线短路(互联箱被雨水淹没)、绝缘接头的环氧预制件击穿短接、绝缘外护套破损导致金属护套多点接地、过电压保护器受潮或击穿等。这些故障本质上改变了金属护套回路的拓扑结构。按电路拓扑可分为护套回路开路、护套回路间新增支路、护套回路新增对地支路3大类<sup>[15]</sup>。例如交叉互联箱进水短路、外护套破损导致金属护套多点接地都属于护套回路新增对地支路。

接地系统故障可能会造成极大危害。例如,护套回路开路会导致高压电缆线路会失去有效接地,

电缆金属护套感应电压对线路外部设备造成威胁；特别是当雷电波入侵电缆时金属护套中的过电压将击穿绝缘外护套，进而造成金属护套多点接地。外护套破损导致的多点接地，增大了金属护套中的环流，从而增大电缆的线路损耗、降低电缆载流容量；金属护套特别是接地点高温会加速电缆主绝缘老化，触发主绝缘放电乃至击穿。对于电缆金属护套接地系统的故障诊断是非常必要的。

### 1.3 金属护套接地系统缺陷诊断方法

针对电缆接地系统缺陷的检测方法按检测方式可分为离线检测和在线检测。离线状态下检测单芯电流金属护套多点接地的方法有金属护套绝缘电阻法和冲击高压闪络法等<sup>[21]</sup>。在线检测方法主要有红外检测、金属护套接地电流检测。《高压电缆状态检测技术规范》给出的相关在线检测方法适用范围见表1。其中金属护套接地电流检测方法在接地系统缺陷诊断方面有更广阔的应用前景。

表1 在线检测方法适用范围

Table 1 Application scope of online detection method

方法	适用电缆	重点检测部位	针对缺陷
红外热像	35 kV及以上电缆	终端、接头	连接不良、受潮、绝缘缺陷
金属护套接地电流	110 kV及以上电缆	接地系统	电缆接地系统缺陷

交叉互联接地方式下接地电流传感器典型安装位置见图6。传感器安装位置不同，被测电流的组成也不同。安装在电缆本体上的传感器(4号)的被测电流为电缆负荷电流与护套电流的叠加电流，即复合电流。安装在电缆绝缘接头屏蔽层引出线上的传感器(5号)的被测电流为护套电流。安装在交叉互联箱的同轴电缆进线上的传感器(6号)的被测电流为两段金属护套电流的矢量和，即差分电流。如果将测量得到的差分电流与规程规定的接地电流诊断标准对标可能会导致误判<sup>[22]</sup>。

## 2 电缆接地系统故障诊断判据研究现状

截至目前，国际上尚未颁布高压单芯XLPE交流电缆金属护套接地电流检测和缺陷判定的相关标准。IEEE 400:2012提出了离线直流泄漏电流的检测方法以用于检测电缆绝缘的整体状况<sup>[23]</sup>。IEEE 400.2:2013中提出了对于介损、泄漏电流、谐波损耗电流检测的电压波形的要求<sup>[24]</sup>。IEEE 575:2014为金属护套高压单芯XLPE电缆的感应电压和感应电流提供了理论计算方法，将理论计算结果与实际测量结果进行了比较，但没有给出明确的缺陷诊断标准<sup>[8]</sup>。

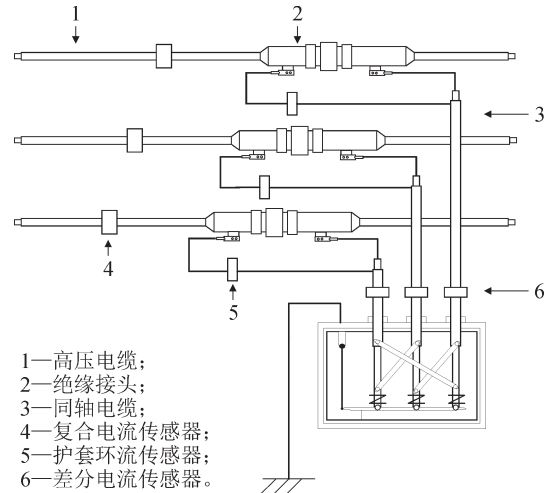


图6 传感器典型安装位置

Fig. 6 Typical sensor installation position

国内基于大量检测数据和现场经验制定了相关的行标、企标用于指导金属护套接地电流检测工作。《Q/GDW 11316—2018电力电缆线路试验规程》<sup>[9]</sup>、《QGDW 11223—2024 高压电缆线路状态检测技术规范》<sup>[10]</sup>、《Q/GDW 456—2024 电缆线路状态评价导则》<sup>[25]</sup>以及南方电网公司《输电设备缺陷定级标准》给出了粗略的缺陷严重程度诊断判据，但各标准中的诊断判据差异巨大，在现场检测中误判率较高，而且缺乏缺陷类型识别判据。

国内外已有学者通过建立接地电流特征与缺陷类别之间的关系，从护套电流绝对值、护套电流与负荷电流比值、护套电流测量值与理论计算值比值、三相护套电流比值、同回路不同位置护套电流比值等角度，对现有缺陷诊断判据进行优化，或提出了更完善的判据。

### 2.1 护套电流绝对值判据

护套电流绝对值是护套接地系统状态的主要诊断判据。并得到多个标准采用，见表2。

### 2.2 护套电流与负荷电流比值判据

现场中护套环流测量值与负荷电流数据获取方便，以二者比值作为判据有助于运维人员快速判断电缆的运行情况以作出反应。《Q/GDW 1168—2013 输变电设备状态检修试验规程》指出，对于接地电流数据的分析要结合电缆线路的负荷情况，综合分析金属护套接地电流异常的发展趋势<sup>[26]</sup>。《QGDW 11223—2024 高压电缆状态检测技术规范》规定：接地电流与负荷比值大于20%且50%，应引起注意；接地电流与负荷比值超过50%时，判为缺陷，应停电检查处理<sup>[10]</sup>。《电力电缆线路试验规程》规定单芯电缆线路接地电流与负荷电流比值小于20%，与历史数据比较无明显变化<sup>[9]</sup>。南方电网公司《输

表2 护套电流绝对值判据总结

Table 2 Summary of absolute value criterion of sheath current

判据来源	判据	结论
《高压电缆状态检测技术规范》	接地电流绝对值<50 A (同时满足其他条件)	正常
	50 A≤接地电流绝对值≤100 A	注意
《电力电缆线路试验规程》	100 A<接地电流绝对值	缺陷
	接地电流绝对值<50 A (同时满足其他条件)	正常
《输电设备缺陷定级标准(南方电网)》	多回路同沟敷设电缆线路外护套接地电流出现明显异常变化	一般缺陷
	100 A≤接地电流绝对值≤200 A	扣8分
《电缆线路状态评价导则》	200 A<接地电流绝对值	扣16分 (注意)

电设备缺陷定级标准》将单回路敷设电缆线路金属护套感应电流与负荷电流的比值大于10%且小于20%的情况定为一般等级;将单回路敷设电缆线路金属护套感应电流与负荷电流的比值大于20%的情况定为重大等级。杭州电力公司和佛山电力公司规定:金属护套环流不超过负荷电流的5%<sup>[27]</sup>。对于交叉互联、单端接地的高压电缆线路,护套环流应不超过负荷电流的10%<sup>[28]</sup>。

于连坤等人通过理论分析和实验验证提出当电缆金属护套电流超过负荷电流的80%时,缺陷极有可能是由接地系统接线错误导致<sup>[29]</sup>。黄鹤鸣等人经过仿真并通过实测数据对比,认为护套电流与负荷电流的比值大于50%时外护套绝缘存在缺陷;为排除因电缆负荷电流发生突变造成误判,他们提出了电流变化率判据作为补充,即在护套回路存在缺陷时,护套环流变化率大于负荷电流变化率<sup>[30]</sup>。

王立等人认为护套接地电流与负荷电流比值及其变化情况可直接表征接地系统状态是否正常。通过计算出当日最大负荷时接地电流与负荷比值 $K_{DM1}$ ,以及前一日最大负荷时接地电流与负荷比值 $K_{DM0}$ ,并计算其比值 $K_{DM1}/K_{DM0}$ 并以其为状态评价特征量。当 $K_{DM1}/K_{DM0}$ 出现大幅度的增大或减小时,说明电缆接地系统偏离了正常状态,需要及时查明原因并安排检修<sup>[31]</sup>。

这类判据的总结见表3。需要注意的是,在接地电流不受负荷电流影响的情况(如单点接地方式)下,采用护套电流与负荷电流比值作为判据容易导致误判,将一些接地系统正常的高压电缆线路判别为异常或缺陷;也可能将接地系统存在异常或缺陷

的高压电缆线路判别为正常<sup>[31]</sup>。

表3 护套电流与负荷电流比值判据总结

Table 3 Summary of criterion for ratio of sheath current to load current

判据来源	判据	结论
《高压电缆状态检测技术规范》	20%≤接地电流与负荷比值≤50%	注意
	接地电流与负荷比值>50%	缺陷
《电力电缆线路试验规程》	单芯电缆线路接地电流与负荷电流比值小于20%,与历史数据比较无明显变化	正常
	10%<单回路敷设电缆线路金属护套感应电流与负荷电流的比值≤20%	一般
《输电设备缺陷定级标准(南方电网)》	单回路敷设电缆线路金属护套感应电流与负荷电流的比值>20%	重大
	20%≤接地电流与负荷比值≤50%	扣8分
《电缆线路状态评价导则》	50%<接地电流与负荷比值	扣16分 (注意)
	文[28]	金属护套环流与负荷比值>80%
文[29]	环流与负荷电流比值>50%,且护套环流变化率大于负荷电流变化率	外护套绝缘出现缺陷
	$K_{DM1}<20%$ 且 $K_{DM1}/K_{DM0}∈[0.5, 2]$	正常
文[30]	$K_{DM1}∈[20%, 50%]$	异常
	$K_{DM1}>50%$ 或 $K_{DM1}/K_{DM0}∉[0.5, 2]$	缺陷

### 2.3 护套电流测量值与正常状态计算值比值判据

随着金属护套接地电流计算理论的不完善,接地电流的理论计算值会越来越精确,更多诊断判据以护套电流测量值与正常状态下理论计算值来给出。这种方法优点是评价结果精准,缺点是电缆线路计算参数的选取难度大<sup>[31]</sup>。

周志成等人对于单点接地方式的电缆提出护套电流绝对值与电流相对变化量的定性判据,护套电流相对于计算值异常增大即可判断为出现金属护套多点接地<sup>[21]</sup>。张峥等人补充了感应电压条件:当监测到护套电流异常且感应电压实测值变小时,说明金属护套回路有多点接地故障发生<sup>[32]</sup>。杜伯学等人建立了高压电缆交叉互联接地的数学模型及电缆接地电流计算方法,明确了护套电流相对计算值变化异常的阈值,即若二者差值大于10%,则可判定系统存在缺陷或出现故障<sup>[33]</sup>。

上述这类判据对于护套电流相对计算值变化程度的表述形式都过于笼统。杨静等人定性给出了一种量化护套电流相对计算值变化程度的方法,仍然比较笼统<sup>[34]</sup>。A.Khamlichi等人提出了一套标准以描述护套电流变化程度<sup>[35]</sup>,见表4,将护套电流相对于计算值的变化划分为5个等级,每个等级表征

缺陷情况下接地电流相对于正常情况下接地电流的变化,并用数字编码来表示。例如,如果电缆接地系统正常,接地电流测量值应与理论计算值基本相等,等级代码为“0”。 $K_i$ =环流测量值/环流计算值。

表4 护套电流变化程度划分

Table 4 Sheath current change degree division

护套电流变化幅度	等级	数字编码
$K_i \leq 0.75$	低于正常水平	0
$0.75 < K_i \leq 1.25$	正常水平	1
$1.25 < K_i \leq 7.50$	高于正常水平	2
$7.50 < K_i \leq 12.50$	超高于正常水平	3
$K_i > 12.50$	特高于正常水平	4

基于 A.Khamlichi 等人提出标准, Marina Adel Shokry 等人通过传感器监测电流幅值的变化实现对不同故障的分类与定位<sup>[36]</sup>,其传感器安装位置为图6中交叉互联箱同轴电缆上(6号传感器),以及直接接地箱的单极电缆上。鉴于一个完整的交叉互联段包含两个交叉互联箱和两个直接接地箱,见图4,共12只传感器,则各传感器测到的护套电流变化幅度编码组成12位数字编码,作为缺陷诊断判据。其中前6位数字对应直接接地箱(代码  $C_0, C_c$ ),后6位数字对应交叉互联箱(代码  $C_1, C_2$ )。以表5、6给出的护套回路开路和交叉互联箱浸水故障的诊断标准为例<sup>[36]</sup>,正常情况下,编码应该为“111,111/111,111”。金属护套回路出现开路故障的情况下,故障回路护套环流会减少,非故障回路护套环流变化不大,此时编码在0和1之间。在发生其他类型的缺陷的情况下,护套电流升高,这导致获得的编码在2、3、4之间。将实际测到的编码与理论编码对照就能判断不同的故障并且确定故障点位置。此外, Marina Adel Shokry 等人还提出了电容电流消除法(capacitive current subtraction, CCS)以消除护套电流中电容电流对故障诊断的影响。用CCS优化后给出的编码在不同负荷水平下更稳定,诊断效率更高。

表5 接地回路开路故障诊断判据

Table 5 Ground circuit open fault diagnosis criteria

故障位置	护套电流变化幅度编码( $C_0, C_c/C_1, C_2$ )
护套回路 $A_1-B_2-C_3$	011, 110/001, 100
护套回路 $B_1-C_2-A_3$	101, 011/100, 010
护套回路 $C_1-A_2-B_3$	110, 101/010, 001

Marina Adel Shokry 等人提出的方法需要在一个交叉互联段安装12个传感器来实现,在实际工程中,如果能够通过仅在一个或两个点测量护套环流来检测和定位缺陷,确保使用最少数量的传感器正确检测和定位缺陷对于降低系统成本具有重要意

表6 交叉互联箱浸水故障诊断判据

Table 6 Fault diagnosis criterion of cross interconnection box flooding

浸水位置	护套电流变化幅度编码( $C_0, C_c/C_1, C_2$ )
交叉互联箱1	444, 333/333, 333
交叉互联箱1	333, 444/333, 333
交叉互联箱1,2	444, 444/000, 000

义。F GARNACHO 等人对一个交叉互联段中传感器的最佳数量和最佳位置进行了详细分析<sup>[37]</sup>。以传感器分别安装在首末两端的直接接地箱的单极电缆处(方案1)以及安装在交叉互联箱的同轴电缆处(方案2)这两种方案为例。传感器布置方案的诊断效果,以检测缺陷的可行性以及区分两个不同缺陷的能力进行衡量。例如,对于护套回路开路故障认为可能发生在首末两端的直接接地箱和两个交叉互联箱处。则传感器对于定位开路点的有效率在0%、25%、75%、100%之间变化。若方案在各故障点处获得的代码均一致,则说明该方案不能定位护套回路开路缺陷位置,具有0%的有效率。由前文分析只有发生护套回路开路故障时编码只包含0和1,这种情况下识别护套回路开路故障方面具有100%的有效率。两种方案下给出的有效率分析见表7、8<sup>[37]</sup>。通过对比, F GARNACHO 等人认为方案1的缺陷诊断效果更好。

表7 方案1的有效率

Table 7 The efficiency of plan one %

缺陷类型	护套对地断开	回路间短路	交叉互联箱浸水	互联线接错(1)	互联线接错(2)
护套对地断开	0.0	100.0	100.0	100.0	100.0
回路间短路	100.0	100.0	100.0	83.3	100.0
交叉互联箱浸水	100.0	100.0	33.3	100.0	33.3
互联线接错(1)	100.0	50.0	100.0	50.0	100.0
互联线接错(2)	100.0	100.0	0.0	100.0	—

表8 方案2的有效率

Table 8 The efficiency of plan two %

缺陷类型	护套对地断开	回路间短路	交叉互联箱浸水	互联线接错(1)	互联线接错(2)
护套对地断开	0.0	100.0	100.0	100.0	100.0
回路间短路	100.0	50.0	100.0	100.0	100.0
交叉互联箱浸水	100.0	100.0	33.3	100.0	33.3
互联线接错(1)	100.0	100.0	100.0	50.0	100.0
互联线接错(2)	100.0	100.0	0.0	100.0	—

需要注意的是,交叉互联箱同轴电缆上传感器所测电流是差分电流,即不同护套回路电流的叠

加,而直接接地箱电缆上传感器所测电流为单个护套回路中的电流。这两种位置上的电流成分存在差异,可能会对诊断结果产生影响,有待进一步研究。

#### 2.4 三相护套电流测量值比值判据

对于交叉互联系统,正常情况下三相接地电流平衡且数值都不大,当三相接地电流差别较大时,说明可能存在缺陷。《高压电缆状态检测技术规范》规定:单相接地电流最大值与最小值的比值大于等于3且小于等于5时,应引起注意;单相接地电流最大值与最小值的比值大于5时,判为缺陷,应停电检查处理<sup>[10]</sup>。

张锴等人总结了交叉互联接地方式下出现接地系统接线错误、交叉互联箱进水、金属护套破损、换位同轴电缆断裂4种故障状态下的接地电流特征<sup>[38]</sup>。姚舜禹分析了同轴电缆内外芯与接地柱连接方向不一致(俗称“羊角”接反)缺陷下的环流特征,并通过建立缺陷特征库,实现常见“羊角”接反缺陷的诊断<sup>[39]</sup>。上述故障情况下电缆护套三相接地电流差别很大,因此可将三相护套接地电流相互比较作出诊断。

这类判据的总结见表9,其中 $K_0$ 为单相接地电流最大值与最小值的比值。需要注意的是, $K_0$ 小并不能代表接地系统不存在问题。例如:对于交叉互联箱进水故障,三相金属护套均异常接地,三相护套环流都异常增大,此时 $K_0$ 却比较小。对此方春华等人补充了不平衡系数,表10中一箱进水与两箱进水的的核心系数相差较大,有效区分了交叉互联箱进水情况<sup>[40]</sup>。

#### 2.5 同回路不同位置护套电流比值判据

前文所列举的方法多集中于故障诊断,少有对故障定位的研究。正常运行时,同一回路中电流分布差异不大,若位于同一回路上的两处护套电流存在明显差异,则该电缆金属护套可能发生故障<sup>[41]</sup>。故障点的不同会引起护套回路电流分布不同,通过研究不同故障点下护套电流分布的差异可以实现护套故障的定位。

文[42]指出,随着故障位置与两端的距离减小,护套环流差异变小,这时利用环流法对护套故障检测变得越来越困难。涂静芸等人通过对一个交叉互联段上外护套破损导致金属护套多点接地故障的仿真,发现故障点靠近首端或靠近末端时,环流变化差异较小。当故障发生在电缆交叉互联主段的中部,环流变化差异相对较大。这主要是由于,随着故障位置由外护套两端向中部移动时,护套整体接地电阻在逐渐减小,故环流随着故障位置往中部移动在逐渐增大,说明环流变化情况与交叉互联

表9 三相接地电流比值判据总结

Table 9 Summary of criteria for ratio of three-phase sheath current

判据来源	判据	结论
《电力电缆线路试验规程》	$K_0 < 3$ (同时满足其他条件)	正常
《高压电缆状态检测技术规范》	$3 \leq K_0 \leq 5$ $K_0 > 5$	注意 缺陷
《电缆线路状态评价导则》	$3 \leq K_0 \leq 5$ $K_0 > 5$	扣8分 扣16分(注意)
文[37]	某一相的接地电流值较小。另两相的接地电流值为最小相接地电流值的6倍以上 三相接地电流值趋于相等,均大于接地电流的计算值 破损相的接地电流值偏大5 A左右,其他相的接地电流值正常 某一相的接地电流值变小,另两相的接地电流值正常	交叉互联换位失败 交叉互联箱进水 金属护层破损 同轴电缆断裂

表10 交叉互联箱进水情况诊断

Table 10 Fault diagnosis of cross interconnection box flooding

电流系数	箱内进水		不平衡系数	箱内进水	
	一箱进水	两箱进水		一箱进水	两箱进水
$K_{AB}$	1.00	1.00	$J_{AB}$	0	0
$K_{BC}$	0.67	0.99	$J_{BC}$	33%	1%
$K_{CA}$	1.50	1.13	$J_{CA}$	50%	13%

注:  $K_{AB}=I_A/I_B$ ;  $K_{BC}=I_B/I_C$ ;  $K_{CA}=I_C/I_A$ ;  $J_{AB}=\frac{K_{AB}-K_{标准}}{K_{标准}}$ ;  $J_{BC}=\frac{K_{BC}-K_{标准}}{K_{标准}}$ ;

$J_{CA}=\frac{K_{CA}-K_{标准}}{K_{标准}}$ ;  $I_A, I_B, I_C$ 分别为ABC三相首端接地电流;  $K_{标准}$ 为理想

情况电流系数,取1。

接地电阻以及故障接地电阻有较大关系。因此,利用环流法进行护套绝缘故障定位诊断存在一个可检测范围。考虑了电缆的敷设情况、接地电阻和电缆不均匀敷设等影响因素提出了利用环流法的可检测范围,发现故障接地电阻与交叉互联接地电阻的比值 $k$ 与故障的可检测长度呈反比关系。当比值 $k$ 超过10时,环流值变化不明显,故障情况难以检测。当比值 $k$ 小于10时,可以对护套中部发生的多点接地故障进行诊断,最大诊断范围( $k \approx 0$ )可以达到90%<sup>[38]</sup>。通过确定可检测范围可将故障范围由全线定位缩小至故障可能区域,减少长距离电缆检修的工作量。

周欣等人基于电缆金属护套首末两端的接地电流,构造了一种新型判据来实现电缆故障的分类与定位<sup>[43]</sup>。该方法通过测量电缆交叉互联主段首末两端直接接地箱中金属护套接地电流的幅值与相

位,并以同一金属护套回路首末两端接地电流幅值与相位的比值、以不同金属护套回路首末两端接地电流相位差的绝对值作为特征值,根据建立故障判据对应的特征量矩阵,对电缆中间接头开路、交叉互联接地箱进水和中间接头短路等故障进行诊断。给出的判据见表11<sup>[43]</sup>, $a_1$ 、 $a_2$ 、 $a_3$ 分别反映同一金属护套回路首末两端电流的幅值之比; $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 分别反映同一金属护套回路首末两端电流的相位差

值。在电缆正常运行状态下,同一金属护套回路首末两端电流的幅值几乎相等,即 $a_1 \angle b_1 = 1 \angle 0$ 。 $K$ 指的是三相回路中满足这类关系式的个数。为了对护套回路故障进行更精确的区分和定位,构造了不同回路之间的电流相位特征值 $t_n(n=1, 2, 3)$ ,指不同护套回路之间相位差的绝对值。首先通过 $K$ 的值对电缆的故障类型进行分类,再用其他参数对发生故障的具体位置进行定位。

表11 不同位置护套电流比值判据

Table 11 Ratio criterion of sheath current at different positions

故障原因	故障类型判据	故障位置判据
主段内部中间接头开路	$K=3$ $a_1 \angle b_1 = a_2 \angle b_2 = a_3 \angle b_3 = 1 \angle 0$	$t_1 < 10^\circ$ $ y_3  < 90^\circ$ J <sub>C1</sub>
		$ y_3  > 90^\circ$ J <sub>A2</sub>
		$t_2 < 10^\circ$ $ y_1  > 150^\circ$ J <sub>A1</sub>
		$ y_1  < 150^\circ$ J <sub>B2</sub>
		$t_3 < 10^\circ$ $ y_2  > 30^\circ$ J <sub>B1</sub>
		$ y_2  < 30^\circ$ J <sub>C2</sub>
主段两端中间接头开路	$K=2$ $a_1 \angle b_1 = a_3 \angle b_3 = 1 \angle 0$ $a_2 \angle b_2 = a_3 \angle b_3 = 1 \angle 0$	$a_3 \angle b_3 = 0$ J <sub>C0</sub>
		$a_3 \angle b_3 = \infty$ J <sub>B3</sub>
		$a_2 \angle b_2 = 0$ J <sub>B0</sub>
		$a_2 \angle b_2 = \infty$ J <sub>A3</sub>
		$a_1 \angle b_1 = 0$ J <sub>A0</sub>
		$a_1 \angle b_1 = \infty$ J <sub>C3</sub>
中间接头击穿短接故障	$K=1$ $a_1 \angle b_1 = 1 \angle 0$ $a_2 \angle b_2 = 1 \angle 0$ $a_3 \angle b_3 = 1 \angle 0$	$a_2 \times a_3 > 1$ J <sub>C1</sub>
		$a_2 \times a_3 < 1$ J <sub>A2</sub>
		$a_1 \times a_3 > 1$ J <sub>A1</sub>
		$a_1 \times a_3 < 1$ J <sub>B2</sub>
		$a_1 \times a_2 > 1$ J <sub>B1</sub>
		$a_1 \times a_2 < 1$ J <sub>C2</sub>
交叉互联箱浸水故障	$K=0$	$b_1, b_2 > 0$ 且 $b_3 < 0$ J <sub>1</sub>
		$b_1 > 0$ 且 $b_2, b_3 < 0$ J <sub>2</sub>
		$b_1, b_2, b_3 < 0$ J <sub>1, J_2</sub>

方春华等人提出了一种基于首末两端环流比值的长电缆线路交叉互联箱缺陷(接地、进水和三相相序错误)识别定位方法,将首末环流比值与缺陷箱号数的散点数据进行拟合得到定位公式<sup>[44]</sup>。实际应用中,在明确缺陷类型后,即可将缺陷回路首末两端环流比值代入相应定位公式即可确定缺陷箱号数的范围。此方法对在长电缆线路的缺陷定位具有一定参考意义,且不受线芯电流和接地电阻变化的影响。但是在缺陷类型识别上还是主要依靠现场巡视来确定,且给出的定位公式只适用于文中案例,对于其他线路的定位公式,还需重新进行仿真拟合。

### 2.6 现有金属护套接地系统故障判据的不足

先前国内外电缆金属护套接地系统缺陷诊断判据及相关研究大多基于确定条件下的电缆金属护套层电流,少有考虑现场因素对接地电流的影响<sup>[8,45,46]</sup>。

近年来不同学者结合影响接地电流的若干因素,如双回并行敷设,电缆交叉互联段长度不相等、电缆布置方式,金属护套参数等,给出了更接近现场实际的环流计算方法<sup>[47-50]</sup>。需要注意,现有护套环流理论计算值大多基于护套回路等值电路得到,为简化计算将工程中的分布参数简化为集总参数。对于长距离,多回路的电缆线路,从多导体传输线理论和多端口电网络理论可得到更准确的结果<sup>[51-52]</sup>。且如果能从统计概率的角度来确定诊断阈值,使误判率最低,则故障诊断结果会更准确。

### 3 案例分析

目前《电缆线路状态评价导则》《高压电缆状态检测技术规范》等涉及的金属护套接地系统故障诊断的标准在现场得到了广泛应用。文中通过收集

到的数据和案例,分析了现行金属护套接地系统故障诊断判据的效果。

### 3.1 案例1

文中搜集到3条存在电缆金属护套接地系统故障线路的接地电流数据,整理后的判据数据见表12。根据前文列举的诊断判据给出的诊断结果见表13-15。现场排查结果明确了线路1和线路2分别存在接地系统接线错误和外护套破损导致金属护套回路多点接地的故障,线路3故障原因不明。

表12 电缆线路护套电流数据(各项数据取最大值)

Table 12 Cable line sheath current data(maximum value of each data)

线路编号	接地电流绝对值/A	接地电流与负荷电流比值/%	单相接地电流最大值与最小值比值
1	36.9	67.9	2.08
2	63.7	70.3	2.31
3	63.7	122.5	3.87

表13 基于接地电流绝对值判据的诊断结果

Table 13 Diagnostic results based on the absolute value criterion of ground current

线路编号	接地电流绝对值/A	判据1结论	判据2结论	判据3结论
1	36.9	正常 (还需其他条件)	正常 (还需其他条件)	不扣分 (正常)
2	63.7	注意	正常 (还需其他条件)	不扣分 (正常)
3	63.7	注意	正常 (还需其他条件)	不扣分 (正常)

注:判据1、2、3来源分别为《高压电缆状态检测技术规范》《电缆线路试验规程》《电缆线路状态评价导则》。

表14 接地电流与负荷电流比值判据的诊断结果

Table 14 The diagnostic result of the ratio criterion of ground current to load current

线路编号	接地电流与负荷电流比值/%	判据1结论	判据2结论	判据3结论	判据4结论	判据5结论
1	67.9	缺陷	不正常	扣16分 (注意)	—	外护套绝缘缺陷
2	70.3	缺陷	不正常	扣16分 (注意)	—	外护套绝缘缺陷
3	122.5	缺陷	不正常	扣16分 (注意)	接地系统接线错误	外护套绝缘缺陷

注:判据4、5来源分别为文[29]、[30]。其余判据同表13。

表15 三相接地电流测量值比值判据的诊断结果

Table 15 The diagnostic results of the ratio criterion of the measured values of three-phase ground current

线路编号	单相接地电流最大值与最小值比值	判据1结论	判据2结论	判据3结论
1	2.08	正常 (还需其他条件)	正常 (还需其他条件)	不扣分 (正常)
2	2.31	正常 (还需其他条件)	正常 (还需其他条件)	不扣分 (正常)
3	3.87	注意	不正常	扣8分

注:判据1、2、3同表13。

结合表中的诊断结果以及现场实际,可得出以下结论:①接地电流绝对值判据应用效果不佳,体现为诊断结果不准确,将缺陷状态线路诊断为注意状态。②接地电流与负荷电流比值判据诊断结果较准确,成功诊断出3条线路存在缺陷。且根据黄鹤鸣的判据识别出了线路2的外护套破损缺陷。对于线路3故障原因不明可参考于连坤的诊断结果,针对直接接地箱、交叉互联箱的接线方式进行检查。③对于存在接地系统接线错误故障的线路2,最大相接地电流约为最小相的2倍,而张锴的判据中该差距应达到6倍以上。单相接地电流最大值与最小值比值判据普遍不能发现缺陷,还需结合现场实际进一步完善。

### 3.2 案例2

文[33]给出的案例中,某220 kV 电缆线路接地电流绝对值超过100 A,依据《电缆线路状态评价导则》或者《高压电缆状态检测技术规范》,均会被判定为不正常,甚至需要停电检查。利用接地电流计算软件和线路全天的负荷电流数据,计算出正常运行条件下接地电流的变化曲线,对比结果见图7,测量值与计算值非常接近,说明电缆运行状态正常,接地系统不存在问题。

通过该案例可以说明,仅以接地电流绝对值判据可能导致误判。如果接地电流理论计算值准确,可采用接地电流测量值与计算值的比值来诊断电缆接地系统缺陷情况。

## 4 结语

目前国内外对电缆金属护套接地系统缺陷的诊断判据包括护套接地电流绝对值、护套电流与负荷电流比值、护套电流测量值与正常状态下理论计

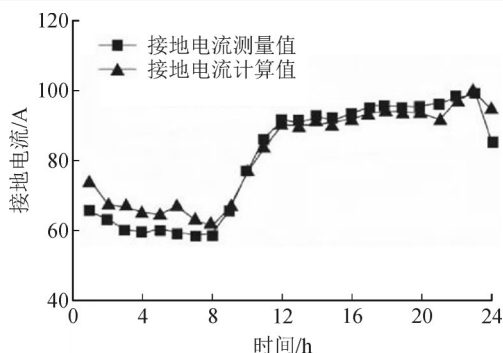


图7 某电缆线路接地电流测量值与正常状态下计算值对比

Fig. 7 Comparison of the measured ground current of a cable line with the calculated value in normal state

算值比值、三相护套电流比值、同回路不同位置护套电流比值等。国内已有相关诊断标准,但是各标准之间的诊断判据差异较大,还未形成共识;还未出现相关国际标准。

从现场应用来看,现有标准中护套接地电流绝对值判据诊断效果较差,误判情况较多。接地电流与负荷电流比值判据诊断效果较好,能准确反映电缆接地系统运行状态。在缺陷类型和位置识别上,部分学者提出的判据具有一定的参考价值,但还需结合现场实际继续深入研究。

多数研究集中于护套环流测量值与理论计算值比值判据,这类判据在故障诊断上能满足故障识别及故障定位的要求。但现有研究中这类判据多基于固定条件下的仿真结果给出,缺少现场案例的验证。若考虑各种影响护套电流的随机因素的影响,从统计概率的角度给出误判率最低判据,将改善故障诊断效果。

## 参考文献:

- [1] 赵健康,李文杰. 国家电网公司电力电缆运行情况报告[C]/第十三届全国工程电介质学术会议. 西安:中国电工技术学会, 2011:31.  
ZHAO Jiankang, LI Wenjie. Report on the operation of power cables of state grid corporation[C]/the 13th National Conference on Engineering Dielectrics. Xi'an: China Electrotechnical Society, 2011:31.
- [2] 杜伯学,马宗乐,霍振星,等. 电力电缆技术的发展与研究动向[J]. 高压电器, 2010, 46(7):100-104.  
DU Boxue, MA Zongle, HUO Zhenxing, et al. Recent research status of techniques for power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(7):100-104.
- [3] 田野,郭金明,傅明利,等. 超高压交流XLPE电缆输电工程应用现状综述[J]. 南方电网技术, 2016, 10(9):30-36.  
TIAN Ye, GUO Jinming, FU Mingli, et al. Review on power transmission projects with UHVAC XLPE cables[J]. Southern Power System Technology, 2016, 10(9):30-36.
- [4] WG B1.10. Update of service experience of HV underground and submarine cable systems[R]. Paris: CIGRE, 2020.
- [5] WG B1.60. Maintenance of HV cable systems[R]. Paris: CIGRE, 2021.
- [6] 电力工程电缆设计规范:GB 50217—2018[S]. 2018.  
Standard for design of cables of electric power engineering: GB 50217—2018[S]. 2018.
- [7] 城市电力电缆线路设计技术规定:DL/T 5221—2016[S]. 2016.  
Technical code for the design of urban power cables: DL/T 5221—2016[S]. 2016.
- [8] IEEE guide for bonding shields and sheaths of single-conductor power cables rated 5 kV through 500 kV: IEEE Std 575: 2014 [S]. 2014.
- [9] 电力电缆线路试验规程:Q/GDW 11316—2018[S]. 2020.  
Test code for HV power cables: Q/GDW 11316—2018[S]. 2020.
- [10] 高压电缆状态检测技术规范:Q/GDW 11223—2024[S]. 2024.  
Technical specification for state detection for high voltage cable lines: Q/GDW 11223—2024[S]. 2024.
- [11] 夏新民. 电力电缆选型与敷设[M]. 第2版. 北京:化学工业出版社, 2012.  
XIA Xinmin. Selection and installation of power cables[M]. 2nd ed. Beijing: Chemical Industry Press, 2012.
- [12] 电力电缆线路运行规程:Q/GDW 512—2010[S]. 2010.  
Operating code of power cable line: Q/GDW 512—2010[S]. 2010.
- [13] 喻世根. 高压电缆护层环流监测系统及其电磁耦合特性研究[D]. 长沙:湖南大学, 2011.  
YU Shigen. Design of high voltage cable sheath circulating current monitoring system and research on its electromagnetic coupling characteristics[D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [14] 朱宁西,杨帆,刘刚. 高压电缆金属护套多点接地情况下的环流模型及参数计算[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2018, 46(10):15-23.  
ZHU Ningxi, YANG Fan, LIU Gang. Sheath currents model and parameter calculation method on high voltage cable sheath multipoint grounding[J]. Journal of South China University of Technology(Natural Science Edition), 2018, 46(10):15-23.
- [15] 李根. 高压电缆系统典型缺陷建模与分类识别[D]. 武汉:武汉邮电科学研究院, 2021.  
LI Gen. Modeling and classification recognition of typical defects in high-voltage cable systems[D]. Wuhan: Wuhan Research Institute of Posts and Telecommunications, 2021.
- [16] BARRETT J, ANDERS G. Circulating current and hysteresis losses in screens, sheaths and armour of electric power cables: mathematical models and comparison with IEC Standard 287[J]. IEE Proceedings - Science, Measurement and Technology, 1997, 144(3): 101-110.
- [17] IEEE standard for the testing, design, installation, and maintenance of electrical resistance trace heating for industrial applications: IEEE Std 515: 2011[S]. 2011.
- [18] TANG Zeyang, ZHOU Chengke, JIANG Wei, et al. Analysis of significant factors on cable failure using the cox proportional hazard model[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2014, 29(2):951-957.
- [19] 朱晓华. 110 kV及以上高压交联电缆故障探析[J]. 科技创新

- 与应用, 2015(28):186-186.
- ZHU Xiaohua. Analysis of faults in 110 kV and above high-voltage cross-linked cables[J]. Technology Innovation Application, 2015(28):186-186.
- [20] 李华春, 周作春, 陈平. 110 kV及以上高压交联电缆系统故障分析[J]. 电力设备, 2004, 5(8):9-13.
- LI Huachun, ZHOU Zuochun, CHEN Ping. Fault analysis for 110 kV and the above HV cross-linking cable system[J]. Electrical Equipment, 2004, 5(8):9-13.
- [21] 周志成, 何俊佳, 陈俊武, 等. 单芯XLPE电缆金属护套绝缘在线监测研究[J]. 高压电器, 2006, 42(2):90-92.
- ZHOU Zhicheng, HE Junjia, CHEN Junwu, et al. Research on the insulation on-line monitoring of single-core XPLE cable metal sheath[J]. High Voltage Apparatus, 2006, 42(2):90-92.
- [22] 姚舜禹. 电缆交叉互联接地系统缺陷带电诊断分析[J]. 电线电缆, 2022(2):37-42.
- YAO Shunyu. Analysis of energized diagnosis of defects in cable cross connection system[J]. Electric Wire & Cable, 2022(2):37-42.
- [23] IEEE guide for field testing and evaluation of the insulation of shielded power cable systems rated 5 kV and above: IEEE Std 400:2012[S], 2012.
- [24] IEEE guide for field testing of shielded power cable systems using very low frequency(VLF)(less than 1 Hz): IEEE Std 400.2:2013[S], 2013.
- [25] 电缆线路状态评价导则: Q/GDW 456—2024[S], 2024.
- Guide for condition evaluation of power cable: Q/GDW 456—2024[S], 2024.
- [26] 输变电设备状态检修试验规程: Q/GDW 1168—2013[S], 2013.
- Regulations of condition-based maintenance & test for electric equipment: Q/GDW 1168—2013[S], 2013.
- [27] 徐绍军, 黄鹤鸣, 陈平. 单芯高压电缆金属护套环流异常分析及对策[J]. 供用电, 2007, 24(5):50-51.
- XU Shaojun, HUANG Heming, CHEN Ping. Analysis and precautions of abnormal ring current flowed in the metal sheath of single-core cable[J]. Distribution & Utilization, 2007, 24(5):50-51.
- [28] 洪娟. 高压电缆金属护套环流在线监测系统的研究和应用[D]. 北京: 华北电力大学, 2013.
- HONG Juan. Research and application of online monitoring system for current in metal sheaths of high voltage cables[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [29] 于连坤, 魏占朋, 丁彬, 等. 电力电缆接地系统缺陷引起环流异常的分析[J]. 山东电力技术, 2020, 47(5):26-29.
- YU Liankun, WEI Zhanpeng, DING Bin, et al. Analysis of circulation current abnormality caused by defects in power cable grounding system[J]. Shandong Electric Power, 2020, 47(5):26-29.
- [30] 黄鹤鸣. 高压单芯电力电缆接地电流分析与监测系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2009.
- HUANG Heming. Research on grounding current analysis and monitoring system for high voltage single-conductor power cables[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2009.
- [31] 王立. 运行交联聚乙烯电缆绝缘状态及接地系统的监测与评价[D]. 天津: 天津大学, 2013.
- WANG Li. Monitoring and evaluation of insulation status and grounding system of cross-linked polyethylene cable operation[D]. Tianjin: Tianjin University, 2013.
- [32] 张峥. 高压电力电缆绝缘在线检测技术实验研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
- ZHANG Zheng. Experimental research on online detection technology for insulation of high voltage power cables[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [33] 杜伯学, 李忠磊, 张镨, 等. 220 kV交联聚乙烯电力电缆接地电流的计算与应用[J]. 高电压技术, 2013, 39(5):1034-1039.
- DU Boxue, LI Zhonglei, ZHANG Kai, et al. Calculation and application of 220 kV crosslinked polyethylene power cable grounding current[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(5):1034-1039.
- [34] 杨静, 朱晓岭, 董翔, 等. 基于护层电流的高压电缆故障在线监测和诊断[J]. 高电压技术, 2016, 42(11):3616-3625.
- YANG Jing, ZHU Xiaoling, DONG Xiang, et al. On-line monitoring and diagnosis of HV cable faults based on sheath currents[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(11):3616-3625.
- [35] KHAMLICH A, ADEL M, GARNACHO F, et al. Measuring cable sheath currents to detect defects in cable sheath connections[C]//2017 52nd International Universities Power Engineering Conference(UPEC). Greece: IEEE, 2017:8231978.
- [36] SHOKRY M A, KHAMLICH A, GARNACHO F, et al. Detection and localization of defects in cable sheath of cross-bonding configuration by sheath currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(4):1401-1411.
- [37] B1-311. Automated sheath current monitoring system for cable sheath diagnostics purposes[R]. Paris: CIGRE, 2020.
- [38] 张镨. 高压交联聚乙烯电缆接地电流机理与故障分析[D]. 天津: 天津大学, 2011.
- ZHANG Kai. Mechanism and fault analysis of grounding current in high-voltage cross-linked polyethylene cables[D]. Tianjin: Tianjin University, 2011.
- [39] 姚舜禹. 一类电缆交叉互联接地系统缺陷的环流特征研究[J]. 电线电缆, 2023(2):48-53.
- YAO Shunyu. Study on circulation characteristics of a kind of defects in cable cross-connected grounding system[J]. Electric Wire & Cable, 2023(2):48-53.
- [40] 方春华, 李景, 汤世祥, 等. 基于接地电流的交叉互联箱故障诊断技术研究[J]. 高压电器, 2018, 54(6):16-23.
- FANG Chunhua, LI Jing, TANG Shixiang, et al. Fault diagnosis of cross-bonded box based on grounding current[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(6):16-23.
- [41] 涂静芸. 基于护层环流法的高压电缆故障诊断与定位技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.
- TU Jingyun. Research on fault diagnosis and location technology for high voltage cables based on layered circulation method[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2019.
- [42] MARZINOTTO M, MAZZANTI G. The feasibility of cable sheath fault detection by monitoring sheath-to-ground currents at the ends of cross-bonding sections[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2015, 51(6):5376-5384.
- [43] 周欣, 夏向阳, 夏君山, 等. 基于护层电流构建新型判据的高

- 压输电电缆在线监测[J]. 中国电力, 2021, 54(9):45-54.  
ZHOU Xin, XIA Xiangyang, XIA Junshan, et al. On-line monitoring of HV transmission cables based on a new criterion established with sheath current[J]. Electric Power, 2021, 54(9):45-54.
- [44] 方春华, 郭凯歌, 方雯, 等. 基于首末两端环流的电缆交叉互联箱缺陷识别定位方法[J]. 电力工程技术, 2022, 41(3):64-71.  
FANG Chunhua, GUO Kaige, FANG Wen, et al. Defect identification and location method of cable cross-bonded box based on head - end circulation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3):64-71.
- [45] YAN Li, PENG Fadong, CHEN Xiaolin, et al. Study on sheath circulating current of cross-linked power cables[C]//2008 International Conference on High Voltage Engineering and Application. China: IEEE, 2008:4774018.
- [46] LI Z, DU B X, WANG L, et al. The calculation of circulating current for the single - core cables in smart grid[C]//IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. China: IEEE, 2012: 6303176.
- [47] 苑玉宽, 李华春, 任志刚, 等. 双回并行敷设高压电缆零序护层电流计算及负荷相序优化方法[J]. 电瓷避雷器, 2022(3):123-132.  
YUAN Yukuan, LI Huachun, REN Zhigang, et al. Calculation of zero - sequence sheath current and load - phase sequence optimization method for double-circuit parallel laying high-voltage cables[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(3): 123-132.
- [48] 王爱华, 张勇, 刘云杰, 等. 高压单芯电缆不等长交叉互联接地环流分析[J]. 山东电力高等专科学校学报, 2022, 25(1):1-4.  
WANG Aihua, ZHANG Yong, LIU Yunjie, et al. Analysis of grounding circulating current for high-voltage single-core cables in unequal-length cross-bonding connection[J]. Journal of Shandong Electric Power College, 2022, 25(1):1-4.
- [49] 郑大白, 刘哲, 王凤凯. 高压电缆交叉互联金属护套环流影响因素分析及解决方法[J]. 电线电缆, 2022(1):19-25.  
ZHENG Dabai, LIU Zhe, WANG Fengkai. Analysis and solution of metal sheath ground circulating current in cross connection of high voltage cable[J]. Electric Wire & Cable, 2022(1): 19-25.
- [50] 潘伟, 王浩, 童斌, 等. 高压电缆接地电流的计算及其影响因素分析[J]. 电力工程技术, 2019, 38(2):147-151.  
PAN Wei, WANG Hao, TONG Bin, et al. Calculation and analysis of grounding current and its influence factors of high-voltage power cables[J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(2): 147-151.
- [51] 李明贞. 基于护层电流在线监测的电力电缆故障定位方法[D]. 武汉: 武汉大学, 2019.  
LI Mingzhen. A novel power cable fault location method based on on - line monitoring of sheath current[D]. Wuhan: Wuhan University, 2019.
- [52] 罗楚军, 王亚婕, 岳浩, 等. 埋地高压电缆与金属管道邻近敷设时电磁影响模型及计算方法[J]. 华北电力大学学报, 2023, 50(3):57-66.  
LUO Chujun, WANG Yajie, YUE Hao, et al. Modeling and analysis method of electromagnetic influence of buried high - voltage cable adjacent to metal pipe[J]. Journal of North China Electric Power University, 2023, 50(3):57-66.
- 赵洋(1979—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事高压电缆运维检修工作。  
马宪伟(1994—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事高压电缆运维检修工作。  
程养春(1974—), 男, 教授, 博士, 研究方向为电力设备局部放电现象、电力设备带电检测、状态评估与可靠性分析和电力装备智能化设计与高效运维(通信作者)(E-mail: chych@ncepu.edu.cn)。