



基于输入阻抗谱的电力电缆缺陷和故障特征研究

杨金海, 刘雪锋, 李双喜, 尹泓江, 余磊, 林营

引用本文:

杨金海, 刘雪锋, 李双喜, 尹泓江, 余磊, 林营. 基于输入阻抗谱的电力电缆缺陷和故障特征研究[J]. 信阳师范学院学报自然科学版, 2022, 35(4): 631–637. doi: 10.3969/j.issn.1003–0972.2022.04.018

YANG Jinhai, LIU Xuefeng, LI Shuangxi, YIN Hongjiang, YU Lei, LIN Ying. Characterization of Cable Local Defects and Faults Based on Input Impedance Spectroscopy[J]. *Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition)*, 2022, 35(4): 631–637. doi: 10.3969/j.issn.1003–0972.2022.04.018

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2022.04.018>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于BAS–BP模型的变压器故障诊断

Transformer Fault Diagnosis Based on BAS–BP Model

信阳师范学院学报自然科学版, 2020, 33(4): 635–639. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2020.04.021>

形态小波和对比敏感度函数结合的图像融合算法

MW and CSF–based Image Fusion Algorithm in Fault Diagnosis

信阳师范学院学报自然科学版, 2017, 30(3): 449–453. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2017.03.022>

氧化锌多孔空心微球湿敏性能的直交流分析

Direct AC Analysis of Wet–sensitive Properties and Wet–sensitive Mechanism of Nanometer Zinc Oxide Hollow Spheres

信阳师范学院学报自然科学版, 2020, 33(4): 617–621. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2020.04.017>

一种枝节延伸的宽轴比波束圆极化天线

Branch Circularly Polarized Antenna with Wide Axial Ratio Beamwidth

信阳师范学院学报自然科学版, 2022, 35(2): 295–299. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2022.02.021>

基于 PCA 的过程控制系统欺骗攻击研究

Study on Deception Attacks on Control System Using PCA

信阳师范学院学报自然科学版, 2015(4): 574–578. <https://doi.org/10.3969/j.issn.1003–0972.2015.04.027>

基于输入阻抗谱的电力电缆缺陷和故障特征研究

杨金海*, 刘雪锋, 李双喜, 尹泓江, 余磊, 林营

(云南电网有限责任公司 玉溪供电局, 云南 玉溪 653100)

摘要:分析了城市电网建设中电力电缆缺陷和故障类型的特征,提出了一种电缆首端输入阻抗谱特征的研究方法,搭建了不同缺陷和故障类型的电缆仿真模型,并与实际测试结果进行了对比分析。结果表明:电缆缺陷会引起输入阻抗谱的偏移和谐振频率点的变化;开路故障和短路故障会增大输入阻抗谱的振荡周期;仿真曲线和测试结果基本一致。

关键词:输入阻抗谱;容性缺陷;感性缺陷;开路故障;短路故障

中图分类号: TM75

文献标识码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Characterization of Cable Local Defects and Faults Based on Input Impedance Spectroscopy

YANG Jinhai*, LIU Xuefeng, LI Shuangxi, YIN Hongjiang,
YU Lei, LIN Ying

(Yuxi Power Supply Bureau of Yunnan Power Grid Co. Ltd., Yuxi 653100, China)

Abstract: The characteristic of power cable defects and fault types are analyzed in urban power grid construction, and a research method for characteristics of power cables is put forward based on head end impedance spectrum. At the same time, the cable simulation models with different defects and fault types are built, and the results are compared with the results of actual test. The results show that the cable defect will cause the input impedance spectrum shifts and the resonant frequency point change. Open circuit fault and short circuit fault will increase the oscillation period of input impedance spectrum. The simulation curves are basically consistent with the test results.

Key words: input impedance spectroscopy; capacitive defects; inductive defects; open-circuit fault; short-circuit fault

0 引言

相对于架空线路,电力电缆具有占地面积小、可靠性高的优势,在城市电网建设中得到了广泛的应用^[1-3]。随着电力电缆线路大量的铺设,实际运行过程中,在外力破坏、过负荷等因素的共同作用下,电缆的缺陷及故障问题^[4-6]变得越来越突出。而电缆一般敷设在隧道或者井盖里面,位置较隐蔽,为缺陷及故障的辨识带来了挑战。目前电缆故障辨识的主流方法包括行波法、局部放电技术和温度法。电缆发生故障时,会有行波信号产生,因此行波电流可作为故障定位的方法^[7-8]。行波法结合图像处理的方法,对波形的时域或者频域特征进行

辨识^[9-10],但由于信号衰减、噪声干扰等问题会造成一定的误差。电缆缺陷产生时,往往会伴随局部放电信号^[11-12],局部放电的方法在电缆典型故障的类型识别中起到了较好的效果,但目标对象主要为电缆附件,而电缆本体的故障识别效果容易受到强电磁环境的影响^[13-14]。电缆发生故障时,会出现局部温度过高的现象,具体检测方法一般为分布式光纤测温技术与红外热成像技术^[15-16],但成本较高。

近年来,一种新型的检测方法——阻抗谱法^[17]得到了国内外电力学者的重视。对于电缆的阻抗谱研究,日本学者提出了快速傅里叶反变换(IFFT)技术^[18]。国内华中科技大学研究人员^[19-20]基于积分变换技术开展了电缆本体及中间

接头等缺陷的识别和定位研究,验证了阻抗谱技术用于电缆缺陷定位的有效性。电缆故障发生前,往往伴随缺陷的产生。为深入研究电缆故障机理,本文基于输入阻抗谱的方法,利用仿真建模和试验验证,提出电缆缺陷和故障类型的辨识方法,旨在解决目前主流方法无法联合缺陷和故障进行诊断和分析的瓶颈,为电缆故障预警提供技术支撑。

1 输入阻抗谱相关原理

1.1 传输线原理

依据传输线理论,电力电缆可等效为单位长度分布参数模型的组合,如图 1^[21]所示。

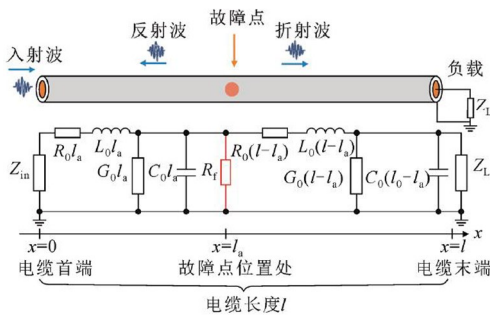


图 1 传输线等效分布参数模型

Fig. 1 Equivalent distribution parameter model of transmission line

将电缆首端的位置设置为原点,则传输线 x 处的电压、电流计算过程为:

$$\begin{cases} \frac{dU(x)}{dx} = -(R_0 + j\omega L_0)U(x), \\ \frac{dI(x)}{dx} = -B(G_0 + j\omega C_0)I(x), \end{cases} \quad (1)$$

其中: R_0 、 L_0 、 G_0 、 C_0 分别为单位长度的电阻、电感、电导和电容, j 表示虚数, ω 表示角频率。

进一步可得:

$$\begin{cases} \frac{d^2U(x)}{dx^2} = (R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)U(x), \\ \frac{d^2I(x)}{dx^2} = (R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)I(x), \end{cases} \quad (2)$$

对式(2)求得通解为:

$$\begin{cases} U(x) = U^+ e^{-\gamma x} + U^- e^{\gamma x}, \\ I(x) = \frac{1}{Z_0}(U^+ e^{-\gamma x} - U^- e^{\gamma x}), \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中 e 表示自然常数。

由式(3)可知,电力电缆中任意位置的电压及电流均以波的形式传播,本质上由前向传播的入射

波 U^+ 和后向传播的反射波 U^- 两部分组成。

当故障点位于电缆首端时,则无反射波,即 $U^- = 0$;同理,当故障点位于电缆末端时,则无入射波,即 $U^+ = 0$ 。其中:传输线的传播系数 γ 、传输线的特征阻抗 Z_0 分别为:

$$\begin{aligned} \gamma &= \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}, \\ Z_0 &= \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}}. \end{aligned} \quad (4)$$

故障电流一般为高频分量,则有 $\omega L_0 \gg R_0$ 、 $\omega C_0 \gg G_0$,则有

$$Z_0 = \sqrt{L_0/C_0}. \quad (5)$$

1.2 输入阻抗谱

坐标 x 处的输入阻抗为:

$$Z(x) = \frac{U(x)}{I(x)} = Z_0 \left(\frac{1 + \rho_L e^{-2\gamma(l-x)}}{1 - \rho_L e^{-2\gamma(l-x)}} \right), \quad (6)$$

其中: ρ_L 为电缆的反射系数,计算过程为

$$\rho_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}, \quad (7)$$

其中: Z_L 为电缆终端负载的阻抗值, ρ_L 表示负载反射系数。

电缆异常状态包括开路和短路状态,当传输线为开路故障时,则 Z_L 趋近于无穷大,反射系数为 1;当传输线为短路故障时,则趋近于 0,反射系数为 -1。其他情况下,阻抗不匹配,发射系数介于 -1 到 1 之间。

当故障点位置为 l_a 时,则输入阻抗为:

$$Z(0) = Z_0 \left(\frac{1 + \rho_{L1} e^{-2\gamma l_a}}{1 - \rho_{L1} e^{-2\gamma l_a}} \right), \quad (8)$$

$$Z(l_a) = Z_0 \left(\frac{1 + \rho_{L2} e^{2\gamma(l_a-l)}}{1 - \rho_{L2} e^{2\gamma(l_a-l)}} \right). \quad (9)$$

反射系数的计算公式为:

$$\rho_{L1} = \frac{(Z(l_a) \parallel R_f) - Z_0}{(Z(l_a) \parallel R_f) + Z_0}, \quad (10)$$

$$\rho_{L2} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}, \quad (11)$$

其中: \parallel 为阻抗的并联值, R_f 为电缆故障点等效电阻。

当电缆发生故障时,由公式(9)知,电缆首端输入阻抗也会发生变化。因此,可根据首端电缆输入阻抗谱的特征差异,对故障类型进行研判。

2 仿真测试

以某一同轴 10 kV 交联聚乙烯电缆为研究对象,其长度设置为 50 m,通过 pscad 仿真平台,开

展不同缺陷和故障类型的输入阻抗谱研究。

2.1 电缆本体容性缺陷

电缆本体容性缺陷主要是电缆老化引起的,因其会增大绝缘介质的相对介电常数,仿真中设定电缆 9.0~10.2 m 发生局部老化,缺陷程度分为轻度老化和重度老化,即单位电容值分别增大到健康状态的 1.03 倍和 1.07 倍,测试频率为 0~100 MHz,仿真计算得到的输入阻抗谱见图 2。

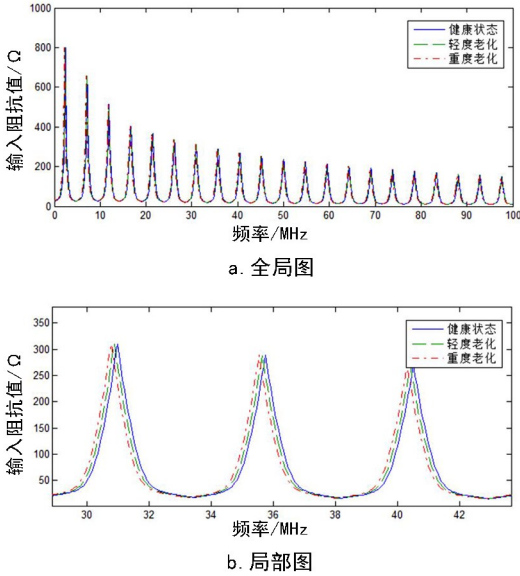


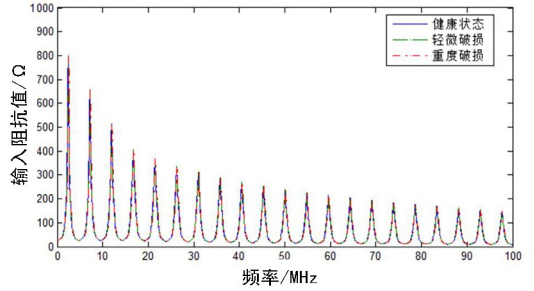
图 2 容性缺陷仿真的电缆输入阻抗谱

Fig. 2 Capacitive defect simulation of input impedance spectroscopy for power cable

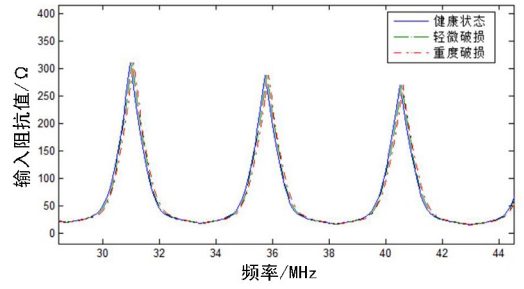
由图 2 可知,从整体上看,容性缺陷下,电缆的输入阻抗谱呈振荡衰减的趋势,且与健康状态下的振荡周期相同;从细节上看,随着电缆容性缺陷严重程度的增加,电缆输入阻抗幅值会往左偏移,即谐振频率点变小。

2.2 电缆本体感性缺陷

电缆本体感性缺陷主要是电缆屏蔽层破坏引起的,因为电缆为同轴结构,铜屏蔽层的破坏改变该区域的物理结构,从而导致局部区域的单位电容值减小。仿真中设定电缆 9.0~10.2 m 处发生屏蔽层破损,严重程度分为轻微破损和重度破损,相对于健康状态,单位电容值分别减小了 1% 和 5%,测试频率为 0~100 MHz,仿真计算得到的输入阻抗谱见图 3。由图 3 可知,从整体上看,感性缺陷下,电缆的输入阻抗谱呈振荡衰减的趋势,且与健康状态下的振荡周期一致;从细节上看,随着电缆感性缺陷严重程度的增加,电缆输入阻抗幅值会往右偏移,即谐振频率点变大。



a. 全局图



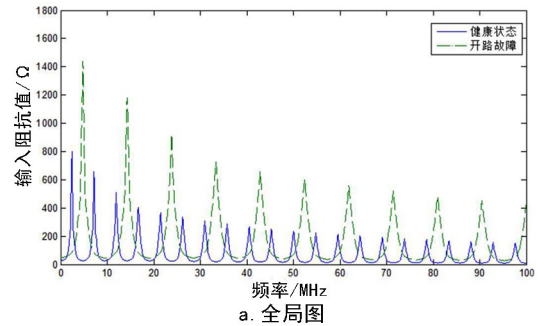
b. 局部图

图 3 感性缺陷仿真的电缆输入阻抗谱

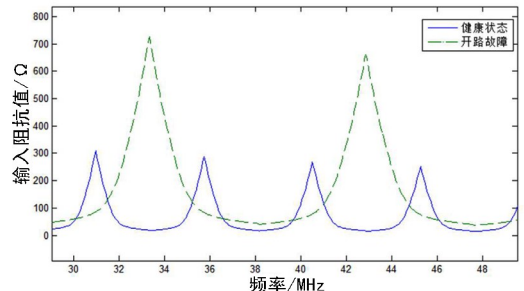
Fig. 3 Inductive defect simulation of input impedance spectroscopy for power cable

2.3 开路故障

电缆开路故障设定在电缆远端,反射系数为 1,会引起阻抗不匹配。仿真中设定电缆 40 m 处存在电缆断线,电缆末端为开路状态,测试频率为 0~100 MHz,仿真计算得到的输入阻抗谱见图 4。



a. 全局图



b. 局部图

图 4 开路故障仿真的电缆输入阻抗谱

Fig. 4 Open-circuit fault simulation of input impedance spectroscopy for power cable

由图 4 可知,从整体上看,电缆的输入阻抗谱呈振荡衰减的趋势,振荡周期较健康状态增大;从细节上看,对比健康状态,电缆输入阻抗幅值谐振频率点会偏移,对应幅值也会增加。

2.4 短路故障

电缆发生开路故障时,故障点位置设定在电缆远端,反射系数为 -1 ,会引起阻抗不匹配。仿真中,设定电缆 40 m 处存在短路情况,且电缆末端为开路状态,测试频率为 $0\sim 100$ MHz,仿真计算得到的输入阻抗谱见图 5。由图 5 可知,从整体上看,电缆的输入阻抗谱呈振荡衰减的趋势,振荡周期较健康状态增大;从细节上看,对比健康状态,电缆输入阻抗幅值谐振频率点会偏移,对应幅值也会增加,且幅值大于开路故障。

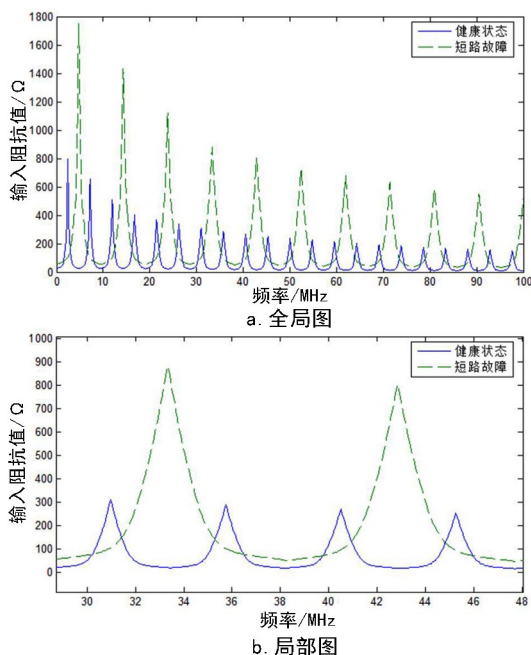


图 5 短路故障仿真的电缆输入阻抗谱

Fig. 5 Short-circuit fault simulation of input impedance spectroscopy for power cable

3 试验验证

为验证仿真计算结果的准确性,取电缆户外试验场废弃的 50 m 三相电缆,制作电缆缺陷与故障标本。利用宽频阻抗谱仪对电缆标本进行电缆首端输入阻抗谱测试,即将夹具两端分别连接电缆首端的缆芯和屏蔽层,而电缆末端开路。测量前,对电缆首端进行预处理,使电缆缆芯及屏蔽层各伸出长度约为 1.5 cm,便于夹具的连接,阻抗谱测量范围为 $100\text{ kHz}\sim 100\text{ MHz}$ 。

3.1 局部老化

电缆局部老化试验中,参照相应的测试标注,将 1.2 m 长的电缆放入老化箱,进行加热老化,老化时间分别为 5、7 d,通过阻抗分析仪测量的输入阻抗谱见图 6。

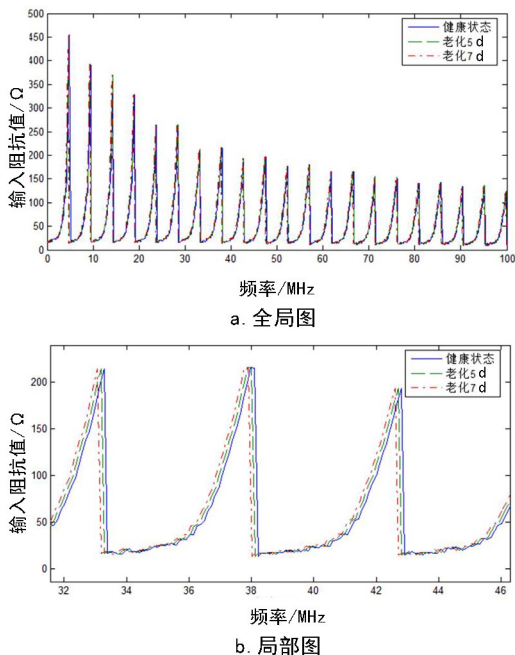


图 6 老化试验中的电缆输入阻抗谱

Fig. 6 Aging test of input impedance spectroscopy for power cable

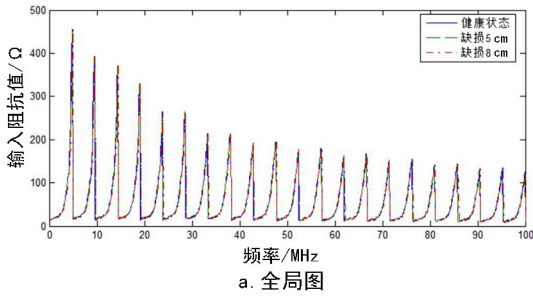
由图 6 可知,老化试验会引起电缆输入阻抗谱和谐振频率点的改变。随着老化天数的增加,输入阻抗谱向左偏移越严重,谐振频率点会偏小,试验结果与仿真计算结果一致。

3.2 屏蔽层损害

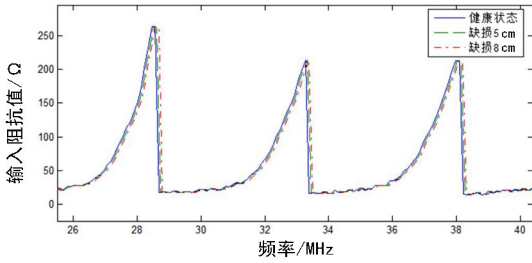
屏蔽层损害试验中,通过人为控制局部缺损长度,缺陷起始位置距电缆首端 9 m 处,缺损长度分别为 5 cm 和 8 cm,通过阻抗分析仪测量的输入阻抗谱见图 7。由图 7 可知,缺损试验也会引起电缆的输入阻抗谱和谐振频率点的改变。随着缺损长度的增加,输入阻抗谱向右偏移越严重,谐振频率点会偏大,试验结果与仿真计算一致。

3.3 开路故障

开路故障测试中,故障点位置设置于距首端 40 m 处,通过阻抗分析仪测量的输入阻抗谱见图 8。由图 8 可知,开路故障会导致输入阻抗谱周期与谐振频率点幅值的改变。谐振周期会增大,且谐振频率点幅值也会增大,试验结果与仿真变化规律相符。



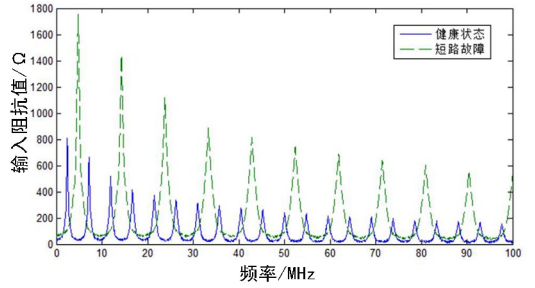
a. 全局图



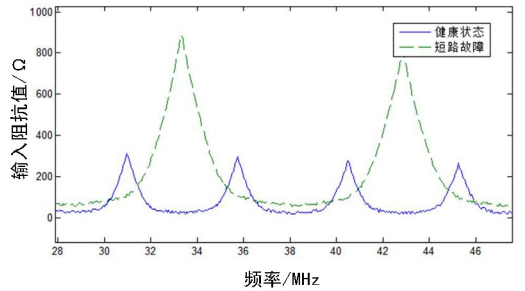
b. 局部图

图7 缺损试验中的电缆输入阻抗谱

Fig. 7 Shielding layer detect test of input impedance spectroscopy for power cable



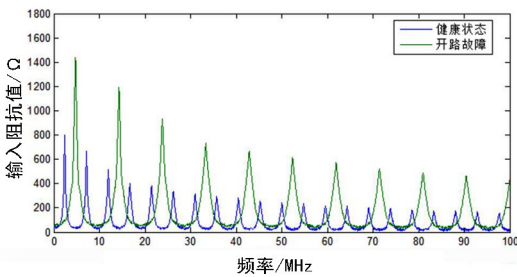
a. 全局图



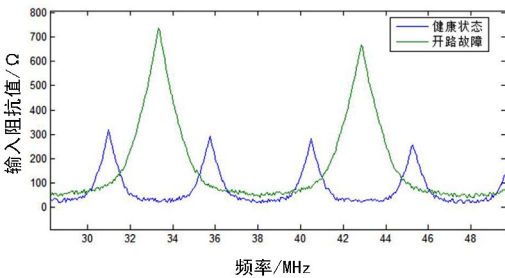
b. 局部图

图9 短路故障试验中的电缆输入阻抗谱

Fig. 9 Short-circuit fault test of input impedance spectroscopy for power cable



a. 全局图



b. 局部图

图8 开路故障试验中的电缆输入阻抗谱

Fig. 8 Open-circuit fault test of input impedance spectroscopy for power cable

3.4 短路故障

短路故障测试中,故障点位置设置于距首端40 m处,通过阻抗分析仪测量的输入阻抗谱见图9。由图9可知,短路故障会导致输入阻抗谱周期与谐振频率点幅值的改变。谐振周期会增大,且谐振频率点幅值也会增大,试验结果与仿真变化规律相符。

3.5 中间接头故障

为进一步探索输入阻抗谱方法的适用性,开展中间接头故障的研究。距电缆首端9 m处设置一个中间接头,长度约为0.2 m,通过阻抗分析仪测量的输入阻抗谱见图10。

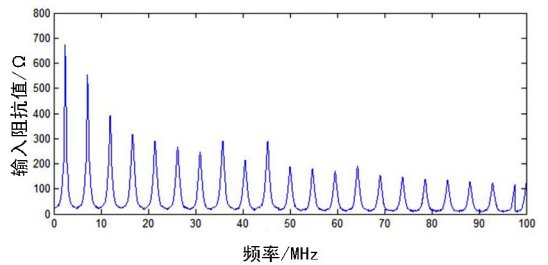


图10 中间接头试验中的电缆输入阻抗谱

Fig. 10 Intermediate joints test of input impedance spectroscopy for power cable

由图10可知,电缆存在中间接头故障时,输入阻抗谱整体呈现衰减趋势,但中间会有异常振荡点,幅值反而会增加值。

4 结论

电缆缺陷发生时,输入阻抗谱会产生偏移,而电缆故障发生时,输入阻抗谱振荡周期会增大,因此,可根据输入阻抗谱的特征变化制定相应的运维策略,若发生偏移,及早进行现场巡视,规避电缆形

成实质性故障,引起线路跳闸,最终造成电力事故。为电缆故障的机理研究提供技术支撑。
后续可进一步开展高阻、低阻等接地故障的研究,

参考文献:

- [1] 郑建康,刘素蓉,蒲路,等. 电力电缆带电燃烧的数值模拟技术研究进展[J]. 智慧电力, 2020, 48(10): 105-112.
ZHENG Jiankang, LIU Surong, PU Lu, et al. State of the art of combustion behavior of live power cables[J]. Smart Power, 2020, 48(10): 105-112.
- [2] 叶婧,徐鸣,王永,等. 基于L-稳定单步多级块方法的多导体传输线时域响应分析[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2021, 34(4): 639-644, 697.
YE Jing, XU Ming, WANG Yong, et al. Time domain response analyses of multiconductor transmission lines using L-stable single step multistage block method[J]. Journal of Xinyang Normal University(Natural Science Edition), 2021, 34(4): 639-644, 697.
- [3] 刘家军,杜智亮,李娟绒,等. 铁路10 kV 电力电缆头发热分析与安全监测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(24): 131-138.
LIU Jiajun, DU Zhiliang, LI Juanrong, et al. Thermal analysis and safety monitoring of railway 10 kV power cable joints[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(24): 131-138.
- [4] 圣文顺,徐爱萍,涂洁,等. 基于模糊层次法的分布式故障诊断系统安全评估[J]. 信阳师范学院学报(自然科学版), 2020, 33(3): 438-442.
SHENG Wenshun, XU Aiping, TU Jie, et al. Research on safety evaluation for distributed fault diagnostic system of overhead transmission lines based on fuzzy analytic hierarchy process[J]. Journal of Xinyang Normal University (Natural Science Edition), 2020, 33(3): 438-442.
- [5] 杨帆,杨旗,程鹏,等. 电缆接头内部气隙放电缺陷下的绝缘劣化程度表征方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(2): 24-32.
YANG Fan, YANG Qi, CHENG Peng, et al. Study of cracking extent for gap discharge in insulating material of power cable joint[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(2): 24-32.
- [6] 陈新,李文鹏,李震宇,等. 高压直流XLPE绝缘材料及电缆关键技术展望[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1577-1585.
CHEN Xin, LI Wenpeng, LI Zhenyu, et al. Prospect on key technology of the XLPE insulation materials and HVDC cables[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1577-1585.
- [7] 张鹏,李京,周继功. 基于行波原理的电缆故障在线双端测距研究[J]. 国网技术学院学报, 2014, 17(2): 5-8.
ZHANG Peng, LI Jing, ZHOU Jigong. The double end ranging on-line based on the principle of transient traveling wave of cable[J]. Journal of State Grid Technology College, 2014, 17(2): 5-8.
- [8] 付华,王婧羽. 基于SR-VMD的微弱故障行波检测方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 156-162.
FU Hua, WANG Jingyu. Weak fault traveling wave detection method based on SR-VMD[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 156-162.
- [9] 索南加乐,王增超,钟应,等. 基于参数识别的长输电线路接地距离保护算法[J]. 高电压技术, 2013, 39(11): 2814-2821.
SUONan Jiale, WANG Zengchao, ZHONG Ying, et al. Grounding distance protection algorithm for long transmission line based on parameter identification[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(11): 2814-2821.
- [10] 邓丰,曾祥君,马士聪,等. 基于分布式行波检测的广域网络故障定位方法[J]. 电网技术, 2017, 41(4): 1300-1307.
DENG Feng, ZENG Xiangjun, MA Shicong, et al. Research on wide area traveling wave fault location method based on distributed traveling wave detection[J]. Power System Technology, 2017, 41(4): 1300-1307.
- [11] 林文钊. 基于振荡波局部放电检测的电力电缆缺陷定位研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2016.
LIN Wenzhao. Algorithm research of power cable fault location based on oscillatory voltage partial discharge detection [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2016.
- [12] 李巍巍,白欢,吴惟庆,等. 基于振荡波局部放电检测的电力电缆绝缘老化状态评价与故障定位[J]. 电测与仪表, 2021, 58(9): 147-151.
LI Weiwei, BAI Huan, WU Weiqing, et al. Evaluation and fault location of power cable insulation aging based on

- oscillation-wave partial discharge detection[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(9): 147-151.
- [13] 谢敏,周凯,赵世林,等.考虑相速度频变特性的改进互相关算法局部放电定位[J].*电网技术*, 2018, 42(5): 1661-1667.
- XIE Min, ZHOU Kai, ZHAO Shilin, et al. Research on partial discharge location using modified cross-correlation method considering frequency characteristic of phase velocity[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(5): 1661-1667.
- [14] 杨帆,王干军,彭小圣,等.基于卷积神经网络的高压电缆局部放电模式识别[J].*电力自动化设备*, 2018, 38(5): 123-128.
- YANG Fan, WANG Ganjun, PENG Xiaosheng, et al. Partial discharge pattern recognition of high-voltage cables based on convolutional neural network[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(5): 123-128.
- [15] 周远翔,赵健康,刘睿,等.高压/超高压电力电缆关键技术分析及展望[J].*高电压技术*, 2014, 40(9): 2593-2612.
- ZHOU Yuanxiang, ZHAO Jiankang, LIU Rui, et al. Key technical analysis and prospect of high voltage and extra-high voltage power cable[J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(9): 2593-2612.
- [16] 梁栋,徐丙垠,刘洋,等.基于差分方向行波的脉冲电流电缆故障测距方法[J].*电测与仪表*, 2021, 58(7): 150-156.
- LIANG Dong, XU Bingyin, LIU Yang, et al. Impulse current cable fault location method based on differential directional traveling waves[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2021, 58(7): 150-156.
- [17] 张丹丹,郑建康,冯南战,等.基于阻抗谱的同轴电力电缆高频传输特性研究[J].*高压电器*, 2021, 57(6): 18-23.
- ZHANG Dandan, ZHENG Jiankang, FENG Nanzhan, et al. Study on high frequency transmission characteristics of coaxial power cable based on impedance spectrum[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(6): 18-23.
- [18] OHKI Y, HIRAI N. Location feasibility of degradation in cable through Fourier transform analysis of broadband impedance spectra[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2013, 183(1): 1-8.
- [19] ZHOU Z Q, ZHANG D D, HE J J, et al. Local degradation diagnosis for cable insulation based on broadband impedance spectroscopy[J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2015, 22(4): 2097-2107.
- [20] 张丹丹,苏小婷,景晓东,等.基于阻抗谱的同轴电缆故障及中间接头定位实验研究[J].*高压电器*, 2021, 57(7): 92-97, 104.
- ZHANG Dandan, SU Xiaoting, JING Xiaodong, et al. Experimental study on coaxial cable faults and intermediate joints location based on impedance spectrum[J]. *High Voltage Apparatus*, 2021, 57(7): 92-97, 104.
- [21] 李蓉,周凯,饶显杰,等.基于输入阻抗谱的电缆故障类型识别及定位[J].*高电压技术*, 2021, 47(9): 3236-3245.
- LI Rong, ZHOU Kai, RAO Xianjie, et al. Identification and location of cable faults based on input impedance spectrum[J]. *High Voltage Engineering*, 2021, 47(9): 3236-3245.

责任编辑:任长江