

DOI:10.12158/j.2096-3203.2022.03.008

基于首末两端环流的电缆交叉互联箱缺陷识别定位方法

方春华, 郭凯歌, 方雯, 普子恒, 胡冻三, 陶玉宁

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

摘要:长电缆线路交叉互联箱在出现接地、进水、三相相序错误等缺陷时,难以对其进行快速识别和定位。针对交叉互联箱3类典型缺陷,建立长电缆线路交叉互联模型,分析缺陷下环流幅值及相位的变化规律,并对首末两端环流比值与缺陷箱号数的散点数据进行曲线拟合,获得缺陷定位公式,最后通过实例加以验证。结果表明:箱内接地时,缺陷相环流幅值增大,非缺陷相正常;三相相序错误时,两相环流幅值明显增大,另一相环流幅值较小;箱内进水时,各相环流幅值均增大且基本相等。定位公式的拟合度在0.96左右,通过实例验证可确定缺陷箱号数的范围。所提方法不受线芯电流和接地电阻变化的影响,可为长电缆线路交叉互联箱缺陷识别定位提供参考。

关键词:电缆线路;交叉互联箱;护层环流;环流比值;缺陷识别;缺陷定位

中图分类号:TM75

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2022)03-0064-08

0 引言

高压电缆由于良好的供电可靠性被广泛应用于电力系统^[1-2]。随着高压电缆运行年限的增加,线路中交叉互联箱易因自然或人为因素引发故障。江苏地区故障案例统计表明,每年交叉互联箱故障占交叉互联电缆总故障量的50%以上。交叉互联箱接地、三相相序错误、箱内进水等类型的缺陷发生后,整个交叉互联线路的等值电路发生变化,导致金属护套中的环流出现异常,容易造成电缆护层环流超标,影响电缆的安全稳定运行^[3-6]。因此,研究交叉互联箱缺陷识别定位方法具有重要的意义。

文献[7-8]建立了高压电缆环流计算模型,分析了交叉互联箱进水、护层回路开路及接头内环氧预制件击穿等不同缺陷下同轴电缆监测电流的变化情况,并以此为依据提出了缺陷诊断标准。文献[9]针对1.5 km电缆线路交叉互联箱内同轴电缆断裂、三相换位失败、进水3种典型缺陷,分析了缺陷下电缆首端环流变化情况,提出了基于电缆首端护层电流的缺陷诊断方案。文献[10]针对高压电缆金属护套多点接地缺陷,建立了环流计算模型,并基于该模型提出了利用电缆首末两端环流来判断缺陷发生相位和位置。文献[11]分析了线芯换位、负荷率及敷设形式对护套缺陷下接地电流的影响,提出了编码形式的护套缺陷诊断标准。文献[12]提出了基于接地电流幅值比和相角差的交叉互联接地系统缺陷综合诊断方法,通过引入逻辑回归算

法实现了缺陷的智能分类。以上研究大多集中在电缆线路护层缺陷诊断,而长电缆线路交叉互联箱缺陷定位方法有待进一步研究。

针对上述问题,文中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识别定位方法,仅须在电缆首末两端安装监测装置,就能降低线路成本,且不受线芯电流和接地电阻变化影响。利用该方法能大致确定缺陷箱号数的范围,再进行线路故障巡检,即可精准定位缺陷箱号数,对及时排除交叉互联箱缺陷具有一定的指导意义。

1 理论分析与模型建立

1.1 电缆护层环流分析

高压电缆均采用单芯结构,其运行电流产生的交变磁场会在铝护套上产生感应电压^[13]。铝护套若通过大地或回流线形成通路,则会产生环流^[14]。护层环流会产生电能损耗,导致电缆载流量降低,严重发热时甚至会烧毁接地线^[15]。

目前主要采用交叉互联接地方式来降低电缆护层环流^[16],其结构如图1所示。先将整条电缆线路分成几个大段,再将每个大段等分为3小段,在各个小段间装设绝缘接头,利用交叉互联箱将各个小段的金属护套进行换位连接,并在交叉互联箱中安装护层保护器,最后将整条线路两端的金属护套直接接地^[17-18]。理想情况下,每小段护套上产生的感应电压幅值基本相等,相位相差120°,因此交叉互联接地方式可以中和各小段护套上产生的感应电流^[19]。

电缆交叉互联等值电路见图2, $U_{A1}, U_{A2}, U_{A3}, U_{B1}, U_{B2}, U_{B3}, U_{C1}, U_{C2}, U_{C3}$ 分别为各小段金属护套上

收稿日期:2022-01-18;修回日期:2022-03-25

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51807110)

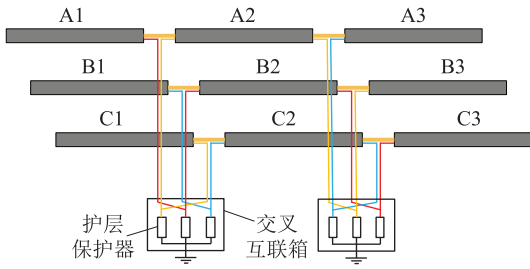


图1 交叉互联电缆结构

Fig.1 Cross-bonded cable structure graph

的感应电压; I_{sA}, I_{sB}, I_{sC} 分别为各回路中流过的感应电流; $Z_{A1}, Z_{A2}, Z_{A3}, Z_{B1}, Z_{B2}, Z_{B3}, Z_{C1}, Z_{C2}, Z_{C3}$ 分别为各小段金属护套的阻抗; R_e 为接地电阻。

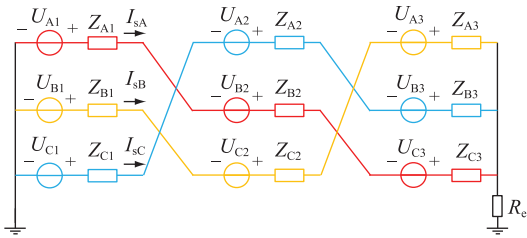


图2 电缆交叉互联等值电路

Fig.2 Equivalent circuit of cross-bonded cable

利用电缆线芯电流和金属护套的相关参数即可计算出完整换位段的感应电流^[20-21]。计算公式见式(1)一式(3), 式中参数参见文献[22-23]。

$$I_{sA} = \frac{U_{A1} + U_{B2} + U_{C3}}{Z_{A1} + Z_{B2} + Z_{C3} + R_e} \quad (1)$$

$$I_{sB} = \frac{U_{B1} + U_{C2} + U_{A3}}{Z_{B1} + Z_{C2} + Z_{A3} + R_e} \quad (2)$$

$$I_{sC} = \frac{U_{C1} + U_{A2} + U_{B3}}{Z_{C1} + Z_{A2} + Z_{B3} + R_e} \quad (3)$$

电缆护层电流为金属护套中流过的感应电流和电容电流的叠加。线芯和金属护套之间的电容特性会导致金属护套中产生电容电流 I_C , 如图3所示。其中, Z_{KM}, Z_{KN} 分别为金属护套左、右侧等效阻抗; C 为电缆线芯至金属护套间的电容值; U 为电缆的运行电压。

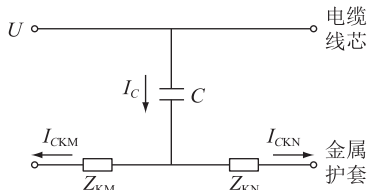


图3 电容电流示意

Fig.3 Capacitance current diagram

2个方向的电容电流 I_{CKM} 和 I_{CKN} 大小取决于该段金属护套阻抗的大小^[24-25], 其计算公式为:

$$\begin{cases} I_{CKM} = \frac{Z_{KN}}{Z_{KM} + Z_{KN}} I_C \\ I_{CKN} = \frac{Z_{KM}}{Z_{KM} + Z_{KN}} I_C \end{cases} \quad (4)$$

其中:

$$\begin{cases} I_C = j\omega CU \\ C = \frac{2\pi\epsilon_r\epsilon_0}{\ln(D_x/D_c)} \end{cases} \quad (5)$$

式中: ϵ_r 为相对介电常数; ϵ_0 为真空介电常数, 为 8.85×10^{-12} F/m; D_x 为电缆绝缘层外径; D_c 为电缆线芯的外径。

三相电缆左、右侧的护层电流 I_{mpL}, I_{mpR} 分别表示为:

$$\begin{cases} I_{mpL} = I_{sp} - I_{CKM} \\ I_{mpR} = I_{sp} + I_{CKN} \end{cases} \quad (6)$$

式中: $p = A, B, C$ 。

1.2 仿真模型建立

建立单回路 110 kV 线路, 总长度为 15 km, 线路被等分为 30 小段, 每小段长度为 500 m, 共有 29 个交叉互联箱。整条线路首末两端采用直接接地方式, 中间采用交叉互联箱进行各相换位, 敷设方式为品型敷设, 电缆具体参数见表 1。

表 1 110 kV 单芯电缆参数

Table 1 The parameters of 110 kV single-core cable

参数	数值	参数	数值
导体横截面积/mm ²	1 000	几何半径/mm	50.65
导体半径/mm	20.2	铝护套厚度/mm	1.8
绝缘层厚度/mm	16	外护套厚度/mm	3

利用 PSCAD 建立电缆模型时选择 Bergeron 模型, 设置仿真总时长 T 为 0.1 s, 仿真步长 Δt 为 2×10^{-6} s, 护套两端接地电阻设为 0.1 Ω 。仿真分析电缆线路首末两端环流幅值和相位的变化情况。

2 故障电流波形特征分析

正常工况下, 线路各个小段内产生的感应电压相互中和, 护层环流较小, 不会对系统安全运行造成影响。在电缆交叉互联箱出现接地、进水或三相相序错误时, 电缆环流等效电路会发生改变, 导致环流幅值和相位发生变化^[18]。

分析交叉互联箱缺陷之前, 作如下定义。环流回路 1: 1A—2B—3C—4A—...—30C (1A 代表第一段电缆的 A 相金属护套, 其他依次类推); 环流回路 2: 1B—2C—3A—4B—...—30A; 环流回路 3: 1C—2A—3B—4C—...—30B。 I_{h1} 为环流回路 1 的首端环

流; I_{e1} 为环流回路1的末端环流($I_{h2}, I_{e2}, I_{h3}, I_{e3}$ 依次类推)。

2.1 接地缺陷

环流回路1存在交叉互联箱单相护层接地缺陷时,环流波形见图4。在50ms出现缺陷之前,各护层回路首端环流幅值和相位基本相同。在50ms出现缺陷后,回路2和回路3的首端环流 I_{h2}, I_{h3} 幅值和相位均无太大变化,与正常环流相比基本可忽略不计,但回路1首端环流 I_{h1} 幅值增大20.57A。

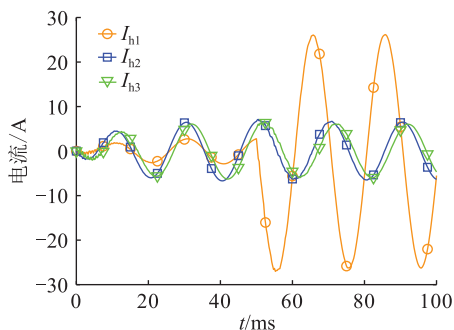


图4 单相护层接地时环流波形

Fig.4 Circulating current waveforms in single-phase sheath grounding

环流回路1和回路2均存在交叉互联箱接地缺陷时,环流波形见图5。在50ms发生两相护层接地后,首端环流 I_{h1}, I_{h2} 幅值分别增大17.56A,20.06A。接地缺陷表现为缺陷相首端环流幅值增大,非缺陷相环流基本不变。

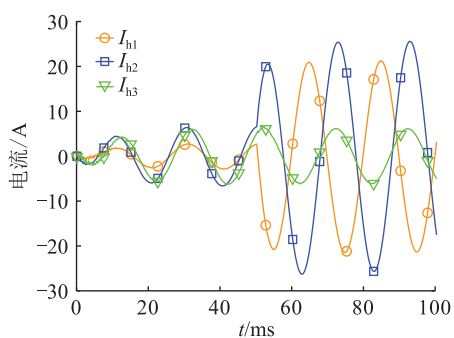


图5 两相护层接地时环流波形

Fig.5 Circulating current waveforms in two-phase sheath grounding

2.2 三相相序错误

三相相序错误的环流波形见图6。在50ms出现缺陷后,首端环流 I_{h1}, I_{h2}, I_{h3} 分别增大19.91A,18.36A,6.72A。三相相序错误表现为有两相首端环流幅值明显增大,另一相环流幅值较小。

2.3 箱内进水

通过在模型中加电阻接地来模拟各种水体成分下的交叉互联箱进水缺陷,以0.5Ω缺陷点接地电阻为例进行分析,环流波形见图7。在50ms交叉

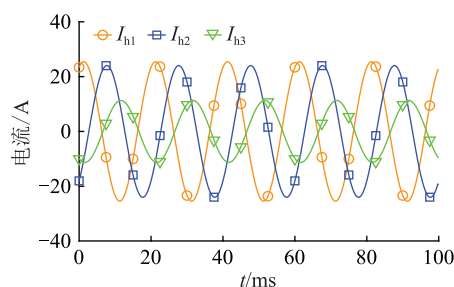


图6 三相相序错误时环流波形

Fig.6 Circulating current waveforms when three-phase sequence errors

互联箱进水后, I_{h1}, I_{h2}, I_{h3} 幅值分别增大10.75A,11.56A,11.68A。因此,箱内进水时,各护层回路首端环流幅值均增大且基本相等。缺陷点接地电阻为1Ω时的环流波形见图8,当接地电阻不同时,环流变化趋势相同,仅是环流幅值不同。

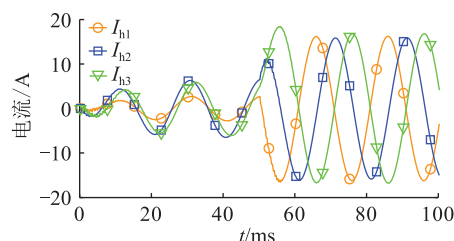


图7 接地电阻为0.5Ω时的环流波形

Fig.7 Circulating current waveforms when grounding resistance is 0.5Ω

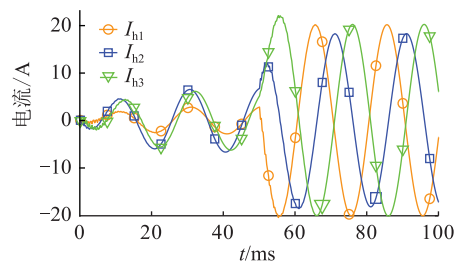


图8 接地电阻为1Ω时的环流波形

Fig.8 Circulating current waveforms when grounding resistance is 1Ω

对比不同缺陷下的环流变化情况,即可快速对交叉互联箱进行缺陷诊断,各类缺陷下环流的变化特征见表2。

表2 缺陷下环流的变化特征

Table 2 Variation characteristics of circulation under defects

缺陷类型	特征
接地缺陷	缺陷相环流幅值增大,非缺陷相环流正常
三相相序错误	有两相环流幅值明显增大,另一相环流幅值较小
箱内进水	各相环流幅值均增大且基本相等

3 基于首末两端环流比值的缺陷定位方法

统计 29 个交叉互联箱分别存在某一缺陷时首端环流 I_{h1}, I_{h2}, I_{h3} 和末端环流 I_{e1}, I_{e2}, I_{e3} 的幅值大小, 找出每种缺陷情况对应的特征相环流, 利用指数函数对特征相首末两端环流比值与缺陷箱号数的散点数据进行拟合, 获得缺陷定位公式。文中采用首末两端环流比值进行缺陷定位, 所提方法不受线芯电流和接地电阻变化的影响。分析前作以下定义: $x_1 = I_{h1}/I_{e1}; x_2 = I_{h2}/I_{e2}; x_3 = I_{h3}/I_{e3}; y$ 为缺陷交叉互联箱号数。

3.1 接地缺陷定位

3.1.1 单相护层接地

交叉互联箱内单相护层接地时, 以环流回路 1 接地为例进行分析, 特征环流为 I_{h1} 和 I_{e1} , 环流分布情况见图 9。3 倍数的交叉互联箱缺陷对首末两端环流幅值几乎没有影响, 包括后面的箱内进水和三相相序错误, 原因是每一大段中的感应电压仍可相互中和。因此文中只对除 3 倍数以外的缺陷交叉互联箱号数进行分析。

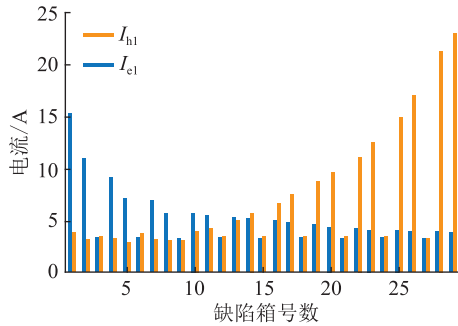


图 9 单相护层接地的首末两端环流分布情况

Fig.9 Head-end circulation distribution in single-phase sheath grounding

环流回路 1 接地时, 对首末两端环流比值 x_1 与缺陷箱号数的散点数据进行拟合, 如图 10 所示, 拟合度 R^2 为 0.97, 拟合效果较好。根据三相电路的对称性, 环流回路 1 接地缺陷的定位公式同样也可应用于回路 2 和回路 3。环流回路 1 拟合曲线为:

$$y = 30.91e^{-0.81x_1} \quad (7)$$

3.1.2 两相护层接地

箱内两相护层接地时, 以环流回路 1 和回路 2 接地缺陷为例进行分析, 特征环流为 I_{h1}, I_{e1} 和 I_{h2}, I_{e2} , 环流分布情况见图 11。除 3 倍数以外的缺陷交叉互联箱, 随缺陷箱号数增加, 首端环流逐渐减小, 末端环流逐渐增大, 首末两端环流比值呈减小趋势。

x_1, x_2 与缺陷箱号数的散点拟合曲线见图 12。首末两端环流比值与缺陷箱号数的散点呈指数趋

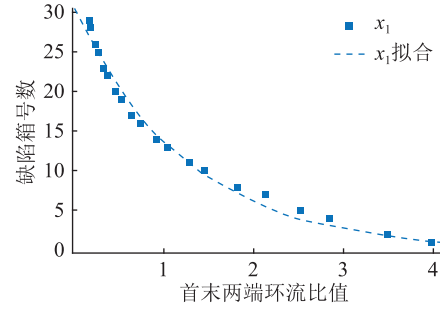
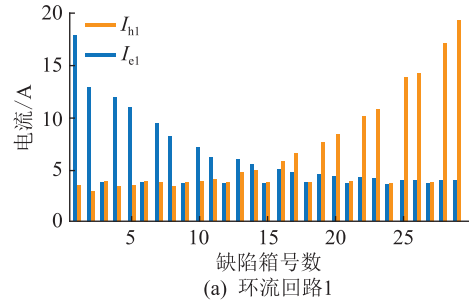
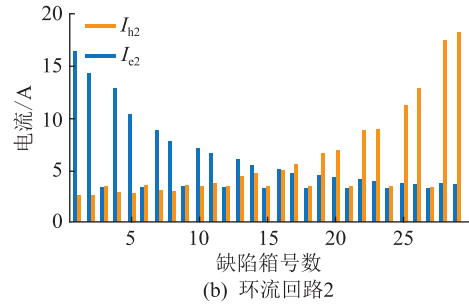


图 10 单相护层接地的首末两端环流比值拟合曲线

Fig.10 Fitting curve of head-end circulation ratio in single-phase sheath grounding



(a) 环流回路1



(b) 环流回路2

图 11 两相护层接地的首末两端环流分布情况

Fig.11 Head-end circulation distribution in two-phase sheath grounding

势变化, 拟合度 R^2 分别为 0.98 和 0.97, 拟合效果较好。利用三相电路的对称性, 环流回路 1、2 接地缺陷的定位公式同样也可应用于回路 1、3 接地缺陷和回路 2、3 接地缺陷。

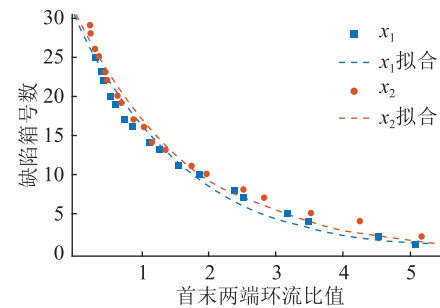


图 12 两相护层接地的首末两端环流比值拟合曲线

Fig.12 Fitting curves of the head-end circulation ratio in two-phase sheath grounding

环流回路 1 拟合曲线为:

$$y = 29.15e^{-0.65x_1} \quad (8)$$

环流回路 2 拟合曲线为:

$$y = 31.47e^{-0.59x_2} \quad (9)$$

3.2 三相相序错误定位

三相相序错误时,随缺陷箱号数增大,各相首末两端环流比值均在某一小范围内变化。将 3 个环流回路的首末两端环流比值散点分别进行拟合,如图 13 所示。拟合度 R^2 分别为 0.93,0.95,0.96,拟合曲线与散点数据基本吻合,归一性较好。

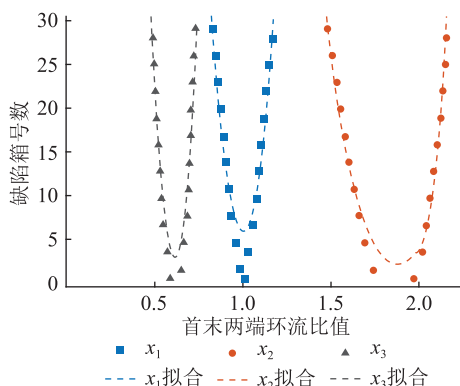


图 13 三相相序错误的首末两端环流比值拟合曲线
Fig.13 Fitting curves of head-end circulation ratio when three-phase sequence errors

环流回路 1 拟合曲线为:

$$y = 3.27e^{-1.50x_1} + 2.81e^{1.57x_1} \quad (10)$$

环流回路 2 拟合曲线为:

$$y = 2.41e^{-1.84x_2} + 0.51e^{3.29x_2} \quad (11)$$

环流回路 3 拟合曲线为:

$$y = 1.79e^{-2.02x_3} + 1.48e^{2.35x_3} \quad (12)$$

3.3 箱内进水定位

箱内进水时,各相首末两端环流比值与缺陷箱号数的散点数据呈指数趋势变化。对各相首末两端环流比值与缺陷箱号数的散点数据进行拟合,结果见图 14。拟合度 R^2 分别为 0.97,0.95,0.96,拟合效果较为理想,说明指数函数能较好地表示环流比值与缺陷箱号数的关系。

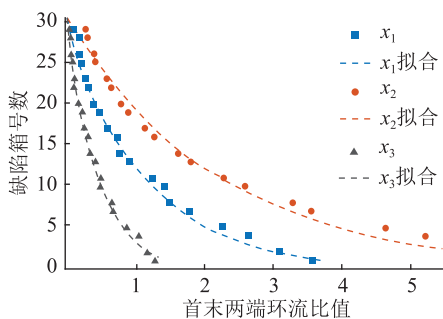


图 14 箱内进水的头末两端环流比值拟合曲线
Fig.14 Fitting curves of head-end circulation ratio of the inlet water in the box

环流回路 1 拟合曲线为:

$$y = 31.81e^{-0.91x_1} \quad (13)$$

环流回路 2 拟合曲线为:

$$y = 31.35e^{-0.47x_2} \quad (14)$$

环流回路 3 拟合曲线为:

$$y = 33.32e^{-2.33x_3} \quad (15)$$

根据以上缺陷分析,总结交叉互联箱缺陷定位流程如下:先将首端环流与正常环流进行比较分析,确定缺陷类型和缺陷环流回路;将首末两端环流比值代入各缺陷对应的定位公式从而确定缺陷箱号数范围,交叉互联箱内单相接地时代入式(7),两相接地时代入式(8)、式(9),三相相序错误时代入式(10)一式(12),箱内进水时代入式(13)一式(15);最后再进行线路巡检确定缺陷箱号数。

3.4 影响因素分析

当电缆线芯电流和接地电阻发生变化时,缺陷回路的首末两端环流比值也必定发生变化。因此有必要分析线芯电流和接地电阻对定位方法的影响。

仿真不同线芯电流和接地电阻下回路 1 发生单相护层接地缺陷时的首末两端环流,如表 3 所示。当线芯电流为 150 A 且接地电阻为 0.1 Ω 时, x_1 为 3.94,影响因素的误差分析以此为标准,使用式(16)计算误差 E 。由表 3 可知,随线芯电流增大,首末两端环流幅值逐渐增大,但环流比值基本不变。

表 3 不同线芯电流下的首末两端环流

Table 3 Head-end circulation at different core currents

线芯电流/A	I_{h1}/A	I_{e1}/A	x_1	$E/\%$
160	17.62	4.48	3.93	0.25
180	19.81	5.01	3.96	0.51
200	22.15	5.66	3.91	0.76
220	24.23	6.13	3.95	0.25

$$E = (|I_{h1}/I_{e1} - 3.94|/3.94) \times 100\% \quad (16)$$

文中的定位公式是在接地电阻为 0.1 Ω 的情况下拟合的。接地电阻接近 0.1 Ω 时,定位准确,随着接地电阻的增大,定位逐渐偏离,但在接地电阻到达 1.0 Ω 时仍具有较高精度,如表 4 所示。

表 4 不同接地电阻下的首末两端环流

Table 4 Head-end circulation at different ground resistances

接地电阻/ Ω	I_{h1}/A	I_{e1}/A	x_1	$E/\%$
0.2	15.95	4.07	3.92	0.51
0.3	15.31	3.93	3.90	1.02
0.5	14.68	3.79	3.87	1.78
1.0	14.15	3.71	3.82	3.05

若根据现场以 0.5 Ω 为基准拟合定位公式,将具有更大范围的适应性。因此基于首末两端环流

比值的定位方法可适用于线芯电流和接地电阻变化的情况。

4 实例分析

某供电局实际运行双回路 110 kV 线路情况如图 15 所示。两路电缆中间部分各有 29 个交叉互联箱,线路两端直接接地, A_1 — A_4 为电流互感器,利用电流互感器检测各个交叉互联箱内的护层环流。线路一的部分检测数据见表 5。

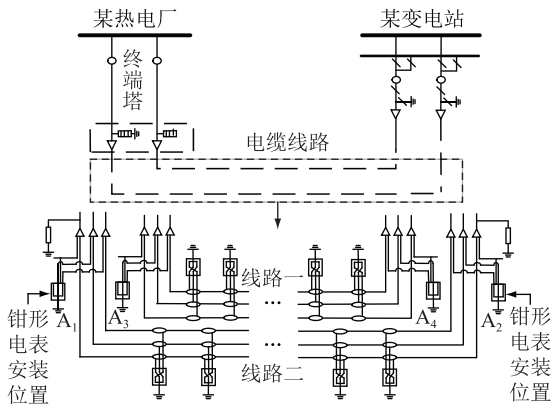


图 15 实际线路设计

Fig.15 The design of actual cable line

表 5 实测护层环流数据 1

Table 5 The actual circulating current data 1

时刻	I_{h1}/A	I_{h2}/A	I_{h3}/A	I_{e1}/A	I_{e2}/A	I_{e3}/A
09:30	5.38	5.06	5.10	5.12	4.91	5.05
10:30	5.09	5.01	5.16	4.99	5.27	4.91
11:30	4.97	5.22	5.08	5.23	5.22	4.98
12:30	5.31	4.95	5.11	5.42	5.00	5.11
13:30	5.02	5.06	5.21	5.07	4.87	4.92
14:30	5.49	5.31	5.52	5.49	5.01	5.36
15:30	4.88	5.25	5.14	5.03	5.10	5.14
16:30	5.38	5.23	5.24	5.43	5.18	4.94

某日输电线路状态监测中心值班人员通过监控设备发现 110 kV 线路一 5 号交叉互联箱的环流在线检测结果异常,经线路巡检发现 5 号交叉互联箱已被水浸没,其他交叉互联箱处于正常状态。次日工作人员采用钳形电表现场检测线路一的首末两端护层环流,部分检测数据见表 6。

分析表 5 和表 6,正常工况下护层环流基本在 5 A 左右,首末两端环流比值接近于 1。缺陷下各相首端环流幅值均增大且基本相等,对照表 2 可判定缺陷类型为箱内进水,将各相首末两端环流比值分别代入式(13)一式(15),得缺陷箱号数在 4~7 之间。通过文中提出的基于首末两端环流比值的定位方法可及时确定缺陷箱号数范围,再进行线路故障巡检即可确定缺陷箱号数。

表 6 实测护层环流数据 2

Table 6 The actual circulating current data 2

时刻	I_{h1}/A	I_{h2}/A	I_{h3}/A	I_{e1}/A	I_{e2}/A	I_{e3}/A
09:30	25.01	24.67	25.53	14.71	6.53	34.97
10:30	19.37	17.98	22.15	10.19	5.05	27.01
11:30	21.96	19.55	20.63	13.73	4.95	25.79
12:30	10.98	14.12	12.54	5.94	4.09	16.50
13:30	19.12	19.43	17.17	9.33	5.92	20.44
14:30	16.31	19.82	17.31	8.32	5.71	22.19
15:30	17.19	17.18	21.11	9.19	4.17	26.06
16:30	15.13	14.80	17.12	7.84	3.65	22.53

5 结论

文中通过理论分析和仿真计算得到长电缆线路交叉互联箱缺陷下的护层环流,以线路首末两端环流特征对箱内缺陷进行识别和定位,并得到以下结论:

(1) 存在接地缺陷时,缺陷相环流增大;三相相序错误时,两相环流增大,另一相环流偏小;箱内进水时,各相护层环流均增大且基本相等。

(2) 采用指数函数对环流比值与缺陷箱号数的散点数据进行拟合,拟合度较高,所得参数归一性较好。

(3) 在确定缺陷类型后,将缺陷环流回路的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,该定位方法不受线芯电流和接地电阻变化的影响。

参考文献:

- [1] 曹京荣,徐超,陈杰,等. 防火带材对高压电缆载流量和温度监测影响研究[J]. 电力工程技术,2019,38(1):19-23.
CAO Jingying, XU Chao, CHEN Jie, et al. Influence of fireproof belt on ampacity and temperature measuring of high voltage cable [J]. Electric Power Engineering Technology, 2019, 38(1):19-23.
- [2] 郭卫,周松霖,王立,等. 电力电缆状态在线监测系统的设计及应用[J]. 高电压技术,2019,45(11):3459-3466.
GUO Wei, ZHOU Songlin, WANG Li, et al. Design and application of online monitoring system for electrical cable states [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11):3459-3466.
- [3] 袁婧,周承科,周文俊,等. 基于时间延迟理论的高压电缆巡检周期优化[J]. 高电压技术,2021,47(5):1640-1648.
YUAN Jing, ZHOU Chengke, ZHOU Wenjun, et al. Maintenance scheduling for HV cable based on the delay-time concept [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5):1640-1648.
- [4] 任广振,吴健儿,李翔翔,等. 高压电缆交联聚乙烯绝缘长期服役后的性能变化研究[J]. 绝缘材料,2020,53(7):51-56.
REN Guangzhen, WU Jianer, LI Xiangxiang, et al. Properties of high voltage cable XLPE insulation after long-term service [J].

- Insulating Materials, 2020, 53(7):51-56.
- [5] 尹丽菊,于毅,咸日常,等. 基于无监督学习的交叉互联电缆行波测距方法[J]. 智慧电力, 2021, 49(4):89-94, 100.
YIN Liju, YU Yi, XIAN Richang, et al. Traveling wave ranging method for cross-bonded cable based on unsupervised learning [J]. Smart Power, 2021, 49(4):89-94, 100.
- [6] 吴科,乔运松,熊刚,等. 一起同轴电缆发生局部放电的故障分析[J]. 电气技术, 2020, 21(6):83-87.
WU Ke, QIAO Yunsong, XIONG Gang, et al. Failure analysis of partial discharge of coaxial cable [J]. Electrical Engineering, 2020, 21(6):83-87.
- [7] 袁燕岭,周灏,董杰,等. 高压电力电缆护层电流在线监测及故障诊断技术[J]. 高电压技术, 2015, 41(4):1194-1203.
YUAN Yanling, ZHOU Hao, DONG Jie, et al. Sheath current in HV cable systems and its on-line monitoring for cable fault diagnosis [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(4):1194-1203.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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, 49.
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, 49.
- [11] 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.
- [12] 李根,王航,刘海康,等. 基于逻辑回归的高压电缆交叉互联接地系统缺陷分类识别方法[J]. 高电压技术, 2021, 47(10):3674-3683.
LI Gen, WANG Hang, LIU Haikang, et al. Classification and identification method of grounding system defects in cross-bonded HV cables based on logistic regression [J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10):3674-3683.
- [13] 齐伟强,任志刚,陈平,等. 220 kV 城市长电缆芯线及护层中操作过电压研究[J]. 电瓷避雷器, 2020, (6):95-101, 108.
QI Weiqiang, REN Zhigang, CHEN Ping, et al. Study on switching overvoltage in 220 kV city long cable core and sheath [J]. Insulators and Surge Arresters, 2020, (6):95-101, 108.
- [14] 高飞,黄磊,张蕾,等. 高压长距离分段电缆随公共交通隧道敷设电磁影响分析[J]. 高压电器, 2021, 57(12):156-161.
GAO Fei, HUANG Lei, ZHANG Lei, et al. Electromagnetic influence analysis of high voltage long distance segment cable laying in public transportation tunnel [J]. High Voltage Apparatus, 2021, 57(12):156-161.
- [15] DONG X, YANG Y, ZHOU C K, et al. Online monitoring and diagnosis of HV cable faults by sheath system currents [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(5):2281-2290.
- [16] 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.
- [17] 陈彦,徐欣,杨浩,等. 通过优化金属护层接地方式延长高压电缆段长可行性研究[J]. 武汉大学学报(工学版), 2020, 53(11):1014-1021.
CHEN Yan, XU Xin, YANG Hao, et al. Feasibility study on lengthening high voltage cable segment via optimization of metal sheath grounding [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2020, 53(11):1014-1021.
- [18] 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, 118.
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, 118.
- [19] 张重远,芮皓然,刘贺晨,等. 高压单芯电缆金属护套感应电压仿真计算及最大允许敷设长度研究[J]. 高压电器, 2020, 56(5):143-148.
ZHANG Zhongyuan, RUI Haoran, LIU Hechen, et al. Inducted voltage simulation of metal sheath and analysis on maximum allowable laying length for high voltage single-core cable [J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5):143-148.
- [20] 刁超健. 高速动车组保护接地性能分析及优化方法研究[D]. 成都:西南交通大学, 2019.
DIAO Chaojian. Research on performance analysis and optimization method of protective grounding of high speed EMU [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.
- [21] 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, 28.
ZHENG Dabai, LIU Zhe, WANG Fengkai. Analysis and solution of metal sheath ground circulating current in cross connection of high voltage cable [J]. Wire & Cable, 2022(1):19-25, 28.
- [22] 杨帆. 110 kV 电缆线路载流量关键技术研究[D]. 广州:华南理工大学, 2019.
YANG Fan. Research on the key technologies of ampacity in 110 kV cable line [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.

- [23] 云腾. 110 kV 高压 XLPE 电缆护层结构特性分析及优化设计研究[D]. 济南:山东大学,2020.
YUN Teng. Structure characteristics analysis and optimization design of 110 kV high-voltage XLPE cable shield layer[D]. Ji'nan:Shandong University,2020.
- [24] 周恺,杨亮,倪周,等. 基于小波变换的 XLPE 电缆介质损耗在线监测研究[J]. 智慧电力,2021,49(6):99-106.
ZHOU Kai,YANG Liang,NI Zhou,et al. Online monitoring of XLPE cable dielectric loss based on wavelet transform[J]. Smart Power,2021,49(6):99-106.
- [25] 杨隆凯,夏向阳,周正雄. 基于利萨如图形与温度 Pettitt 检测的高压电缆故障诊断方法[J]. 电力科学与工程,2021,37(7):34-41.

YANG Longkai,XIA Xiangyang,ZHOU Zhengxiong. Fault diagnosis method of high voltage cable based on Lissajous diagram and temperature Pettitt detection[J]. Electric Power Science and Engineering,2021,37(7):34-41.

作者简介:



方春华

方春华(1980),男,博士,副教授,研究方向为高电压绝缘与在线检测技术(E-mail:fang107531@163.com);

郭凯歌(1996),男,硕士在读,研究方向为高电压与绝缘技术;

方雯(1989),女,硕士,讲师,研究方向为高电压与绝缘技术。

Defect identification and location method of cable cross-bonded box based on head-end circulation

FANG Chunhua, GUO Kaige, FANG Wen, PU Ziheng, HU Dongsan, TAO Yuning

(School of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: It is difficult to identify and locate the defects quickly when the long cable line cross-bonded box has defects such as grounding, water inflow and three-phase sequence error. Aiming at three types of typical defects of cross-bonded box, a cross-bonded model of long cable lines is established to analyze the amplitude and phase change rule of circulation under the defects. Then, the curve fitting of the ratio of circulation at both ends and the scatter data of defect box number are carried out to obtain the defect location formulas. Finally, it is verified by an example. The results show that the circulation amplitude of the defective phase increases and the non-defective phase is normal when the ground is grounded inside the box. When the phase sequence is wrong, the amplitude of two-phase circulation increases obviously, and the amplitude of the other phase circulation is smaller. When the tank is filled with water, the circulation amplitude of each phase increases and is basically equal. The fitting degree of the positioning formula is about 0.96, and the range of defect box number can be determined through the example verification. The proposed method is not affected by the change of wire core current and ground resistance, and can provide reference for the defect identification and location of long cable line cross-bonded box.

Keywords: cable line; cross-bonded box; sheath circulation; the circulation ratio; defect identification; defect location

(编辑 陆海霞)