

高压电力电缆护层电流在线监测及故障诊断技术

袁燕岭¹, 周 灏², 董 杰¹, 史筱川², 穆 勇¹, 唐泽洋³, 周承科³

(1. 国网冀北电力有限公司唐山供电公司, 唐山 100053; 2. 北京伏佳安达电气技术有限公司, 北京 100044;
3. 武汉大学电气工程学院, 武汉 430072)

摘 要: 通过监测护层电流可及早发现高压电力电缆线路的潜在故障, 有效避免非计划性停电。为此, 提出了 1 种可用于诊断故障与非故障情况下 3 相交叉互联高压电力电缆中护层电流的研究方案。通过建立数学模型详细分析了 2 种典型的电缆故障, 并基于 1 条线路长度为 1.5 km、电压等级为 110 kV 的隧道电缆的仿真计算, 提出了 1 套适用于 12 种电缆故障的诊断及定位标准。仿真分析结果显示: 当电缆接地系统中存在开路故障时, 故障回路中的护层电流会降低; 而当电缆交叉互联箱进水或电缆接头内环氧预制件击穿时, 故障护层回路中将产生高于正常水平的护层电流值。基于故障仿真, 所提出的故障诊断标准可准确识别并定位指定的 3 种电缆故障: 接头松动导致护层开路、交叉互联箱进水和接头内环氧预制件击穿。仿真表明地电阻的大幅度变化会导致诊断标准发生变化。
关键词: 高压电力电缆; 状态监测; 护层电流; 仿真计算; 故障分析; 故障诊断

Sheath Current in HV Cable Systems and Its On-line Monitoring for Cable Fault Diagnosis

YUAN Yanling¹, ZHOU Hao², DONG Jie¹, SHI Xiaochuan², MU Yong¹, TANG Zeyang³, ZHOU Chengke³

(1. Tangshan Power Supply Company, State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd., Tangshan 100053, China;
2. Beijing Fujiaanda Electrical Technology Co., Ltd., Beijing 100044, China;
3. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Cable sheath currents can be utilized to identify cable faults at an early stage and avoid unplanned power outages. We put forward a methodology to analyze the sheath currents in three-phase cross-bonded cable system with cable link boxes under either normal or fault conditions. Firstly, we established a numerical model to analyze two selected joint faults in detail. Then, on the basis of the calculation of a 1.5 km long 110 kV underground power cable system installed in a cable tunnel, we proposed a set of criteria for the fault diagnosis and localization of 12 kinds of faults that could significantly cause changes in sheath currents. The simulation results indicate that the sheath current decreases when the open-circuit fault occurs in the cable sheath loop, however, in the case of flooded cable link box or insulation breakdown between sheaths at both sides of a cable joint, the sheath current gets higher than its normal. According to the criteria, it is able to determine and locate three kinds of cable faults, namely, sheath open circuit induced by loosen joints, flooded cable link box, and prefabricated epoxy component breakdown in joints, though the criteria may vary due to large changes in earth resistance.

Key words: high voltage power cable; condition monitoring; sheath current; simulation; fault analysis; fault diagnosis

0 引言

随着我国城市化进程的加快, 高压电力电缆在输电系统中的作用越来越重要^[1]。然而, 电力电缆在运行中因受多方面因素影响而经常出现故障, 包括施工人员在安装过程中的不当操作、水分浸入、外力破坏导致的机械损伤^[2]、过电压或过电流、电

缆服役年限增长导致的绝缘老化、腐蚀^[3]等。

导致电缆故障的初始原因大致可以归类为 6 种, 包括运行环境因素、外力破坏、安装工艺不良、制造工艺或设计缺陷、运行维护人员操作失误以及电缆服役年限增长引起的老化^[2-5]。

电缆故障发生时的表现形式通常可分为以下 3 种类型^[6]: ①电缆中的金属导体断路; ②电缆导体对导体短路或导体对地短路; ③绝缘电阻严重下降。

电缆中金属导体断路具体表现为电缆部件中的导体失去传输电流的能力, 即电缆中的 1 根或多

基金资助项目: 中国-苏格兰博士生教育及科研基金(留金欧[2010]6044)。
Project supported by Scotland-China Higher Education Research Partnership for Ph.D. Studies([2010]6044).

根导体由于机械损伤等原因而导致线路中出现断路故障。在单芯电缆中, 短路故障一般表现为由于绝缘击穿而导致的导体对地短路; 在多芯电缆中, 由于绝缘击穿而导致的短路故障除导体对地短路外, 还可能是导体对导体之间的短路。另外 1 种常见的故障表现形式是绝缘电阻下降, 它包括高阻故障和低阻故障。高阻故障会导致泄漏电流增大, 但不会引起继电保护装置动作。相反, 低阻故障存在于电缆绝缘时, 线路电流增大会导致继电保护装置动作。目前绝缘电阻下降的主要原因是绝缘局部缺陷^[5]。

电缆故障机理是指电缆故障从初始原因发展到最终故障的物理过程。在电力电缆中, 故障机理主要可以分为以下几种类型: ①在气隙或绝缘破损处等局部电场强度(简称场强)集中的地方发生的局部放电(简称局放)^[7]; ②水分浸入导致的水树或电树^[8-9]; ③杂质导致的沿面放电; ④过负荷或护层电流过高导致绝缘的热退化; ⑤绝缘老化或水树引起的介质损耗上升。

在电缆系统中, 由于大多数故障如水树、局放等都会导致绝缘击穿(永久或瞬间击穿)^[2], 所以电缆绝缘是电缆中最容易出现问题的部分。统计资料表明, 大多数的电缆绝缘缺陷可能会持续数年才会最终导致故障^[10]。提升电缆运行可靠性并延长电缆服役寿命的关键是在维修或替换电力电缆之前发现并确定其中缺陷点的劣化程度。因此电缆状态监测及状态检修(condition based maintenance)被广泛地应用于电力设备的维护中。目前局放监测、绝缘电阻测量、介损检测等电缆状态监测手段已经广泛应用于实际电缆故障诊断及定位^[11-12]。

根据电缆现场运行维护经验, 众多事故在电缆故障发生前有引起电缆护层电流上升的现象, 例如交叉互联接地箱进水、电缆本体或附件金属护套发生腐蚀、外力破坏导致的外护套破损以及环氧预制件击穿等。电缆护层电流过高会引起电缆升温, 从而导致其护套上产生大量附加损耗, 降低电缆载流量, 缩短电缆使用寿命, 甚至热击穿^[13]。虽然工程经验表明护层电流的监测在电缆监测中能起到很重要的作用, 但到目前为止只有少数研究人员将护层电流的监测作为电缆状态监测的 1 个重要手段。

当高压电缆的线路长度超过 1.2 km 时, 通常情况下线路会采用交叉互联的方式来限制电缆金属护层中的感应电压, 并降低其中流过的护层电流, 从而减少电能损耗。电力电缆交叉互联是 1 种通过相

邻单元段电缆的金属护套或屏蔽层交叉相连, 使每个金属护套或屏蔽层的连续回路依次包围三相导体的特殊互联方式^[14]。一些研究人员已经针对交叉互联方式下的电缆护层电流提出了相应的数学模型并进行了理论计算。文献[15]中介绍了交叉互联电缆护层中感应电压的正序、负序和零序部分的计算方法。文献[16]提出了 1 种可计算护层感应电压所产生的护层电流的数学模型。结果表明, 该模型计算结果与实际检测结果相符, 可用于实际检测。其后的分析还表明, 误差可能是由邻近电缆之间的相互影响、电缆内部的升温以及电容电流的影响而产生。文献[17-18]中验证了平行敷设三相交叉互联电缆中的护层电流的幅值高于等边三角形敷设的三相电缆。除了敷设方式之外, 电缆分段长度不一致、电缆负荷电流以及电缆间距都是电缆中护层电流幅值的影响因素。文献[19]针对三相电缆的敷设方式对护层电流幅值的影响进行了探讨。文献[20]建立了 1 个可用于计算电缆护层中感应电流与电容电流的护层电流计算模型。其中, 感应电流的幅值不仅包括由负荷电流感应产生的电流, 而且包括感应电流本身对护层电流的影响。也就是说, 通过叠加的算法, 总感应电流应为负荷电流和感应电流本身产生的感应电流之和。仿真结果证明, 当三相电缆分段长度相等而导致负荷电流产生的感应电流幅值较低时, 感应电流本身产生的电流幅值可以忽略不计。上述研究成果虽然都对护层电流的计算进行了分析, 但并未研究如何对故障情况下的护层电流大小进行仿真分析。

护层电流检测可作为早期故障检测的 1 种手段来诊断电缆线路中存在的故障并进行定位。本文首先通过三相交叉互联电缆模型对正常情况下的护层电流进行了仿真分析; 然后对于 3 种选定的电缆故障类型, 通过等效电路图对其故障状态下的护层电流理论值进行了仿真分析; 最后提出了 1 套可通过护层电流检测的电缆故障诊断及定位标准。

1 三相交叉互联电缆中护层电流的理论计算

图 1 展示了 1 个交叉互联循环段中经过交叉换位连接的电缆护层示意图。图 1 中: I_{m1} 、 I_{m2} 、 I_{m3} 表示 3 个回路中流过的因护层感应电压而产生的感应电流值, 它们所流过的回路分别在图中用箭头进行标识; A_1 、 A_2 、 A_3 、 B_1 、 B_2 、 B_3 、 C_1 、 C_2 、 C_3 表示 1 个交叉互联循环段中 9 个电缆段的金属护层

的标号; J_1 、 J_2 、 J_3 、 J_4 表示4组接头的位置, 每组接头处安装有3个电缆接头, 分别连接A、B、C三相电缆; R_e 表示地电阻。

科研人员对不同负荷情况下三相交叉互联电缆中的护层电流已经进行了仿真和研究^[16-17,20]。根据文献[20]中的验证结果, 其中的护层电流模型可用于仿真非故障情况下三相交叉互联电缆中的护层电流。基于此模型, 图2给出了三相交叉互联电缆的等效电路图。图2中: U_{a1} 、 U_{a2} 、 U_{a3} 、 U_{b1} 、 U_{b2} 、 U_{b3} 、 U_{c1} 、 U_{c2} 、 U_{c3} 表示各电缆段中的感应电压; Z_{a1} 、 Z_{a2} 、 Z_{a3} 、 Z_{b1} 、 Z_{b2} 、 Z_{b3} 、 Z_{c1} 、 Z_{c2} 、 Z_{c3} 表示各电缆段的阻抗; R_e 表示地电阻。

根据图2中的等效电路图, 3条护层回路中的感应电流可以通过式(1)~式(3)计算:

$$I_{m1} = \frac{U_{a1} + U_{c2} + U_{b3}}{Z_{a1} + Z_{c2} + Z_{b3} + R_e} \quad (1)$$

$$I_{m2} = \frac{U_{b1} + U_{a2} + U_{c3}}{Z_{b1} + Z_{a2} + Z_{c3} + R_e} \quad (2)$$

$$I_{m3} = \frac{U_{c1} + U_{b2} + U_{a3}}{Z_{c1} + Z_{b2} + Z_{a3} + R_e} \quad (3)$$

另外, 电缆的线芯和金属护层间的电容特性导致护层和大地组成的闭合回路中产生电容电流, 该电容电流 I_c 可用式(4)计算得出

$$I_c = j\omega CU \quad (4)$$

式中: ωC 代表各段电缆的电容导纳; U 表示电缆在正常工作下的工作电压。本文理论计算中所用到的电缆原始参数列于表1。对于本文表1中电压等级为110 kV的电缆来说, 电容值约为213 pF/m。因此, 每500 m长的电缆段大约产生3.68 A的电容电流。

电容电流示意图如图3所示。假设每段电缆产生的电容电流都在该段电缆的中点, 如图3(a)中所示的K点, 那么电容电流 I_c 会从K点流向2个方向, 即图3(a)中的KM和KN方向。2个方向的电容电流分量大小则取决于该段回路中阻抗的大小, 如图3(b)所示。

分析图3(b)可知, 2个电容电流分量 I_{cKM} 、 I_{cKN} 分别可以通过下列等式计算:

$$I_{cKM} = \frac{Z_{KN}}{Z_{KM} + Z_{KN}} I_c \quad (5)$$

$$I_{cKN} = \frac{Z_{KM}}{Z_{KM} + Z_{KN}} I_c \quad (6)$$

电缆的护层电流是护层中流过的感应电流和电容电流之和。电容电流只受电缆运行电压和分段

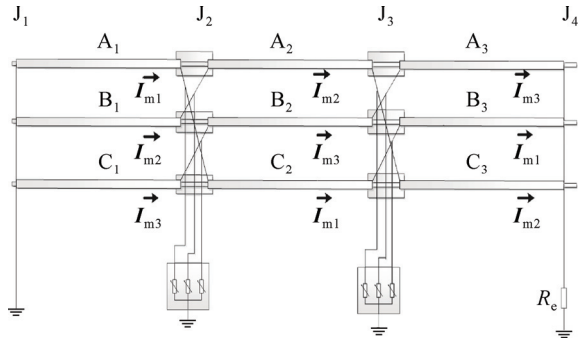


图1 三相交叉互联电缆示意图

Fig.1 Schematic diagram of three-phase cross-bonded cable

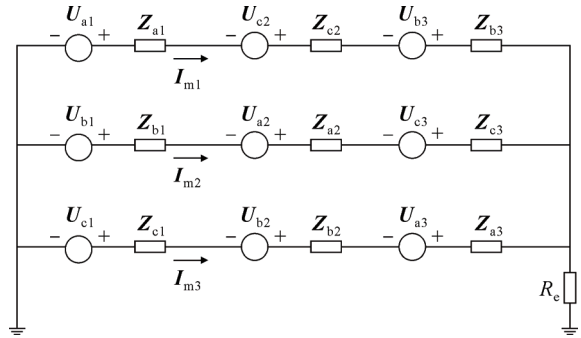


图2 三相交叉互联电缆等效电路图

Fig.2 Equivalent circuit diagram of three-phase cross-bonded cable

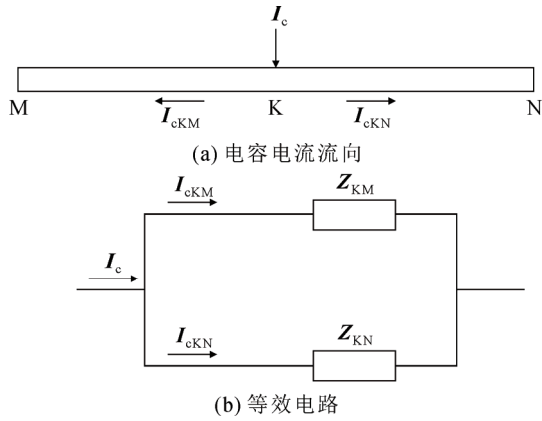


图3 电容电流示意图

Fig.3 Schematic diagram of capacitive current

表1 电缆参数

Table 1 Parameters of cable

参数	数值	参数	数值
三相电缆线芯直径/mm	38.9	绝缘厚度/mm	16
绝缘相对电容率	2.3	AB 两相间距/m	0.27
金属护层外径/mm	99.6	BC 两相间距/m	0.27
金属护层内径/mm	97.3	AC 两相间距/m	0.54
护层材料温度系数/(10 ⁻⁹ ·℃ ⁻¹)	4.03	环境温度/℃	35
金属护层电阻率/(nΩ·m ⁻¹)	2.84	电压频率/Hz	50

长度的影响, 因此在下文分析的故障中, 其电缆运行电压和分段长度保持不变, 电容电流也保持不变。

2 故障情况下护层电流的分析计算

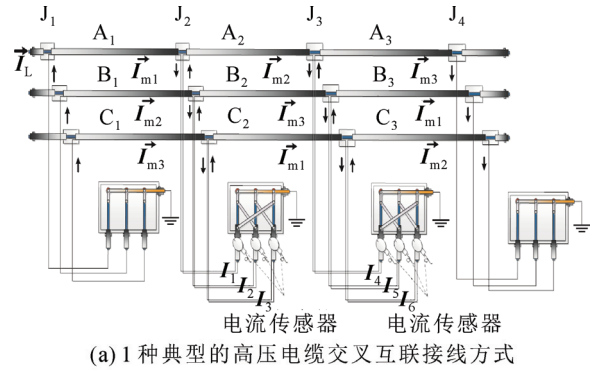
2.1 交叉互联接线方式下的护层电流

图 4(a)给出了 1 种常见的电缆交叉互联的接线方式。在 J_2 、 J_3 接头处分别安装了交叉互联接地箱和同轴电缆, 用来实现三相电缆护层的交叉换位。同轴电缆是由 2 根同轴心且相互绝缘的圆柱形金属导体所构成的基本单元(同轴对), 通常被用作交叉互联箱和电缆接头的连接线。使用同轴电缆的目的是为了减小连接线的波阻抗, 以降低冲击电流沿保护器连接线的压降^[21]。同时, 使用同轴电缆能够使此连接线具有更加良好的防水性能。图 4(a)中: I_L 为负荷电流; 6 个可用于检测护层电流 I_1 、 I_2 、 I_3 、 I_4 、 I_5 、 I_6 的工频电流传感器分别安装在 2 个交叉互联箱的进线口处。电容电流在该图中并未标注。图 4(b) 显示了交叉互联接地箱的内部结构。2 个相邻电缆段的护层分别通过同轴电缆的内外导体层, 被接入到交叉互联箱内部, 并通过金属片实现交叉换位。对于这种实际接线情况下的护层电流的分析, 尚未见公开发表的文献进行过报道。

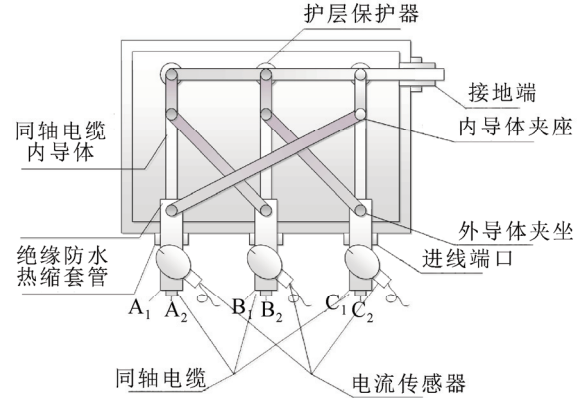
电容电流始终存在于每 1 条运行的电缆中。1 个交叉互联循环段中的各电缆分段的电容电流分布如图 5 所示。图 5 中: I_{c1} 、 I_{c2} 、 I_{c3} 、 I_{c4} 、 I_{c5} 、 I_{c6} 表示 6 个电流传感器所测得的电容电流。

以电缆段 A_1 为例, 如前文所述, 对 110 kV 的电缆, 每 500 m 长的电缆段大约产生 3.68 A 的电容电流 I_{ca1} 。电容电流 I_{ca1} 产生的左(L)、右(R)这 2 个方向的分量 I_{ca1L} 、 I_{ca1R} 分别流经的回路阻抗为 $Z_{ca1L}=0.5Z_{a1}=0.049\ \Omega$ 、 $Z_{ca1R}=0.5Z_{a1}+Z_{c2}+Z_{b3}=0.224\ \Omega$ 。因此, A_1 段电缆所产生的电容电流 I_{ca1} 被分成了以下 2 个部分: 向左(J_1)方向流动的分量 $I_{ca1L}=3.01\text{ A}$ 和向右(J_4)方向流动的分量 $I_{ca1R}=0.67\text{ A}$ 。同理可推导出其他 8 段电缆中产生的 2 个方向的电容电流分量。由于传感器安装在同轴电缆上, 所以电容电流的测量值应该是 3 个电容电流分量之和, 其数值可通过以下计算式获得

$$\begin{cases} I_{c1} = I_{ca1R} + I_{ca2L} + I_{cc3L}; & I_{c2} = I_{cb1R} + I_{cb2L} + I_{ca3L} \\ I_{c3} = I_{cc1R} + I_{cc2L} + I_{cb3L}; & I_{c4} = I_{cb1R} + I_{ca2R} + I_{ca3L} \\ I_{c5} = I_{cc1R} + I_{cc2R} + I_{cb3L}; & I_{c6} = I_{ca1R} + I_{cc2R} + I_{cc3L} \end{cases} \quad (7)$$



(a) 1 种典型的高压电缆交叉互联接线方式



(b) 交叉互联箱内部结构及交叉互联接线示意图 (J_2 处交叉互联箱)

图 4 交叉互联箱接线方式及结构

Fig.4 Connection mode and structure of cross-bonded box

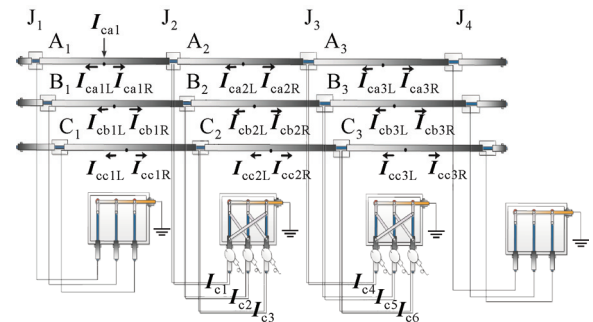


图 5 电缆护层中电容电流示意图(感应电流在图中没有标注)

Fig.5 Schematic diagram of the capacitive current in cable sheath(the induced current is not shown in the figure)

在仿真过程中, 假设各电缆段具有相同的长度及工作电压, 因此 6 个测量点处的电容电流均为 2.21 A。

综上分析, 测量的护层电流应为感应电流与电容电流之和。结合图 4(a)和图 5, 6 个测量点处测到的护层电流理论值为(I_{m1} 、 I_{m2} 、 I_{m3} 所表示的感应电流在图 4(a)中标识)

$$\begin{cases} I_1 = I_{m1} + I_{m2} + I_{c1}; & I_2 = I_{m2} + I_{m3} + I_{c2} \\ I_3 = I_{m3} + I_{m1} + I_{c3}; & I_4 = I_{m2} + I_{m3} + I_{c4} \\ I_5 = I_{m3} + I_{m1} + I_{c5}; & I_6 = I_{m1} + I_{m2} + I_{c6} \end{cases} \quad (8)$$

2.2 接头处连接松动导致的开路故障

接头处连接松动是1种交叉互联电缆系统中常见的故障情况,其原因可能是由于安装过程中操作不当或者外力破坏而引起。这种情况下由于原本正常情况下的电缆回路被断开而无法形成闭合回路,所以故障段的所在护层回路电流为0。仍然以A₁段电缆为例,当A₁段中出现开路故障时,感应电流 I_{m1} 的幅值降至0。则各测量点处的护层电流值应为

$$\begin{cases} I_1 = I_{m2}; & I_2 = I_{m2} + I_{m3}; & I_3 = I_{m3} \\ I_4 = I_{m2} + I_{m3}; & I_5 = I_{m3}; & I_6 = I_{m2} \end{cases} \quad (9)$$

2.3 交叉互联箱进水

在我国南方地区,由于夏天雨水较多,所以安装在电缆隧道内的高压电缆及其附件可能出现被积水淹没的现象。当交叉互联箱的外壳出现破损时,周围的污水会进入箱体内部,淹没护层保护器,从而导致短路现象。根据水体成分的不同,其电阻也有较大差别^[22-23]。然而由于污水的电阻率低,且箱内外水体相连,使得水体的面积远远大于其深度,所以此时水电阻可忽略不计。在这种情况下,若保护器被水完全淹没,则会导致交叉互联箱中出现接地的情况,相当于护层两端直接接地,从而导致其中的感应电流大幅上升^[24]。以J₂接头处的交叉互联箱被水淹没为例,对6个测量点处的护层电流进行了理论计算。J₂接头处交叉互联箱被水淹没如图6所示。图6中: I_{x1} 、 I_{x2} 、 I_{x3} 、 I_{x4} 、 I_{x5} 、 I_{x6} 代表6个新形成的故障回路中的感应电流。

当J₂接头处的交叉互联箱被水淹没时,箱内的导体出现直接接地,因此原本的3条护层回路变为6条故障情况下的回路。此时的6个测量点处的护层电流可以通过下列等式计算

$$\begin{cases} I_1 = I_{x1} + I_{x4}; & I_2 = I_{x2} + I_{x5}; & I_3 = I_{x3} + I_{x6} \\ I_4 = I_{x4} + I_{x6}; & I_5 = I_{x5} + I_{x6}; & I_6 = I_{x6} + I_{x4} \end{cases} \quad (10)$$

根据安培定律及图6(b)中的等效电路,故障情况下回路中的感应电流为

$$\begin{cases} I_{x1} = \frac{U_{a1}}{Z_{a1} + R_e}; & I_{x2} = \frac{U_{b1}}{Z_{b1} + R_e} \\ I_{x3} = \frac{U_{c1}}{Z_{c1} + R_e}; & I_{x4} = \frac{U_{a2} + U_{c3}}{Z_{a2} + Z_{c3} + R_e} \\ I_{x5} = \frac{U_{b2} + U_{a3}}{Z_{b2} + Z_{a3} + R_e}; & I_{x6} = \frac{U_{c2} + U_{a3}}{Z_{c2} + Z_{a3} + R_e} \end{cases} \quad (11)$$

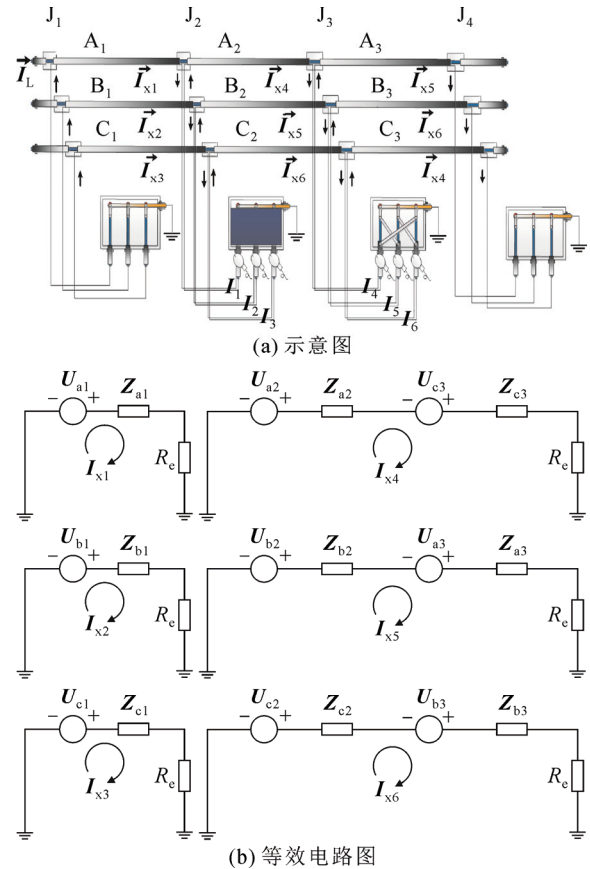


图6 J₂接头处交叉互联箱被水淹没

Fig.6 Cross-bonded box which locates at the joint J₂ is flooded

2.4 电缆接头环氧预制件击穿

若电缆接头中环氧预制件被击穿,则一方面将导致其左右两侧的金属护层相连,从而破坏交叉互联系统,使得运行中的护层电流迅速上升;另一方面增大的护层电流将引起接头内环氧预制件发热。由于接头内散热环境差,所以环氧预制件的长期发热也给接头的安全运行带来隐患^[25]。当某个接头处的环氧预制件被击穿时,2条护层回路中的感应电流将受到影响,而另1条回路中的电流则保持不变。以J₂接头处A相接头环氧预制件击穿为例,采用回路电流法对故障回路中的护层电流进行分析,可以推导环氧预制件击穿故障对护层电流造成的影响。其他接头处的故障分析与案例采用相同方法,即可推导出相关计算式。图7(a)是故障情况下的电缆线路示意图。故障点已在图7(a)中标识出来。考虑J₂接头处A相接头环氧预制件击穿时原护层回路发生变化,所以会产生新的故障回路。为了方便说明,图7(a)对故障情况下线路中的所有护层回路进行了重新标识。图7(b)给出了该故障情况下的等效电路图。

根据等效电路图, 回路电流 I_{f1} 、 I_{f2} 、 I_{f3} 可通过以下等式计算:

$$I_{f1}(Z_{b1} + Z_{a2} + Z_{c3} + R_e) - I_{f2}Z_{b1} - I_{f3}(Z_{a2} + Z_{c3}) = U_{b1} + U_{a2} + U_{c3} \quad (12)$$

$$I_{f2}(Z_{a1} + Z_{b1}) - I_{f1}Z_{b1} = U_{a1} - U_{b1} \quad (13)$$

$$I_{f3}(Z_{c2} + Z_{b3} + Z_{a2} + Z_{c3}) - I_{f1}(Z_{a2} + Z_{c3}) = U_{c2} + U_{b3} - U_{a2} - U_{c3} \quad (14)$$

故障回路中流过的感应电流为

$$\begin{cases} I_{x1} = I_{f2}; I_{x2} = I_{f3} \\ I_{x3} = I_{f1} - I_{f2}; I_{x4} = I_{f1} - I_{f3} \end{cases} \quad (15)$$

从图 7 中可以推出, 6 个测量点处测得的护层电流分别为

$$\begin{cases} I_1 = I_{x1} + I_{x4}; I_2 = I_{x3} + I_{m3} \\ I_3 = I_{m3} + I_{x2}; I_4 = I_{x4} + I_{m3} \\ I_5 = I_{m3} + I_{x2}; I_6 = I_{x2} + I_{x4} \end{cases} \quad (16)$$

3 基于电缆护层电流分析的故障诊断及定位标准

选取 1 条线路长度为 1.5 km、电压等级为 110 kV 电缆线路作为仿真对象。通过对实际数据的仿真, 可以更加清晰地分析非故障及故障情况下护层电流的变化情况。电缆原始数据由表 1 中给出。根据式(8), 可得正常情况下 6 个测量点处的护层电流测量值分别为 $I_1=19.9$ A、 $I_2=22.9$ A、 $I_3=23.6$ A、 $I_4=20.0$ A、 $I_5=23.7$ A、 $I_6=22.7$ A。

在仿真的过程中, 对以下数据作了假设:

1) 三相负荷电流为平衡电流, 即三相的负荷电流相等。根据几天的连续观察, 取中间值 162 A 作为仿真的负荷电流值。

2) 1 个交叉互联循环段中的 3 个电缆段长度相等, 均为 500 m。

3) 为了仿真实际情况下安装回流线与否的情况, 后面分别讨论了 2 种地电阻值的情况: ①是 0.1Ω 的地电阻值, 用来仿真安装有回流线的情况; ②是 4Ω 的地电阻值, 用来仿真未安装回流线的情况。

在系统实际运行中, 高压电缆三相负荷电流可能并不完全相同, 但差别不大, 可以忽略其影响。另 1 个影响因素就是 3 个电缆段的长度, 此处得到的数据是完全相等, 然而, 在实际工程中, 3 个电缆段的长度不一定完全相等。

根据电缆数据对表 2 中所列举的 12 种典型的

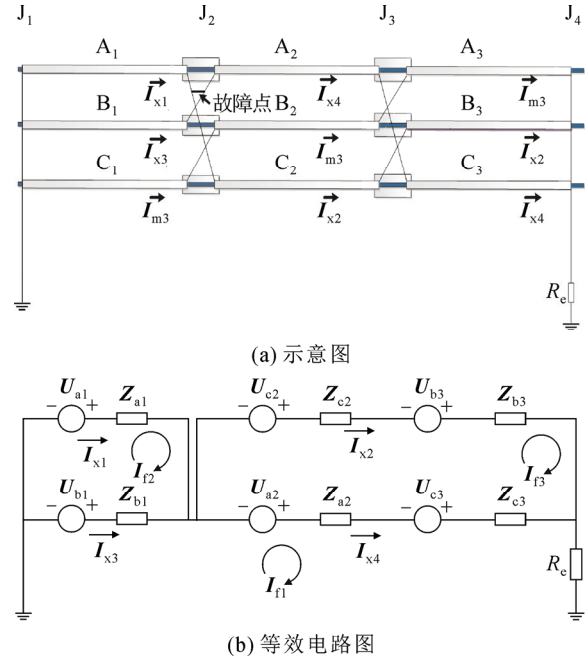


图 7 J_2 接头处 A 相接头环氧预制件击穿

Fig.7 Epoxy prefabricated of phase A which locates at the joint J_2 is breakdown

表 2 可通过护层电流检测出的故障

Table 2 Faults which can be detected from sheath current	
故障种类序号	故障原因
1	护层回路 A_1 - C_2 - B_3 中任意位置出现开路故障
2	护层回路 B_1 - A_2 - C_3 中任意位置出现开路故障
3	护层回路 C_1 - B_2 - A_3 中任意位置出现开路故障
4	J_2 接头处交叉互联接地箱进水
5	J_3 接头处交叉互联接地箱进水
6	J_2 、 J_3 接头处交叉互联接地箱进水
7	J_2 接头处 A 相接头击穿
8	J_2 接头处 B 相接头击穿
9	J_2 接头处 C 相接头击穿
10	J_3 接头处 A 相接头击穿
11	J_3 接头处 B 相接头击穿
12	J_3 接头处 C 相接头击穿

电缆故障进行仿真分析, 可以提出相应的故障诊断依据。这 12 种故障包含了电缆隧道中的典型故障。而通常情况下, 电缆隧道敷设方式因成本昂贵而只适用于关键的电缆线路。

图 8(a)~图 8(f)给出了故障情况下 6 个测量点处护层电流测量值 $I_i(i=1, 2, \dots, 6)$ 与负荷电流 I_L 的比值图。图 9(a)~图 9(c)则给出了测量点处护层电流间 (I_1/I_6 、 I_2/I_4 、 I_3/I_5) 的比值图。非故障情况下的预期比值均用 1 条直线标出以作为参考。通过故障情况下这些比值与预期比值的比较, 可以诊断出电缆的健康状态。

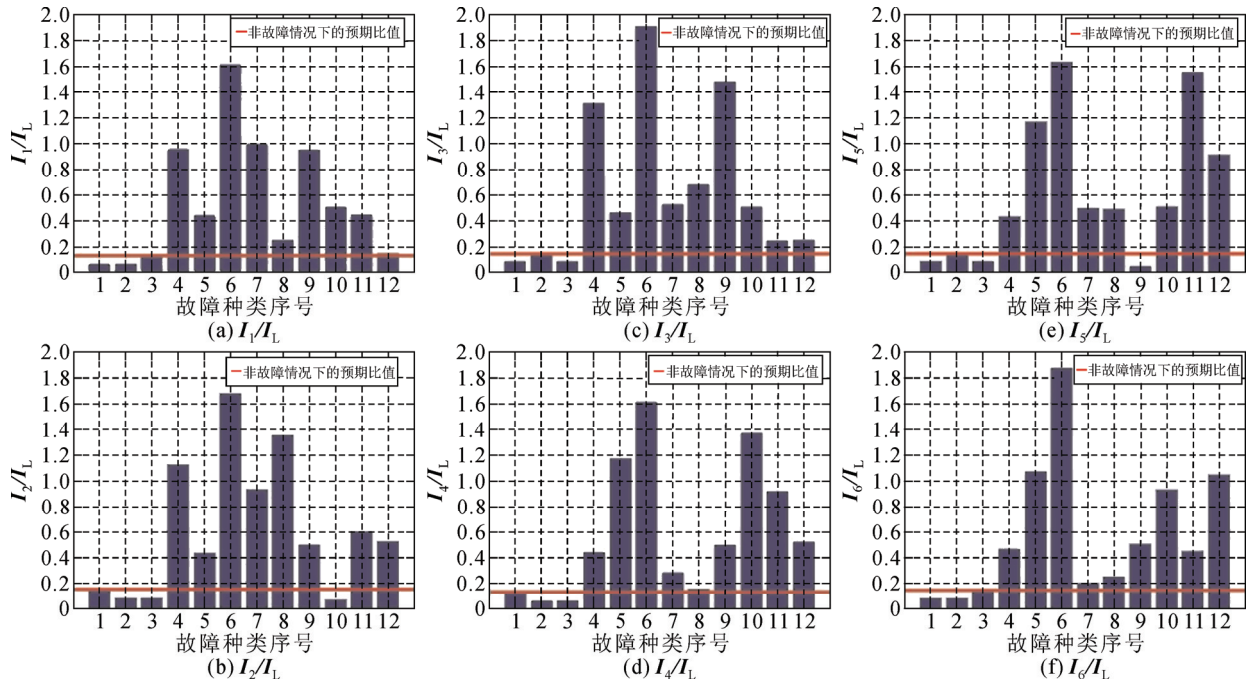
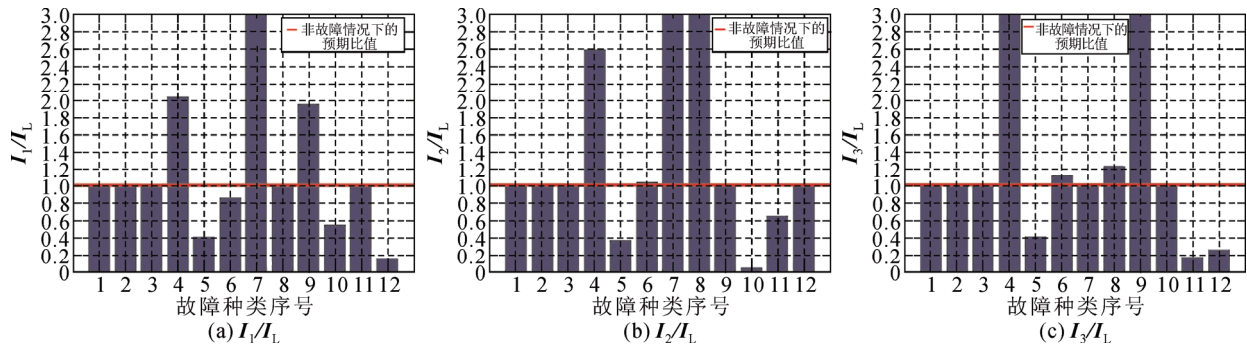


图8 地电阻为0.1 Ω时故障护层电流值与负荷电流值的比值

Fig.8 Ratio of sheath current and load current when the ground resistance is 0.1 Ω

图9 地电阻为0.1 Ω时 I_1/I_6 、 I_2/I_4 、 I_3/I_5 的比值Fig. 9 Ratio of I_1/I_6 , I_2/I_4 , I_3/I_5 when the ground resistance is 0.1 Ω

为了方便说明,图8和图9中的比值用下列等式(其中, $i=1, 2, \dots, 6$)表示

$$\begin{cases} T_i = I_i / I_L; & K_1 = I_1 / I_6 \\ K_2 = I_2 / I_4; & K_3 = I_3 / I_5 \end{cases} \quad (17)$$

假设 T_{1N} 、 T_{2N} 、 T_{3N} 、 T_{4N} 、 T_{5N} 、 T_{6N} 代表非故障情况下护层电流与负荷电流的比值, K_{1N} 、 K_{2N} 、 K_{3N} 表示非故障情况下 K_1 、 K_2 、 K_3 的值, 则故障情况下这些比值的变化如表3所示。根据表3给出的数据, 利用电缆故障诊断判据可以清楚地识别表中所列举的12种电缆故障。在非故障情况下, 表中的数据应当全部为0。而当电缆发生故障时, 这个数值可能会上升到非故障情况下的5倍以上。考虑到实际工程中电缆隧道内的环境条件如湿度变化等、以及其他复杂工况的影响, 在表3中仿真数值的基

础上加上30%的浮动可以使得这套诊断标准能够更加准确地检测电缆中的故障, 减少误报警的概率。分析表明, 如果这个浮动的范围上升到40%, 诊断标准就可能因条件冲突而出现错误。变更后的诊断标准如表4所示。为了便于使用, 表3中的参数改用下列符号来表示

$$\begin{cases} t_1 = |(T_1 - T_{1N}) / T_{1N}|; & t_2 = |(T_2 - T_{2N}) / T_{2N}| \\ t_3 = |(T_3 - T_{3N}) / T_{3N}|; & t_4 = |(T_4 - T_{4N}) / T_{4N}| \\ t_5 = |(T_5 - T_{5N}) / T_{5N}|; & t_6 = |(T_6 - T_{6N}) / T_{6N}| \\ k_1 = |(K_1 - K_{1N}) / K_{1N}|; & k_2 = |(K_2 - K_{2N}) / K_{2N}| \\ k_3 = |(K_3 - K_{3N}) / K_{3N}| \end{cases} \quad (18)$$

值得注意的是, 表4中所提出的标准适用于满足前文中所列假设条件下的隧道电缆, 不一定适用于所有情况。但其他隧道可以采用相同的方法, 并

表 3 护层电流测量比值与预期比值的比较

Table 3 Comparison of measured ratios and the expected ratios of sheath current

故障种类 序号	$ (T_1-T_{1N})/T_{1N} $	$ (T_2-T_{2N})/T_{2N} $	$ (T_3-T_{3N})/T_{3N} $	$ (T_4-T_{4N})/T_{4N} $	$ (T_5-T_{5N})/T_{5N} $	$ (T_6-T_{6N})/T_{6N} $	$ (K_1-K_{1N})/K_{1N} $	$ (K_2-K_{2N})/K_{2N} $	$ (K_3-K_{3N})/K_{3N} $
1	0.55	0	0.46	0	0.46	0.48	0.13	0	0.01
2	0.55	0.48	0	0.55	0	0.48	0.13	0.15	0
3	0	0.48	0.46	0.55	0.46	0	0	0.15	0.01
4	6.75	6.94	7.98	2.52	1.94	2.30	1.32	1.25	2.03
5	2.53	2.05	2.17	8.49	6.94	6.61	0.54	0.68	0.59
6	12.1	10.9	12.1	12.1	10.1	12.4	0.02	0.08	0.11
7	7.06	5.56	2.62	1.24	2.36	0.37	5.17	1.93	0.01
8	1.00	8.53	3.65	0.23	2.35	0.76	0.14	6.31	0.22
9	6.68	2.48	9.16	2.99	0.72	2.55	1.22	0.11	30.0
10	3.05	0.58	2.47	10.1	2.44	5.62	0.37	0.97	0.01
11	2.60	3.20	0.67	6.42	9.58	2.16	0.14	0.45	0.83
12	0.19	2.70	0.73	3.24	5.21	6.43	0.82	0.11	0.75

表 4 电缆故障诊断及定位标准

Table 4 Standard of cable fault diagnose and localization

比值范围									故障原因	故障位置
t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	k_1	k_2	k_3		
<0.3	<0.3	<0.3	>0.3	<0.3	>0.3	<0.3	<0.3	<0.3	接头处连接松动导致的开路	护层 A ₁ -C ₂ -B ₃ 所组成的回路
<0.3	<0.3	>0.3	<0.3	>0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	接头处连接松动导致的开路	护层 B ₁ -A ₂ -C ₃ 所组成的回路
>0.3	<0.3	<0.3	<0.3	<0.3	>0.3	<0.3	<0.3	<0.3	接头处连接松动导致的开路	护层 C ₁ -B ₂ -A ₃ 所组成的回路
>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>1	>1	>1	交叉互联箱进水	J ₂ 处交叉互联箱
>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	<1	<1	<1	交叉互联箱进水	J ₃ 处交叉互联箱
>10	>10	>10	>10	>10	>10	<0.3	<0.3	<0.3	交叉互联箱进水	J ₂ 、J ₃ 处交叉互联箱
>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>1		<0.3	电缆接头环氧预制件击穿	J ₂ 接头处 A 相电缆
>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	<0.3	>1		电缆接头环氧预制件击穿	J ₂ 接头处 B 相电缆
>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	<0.3		>1	电缆接头环氧预制件击穿	J ₂ 接头处 C 相电缆
>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>1	<0.3		电缆接头环氧预制件击穿	J ₂ 接头处 A 相电缆
>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3		<0.3	>1	电缆接头环氧预制件击穿	J ₂ 接头处 B 相电缆
>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	0.3~1	0.3~1	<0.3	电缆接头环氧预制件击穿	J ₃ 接头处 A 相电缆
>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	0.3~1	<0.3	0.3~1	电缆接头环氧预制件击穿	J ₃ 接头处 B 相电缆
>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	>0.3	<0.3	0.3~1	0.3~1	电缆接头环氧预制件击穿	J ₃ 接头处 C 相电缆

通过修改参数来提出 1 套适用于其本身的故障诊断及定位标准。例如, 当电缆系统未安装回流线时, 护层回路经过大地形成闭合回路, 这就造成了回路中电阻值的大幅升高。当地电阻为 4 Ω 时, 对应故障下的感应电流值将受到很大的影响。图 10 和图 11 是地电阻为 4 Ω 时护层电流的比值图。

同理, 可以推导出适用于这种隧道条件的故障诊断及定位标准。

4 结论

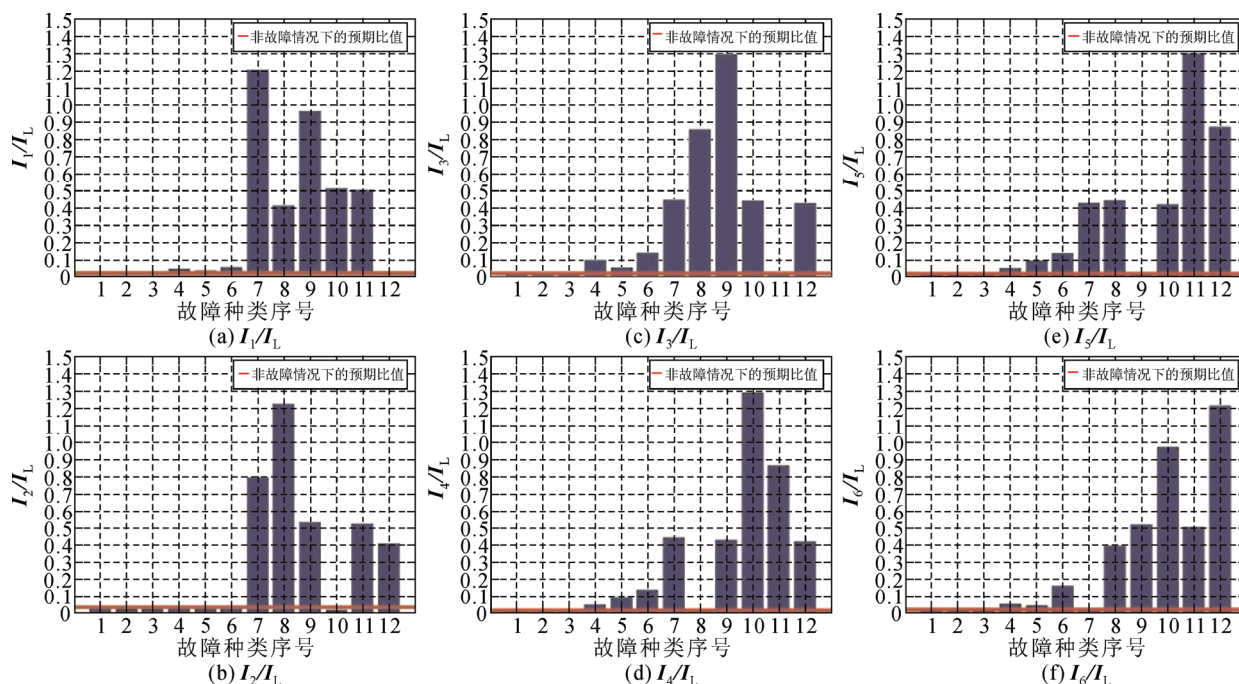
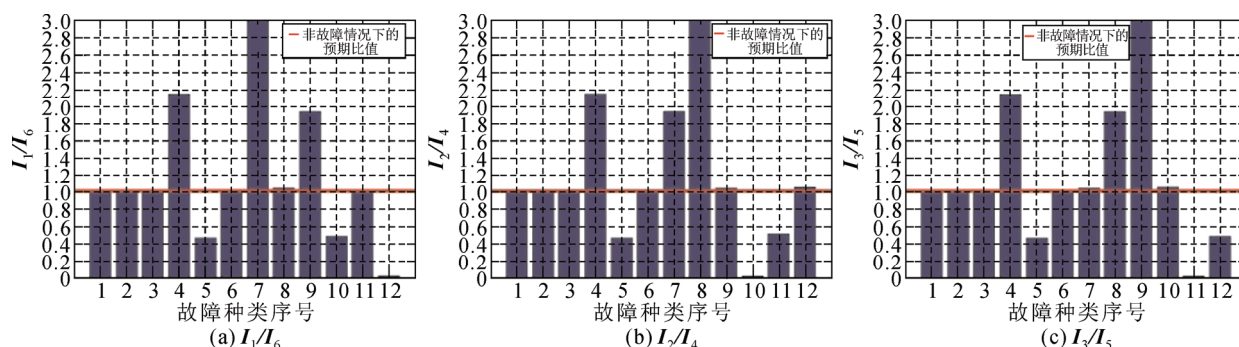
通过本文的讨论和分析, 主要可得出以下结论:

1) 建立了 1 种可用于计算三相交叉互联电缆护层电流的数学模型。

2) 通过等效电路图分析, 提出了当电缆发生故障时护层电流的仿真计算方法。

3) 当电缆接头发生交叉互联箱进水或接头内环氧预制板击穿故障时, 测量点处传感器测得的电缆护层电流可以上升至非故障情况下的数倍。

4) 根据故障情况护层电流数值与预期护层电流值的比值, 可以制订出 1 套适用于隧道电缆的故障诊断及定位标准。这套标准可以准确地识别并定位本文中所列出的 12 种常见电缆故障。

图 10 地电阻为 4Ω 时故障护层电流值与负荷电流值的比值Fig.10 Ratio of sheath current and load current when the ground resistance is 4Ω 图 11 地电阻为 4Ω 时, I_1/I_6 、 I_2/I_4 、 I_3/I_5 的比值Fig.11 Ratio of I_1/I_6 , I_2/I_4 , I_3/I_5 when the ground resistance is 4Ω

这套电力电缆故障诊断及定位标准的制订方法适用于敷设在电缆隧道内的交叉互联电力电缆。由于敷设在隧道内的电缆较少受到第3方破坏或化学腐蚀等外部因素影响,所以由外护套破损而引起多点接地故障在总故障中的比例相对较低。对于电缆隧道而言,故障发生率比较高的部件就是中间接头和终端。而采用直埋方式敷设的地下电缆,外护套会受到环境的侵蚀,也会受到白蚁蛀蚀的影响,所以外护套破损是1个常见的故障。这种类型故障的仿真将在未来的工作中进一步加以讨论和分析。

参考文献 References

- [1] Barber K W, Marazotto H. Reliable undergrounding of electricity supply in Asia[C]// Asia Pacific Conference on MV Power Cable Technologies. Kuala Lumpur, Malaysia: [s.n.], 2005: 1-5.
- [2] Hartlein R. Diagnostic testing of underground cable systems (cable diagnostic focused initiative): Neetrac Project No. 04-211/04-212/09-166[R]. [S.l.]: [s.n.], 2010.
- [3] Densley J. An overview of aging mechanisms and diagnostics for extruded power cables[C]// IEEE Power Engineering Society Winter Meeting: Vol 3. Singapore: IEEE, 2000: 1587-1592.
- [4] Bertling L, Eriksson R, Allan R N, *et al.* Survey of causes of failures based on statistics and practice for improvements of preventive maintenance plans[C]// 14th Power Systems Computation Conference. Seville, Spain: PSCC, 2002: 1-7.
- [5] 靖小平, 彭小圣, 姜伟, 等. 基于 K-means 聚类算法的自动图谱识别在电缆局部放电在线监测系统中的应用[J]. 高电压技术, 2012, 38(9): 2437-2446.

JING Xiaoping, PENG Xiaosheng, JIANG Wei, *et al.* Phase resolved partial discharge pattern recognition method for on-line cable condi-

- tion monitoring system based on K-means clustering[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(9): 2437-2446.
- [6] Nowlen S P, Wyant F J, Dandini V J. Circuit analysis: failure mode and likelihood analysis[M]. Rockville, USA: US Nuclear Regulatory Commission, 2003.
- [7] 陈向荣, 徐 阳, 王 猛, 等. 高温下 110 kV 交联聚乙烯电缆电树枝生长及局部放电特性[J]. 高电压技术, 2012, 38(3): 645-654. CHEN Xiangrong, XU Yang, WANG Meng, *et al.* Propagation and partial discharge characteristics of electrical trees in 110 kV XLPE cable insulation at high temperature[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(3): 645-654.
- [8] 杜伯学, 马宗乐, 高 宇, 等. 采用温差法的 10 kV 交联聚乙烯电缆水树老化评估[J]. 高电压技术, 2011, 37(1): 143-149. DU Boxue, MA Zongle, GAO Yu, *et al.* Insulation evaluation of water-tree aged 10 kV XLPE cables using thermal step method [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 143-149.
- [9] 王金锋, 李彦雄, 刘志民, 等. 温度对聚乙烯水树枝老化特性的影响[J]. 高电压技术, 2012, 38(1): 181-187. WANG Jinfeng, LI Yanxiong, LIU Zhimin, *et al.* Influence of temperature on water treeing in polyethylene[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(1): 181-187.
- [10] Alsharif M, Wallace P, Hepburn D, *et al.* FEM modelling of electric field and potential distributions of MV XLPE cables containing void defect[C]/COMSOL Conference User Presentations. Milan, Italy: [s.n.], 2012: 1-4.
- [11] Khan A A, Malik N, Al-Arainy A, *et al.* A review of condition monitoring of underground power cables[C]//2012 IEEE International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Bali, Indonesia: IEEE, 2012: 909-912.
- [12] Villaran M, Lofaro R. Condition monitoring of cables task 3 report: condition monitoring techniques for electric cables: BNL-90735-2009-IR [R]. New York, USA: Energy Sciences and Technology Department, Brookhaven National Laboratory, 2009.
- [13] 杜伯学, 李忠磊, 张 楷, 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.
- [14] DL/T 5221—2005 城市电力电缆线路设计技术规定[S], 2005. DL/T 5221—2005 Technical design of power cable system in cities[S], 2005.
- [15] Rhodes D J, Wright A. Induced voltages in the sheaths of cross-bonded AC cables[J]. Proceedings of the Institution of Electrical Engineers, 1966, 113(1): 99-110.
- [16] Li Z L, Du B X, Wang L, *et al.* The calculation of circulating current for the single-core cables in smart grid[C]//Innovative Smart Grid Technologies—Asia (ISGT Asia). Tianjin, China: IEEE, 2012: 1-4.
- [17] Jung C K, Lee J B, Kang J W, *et al.* Sheath current characteristic and its reduction on underground power cable systems[C]//IEEE Power Engineering Society General Meeting: Vol 3. [S.l.]: IEEE, 2005: 2562-2569.
- [18] Jung C K, Lee J B, Kang J W. Sheath circulating current analysis of a cross-bonded power cable systems[J]. Journal of Electrical Engineering & Technology, 2007, 2(3): 320-328.
- [19] Ruiz J R R, Morera X A. Effects of the circulating sheath currents in the magnetic field generated by an underground power line[C]//ICREPQ'2006. Palma de Mallorca: [s.n.], 2006: 1-5.
- [20] Yan L, Peng F D, Chen X L, *et al.* Study on sheath circulating current of cross-linked power cables[C]//2008 IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application. Chongqing, China: IEEE, 2008: 645-648.
- [21] 江守和, 满忠雷, 周保华, 等. 新版 GB 4706.1 中“泄漏电流”测试浅析[J]. 上海标准化, 2007(7): 23-24. JIANG Shouhe, MAN Zhonglei, ZHOU Baohua, *et al.* Analysis of leakage current test in GB 4706.1 (new version)[J]. Shanghai Standardization, 2007(7): 23-24.
- [22] Cardimona S. Electrical resistivity techniques for subsurface investigation[R]. Rolla, USA: Department of Geology and Geophysics, University of Missouri-Rolla, 2002.
- [23] Saad R, Nawawi M N M, Mohamad E T. Groundwater detection in alluvium using 2D electrical resistivity tomography (ERT)[J]. Electronic Journal of Geotechnical Engineering, 2012, 17: 369-376.
- [24] IEEE Std 142™—2007 IEEE recommended practice for grounding of industrial and commercial power systems[S], 2007.
- [25] 荣根旺, 宋海清. 电缆隧道中间接头室的应用及推广[J]. 冶金动力, 2010(1): 9-10. RONG Genwang, SONG Haiqing. Application and extension of intermediate joint room in cable tunnel[J]. Metallurgic Power, 2010(1): 9-10.



YUAN Yanling

袁燕岭

1982—, 男, 硕士, 工程师
研究方向为电力系统, 电力设备运维检修
E-mail: 15175502063@126.com



ZHOU Chengke

周承科(通信作者)

1963—, 男, 博士, 教授, 博导
研究方向为高电压设备状态检测、信号处理与知识挖掘、智能电网
E-mail: C.Zhou@gcu.ac.uk

Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2014-12-15 修回日期 2015-03-29 编辑 李 东