

基于金属护层环流的高压电缆外护套绝缘电阻在线监测方法

王春坡, 周 凯, 孟鹏飞, 刘兆贵

(四川大学 电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘要: 高压电缆外护套的绝缘电阻是衡量高压电缆绝缘状态的重要参数, 本文提出了一种基于金属护层环流的在线监测方法, 以评估高压电缆外护套的绝缘电阻, 从而实现高压电缆绝缘状态的实时监测。该方法分析了金属护层环流形成及其与外护套绝缘电阻之间的关系, 推导出计算模型, 并对单端接地和交叉互联接地的高压电缆开展了在线监测方法的现场应用。结果表明: 所提出的在线监测方法与离线测量方法的误差在 20% 以内, 且该方法对交叉互联接地高压电缆中间段的测量效果明显好于两边电缆段, 对于高压电缆的状态监测和金属护层故障定位具有重要意义。

关键词: 电缆外护套; 金属护层环流; 绝缘电阻; 在线监测

Online monitoring method for insulation resistance of high-voltage cable outer sheath based on metal sheath circulation current

WANG Chunpo, ZHOU Kai, MENG Pengfei, LIU Zhaogui

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The insulation resistance of the outer sheath of high-voltage cables is an important parameter for measuring the insulation state of high-voltage cables. In this paper, an online monitoring method based on metal sheath circulation current was proposed to evaluate the insulation resistance of the outer sheath of high-voltage cables, so as to realize the real-time monitoring of the insulation state of high-voltage cables. The formation of metal sheath circulation current and its relationship with the insulation resistance of outer sheath were analyzed, and a calculation model was derived. Then the online monitoring of high-voltage cable with single-end grounding and cross-linked grounding have been carried out. The results show that the error between the online monitoring method and the offline measurement method is less than 20%, and the measurement effect of the method is significantly better in the cross-linked grounding segments than in the two-sided cable segments, which is of great significance for the condition monitoring and fault location of the metal sheath of high-voltage cables.

Key words: outer sheath of the cable; metal sheath circulating current; insulation resistance; online monitoring

0 引言

随着社会的发展, 电能在生产能源中所占的比重越来越大, 高压电缆在电能输送中得到了广泛应用^[1-3]。单芯高压电缆在运行时, 其外护套的绝缘电阻是一个至关重要的性能指标^[4]。高压电缆在运行过程中, 由于潮湿、腐蚀和机械磨损等原因, 外护套的结构受到影响, 其绝缘电阻可能会发生变化, 从而影响高压电缆系统的稳定性和安全可靠^[5-7]。当外护套产生开裂或破损等故障后, 含杂质的水分入侵到高压电缆内部会造成结构腐蚀和水树等问

题, 同时在外护套破损的位置金属护层接地会改变金属护层回路的结构, 可能造成金属护层环流异常, 引起高压电缆发热等问题, 导致高压电缆的载流量降低^[8-10]。目前检测高压电缆外护套绝缘电阻的方法是对高压电缆进行停电测量, 但停电测量需考虑供电情况, 工作效率不高且影响经济效益。因此, 研究高压电缆外护套绝缘电阻的在线测量方法, 进而进行外护套绝缘状态的评估, 无论对于科学研究还是工程应用都具有重要意义。

对于高压电缆外护套绝缘状态的评估方法, 已经有学者进行了研究, 并取得了一些成果。文献[11]对电力电缆线路交接试验中外护套绝缘电阻试

验进行了研究,分析了绝缘电阻的检测电路原理以及测量方法,通过理论研究和数值计算得到了电缆外护套绝缘电阻合理的技术规定。文献[12]介绍了直流电桥法、压降比较法、跨步电压法、音频检测法和磁声同步法5种外护套故障定位方法及其定位原理,描述了评估高压电缆外护套绝缘状态的方法,但并未进行方法验证,实际应用效果尚未可知。文献[13-17]提出了一系列基于金属护层来评估外护套绝缘状态的方法,但金属护层环流法没有直观地反映外护套绝缘电阻值,外加电源在金属护层上形成电信号的方法需要专门的信号发生设备,且信号注入会改变原有的金属护层环流,不利于高压电缆稳定运行。

从上述研究结果来看,高压电缆外护套的绝缘状态可以通过高压电缆结构和金属护层环流来进行评估。就评估方法而言,一方面评估结果要直观展示外护套绝缘状态即绝缘电阻,而不只是粗略地展示高压电缆整体的绝缘状态;另一方面评估方法不能改变原有高压电缆的运行状态,特别是外加电源法,在金属护层上注入信号会使金属护层环流发生变化,可能会导致高压电缆发热等问题。因此,需要一种可以直观反映外护套绝缘电阻且不改变高压电缆结构的监测方法。

为解决上述问题,本文提出基于金属护层环流的高压电缆外护套绝缘电阻在线监测方法。充分考虑感应电流和泄漏电流的影响因素,建立金属护层环流模型,利用金属护层和外护套紧密连接的关系,通过对金属护层电压和环流的分析,建立外护套绝缘电阻计算模型,并通过实验平台和实际线路测量数据验证该模型的准确性,实现对高压电缆外护套绝缘状态的评估。

1 金属护层环流模型的建立

高压电缆通常采用金属护层接地的方式来为短路电流提供通路,同时金属护层接地降低了金属护层上的电压,使其电位与地电位接近,将高压电缆的电场限制在高压缆芯和金属护层之间。在绝缘层上会形成泄漏电流,同时,由电磁感应现象金属层上会形成感应电流,泄漏电流和感应电流在高压电缆的金属护层上叠加形成环流。由于单个接地系统的尺寸远小于运行电压的波长,可以将单个接地系统看作集中参数电路来分析金属护层

环流^[18]。

1.1 泄漏电流模型

高压电缆运行时,在半导体层、XLPE绝缘层和缓冲层上形成了从高压缆芯流向金属护层的电流,这部分电流称为缆芯泄漏电流,泄漏电流是由高压电缆的电压决定的。半导体层具有一定的导电性,缓冲层材料含有导电碳粉也具有一定的导电性,所以二者的阻抗可忽略不计,在分析泄漏电流时主要考虑XLPE绝缘层的阻抗^[19]。因为XLPE绝缘层的电阻 R 远大于容抗 X_C ,所以XLPE绝缘层的电容电流远大于电阻电流,即泄漏电流由XLPE绝缘层的电容所决定,将绝缘层等效为电容 C_1 ,单个高压电缆段的泄漏电流等效电路如图1所示。

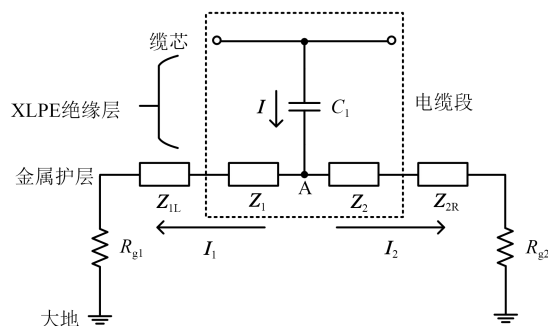


图1 泄漏电流等效电路图

Fig.1 The equivalent circuit diagram of leakage current

图1中, C_1 为XLPE绝缘层的等效电容; Z_1 和 Z_2 为该段电缆金属护层的阻抗; Z_{1L} 和 Z_{2R} 为与金属护层相连接结构的阻抗; R_{g1} 和 R_{g2} 为金属护层两端的接地电阻;A点为泄漏电流流入点。

金属护层泄漏电流可由式(1)确定。

$$I = j\omega C_1 U_a \quad (1)$$

式(1)中: I 为泄漏电流; U_a 为运行高压电缆的缆芯相电压; j 为虚数单位; ω 为角频率。

泄漏电流流入金属护层后,经金属护层到达两端接地点流入地下,泄漏电流从A点的左右分流可由式(2)确定。

$$\begin{cases} I_1 = I \cdot \frac{Z_2 + Z_{2R} + R_{g2}}{R_{g1} + Z_{1L} + Z_1 + Z_2 + Z_{2R} + R_{g2}} \\ I_2 = I \cdot \frac{Z_1 + Z_{1L} + R_{g1}}{R_{g1} + Z_{1L} + Z_1 + Z_2 + Z_{2R} + R_{g2}} \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中, I_1 和 I_2 分别为泄漏电流在A点左右两侧的分电流。

1.2 感应电流模型

金属护层处于各个导体电流的磁场中,由于电

磁感应作用,在金属护层上形成对应的感应电压,当金属护层两端接地形成回路后,金属护层中会形成感应电流^[20-21]。感应电压是由高压电缆的电流决定的,不但要考虑金属护层所在相负荷电流磁场变化,还要考虑其他相负荷电流磁场变化^[22],甚至其他相金属护层环流的磁场也是重要影响因素,因此感应电压至少由3部分组成。分析每部分感应电压的形成和计算,再进行线性叠加得到整个金属护层上的感应电压,最后结合回路阻抗计算出感应电流,如图2所示。图2中, U_s 为金属护层所在相负荷电流在金属护层上感应形成的感应电压; U_L 表示其他相高压电缆的负荷电流和金属护层电流引起的感应电压; Z_L 表示金属护层阻抗; I_L 表示该模型中形成的感应电流。将金属护层看作空心圆柱体,金属护层与所在相缆芯的互感 M_s 可由式(3)确定^[23]。

$$M_s = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln\left(\frac{2r+d}{2r-d}\right) \quad (3)$$

式(3)中: μ_0 为真空磁导率; r 为金属护层的平均半径; d 为金属护层的厚度; l 为高压电缆长度。

金属护层与其他相电流导体的互感 M_c 可由式(4)确定。

$$M_c = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln\left(\frac{k}{r}\right) \quad (4)$$

式(4)中, k 为金属护层和电流导体的距离。

计算出互感后,利用电流与互感的乘积得到金属护层上的各个感应电压,将所有感应电压求和,得到金属护层上总的感应电压,由图2所示,在金属护层与大地构成的回路中,感应电流可由式(5)确定。

$$I_L = \frac{U_z}{Z_z} = \frac{(U_L + U_s)}{R_{g1} + Z_L + R_{g2}} \quad (5)$$

式(5)中: U_z 为金属护层上的总电压; Z_z 为金属护层和接地电阻的总阻抗。

1.3 金属护层环流模型

金属护层接地方式不同时,金属护层环流的构成也不同,但都是泄漏电流和感应电流的矢量叠加。单个高压电缆段的金属护层环流如图3所示,泄漏电流流入金属护层后与感应电流叠加,形成金属护层环流,其中, I_h 为泄漏电流和感应电流叠加形成的金属护层环流。

对于不同的接地方式,金属护层环流计算需要考虑的内容不同,此处仅考虑单个电缆段的泄漏电流和感应电流叠加即可,如式(6)所示。

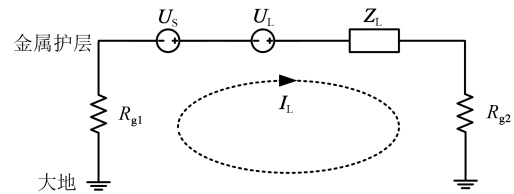


图2 感应电压与感应电流

Fig.2 Induced voltage and induced current

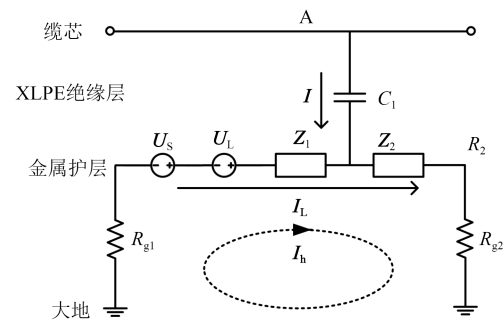


图3 金属护层环流

Fig.3 Metal sheath circulation

$$I_h = \frac{U_s + U_L + I_c(R_{g1} + Z_1 - R_{g2} - Z_2)}{R_{g1} + Z_1 + Z_2 + R_{g2}} \quad (6)$$

2 外护套绝缘电阻及在线检测方法

外护套绝缘电阻是指外护套的横向直流电阻,它是体现外护套绝缘状态的重要参数。常用的测量方法是将金属护层的接地线断开,在金属护层上施加直流电压,忽略XLPE绝缘层泄漏电流的影响,通过电压和电流的比值得到外护套绝缘电阻。而高压电缆运行时,金属护层接地,无法在金属护层上施加电压^[24]。为了在高压电缆运行时能够初步判断外护套绝缘状态,利用外护套和金属护层紧密连接的关系,分析金属护层电流和外护套绝缘电阻的联系,通过测量金属护层电流和电压来评估外护套的绝缘状态。

图4为金属护层和外护套的电流示意图。从图4可以看出,电流 I_1 从金属护层一端流向另一端的过程中,缆芯的泄漏电流 I_c 经XLPE绝缘层流入金属护层,外护套电流 I_b 从金属护层流入外护套,最终电流 I_1 在金属护层的另一端变成 I_2 ,金属护层对地的电压为 U_1 和 U_2 ,该等效电路如图5所示。图5中, Z_b 为外护套的阻抗; I_b 为流过外护套的电流;电压 U 为外护套承受的电压。

由图4和图5可知,金属护层的对地电压就是外护套承受的电压,根据基尔霍夫电流定律,外护套上流过的电流为金属护层上其他的电流之和,电

压和电流可由式(7)确定。

$$\begin{cases} U = (U_1 + U_2)/2 \\ I_B = I_C + I_1 - I_2 \end{cases} \quad (7)$$

式(7)中： U 为金属护层上的平均电压； U_1 和 U_2 为金属护层首末端对地电压； I_1 和 I_2 为金属护层两端的金属护层环流。

利用替代定理，图5所示电路可等效为图6。图6中， I_d 为金属护层两端环流差值； C_B 为外护套等效电容； R_B 为外护套等效绝缘电阻。由图6可以得出外护套阻抗(Z_B)计算表达式即式(8)。由于对运行的高压电缆无法直接测量电压相位和XLPE绝缘层电容参数，仅已知缆芯电压 U_a 幅值，但相角未知，XLPE绝缘层阻抗 Z_C 未知，电流 I_B 无法直接计算，下面进行分析。

$$Z_B = \frac{U}{I_d + (U - U_a)/Z_C} \quad (8)$$

高压电缆运行时，XLPE绝缘层承受了缆芯的高电压，每千米高压电缆的泄漏电流可达安培级，而外护套上的电压通常只有数十伏特甚至更低，外护套电流只有毫安甚至微安级，所以正常情况下外护套上的电流可忽略不计。当金属护层两端电流差近似于泄漏电流理论值时，可认为金属护套两端电流的差值几乎全是泄漏电流。测量得到高压电缆两端的金属护层环流后，与泄漏电流理论计算值进行对比，并考虑电流测量误差，如式(9)所示。当金属护层两端电流差(I_d)处于正常范围内时，该段电缆外护套绝缘状态正常，再计算外护套的绝缘电阻，否则，金属护层环流异常，需要对该高压电缆进行进一步检查。

$$|I_{CL}| \cdot k_1 \leq |I_d| \leq |I_{CL}| \cdot k_2 \quad (9)$$

式(9)中： I_{CL} 为泄漏电流的理论计算值； k_1 和 k_2 为测量误差修正系数。

在式(9)成立的前提下，可以得到式(10)，即金属护层两端电流差与泄漏电流相等。

$$I_d = I_1 - I_2 = I_C \quad (10)$$

由缆芯电压与泄漏电流的比值可得到XLPE绝缘层的阻抗 Z_C ，如式(11)所示，XLPE绝缘层的阻抗等效为容抗，所以其阻抗为 $-jX_C$ 。

$$|Z_C| = X_C = \frac{|U_a|}{|I_d|} \quad (11)$$

泄漏电流主要为电容电流，电容的电压相位比电流相位滞后 90° ，所以泄漏电流的相位比所承受

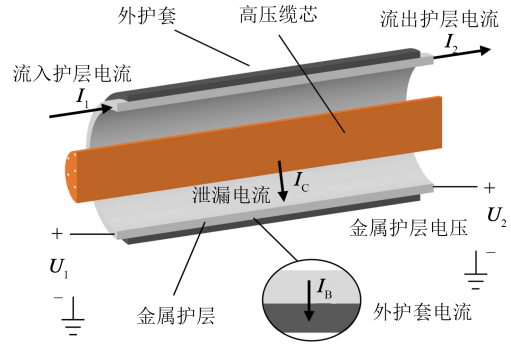


图4 金属护层和外护套的电流

Fig.4 Current of metal sheath and outer sheath

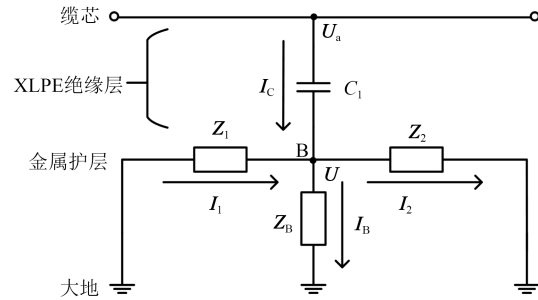


图5 外护套的电压和电流

Fig.5 Voltage and current of the outer sheath

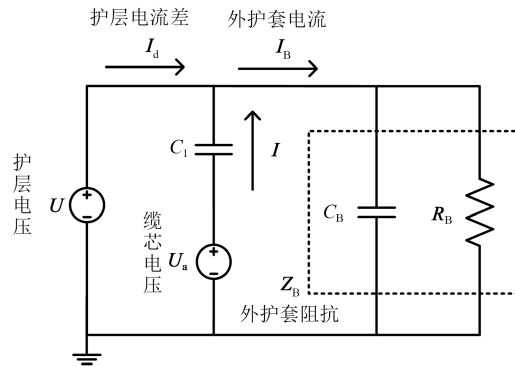


图6 外护套绝缘电阻等效电路

Fig.6 Sheathed insulation resistance equivalent circuit

的电压相位超前 90° ，由泄漏电流反推缆芯电压的相位，如式(12)所示，得到缆芯电压 U_a 的相角值。

$$\varphi_{ua} = \varphi_{id} - 90^\circ \quad (12)$$

式(12)中： φ_{ua} 为高压缆芯电压相量 U_a 的相角值； φ_{id} 为金属护层两端电流差相量 I_d 的相角值。

到此，式(8)中的所有变量都已知，可计算得到外护套阻抗串联模型 Z_B 。为得到外护套绝缘电阻值，对 Z_B 变形得到电导 G 和电纳 B 并联的模型，由式(13)计算电导 G 的倒数，即为外护套绝缘电阻 R_B 。

$$R_B = \frac{1}{G} \quad (13)$$

3 模型及方法验证

3.1 金属护层环流模型验证

为验证金属护层环流模型的准确性,搭建如图7所示的高压电缆金属护层环流测试平台,用来模拟金属护层电流的感应电流和泄漏电流,所用的高压电缆型号为YJLW02-64/110 kV-1*240,具体参数如表1所示。

图7中,实线连接的设备构成测试感应电流的电路,其原理是大电流发生器工作,缆芯上流过大电流,同时金属护层上形成相应的感应电流,通过电流传感器将缆芯和金属护层的电流信号转化为电压信号传输给示波器,通过示波器的数据得到缆芯电流和金属护层电流。缆芯流过不同数值的大电流时,金属护层会形成相应的感应电流,根据示波器的数据得到缆芯和金属护层的互感。由于大电流发生器输出的电流较大但电压较低,不会在XLPE绝缘层上形成泄漏电流。同时根据电缆参数可计算缆芯和金属护层的互感,根据缆芯的电流和互感可计算金属护层感应电流的理论值。将互感的测量值和理论值进行对比,同时对比金属护层电流的测量值和理论值,具体数据如表2所示。

由表2可以看出,当改变高压电缆的缆芯电流时,金属护层感应电流随之变化,缆芯和金属护层的互感基本保持不变,通过本文提出的金属护层感应电流模型计算得到的金属护层感应电流和互感值,与测量值的误差大都在5%以内,验证了感应电流模型的准确性。但计算结果和实际测量结果之间仍然具有一定误差,出现误差的原因有两方面:一方面是由于测量设备固有的测量误差,特别是电流传感器不能在保证量程的同时保证测量精度;另一方面是计算模型中将金属护层等效为空心圆柱体,未考虑实际金属护层存在的压纹深度。

图7中,虚线连接的设备构成泄漏电流测试电路,其原理是试验变压器对高压电缆的缆芯施加高电压,在XLPE绝缘层上形成泄漏电流,该电流流到金属护层后,通过接线流入地下,通过高压探头测量缆芯的电压,通过电流传感器将泄漏电流转化为电压值,传输到示波器进行测量,根据测量结果得到XLPE绝缘层的泄漏电流和阻抗。由于金属护层两端不构成闭合回路,不会在金属护层上形成感应电流。通过缆芯施加的电压和电缆的参数,可以计算XLPE绝缘层泄漏电流和阻抗的理论值,将XLPE

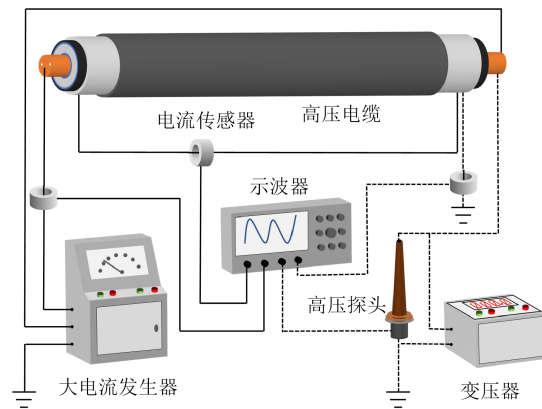


图7 金属护层环流测试平台

Fig.7 Metal sheath circulation test platform

表1 高压电缆的参数

Table 1 Parameters of high-voltage cables

电缆参数	数值	电缆参数	数值
缆芯半径/mm	17.5	外半导厚度/mm	2
内半导厚度/mm	2	金属护层内径/mm	75
绝缘层厚度/mm	19	绝缘层相对介电常数	2.3
金属护层外径/mm	79	金属护层电阻率/($\Omega \cdot m$)	2.8×10^{-8}
电缆长度/mm	1 000	金属护层厚度/mm	2

表2 感应电流理论计算值和实测值对比

Table 2 Comparison on theoretical calculation and measured values of induced current

缆芯电流/A	50	150	250	350	450	550
感应电流测量值/A	6.19	18.43	30.80	42.93	56.57	68.23
感应电流计算值/A	6.44	19.31	32.16	45.06	57.93	70.81
误差/%	3.92	4.56	4.22	4.73	2.35	3.64
互感测量值/mH	2.16	2.15	2.15	2.14	2.20	2.17
互感计算值/mH	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25	2.25
误差/%	3.92	4.56	4.22	4.73	2.35	3.64

绝缘层阻抗和泄漏电流的测量值与理论值进行对比,如表3所示。

由表3可以看出,当改变高压电缆的缆芯电压时,XLPE绝缘层的泄漏电流随之改变,但阻抗值基本保持不变,通过本文所提模型计算出的泄漏电流和XLPE绝缘层的阻抗,与实测值的误差大都在8%以内,验证了泄漏电流模型的准确性。出现误差的原因有两方面:一方面是测量设备的误差;另一方面是计算绝缘层的阻抗时,采用的参数是高压电缆截面对应的标准电容数值,未考虑阻水缓冲层的存在,并且阻水缓冲层与具有压纹的金属护层不是充分接触,采用的电容值与实际值有差异,导致了实测值与计算值的不同。

表3 泄漏电流理论计算和实测值对比
Table 3 Comparison on theoretical calculation and measured values of leakage current

缆芯电压/kV	45	50	55	60	65	70
泄漏电流测量值/mA	17.197	19.053	21.202	23.005	24.722	26.412
泄漏电流计算值/mA	18.236	20.263	22.290	24.316	26.342	28.369
误差/%	5.57	5.97	4.88	5.39	6.15	6.67
绝缘层阻抗测量值/MΩ	2 616.74	2 624.26	2594.09	2608.13	2629.23	2650.00
阻抗计算值/MΩ	2 467.52	2 467.52	2 467.52	2 467.52	2 467.52	2 467.52
误差/%	6.08	6.35	5.13	5.70	6.55	7.41

3.2 外护套绝缘电阻在线测量方法验证

为验证本文所提的外护套绝缘电阻在线测量方法的有效性,设计如图8所示的测量设备对实际电缆线路进行金属护层环流在线测量和分析计算,并将本文方法的测量值和离线方法的测量值进行对比。

图8中,数据采集卡通过电压传感器和电流传感器采集电压信号和电流信号,对时设备通过对时天线对采集卡的采集时间进行实时校正,同一时间采集的电压和电流数据打包上传到云平台,主服务器从云平台读取电压和电流数据包并解析,得到电压和电流数据,计算外护套绝缘电阻。为便于后续研究分析更多信息,同时降低前端设备工作量,在前端设备上传电压和电流的原始数据后,由于原始数据中包含了大量谐波信号,需要对电压和电流数据进行分解,提取出其中的工频分量,再进行后续外护套绝缘电阻的计算。

3.2.1 单端接地系统外护套绝缘电阻测量

对某地的110 kV振民线电缆进行现场测量,选择该电缆线路中的金属护层单端接地系统进行测量,单端接地系统长度为648 m,所用高压电缆型号为FY-YJLW03 64/110 1*400,测量设备安装示意图如图9所示。

金属护层单端接地系统中,金属护层一端直接接地,另一端通过保护电阻接地,两端构成了回路,所以金属护层两端都可以测量电流,直接接地箱中不能测量电压,只有保护接地端可以测量电压。图9中,测量单元一和测量单元二同步测量金属护层电流,并且测量单元二还测量了保护接地电阻的电压,即保护接地端的金属护层电压,根据所得数据计算了外护套绝缘电阻,从测量结果中选取时间间

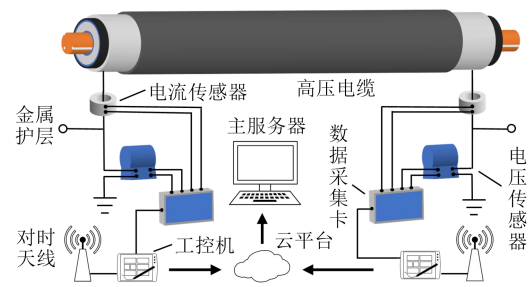


图8 外护套绝缘电阻测量设备
Fig.8 Measuring equipment for insulation resistance of outer sheath

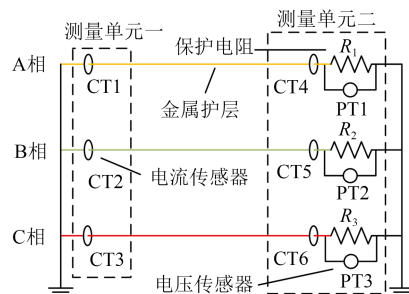


图9 单端接地高压电缆测量设备安装示意图
Fig.9 Installation diagram of single ended grounding high-voltage cables measurement device

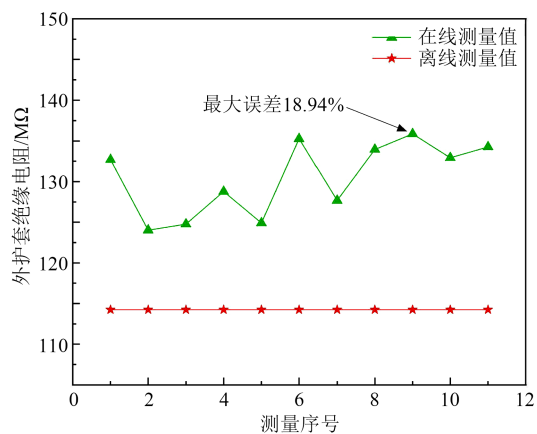
隔相同的11次测量结果作图,并与离线测量的外护套绝缘电阻进行对比,如图10所示。

从图10可以看出,对于金属护层单端接地的高压电缆,采用本文在线测量方法所得的外护套绝缘电阻与离线测量的外护套绝缘电阻值接近,误差在20%以内,验证了本文所提方法的工程有效性。需要注意的是,在线测量值与离线测量值之间仍有一定差距。探究其原因,一方面直接接地端的电压无法直接测量,在计算过程中采用了金属护层平均电压进行近似计算,导致计算数据和实际数据有偏差;另一方面,高压电缆现场环境复杂,金属护层单端接地的环流很小,现场存在的干扰信号导致金属护层环流测量容易受到较大的干扰,即使进行了滤波,这种干扰仍然无法排除,在测量过程中需要精度更高、抗干扰能力更强的传感器。综合而言,该监测方法对单端接地电缆具有应用价值。

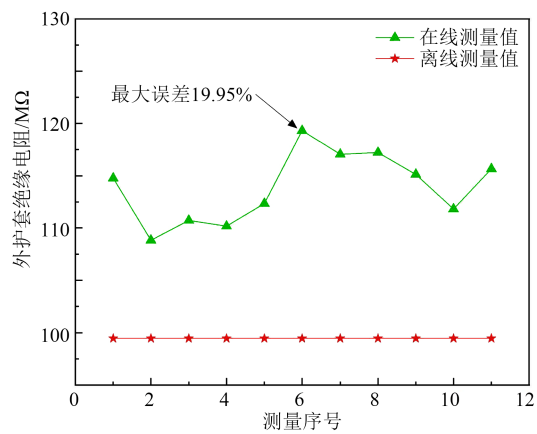
3.2.2 交叉互联接地系统外护套绝缘电阻测量

对某地的110 kV振长线电缆进行现场测量,选择该电缆线路中的金属护层交叉互联接地系统进行测量,所用高压电缆型号为FY-YJLW03 64/110 1*400,测量设备安装位置如图11所示,其中A1、B2、C3段电缆的长度分别为543、552、561米。

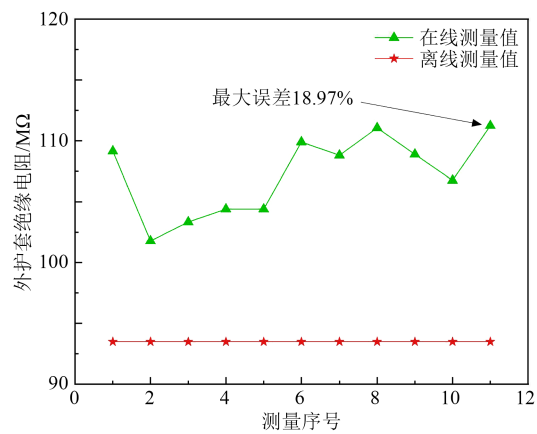
需要指出的是,金属护层交叉互联将金属护层



(a) A相测量数据对比



(b) B相测量数据对比



(c) C相测量数据对比

图10 单端接地高压电缆在线测量数据与离线测量数据对比

Fig.10 Comparison on measurement data and offline data of single terminal grounding high-voltage cable

分成了3段,第2段电缆的金属护层上可以测量电压和电流,第1段和第3段电缆都有一段直接接地,无法测量对地电压,这种情况与单端接地系统相同,即图11中测量单元一与单元二同步测量,本节不再重复进行测量。

图12中,测量单元二与测量单元三的传感器同

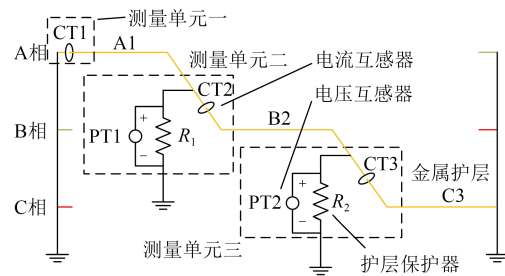


图11 交叉互联接地高压电缆测量

Fig.11 Measurement of cross-connected grounding high-voltage cables

步测量第2段高压电缆金属护层的电压和电流,结合电缆数据计算外护套绝缘电阻值,从测量结果中选取时间间隔相同的11次测量结果作图,并与离线测量的外护套绝缘电阻进行对比,如图12所示。

从图12可以看出,金属护层交叉互联接地的高压电缆第2段的外护套绝缘电阻在线测量值和离线测量值的误差均在15%以内,验证了本文所提外护套绝缘电阻测量方法的有效性。同样,受电缆现场条件所限,部分无法测量的变量用近似值代替,导致计算结果与实际值存在偏差。与单端接地的高压电缆外护套测量结果相比,交叉互联接地的第2段外护套绝缘电阻测量更加准确,这是因为第2段电缆的金属护层两端电压和电流都可以测量,所用的电压数据与实际数据更为接近。但是测量设备需要对两端对时,在实际应用中两端设备的采集仍然存在一定误差。通过提高两端设备对时的精准程度,同时在计算过程中进行相位修正,有助于改善计算误差。

4 结论

(1)金属护层环流由泄漏电流和感应电流组成,泄漏电流主要为XLPE绝缘层的电容电流,泄漏电流从高压缆芯流到金属护层后分流;感应电流由电磁感应原理形成感应电压并作用在金属护层上形成。高压电缆金属护层接地方式不同但计算金属护层环流的方法相同。

(2)通过对金属护层电流和电压的分析,得出金属护层两端的电流差就是泄漏电流和外护套电流的差值,可通过金属护层两端的电流差来判断金属护层环流是否正常,并推导了基于金属护层环流的外护套绝缘电阻的计算方法。

(3)通过设计外护套绝缘电阻测试设备,对金属护层单端接地和交叉互联接地的高压电缆系统外护套绝缘电阻进行在线测量,并和外护套绝缘电阻的离线测量值进行对比,发现本文所提在线测量

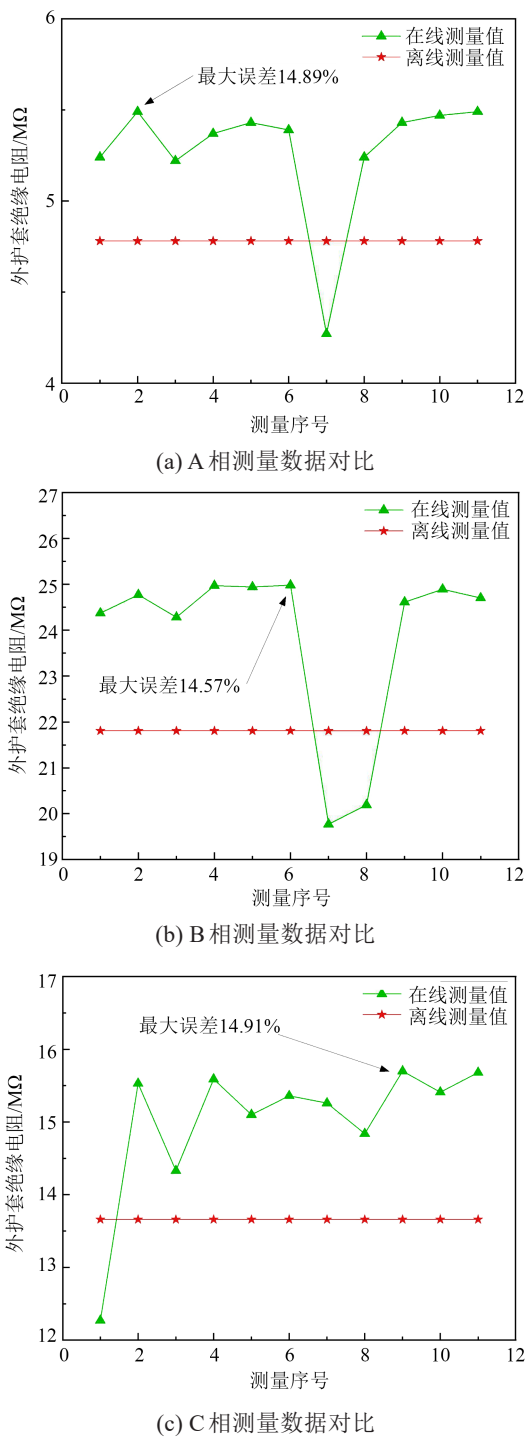


图 12 交叉互联接地高压电缆在线测量数据与离线测量数据对比

Fig.12 Comparison on measurement data and offline data of the cross-connected grounding high-voltage cable

方法对单端接地系统的测量误差在 20% 以内,对交叉互联接地系统第 2 段电缆的测量误差在 15% 以内,验证了本文所提方法的有效性,为高压电缆的状态检测、金属护层故障定位等工作提供了参考方法。

参考文献 References

- [1] 赖胜杰,夏成军,池梓斌,等.考虑泄漏电流及层间耦合的高压电缆金属护套环流计算与分析[J].高电压技术,2024,50(2):765-775.
LAI S J, XIA C J, CHI Z B, et al. Calculation and analysis of circulating current in metal sheath for HV cable considering leakage current and interlayer coupling[J]. High Voltage Engineering, 2024,50(2):765-775.
- [2] 陈伟林,周凯,林思衍,等.短时高热运行对 XLPE 电缆绝缘聚集态结构及介电性能的影响[J].高电压技术,2023,49(2):588-596.
CHEN Y L, ZHOU K, LIN S Y, et al. Effect of short-term high-temperature operation on the aggregate structure and dielectric properties of XLPE cables insulation[J]. High Voltage Engineering, 2023,49(2):588-596.
- [3] 单秉亮,李舒宁,孙茂伦,等.基于宽频阻抗谱技术的 XLPE 电缆老化诊断方法研究[J].绝缘材料,2022,55(2):84-90.
SHAN B L, LI S N, SUN M L, et al. Study on ageing diagnostic method of XLPE cables based on broadband impedance spectroscopy[J]. Insulating Materials, 2022,55(2):84-90.
- [4] 牛海清,徐涛,黄嘉盛,等.单芯电缆外护套绝缘缺陷及其差异化检修策略[J].绝缘材料,2015,48(11):64-68.
NIU H Q, XU T, SHUANG J S, et al. Insulation defects in outer sheath of single-core cable and its differential maintenance strategy[J]. Insulating Materials, 2015,48(11):64-68.
- [5] 赵琦,周凯,孔佳民,等.高压 XLPE 电缆阻水缓冲层烧蚀机理研究现状[J].绝缘材料,2022,55(4):20-28.
ZHAO Q, ZHOU K, SUN J M, et al. Research status of ablation mechanism of water-blocking buffer layer in high voltage XLPE power cable[J]. Insulating Materials, 2022,55(4):20-28.
- [6] 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 G, WANG H, LIU H K, 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.
- [7] 石大城,李乾,余志强,等.基于电磁-热-流体耦合的隧道敷设电缆载流量分析[J].绝缘材料,2022,55(12):111-118.
SHI D C, LI Q, YU Z Q, et al. Current carrying capacity analysis of cables laid in tunnel based on electromagnetism-heat-fluid coupling[J]. Insulating Materials, 2022,55(12):111-118.
- [8] 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.
- [9] ALOUI T, AMAR F B, ABDALLAH H H. Fault prelocalization of underground single-phase cables: Modeling and simulation[J]. International Journal of Electrical Power and Energy System, 2013,44(1):514-519.
- [10] LI M Z, ZHOU C K, ZHOU W J, et al. A novel fault location method for a cross-bonded HV cable system based on sheath current monitoring[J]. Sensors, 2018,18(10):3356.
- [11] 孙建生,张大鹏,夏俊峰,等.电力电缆线路交接试验标准中电缆绝缘电阻规定的探讨[J].电工电气,2020,271(7):63-65.

- SUN J S, ZHANG D P, XIA J F, et al. Study on the regulation of cable insulation resistance in the national standard of power cable line handover test[J]. *Electrical and Electrical Engineering*, 2020,271(7):63-65.
- [12] 江福章. 电力电缆外护套的故障定位及监测技术[J]. *电线电缆*,2023(1):7-11.
- JIANG F Z. Review on fault location and monitoring technology of power cable sheath[J]. *Wire & Cable*, 2023(1):7-11.
- [13] 许东升,田凤兰,赵珩,等. 电力电缆故障现场测距方法的研究与应用[J]. *高压电器*,2009,45(5):136-140.
- XU D S, TIAN F L, ZHAO Y, et al. Research and application of power cable fault diagnostic method[J]. *High Voltage Apparatus*, 2009,45(5):136-140.
- [14] 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 J, ZHU X L, DONG X, et al. On-line monitoring and diagnosis of HV cable faults based on sheath currents[J]. *High Voltage Engineering*,2009,45(5):136-140.
- [15] 郭小凯,李峰,南保峰,等. 高压电缆外护套故障测距误差分析及改进措施[J]. *南方电网技术*,2021,15(1):48-53.
- GUO X K, LI F, NAN B F, et al. Error analysis and improvement measures of the HV cable jacket fault location[J]. *Southern Power System Technology*,2021,15(1):48-53
- [16] 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 Y L, ZHOU Y, DONG J, 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.
- [17] 蔡坤强,兰生,章婧. 基于环流法的电缆外护套绝缘在线监测系统的设计[J]. *电力学报*,2014(1):56-61.
- CAI K Q, LAN S, ZHANG J. On-line monitoring system design for power cable's outer sheath based on the circulating current method[J]. *Journal of Electric Power*,2014(1):56-61.
- [18] 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 D B, LIU Z, WANG F K. Analysis and solution of metal sheath ground circulating current in cross connection of high voltage cable[J]. *Wire & Cable*,2022(1):19-25,28.
- [19] 周凯. 中高压电缆系统老化诊断修[M]. 北京:科学出版社, 2018.
- ZHOU K. Diagnosis and repair of aging in medium and high voltage cable systems[M]. Beijing: Science Press,2018.
- [20] 复高飞,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.
- FU G F, HUANG L, ZHANG L, et al. Electromagnetic influence analysis of high voltage long distance segment cable laying in public transportation tunne[J]. *High Voltage Apparatus*,2021, 57(12):156-161.
- [21] 王永志,曹炜,梁海生,等. 电缆护套环流估算公式的拟合及排列方式的优化[J]. *高压电器*,2017,53(1):77-82.
- WANG Y Z, CAO W, LIANG H S, et al. Fitting formula of sheath current and the arrangement optimization of cables[J]. *High Voltage Apparatus*,2017,53(1):77-82.
- [22] 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 X, XIA X Y, XIA J S, 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.
- [23] 王航,周文俊,陈杰,等. 波纹金属护套高压单芯电缆线芯护层互感的解析解[J]. *电工技术学报*,2020,35(16):3369-3376.
- WANG H , ZHOU W J, CHEN J, et al. Analytical solution of the mutual inductance of a HV single conductor cable with corrugated metallic sheath[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2020,35(16):3369-3376
- [24] 李露露,雍静,曾礼强,等. 基于系统电力扰动的交叉互联电缆绝缘整体老化在线监测[J]. *电工技术学报*,2018,33(14):3396-3405.
- LI L L, YONG J, ZENG L Q, et al. On-line monitoring of insulation overall aging for cross-bonded cables based on system power disturbances[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*,2018,33(14):3396-3405.

收稿日期:2023-06-30;修回日期:2023-08-21。

作者简介:

王春坡(1995-),男(汉族),河北张家口人,硕士生,主要从事电缆状态监测及绝缘诊断的研究;

周凯(1975-),男(汉族),四川成都人,教授,博士,主要从事电缆状态监测及固体电介质方面的研究。