

电力电缆金属护层的交流电阻计算及测量

韩 啸¹, 刘雄军¹, 刘 英², 张何燕²

(1. 江苏上上电缆集团科学技术研究院, 江苏 溧阳 213300; 2. 西安交通大学电气工程学院, 西安 710049)

摘要: 金属护层是电力电缆的必要组成部分, 其交流电阻是电缆设计及性能评估的重要参数, 但目前还没有推荐计算公式或算法可参考, 也没有专用测量设备可应用。文中针对电力电缆金属护层的电阻计算及测量展开研究, 重点关注交流电阻相对于直流电阻增大的程度。首先, 对不同结构金属护层的直流电阻解析算法进行讨论, 并借鉴中空线芯导体的推荐公式, 提出了金属护层交流电阻的计算方法。在此基础上, 讨论了材料电导率、护层厚度、电源频率、电缆相间距对金属护层交直流电阻比的影响。之后, 建立了金属护层电阻测量方法及测试线路, 利用特制夹具及铠装回流等方式减小接触电阻及电磁干扰的影响, 对 3 种不同型号的电缆成品进行了测量, 并将测量数据与解析计算结果进行对比, 两者具有较好的一致性。研究表明, 虽然工频下电缆中常规厚度的金属护层其交流有效电阻比直流电阻增大幅度不超过 2%, 但随着频率增大交直流电阻比将显著增加; 文中提出的方法可用于不同材料、结构及尺寸的金属护层直流及交流电阻的工程计算及测量, 具有较好的适用性。

关键词: 电力电缆; 金属护层; 交流电阻; 解析计算; 测量方法

Calculation and Measurement of AC Resistance for the Metal Sheath in Power Cables

HAN Xiao¹, LIU Xiongjun¹, LIU Ying², ZHANG Heyan²

(1. Science and Technology Research Institute, Jiangsu Shangshang Cable Group, Jiangsu Liyang 213300, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The metal sheath is an essential part of a power cable, and its AC resistance is an important parameter for cable design and performance evaluation. However, there is neither recommended calculation formula or algorithm, nor special measuring device. This paper aims to study the resistance calculation and measurement of metal sheath in power cables, with a focus on the increase degree of AC resistance compared to DC resistance. Firstly, the analytical algorithm of DC resistance is presented for the metal sheath with different structures, and the calculation method of AC resistance is proposed by referring to the recommended formula of hollow conductor. Based on this, the effects of material conductivity, sheath thickness, power frequency and phase spacing on the AC/DC resistance ratio of metal sheath are discussed. At the same time, the measuring method is established for the resistance of metal sheath, and the corresponding test circuit is set up, where the influence of poor contact and electromagnetic interference can be minimized by the special sample fixture and armor back-flowing method. The case study is performed on the metal sheath of three different cables, and the measured data are compared with the analytically calculated values, where a good consistency is found. The results show that although the AC resistance is no more than 2% higher than the DC one for the metal sheath with a normal thickness, the AC/DC resistance ratio will increase remarkably with the increase of the frequency. The method proposed in this paper can be used for the engineering calculation and measurement of DC and AC resistance of metal sheath with different materials, structures and sizes, which is widely applicable.

Key words: power cable; metal sheath; AC resistance; analytical calculation; measuring method

0 引言

金属护层作为电力电缆的必要组成结构之一, 主要作用有: 正常情况下流过电容电流, 短路故障时提供短路电流通路; 将电缆的电磁场屏蔽在绝缘线芯内, 减少对外界的电磁干扰; 为电缆绝缘线芯提供机械保护及防水屏障。常见的金属护层结构有金属丝/带绕包、同轴波纹护套、平滑护套等, 材料一般为铜、铝或者铅^[1-4]。

作为电力电缆的一个重要电气参数, 在稳态载流量、短路容量及特征阻抗等计算中, 均需用到金属护层的电阻值。此外, 电阻值还能作为金属护层完整性的表征参数, 当金属护层被腐蚀、氧化, 或者发生断裂时, 其电阻值将会明显增大。因此, 准确测量金属护层的电阻值, 具有重要意义^[5]。交流系统中的电力电缆, 正常运行情况下, 承受工频交

流电压, 传输工频负载电流, 因此, 在进行额定载流量评估、短路容量及特征阻抗等计算时, 所涉及的导体线芯电阻、金属护层电阻、铠装层电阻均应采用交流电阻^[6]。

对于架空线及电缆线芯的直流电阻的计算及测量, 相关研究已经开展得比较多了。交流电阻方面, 目前 CIGRE、IEC 推荐的集肤效应和邻近效应计算公式和系数, 主要来自于 NEHER J H 等基于实际测量数据的分析拟合, 可用于实心、绞合以及分割导体线芯^[7]。SUZUKI H 在对电缆分割导体线芯进行电阻测量时发现, 电压与电流测量端必须间隔一定的距离, 且电压测量线要绕成 S 型或 Z 型, 以减小测量过程中产生的感应电压^[8]。CIGRE WG B1.03^[9]对大截面电缆线芯交流电阻的计算与测量进行了系统研究, 强调了实际测量的重要性, 推荐了 4 种测量方法。ABB 公司^[10]利用电流电压表和同轴分流器进行线芯电阻测量, 最大电流可以加到

100 A, 测得 2 000 mm² 铜芯的交直流电阻比可达 1.5, 误差小于 3%。德国南方电缆公司^[11]测量 2 500 mm² 电缆线芯时发现, 在 20~100 Hz 范围内测得的数据与理论计算值基本一致, 而超过 100 Hz 以后由于未知因素的影响偏差将明显变大。

在国内, 横截面积 1 200 mm² 及以下电缆线芯的直流电阻测量已经是一项成熟技术, 2 500 mm² 线芯的适用夹具及测量设备也在开发当中。高岭^[12]针对大截面电缆线芯的交流电阻测量进行了研究, 获得了相关经验及数据, 同时显示测量精度受夹具、温升以及电磁干扰等影响显著。目前, 还没有电缆线芯交流电阻测量的成套设备可用。

在相关标准及文献中, 对于金属护层的交流电阻计算和测量均没有给出推荐方法。IEC 60287 及 IEC 60949: 1988^[13]中, 将涉及金属护套和铠装交流电阻的部分直接由直流电阻进行了替代。这种替代是否合适, 所带来的误差有多大, 由于未有专门研究, 仍不可知。另外, 国内外也未见有测量电缆线芯、金属护层交流电阻的专门设备, 这使得相关测量技术研究很有必要。

基于上述, 文中针对电力电缆中金属护层的电阻计算及测量展开研究。首先, 通过理论分析, 确定不同结构金属护层的直流及交流电阻计算方法, 讨论不同因素对金属护层交直流电阻比的影响。之后, 提出一种金属护层电阻测量方法, 在实际电缆上进行测量, 并将所得结果与理论计算值进行对比, 验证测量的准确性。

1 金属护层电阻计算方法

1.1 金属护层常见结构

在中/低压电缆中, 金属护层通常由金属丝或金属带采用螺旋绕包的方式构成; 而在高压/超高压电缆中, 金属护层通常为连续封闭的平滑或波纹管状结构, 见图1。由于结构的多样性及复杂性, 金属护层电阻尤其是交流电阻的精确计算非常困难, 需要考虑缆芯直径、金属材料特性、金属丝直径/间隙、金属带厚度/宽度/搭盖率、绕包角度/节距、波纹深度等众多因素影响^[14-15]。实际工程中, 需要基于已有数据及经验, 采取一些简化处理手段。

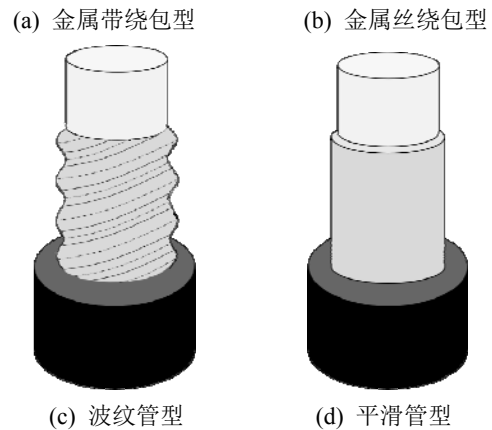
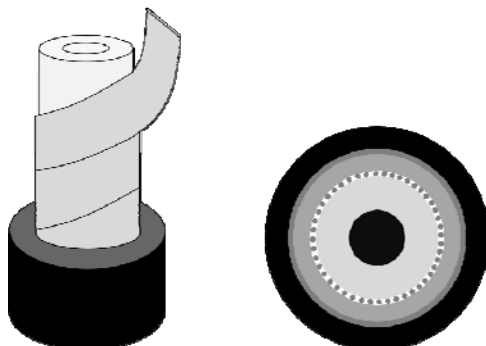


图 1 常见金属护层结构

Fig. 1 Common structures of cable's metal sheath

1.2 直流电阻解析计算方法

电力电缆沿轴向可视为均匀柱状结构, 其金属护层可视为同轴壳层结构, 单位长度金属护层的直流电阻可按照式(1)进行计算

$$R_{DC} = \rho \frac{1}{S} \quad (1)$$

式(1)中: R_{DC} 为单位长度(1 m)金属护层的直流电阻, Ω/m ; ρ 为护层材料的电阻率, $\Omega \cdot m$; S 为护层的横截面积, m^2 。不同金属材料的电阻率在标准中有推荐值可查; 式(1)的关键在于横截面积的确定。

1.2.1 金属带绕包护层

金属带绕包是 35 kV 及以下电力电缆最常用的护层结构型式, 但不同的标准或文献所给出的横截面积计算方法略有不同, 主要有下述 3 种^[16-18]。

1) “带宽一带厚”法。根据 IEC 60949: 1988^[13], 金属带绕包护层的横截面积计算式为

$$S = nw\delta_0 \quad (2)$$

式(2)中: n 为金属带绕包层数; w 为带材宽度, m ; δ_0 为带材厚度, m 。

由于绕包带材的匝间和带间接触情况无法精确确定, 尤其是在运行一段时间之后, 因此假定绕包带中的电流仅沿螺旋绕包方向流动, 绕包带的有效面积即为护层横截面积。通过式(2)可知, 护层横截面积只与金属带材的宽度、厚度及绕包层数有关, 与绕包前的缆芯尺寸、带材搭盖率无关。

“带宽一带厚”法认为铜带中的电流沿绕包铜带的螺旋方向, 在重叠部分的铜带间没有电流流动, 即认为带间的接触电阻无穷大, 这是一种理想情况。实际上, 铜带绕包得非常紧密, 搭盖部分相互接触, 而且铜带表面无任何外加绝缘, 因此, 搭盖部分的铜带间仍会有电流流过。

2) “近似圆环截面”法。根据 ICEA P-45-483—

2017^[19]，金属带绕包护层的横截面积由式(3)计算

$$S=4\delta d_m \sqrt{\frac{1}{2(1-k)}} \quad (3)$$

式(3)中： δ 为护层总厚度，m； d_m 为护层平均直径，m，可按 $d_m=(d_o+d_i)/2$ 计算，其中， d_i 和 d_o 分别为护层内、外直径，m； k 为搭盖率。

由式(3)可见，这种计算方法将绕包护层近似等效为空心圆环，在此基础上引入 $1/\sqrt{2(1-k)}$ ，表示搭盖率对有效截面积的影响。式(3)仅适用于新电缆。

在运行过程中，发热、氧化等将导致金属护层性能改变，弯曲及热胀冷缩等将导致绕包带材移位。因此，随着运行年限增加，绕包带材搭盖部分的接触电阻逐渐增大，此时，护层有效截面积改由式(4)计算

$$S=1.27m\omega\delta_0 \quad (4)$$

式(4)与式(2)类似，但多了一个系数“1.27”，用于考虑搭盖部分电流流通的影响。

3)“圆环截面”法。根据《电气绝缘结构设计原理》^[20]，金属带绕包护层的截面积为

$$S=\frac{\pi\delta(d_i+\delta)}{1-k}\eta \quad (5)$$

式(5)中， η 为带材重叠绕包部分的接触电阻系数，无确定值时一般取0.5。相关实测数据显示， η 的值基本在0.6~0.75之间^[18]，取0.5含有一定安全裕度。

“圆环截面”法将金属护层视为空心圆环计算截面积，考虑铜带搭盖部分的影响引入系数 $1/(1-k)$ ，再考虑铜带间接触状况的影响引入系数 η 。相对于前面两种方法，式(5)考虑的因素更全面，需要提供的特性参数也更多。

1.2.2 金属丝绕包护层

金属丝绕包也是电力电缆中常用的护层结构型式，总的护层截面积可视为单丝截面积之和，见式(6)

$$S=\frac{\pi}{4}md^2 \quad (6)$$

式(6)中： m 为金属丝根数； d 为单丝直径，m。

1.2.3 管状护层

高压/超高压电缆的金属护层通常为管状结构，以起到径向防水作用，常用材料为铝、铅和铜，有波纹型和平滑型两种。

管状金属护层的横截面积为

$$S=\pi d_m \delta \quad (7)$$

对于波纹型金属护层， $d_m=(d_{oc}+d_{ic})/2$ ，其中， d_{oc} 和 d_{ic} 分别为与金属护层波峰及波谷相切的假定同心圆柱体的直径，m。

1.3 交流电阻解析计算方法

1.3.1 理论基础

对于载流体而言，交流电阻与直流电阻存在差异的根本原因在于：在电磁场的作用下，载流体中发生了涡流现象，导致电流在载流体的横截面上分布不均匀^[20-21]，产生大家熟知的两种效应：集肤效应和邻近效应。

当载流体中通过直流电流时，在其横截面上电流均匀分布。而当载流体中通过交变电流时，越接近其表面，电流密度越大，整个横截面上电流分布不均匀，这种现场被称为集肤效应。此外，由于相邻其他载流体中的电流影响而导致电流分布不均匀的现象被称为邻近效应，此时，电流将趋向于分布在载流体相邻一侧或者远离一侧。

由于集肤效应和邻近效应的存在，交流下，载流体中电流通过的有效面积减小，有效电阻增大。

1.3.2 解析计算方法

对于金属护层的交流电阻，尚未有可参考的理论计算方法。在IEC 60287^[6]标准中，针对带有中心油道的充油电缆，推荐了空心导体的交流电阻计算公式。从结构形态上看，金属护层可视为同轴壳层结构，与空心导体类似，故可借鉴其电阻计算方法。

单位长度金属护层的交流电阻为

$$R_{AC}=R_{DC}\cdot(1+Y_S+Y_P) \quad (8)$$

式(8)中： R_{AC} 为金属护层的交流电阻， Ω/m ； Y_S 为集肤效应因数； Y_P 为邻近效应因数。

集肤效应因数为：

$$Y_S=\frac{x_s^4}{192+0.8x_s^4} \quad (9)$$

$$x_s^2=\frac{8\pi f}{R_{DC}}\times 10^{-7}k_s \quad (10)$$

式(10)中： f 为电源频率，Hz； k_s 值由式(11)进行计算

$$k_s=\frac{d_o-d_i}{d_o+d_i}\left(\frac{d_o+2d_i}{d_o+d_i}\right)^2 \quad (11)$$

3根单芯电缆或三芯电缆的邻近效应因数为：

$$Y_p = \frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} \left(\frac{d_o}{S} \right)^2 \times \left[0.312 \left(\frac{d_o}{S} \right)^2 + \frac{1.18}{\frac{x_p^4}{192 + 0.8x_p^4} + 0.27} \right] \quad (12)$$

$$x_p^2 = \frac{8\pi f}{R_{DC}} \times 10^{-7} k_p \quad (13)$$

式(12)、(13)中： S 为电缆相间距，m。对于三角形敷设，电缆各相通常采用对称分布，相间距相同，均为 S ；而在平行排列情况下， S 为相邻相的间距；若相邻相间距不同，分别为 S_1 和 S_2 ，则 $S = \sqrt{S_1 \cdot S_2}$ 。

1.4 实例计算及影响因素分析

以26/35 kV单芯XLPE电缆为例，主要结构参数见表1，金属护层为铜带绕包结构，搭盖率为15%。三相电缆呈正三角形敷设，相间距为250 mm，金属护层工作温度为80 °C，横截面积采用“圆环截面”法计算。鉴于文中重点是研究金属护层的交、直流电阻差异，后文将以交直流电阻比(交流电阻与直流电阻的比值)为特征参数进行展示和讨论。

表1 电缆结构参数
Table 1 Structure parameters of the cable

结构	厚度/mm	外径/mm
线芯	—	20.6
XLPE 绝缘层	12.7	46.0
金属护层	1.0	48.0
外护层	5.6	59.2

1.4.1 不同材料的护层交直流电阻比

电力电缆金属护层常用材料为铜、铝或铅，其电阻率分别为 1.72×10^{-8} 、 2.83×10^{-8} 、 $2.14 \times 10^{-7} \Omega \cdot m$ 。首先，针对3种不同材料，讨论其它条件相同时，电缆护层交直流电阻比随频率变化的关系，见图2。

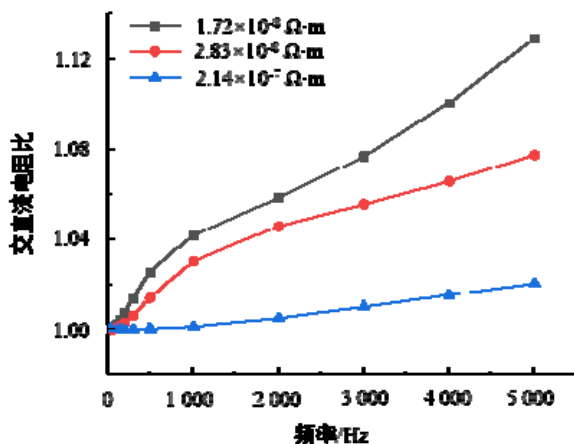


图2 不同材料金属护层的交直流电阻比随频率的变化
Fig. 2 The AC/DC resistance ratios of metal sheath made of different materials at different frequencies

图2显示，首先，1 mm厚度金属护层的交直流电阻比均较小，工频下接近于1，5 000 Hz频率下也未超过1.15；其次，不同材料构成的金属护层，其交直流电阻比均随频率增大而增大，但变化趋势略有不同：材料电阻率越小，曲线上升越快；再次，相同频率下，材料电阻率越小，交直流电阻比越大。

这说明，对于导电性能越好的金属护层，越要考虑其交流有效电阻与直流电阻的差异，特别是在频率较高的场合应用时。

1.4.2 不同厚度的护层交直流电阻比

因为导电性能越好的金属护层交、直流电阻差异越大，因此，以铜护层为例，改变其厚度，获得不同厚度铜护层的交直流电阻比随频率的变化关系，见图3。

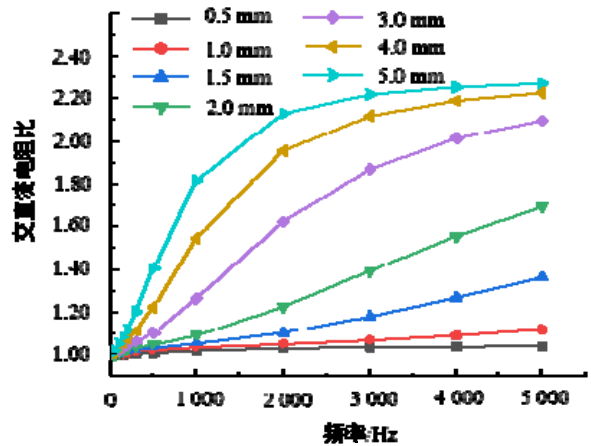


图3 不同厚度铜护层的交直流电阻比随频率的变化
Fig. 3 The AC/DC resistance ratios of copper sheath with different thicknesses at different frequencies

从图3可以看出，首先，不同厚度铜护层的交直流电阻比均随频率增大而增大，且厚度越大的护层，交直流电阻比的数值越大，随频率变化越显著；其次，随护层厚度增大，变化曲线逐渐显示出饱和趋势，如厚度为5.0 mm的铜护层，当频率为3 000 Hz以上时，交直流电阻比将达到2.2并趋于稳定。这说明，厚度较大的金属护层在高频场合应用时交流有效电阻显著高于直流电阻。

接下来，讨论工频下铜护层的交直流电阻比随护层厚度的变化，见图4。从图4可以看到，虽然交直流电阻比随着铜护层厚度的增加而指数式增大，但当厚度为5.0 mm时，交直流电阻比也未超过1.02。电力电缆中金属护层的厚度通常不超过5.0 mm，这说明，常规金属护层在交流电缆正常工作情况下的交流有效电阻与直流电阻差异不大。

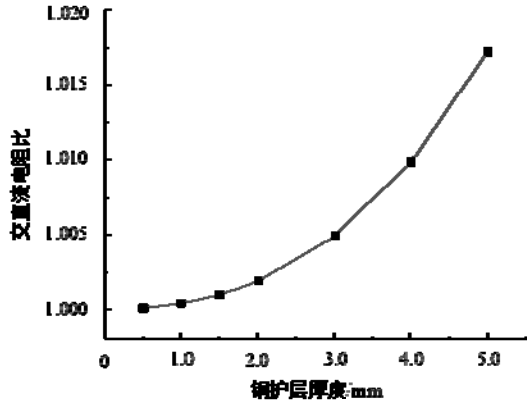


图4 工频下交直流电阻比随铜护层厚度的变化

Fig. 4 The AC/DC resistance ratio of copper sheath with different thicknesses at 50 Hz

1.4.3 不同间距的护层交直流电阻比

以1 mm厚度铜护层为例, 改变电缆相间距, 获得不同相间距下, 铜护层交直流电阻比随频率的变化关系, 见图5。图5中最小相间距为59.2 mm, 为电缆外径, 对应于接触式紧密排列情况。

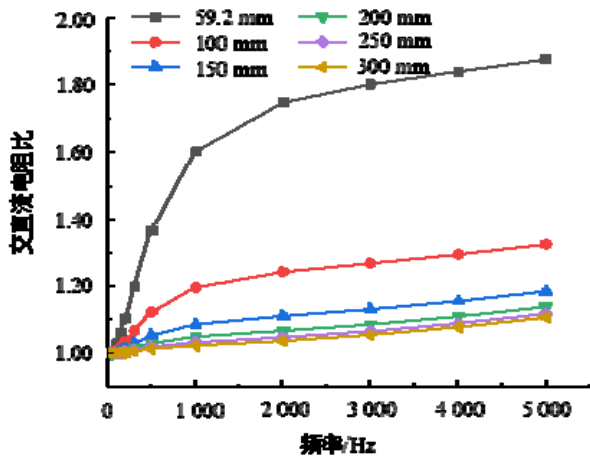


图5 不同相间距时铜护层交直流电阻比随频率的变化

Fig. 5 The AC/DC resistance ratios of copper sheath with different phase spacing at different frequencies

从图5可以看出, 铜护层的交直流电阻比随电缆相间距的增大而减小, 且相对变化幅度也随相间距增大而减小。电缆相间距的改变, 主要影响邻近效应, 电缆排列得越近, 相邻电缆之间的电磁影响就越大, 邻近效应越显著。工频电压下, 即使是接触式紧密排列, 交直流电阻比也未超过1.01; 但在高频电压下, 交直流电阻比受间距的影响变得显著; 根据图5, 将相间距增大至200 mm及以上, 有利于抑制高频电压下的护层交流电阻增大。

1.5 护层交直流电阻比的数值计算

利用专业有限元软件, 以解析计算所用表1中电缆结构为对象建立数值计算模型。假设电缆各层接触良好, 忽略层间接触热阻; 假设电缆无限长, 温度分布已达稳态, 只考虑径向热量传递。1 mm厚度的铜护层, 模型中采用平滑圆管进行模拟。

3根单芯电缆呈正三角形分布, 间距为250 mm; 敷设于土壤中。本节旨在研究金属护层横截面上的电流分布, 从而确定其交直流电阻, 并与解析计算结果进行对比, 故在仿真模型中将热源施加于电缆线芯上, 使金属护层温度达到80 °C; 同时将电流激励直接施加于金属护层上。改变系统频率, 获得金属护层交直流电阻比随频率变化的关系, 见图6, 图6中同时给出了相同条件下的解析计算结果。

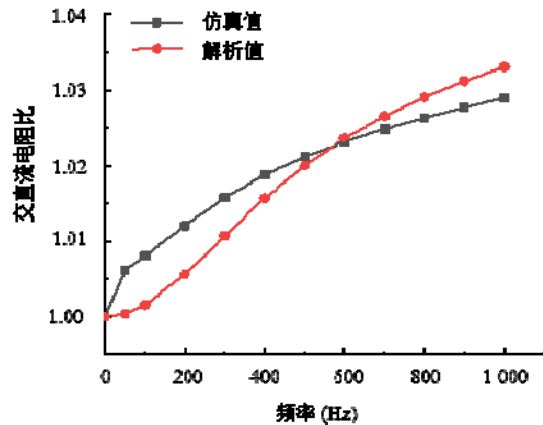


图6 铜护层交直流电阻比随频率变化的仿真与解析结果

Fig. 6 The AC/DC resistance ratios of copper sheath under different frequencies calculated analytically and numerically

对比图6中两条曲线可知, 不同频率下, 解析与数值计算所得铜护层的交直流电阻比的差异较小, 未超过1%。由此表明, 前文所述解析公式可用于计算电缆金属护层的交流电阻并具有一定的准确度。

2 金属护层电阻测量技术

2.1 测量方法及测试线路

目前国内外还未有专门用于电缆金属护层电阻测量的设备。考虑到金属护层在材料和电气性能等方面与线芯存在相似性, 借鉴CIGRE TB 272^[9]中推荐的线芯电阻测量方法, 开展针对金属护层的测试研究。测量线芯交流电阻的推荐方法包括: 热测法和电测法^[9]。热测法是通过测量温度差以表征线芯损耗、从而获得线芯电阻, 这种方法在稳态或暂态条件下均可应用, 但可重复性差, 精度低, 耗时长。电测法通过测量线芯两端的电压、电流及两者相角差, 获得线芯的交流电阻。相对而言, 电测

法简单，易操作，但需注意电磁干扰的影响。

文中基于电测法提出一种可对短段或成盘电缆进行金属护层电阻测量的方法。所需设备主要包括：提供小电流输入的恒流源、能够同时测量幅值及相角的电流和电压测试设备、夹具和连接线。测试连接示意图见图7，恒流源提供的小电流从电缆一端的金属护层流入，另一端流出，之后，通过金属护层和铠装层之间的短接线从铠装层反向流回恒流源。电流测试设备串联在回路中，而电压测试设备并联在金属护层两端，分别对电流和电压的幅值及相角进行测量。金属护层电阻为

$$R = \frac{U}{I} \cos \theta \quad (14)$$

式(14)中： U 为金属护层两端的电压幅值， V ； I 为流经金属护层的电流幅值， A ； θ 为电压与电流的相角差。

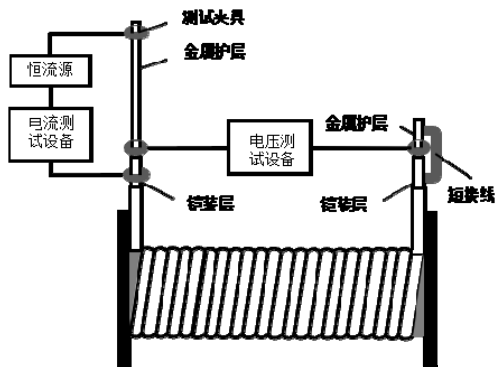


图7 金属护层电阻测试线路示意图
Fig. 7 Diagram of the measuring circuit used for the resistance of cable's metal sheath

为提高测量精度，本测试线路中特别设计了以下几点：①在电缆端头金属护层上，电压测试夹具位于电流测试夹具内侧，且间距不小于50 cm，以使电压测试处电流分布已基本均匀。②采用主体部分由两块铜材制成的特制夹具，见图8，套装在护层外表面上，通过半球形凸起设计增强与金属护层的有效接触，使电流沿金属护层的圆周面均匀分布，且通过螺杆与螺帽的配合调节，满足不同尺寸电缆的护层测试需要。③测试电流从金属护层流入，经铠装层流回，铠装层与金属护层中的电流大小相等方向相反，可有效屏蔽外界电磁干扰，提高测试精度。在实际电缆中，被测金属护层外的任何同轴金属结构都可以充当图8中铠装层的功能。

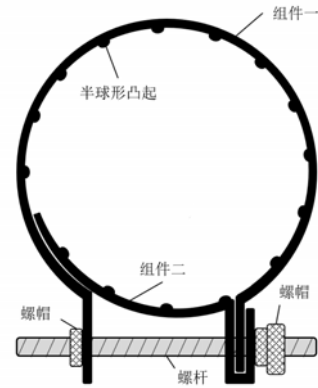


图8 测试夹具结构示意图
Fig. 8 Structural diagram of the test fixture

此方法可用于短段或成盘电缆，并可对不同结构型式及尺寸的电缆金属护层进行测量，操作简单，实用性强。恒流源提供毫安级电流，避免金属护层温度升高导致测试结果偏大。基于所施加的电流频率不同，可完成对金属护层直流或交流电阻的测量。

2.2 测量实例

采用文中提出的测量方法对不同型号的3根电缆进行实测，电缆长度分别为915、85、985 m。获得金属护层的直流电阻及工频交流电阻，并计算得交直流电阻比，见表2。3根电缆均卷绕于电缆盘上，基本结构类似，其中，金属护层均为铜带绕包结构，厚度及宽度分布为0.12 mm和40 mm，单层绕包，搭盖率为15~18%。

表2 不同型号电缆金属护层电阻测量值
Table 2 DC and AC resistance values of metal sheath measured on different cables

电缆型号	直流电阻/ Ω	交流电阻/ Ω	交直流电阻比
YJV62-26/35 kV- 1×95 mm ²	1.358 6±0.003 8	1.376 7±0.001 9	1.013
YJV62-26/35 kV- 1×120 mm ²	0.130 6±0.000 2	0.133 9±0.00 02	1.025
YJV62-8.7/15 kV- 1×240 mm ²	1.730 4±0.00 24	1.780 5±0.003 2	1.028

表2中结果显示，三种型号电缆的铜护层交直流电阻比在1.01至1.03之间，即交流电阻相比于直流电阻增加幅度不大。

为了验证测量结果的准确性，以YJV62-26/35 kV-1×120 mm²电缆为例计算其铜带绕包护层的电阻。其中，电缆长度为85 m，铜护层截面积采用“圆环截面法”计算，搭盖率取15%，接触电阻系数取0.5，计算得直流电阻为129.198 m Ω ，工频交流电阻为129.209 m Ω 。与表2中的测量值对比可知：直流电阻的相对偏差为1.08%，交流电阻的相对偏差为

3.62 %。也就是说，交流电阻的偏差相比于直流电阻稍大。

3 讨论

交流下，电流密度在载导体横截面上不均匀分布、从而导致交流电阻相比于直流电阻增大的程度可结合透入深度进行定性分析。透入深度为

$$\Delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\gamma}} \quad (15)$$

式(15)中： Δ 为透入深度，为载导体中电流密度衰减为表面值的 $1/e$ 时的深度， m ； ω 为角频率， $\omega=2\pi f$ ， rad/s ； μ 为磁导率， H/m ； γ 为电导率， S/m 。以铜为例，50 Hz 下，其透入深度约为 9.33 mm。

可以预期，对于确定厚度的载导体，透入深度越小，电流密度分布的不均匀程度越高，交直流电阻比越大；而对于相同材料的载导体，随着其厚度增加，电流分布不均匀的影响将变得显著，特别是当厚度大于透入深度之后，交流电阻将具有较大的数值。

由式(15)可知，透入深度与电源频率及材料电导率成反比，这也解释了1.4节中交直流电阻比随材料电导率增大而增大，随频率增大而增大的现象。另一方面，金属护层厚度通常较小，比集肤深度小得多，这也是为什么在文中所讨论的案例中，工频下交流电阻都仅比直流电阻略大。

电缆相间距的影响主要体现在邻近效应上。邻近效应的本质和集肤效应相同，都是涡流效应，即相邻载导体中的电流变化导致本导体中产生了涡流现象，电流密度趋向于在某一侧分布，导体的交流有效电阻增大。显然，随着距离增大，导体之间的相互影响减弱，电流密度逐渐恢复均匀分布状态，交流电阻趋近于直流电阻。

从文中的计算及测量结果来看，1.3.2节中的解析公式可用于对金属护层的集肤效应及邻近效应进行较为准确的定量评估，从而获得金属护层的交流电阻。

2.2节中的对比显示，测量值略大于计算值，推测可能有以下原因。

首先，测试过程中虽然已经采用了打磨金属护层表面、增大夹具与电缆之间的夹紧力等措施，但接触电阻的影响可能无法完全消除。

其次，成盘电缆堆放于生产车间，周围有很多正在工作的大型设备，而本测试的电压、电流幅值都很小，极易受到电磁干扰影响。在有条件情况下，建议在屏蔽室中进行测试，以提高测量精度。

最后，解析法计算时邻近效应系数是按照3根

单芯电缆相邻排列来考虑的，而对于卷绕在电缆盘上的成品电缆，邻近效应的影响可能更大，这也导致测量值比理论计算值偏大。

总的来说，文中提出的测试方法能够对电力电缆金属护层的交、直流电阻进行较为准确的测量，误差在工程允许范围内。

4 结论

文中主要针对电力电缆金属护层的交、直流电阻计算与测量展开研究，获得以下结论：

1)金属护层的交直流电阻比随材料电导率、护层厚度、电源频率的增大而增大，随电缆线间距的增大而减小。对于交流电缆中厚度不超过5 mm的常规金属护层，工频下其交直流电阻比未超过1.02，但kHz频率下可能达到2.0。

2)文中提出的近似解析公式可用于对不同材料、结构及尺寸的电缆金属护层的直流及交流电阻的评估计算。

3)文中建立的测试方法能够对电力电缆金属护层的交、直流电阻进行较为准确的测量，操作简单，易于调控；且可在成盘电缆上直接应用，工程适用性强。

参考文献：

- [1] 陈曼虹. 电力电缆金属屏蔽的截面积及其短路热稳定要求[J]. 电气技术, 2013(12): 105-106.
CHEN Manhong. Requirements for metallic screen size and thermal short-circuit of power cable[J]. Electrical Engineering, 2013(12): 105-106.
- [2] 王晓东, 宣天鹏. 电缆屏蔽材料的种类及应用[J]. 安全与电磁兼容, 2015(1): 76-79.
WANG Xiaodong, XUAN Tianpeng. Type and application of EMS materials for cables[J]. Safety & EMC, 2015(1): 76-79.
- [3] 蒲丽娟, 刘念, 刘航宇, 等. 铜屏蔽层间隔缠绕引发电力电缆过热的故障分析与仿真计算[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 157-162.
PU Lijuan, LIU Nian, LIU Hangyu, et al. Analysis and simulation calculation of power cable overheating fault caused by copper shield interval winding[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 157-162.
- [4] 徐刚, 吴炯. 中高压电力电缆金属屏蔽结构特性分析[J]. 电线电缆, 2004(5): 19-22.
XU Gang, WU Tong. Analysis of the constructional characteristic of the metal screen used in MV/HV power cables[J]. Wire & Cable, 2004(5): 19-22.
- [5] 高建堂. 测量电力电缆金属屏蔽层电阻和导体电阻比的方法和意义[J]. 科技创新导报, 2012(30): 74.
GAO Jiantang. Method and significance of measuring resistance ratio between metal shielding layer and conductor of power cable[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2012(30): 74.
- [6] Electric cables-calculation of current rating-Part 1: Current rating equations (100% load factor) and calculation of losses: IEC 60287-1-1: 2014[S]. 2014.

- [7] DOUGLASS D, GAUNDRY M, SEPPA T, et al. Alternating current (AC) resistance of helically stranded conductors[J]. *Electra*, 2008(237): 72-80.
- [8] SUZUKI H, KANAOKA M. Theoretical investigation on skin effect factor of conductor in power cables[J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2008, 165(1): 18-34.
- [9] CIGRE TB 272. Large Cross-Sections and Composite Screen Design[R]. France: CIGRE Working Group B1.03. 2005.
- [10] RYDLER K, SJOBERG M, SVAHN J.A measuring system of conductor AC and DC resistance[C]//8th International Conference on Insulated Power Cables. France: [s.n.], 2011: A.8.1.
- [11] SCHRDER G, KAUMANN S, PLATH R, et al. Advanced measurement of ac resistance on skin-effect reduced large conductor power cables[C]//8th International Conference on Insulated Power Cables. France: [s.n.], 2011: A.8.2.
- [12] 高 岭. 大截面XLPE 电缆导体交流电阻的测量技术研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2013.
GAO Ling. Study on measurement technology of conductor AC resistance of large cross-section XLPE cable[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2013.
- [13] Calculation of thermally permissible short-circuit currents, taking into account non-adiabatic heating effects; IEC 60949: 1988[S]. 1988.
- [14] DAI D, ZHANG X H, WANG J J. Calculation of AC Resistance for Stranded single-core power cable conductors[J]. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2014, 50(11): 1-4.
- [15] PATEL R, PREMKUMAR S, AMBADE A, et al. AC resistance calculation of litz wire and its modeling with FEMM[C]//2016 IEEE International Conference on Recent Trends in Electronics, Information and Communication Technology. New York: IEEE, 2016: 692-696.
- [16] 郑建康. 35 kV 单芯电缆金属屏蔽层截面选择应注意的问题[J]. *高电压技术*, 2004, 30(z1): 31-38.
ZHENG Jiankang. The selection of section of metal shield layer of single core cable[J]. *High Voltage Engineering*, 2004, 30(z1): 31-38.
- [17] 黄 海. 中压单芯电力电缆金属屏蔽结构的选择[J]. *电气技术*, 2013(7): 74-75.
HUANG Hai. Choice of metallic shield in medium voltage single core power cables[J]. *Electrical Engineering*, 2013(7): 74-75.
- [18] 朱欣娣, 武宇波, 魏莹莹. 中压交联电缆金属屏蔽层的几个关键问题的讨论[J]. *电线电缆*, 2009(4): 11-13.
ZHU Xinti, WU Yubo, WEI Yingying. Discussion on some problems about the metallic shield in MV XLPE cables[J]. *Wire & Cable*, 2009(4): 11-13.
- [19] Short circuit performance of metallic shields and sheaths on insulation cables: ICEA P-45-482—2017[S]. 2017.
- [20] 刘子玉. 电气绝缘结构设计原理[M]. 北京: 机械工业出版社, 1981.
LIU Ziyu. Design principle of electrical insulation structure[M]. Beijing: China Machine Press, 1981.
- [21] CASTELLI F, MACIOTTA L, RINER P. A new method of measuring the AC resistance of large cable conductors[J]. *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, 1977, 96(2): 414-422.

韩 啸(1992—), 男, 硕士, 工程师, 主要从事超/特高压电缆与电气绝缘方面的研究 (E-mail: 1062278235@qq.com)。

刘 英(1976—), 女, 博士, 副教授, 从事电气绝缘结构设计、电力电缆及绝缘测试技术研究 (E-mail: candyly@mail.xjtu.edu.cn)。