

## Study on the Impedance Characteristics of Low Voltage Cables in Harmonic Environment\*

XIANG Enxin<sup>1\*</sup>, WANG Ke<sup>1</sup>, BU Wei, NIE Ding<sup>1</sup>, ZHOU Maokun<sup>2</sup>, XI Youjian<sup>3</sup>

(1. Yunnan Electric Power Research Institute, Yunnan Power Co., Ltd., Kunming 650217, China;

2. Kunming Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Co., Ltd. Kunming 650118, China;

3. Kunming Cable Group Co., Ltd., Kunming 650503, China)

**Abstract:** Cables are widely used in low-voltage distribution networks. It is very important to study the harmonic characteristics of power cables in low-voltage distribution systems. Based on circuit theory, the calculation methods of cable resistance and reactance in harmonic environment were analyzed. An experimental method for calculating cable full matrix impedance at harmonic frequency was proposed, and the influence of different parameters on cable resistance and reactance was explored. The harmonic impedance of the cable was measured experimentally and compared with the calculated results of the formula. The results show that the cable resistance increases with the increase of harmonic number, while the cable inductance decreases with the increase of harmonic number. The approximate formulas for calculating the cable harmonic impedance have different accuracy for single-core cable and multi-core cable, respectively. The research results of this paper have guiding significance for the research of cable characteristics.

**Key words:** power cable; harmonic impedance characteristics; experimental calculation; full matrix impedance; installation mode

EEACC: 8130                      doi: 10.3969/j.issn.1005-9490.2020.02.014

## 低压电缆在谐波环境下的阻抗特性研究\*

项恩新<sup>1\*</sup>, 王 科<sup>1</sup>, 卜 威<sup>2</sup>, 聂 鼎<sup>1</sup>, 周懋坤<sup>2</sup>, 习有建<sup>3</sup>

(1. 云南电网有限责任公司电力科学研究院, 昆明 650217; 2. 云南电网有限责任公司昆明供电局, 昆明 650217;

3. 昆明电缆集团股份有限公司, 昆明 650503)

**摘 要:** 电缆广泛用于低压配电网中, 研究低压配电系统中电力电缆的谐波特性十分重要。基于电路理论对电缆在谐波环境下的电阻和电抗计算方法进行分析, 提出了在谐波频率下求解电缆全矩阵阻抗的实验测算方法, 并探究不同参数对电缆电阻和电抗的影响。对电缆谐波阻抗进行实验测算并与公式计算结果进行对比, 结果表明: 电缆电阻会随谐波次数的增加而增大, 而电缆电感则随谐波次数的增加而减小, 电缆谐波阻抗近似计算公式对于单芯电缆和多芯电缆分别具有不同的准确精度, 论文研究成果对电缆特性研究具有指导意义。

**关键词:** 电力电缆; 谐波阻抗特性; 实验测算; 全矩阵阻抗; 安装方式

中图分类号: TM247                      文献标识码: A                      文章编号: 1005-9490(2020)02-0315-06

随着电力系统中非线性设备的投运, 谐波含量不断增加, 谐波分析越来越多地被用于解决和避免电力系统中的谐波相关问题, 电力电缆电气参数在谐波环境下的准确性是相关电气计算及继电保护整定的重要基础<sup>[1]</sup>。因此, 对配电电缆在谐波频率下

的电路阻抗进行分析, 成为当前的研究热点之一。

杨春森<sup>[2]</sup>对英国标准 BS 7671 制造的电缆阻抗数据进行归纳, 包括: 导体材料, 绝缘材料, 导体尺寸和安装方法, 并将工频 50 Hz 下的阻抗数据用于推断谐波频率的电缆阻抗。Robert A 等<sup>[3]</sup>认为电缆电

感的大小会随着频率变化,而电阻的大小只与集肤效应系数有关。然而人们发现在谐波频率甚至是工频状态下,电阻和电抗的理论值与实际值都存在显著差异。徐林青<sup>[4]</sup>提出了一种大截面积铝芯导体直流电阻的测量方法,并对测量过程的相关影响因素以及测量结果评价指标进行了详细的论述。胡纪五等<sup>[5]</sup>提出了一种电缆绝缘电阻的在线测量方法,通过对电压、电流进行两次测量,并运用微机进行信号处理实现绝缘电阻的在线测量。古毅<sup>[6]</sup>对三相低压多芯电力电缆阻抗的计算原理进行分析,并在此基础上根据多芯电力电缆结构参数及我国低压配电系统的特点,给出了缆芯各种排布方式下电缆阻抗的计算方法及其适用条件。李强等<sup>[7]</sup>提出了金属层两端接地以及单端接地方式下的电缆阻抗参数计算方法,并对不同排列方式及金属层不同接地方式下的电缆阻抗参数差异性进行分析,为相应的电缆阻抗参数计算及设计工作提供了参考依据。

事实上,当电缆中的谐波电流不对称或电力电缆处于不同物理结构时,上述文献所应用的谐波阻抗数据是不够准确的。为此,本文对低压铜绞线电缆的谐波特性进行研究。首先对电缆电阻和电抗的计算公式进行分析讨论,提出了一种在谐波频率下求解电缆全矩阵阻抗的实验方法。通过对单芯和多芯电缆样品进行实验测试,得到不同谐波频率下的正序阻抗比和负序阻抗比,探究谐波次数,电缆安装方式,电缆尺寸、注入电流的序列类型等参数对电缆电阻和电感的影响。最后,将实验测量结果与 BS 7671 中给出的数据以及近似公式计算值进行比较,对使用电缆阻抗近似公式提出了相应建议。

## 1 电缆阻抗的计算

XLPE 铜绞线电缆的基本结构如图 1 所示,其由许多直径为几毫米的电线构成,绞线由绝缘材料覆盖,并沿电缆轴线连续旋转<sup>[8]</sup>。如果电缆是多芯铠装电缆,则电缆导体由一层钢丝包裹,由于存在涡流损耗,单芯电缆一般不配备磁性铠装层。

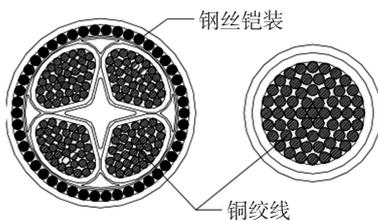


图 1 铜绞线电缆的横截面

### 1.1 电缆电阻的近似计算

电缆电阻作为关键电气参数之一,会对电缆额

定值造成影响。由于电缆存在集肤效应和邻近效应,使得导体内电流分布不均匀,电缆电阻会随着谐波频率的增加而增大。为此,基于工频状态下电缆电阻的通用计算公式<sup>[9]</sup>,推出了电缆导体在  $h$  次谐波下的电阻计算公式为:

$$R_h = R_{DC}(1 + y_{s,h} + y_{p,h})(1 + \lambda_{2,h}) \quad (1)$$

式中: $R_{DC}$ 为电缆直流电阻; $y_{s,h}$ 为  $h$  次谐波下的趋肤效应系数; $y_{p,h}$ 为  $h$  次谐波下的邻近效应系数; $\lambda_{2,h}$ 为钢丝铠装电缆  $h$  次谐波下的损耗因数。

令  $x_{s,h}^2 = y_{s,h}^2 = 8\pi f_1 h / 10^7 R_{DC}$ , 得到对称工况下,趋肤效应系数和邻近效应系数的计算公式如式(2)、式(3)所示<sup>[10-11]</sup>:

$$y_{s,h} = \begin{cases} \frac{x_{s,h}^4}{193 + 0.8x_{s,h}^4} & 0 < x_{s,h} \leq 2.8 \\ 0.0563x_{s,h}^2 - 0.0177x_{s,h} - 0.136 & 2.8 < x_{s,h} \leq 3.8 \\ \frac{x_{s,h}}{2\sqrt{2}} - \frac{11}{15} & 3.8 < x_{s,h} \end{cases} \quad (2)$$

$$y_{p,h} = \frac{my^2 G_{p,h}}{2 - 5y^2 H_{p,h} / 12} \quad (3)$$

式中: $m=2.5$ 表示其为三芯电缆, $m=3$ 表示其为3根单芯电缆,式(3)中,系数  $G_{p,h}$ 、 $H_{p,h}$  的计算公式为:

$$G_{p,h} = \begin{cases} \frac{11x_{p,h}^4}{704 + 20x_{p,h}^4} & 0 < x_{p,h} \leq 2.8 \\ -0.08x_{p,h}^2 + 0.72x_{p,h} - 1.04 & 2.8 < x_{p,h} \leq 3.8 \\ \frac{x_{p,h}}{4\sqrt{2}} - \frac{1}{8} & 3.8 < x_{p,h} \end{cases} \quad (4)$$

$$H_{p,h} = \begin{cases} \frac{1}{3} \cdot \frac{1 + 0.0283x_{p,h}^4}{1 + 0.0042x_{p,h}^4} & 0 < x_{p,h} \leq 2.8 \\ 0.0384x_{p,h}^2 + 0.119x_{p,h} + 0.095 & 2.8 < x_{p,h} \leq 3.8 \\ \frac{2x_{p,h} - 4.69}{x_{p,h} - 1.16} & 3.8 < x_{p,h} \end{cases} \quad (5)$$

$$y = d_c / s \quad (6)$$

式中: $s$ 为电缆导体中心间距, $d_c$ 为等截面圆绞线直径。对于多芯电缆,可以近似表示为<sup>[12]</sup>:

$$\begin{cases} d_c = d_s \sqrt{(4N-1)/3} \\ s = d_c + 2t \end{cases} \quad (7)$$

式中: $d_s$ 为铜绞线的直径,单位:mm; $N$ 为铜绞线的数量, $t$ 为导体绝缘厚度,单位:mm。

当电缆存在钢丝铠装层时,会产生磁滞损耗和

附加涡流损耗<sup>[13]</sup>。对于三芯电缆,在谐波频率下钢丝铠装层的损耗计算公式为:

$$\lambda_{2,h} = \frac{0.358 \frac{R_a (2r_1)^2}{R'_h \left(\frac{d_a}{d_a}\right)^2}}{1 + \left(\frac{2.77R_a 10^6}{2\pi f_1 h}\right)^2} \quad (8)$$

式中: $f_1$  为工频 50 Hz; $R_a$  为铠装电缆直流电阻; $R'_h$  为非铠装电缆  $h$  次谐波电阻; $r_1$  为三芯扇形电缆导体的外切半径; $d_a$  为铠装层的平均直径。若电缆为四芯铠装电缆,则式(8)中的系数  $\lambda_2$  需要乘以 1.02 倍<sup>[14]</sup>。

### 1.2 电缆电感的近似计算

与电缆电阻不同,在工频下,每相导体电感的近似公式如式(11)所示,其单位为  $\mu\text{H}/\text{m}$ <sup>[15]</sup>。

$$L = K + 0.2 \ln\left(\frac{2s_m}{d_c}\right) \quad (9)$$

式中: $s_m$  是电缆导体中心间距的几何平均值,常数  $K$  是每根导体的自感系数,其近似值如表 1 所示。由多芯电缆中导体的螺旋结构可知,三芯或四芯电缆的电感值约等于从式(9)得到的电感的 1.02 倍。

表 1 不同导线数量绞线的自感系数值

导线数量	$K$
3	0.07 78
7	0.06 42
19	0.05 54
37	0.05 28
<61	0.05 14

需要注意的是,电感计算式(9)未考虑钢丝铠装对其的影响,其主要用于计算由平衡三相交流电流供电的电缆平均电感,工频状态下电缆电感或电抗的粗略计算。

## 2 电缆阻抗的实验测量计算

若电缆中流过的电流三相对称且电缆几何结构对称,则每相平均电阻和有效电抗足以表征电缆系统。但是,在实际运行工况中,由于不对称谐波电流的存在,电缆系统并不对称。因此,引入  $h$  次谐波全阻抗矩阵  $Z_h$  进行谐波阻抗的分析:

$$Z_h = \begin{pmatrix} Z_{h,aa} & Z_{h,ab} & Z_{h,ac} \\ Z_{h,ab} & Z_{h,bb} & Z_{h,bc} \\ Z_{h,ca} & Z_{h,cb} & Z_{h,cc} \end{pmatrix} \quad (10)$$

采用单相电流注入法确定阻抗矩阵  $Z_h$  中的各个元素。图 2 为在 A 相和中性线(A-N)之间注入电流的等值电路模型。

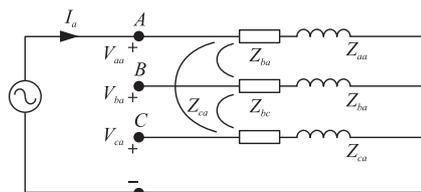


图 2 A-N 相电流注入下的电路模型

实验测量装置如图 3 所示,由 PWM 逆变器产生单相谐波电流,通过计算机控制谐波发生器以控制电缆电流中的谐波含量,使得电缆电流中 9 次谐波电流含量约为 5%,3 次谐波电流含量约为 20%,运用自耦变压器将电流大小调整至电缆额定电流的一半。对电缆电压  $V_{aa}$ 、 $V_{ab}$ 、 $V_{ac}$  以及电缆电流  $I_a$  进行实时采样测量,通过傅立叶变换提取测量电压  $h$  次谐波分量  $V_{h,aa}$ 、 $V_{h,ab}$ 、 $V_{h,ac}$  以及测量电流  $h$  次谐波分量  $I_{h,a}$ ,计算 A 相在  $h$  次谐波下的自阻抗  $Z_{h,aa}$  和互阻抗  $Z_{h,ab}$ 、 $Z_{h,ac}$ ,如下式所示:

$$\begin{cases} Z_{h,aa} = \frac{V_{h,aa}}{I_{h,a}} \Big|_{I_b=I_c=0} \\ Z_{h,ab} = \frac{V_{h,ab}}{I_{h,a}} \Big|_{I_b=I_c=0} \\ Z_{h,ac} = \frac{V_{h,ac}}{I_{h,a}} \Big|_{I_b=I_c=0} \end{cases} \quad (11)$$

同理,对 B 相和 C 相进行重复实验并测量计算,即可求得阻抗矩阵的其他元素。

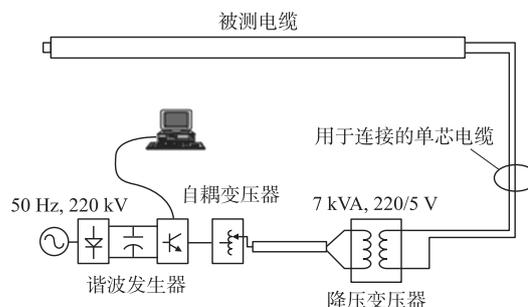


图 3 实验测量装置

## 3 实验及结果分析

实验采用 Dranetz PP1 电能质量分析仪测量电缆电压和电流,其输入端口的分辨率为 14 位。注入电流通过电流互感器记录,这些电流互感器在工频下的分辨率为 0.12 A,精度为  $\pm 0.05\%$ ,相位精度为 0.2%。由于电缆样本长度较短,电缆电压一般小于 1 V。为了提高电压的测量精度,实验使用增益为 10 的高精度前置放大器。

### 3.1 单芯电缆阻抗

选取 9 根完全相同的 400 mm<sup>2</sup> XLPE 绝缘单芯电缆进行单芯电缆阻抗实验,将其分为 3 组,这些电

缆长度为 7.7 m, 直径为 34 mm。电缆芯由直径为 25 mm 的铜绞线制成, 每根电缆由 61 根铜线组成, 其直流电阻的大小为 45.54  $\mu\Omega/m$ 。将每组电缆分别按照文献[2]中给出的电缆安装方法安装在非磁性表面上, 即: 水平等间隔式排布(间隔为一个电缆直径)、水平紧密式排布以及三叶形排布, 其安装结构示意图如图 4 所示。

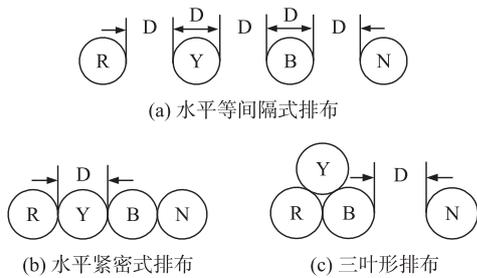


图 4 单芯电缆安装方法

对工频下测量得到的每组单芯电缆阻抗值取平均值, 同时将其与 BS 7671 标准给出的阻抗值以及基于式(1)~式(7)计算求得的阻抗值进行对比, 结果列于表 2 中。表 2 中的所有阻抗数据均按照规定转换为 20  $^{\circ}\text{C}$  下的线电压降 ( $\mu\text{V}/\text{A}/\text{m}$ )<sup>[2]</sup>。

表 2 单芯电缆的阻抗比较 单位:  $\mu\Omega/m$

电缆安装方式	BS 7671	测量值	计算值
三叶形	49.8+77.9j	50.7+80.7j	51.1+79j
水平紧密式	49.8+92.4j	50.9+94.1j	51.1+93.5j
水平等间隔式	49.8+139j	49.5+137j	48.2+137j

结果表明, 单线电缆阻抗实测值与 BS 7671 标准中的阻抗值具有较好的一致性, 二者的差异小于 2%, 这种差异可能是由于电缆样品和安装过程中的微小差别, 或者是测量误差造成的。从单芯电缆阻抗值的计算结果来看, 其最大误差不超过 3%, 证明解析计算公式的正确性。

实验测量并计算了 1~9 次谐波的全阻抗矩阵, 为便于讨论, 本文只对正序谐波阻抗测量值和零序谐波阻抗测量值进行讨论。将电缆电阻比  $R_k$  定义为:

$$R_k = R_h / R_{DC} \quad (12)$$

图 5 为电缆电阻比随谐波次数的变化特性曲线。由于电缆中存在涡流损耗, 电缆电阻比随谐波次数的增加而增大。当电缆按照水平等间隔方式进行排布时, 电缆电阻比的递增速率会有所减缓, 这是因为在较大的电缆间距下, 电缆的邻近效应被削弱。对比图 5(a) 和图 5(b), 可以看出, 当电缆安装方式为水平紧密式排布时, 其零序电阻比高于正序电阻比。这是由于靠近中性线的线路电缆具有更强的邻近效应所导致的, 中性线上流过的三倍电流和其他

两线电流使得该电缆的电流分布极不均匀, 导致其电阻大幅度增加。

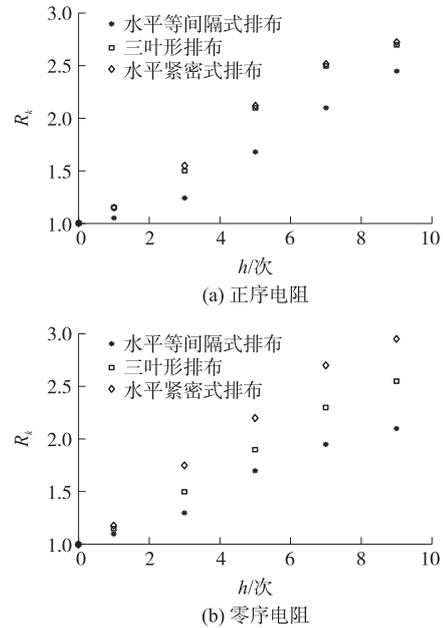


图 5 单芯电缆的谐波电阻

由于直流电感的参数值难以得到, 因此选择了工频下的电感值作为参考值, 定义电缆电感比  $L_k$  为:

$$L_k = L_h / L_{DC} \quad (13)$$

图 6 为电缆谐波电感随谐波次数的变化特性曲线。从图 6 的统计结果来看, 电缆谐波电感值随着谐波次数的增加而减少。这主要是因为电缆导体间的相互作用引起的, 当对电缆导体施加单相电流时, 其他导体内所产生的感应电流会减少与该电缆导体上的磁通量, 进而造成电路电感降低。这种感应电流削弱效随着频率的增加而增强, 而不会对直流电

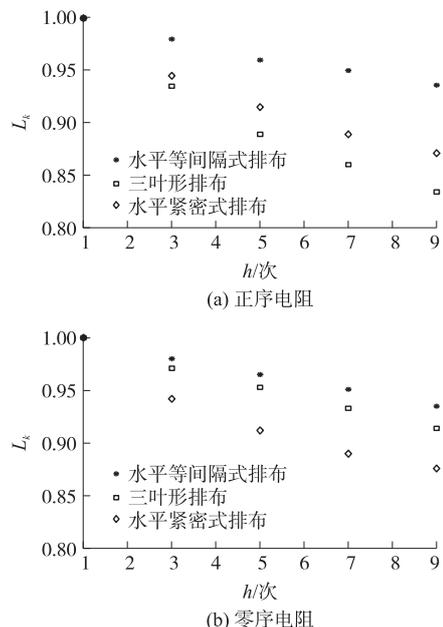


图 6 单芯电缆的谐波电感

产生影响。通常,当导体间的间距越小,电感的削弱效应越明显。如图 6 所示,其中三叶形电缆安装方式在正序电流条件下产生最小间距,而水平紧密式电缆安装方式在零序电流条件下产生最小间距。

此外,如果电缆导体尺寸增大或电缆内部存在金属部件,则电感的削弱效应也会变得显著,这会在下一节中进行讨论。

### 3.2 多芯电缆阻抗

选取 3 组样本的多芯 XLPE 铜绞线电缆样本进行阻抗实验,每组样本下的电缆数量为 3 根。这些电缆样本的基本参数是:样本 1 为 21 m 的 70 mm<sup>2</sup> 铠装电缆,样本 2 为 7.09 m 的 120 mm<sup>2</sup> 铠装电缆,样本 3 为 8.7 m 的 120 mm<sup>2</sup> 非铠装电缆。

表 3 为 3 组电缆样本的基本参数值,表中参数的定义如文中 2.2 节所述。

表 3 多芯电缆的基本参数值

电缆样本	电缆导体参数				
	$d_s/\text{mm}$	$N$	$t/\text{mm}$	$r_1/\text{mm}$	$R_{\text{DC}}/(\text{m}\Omega/\text{m})$
样本 1	2	18	1.1	12.45	0.265 5
样本 2	2	36	1.2	16.15	0.152 0
样本 3	2	36	1.2	16.15	0.152 0
电缆样本	电缆铠装层参数				
	$R_a/(\text{m}\Omega/\text{m})$	$d_a/\text{mm}$	$d_o/\text{mm}$		
样本 1	0.98	2.0	30.7		
样本 2	0.668 4	2.5	38.8		
样本 3	—	2.5	—		

与单芯电缆的实验研究类似,表中 4 给出了 20 ℃ 时工频下测量得到的每组多芯电缆线电压降平均值 ( $\mu\text{V}/\text{A}/\text{m}$ ),同时将其与 BS 7671 标准给出的阻抗值以及基于式(1)~式(7)计算求得的阻抗值进行对比。

表 4 多芯电缆的阻抗比较 单位:  $\mu\Omega/\text{m}$

电缆样本	BS 7671	测量值	计算值
样本 1	267+75j	268+99j	270+84j
样本 2	154+75j	157+95j	159+78j
样本 3	154+75j	155+80j	154+78j

从表 4 的结果来看,对于具有铠装层的电缆,电缆电阻和电抗测量值会受铠装层的影响,电缆电抗的测量值与 BS 7671 中给出的参考值以及计算值相比明显增加,而电阻测量值与另外二者的差异较小,总体差异小于 2%。非铠装电缆的电阻及电抗测量值与 BS 7671 中给出的参考值以及计算值具有较好的一致性。这主要因为计算公式(8)并未考虑电缆铠装层对电缆谐波阻抗的影响所导致的,而实际工况下,电缆铠装对谐波电感值的影响不容忽视。

图 7 为正负序工况下测得的电阻比随谐波次数变化特性曲线。由于涡流损耗和磁滞损耗会随谐波

频率的增加而增加,电缆电阻也随着谐波次数的增加而呈现单调上升的趋势。对比样本 1 和样本 2 的正序、零序测量电阻值来看,电阻比随电缆尺寸的增大而增大,120 mm<sup>2</sup> 铠装电缆的电阻比几乎是 70 mm<sup>2</sup> 铠装电缆的两倍;对比样本 2 和样本 3 的测量电阻值来看,因为四芯铠装电缆紧密的结构(存在邻近效应)且存在额外的铠装损耗,所以四芯铠装电缆的电阻远大于相同尺寸的单芯电缆。

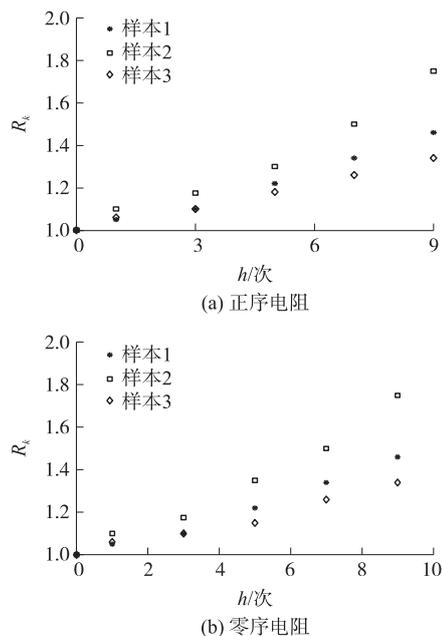


图 7 多芯电缆谐波电阻特性

电缆电感随谐波次数的变化特性曲线如图 8 所示。虽然 9 次谐波下的差距不到 5%,但是总体而言,电缆电感的比值随谐波次数的增加而减小。电缆电感的降低主要是由于相邻导线间的交互作用以

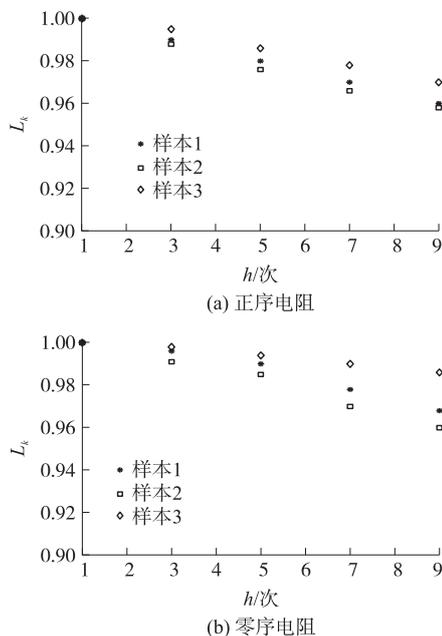


图 8 多芯电缆谐波电感特性

及电缆铠装层的存在所导致的:相邻导体间的感应电流造成的削弱效应与单芯电缆类似;由于多芯电缆铠装层的存在,随着电流谐波频率增加,电缆铠装层逐步向纯导电导体方向发展。因此,电缆电感随谐波次数的增加而减小。

## 4 结 论

本文应用单相电流注入法对低压铜绞线电缆的谐波阻抗进行实验研究,该方法可用于建立各种低压电缆谐波频率全矩阵阻抗数据库,得到的主要结论如下:

(1)基于式(1)计算安装在非磁性表面上的单芯电缆的谐波电阻,其具有较好的计算精度;然而,对于多芯电缆而言,由于难以量化电缆中部分绞合导线的邻近效应,多芯电缆电阻的计算结果一般较高。式(9)对于计算单芯电缆电感值具有良好的精度,但对于存在铁磁材料的多芯电缆,该计算公式求解得到的电缆电感值差异较大。

(2)电缆的电阻和电感值会随着频率的变化而变化。由于电缆中存在涡流损耗和磁滞损耗,电阻值随谐波次数的增加而增大;然而,由于涡流产生的磁通压缩效应,电感随谐波次数的增加而减小。

(3)电缆的阻抗值会受电缆尺寸、电缆安装方法以及注入电流的序列类型的影响。在谐波分析中,定电阻和定电感的假设是不合理的,往往会造成很大的误差。

### 参 考 文 献:

[1] 贺家礼,李永丽,董新洲,等. 电力系统继电保护原理[M]. 北

京:中国电力出版社,2010:76-83.

- [2] 杨春森. 绞合导体单芯电线绝缘电阻的理论计算[J]. 电线电缆,1995(5):24-27.
- [3] Robert A,Deflandre T,Gunther E, et al. Guide for Assessing the Network Harmonic Impedance[C]//Electricity Distribution. IET, 1997:301-310.
- [4] 徐林青. 大截面铝芯电缆导体电阻测量方法技术改进[J]. 电测与仪表,2009,46(s1):32-34.
- [5] 胡纪五,吴庆明,马晋嵘. 电缆绝缘电阻在线测量的研究[J]. 电测与仪表,2000(5):9-12.
- [6] 古毅. 三相低压多芯电力电缆阻抗计算[J]. 中国科技信息, 2015(09):127-128.
- [7] 李强,邓云川,李良威. 金属层不同接地方式的电缆阻抗参数计算与分析[J]. 电气化铁道,2017(1):49-52,55.
- [8] 李欢,李建英,马永翔,等. 不同温度热老化对 XLPE 电缆绝缘材料晶体结构的影响研究[J]. 中国电机工程学报,2017,37(22):6740-6748.
- [9] 丁梓涵,赵其华,彭社琴,等. 光纤和电阻应变片在结构变形测试中的对比试验研究[J]. 传感技术学报,2015,28(8):1149-1154.
- [10] Anders G J. Rating of Electric Power Cables in Unfavorable Thermal Environment[M]. Wiley-IEEE Press,2005:102-105.
- [11] 王亮,李平,文玉梅,等. 一种钢板空气隙缺陷的巴克豪森检测方法[J]. 传感技术学报,2010,23(12):1825-1830.
- [12] Shea. Rating of Electric Power Cables[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine,2000,16(4):35-35.
- [13] 张磊,俞恩科,陈国志,等. 提升海底电缆载流量的2种方法及其试验研究[J]. 高电压技术,2015,41(8):2716-2722.
- [14] Bungay E W G, Mcallister D. Electric Cables Handbook[M]. CRC Press,1990:54-55.
- [15] Hernandez-Mejia J C, Harley R, Hampton N, et al. Characterization of Ageing for MV Power Cables Using Low Frequency Tan  $\delta$  Diagnostic Measurements[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation,2009,16(3):862-870.



项恩新(1990-),男,本科,工程师,主要研究方向为从事输配电电缆检测技术研究工作,419722987@qq.com。