

XLPE 中金属尖刺缺陷阻性电流谐波成分分析

林奕夫¹, 何 锋¹, 赵 岩², 朱俊伟¹, 郑书生²

(1. 国网福建省电力有限公司, 福建 福州 350007;

2. 华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室, 北京 102206)

摘要:为开发一种能实时掌握电缆绝缘状态的监测技术,本文通过模拟 XLPE 电缆绝缘中出现金属尖刺缺陷,对其阻性电流的谐波成分进行分析,从理论和实验两方面为实现基于阻性电流谐波成分的电缆绝缘诊断提供支撑。首先,基于聚合物的跳跃电导模型,对 XLPE 的电导特性进行了仿真与理论分析。而后建立了 XLPE 金属尖刺缺陷仿真模型,对不同针尖曲率半径以及针板间距下阻性电流密度的谐波成分进行了仿真分析。最后制作了 3 种不同规格的 XLPE 金属尖刺缺陷试样,在针尖曲率半径为 30 μm 、针板间距为 2 mm,针尖曲率半径为 90 μm 、针板间距为 3 mm 以及针尖曲率半径为 30 μm 、针板间距为 3 mm 条件下进行了验证实验。结果表明:当 XLPE 绝缘中存在导体尖刺缺陷时,由于局部电场强度的急剧增大,导致绝缘材料的电导特性随着交流电压波形的变化而在欧姆区与非欧姆区之间反复,使得阻性电流的波形发生畸变,叠加了高次谐波分量;当 XLPE 绝缘中存在导体尖刺缺陷时,其阻性电流中会存在明显的 3 次与 5 次谐波分量,二者构成了阻性电流谐波分量的主要组成部分;随着导体尖刺缺陷的严重程度增加,阻性电流的谐波畸变率以及电导率畸变率均有明显的上升,可以谐波畸变率作为判断缺陷严重程度的特征量。

关键词: XLPE 电缆; 交流阻性电流; 电导率; 谐波分析

中图分类号: TM215 DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2023.11.016

Analysis on resistive current harmonic components of metal spike defect in XLPE

LIN Yifu¹, HE Feng¹, ZHAO Yan², ZHU Junwei¹, ZHENG Shusheng²

(1. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350007, China;

2. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: In order to develop an on-line monitoring technology for cable insulation status, we analyzed the harmonic components of resistive current by simulating the metal spike in XLPE cable insulation, which provided theoretical and experimental support for cable insulation diagnosis based on the harmonic components of resistive current. Firstly, the conductivity characteristics of XLPE were simulated and theoretically analyzed based on the jump conductivity model of polymer. Then, a simulation model of metal spike defect in XLPE was established, and the harmonic components of resistive current density under different needle curvature radius and needle plate spacing were simulated and analyzed. Finally, three kinds of XLPE metal spike defect samples with different specifications were made, and confirmatory experiments were conducted under the conditions of 30 μm of needle tip curvature radius and 2 mm of needle plate spacing, 90 μm of needle tip curvature radius and 3 mm of needle plate spacing, and 30 μm of needle tip curvature radius and 3 mm of needle plate spacing. The results show that there is metal spike defect in XLPE insulation, due to the sharp increase of local electric field strength, the conductivity characteristics of the insulation material will repeat between the Ohmic and non Ohmic regions with the change of AC voltage waveform, resulting in the distortion of resistive current waveform and the addition of higher-order harmonic components. When there is metal spike defect in XLPE insulation, there are obvious 3rd and 5th harmonic components in the resistive current, which constitutes the main components of resistive current harmonic component. As the severity of metal spike defect increases, the harmonic distortion rate of resistive current and conductivity distortion rate increase significantly, and the harmonic distortion rate can be used as a characteristic quantity to judge the severity of defect.

Key words: XLPE cable; AC resistive current; conductivity; harmonic analysis

0 引言

近年来,国家加大力度进行电网改造,全国联

基金项目:国家电网有限公司科技项目(5213202100A5)。

网步伐不断加快,使得电缆线路增长十分迅速,电缆已成为中低压供电系统的主流选择之一。XLPE 电缆因具有良好的电气性能被广泛应用。电缆的安全运行关乎着电力系统的稳定,因此开发一种能

实时掌握电缆绝缘状态的监测技术是十分必要的^[1-2]。

文献[3-4]研究发现当 XLPE 电缆绝缘中存在水树时,其绝缘电导是非线性的,在施加正弦激励后会产生带有谐波分量的阻性电流,在此基础上开发出了一种基于阻性电流谐波分量的水树诊断技术,文献[5-7]也在此基础上进行了相关研究。但目前还没有针对电缆绝缘中存在其他缺陷时,基于其阻性电流频谱特征的绝缘状态诊断方法的研究与应用。而在电缆的制作过程中,绝缘挤出之前绞合导体时存在产生尖刺的可能,导致内屏蔽凸起或毛刺刺破内屏蔽直接进入绝缘层形成导体尖刺缺陷,这种缺陷会在缺陷处形成电场强度极高的区域,在高场强的长时间作用下,会导致绝缘材料劣化,绝缘性能下降,形成电树枝最终导致击穿^[8-9]。此类缺陷对电缆的安全运行危害极大,且在未发生局放时难以用基于局部放电信号的方法进行检测;而介电谱法无法实现在线监测,且商用设备功率有限,无法应用于较长的电缆线路。

本文通过模拟 XLPE 绝缘内部存在导体尖刺,对其阻性电流的谐波特征进行仿真与实验分析。分析阻性电流中谐波分量产生的物理机理,明确阻性电流谐波成分随缺陷严重程度的变化规律,为实现基于阻性电流谐波成分的电导缺陷诊断提供理论和实验参考。

1 交联聚乙烯(XLPE)电导特性

当 XLPE 材料内部存在导体尖刺缺陷时,其局部的电场会发生明显的畸变,导致电场强度剧增^[10]。为了能从机理上剖析当 XLPE 绝缘内部存在导体尖刺缺陷时其阻性电流的频谱特性,本节主要对 XLPE 在高场强下的电导特性进行分析。

1.1 交变高场强下 XLPE 非线性电导理论

聚合物固体介质在高场强下的电导特性与传统意义上的电导特性有很大差别,后者是用欧姆定律来描述的线性规律,而前者却是非欧姆性,即具有非线性伏安关系。在较低场强下,聚合物固体介质中的载流子主要由两部分组成,一部分是电子(或空穴)在热激发带间跃迁所产生的本征载流子,另一部分是杂质能级中电子(或空穴)的热激发所产生的非本征载流子。由于聚合物的禁带宽度(大于 5 eV)远大于半导体和导体的禁带宽度,这种由热激发产生的本征和非本征载流子浓度非常低,且与外施电场的大小无关。当高场强施加于介质时,将引起电极处的电荷注入或者介质内的电子发射

等一系列载流子增殖过程,使得介质内部的载流子浓度由与外电场无关变为随外施电场剧烈变化,稳态电流密度与电场强度之间的欧姆关系不再成立,介质的电导率成为电场的函数。

国内外众多学者对聚合物在高场强下的非线性电导机理进行了研究,主要包括电极限制和体限制两大类,如表 1 所示^[11-12]。

表 1 聚合物介质的高场非线性电导模型
Tab.1 High field nonlinear conductivity model of polymer medium

| 类型 | 名称 | 表达式 |
|------|--------------------|---|
| 电极限制 | Schottky 效应 | $J=J_0 \exp(\beta_s \sqrt{E} / kT)$ |
| | Fowler-Nordheim 效应 | $J=AF^2 \exp(-B/F)$ |
| 体限制 | Poole-Frenkel 效应 | $J=J_0 \exp(\beta_{PF} \sqrt{E} / 2kT)$ |
| | 跳跃电导 | $J=J_0 \sinh(eE\lambda / 2kT)$ |
| | 空间电荷限制电流 | $J = (9/8) \epsilon_{qe} V^2 / d^3$ |

兰莉^[12]用跳跃电导模型来描述 XLPE 在高场强下的电导特性,即 XLPE 的电导率可以用式(1)表示。

$$\sigma = A \exp\left(-\frac{\varphi e}{KT}\right) \frac{\sinh\left(\frac{10^6 B |E|}{10^6 |E|}\right)}{10^6 |E|} \quad (1)$$

式(1)中: A 和 B 为常数; φ 为活化能; e 为单位电荷即元电荷; T 为热力学温度; E 为电场强度; K 为 Boltzmann 常数。

从式(1)可以看出,电导率是电场强度的函数,会随着电场强度的变化而变化。当交变电压施加于绝缘介质,介质内部存在金属尖刺缺陷时,介质局部处于交变的高场强,绝缘介质的电导率会随着电压的变化而产生周期性的变化,从而使阻性电流波形产生畸变。

XLPE 的电导率随外施电场强度大小的不同会呈现不同的特性:在较低场强范围内,电导率随场强的变化较小;场强升高后,电导率随着场强的升高急剧增大,即电导率随场强的变化均包含低场强下的线性区和高场强下的非线性区。研究表明在 30℃ 时, XLPE 电导特性在线性区与非线性区的过渡场强约为 3×10^7 V/m^[12]。

1.2 交联聚乙烯电导率数值仿真

从上一节的分析中得到了 XLPE 电导率基于电场强度的解析表达式,为了获取公式中的参数,利用双极性载流子模型对 XPLE 中的空间电荷行为进行仿真,得到电导率随电场强度变化的曲线。

按照电介质物理学中的定义,材料的电导率可表示为式(2)^[13]。

$$\sigma = \sum e_i n_i \mu_i \quad (2)$$

式(2)中, e_i 、 n_i 、 μ_i 分别表示第 i 种载流子的电荷量、浓度与迁移率。

双极性载流子模型是由 J M ALISON 提出的空间电荷输运模型, 通过注入-抽出、电荷迁移、入陷-脱陷、复合、输运 5 个方面来描述介质内部电荷的行为, 从而实现聚合物内部空间电荷的数值模拟。

电极处的注入采用 Schottky 公式来描述, 如式(3)和式(4)所示。

阳极注入:

$$J_{\text{hole}} = RT^2 \exp\left(-\frac{w_{\text{hi}}}{KT}\right) \exp\left(\frac{e}{KT} \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon}}\right) \quad (3)$$

阴极注入:

$$J_{\text{electron}} = RT^2 \exp\left(-\frac{w_{\text{ei}}}{KT}\right) \exp\left(\frac{e}{KT} \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon}}\right) \quad (4)$$

式(3)和式(4)中: hole 和 electron 分别代表空穴和电子; R 为 Richardson 常数; w_{ei} 和 w_{hi} 分别为阴极和阳极与复合材料之间的注入势垒; J 为电流密度; E 为电极处的电场强度; K 为玻尔兹曼常数; T 为绝缘温度; e 为元电荷; ϵ 为复合材料的介电常数。

对于载流子的界面注入, 相应地也会有载流子的界面抽出, 二者在机理上是相似的, 因而在数学上也具有相似的形式, 如式(5)和式(6)所示。

阳极抽出:

$$J_c = RT^2 \exp\left(-\frac{w_{\text{eo}}}{KT}\right) \exp\left(\frac{e}{KT} \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon}}\right) \quad (5)$$

阴极抽出:

$$J_h = RT^2 \exp\left(-\frac{w_{\text{ho}}}{KT}\right) \exp\left(\frac{e}{KT} \sqrt{\frac{eE}{4\pi\epsilon}}\right) \quad (6)$$

式(5)和式(6)中, w_{eo} 、 w_{ho} 分别为电子与空穴的界面抽出势垒。

电介质内部的双极性载流子输运模型的方程组如式(7)~(9)所示。

传导方程:

$$J_i = \mu_i n_i E - D_i \frac{dn_i}{dx} \quad (7)$$

泊松方程:

$$\frac{\partial E}{\partial x} = \frac{\rho}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (8)$$

连续方程:

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} + \frac{\partial J_i}{\partial x} = S_i \quad (9)$$

式(7)~(9)中: E 为电场强度; n_i 、 μ_i 分别表示第 i 种载流子的浓度与迁移率; t 为时间; J_i 为单位体积内

的电流密度; D_i 为扩散系数; ρ 为单位体积的净电荷密度; ϵ_0 和 ϵ_r 分别代表真空介电常数与聚合物的相对介电常数; 连续方程右侧 S_i 为源项, 其是由局域范围内非电荷传导输运引起的各类载流子电荷密度变化量的总和, 主要包含内部电荷的产生、复合、入陷与脱陷。

利用双极性载流子运输模型, 对温度为 30°C 时不同电场强度下 XLPE 的电导率进行仿真分析, 结果如图 1 所示。从图 1 可以看出, 在电场强度较低时, XLPE 的电导率随电场强度的变化不明显; 而在较高的电场强度下, 电导率会随着电场强度的增加明显增大。电导率的变化趋势和数量级与现有研究结论相吻合^[14]。

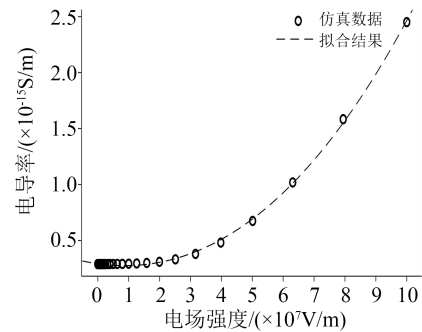


图 1 不同电场下 XLPE 的电导率仿真与拟合曲线

Fig.1 Simulation and fitting curves of XLPE conductivity under different electric fields

利用仿真得到的数据, 对式(1)进行拟合, 得到的电导率计算公式如式(10)所示。

$$\sigma = 3.59 \times 10^7 \exp\left(-0.96 \times \frac{1.6 \times 10^{-19}}{1.38 \times 10^{-23} T}\right) \cdot \frac{\sinh(1 \times 10^{-7} |E|)}{|E|} \quad (10)$$

2 XLPE 中金属尖刺缺陷阻性电流仿真分析

2.1 仿真设置

为模拟在电缆绝缘中出现金属尖刺情况时其阻性电流的频谱特征, 使用多物理场仿真软件 COMSOL 建立尖刺试样模型, 将式(10)作为材料的电导特性解析表达式, 利用软件中的电流模块, 对模型的阻性电流密度(阻性电流密度为电极表面的面平均值, 电极表面于图 2 中标识)与平均电导率进行计算(利用 COMSOL 中的体平均值计算模块, 对二维轴对称模型的回转体内部电导率的平均值进行计算)。为减少运算量, 采用二维轴对称模型, 仿真模型的几何结构如图 2 所示。

针尖的几何形状通过式(11)所示的曲线方程确定。

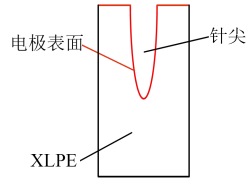


图2 尖刺缺陷试样几何结构

Fig.2 Geometric structure of spick defect sample

$$y = \frac{x^2}{4R^2} + h \quad (11)$$

式(11)中, y, x, R, h 分别代表平面坐标系中的横坐标、纵坐标、针尖曲率半径和针尖到平板电极之间的距离。

下面分别对不同针尖曲率半径以及不同针板间距下尖刺试样的阻性电流进行仿真分析^[15-16], 仿真温度为 30℃。为避免在后续的实验试样产生电树对实验结果造成影响, 仿真与实验检测的电压均采用 6 kV, 避免试样产生电树。

2.2 金属尖刺曲率半径对阻性电流密度与电导率的影响

保持针尖与平板电极之间的距离为 3 mm, 参照现场实际情况对 30、90、270、810 μm 4 种不同针尖曲率半径模型的阻性电流密度以及平均电导率进行仿真分析。

在开展阻性电流密度以及电导率仿真之前, 首先对不同针尖曲率半径下的电场强度进行仿真分析, 结果如表 2 所示。从表 2 可以看出, 随着针尖曲率半径的减小, 针尖处的电场畸变愈发严重, 当针尖曲率半径减小至 30 μm 时, 其局部电场强度最大值可达 7.89×10^7 V/m。

表 2 不同针尖曲率半径下的电场强度最大值

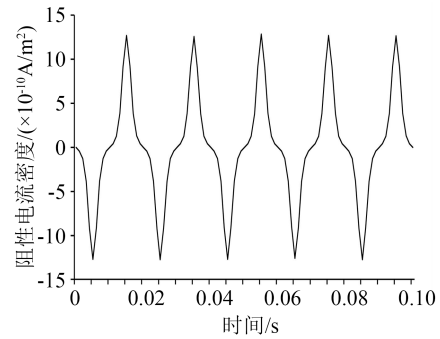
Tab.2 The maximum electric field strength under different tip curvature radius

| 针尖曲率半径/μm | 电场强度/(V/m) |
|-----------|--------------------|
| 30 | 7.89×10^7 |
| 90 | 2.89×10^7 |
| 270 | 1.25×10^7 |
| 810 | 7.13×10^6 |

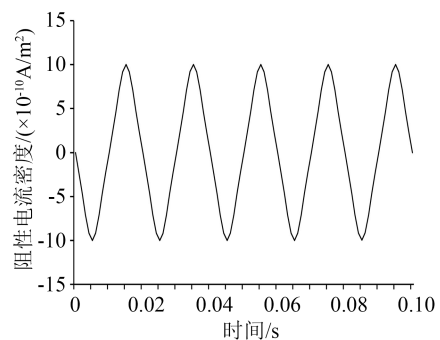
2.2.1 阻性电流密度

图 3 为不同针尖曲率半径下的阻性电流密度变化图。从图 3 可以看出, 随着针尖曲率半径的增大, 电极表面的电流密度与波形畸变程度都在减小。

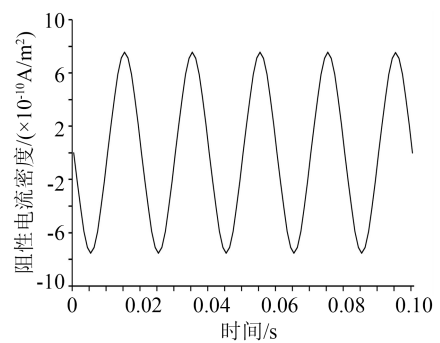
进一步对其做频谱分析, 结果如图 4 所示。从图 4 可以看出, 对于金属尖刺来说, 其阻性电流的主要成分为 3 次与 5 次谐波, 且针尖曲率半径越大, 电流中的谐波含量越低。



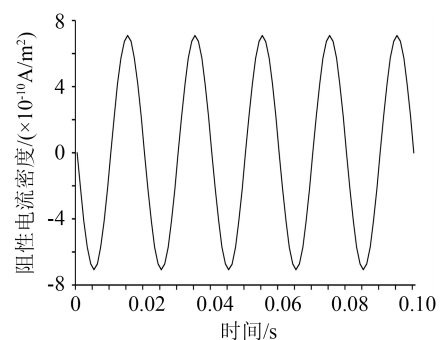
(a) 针尖曲率半径为 30 μm



(b) 针尖曲率半径为 90 μm



(c) 针尖曲率半径为 270 μm



(d) 针尖曲率半径为 810 μm

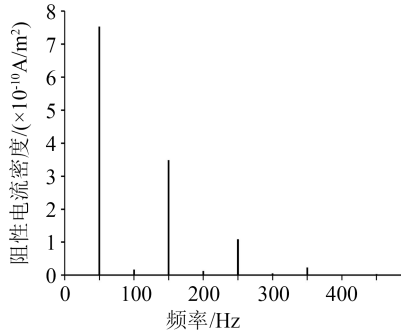
图 3 不同针尖曲率半径的阻性电流密度

Fig.3 Resistive current density of different tip curvature radius

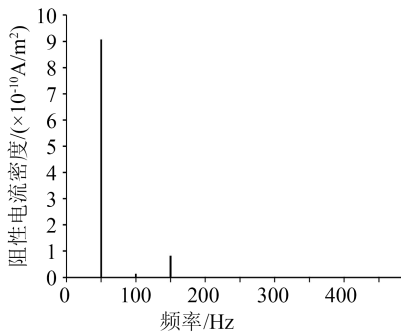
为了更直观地对不同情况下阻性电流密度的谐波特征进行量化分析, 采用谐波畸变率 (THD) 来量化阻性电流密度的谐波含量。谐波畸变率如式 (12) 所示。

$$THD = \frac{\sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + \dots + I_n^2}}{I_1} \quad (12)$$

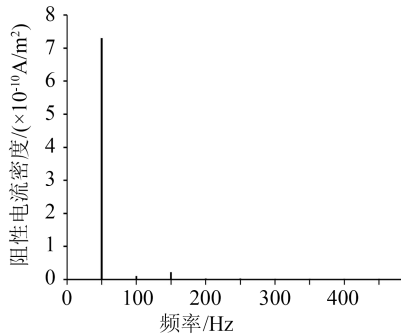
式(12)中: I_n 为第 n 次谐波的有效值; I_1 为基波有效值。



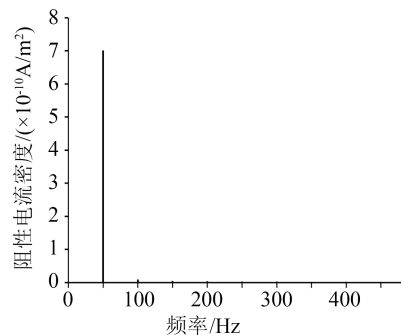
(a) 针尖曲率半径为 30 μm



(b) 针尖曲率半径为 90 μm



(c) 针尖曲率半径为 270 μm



(d) 针尖曲率半径为 810 μm

图4 不同针尖曲率半径的阻性电流密度频谱
Fig.4 Spectrum of resistive current density under different tip curvature radius

表3为不同针尖曲率半径下的阻性电流密度谐波畸变率。从表3可以看出,阻性电流密度谐波畸变率与针尖曲率半径成反比。

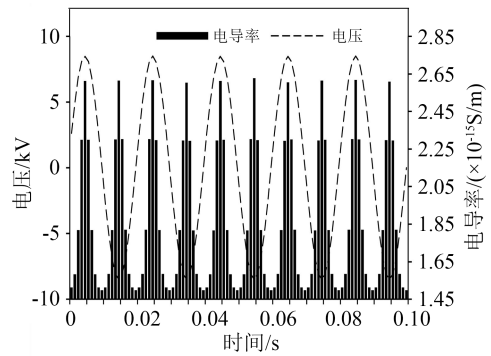
表3 不同针尖曲率半径下的阻性电流密度谐波畸变率

Tab.3 Harmonic distortion rate of resistive current under different tip curvature radius

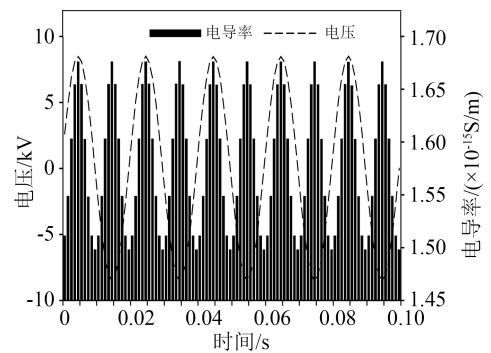
| 针尖曲率半径/μm | 30 | 90 | 270 | 810 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|
| 谐波畸变率 | 0.486 8 | 0.092 8 | 0.036 3 | 0.020 8 |

2.2.2 电导率

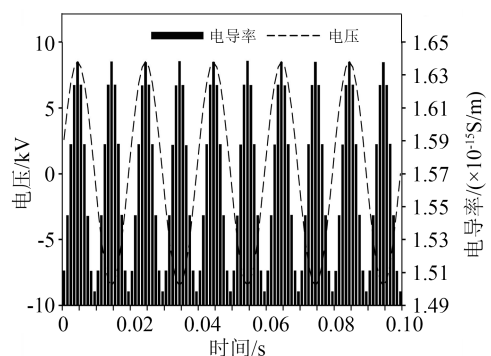
图5为不同针尖曲率半径下的平均电导率随着时间的变化趋势。从图5可以看出,电导率随着电压的正弦波动而发生周期性的变化,在电压的峰值处,电导率也存在明显的峰值,因此阻性电流中包含一定的谐波成分。随着针尖曲率半径的增大,电



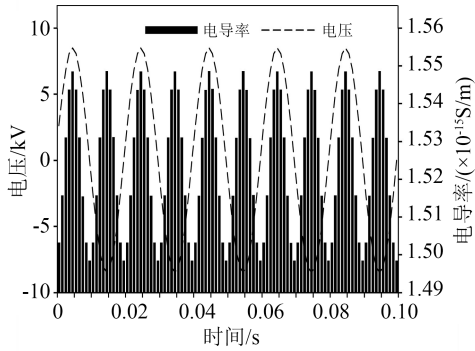
(a) 针尖曲率半径为 30 μm



(b) 针尖曲率半径为 90 μm



(c) 针尖曲率半径为 270 μm



(d) 针尖曲率半径为 810 μm

图5 不同针尖曲率半径下的平均电导率

Fig.5 Average conductivity under different tip radius curvature radius

导率的峰值和峰谷差都减小。为了更直观地对电导率的畸变程度做量化分析,定义电导率畸变率来表示畸变程度,计算公式如式(13)所示,计算结果如表4所示。

$$S_{DR} = \frac{S_{MAX} - S_{MIN}}{S_{MAX}} \quad (13)$$

式(13)中: S_{DR} 为电导率畸变率; S_{MAX} 为电导率最大值; S_{MIN} 为电导率最小值。

表4 不同针尖曲率半径下的电导率畸变率

Tab.4 Conductivity distortion rate under different tip curvature radius

| 针尖曲率半径/μm | 30 | 90 | 270 | 810 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|
| 电导率畸变率 | 0.429 6 | 0.106 3 | 0.085 4 | 0.032 3 |

从表4可以看出,随着针尖曲率半径的减小,电导率的畸变程度明显增加。

2.3 金属尖刺不同针板间距对阻性电流密度与电导率的影响

保持针尖曲率半径为 30 μm,对 1、2、3、4 mm 4 种不同针板间距模型的阻性电流密度以及平均电导率进行仿真分析。

在开展阻性电流密度以及电导率仿真之前,首先对不同针板间距的电场强度进行仿真分析,结果如表5所示。从表5可以看出,随着针板间距的减小,针尖处的电场畸变愈发严重,当针板间距减小至 1 mm 时,其局部电场强度最大值可达到 1.49×10^8 V/m。

2.3.1 阻性电流密度

图6为不同针板距离下阻性电流密度随时间的变化规律。从图6可以看出,随着针板间距的增大,阻性电流密度的畸变程度明显减小。进一步对其做频谱分析,结果如图7所示。从图7可以看出,在

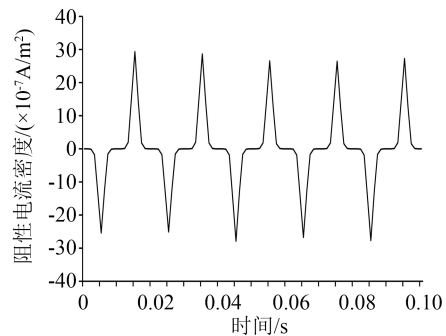
表5 不同针板间距下电场强度最大值

Tab.5 The maximum value of electric field strength under different needle plate spacing

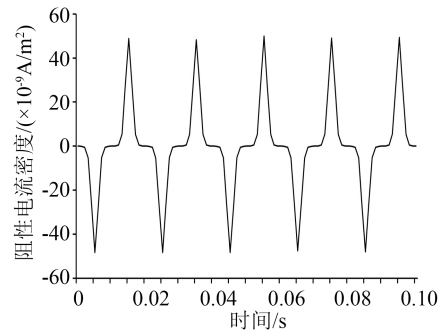
| 针板间距/mm | 电场强度/(V/m) |
|---------|--------------------|
| 1 | 1.49×10^8 |
| 2 | 1.25×10^8 |
| 3 | 7.89×10^7 |
| 4 | 5.71×10^7 |

针板距离减小时,阻性电流密度的基波分量与谐波分量的幅值都减小,其主要的谐波成分为3次与5次谐波。

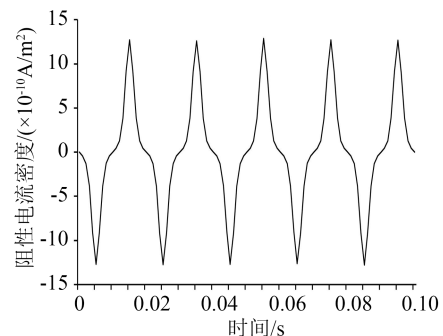
同样对阻性电流密度的谐波畸变率进行分析,结果如表6所示。从表6可以看出,阻性电流密度谐波畸变率与针板间距的大小成反比。针板间距从 4 mm 减小到 3 mm 时,谐波畸变率增加了约 0.21,而针板间距从 3 mm 减小到 2 mm 时,谐波畸变



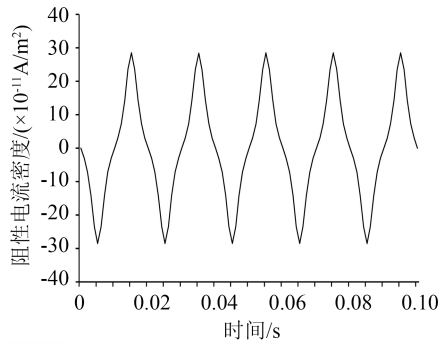
(a) 针板间距为 1 mm



(b) 针板间距为 2 mm



(c) 针板间距为 3 mm

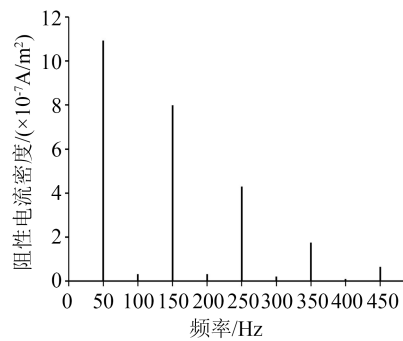


(d)针板间距为4 mm

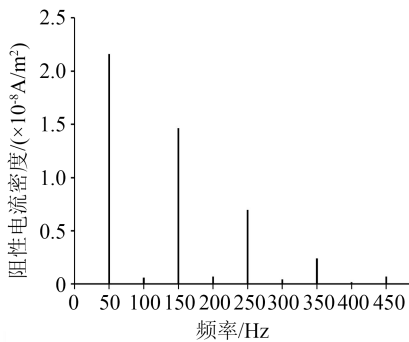
图6 不同针板间距下的阻性电流密度随时间变化规律

Fig.6 Resistive current density under with time different needle plate spacing

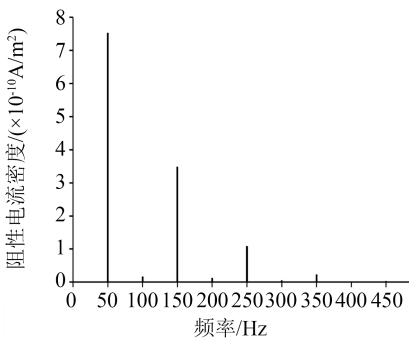
率增加了约0.27,也就是说,随着针板间距的减小,谐波畸变率的上升速度在加快。



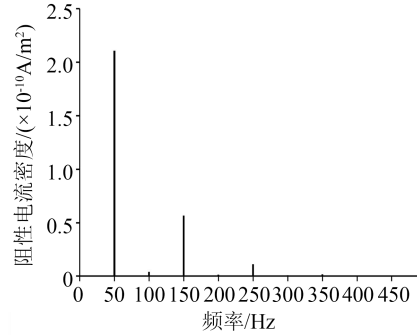
(a)针板间距为1 mm



(b)针板间距为2 mm



(c)针板间距为3 mm



(d)针板间距为4 mm

图7 不同针板间距下的阻性电流密度频谱

Fig.7 Spectrum of resistive current density under different needle plate spacing

表6 不同针板间距下的阻性电流密度谐波畸变率

Tab.6 Harmonic distortion rate of resistive current density under different needle plate spacing

| 针板间距/mm | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 谐波畸变率 | 0.848 5 | 0.759 8 | 0.486 8 | 0.274 6 |

2.3.2 电导率

图8为不同针板间距下的平均电导率随时间的变化趋势。图8可以看出,随着针板间距的增大,电导率的峰值和峰谷差都在减小。

表7为不同针板间距下电导率的畸变率。从表7可以看出,针板距离越小,电导率的畸变率越大。

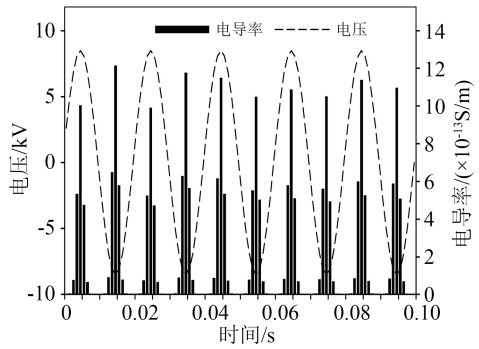
本节通过对不同针尖曲率半径以及不同针板间距下尖刺试样的阻性电流密度以及电导率进行仿真分析发现,绝缘中存在导体尖刺缺陷时,阻性电流密度中会存在较大的3次与5次谐波分量,且随着缺陷程度的加深(针尖曲率半径与针板间距的减小),阻性电流密度谐波畸变率与电导率畸变率都明显增加。

3 导体尖刺缺陷试样实验

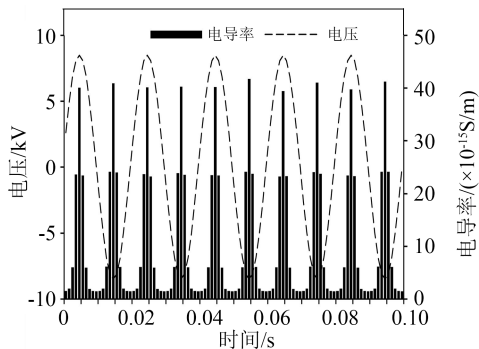
3.1 实验方案

制作导体尖刺缺陷试样,采用预埋电极的方式浇筑/挤压成型。以针板间距为3 mm、针尖曲率半径为30 μm为例,其模型结构如图9所示。

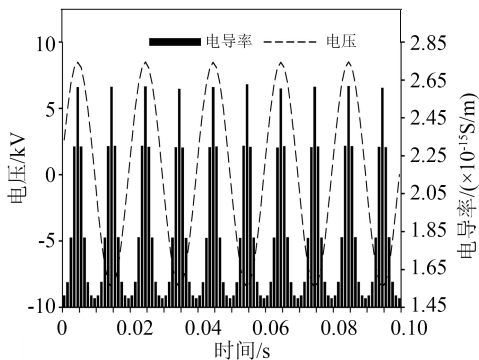
实验接线如图10所示,在针尖曲率半径为30 μm、针板间距为2 mm,针尖曲率半径为90 μm、针板间距为3 mm以及针尖曲率半径为30 μm、针板间距为3 mm 3种情况下进行验证性实验。利用100 kΩ的大功率电阻将流过接地线的电流信号转化为电压信号,接入到示波器中,并同步对电源电压信号进行采集,对电源电压进行频谱分析,得到其谐波畸变率仅为1.6%。参考仿真结果,可以认为电源电



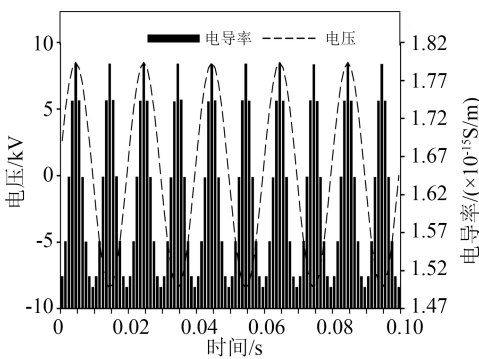
(a)针板间距为1 mm



(b)针板间距为2 mm



(c)针板间距为3 mm



(d)针板间距为4 mm

图8 不同针板间距下的平均电导率
Fig.8 Average conductivity under different needle plate spacing

压中所含有的谐波分量基本不会对实验结果产生影响。为避免表面泄漏电流对实验结果造成影响,在实验过程中将试样浸没在变压器油中。

表7 不同针板间距下的电导率畸变率
Tab.7 Conductivity distortion rate under different needle plate spacing

| 针板间距/mm | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---------|---------|---------|---------|---------|
| 电导率畸变率 | 0.998 8 | 0.964 1 | 0.429 6 | 0.164 2 |

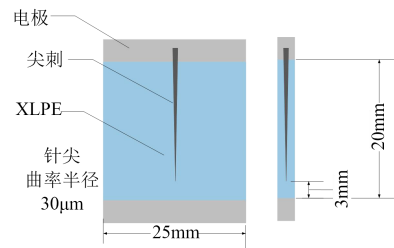


图9 导体尖刺缺陷模型
Fig.9 Metal spike defect model

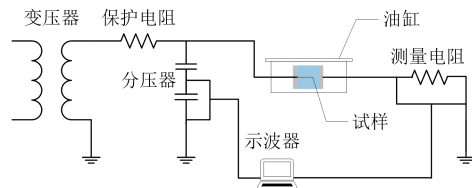


图10 实验接线图
Fig.10 Experimental wiring diagram

3.2 实验结果与仿真结果对比

图11为针尖曲率半径为30 μm、针板间距为3 mm时的泄漏电流与承受电压。

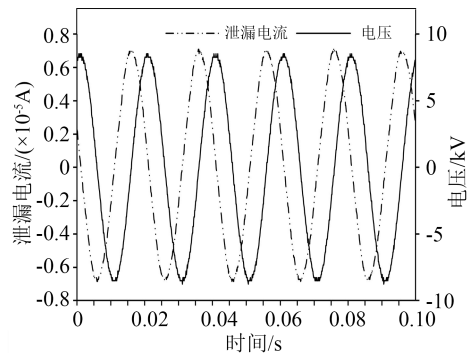


图11 导体尖刺缺陷试样承受电压与泄漏电流
Fig.11 Withstand voltage and leakage current of metal spike defect sample

从图11可以看出,泄漏电流与承受电压两者之间存在90°的相位差,即泄漏电流的主要成分为容性电流,利用两者的相对相位将泄漏电流的阻性分量(阻性电流)分离出来。

表8为阻性电流有效值与谐波畸变率的计算结果。从表8可以看出,随着针尖曲率半径的减小,阻性电流有效值与谐波畸变率都显著增加;随着针板间距的增大,阻性电流的有效值与谐波畸变率都有一定程度的减小。也就是说,随着缺陷严重程度的增加,阻性电流的幅值与谐波畸变率都会增大,与

仿真结果保持一致。

表8 阻性电流有效值与谐波畸变率

Tab.8 Effective value of resistive current and harmonic distortion rate

| 项目 | 30-2 | 30-3 | 90-3 |
|--------|----------|---------|---------|
| 有效值/nA | 9 416.35 | 226.03 | 103.75 |
| 谐波畸变率 | 0.375 3 | 0.234 1 | 0.053 8 |

为了更好地对比仿真与实验结果,引入各次谐波贡献率 H_n ,计算公式如式(14)所示。

$$H_n = \frac{I_n}{I_2 + I_3 + I_4 + \dots + I_n} \quad (14)$$

式(14)中: H_n 代表第 n 次谐波贡献率; I_n 表示第 n 次谐波的有效值。

图12为仿真与实验中阻性电流各次谐波贡献率的对比。

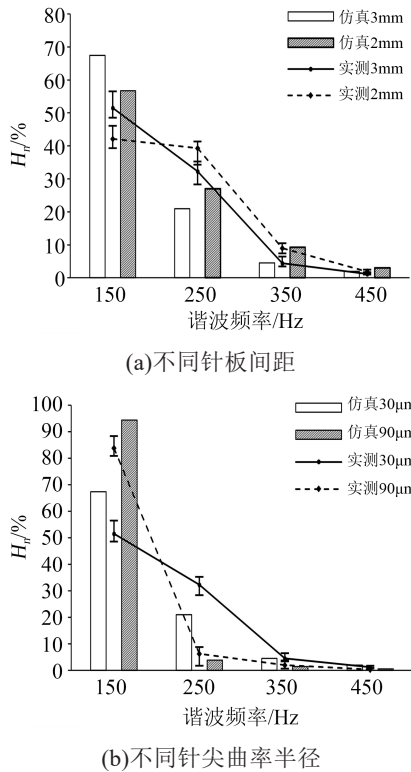


图12 仿真与实验各次谐波贡献率对比

Fig.12 Comparison of harmonic contribution rates between simulation and experiment

从图12可以看出,阻性电流谐波分量的主要成分为3次与5次谐波。针板间距与针尖曲率半径对应不同的缺陷严重程度,随着缺陷严重程度的增加,3次谐波分量占比有所减小,5次谐波分量的占比有所增加。

4 结论

(1)当XLPE绝缘中存在导体尖刺缺陷时,由于

局部电场强度的急剧增大,使得绝缘材料的电导特性在一个工频周期内发生于欧姆区和非欧姆区间之间的反复波动,即材料的电导率不可再看作一个常数,使得阻性电流的波形发生畸变,叠加了高次谐波分量。

(2)当XLPE绝缘中存在导体尖刺缺陷时,其阻性电流中会存在明显的3次与5次谐波分量,二者构成了阻性电流谐波分量的主要组成部分。

(3)随着导体尖刺缺陷的严重程度增加,阻性电流的谐波畸变率以及电导率畸变率均有明显的上升,可以将此作为判断缺陷严重程度的特征量。

参考文献:

- [1] 赵世纯,凌标灿,朱希安,等. HDS电气设备带电状态诊断技术及应用[M]. 北京:电子工业出版社,2017.
- [2] 周凯,陈泽龙,尹游,等. XLPE电缆水树老化及其诊断技术的研究进展[J]. 绝缘材料,2019,52(2):7-14.
- [3] YAGI Y, TANAKA H, KIMURA H. Study on diagnostic method for water treed XLPE cable by resistive current measurement[C]// 1998 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Atlanta, USA:IEEE,1998.
- [4] HVIDSTEN S, ILDSTAD E, SLETTBAK J, et al. Understanding water treeing mechanisms in the development of diagnostic test methods[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1998,5(5):754-760.
- [5] 魏强. 基于谐波分量法XLPE电缆水树老化测试系统的研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2004.
- [6] 高震. 变频谐振电源条件下电缆绝缘阻性电流谐波分量的测量[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2012.
- [7] 李闯. 阻性电流谐波分量测试系统的研制[D]. 哈尔滨:哈尔滨理工大学,2010.
- [8] 李特,崔竹叶,曹俊平,等. 高压电缆状态仿真及缺陷诊断平台的构建[J]. 浙江电力,2017(9):39-43.
- [9] 江航,杨勇,周伟杰,等. 高压电缆缺陷模拟及状态评估技术评述[J]. 浙江电力,2017,36(10):31-36,49.
- [10] 黄光磊,李喆,杨丰源,等. 直流交联聚乙烯电缆泄漏电流试验特性研究[J]. 电工技术学报,2019,34(1):192-201.
- [11] 刘德远. 交直流电场下电缆绝缘中空间电荷测量与数值模拟技术研究[D]. 上海:上海交通大学,2019.
- [12] 兰莉. 温度对聚合物绝缘中空间电荷行为的影响[D]. 上海:上海交通大学,2015.
- [13] 曹政钦,石岩,魏钢. 高电压技术[M]. 重庆:重庆大学出版社,2020.
- [14] 刘士利,李丛健,沈方,等. 交流XLPE电缆改为直流运行时空间电荷积累特性仿真[J]. 高电压技术,2017,43(11):3576-3582.
- [15] 周凤争,孟庆霖,朱晓辉,等. 10kV电缆附件典型缺陷仿真与绝缘故障分析[J]. 绝缘材料,2011,44(4):67-69.
- [16] 隋兴嘉. 高压电缆典型绝缘缺陷模拟试验研究[J]. 科学技术创新,2017(34):26-27.

收稿日期:2022-11-17;修回日期:2023-02-20。

作者简介:林奕夫(1992-),男(汉族),福建莆田人,工程师,主要从事电力设备管理的工作;郑书生(1979-),男(汉族),山西临汾人,博士,正高级实验师,主要从事高电压与绝缘技术的研究。