

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.12.017

基于泄漏电流高次谐波比的电缆护层保护器老化状态评估

方春华, 李放, 张怡琳, 庄立, 胡涛, 孙奥琪, 张瑶, 吕俊杰
(三峡大学电气与新能源学院, 湖北宜昌 443002)

摘要: 氧化锌电缆护层保护器是电力系统中保证电缆供电安全的重要设备,其运行状态将直接影响到线路安全。由于长期受到各种过电压的影响,电缆护层保护器极易发生老化,导致其性能发生明显劣化。基于泄漏电流分析的状态检测对于预测电缆护层保护器的老化状态具有重要作用。文中采用雷电冲击老化的方法,研究了电缆护层保护器冲击老化后的高频特性,提出了基于泄漏电流高次谐波比的老化状态诊断检测指标,该指标随老化程度的加深呈现逐渐增大的趋势。因此,能够用来有效评估电缆护层保护器的老化状态,为电缆护层保护器老化状态检测提供技术支撑。

关键词: 电缆护层保护器; 老化状态; 泄漏电流; 高频特性; 谐波比

Aging State Assessment of Cable Sheath Protector Based on High-order Harmonic Ratio of Leakage Current

FANG Chunhua, LI Fang, ZHANG Yilin, ZHUANG Li, HU Tao, SUN Aoqi,
ZHANG Yao, LYU Junjie

(School of Electrical and New Energy, China Three Gorges University, Hubei Yichang 443002, China)

Abstract: The zinc oxide cable sheath protector in power system is an important equipment to assure the safety of the cable supply and its operating condition will directly affect the safety of the line. Due to the long-term influence of various overvoltages, the cable sheath protector is susceptible to aging, resulting in significant deterioration of its performance. The leakage current analysis-based condition detection is important for predicting the aging state of the cable sheath protector. In this paper, the high frequency characteristics of the cable sheath protector after impact aging are studied by using the lightning impulse aging method, and a diagnostic test index for the aging state based on the high harmonic ratio of the leakage current is proposed, which tends to increase gradually with the increase of aging. Therefore, it can be used to effectively assess the aging state of the cable sheath protector and provide technical support for the detection of the aging state of the cable sheath protector.

Key words: cable sheath protector; aging condition; leakage current; high frequency characteristics; harmonic ratio

0 引言

随着全球气候环境的不断恶化和能源危机的日益加剧,“双碳”已成为全球的共识。因此,大力发展新能源,构建以新能源为主体的新型电力系统是实现“双碳”目标的必然途径^[1]。然而,这种高比例新能源接入的同时也为电力系统带来了各种潜在的过电压隐患,严重影响了电力系统的稳定运行^[2-9]。

电缆护层保护器作为电力系统中必不可少的电气元件,由于其内部的氧化锌阀片具有良好的非线性性能而被广泛用于保护电缆的金属护层免受过电压的危害,维持电缆供电安全,延长电缆使用寿命^[10-11]。由于长期受到过电压的影响,电缆护层保护器内部性能极易发生劣化,进而导致其发生故障,这会对电力系统中其他的设备和检修人员带来安全风险。因此,研究过电压作用后电缆护层保护器的老

收稿日期:2024-07-20; 修回日期:2024-09-25

基金项目:电网环境保护国家重点实验室开放基金资助项目(GYW51202201415)。

Project Supported by Open Fund of State Key Laboratory of Power Grid Environmental Protection(GYW51202201415).

化特性,进行状态检测,避免此类故障发生对保障电力系统的安全、稳定及高效运行具有重要意义。

实施在线检测是避免电缆护层保护器发生故障的一种有效方法,目前,对电缆护层保护器的故障分析主要依据电力系统领域中关于避雷器的相关研究。已有许多文献提出了不同的状态检测方法,如文[12]提出了一种运行电压下避雷器相对阻性电流检测与评价方法,测量时仅需获取三相避雷器全电流,不需采集PT参考电压信号,避免了电压信号中谐波的影响;文[13]基于三次谐波泄漏电流分析,提出了对不同类型避雷器的总泄漏电流或内外泄漏电流进行在线检测的方法;文[14]提出了一种基于五次谐波阻性电流的检测方法来代替三次谐波阻性电流的状态评估,以避免三次谐波对三次谐波阻性泄漏电流提取的影响;除此之外,文[15]提出了将功率因数作为评价避雷器老化的新指标。尽管上述研究取得了一定成果,但大多数检测技术主要是基于低次谐波泄漏电流来检测,对于使用高次谐波泄漏电流进行检测的研究还较少^[16-17]。然而,电力系统中往往会存在谐波含量较高的情况^[18-20],在这种情况下会导致基于低次谐波泄漏电流的检测方法产生一定的误差^[21],影响检测的结果。

鉴于此,文中首先模拟了雷电流对电缆护层保护器进行冲击试验^[22],并对雷电冲击过后的电缆护层保护器进行了高频特性试验^[23-25],得到了不同冲击次数下电缆护层保护器的各项性能参数变化特性。最后,提出了基于泄漏电流高次谐波比的老化状态诊断检测指标,以克服泄漏电流检测法的局限性,为实现电缆护层保护器的状态检测与分析提供技术支撑。

1 试验介绍

试验选取了国内一种典型的110 kV氧化锌电缆护层保护器作为试验对象,氧化锌电缆护层保护器的型号为BHQ-7/600。电缆护层保护器相关参数见表1。

1.1 试验方法

首先对整只电缆护层保护器进行冲击老化试验,通过连续施加多次的雷电流(8/20 μ s),冲击电流的幅值为10 kA,极性为负。每冲击1次间隔1 min,每3次间隔5 min^[26-27],共冲击4 000次,每隔1 000次对冷却至室温的电缆护层保护器进行高频特性试验。试验环境温度为23~28 $^{\circ}$ C,相对湿度为58%~86%。

高频特性试验^[28]首先保持谐波电压频率不变,在50、550、1 050、1 550、2 050、2 550 Hz频率下,以400 V为一个单位间隔,逐渐增加施加在电缆护层

表1 110 kV 电缆护层保护器试品

Table 1 110 kV cable sheath protector test article

参数	数值
适用电缆系统电压/kV	110
额定电压/kV	2.8
持续运行电压/kV	2.24
标称放电电流/kA	10
直流参考电压 U_{1mA} /kV	≥ 4.0
0.75 U_{1mA} 下的泄漏电流/ μ A	≤ 30
标称放电电流下的残压/kV	≤ 7

保护器两端的电压,从400 V增加到3 200 V,记录电缆护层保护器的电压与泄漏电流状态。保持谐波电压幅值不变,在2、3 kV电压下,以100 Hz为一个单位间隔,逐渐增加施加电压的频率,从50 Hz增加到2 550 Hz,记录电缆护层保护器的电压与泄漏电流状态。

试验过程中采用示波器依次记录不同雷电冲击次数下电缆护层保护器的电压和电流波形的幅值和相位差。示波器中存储的数据将在后期进行处理,以保证数据的可靠性和准确性。

1.2 试验设备

冲击老化试验采用的冲击电流试验装置见图1,该试验装置最高充电电压可达100 kV,因此能够对整只电缆护层保护器进行8/20 μ s大电流冲击老化试验,其试验原理见图2。

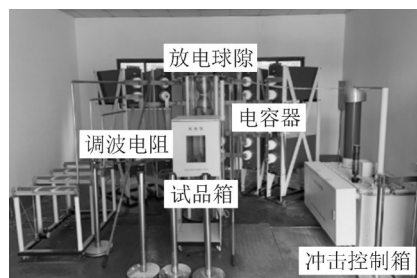


图1 冲击电流发生器实物图

Fig. 1 Physical picture of impulse current generator

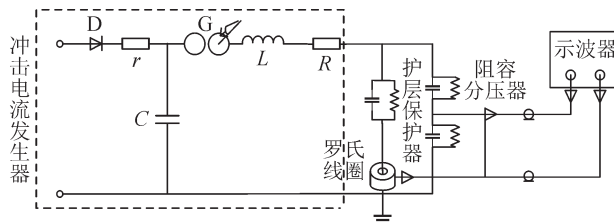


图2 冲击试验原理图

Fig. 2 Schematic diagram of impact test

高频特性试验的原理见图3。该回路是通过可编程逻辑电源设定所需的电压信号,经过电压放大器放大电压信号,将放大的电压施加给试品,然后通过由泄漏电流测量装置和信号放大器模块组成

的数据采集分析系统采集数据。

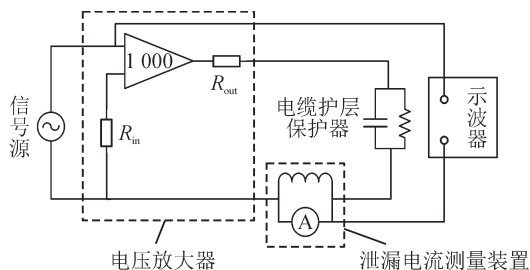


图3 高频特性试验原理图

Fig. 3 Schematic diagram of high frequency characteristic test

高频特性试验设备见图4。该设备主要由高频电压源、主测试电路和数据采集分析系统组成。采用高频电压源模拟电力系统中的谐波电压,利用高精度测量仪器采集并记录不同冲击次数下电缆护层保护器的各项参数特性。



图4 高频特性试验设备实物图

Fig. 4 Physical diagram of the equipment for high-frequency characteristic test

高频电压源由可编程逻辑电源和电压放大器组成。可编程逻辑电源输入端接入220 V工频电压,输出端电压幅值在0~10 V和0~240 MHz内可调,输出电压信号可以在此区间内任意幅度和频率。电压放大器的放大倍数可在0~1 000倍之间任意选择,并且自带有1/1000 Monitor监测口,该端口可以将输出端口的电压缩小1 000倍,从而可以通过示波器进行输出电压的实时监测。

数据采集分析系统由泄漏电流测量装置和信号放大器模块组成。泄漏电流测量装置采用零磁通霍尔电流传感器,测量量程为0 mA~10 A,分辨率为0.001 mA,变比为1 000:1,相角测量误差小于1°。信号放大器增益范围可在1~1 000倍之间调整,能够将电流传感器采集到的电流信号转换为电压信号传递给示波器。

2 不同老化状态下泄漏电流谐波特征影响因素

2.1 电压幅值

在同一频率谐波电压下对不同老化程度的电

缆护层保护器进行升压试验,以31次谐波(1 550 Hz)为例。

不同老化程度下电缆护层保护器的总泄漏电流(I_l)随谐波电压(U)的变化趋势见图5,在同一频率的谐波电压作用下,不同老化程度的 I_l 随 U 变化的整体趋势近似为线性,表明随着 U 的升高,内阻抗(Z)基本不变,且老化后 I_l 随 U 变化的曲线相较于老化前并无太大变化,两者曲线接近于重合,这表明经过4 000次的冲击老化作用, Z 也基本保持不变。

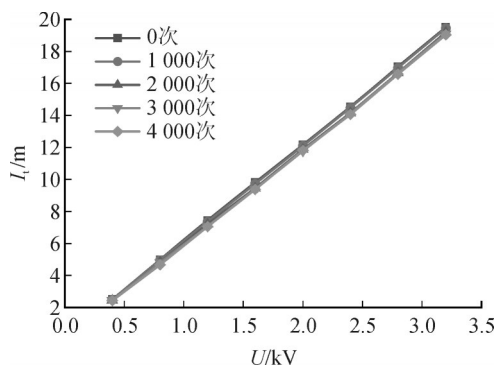


图5 不同老化程度下总泄漏电流随电压幅值变化趋势

Fig. 5 Variation trend of total leakage current with voltage amplitude under different aging degrees

不同老化程度下电缆护层保护器的 I_l 与 U 的相位差(θ)随 U 的变化趋势见图6。随着 U 升高, θ 呈现先增大后减小的现象。泄漏电流的这种性质与护层保护器内部氧化锌阀片的极化过程密不可分,因为泄漏电流由极化电流和传导电流组成,当谐波电压频率固定时,极化电流随着谐波电压的升高而明显增大,同时相位差减小。其次,在3.2 kV谐波作用下,经雷电冲击1 000、2 000、3 000、4 000次的护层保护器相较于老化前,其 θ 分别下降了0.86%、0.91%、1.2%、1.64%。这表明,随着老化程度的加深, θ 会逐渐减小。老化程度越大, θ 越小。

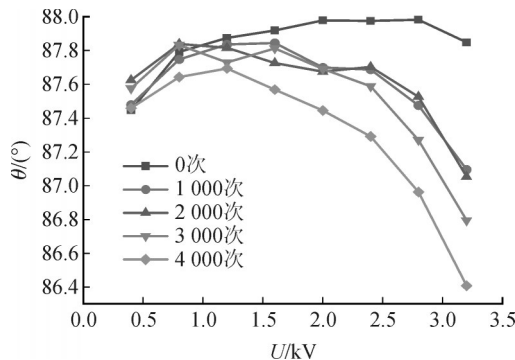


图6 不同老化程度下相位差随电压幅值变化趋势

Fig. 6 Variation trend of phase difference with voltage amplitude under different aging degrees

运用图5、6的试验结果,根据式(1)计算得到谐波作用下不同老化程度的电缆护层保护器的阻性

泄漏电流(I_R)随 U 的变化趋势见图7。不同老化程度下 I_R 随着 U 升高逐渐增大,并且当 U 较小时, I_R 增大的幅度较小,当 U 较大时, I_R 增大的幅度也会变大,即随着 U 的增大, I_R 增大的速度越来越快。当 U 为3.2 kV时,未老化的 I_R 为0.732 mA,经过雷电冲击1 000、2 000、3 000、4 000次的护层保护器的 I_R 分别为0.985、0.986、1.068、1.193 mA。这表明,老化后的 I_R 与老化前相比有一定程度的增大,且老化程度越大, I_R 越大,即增大的幅度也是随老化程度的加深而增大。同时,这也代表着电缆护层保护器的等效内阻(R)随着 U 的增大以及老化程度的加深而逐渐减小。

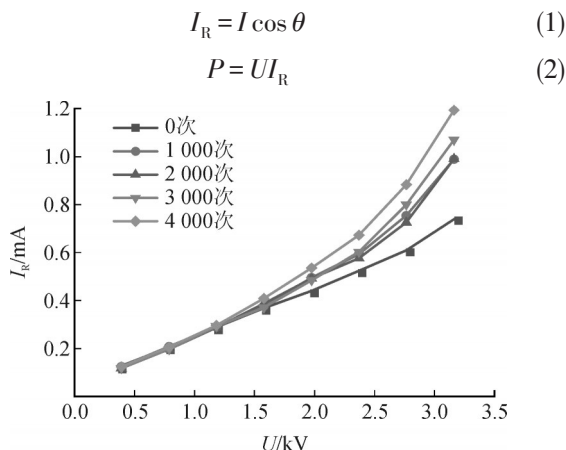


图7 不同老化程度下阻性泄漏电流随电压幅值变化趋势
Fig. 7 Variation trend of resistive leakage current with voltage amplitude under different aging degrees

结合图5、6试验数据,根据式(2)可计算得到不同老化程度下电缆护层保护器的有功功率(P)随 U 的变化趋势见图8。不同老化程度下的 P 均随 U 升高而急剧增大,当 U 较小时, P 增大的幅度较小,当 U 较大时, P 增大的幅度也会变大,即随着 U 的增大, P 增大的速度越来越快。同时,对于未老化以及经过雷电冲击1 000、2 000、3 000、4 000次的电缆护层保护器,当 U 为3.2 kV时,其 P 分别为2.343、3.153、3.156、3.417、3.817 W。这表明,老化后的 P 相较于老化前也是有所增大,且增大的幅度随老化程度的加深而增大。

2.2 电压频率

在同一谐波电压幅值下对不同老化程度的电缆护层保护器进行升频试验,以3 kV下的谐波电压为例。

不同老化程度下电缆护层保护器的总泄漏电流(I_t)随谐波电压频率(f)的变化趋势见图9。在同一幅值的谐波电压作用下,不同老化程度下的 I_t 随 f 的变化趋势与 I_t 随 U 的变化趋势一致,均近似表现为

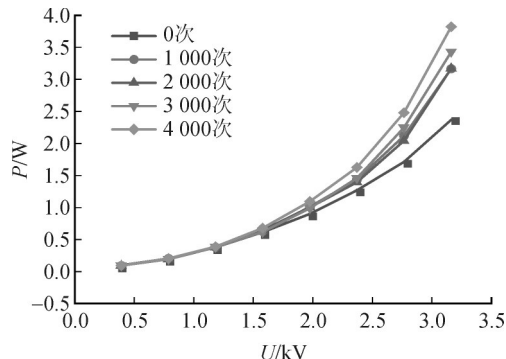


图8 不同老化程度下有功率随电压幅值变化趋势
Fig. 8 Variation trend of active power with voltage amplitude under different aging degrees

线性关系,由于此时 U 保持不变而 I 线性增大,因此当所加的 f 升高时, Z 也是呈线性减小。而不同老化程度下的电缆护层保护器的 I_t - f 曲线基本重合,这表明4 000次雷电冲击老化对 I_t 的影响很小,同时护层保护器老化前后的 Z 也是基本维持不变,这与图5的试验结果一致。

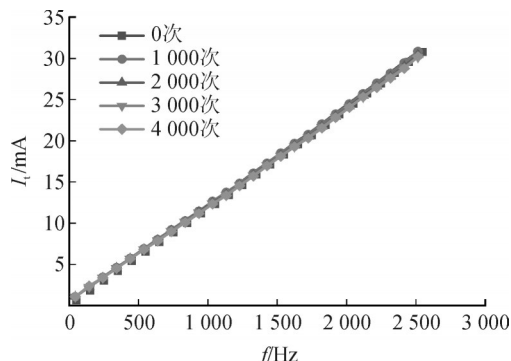


图9 不同老化程度下总泄漏电流随电压频率变化趋势
Fig. 9 Variation trend of total leakage current with voltage frequency under different aging degrees

不同老化程度下电缆护层保护器的 θ 随 f 的变化趋势见图10。随着 f 升高, θ 先急剧增大,随后缓慢减小,最后趋于平稳。这是因为当频率较低时,极化电流较大,相位差随着频率增大而急剧增加;当频率较高时,极化电流减小,泄漏电流主要受传导电流的影响,电压维持不变,相位差缓慢减小。在3 kV、50 Hz谐波电压作用下,经雷电冲击1 000、2 000、3 000、4 000次的护层保护器相较于老化前,其 θ 分别下降了5.48%、6.50%、8.71%、11.49%,而在3 kV、2 550 Hz谐波电压作用下,其 θ 分别下降了0.47%、0.49%、0.65%、0.89%。这表明,随着老化程度的加深, θ 会逐渐减小,且频率越低, θ 减小的幅度越大,频率越高, θ 减小的幅度越小,即随 f 的升高,减小的幅度逐渐降低。

同样,结合图5、6,根据式(1)、(2)可计算得到不同老化程度下电缆护层保护器的 I_R 、 P 随 f 的变化趋

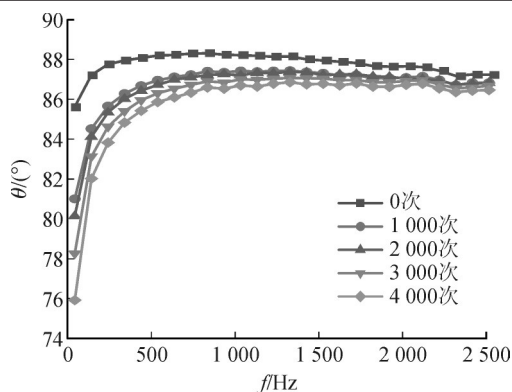


图10 不同老化程度下相位差随电压频率变化趋势

Fig. 10 Variation trend of phase difference with voltage frequency under different aging degrees

势,结果见图11、12。 I_R 、 P 随 f 的升高而逐渐增大,且增大的速度越来越快。同时,随着老化程度的加深, I_R 、 P 也会随之逐渐增大。

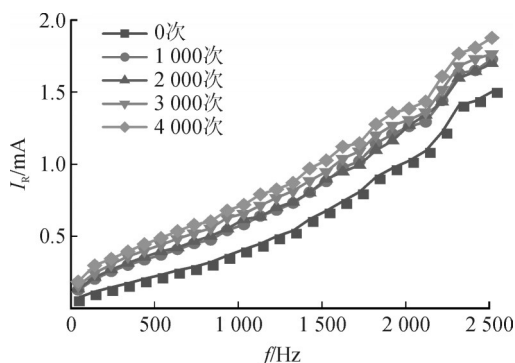


图11 不同老化程度下阻性泄漏电流随电压频率变化趋势

Fig. 11 Variation trend of resistive leakage current with voltage frequency under different aging degrees

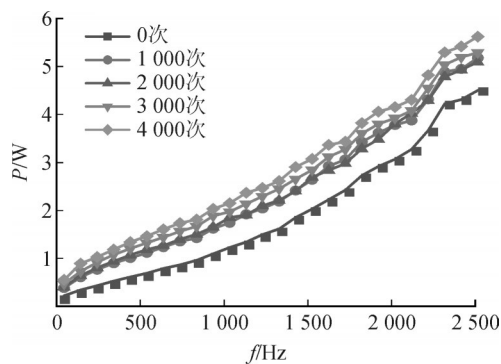


图12 不同老化程度下有功率随电压频率变化趋势

Fig. 12 Variation trend of active power with voltage frequency under different aging degrees

通过对比分析雷电冲击过后不同老化程度下电缆护层保护器的特征参数,发现各参数在整体变化趋势上基本相同。但未老化和老化后电缆护层保护器的各高频特征参数数值有较大的差异,老化程度越深,两者的结果差异就越大。

3 基于泄漏电流谐波比的护层保护器老化状态评估

由上述试验结果可知,电缆护层保护器的阻性泄漏电流在冲击老化试验过后均有一定程度的变化。但导致电缆护层保护器阻性泄漏电流变化的因素有很多,并不能简单的通过阻性泄漏电流的变化来确定电缆护层保护器的老化状态。同时,针对电力系统中某些高次谐波含量较高的区域^[29-30],为了对电缆护层保护器的老化状况做出准确的结论,必须有合适的检测指标。

因此,对上述试验数据进一步处理,基于泄漏电流高次谐波比,提取了31次谐波阻性泄漏电流与31次谐波总泄漏电流之比(I_{R41}/I_{i41})、41次谐波阻性泄漏电流与51次谐波阻性泄漏电流之比(I_{R41}/I_{i51})以及41次谐波阻性泄漏电流与51次谐波总泄漏电流之比(I_{R41}/I_{i51})的检测指标。检测流程见图13。3种检测指标随冲击次数 n 的变化趋势见图14。

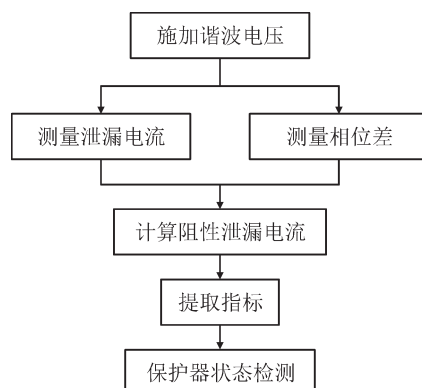


图13 电缆护层保护器状态检测流程

Fig. 13 Status detection process of cable sheath protector

由图14可知,经过4 000次的雷电冲击,其中 I_{R41}/I_{i41} 从0.041增大到0.059, I_{R41}/I_{i51} 由0.708增大到0.809, I_{R41}/I_{i51} 由0.034增大到0.048,3种检测指标对比未老化电缆护层保护器分别增大了43.9%、14.3%、41.2%,即 I_{R41}/I_{i41} 、 I_{R41}/I_{i51} 、 I_{R41}/I_{i51} 均随着电缆护层保护器的冲击次数的增加而逐渐增大,但 I_{R41}/I_{i41} 、 I_{R41}/I_{i51} 的变化幅度要明显大于 I_{R41}/I_{i51} ,同时 I_{R41}/I_{i41} 、 I_{R41}/I_{i51} 在冲击1 000次后有一个缓慢增大的过渡期,当冲击2 000次后,其变化趋势又急剧增大,这表明电缆护层保护器在进行1 000次冲击后,其内部性能已经明显发生劣化。因此,通过比较雷电冲击后不同老化程度下电缆护层保护器的3种比值检测指标的变化情况,可用来反映电缆护层保护器的运行老化状况。

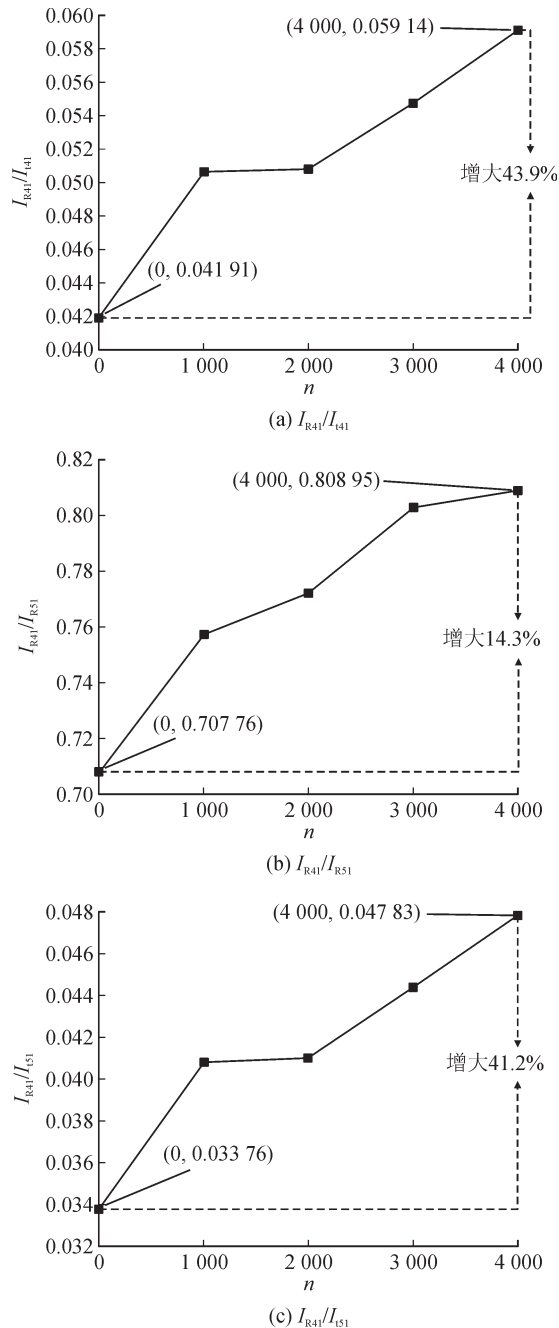


图 14 I_{R41}/I_{I41} 、 I_{R41}/I_{R51} 、 I_{R41}/I_{I51} 随冲击次数增加的变化趋势
Fig. 14 The change trend of I_{R41}/I_{I41} , I_{R41}/I_{R51} , I_{R41}/I_{I51} with the increase of impact times

4 结论

文中对雷电冲击过后不同老化程度的电缆护层保护器进行了高频特性试验,并将不同老化程度下电缆护层保护器的各参数特性进行了对比,分析了电缆护层保护器老化后各谐波特性的变化趋势,得到了如下主要研究结论:

1)同一谐波电压频率下,随着谐波电压的增大,不同老化程度下电缆护层保护器的总泄漏电流、阻性泄漏电流、有功功率均逐渐增大,相位呈现先增

大后减小的趋势。

2)同一谐波电压幅值下,随着谐波电压频率的增大,不同老化程度下电缆护层保护器的总泄漏电流、阻性泄漏电流、有功功率均逐渐增大,相位呈现先增大后减小,最后趋于平稳的趋势。

3)相较于未老化电缆护层保护器,老化后电缆护层保护器的总泄漏电流随老化程度的加深基本维持不变,相位差随老化程度的加深逐渐减小,阻性泄漏电流、有功功率随老化程度的加深逐渐增大。

4)文中提出的 3 种检测指标(I_{R41}/I_{I41} 、 I_{R41}/I_{R51} 、 I_{R41}/I_{I51})随老化程度的加深均不断升高,可正确有效地反映电缆护层保护器的运行老化状态,能用来评估电缆护层保护器的健康状况,为电缆护层保护器的状态检测提供技术支持。

参考文献:

- [1] 陈思源,景巍巍,史明明,等. 新能源接入背景下的谐波源建模方法综述[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 162-175.
CHEN Siyuan, JING Weiwei, SHI Mingming, et al. Review of harmonic source modeling methods with the background of renewable energy access[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 162-175.
- [2] 马文阳,霍 锋,杜志叶,等. 基于 ATP-EMTP 的全复合材料电杆线路防雷技术研究[J]. 智慧电力, 2023, 51(2): 105-110.
MA Wenyang, HUO Feng, DU Zhiye, et al. Lightning protection technology of all-composite pole line based on ATP-EMTP[J]. Smart Power, 2023, 51(2): 105-110.
- [3] 肖宏峰,罗日成,黄 军,等. 基于多重雷击的超高压输电线路雷过电压分析[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 245-251.
XIAO Hongfeng, LUO Richeng, HUANG Jun, et al. Lightning over-voltage analysis of EHV transmission lines based on multiple lightning strikes[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 245-251.
- [4] 徐文华,和文龙,陈继忠,等. 10 kV 配电线路雷电感应过电压在线监测装置及其应用[J]. 高压电器, 2023, 59(4): 77-83.
XU Wenhua, HE Wenlong, CHEN Jizhong, et al. On-line monitoring device for lightning induced over-voltage of 10 kV distribution line and its application[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(4): 77-83.
- [5] 杨大业,项祖涛,马世英,等. 新能源接入系统暂态过电压产生机理及主要影响因素[J]. 电力电容器与无功补偿, 2022, 43(3): 127-134.
YANG Daye, XIANG Zutao, MA Shiying, et al. Mechanism and main influencing factors of transient over-voltage in new energy access system[J]. Power Capacitor & Reactive

- Power Compensation, 2022, 43(3): 127-134.
- [6] 王渝红, 陈立维, 曾琦, 等. 特高压直流分层接入方式下预防换相失败的协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8): 160-170.
WANG Yuhong, CHEN Liwei, ZENG Qi, et al. Coordinated control strategy for preventing commutation failure in a UHVDC system hierarchically connected to an AC grid[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8): 160-170.
- [7] 朱保军, 咸日常, 刘兴华, 等. 35 kV PT爆炸事故及其谐振过电压分析和预防[J]. 高压电器, 2023, 59(1): 185-191.
ZHU Baojun, XIAN Richang, LIU Xinghua, et al. Explosion accident analysis and prevention of resonance overvoltage of 35 kV potential transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(1): 185-191.
- [8] 刘浩宇, 刘挺坚, 刘友波, 等. 基于图卷积神经网络的直流送端系统暂态过电压评估[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(23): 71-81.
LIU Haoyu, LIU Tingjian, LIU Youbo, et al. A method for evaluating transient overvoltage of an HVDC sending-end system based on a graph convolutional network[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(23): 71-81.
- [9] 冯守信, 毛惠卿, 胡元潮, 等. 雷击临近建筑物土壤散流引发配电线路雷电过电压及防护[J]. 电瓷避雷器, 2023(1): 99-105.
FENG Shouxin, MAO Huiqing, HU Yuanchao, et al. Lightning over-voltage and protection of distribution lines caused by lightning striking soil dissipation near buildings[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(1): 99-105.
- [10] 任志刚, 李伟, 李邦彦, 等. 10 kV 配电避雷器整体大电流冲击耐受特性试验研究[J]. 电瓷避雷器, 2018(2): 15-19.
REN Zhigang, LI Wei, LI Bangyan, et al. Experimental study of high current impulse withstand characteristics of entire 10 kV distribution line arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(2): 15-19.
- [11] 孙泉, 田泽群, 王富豪. 避雷器残压试验中雷电冲击残压波形影响因素分析[J]. 电瓷避雷器, 2023(2): 104-112.
SUN Quan, TIAN Zequn, WANG Fuhao. Factors affecting lightning residual voltage waveform in surge arrester residual voltage test[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(2): 104-112.
- [12] 李艳鹏, 张来福, 刘永鑫, 等. 一种避雷器相对阻性电流在线检测方法[J]. 电瓷避雷器, 2019(5): 150-154.
LI Yanpeng, ZHANG Laifu, LIU Yongxin, et al. An on-line detection method of relative resistive current of MOA[J]. Insulators and Surge Arresters, 2019(5): 150-154.
- [13] METWALLY I A, ELADAWY M, FEILAT E A. Online condition monitoring of surge arresters based on third-harmonic analysis of leakage current[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(4): 2274-2281.
- [14] MUNIR A, ABDUL-MALEK Z, SULTANA U, et al. A novel technique for condition monitoring of metal oxide surge arrester based on fifth harmonic resistive current[J]. Electric Power Systems Research, 2022(202): 107576.
- [15] MUNIR A, ABDUL-MALEK Z, ARSHAD R N. Ageing classification of metal oxide surge arrester using its power factor [C]//IEEE International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). Johor Bahru, Malaysia: IEEE, 2021: 410-413.
- [16] 邢超, 赵军, 刘涛, 等. 基于容性设备接地电流的金属氧化物避雷器阻性电流现场检测方法[J]. 电瓷避雷器, 2022(1): 113-117.
XING Chao, ZHAO Jun, LIU Tao, et al. On-site detection method for resistive current of metal oxide surge arrester based on ground current of capacitive equipment[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(1): 113-117.
- [17] 李山, 王崇, 吴天博. 750 kV 金属氧化物避雷器中均压电容检测技术探讨[J]. 电瓷避雷器, 2021(6): 7-12.
LI Shan, WANG Chong, WU Tianbo. Detection technology for 750 kV metal oxide arrester with shunt capacitance[J]. Insulators and Surge Arresters, 2021(6): 7-12.
- [18] 宋可蓉, 吴命利, 杨少兵, 等. 我国电气化铁路高次谐波谐振问题研究综述[J]. 铁道学报, 2021, 43(1): 64-76.
SONG Kejian, WU Mingli, YANG Shaobing, et al. Review of high-order harmonic resonances of electric railways in China[J]. Journal of the China Railway Society, 2021, 43(1): 64-76.
- [19] 马明, 杜婉琳, 白雪儿, 等. 配电网中串联补偿电容方案的谐波谐振分析[J]. 电测与仪表, 2022, 59(4): 159-163.
MA Ming, DU Wanlin, BAI Xue'er, et al. Harmonic resonance analysis of series compensation capacitor scheme in distribution system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(4): 159-163.
- [20] 王清亮, 包晟玮, 王伟峰. 基于网络导纳矩阵奇异性的配电网谐波谐振分析[J]. 电网与清洁能源, 2023, 39(4): 1-8.
WANG Qingliang, BAO Shengwei, WANG Weifeng. A harmonic resonance analysis method of distribution network based on singularity of admittance matrix[J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(4): 1-8.
- [21] 丁国成, 李伟, 刘云鹏, 等. 外部环境因素对MOA在线监测影响的试验[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 27-29.
DING Guocheng, LI Wei, LIU Yunpeng, et al. Experimental study of influence of environmental conditions on online monitoring data of metal oxide surge arrester[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6): 27-29.
- [22] 王陆璐, 黄佳瑞, 陈立, 等. 10 kV 配电避雷器大电流冲击耐受能力影响因素研究[J]. 电瓷避雷器, 2022(5): 59-66.
WANG Lulu, HUANG Jiarui, CHEN Li, et al. Influencing

- factors of high current impulse withstand capability of 10 kV distribution arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(5):59-66.
- [23] 赵海波, 张万起, 沈 迪, 等. 动车组避雷器谐波特性分析及建模[J]. 高电压技术, 2022, 48(10):3891-3899.
ZHAO Haibo, ZHANG Wanqi, SHEN Di, et al. Harmonic characteristics analysis and modeling of EMU arrester[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10):3891-3899.
- [24] 任佳艺. 高次谐波下动车组避雷器劣化机理与优化方法[D]. 北京:北京交通大学, 2021.
REN Jiayi. Deterioration mechanism and improvement method of EMU arrester under high - order harmonic[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2021.
- [25] 李天册. 27.5 kV 无间隙氧化锌避雷器高频特性及监测系统研制[D]. 北京:北京交通大学, 2020.
LI Tiance. High frequency characteristics and development of monitoring system for 27.5 kV metal oxide surge arrester [D]. Beijing:Beijing Jiaotong University, 2020.
- [26] 王 辉, 何锦强, 赵倡皓, 等. 35 kV 金属氧化物避雷器雷电冲击老化性能的研究[J]. 电瓷避雷器, 2014(4):72-77.
WANG Hui, HE Jinqiang, ZHAO Changhao, et al. Research of degradation performance of 35 kV MOA under lightning impulses[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014 (4):72-77.
- [27] 林楚标, 廖永力, 李锐海, 等. 110 kV 整只氧化锌避雷器雷电冲击老化特性研究[J]. 南方电网技术, 2015, 9(7): 40-45.
LIN Chubiao, LIAO Yongli, LI Ruihai, et al. Research on degradation performance of 110 kV full - scale ZnO MOA under lightning impulses[J]. Southern Power System Technology, 2015, 9(7):40-45.
- [28] SUN Jixing, DING Fan, LYU Yunlong, et al. Leakage current characteristics and ageing assessment technology of roof arrester under ultra harmonics overvoltage[J]. High Voltage, 2022, 7(2):346-356.
- [29] 李天册, 孙继星, 吴命利, 等. 高次谐波下动车组车顶避雷器故障机制研究[J]. 中国安全科学学报, 2019, 29(s1): 88-93.
LI Tiance, SUN Jixing, WU Mingli, et al. Study on failure mechanism of arrester on roof of high speed electric multiple units under high-order harmonics[J]. China Safety Science Journal, 2019, 29(s1):88-93.
- [30] 杜修明, 童 涛, 龙国华, 等. 一起 500 kV 避雷器故障原因分析[J]. 电瓷避雷器, 2022(3):61-67.
DU Xiuming, TONG Tao, LONG Guohua, et al. Failure cause of a 500 kV lightning surge arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2022(3):61-67.
- 方春华(1980—), 男, 副教授, 博士, 主要从事高电压绝缘与在线监测技术方面的研究工作(E-mail: fang107531@163.com)。
- 李 放(1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力电缆运行维护及检修(通信作者)(E-mail: 1292093291@qq.com)。