

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2017.03.014

氧化锌避雷器在线监测方法的现状与发展

韩 晗^{1,2}, 潘学萍¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏 南京 210098; 2. 国网江苏省电力公司泗阳县供电公司, 江苏 泗阳 223700)

摘要: 为了保证氧化锌避雷器的安全运行, 必须对其运行状态进行监测。为了选择避雷器状态在线监测的最佳方式, 对每种监测方法的优缺点及其适用范围进行分析。结果表明, 目前对避雷器状态进行监测的最有效的方法是谐波分析法。在实际应用时通过对阻性泄漏电流进行修正, 以及对采集信号进行快速离散傅里叶变换时选取合适的窗函数能够改善谐波分析法的不足。通过对国内外监测技术的总结可以发现, 未来氧化锌避雷器在线监测方法的总体发展趋势是形成全自动、多功能的综合性绝缘在线监测系统。

关键词: 氧化锌避雷器; 安全运行; 运行状态; 在线监测; 谐波分析法; 阻性泄漏电流

中图分类号: TM862 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2017)03-0277-06

Present state and future of online monitoring methods of ZnO arresters

HAN Han^{1,2}, PAN Xueping¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;
2. Siyang Power Supply Company, State Grid Jiangsu Electric Power Company of China, Siyang 223700, China)

Abstract: It is necessary to monitor the state of ZnO arresters to guarantee their safe operation. In order to select a best way to monitor the state of arresters, the advantages, disadvantages, and application of each monitoring method were analyzed. The results show that the harmonic analysis method is the most effective method. The properties of the harmonic analysis method in practical application could be improved by modifying the resistive leakage current and selecting an appropriate window function when conducting fast discrete Fourier transform on the collected signals. Through review of monitoring technologies in China and abroad, it can be found that in the future, the overall development trend of online monitoring methods of ZnO arresters is to develop fully automatic and multi-functional integrated online insulation monitoring systems.

Key words: ZnO arrester; safe operation; operation condition; online monitoring; harmonic analysis method; resistive leakage current

传统的避雷器由碳化硅构成, 现已逐渐被金属氧化物避雷器(metal oxide surge arrester, MOA)所取代。MOA由氧化锌(ZnO)阀片构成, 它具有良好的非线性特性, 能够保护电网中设备免受过电压危害^[1-4]。氧化锌避雷器属于无间隙型避雷器, 工作时会产生泄漏电流, 在长时间承受系统运行电压的情况下, 氧化锌阀片的性能会遭受损害^[5]。如果避雷器不严或结构不良会使阀片和内部结构受潮, 加上环境污染和劣化也会对阀片造成损害, 严重时将导致避雷器损坏或爆炸, 甚至导致母线短路, 影响电力系统的安全运行^[6]。

一般情况下, 主要依靠2种方式对避雷器进行监测。第1种是对避雷器所在线路定期停电, 进行绝缘预防性试验, 但试验电压一般较低, 达不到高电压等级的要求, 且试验周期较长, 设备实际的绝缘状况不能得

收稿日期: 2016-12-12

作者简介: 韩晗(1992—), 女, 江苏泰州人, 硕士研究生, 主要从事电力系统自动化研究。E-mail: m15651625185@163.com

到真实反映,不能及时反映故障情况^[7];第2种是通过避雷器的特征量进行带电检测来监测其运行状况^[8],主要包括泄漏电流及其阻性分量。但在现场测量时,参考电压的选取较为困难。除此之外,测量结果还会受相间干扰的影响。由于传统的检测方法自动化程度低,易受人为因素影响,抗干扰能力差等问题,已不能适应电网发展的需要。近年来发展起来的避雷器在线监测方法,其准确度、灵敏度高,可以被视为高电压、微电流的精密测量,增强了抗干扰性,且提高了性价比。

MOA 是一种非线性元件,其简化等效电路如图 1 所示^[9]。流过 MOA 的总泄漏电流 I_x 可分为阻性电流 I_{RX} 和容性电流 I_{CX} 两部分。因 R_x 为非线性电阻, I_{RX} 中不仅有基波,还含有 3 次、5 次以及更高次谐波;虽然总泄漏电流以容性电流为主,阻性电流仅占全电流的 5% ~ 20%,但由于容性电流变化小,因此对 MOA 泄漏电流的监测以阻性电流为主。在对 MOA 进行在线监测时,一般采用的量测量包括 I_x 或者 I_{RX} 。对 MOA 进行状态监测时,常基于量测量 I_x 或 I_{RX} 的基波或谐波进行。

1 基于全电流量测信号的在线监测方法

全电流在线监测是避雷器全电流监测的主要方法之一,郝成钢^[10]通过在避雷器的接地线串联一个特制的交流毫安表,来测量避雷器全电流,该方法还可以统计避雷器的放电次数。吴朦朦^[11]进一步将采集的全电流进行傅里叶变换,根据谐波电流进行在线检测。避雷器阀片在受潮受污或者劣化时,阀片的阻性电流会明显增加,从而总的泄漏电流也会相应增加,其原理见图 2。

以全电流作为量测信号可以检测出老化或者受潮严重的避雷器,但是对避雷器早期的受潮和老化等渐进影响无法检测。

2 基于阻性电流量测信号的在线监测方法

根据避雷器的阻性电流以及由此产生的功耗,可以发现 MOA 的早期老化问题。但由于阻性电流只占全电流的 5% ~ 20%,因此仅监测全电流很难判断避雷器的绝缘劣化,故应对阻性电流进行在线监测^[12]。

2.1 阻性电流 3 次谐波法

当 MOA 老化时,阻性电流的 3 次谐波分量显著增加^[13]。3 次谐波法是将电流互感器 CT 套在三相总接地线上,系统电压中没有谐波存在(理想状态下),三相电流中的容性电流与阻性电流基波因 120° 相角差相互抵消,CT 测到的是避雷器阻性电流的三相高次谐波分量之和,除 3 次谐波之外其他高次谐波占有量极少,因此主要为三相 3 次谐波之和 I_0 ^[14]。徐志钮等^[15]就是根据测量得到的 I_0 来判断避雷器是否出现故障,原理如图 3 所示。

避雷器绝缘性能正常时, I_0 很小,当某相避雷器出现故障时,因三相泄漏电流基波分量不能互相抵消,会明显增大。三相谐波法不需要采集系统电压就可测量避雷器的阻性电流 3 次谐波,测量方法简单。但是当系统电压存在谐波分量时,测量结果误差较大;避雷器之间的电容耦合可能导致其相角差不再严格对称,阻性电流基波和容性电流部分未被抵消, I_0 会出现不同程度的增加,影响测量结

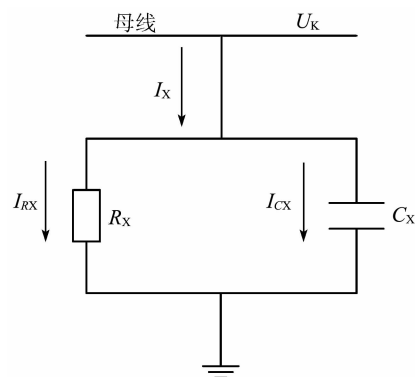


图 1 MOA 简化等效电路
Fig. 1 Simplified equivalent circuit of MOA

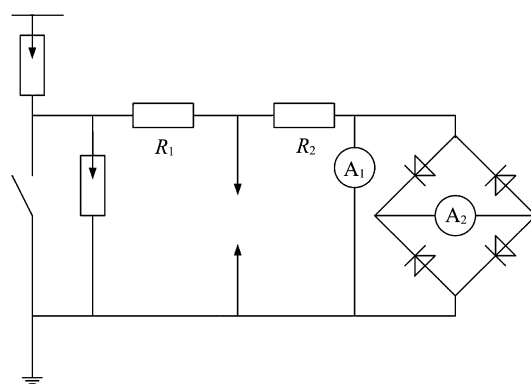


图 2 全电流在线监测原理
Fig. 2 Full current online monitoring

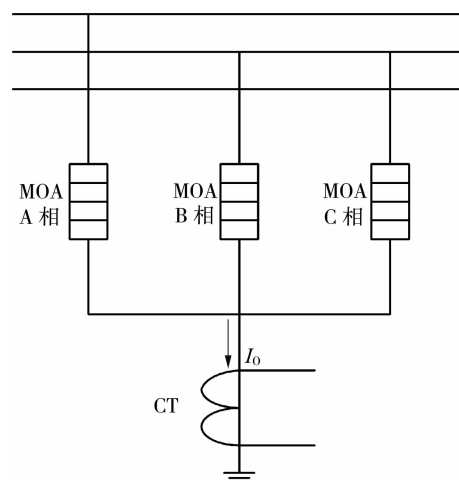


图 3 3 次谐波法原理
Fig. 3 Third harmonic method

果;同时不同厂家生产的避雷器阀片的特性有所差异,3次谐波与阻性电流值的函数关系各有差异,且阀片老化前后又有不同,也会对测量结果产生较大的影响,容易造成误判。因此,3次谐波方法不具备通用性。

2.2 谐波分析法

谐波分析法是目前应用较为广泛的一种监测手段。该方法将采集的全电流和母线电压的信号进行离散数字化,对其进行傅里叶变换在频域中求得电流、电压的基波、各次谐波的幅值和相位^[16]。

谐波分析法能同时测量阻性电流和阻性电流高次谐波分量等重要特征量,当电网电压存在谐波时,谐波分析法能更准确灵敏地反映出特征量情况,且具有较高的稳定性,是所有在线监测方法中较为全面的方法。谐波分析法的不足是电压和电流相位容易受到三相避雷器相间干扰。在变电站中,三相避雷器靠的比较近,各个避雷器之间存在杂散分布电容,邻相电压通过分布电容对避雷器造成耦合干扰,导致避雷器的泄漏电流中含有耦合电容电流成分^[17-18]。避雷器上的电压等级和之间的距离决定了这种干扰程度的大小。

当三相避雷器采用一字形排列时,由于耦合电容造成的角度偏差如下^[19-20]:

$$\varphi_0 = \frac{\varphi_{AC} - 120^\circ}{2} \quad (1)$$

式中: φ_0 ——耦合电容造成的偏差角; φ_{AC} ——避雷器A相与C相的泄漏电流相位差。

避雷器各相阻性电流的修正如下:

$$\dot{I}_{AR} = I_A \cos(\varphi_A + \varphi_0) \quad (2)$$

$$\dot{I}_{BR} = I_B \cos(\varphi_B + \varphi_0) \quad (3)$$

$$\dot{I}_{CR} = I_C \cos(\varphi_C + \varphi_0) \quad (4)$$

式中: I_A 、 I_B 、 I_C ——A相、B相和C相在耦合电容干扰下的泄漏电流; φ_A 、 φ_B 和 φ_C ——A相、B相和C相的初始泄漏电流的相位角; \dot{I}_{AR} 、 \dot{I}_{BR} 、 \dot{I}_{CR} ——A相、B相和C相的电阻性电流。

设A相避雷器和C相避雷器位于边相,根据对称关系可知A相和C相的夹角为 $120^\circ + 2\varphi_0$ 。通过测量两边相避雷器泄漏电流幅值和相位,根据式(1)求出 φ_0 。

MOA在线监测装置需要采集电流、电压等信号,根据奈奎斯特定理,信号采样需满足采样频率是对象信号频率的整数倍。然而电网实际运行时可能产生频率波动,采样率无法严格是电网基波频率的整数倍,造成部分频谱泄漏,带来测量结果的误差^[21]。

在线监测系统采用谐波分析方法时需要将采样信号进行傅里叶变换,实际的傅里叶变换运算只能对有限长度的信号进行处理,这种时域截断分析方法也会导致信号能量泄漏。由于傅里叶运算后,其频谱分量在频域中的表现是离散的,这种现象被称为“栅栏效应”^[22]。

减少“栅栏效应”最有效的办法是增加时域信号的采样点数。也可通过改变窗函数的形状减少频谱的泄漏。可通过选取主瓣宽度窄、旁瓣较小及衰减速率较快的窗函数,尽可能将能量集中在主瓣内。

2.3 容性电流补偿法

容性电流补偿法通过硬件补偿电路,将总泄漏电流中的容性电流补偿掉得到阻性电流^[23-24]。但在实际应用中,硬件补偿电路往往不能实现完全的 90° 相移,因此会造成一定的测量误差。张振洪等^[25]、张志鹏等^[26]针对这一不足提出了改进的补偿算法。容性补偿法理论上可以去掉各次容性谐波成分,但其精度受到采样周期点选取的影响。当采样频率无法达到对象信号频率的整数倍时,会造成部分频谱泄漏,从而导致测量及检测误差。

日本研发的LCD-4是利用补偿法测量阻性电流的代表性仪器^[27],目前也被国内广泛采用,其通过自动调节增益来补偿容性电流,可以监测流经避雷器的阻性电流分量和阻性电流产生的功耗^[28]。

LCD-4现场测量的不足是:(a)需要从电压互感器二次侧获取电压信号,电压互感器本身存在相移;(b)对容性电流信号不能有效补偿,误差很大,随着电压等级的增高误差会相应增大;(c)避雷器相间存在电磁干扰和耦合电容,影响测试结果准确性;(d)避雷器阀片具有交流伏安特性,其电流、电压同时过零时存在不同程度的滞回现象。由于生产厂家的工艺区别,不同规格避雷器阀片的滞回程度不一,也会给测量结果带来一定的误差。

2.4 多元补偿法

当电网存在谐波时(电网正常工作允许存在小于1%~2%的谐波),避雷器的等效电容会产生容性电流基波之外的高次谐波,电压的谐波次数越高,容抗相应变小,容性电流随之增加。避雷器阀片本身掺杂杂散电容,并不全部等效成线性电容,容性电流的高次谐波难免存在。当容性谐波比例相对较高时,测量误差明显增加。因此,有必要研究测量阻性电流时容性电流高次谐波对测量结果带来的误差影响。

与常规的容性电流补偿法不同,多元补偿法针对容性电流各次谐波分别进行补偿^[29]。该方法不直接通过电压互感器端获得补偿信号,而是在电压互感器端交流电压过零时发出一个中断信号,以启动A/D对避雷器泄漏电流采样,并记录此时电压和全电流之间的相位差,计算机根据相位差自动生成和容性电流各谐波成分对应同相位的补偿信号。

多元补偿法在理论上完全可以去掉各次容性谐波成分,通过模拟仿真计算能达到较高的准确度,但其精度受到采样周期点选取的影响。当采样频率无法达到对象信号频率的整数倍时,会造成部分频谱泄漏,无法还原完整的原始信号,带来测量结果的误差。

3 其他在线监测方法

以上主要介绍了国内的基本监测方法,国外对避雷器在线监测的研究始于20世纪60年代。美国是最早进行研究的国家,随后是前苏联、日本和瑞典。前苏联的研究领域主要为局部放电监测、容性绝缘设备监测。日本前期主要对变压器的局部放电监测装置进行了研究。到了20世纪80年代,日本东京电力公司首次使用电流互感器技术采集泄漏电流,对提高在线监测的精确度有重大意义。1990年,瑞典ABB公司通过补偿电网谐波产生的容性电流,得出流过避雷器的阻性电流。2012年西门子研制出ACM智能在线监测系统,其利用电场感应获取信号电压,并采用了寿命趋势分析算法来预估避雷器的使用寿命。2012年挪威Doble公司研发的LCM500在15 min之内可以确定避雷器是否良好以及避雷器是否受到保护。目前应用较多的为基于表面声波传感器的温度测量法^[30]以及双电流传感器法^[31]。在测量时,国外在避雷器上大量应用脱离器,避雷器故障时,脱离器使避雷器引线系统与系统断开,并给出故障避雷器的可见标志^[32],但其没有切断故障电流的能力,不一定能防止避雷器爆炸,尚未在国内得以应用。此外,Almeida等^[33]研究出一种使用热成像技术检测和诊断避雷器故障的方法。Neto等^[34]提出利用人工神经网络对避雷器温控技术进行分析,根据热模式识别出故障避雷器。Lira等^[35]提出利用一种特殊的人工神经网络,即自组织映射地图对泄漏电流的谐波分量的特征量进行分类的方法来实现对避雷器的状态监测。

4 在线监测方法发展趋势

目前MOA的在线监测方式主要选取全电流、阻性电流和阻性电流3次谐波作为主要特征量,它们能够实现MOA状况的实时监测。基于全电流量测信号的在线监测方法适用于老化和受潮较为严重的避雷器,测量精度仍有待提升。基于阻性电流量测信号的在线监测方法能够更准确地发现避雷器早期的老化和受潮问题,对避雷器状况的反映较为全面。在实际情况下,实现对避雷器的精确诊断需要多方面的特征量。避雷器的表面污秽以及环境干扰等都有可能引起误判。因此,在监测中需要综合实际情况全面探讨影响避雷器的各种因素,构建一套全方位的在线监测模型,并且应结合避雷器阀片特性和现场情况做大量的试验研究,总结一套确切可行的诊断标准。除此之外,在对避雷器特征量进行测量时,由于现场环境一般较为复杂,很难保证采集数据的精度,因此,在今后的研究中,应着重加强对传感器技术及测量方法进行改进,从而提高数据采集的精度。

未来避雷器在线测试技术发展的主要方向是形成全自动、多功能的综合性绝缘在线监测系统,运行人员可以通过该系统对避雷器进行实时在线巡回监测。系统的整体运行通过主控室内的主机实现控制,并能够借助通信系统实现与其他设备监测系统的兼容与共享,形成一个全方位的智能监控中心,电力系统监测控制的整体自动化将成为可能。

参考文献:

[1] 杨仲江,曹洪亮,李鹏飞,等. 基于遗传算法的金属氧化物避雷器在线监测[J]. 高电压技术, 2015, 41(9):3104-3109.

- (YANG Zhongjiang, CAO Hongliang, LI Pengfei, et al. On-line monitoring of metal oxide arrester using genetic algorithm[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(9):3104-3109. (in Chinese))
- [2] 崔荣喜,何柏娜,赵云伟,等. 金属氧化锌避雷器泄漏电流仿真研究[J]. 电瓷避雷器, 2016(4):111-115. (CUI Rongxi, HE Bona, ZHAO Yunwei, et al. Simulation research on the leakage current of metal zinc oxide arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2016(4):111-115. (in Chinese))
- [3] 熊泰昌. 电力避雷器[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2013.
- [4] 杨殿成. 金属氧化物避雷器带电测试干扰分析[J]. 高压电器, 2009, 45(5):130-132. (YANG Diancheng. Study on interphase interference to on-line measurement of metal oxide arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5):130-132. (in Chinese))
- [5] 李丹,全杰,赵彦红,等. 基于 WIA-PA 的智能无线避雷器在线监测系统研究[J]. 电气应用, 2014(20):107-111. (LI Dan, TONG Jie, ZHAO Yanhong, et al. Study on WIP-PA based intelligent wireless on-line monitoring system of surge arrester [J]. Electrotechnical Application, 2014(20):107-111. (in Chinese))
- [6] FESER K, KOHLER W, QIU D, et al. Behavior of zinc oxide surge arresters under pollution[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1991, 6(2):688-695.
- [7] 沈骏,卢峰,邢翼. 10 kV 避雷器在线监测系统[J]. 上海电力学院学报, 2014, 30(4):8-10. (SHEN Jun, LU Feng, XING Yi. Study on on-line monitoring system for metal oxide arrester used in 10 kV distribution network [J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2014, 30(4):8-10. (in Chinese))
- [8] 朱海貌,黄锐,夏晓波,等. 金属氧化物避雷器带电检测数据异常的诊断及分析[J]. 电瓷避雷器, 2012(2):68-71. (ZHU Haimao, HUANG Rui, XIA Xiaobo, et al. Diagnosis and analysis on the live detection data abnormal of MOA [J]. Insulators and Surge Arresters, 2012(2):68-71. (in Chinese))
- [9] 陈庆国,李喜平,李广军,等. 基于 GPRS 的氧化锌避雷器状态监测系统[J]. 电机与控制学报, 2010, 14(2):99-102. (CHEN Qingguo, LI Xiping, LI Guangjun, et al. State monitoring system for zinc oxide arrester based on GPRS [J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(2):99-102. (in Chinese))
- [10] 郝成钢. 应用全电流监测氧化锌避雷器运行状态[J]. 吉林电力, 2010, 38(3):20-22. (HAO Chenggang. Total current application for monitoring metal oxide surge arrester operating condition [J]. Jilin Electric Power, 2010, 38(3):20-22. (in Chinese))
- [11] 吴朦朦. 氧化锌避雷器在线监测及专家诊断[D]. 北京:中国科学技术大学, 2014.
- [12] 万四维,陈世元. 氧化锌避雷器阻性电流的在线监测[J]. 广东电力, 2005, 18(12):65-68. (WAN Siwei, CHEN Shiyuan. Resistive current online monitoring of ZnO arresters [J]. Guangdong Electric Power, 2005, 18(12):65-68. (in Chinese))
- [13] 张艺. 避雷器泄漏电流测量方法研究[J]. 电力与能源, 2016(3):394-397. (ZHANG Yi. Study on measurement method of leakage current of arrester [J]. Power & Energy, 2016(3):394-397. (in Chinese))
- [14] LUNDQUIST J, STENSTROM L, SCHEI A, et al. New method for measurement of the resistive leakage currents of metal-oxide surge arresters in service [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1990, 5(4):1811-1822.
- [15] 徐志钮,赵丽娟,丁傲,等. 一种新的 MOA 阻性电流提取算法[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12):47-51. (XU Zhiniu, ZHAO Lijuan, DING Ao, et al. Calculation of MOA resistive current [J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12):47-51. (in Chinese))
- [16] 徐志钮,律方成,李和明. 用改进的 DFT 改进 MOA 容性电流补偿法[J]. 高电压技术, 2007, 33(6):80-84. (XU Zhiniu, LYU Fangcheng, LI Heming. Modified capacitive current compensation method of MOA using improved DFT [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6):80-84. (in Chinese))
- [17] 李金亮,杜志叶,阮江军,等. 基于有限元法的避雷器阻性电流检测的相间干扰计算分析[J]. 电工技术学报, 2016, 31(18):184-190. (LI Jingliang, DU Zhiye, RUAN Jiangjun, et al. Calculation and analysis of interphase interference for monitoring resistive current of arresters based on the finite element method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(18):184-190. (in Chinese))
- [18] 周广平. 消除 MOA 阻性泄漏电流提取过程中相间杂散电容干扰问题研究[J]. 电气开关, 2013, 51(4):25-28. (ZHOU Guangping. Research on stray capacitance interference interphase during cancelling MOA dissipative leakage current [J]. Electric Switchgear, 2013, 51(4):25-28. (in Chinese))
- [19] 莫旭阳. 氧化锌避雷器状态在线监测系统设计[D]. 南京:南京信息工程大学, 2014.
- [20] 王泽文,陈继东,周龙. MOA 在线监测中相间干扰的理论分析[J]. 电磁避雷器, 1998(2):46-48. (WANG Zewen, CHEN Jidong, ZHOU Long. Theoretical analysis of interference in on-line monitoring of MOA [J]. Insulators and Surge Arresters, 1998(2):46-48. (in Chinese))
- [21] 张登奇,杨慧银. 信号的频谱分析及 MATLAB 实现[J]. 湖南理工学院学报, 2010, 23(3):29-33. (ZHANG Dengqi, YANG Huiyin. Analysis of signal spectrum and realization based on MATLAB [J]. Journal of Hunan Institute of Science and

- Technology, 2010, 23(3):29-33. (in Chinese))
- [22] 陈坚,汪伟,王少华,等. 基于 Hanning 自相乘窗的电力谐波 FFT 分析方法[J]. 电力系统保护和控制, 2016, 44(19): 114-121. (CHEN Jian, WANG Wei, WANG Shaohua, et al. An approach for electrical harmonic FFT analysis based on Hanning self-multiply window[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(19): 114-121. (in Chinese))
- [23] 周龙,陈继东,文远芳. 氧化锌避雷器阻性电流的谐波分析法[J]. 华东电力, 1997(7):44-45. (ZHOU Long, CHEN Jidong, WEN Yuanfang. The harmonic analysis method for the resistive leakage currents of ZnO surge arresters[J]. East China Electric Power, 1997(7):44-45. (in Chinese))
- [24] 孟令国. 氧化锌避雷器在线监测及分析系统研究[D]. 山东:山东大学, 2012.
- [25] 张振洪,臧殿红. 氧化锌避雷器在线监测方法的研究[J]. 高压电器, 2009, 45(5):126-129. (ZHANG Zhenhong, ZANG Dianhong. Study on the on-line monitoring method of metal oxide surge arrester[J]. High Voltage Apparatus, 2009, 45(5):126-129. (in Chinese))
- [26] 张志鹏,杨仲江. MOA 谐波阻性电流补偿算法的研究[J]. 高压电器, 2013, 49(4):49-53. (ZHANG Zhipeng, YANG Zhongjiang. Study on the harmonic resistive current compensation algorithm of MOA[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(4): 49-53. (in Chinese))
- [27] 郑劲,彭晓莺. LCD-4 型检测仪带电测试氧化锌避雷器的误差分析及检测效果[J]. 电瓷避雷器, 1995(6):34-40. (ZHENG Jin, PENG Xiaoying. Error analysis and test result of live test of ZnO arresters by LCD-4 type detector[J]. Insulators and Surge Arresters, 1995(6):34-40. (in Chinese))
- [28] 廖新征,赵国杰,张渊渊,等. 基于 DSP 的高压电气设备绝缘在线监测系统的开发[J]. 自动化应用, 2015(12):95-96. (LIAO Xinzhen, ZHAO Guojie, ZHANG Yuanyuan, et al. DSP-based on-line monitoring system for insulation of HV electric equipments[J]. Automation Application, 2015(12):95-96. (in Chinese))
- [29] 唐炬,张新强,孙才新,等. 金属氧化物避雷器阻性电流检测的多元补偿法研究[J]. 高电压技术, 1999, 25(1):36-38. (TANG Ju, ZHANG Xinqiang, SUN Caixin, et al. Study of multi-coefficient compensation method on resistive current passing through MOA[J]. High Voltage engineering, 1999, 25(1):36-38. (in Chinese))
- [30] 武政,严学文. 基于 LabVIEW 和 DSP 的容型设备介损在线检测[J]. 现代电子技术, 2011, 34(18):153-157. (WU Zheng, YAN Xuewen. LabVIEW and DSP-based new measuring system for dielectric loss[J]. Modern Electronics Technique, 2011, 34(18):153-157. (in Chinese))
- [31] HINRICHSEN V, SCHOLL G, SCHUBERT M, et al. On-line monitoring of high-voltage metal-oxide surge arresters by wireless passive surge acoustic wave (SAW) temperature sensors[J]. International Symposium on High Voltage Engineering, 1999, 2(7):238-241.
- [32] 弥璞,李凡,王保山. 一种新型热爆式脱离器的研究及目前脱离器存在问题的分析[J]. 电瓷避雷器, 2002(3):43-46. (MI Pu, LI Fan, WANG Baoshan. Development of a new type thermo explosive disconnecter based on appraisal of prevailing problems of current disconnectors[J]. Insulators and Surge Arresters, 2002(3):43-46. (in Chinese))
- [33] ALMEIDA LAURENTYS C A, BRAGA A P, NASCIMENTO S, et al. Intelligent thermographic diagnostic applied to surge arresters: a new approach[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(2):751-757.
- [34] NETO E T W, COSTA E G D, MAIA M J A. Artificial neural networks used for ZnO arresters diagnosis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(3):1390-1395.
- [35] LIRA G R S, COSTA E G, FERREIRA T V. Metal-oxide surge arrester monitoring and diagnosis by self-organizing maps[J]. Electric Power Systems Research, 2014, 108(3):315-321.