

DOI: 10.7652/xjtuxb201410009

特快波前下金属氧化物电阻片伏安特性试验研究

陈洁¹, 郭洁¹, 邱爱慈¹, 张桂红²

(1. 西安交通大学电气工程学院, 710049, 西安; 2. 青海省电力公司, 810008, 西宁)

摘要: 设计搭建了模拟特快速瞬态过电压发生器,并确定了相关的电压、电流测量方法,选定具有代表性的超高压避雷器使用的金属氧化物电阻片(MOV)作为研究对象,试验研究了 MOV 在电流波头时间为 80~150 ns 的特快波前冲击电流下的伏安特性、电流陡度的影响关系及阻抗特性。在特快波前冲击电流作用下,MOV 伏安特性试验结果表明:随着电流波头时间的减小,MOV 的电压峰值升高,MOV 电压峰值远大于同电流标准雷电波下的电压峰值,特快波前电流冲击波下 MOV 残压上升约 9%~16%;MOV 的电压峰值随着电流峰值的增大而增大,而且电流波头时间越短,同一电流值下的电压峰值越高,在特快波前冲击电流波头时间由 150 ns 变化至 80 ns 时,MOV 电压峰值上升约为 10%~20%;在试验研究的电流波头时间范围和电流峰值范围内,电压峰值出现的时间明显超前于电流峰值出现的时间,呈现感性阻抗特征。

关键词: 金属氧化物电阻片;特快速瞬态过电压;伏安特性;阻抗特性

中图分类号: TM862 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2014)10-0054-06

Experimental Research on V-A Characteristics of Metal Oxide Varistors under Very Fast Transient Wave

CHEN Jie¹, GUO Jie¹, QIU Aici¹, ZHANG Guihong²

(1. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Qinghai Electrical Power Cooperation, Xining 810008, China)

Abstract: Very fast transient overvoltage (VFTO) waveform generator is designed and constructed based on the second-order circuit theory, and the voltage and current measurement scheme is determined. Two different specifications of representative metal oxide varistors (MOV) are chosen as the samples, and the V-A characteristic and impedance behavior of MOV under impulse current within the range of 80-150 ns are investigated. The experiments indicate that as the current peak remains constant, the residual voltage under VFTO reaches approximately 9%-16% higher than the standard lightning impulse voltage; with the rising applied current from 80 ns to 150 ns, the voltage peak value increases by 10% to 20%; the voltage peak comes obviously earlier than the current peak, exhibiting the inductive behavior.

Keywords: metal oxide varistors; very fast transient overvoltage; V-A characteristic; impedance behavior

气体绝缘的金属封闭式组合电器(GIS)中隔离开关操作会引起频率约为 1~100 MHz、峰值最大可达 2.5(标么值)的特快速瞬态过电压(VFTO)^[1-8]。高幅值、陡波前的 VFTO 会威胁 GIS 内部设备及变压器绝缘。作为过电压的主要保护设备,避雷器(MOA)在 VFTO 作用下的伏安特性受到了极大的

关注。

近年来,国内外专家学者对于雷电波及陡波下 MOA 的伏安特性及电气模型做了大量的研究。BBC 公司搭建了特快波前方波发生器,研究了 MOV 形状对伏安特性的影响^[9];文献[10-12]对陡波下电压峰值和放电电流时差进行了研究;中国电力科学研究院搭建特快波前试验回路,对电流峰值约为 1~10 kA 的电流区 MOV 的伏安特性进行了试验研究^[13]。

基于试验结果,国内外专家学者提出了陡波下 MOV 的模型,限于试验条件,模型适用电流波头时间为 0.5~45 μs 的范围。IEC 标准中提出了快波前作用下的一种非线性电阻模型,将避雷器在标准雷电冲击下的残压提高 5%~10%^[14];文献[15]提出了动态滞环的概念以及非线性电感模型;IEEE 第 3.4.11 工作组提出了广泛适用于电流波头时间在 0.5~45 μs 时的 MOV 模型,称为 IEEE 推荐的模型^[16];文献[17]对 MOV 模型中参数的确定方法及 MOV 的等值电容进行简化,提出了 PINCEITI 模型;文献[18]提供了一种通过数值计算方法确定模型参数,取消了 IEEE 推荐模型的参数确定方法中对避雷器几何尺寸差异性的限制。

本文使用二阶电路理论,搭建特快波前冲击电流发生器,通过低感电容对气体火花开关闭放电得到 VFTO 模拟电压波,并对 D115 $\times$ 8(D115)、D70 $\times$ 8(D70)两种规格的 MOV 在波头为 80~150 ns 的冲击电流波作用下的伏安特性进行了试验研究,分析了特快波前冲击电流下 MOV 残压特性、阻抗特性及电流陡度对伏安特性的影响关系。

1 特快波前试验平台的搭建

1.1 试品

为了研究超高压、特高压系统中 MOA 在 VF-TO 下的伏安特性,选用具有代表性的用于超高压交流系统的 D115、D70 两种典型规格 MOV 为研究对象。为了减小试品伏安特性的分散性对于特快波前放电试验结果的影响,同种规格选取 3 片直流参考电压 $U_{1\text{mA}}$ 、泄漏电流 I_s 和标称电流下最大残压相同的 MOV 作为试品,其伏安特性见图 1。

1.2 试验回路

为了尽量减小特快波前冲击电流发生器放电回路的电感,连线采用宽铜皮连接,放电回路电路见图 2。开关的放电时间应尽可能短,考虑试品 MOV 的阻抗,仿真结果表明试验回路可产生峰值为 0.1~

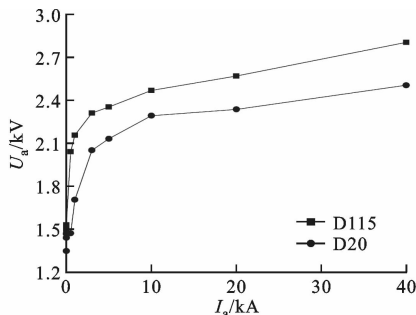


图 1 金属氧化物电阻片的伏安特性

1.0 kA 的电流,满足试验要求。由于在 VFTO 下 MOV 的电压峰值过冲一般出现在波头部分,重点分析波头对 MOV 的影响,采取单级冲击电压发生器回路,试验电路见图 3。

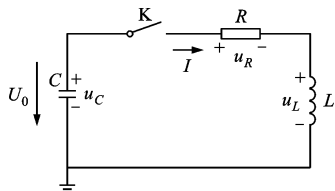
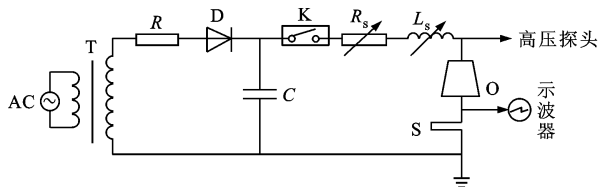


图 2 放电回路电路图



C 为充、放电电容;K 为气体火花间隙开关; R_s 为调波电阻;
 L_s 为调波电感;O 为待测试品(MOV);S 为分流器

图 3 试验电路图

1.3 测量系统

试验采用由分流器、高压探头和数字示波器组成的测量系统。本文特快波前电流测量采用同轴管式分流器,响应时间为 10 ns,最大电流峰值为 10 kA;电压测量采用泰克 P6015A 高压探头,分压比为 1 000:1,带宽为 DC~75 MHz,可测最小上升沿为 4 ns;考虑电压电流波头时间,采用泰克 4032 示波器,带宽为 DC~350 MHz,最高采样率为 $2.5 \times 10^9 \text{ s}^{-1}$ 。通过调节气体开关内的压强改变开关的放电电压,在 D115、D70 两种 MOV 试品上可产生电压波头为 40~140 ns 的冲击电压波形,通过 MOV 的冲击电流波头为 80~150 ns、电流峰值为 0.1~1.0 kA。试验方法根据国标 GB11032—2010,环境温度为 25 $^{\circ}\text{C}$,测试数据均为 3 次测量数据的平均值。

2 特快波前下的 MOV 特性分析

在实际运行中,GIS 的 VFTO 受系统容量影响,由于 GIS 隔离开关操作产生的通过电源侧 MOA 的冲击电流峰值范围为 0.1~4 kA,同时考虑到超高压、特高压 MOA 多为多柱并联结构,本文设计搭建的特快波前冲击电流发生器输出的冲击电流峰值范围为 0.5~1.0 kA,对于研究 VFTO 作用下 MOA 的伏安特性具有一定的代表性。

试验所得 D115 MOV 典型电压 U_a 、电流 I_a 波形分别如图 4、图 5 所示,D70 MOV 典型电压、电流波形分别如图 6、图 7 所示。参照标准雷电波和标准操作波下 MOV 伏安特性的分析方法,定义特快波前冲击电流下 MOV 压比 $k=U_m/U_{1mA}$,其中 U_m 为特快波前冲击电流下 MOV 电压峰值, U_{1mA} 为直流 1 mA 下 MOV 参考电压,MOV 压比 k 可表征 MOA 的保护水平。

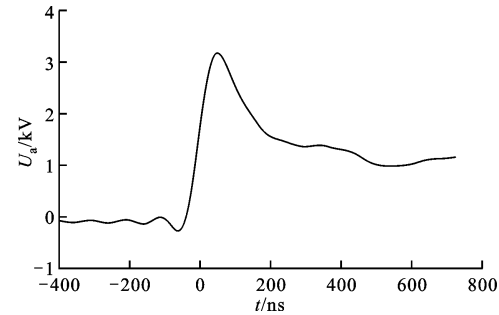


图 4 D115 MOV 电压波形

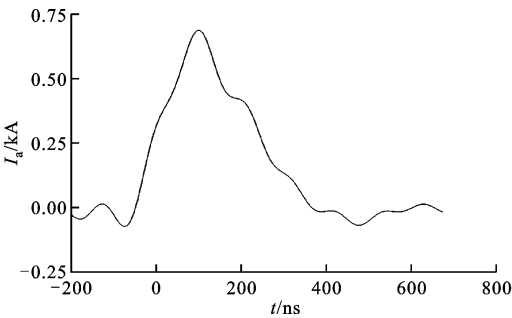


图 5 D115 MOV 电流波形

2.1 残压特性分析

以往研究表明,MOV 对波前数 μs 以下的陡波前电流,会产生电压峰值上升的现象,使得 MOA 的保护特性与传统的雷电波、操作波下的保护特性有较大的差别,可能危及设备的绝缘。MOV 在陡波下电压峰值水平明显提高,显著降低了 MOA 的保护水平。因此,在特快波前下 MOA 的绝缘配合,必须考虑 MOA 电压峰值上升的现象,保证 MOA 防

护的有效性。

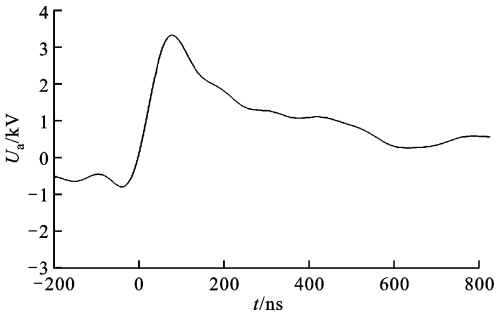


图 6 D70 MOV 电压波形

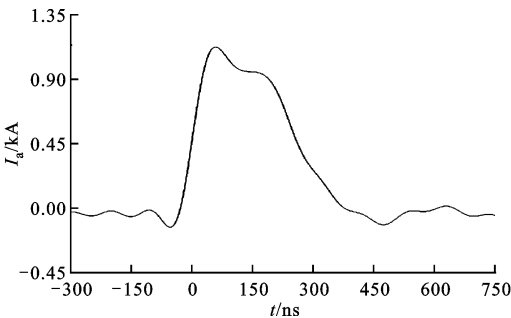


图 7 D70 MOV 电流波形

MOV 小电流区伏安特性试验结果表明,D115 MOV 的 $U_{1mA} = 2.06$ kV,D70 MOV 的 $U_{1mA} = 2.26$ kV,D115 MOV 和 D70 MOV 在特快波前下的压比分别见表 1、表 2,标准雷电波下的压比见表 3。

表 1 不同电流波头时间下 D115 MOV 的压比

$I_m /$ kA	k					
	80 ns	95 ns	102 ns	120 ns	135 ns	150 ns
0.2	1.177	1.143	1.090	1.055	1.046	1.001
0.4	1.342	1.274	1.221	1.187	1.146	1.071
0.6	1.405	1.366	1.284	1.269	1.235	1.192
0.8	1.516		1.332			1.259

表 2 不同电流波头时间下 D70 MOV 的压比

$I_m /$ kA	k					
	89 ns	92 ns	110 ns	120 ns	123 ns	136 ns
0.2	1.202	1.197	1.162	1.149	1.118	1.074
0.4	1.422	1.379	1.343	1.281	1.273	1.228
0.6	1.498	1.458	1.449	1.418	1.369	1.348
0.8	1.511					1.436

表 3 D115、D70 MOV 的标准雷电冲击压比

规格	k			
	1 #	2 #	3 #	平均值
D115	1.004	1.004	1.004	1.004
D70	1.082	1.082	1.082	1.082

试验结果表明:D115 MOV 在特快波前电流波头下的压比范围为 1.00~1.52,D70 MOV 的压比为 1.07~1.51;与同电流峰值下标准雷电波下的残压相比,不同电压波头时间的特快波前电流冲击波下 D70 MOV 电压峰值上升约 24%~38%,D115 MOV 电压峰值上升约 18%~39%;考虑到特快波前冲击电流作用下 MOV 电压峰值与残压具有约 8%~20%的过冲^[13],不同电压波头时间的特快波前电流冲击波下 D70 MOV 残压上升约 9%~16%,D115 MOV 残压上升约 10%~15%。特快波前时间冲击电流作用下 MOV 伏安特性随电流陡度的变化关系主要取决于配方工艺,与 MOV 规格尺寸关系不大。

2.2 阻抗特性分析

在所有的标准雷电及陡波冲击电流试验结果中,电压均超前电流到达峰值,表现出一定的感性阻抗特征。VFTO 频率范围约为 0.3~100 MHz,远高于标准雷电冲击电流波及陡波冲击电流的等值频率,MOV 本体电容及杂散电容均不再可以忽略,特快波前冲击电流下 MOV 可能表现出不同的阻抗特征,值得关注。

国内外学者对特快波前下 MOV 的阻抗特性曾进行了一定的研究,但并未形成一致的结论。其中,文献[10-12]的试验结果表明,当电流波头时间大于 1 μs 时,电压先于电流到达峰值;当电流波头时间小于 1 μs 时,电压晚于电流到达峰值。然而,BBC 公司试验结果则显示,当 MOV 电压波头时间约为 100 ns 时,电压先于电流到达峰值,MOV 表现出感性阻抗特征^[9]。中国电力科学研究院试验结果显示,当 MOV 电压波头时间约为 50 ns 时,电压先于电流到达峰值,MOV 表现出感性阻抗特征^[13]。

为了确定本文选取的两种规格 MOV 在不同电流波形下的阻抗特性,本文对波头时间为 80~150 ns 的冲击电流波下电压-电流相位关系特性进行了试验研究,两种规格试品 MOV 试验产生的电压、电流波头时间见表 4 和表 5。由表 4 和表 5 可以清楚地看到:在电流波头时间为 80~150 ns、电流峰值为 0.1~1 kA 的冲击电流作用下,MOV 电压峰值明显超前于电流峰值,MOV 在特快波前电流波形下呈现出了感性阻抗特征;同时,特快波前冲击波下 MOV 阻抗特性取决于配方工艺,与规格关系不大。

在电流波头时间为 80~150 ns、电流峰值为 0.1~1 kA 的冲击电流作用下,电压波头超前于电流波头,MOV 在特快波前下呈现出感性阻抗特征。

表 4 D115 MOV 电压-电流波头时间对照表

电气量	t_f/ns					
电压	80	92	102	120	135	150
电流	54	62	95	106	110	138

表 5 D70 MOV 电压-电流波头时间对照表

电气量	t_f/ns					
电压	89	92	105	112	123	136
电流	42	76	88	90	111	121

定性表述 MOV 陡波前特性和电容特性的 MOV 的等值电路如图 8 所示,图中所示电感 L 可定性说明电压峰值出现在电流峰值之前,可变电阻 R_1 表示随着电流的增大, α 系数将增大,可变电容 C 用来表征 MOV 本体电容。文献[9]结果表明,MOV 等值电容 C 随瞬时电流的陡度而变化,不同电流陡度对应的等值电容值 C 不同。

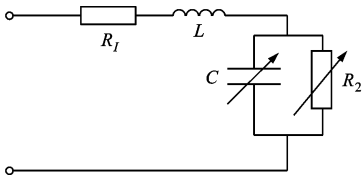


图 8 MOV 的等值电路

3 电流陡度影响分析

不同电流波头陡度下 MOV 的伏安特性是影响 VFTO 作用下 MOA 保护特性的主要因素。研究电流波头时间对 MOV 电压峰值的影响是探究超高压 GIS 中 MOA 频繁动作的原因。由于随机性和多因素性造成 VFTO 频率范围宽泛,因此需要研究不同电流波头时间对 MOV 电压峰值水平的影响。

在波头为 80~150 ns 的冲击电流波下,D115、D70 两种 MOV 在不同电流波头时间下的电压峰值与电流峰值的关系分别如下图 9、图 10 所示。从图中看到,在同一电流波形下,两种 MOV 的电压峰值 U_m 随着电流峰值 I_m 的增大而增大,而且电流波头时间越短,同一电流值下的电压峰值越高。

图 11、图 12 所示分别为 D115、D70 MOV 在电流峰值分别为 0.2、0.4、0.6 kA 时电压峰值水平与电流波头时间的变化关系。由图 10、图 11 可见:随着电流波头时间的增加,MOV 的电压峰值呈现下降趋势,两种型号 MOV 表现出相同的变化规律;特快波前时间冲击电流作用下 MOV 伏安特性随电流陡度的变化关系主要取决于配方工艺,与 MOV 规

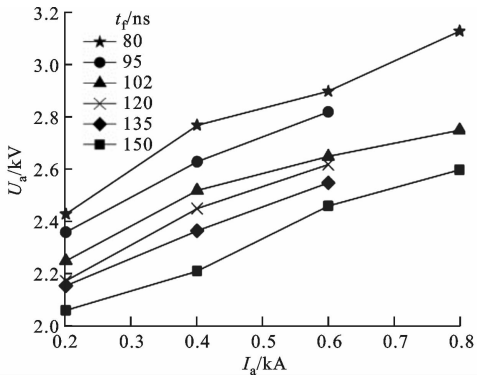


图9 D115 MOV 电压峰值与电流峰值的关系

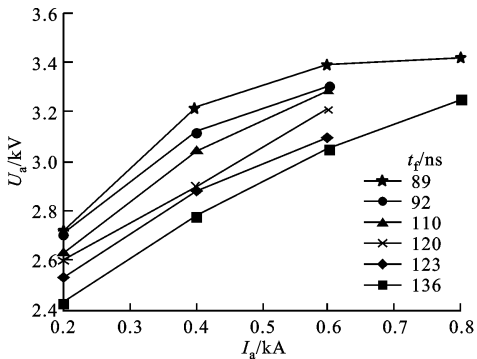


图10 D70 MOV 电压峰值与电流峰值的关系

格尺寸关系不大。

为了比较两种不同规格 MOV 在陡波下的电压峰值变化情况,选取相同的电流波形变化范围。对于 D115 MOV,当 $I_a=0.2$ kA、 t_f 由 136 ns 变化至 80 ns 时,MOV 的电压峰值升高了 18.9%。当 I_a 分别为 0.4 和 0.6 kA、电流波头时间变化范围不变时,MOV 的电压峰值分别升高了 20.1% 和 15.2%。对于 D70 MOV,当电流峰值分别为 0.2、0.4、0.6 kA,电流波头时间变化范围为 136 ns 至 80 ns 时,MOV 的电压峰值分别升高了 10.6%、13.6% 和 10.0%。

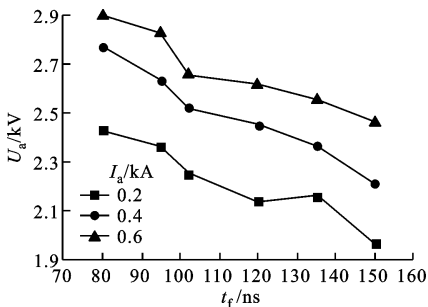


图11 D115 MOV 电压峰值与电流波头时间的关系

在特快波前冲击电流波头时间由 136 ns 变化至 80 ns 时,D115 MOV 电压峰值上升约为 15%~

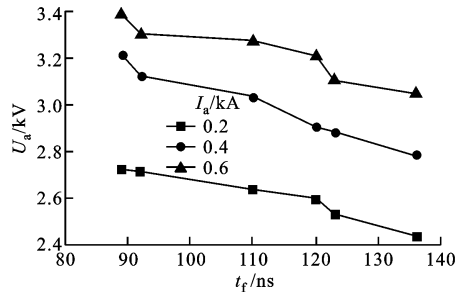


图12 D70 MOV 电压峰值与电流波头时间的关系

20%。在特快波前冲击电流波头时间由 150 ns 变化至 80 ns 时,D70 MOV 电压峰值上升约为 10%~13%。因此,对同一 MOV,当电流波头时间变化范围相同时,随着电流峰值的增加,MOV 的电压峰值变化幅度减小。在同一电流峰值下,在电流波头时间为 80~150 ns 内,随着波头时间的增加,D115 MOV 的电压峰值变化略大于 D70 MOV 的变化。

4 结 论

本文使用二阶电路理论,设计和搭建了 VFTO 发生器,选取具有代表性的 D115、D70 两种规格的 MOV,在电流波头时间为 80~150 ns、电流峰值为 0.1~1.0 kA 的冲击电流波作用下,研究了其伏安特性和阻抗特性,得出了以下结论。

(1)特快波前冲击波下 MOV 残压都高于同电流标准雷电波下的残压。与同电流峰值下标准雷电波下的残压相比,不同电压波头时间的特快波前电流冲击波下 D70 MOV 残压上升约 9%~16%,D115 MOV 残压上升约 10%~15%。

(2)特快波前冲击波下电压峰值出现时间明显超前于电流峰值出现时间,MOV 在特快波前电流波形下呈现感性阻抗特征。特快波前冲击波下 MOV 阻抗特性取决于配方工艺,与规格关系不大。

(3)特快波前冲击波下 MOV 的电压峰值随着电流峰值的增大而增大,MOV 电流波头时间越短,同一电流下的电压峰值越高。在特快波前冲击电流波头时间由 136 ns 变化至 80 ns 时,D115 MOV 电压峰值上升约 15%~20%;在特快波前冲击电流波头时间由 150 ns 变化至 80 ns 时,D70 MOV 电压峰值上升约 10%~13%。

参考文献:

- [1] 邹建华,康宁,李成,等.快速暂态过电压的形成机制与抑制方法[J].西安交通大学学报,2005,39(4):417-420.

- ZOU Jianhua, KANG Ning, LI Cheng, et al. Research on mechanism in formation and depression of very fast transient overvoltage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(4): 417-420.
- [2] 戴敏, 谷定燮, 孙岗, 等. 特高压气体绝缘设备快速瞬态过电压的试验回路研究 [J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(31): 28-36.
- DAI Min, GU Dingxie, SUN Gang, et al. Study on full-scale 1000 kV gas insulated switchgear test circuit for very fast transient overvoltage [J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(31): 28-36.
- [3] 李六零, 胡攀峰, 邱毓昌, 等. 一种抑制气体绝缘开关装置暂态地电位升高的措施 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(6): 624-627.
- LI Liuling, HU Panfeng, QIU Yuchang, et al. Suppression of transient ground potential rise in gas insulated substation [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(6): 624-627.
- [4] 张文元, 史保壮, 邱毓昌. 用微积分系统测量快速暂态过电压的研究 [J]. 西安交通大学学报, 1996, 30(11): 74-79.
- ZHANG Wenyuan, SHI Baozhuang, QIU Yuchang. Research on the measurement of very fast transient overvoltage by differentiating/integrating system [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1996, 30(11): 74-79.
- [5] 李六零, 胡攀峰, 邱毓昌. 不同变压器绕组模型对计算快速暂态过电压的影响分析 [J]. 西安交通大学学报, 2005, 39(10): 1160-1164.
- LI Liuling, HU Panfeng, QIU Yuchang, et al. Analysis of very fast transient overvoltage calculation affected by different transformer winding models [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2005, 39(10): 1160-1164.
- [6] 陈宇渊, 袁梅珍. 快速暂态过电压测试技术的研究 [J]. 西安交通大学学报, 1992, 26(5): 81-86.
- CHEN Yuyuan, YUAN Meizhen. Research on measurement techniques for fast transient overvoltage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1992, 26(5): 81-87.
- [7] 史保壮, 张文元, 邱毓昌. 测量 GIS 中快速暂态过电压的微积分系统响应特性研究 [J]. 西安交通大学学报, 1997, 31(11): 72-75.
- SHI Baozhuang, ZHANG Wenyuan, QIU Yuchang. Research on differentiating-integrating system for the measurement of very fast transient overvoltage in GIS [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 1997, 31(11): 72-75.
- [8] SHU Yinbiao, CHEN Weijiang, LI Zhibing, et al. Experimental research on very-fast transient overvoltage in 1100 kV gas-insulated switchgear [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(1): 458-466.
- [9] SCHMIDT W. Behavior of MO-surge-arrester blocks to fast transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(1): 292-300.
- [10] VALSALAL P, USA S, UDAYAKUMAR K. Response of metal oxide arrester in gas-insulated substation and methods to improve its dynamic characteristics [J]. IET Science, Measurement and Technology, 2012, 6(4): 222-228.
- [11] VALSALAL P, USA S, UDAYAKUMAR K. Modelling of metal oxide arrester for very fast transients [J]. IET Science, Measurement and Technology, 2011, 5(4): 140-146.
- [12] VALSALAL P, USA S, UDAYAKUMAR K. Importance of capacitance on metal oxide arrester block model for VFTO applications [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 1294-1295.
- [13] 李志兵, 王浩, 颜湘莲, 等. 金属氧化物避雷器在陡波下的试验与模型分析 [J]. 高电压技术, 2012, 38(10): 2698-2706.
- LI Zhibing, WANG Hao, YAN Xianglian, et al. Analysis of test and model for metal oxide arrester under steep-front wave [J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2698-2706.
- [14] IEC. IEC60099-4: 2006 Surge arresters; part 4 Metal-oxide surge arresters without gaps for a. c. systems [S]. Geneva, Switzerland: IEC, 2006.
- [15] KING I, FUNABASHI T, SASAKI H, et al. Study of ZnO arrester model for steep front wave [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(2): 834-839.
- [16] IEEE Working Group 3.4.11. Modeling of metal oxide surge arresters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 778-785.
- [17] PINCEITI P, GIANNETTONI M. A simplified model for zinc oxide surge arresters [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2): 393-398.
- [18] LI Hongjie, BIRLASEKARAN S, CHOI S S. A parameter identification technique for metal-oxide surge arrester models [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(3): 736-741.

(编辑 杜秀杰)