

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2024.10.014

多种冲击电流下金属氧化物压敏电阻动态模型准确性分析

王伟芳¹, 何雨微², 徐真¹, 刘政国³, 刘亚坤¹

(1. 上海交通大学电力传输与功率变换控制教育部重点实验室, 上海 200030; 2. 国网浙江省电力有限公司杭州供电公司, 杭州 310009; 3. 上海雷霸电气科技有限公司, 上海 201400)

摘要: 为研究 IEEE 模型和 Pinceti 模型对金属氧化物压敏电阻(metal-oxide varistor, MOV)的仿真准确性, 以额定电压为 150~750 V 的 6 种 MOV 为对象, 理论和试验分析了不同幅值 4/10 μ s、8/20 μ s 雷电冲击电流和 30/60 μ s 操作冲击电流下的残压及吸收能量。结果表明, 在 IEEE 模型参数确定中, 随操作冲击电流幅值的增大, 非线性电阻参考电压取值增大但电感取值减小; 在残压预测中, IEEE 模型误差为 2.6%, 较 Pinceti 模型误差 4.6% 更准确; 在 MOV 吸收能量估算中, IEEE 模型在低于 10 kA 电流幅值下的准确性高于 Pinceti 模型, 且 IEEE 模型对 30/60 μ s 操作冲击电流的准确性较高, 对 8/20 μ s 雷电冲击电流准确性较低。

关键词: 冲击电流试验; 金属氧化物压敏电阻; 动态模型; 残压; 吸收能量

Accuracy Analysis of Dynamic Model of Metal-oxide Varistor Under Different Impulse Currents

WANG Weifang¹, HE Yuwei², XU Zhen¹, LIU Zhengguo³, LIU Yakun¹

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Shanghai Jiao Tong University, Ministry of Education, Shanghai 200030, China; 2. State Grid Hangzhou Power Supply Company, Hangzhou 310009, China; 3. Shanghai Leiba Electric Technology Co., Ltd., Shanghai 201400, China)

Abstract: For studying the simulation accuracy of the IEEE model and Pinceti model for metal-oxide varistor (MOV), six types of MOVs at rated voltage of 150-750 V are taken as the object to theoretically and experimentally analyze the residual voltage absorption energy at amplitude of lightning impulse current of 4/10 μ s and 8/20 μ s and the switching current of 30/60 μ s. The results show that in the parameter determination of IEEE model, the reference voltage of the nonlinear resistance increases but the inductance decreases with the increase of switching impulse current amplitude; In the residual voltage prediction, the error of IEEE model is 2.6%, which is more accurate than 4.6% of the Pinceti model; In the estimation of the energy absorption of MOV, the accuracy of IEEE model is higher than that of the Pinceti model when the current amplitude is less than 10 kA, and the accuracy of IEEE model to the switching impulse current of 30/60 μ s is higher, but to the lightning impulse current of 8/20 μ s is lower.

Key words: impulse current testing; metal-oxide varistor(MOV); dynamic model; residual voltage; energy absorption

0 引言

金属氧化物压敏电阻(metal-oxide varistor, MOV)是一种用以限制电气设备过电压的高度非线性

性元件, 在不同电压保护等级中均有应用^[1-5]。MOV 作为浪涌保护器(surge protection device, SPD)的核心元件, 其过电压能量吸收能力和残压特性是影响被保护设备安全运行的关键因素^[6-9]。由于不同雷电流

收稿日期: 2024-03-25; 修回日期: 2024-05-07

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC1501506)。

Project Supported by National Key Research and Development Program of China(2017YFC1501506).

波形特征差别明显,及其侵入系统的端口阻抗特性各异^[10-11],准确的仿真模型可以预测不同过电压下MOV的残压特性及能量吸收能力,对SPD的选型和低压系统雷电防护研究至关重要^[12-13]。

研究表明,在波头较缓的冲击电流作用下,MOV可用简化的非线性电阻模型进行研究^[14];在波头较陡的雷电浪涌电流作用下,MOV具有与所加电流频率相关的动态伏安特性^[15]。MOV的动态伏安特性具体表现为,对于给定峰值的电流脉冲,MOV两端电压的峰值随着波前时间的减少而增加,且电压峰值出现在电流峰值之前。因此,MOV的动态模型分析应包含与频率相关的阻抗信息,其中,MOV动态模型的建模和评价方法是研究一直关注的重要问题。

国内外学者围绕MOV的动态模型研究做了大量工作^[7, 12, 14-21]。其中,IEEE 3.4.11工作小组提出的适用于电流波前时间为0.5~45 μs 的IEEE模型^[15]和Pinceti提出的Pinceti模型^[16]应用广泛。已有研究表明IEEE模型和Pinceti模型对高压系统用MOV的残压分析较为准确,但对吸收能量的预测误差较高^[3, 14, 17-19]。然而,对于低压系统用MOV,上述动态模型准确性研究较为缺乏。Khanmiri指出,低压MOV和高压MOV的能量吸收能力随电流密度增加表现出相反的变化特征^[22-23],MOV动态模型在低压情况的准确性不能参照高压情况得到的结论进行评价。同时,现有MOV模型分析中存在电压仿真波形与实测波形差异较大的问题^[24],难以判别造成MOV模型吸收能量预测误差较高的原因。

因此,文中选取具有代表性的6种不同额定电压(150~750 V)的MOV元件,考虑操作过电压和雷电过电压的作用,对MOV元件施加不同幅值和不同波头/波尾时间的冲击电流激励。同时,建立上述MOV元件的IEEE模型和Pinceti模型,以残压和吸收能量相对误差作为模型准确性评价指标,通过试验和模型计算,开展IEEE模型和Pinceti模型在不同雷电流幅值、不同浪涌波形作用时的准确性评价研究。研究工作可为MOV动态模型的参数评价与优化提供参考与建议。

1 试验设计

选取6种型号的MOV元件,其参数见表1。表1中: d 为MOV元件厚度; U_{1mA} 为标称压敏电压; I_n 为标称放电电流; U_n 为额定电压。为减小MOV的个

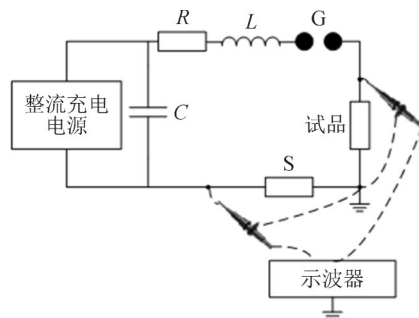
体差异影响,使用防雷元件测试仪(型号为FG-2G)进行试验样品筛选,选出每一型号中MOV元件静态参数相近(差异<1%)的样品,以保证后续试验与建模分析所用MOV元件的有效性。

表1 6种型号MOV元件的相关参数

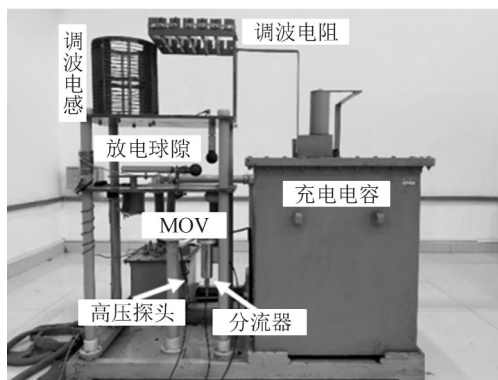
Table 1 Parameters of six types of MOVs

型号	d/mm	U_{1mA}/V	I_n/kA	U_n/V
E150	2.95	240	20	150
E275	4.72	430	20	275
E460	6.54	750	20	460
E550	7.28	910	20	550
E680	8.48	1 100	20	680
E750	9.12	1 200	20	750

MOV元件的冲击电流试验示意图和现场布置见图1。该试验平台由整流充电电源、充电电容(C)、调波电阻(R)、调波电感(L)、放电球隙(G)和分流器(S)组成。在试验测量方面,使用型号为TEK P5100的高压探头测量MOV样品两端电压,使用型号为TEK P2220的探头测量分流器S两端电压,使用型号为TEK MSO 2022B的数字示波器测量并记录电压波形。



(a) 示意图



(b) 现场布置图

图1 MOV元件冲击电流试验示意图和现场布置图

Fig. 1 Schematic diagram and site layout of impulse current test for MOVs

现行标准 GB/T 11032—2020^[25]中要求在0.01~2倍标称放电电流范围内选取适当幅值的8/20 μs

雷电冲击电流和幅值为 2 kA 的 30/60 μs 操作冲击电流进行残压试验, GB/T 18802.11—2020^[26] 中要求施加峰值为 0.1、0.2、0.5、1.0 倍标称放电电流的 8/20 μs 雷电冲击电流进行残压试验。文[7、18]分别使用幅值为 6 kA 的 30/60 μs 操作冲击电流、幅值为 0.5~20 kA 的 4/10 μs 、8/20 μs 冲击电流测量 MOV 的残压。因此, 选取不同波头/波尾时间的 4/10 μs 、8/20 μs 雷电冲击电流^[18, 25~26] 和 30/60 μs 操作冲击电流^[7, 17, 25] 作为 6 种型号 MOV 样品的激励。其中, 4/10 μs 、8/20 μs 雷电冲击电流的幅值范围为 2~20 kA, 30/60 μs 操作冲击电流的幅值范围为 2~10 kA。每个 MOV 样品只经受一次冲击电流, 以减小 MOV 样品状态差异对试验结果的影响, 取 3 个 MOV 样品测试的平均值为最终结果。以型号为 E275 的 MOV 样品为例, 在电流幅值为 20 kA、波形为 4/10 μs 的脉冲电流下, 其电压和电流波形见图 2。

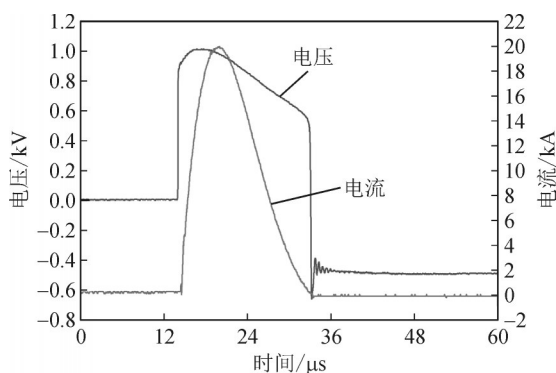


图2 E275型MOV样品在4/10 μs 电流下的电压和电流波形

Fig. 2 The measured voltage and current waveforms of E275 MOV under 4/10 μs current

取 MOV 样品两端电压的最大值为其测量残压, MOV 的吸收能量为

$$E = \int_0^t U(t)I(t)dt \quad (1)$$

式(1)中: $U(t)$ 和 $I(t)$ 分别为 MOV 样品两端电压和通过电流的瞬时值。

试验得到 6 种型号 MOV 元件在不同幅值、不同波形冲击电流作用下的残压和吸收能量的结果见图 3。分析图 3(a)可知, 相同电流幅值下, 4/10 μs 波形下 MOV 的残压最高, 与 8/20 μs 波形下残压相比增加了 1%~10%, 30/60 μs 波形下 MOV 的残压最低, 与 8/20 μs 波形下残压相比降低了 1%~4%; 分析图 3(b)可知, 随着 MOV 电压等级的升高, 不同波形雷电流作用下 MOV 的吸收能量增大; 在相同电流幅值下, 8/20 μs 波形下 MOV 的吸收能量与 4/10 μs 波形下相比增加了 35%~85%, 最大增加比例出现在

18 kA 下的 E150 型 MOV, 30/60 μs 波形下 MOV 的吸收能量最高。

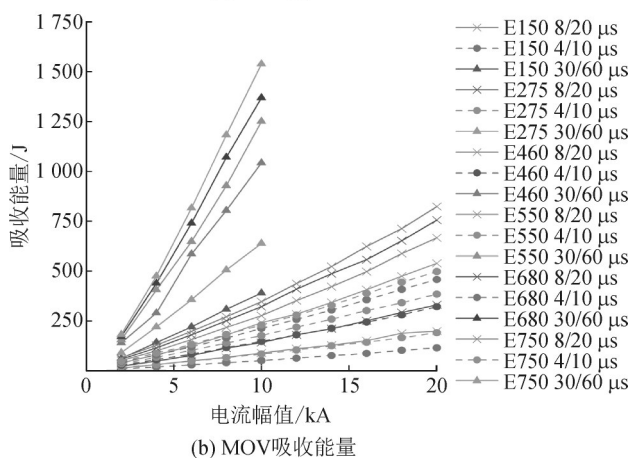
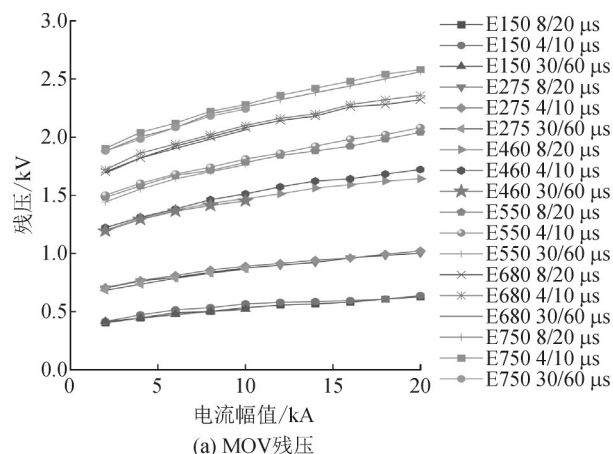


图3 不同冲击电流下6种MOV的残压和吸收能量实测值

Fig. 3 The measured residual voltages and energy absorption of 6 MOVs under different impulse currents

MOV 的残压试验结果表明, 在冲击电流作用下, MOV 的残压不仅与电流幅值有关, 还与其变化率有关。晶界层是使 MOV 具有非线性伏安特性的根本原因, 其在建模中可等效为电阻与电感的并联形式^[27], 导致 MOV 在不同陡度电流作用下残压不同, 即电流幅值相同时, 波形越陡, di/dt 越大, MOV 两端残压越高。

2 MOV 模型及参数确定

2.1 IEEE 模型

IEEE 3.4.11 工作组提出了一种适用于脉冲电流波前时间为 0.5~45 μs 的 MOV 动态仿真模型, 其等值电路见图 4。图 4 中: L_0 为表征 MOV 内、外磁场的电感; R_0 是使模型运行时数值稳定的电阻; C 表征 MOV 的几何电容; A_0 、 A_1 为非线性电阻, 用以表征 MOV 的伏安特性; L_1 是金属氧化物压敏电阻动态特性的调节电感, 其取值由冲击电流作用时电压的时

延决定,同时 L_1 与 R_1 并联组成低通滤波器。当冲击电流波头较缓时, R_1 - L_1 滤波电路的阻抗极低, A_0 、 A_1 可认为直接并联;当冲击电流波头较陡时, L_1 阻抗增大,导致流过 A_0 的电流大于流过 A_1 的电流,同时 A_0 的阻值高于 A_1 ,因此MOV模型两端电压比 A_0 、 A_1 简单并联时增大,可描述MOV在陡波电流下具有较高放电电压的动态特性。

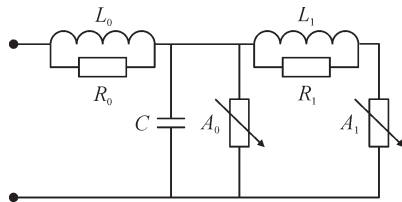


图4 IEEE模型

Fig. 4 IEEE model

在IEEE推荐的动态模型中,主要依据MOV结构确定模型参数的初始值,依据8/20 μs 冲击电流(幅值指明为10 kA)和操作冲击电流(未明确幅值)下MOV的残压实测值,综合确定 A_0 、 A_1 的初始单位电压参考值 U_{ref} 和 L_1 。因IEEE模型推荐的参数确定方法未明确所用操作冲击电流的幅值,所用幅值差异可能会带来模型参数的差异。因此,首先分析不同幅值的操作冲击电流确定的IEEE模型参数及其仿真结果差异。

分别选用幅值为2、4、6、8、10 kA的操作冲击电流确定得到6种型号MOV的IEEE模型参数,见表2。

分析表2可知,选用不同幅值的操作冲击电流会使参数 U_{ref} 和 L_1 不同,具体表现为,随着操作冲击电流幅值的增加, L_1 逐渐减小, U_{ref} 逐渐增大。其中, L_1 减小幅度最高可达94.5%(E150型MOV), U_{ref} 增长幅度最高可达15.9%(E275型MOV)。

不同幅值操作冲击电流确定的不同 U_{ref} 与 L_1 取值会对MOV电压仿真波形及残压计算结果产生影响,以E150型MOV在8/20 μs 冲击电流下的仿真结果为例,见图5, U_{ref} 的不同取值主要影响IEEE模型计算得到的MOV残压, L_1 的不同取值主要影响模型算得的电压波形。在5个操作冲击电流幅值确定的IEEE模型参数中,使用幅值为6 kA的操作冲击电流确定的IEEE模型结果与实测电压波形和残压结果误差最小,因此,文中使用电流幅值为6 kA的操作冲击电流确定IEEE模型的参数。

2.2 Pinceti模型

为简化IEEE模型参数计算方法,Pinceti等对模型结构和参数识别程序进行了修改,建立等值电路

表2 不同操作冲击电流幅值下IEEE模型的参数

Table 2 Parameters for IEEE model under different switching impulse current amplitudes

幅值/kA	型号	$L_1/\mu\text{H}$	U_{ref}/V
2	E150	0.411 3	287.6
4		0.370 0	288.9
6		0.059 7	306.7
8		0.031 1	323.5
10		0.030 9	323.7
2	E275	0.562 0	474.4
4		0.172 5	488.0
6		0.083 1	511.7
8		0.048 1	535.8
10		0.031 1	549.9
2	E460	0.237 3	831.0
4		0.142 3	860.7
6		0.091 5	889.2
8		0.066 7	912.5
10		0.061 0	917.1
2	E550	0.304 2	1 005.8
4		0.194 5	1 036.2
6		0.122 0	1 075.4
8		0.093 0	1 100.6
10		0.073 6	1 118.5
2	E680	0.312 8	1 180.6
4		0.199 3	1 219.6
6		0.152 2	1 247.0
8		0.105 7	1 283.9
10		0.077 4	1 308.9
2	E750	0.275 8	1 311.0
4		0.179 8	1 350.2
6		0.123 1	1 395.6
8		0.103 8	1 413.2
10		0.102 4	1 414.5

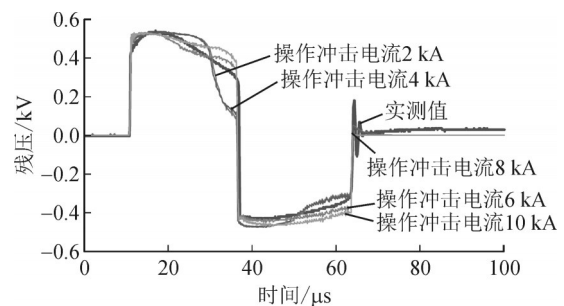


图5 不同幅值操作冲击电流下E150型MOV的实测及仿真电压波形

Fig. 5 Voltage waveforms in measurement and simulation of E150 MOV under operating impulse currents with different amplitude

见图6。对比IEEE模型,在模型结构上,Pinceti模型去除了MOV动态模型的分流电容,在输入首端并联了电阻 R (约1 M Ω),用以代替与电感并联的两个电阻 R_0 和 R_1 ,防止数值振荡。在参数确定上,非线性电阻 A_0 、 A_1 参数的确定方法与IEEE模型相同, L_0 、 L_1 主要依据MOV的电气特性确定,与其结构和几何参数无关^[16]。

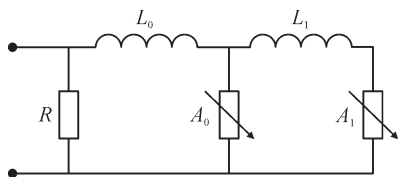


图6 Pinceti模型

Fig. 6 Pinceti model

依据上述参数的确定方法,6种型号MOV元件的IEEE模型和Pinceti模型参数见表3。

表3 6种型号MOV的IEEE模型和Pinceti模型参数

Table 3 The parameters for IEEE model and Pinceti model of six types of MOVs

模型	参数	E150	E275	E460	E550	E680	E750
IEEE模型	R_0/Ω	0.295	0.472	0.654	0.728	0.848	0.912
	$L_0/\mu\text{H}\times 10^{-4}$	5.9	9.4	13.0	15.0	17.0	18.0
	R_1/Ω	0.192	0.307	0.425	0.473	0.551	0.593
	$L_1/\mu\text{H}$	0.060	0.083	0.092	0.122	0.152	0.123
	$C/\text{pF}\times 10^4$	3.4	2.1	1.5	1.4	1.2	1.1
Pinceti模型	$R/\text{M}\Omega$	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
	$L_0/\mu\text{H}\times 10^{-3}$	2.5	2.7	5.0	5.7	6.5	4.7
	$L_1/\mu\text{H}\times 10^{-3}$	7.6	8.2	15.0	17.0	20.0	14.0

3 MOV动态模型残压准确性分析

依据残压与吸收能量的相对误差评价MOV动态模型的准确性,相对误差为

$$\delta = \frac{U_s - U_e}{U_e} \times 100\% \quad (2)$$

式(2)中: δ 为模型计算与试验实测值的相对误差; U_s 、 U_e 分别为模型计算值和试验实测值(残压或吸收能量)。

现有MOV动态模型分析中存在计算得到的电压波形与实测波形误差较大的问题,该误差部分来源于MOV动态模型的电流输入环节,即已有研究多采用双指数函数或Heidler函数作为MOV动态模型的模拟雷电流输入,其与MOV试验所加波形相差较大^[7]。以E460型MOV为例,当分别输入幅值为10 kA的双指数函数模拟8/20 μs 波形和试验8/20 μs 波形时,得到的MOV电压波形与实测电压波形见图7。

分析图7可知,使用实测试验波形作为模型输入时,得到的MOV仿真电压的误差明显减小。因此,文中采用实测的流过MOV的试验电流波形作为仿真模型的电流激励,减少因电流输入数据不同带来的仿真模型计算误差。

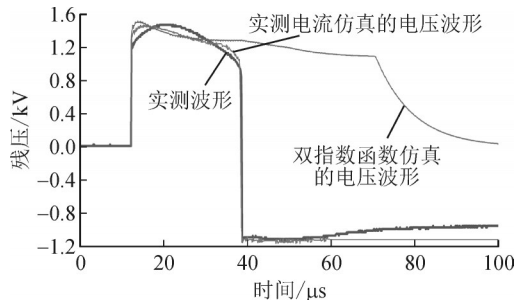


图7 不同输入电流下E460型MOV的电压波形

Fig. 7 Voltage waveforms of E460 MOV under the measured and simulated input 8/20 μs current

6种型号MOV在8/20 μs 、4/10 μs 、30/60 μs 3种波形不同电流幅值下IEEE模型和Pinceti模型的残压误差见图8。同时,为直观比较IEEE模型和Pinceti模型的残压仿真准确性,反映模型对电流波形及幅值的敏感性,对每一幅值下6种型号的MOV残压误差取平均值见图9。

分析图9可知,IEEE模型在4/10 μs 波形下残压平均误差呈减小的趋势,最大值出现在4 kA处,为5.6%,最小值出现在20 kA处,为1.1%;在8/20 μs 波形和30/60 μs 波形下残压平均误差呈先减小后增大的趋势(变化拐点分别在10 kA处和6 kA处,误差分别为0.001%和0.1%)。在8/20 μs 波形下,残压平均误差最大值出现在2 kA处,为4.7%;在30/60 μs 波形下,残压平均误差最大值出现在2 kA处,为6.1%。

Pinceti模型在4/10 μs 和8/20 μs 波形下残压平均误差随电流幅值的增加均先减小后增大(变化拐点均在8 kA处,分别为1.5%和1.4%),在30/60 μs 波形下残压平均误差逐渐减小。在电流幅值较小(2 kA)时,Pinceti模型对4/10 μs 、8/20 μs 和30/60 μs 波形的残压平均误差较大,超过8%。同时,分析图8(b)、(d)、(f)可知,在较低电流幅值下(<10 kA),E150型号MOV的残压误差最高,E750型号MOV的残压误差最低,即Pinceti模型在较低电流幅值下的残压准确性与MOV的最大持续工作电压 U_n 有关,表现为 U_n 越高,仿真准确性越高。

比较IEEE模型和Pinceti模型对MOV的残压仿真误差结果可知,IEEE模型的残压平均误差为2.6%,低于Pinceti模型4.6%的残压平均误差,对于

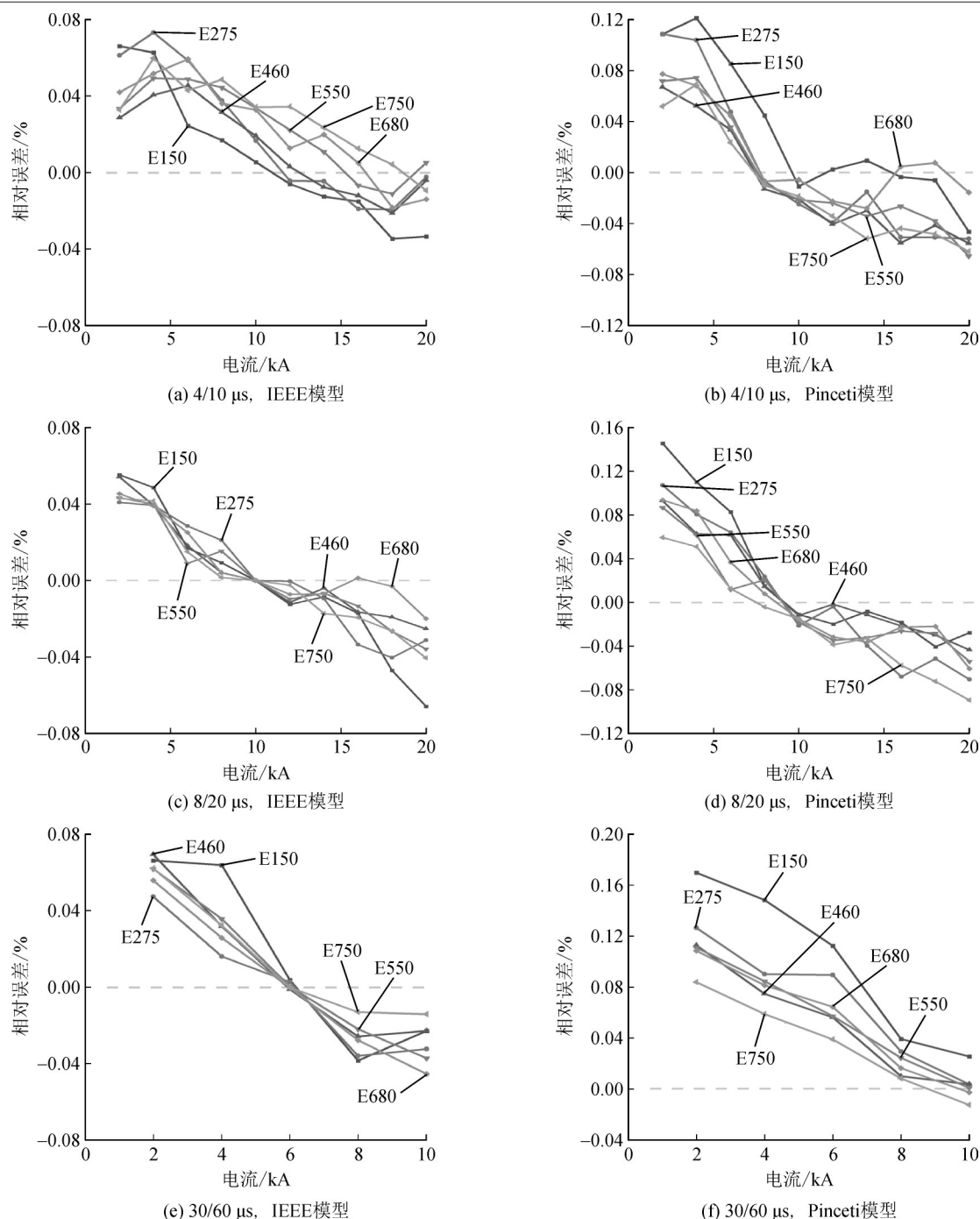


图8 动态模型估算6种型号MOV残压的相对误差

Fig. 8 Relative error of the simulated residual voltages of IEEE model and Pinceti model on 6 types MOVs

低压MOV残压的计算,推荐IEEE模型;比较IEEE模型和Pinceti模型对MOV的额定电压 U_n 仿真敏感性可知,IEEE模型残压准确性受MOV的 U_n 变化影响较小,而Pinceti模型残压准确性受MOV的 U_n 影响明显,随 U_n 的增大,该模型的仿真准确性提高。

在同种冲击电流波形作用下,以E750型MOV为例,IEEE模型和Pinceti模型对MOV仿真得到的电压波形误差结果见图10。分析图10可知,对于IEEE模型,计算得到的MOV电压波形会随所施加

电流波形陡度的增加而逐渐发生畸变,在较缓的30/60 μs 波形下,MOV电压计算结果与实测波形误差最小,在8/20 μs 波形下模型计算得到的电压波形顶部出现凹陷,此顶部波形凹陷在陡波4/10 μs 波形下加深,计算结果明显偏离实测波形。对于Pinceti模型,即使模型中使用1 M Ω 的电阻防止计算结果振荡,但在陡波4/10 μs 的计算中,结果仍出现剧烈振荡。随着施加波形陡度的降低,Pinceti模型MOV电压计算结果的振荡明显减小。

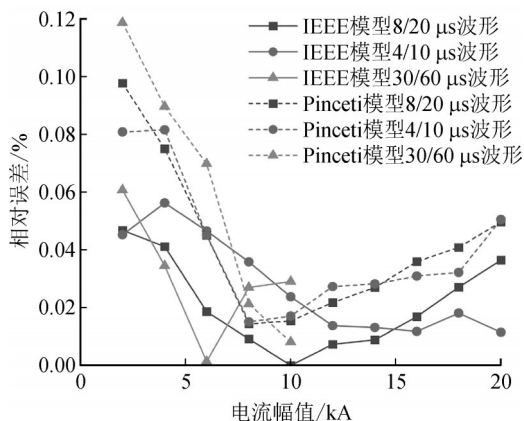


图9 动态模型估算6种型号MOV残压的平均误差

Fig. 9 Average error of the simulated residual voltages of IEEE model and Pinceti model on 6 types MOVs

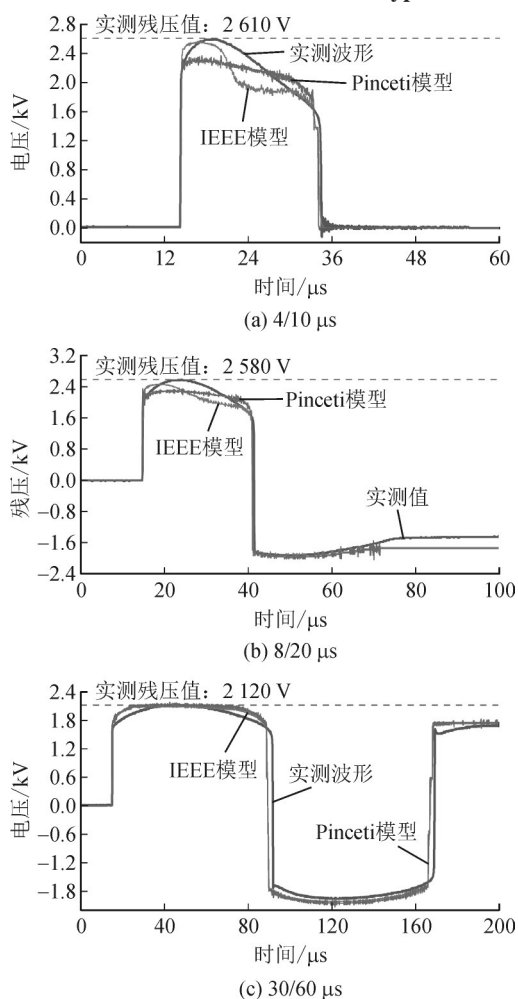


图10 不同冲击电流下实测及仿真的E750电压波形

Fig. 10 The measured and simulated voltage waveforms of E750 MOV under different impulse currents

进一步对比 IEEE 模型和 Pinceti 模型的电路可知, IEEE 模型的 MOV 电气等效电感会与模型中的电容形成 LC 振荡电路, 使得 IEEE 模型对所加波形陡度敏感, 造成电流较陡情况下模型算得的 MOV 电压波形出现明显凹陷。相比之下, Pinceti 模型中未

设置电容, 即使 MOV 的等效电容为 nF 级, 电容的缺失会造成 Pinceti 模型在陡波电流下算得的电压波形出现振荡问题。因此, 建议从优化 IEEE 模型中电容电感的等效方法入手, 提高其在不同冲击电流激励下的残压预测准确性。

4 MOV 动态模型吸收能量准确性分析

由第3小节可得, IEEE 模型和 Pinceti 模型仿真得到的 MOV 电压波形存在差别, 这会导致不同模型估算出的吸收能量结果不同。统计 6 种型号 MOV 在 4/10 μs、8/20 μs、30/60 μs 3 种波形不同电流幅值下的吸收能量计算误差, 见图 11。同时, 为直观比较 IEEE 模型和 Pinceti 模型的吸收能量仿真准确性, 对每一幅值下 6 种型号 MOV 的吸收能量误差绝对值取平均值见图 12。

分析图 12 可知, 在 4/10 μs 波形和 8/20 μs 波形下, IEEE 模型计算得到的吸收能量平均误差随电流幅值的增加先减小后增大(变化拐点在 10 kA 处, 误差分别为 1.3% 和 1.8%); 在 30/60 μs 波形下, IEEE 模型的平均误差随电流幅值的增加而减小。相同电流幅值下, IEEE 模型对 30/60 μs 波形的吸收能量仿真准确性最高, 对 8/20 μs 波形的吸收能量仿真准确性最低。

对于 Pinceti 模型, 在 4/10 μs 波形和 8/20 μs 波形下吸收能量仿真平均误差随电流幅值的增加均先减小后增大(变化拐点在 12 kA 处, 误差分别为 0.6% 和 1.6%); 在 30/60 μs 波形下, Pinceti 模型吸收能量仿真平均误差随电流幅值的增加而逐渐减小。当施加冲击电流幅值较高时(>10 kA), Pinceti 模型在 4/10 μs 波形下吸收能量的仿真误差明显低于 8/20 μs 波形; 当施加冲击电流幅值较低时, Pinceti 模型对于 3 种冲击电流作用下的 MOV 吸收能量的估算能力相当。

比较 IEEE 模型和 Pinceti 模型对 MOV 的吸收能量仿真误差结果可知, 当施加的电流幅值小于 10 kA 时, IEEE 模型计算得到的吸收能量结果误差低于 Pinceti 模型; 当施加的电流幅值超过 10 kA 时, 相比于 IEEE 模型, 使用 Pinceti 模型计算得到的吸收能量结果误差更小。

5 结论

通过试验和仿真计算, 分析了具有代表性的 6 种额定电压 MOV 元件在不同幅值 4/10 μs、8/20 μs

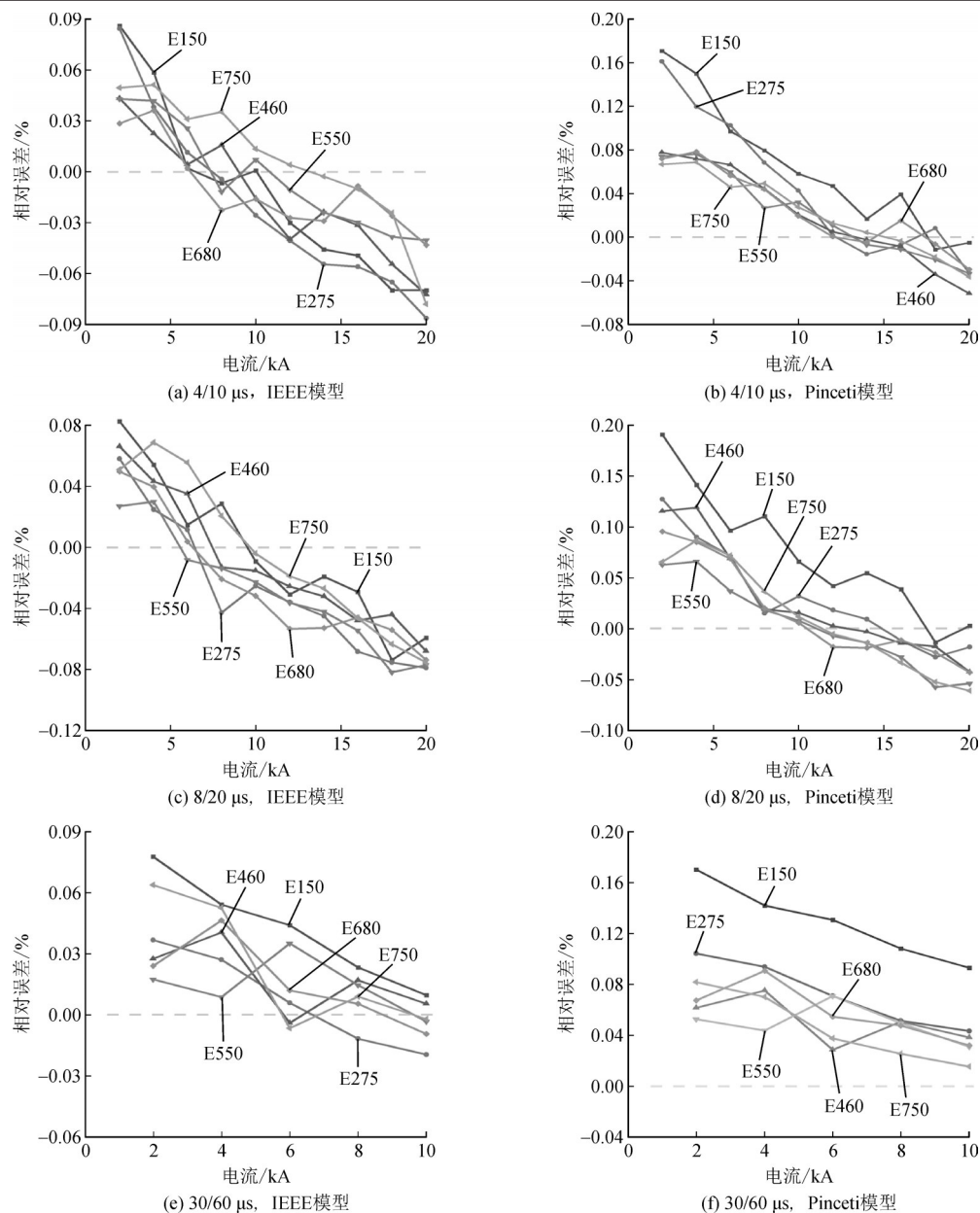


图11 动态模型估算6种型号MOV吸收能量的相对误差

Fig. 11 Relative error of the evaluated energy absorption of IEEE model and Pinceti model on 6 types MOV

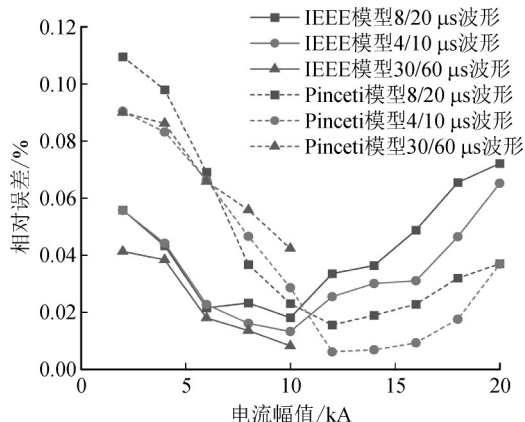


图12 不同冲击电流下MOV动态模型的吸收能量平均误差

Fig. 12 Averaged error of the evaluated energy absorption of IEEE model and Pinceti model on 6 types MOVs

和30/60 μs 冲击电流下的残压和吸收能量特性,研究了IEEE模型和Pinceti模型的准确性,结论如下:

1)在MOV动态模型参数化中,施加操作冲击电流的幅值会影响IEEE模型中非线性电阻参考电压和电感的取值,随电流幅值增加,参考电压增大但电感减小,建议IEEE模型参数确定时考虑操作冲击电流幅值的影响。通过试验和分析,文中推荐选用6 kA操作冲击电流确定模型参数。

2)对于MOV的电压波形仿真,IEEE模型算得的电压波形随电流陡度的增加会发生畸变,这是因为IEEE模型的等效电感电容回路使其对所加电流波形陡度敏感;Pinceti模型在电流较陡时会出现波形振荡,其原因是模型中缺失电容的设计。

3)对于MOV的残压计算,IEEE模型在不同电流幅值的3种波形下残压误差平均为2.6%,准确性高于Pinceti模型;且Pinceti模型残压计算准确性随MOV额定电压降低而降低,IEEE模型准确性受额定电压变化影响可忽略。

4)对于MOV的吸收能量估算,当施加电流幅值小于10 kA时,IEEE模型计算结果误差较低,当电流超过10 kA时,Pinceti模型误差较低;且IEEE模型对30/60 μ s操作冲击电流的准确性最高,对8/20 μ s雷电冲击电流准确性最低。

参考文献:

- [1] 孟鹏飞,刘政,曹伟,等.考虑微观特性的ZnO压敏电阻计算模拟模型[J].中国电机工程学报,2021,41(5):1588-1597.
MENG Pengfei, LIU Zheng, CAO Wei, et al. The calculation model for ZnO varistor considering micro-characteristics[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(5): 1588-1597.
- [2] 何金良,刘俊,胡军,等.电力系统避雷器用ZnO压敏电阻研究进展[J].高电压技术,2011,37(3):634-643.
HE Jinliang, LIU Jun, HU Jun, et al. Development of ZnO varistors in metal oxide arresters utilized in ultra high voltage systems[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 634-643.
- [3] 李春茂,陈子宣,杨雁,等.基于修正Cole-Cole模型的氧化锌压敏电阻老化状态评估[J].高压电器,2020,56(2):85-92.
LI Chunmao, CHEN Zixuan, YANG Yan, et al. Aging state evaluation of ZnO varistor based on Cole - Cole modified model[J]. High Voltage Apparatus 2020, 56(2): 85-92.
- [4] 文远芳,梁毓锦,招誉颐.金属氧化物电阻片等效电路研究[J].电工技术学报,1996,11(4):46-49.
WEN Yuanfang, LIANG Yujin, ZHAO Yuyi. Investigation on the equivalent circuit for metal oxide varistor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 1996, 11(4): 46-49.
- [5] 沈海滨,雷挺,陈康,等.一种中压配电线路用内置金属氧化物压敏电阻的悬式复合绝缘子研制[J].电网技术,2020,44(1):361-368.
SHEN Haibin, LEI Ting, CHEN Kang, et al. Development of suspension composite insulators with built - in metal - oxide varistors for MV distribution lines[J]. Power System Technology, 2020, 44(1): 361-368.
- [6] 徐伟,盛飒,张春龙,等.多脉冲雷电冲击下ZnO压敏电阻的劣化性能[J].高电压技术,2019,45(12):3785-3793.
XU Wei, SHENG Feng, ZHANG Chunlong, et al. Degradation performance of ZnO varistor under multi - pulse lightning impulse[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(12): 3785-3793.
- [7] 何雨微,司文荣,魏本刚,等.考虑吸收能量估算的金属氧化物避雷器模型准确性分析[J].中国电机工程学报,2017,37(10):3019-3027.
HE Yuwei, SI Wenrong, WEI Bengang, et al. Accuracy analysis of metal-oxide arrester simulation models considering the energy absorption estimation under impulse currents with different steepness [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 3019-3027.
- [8] 何雨微,瞿金炜,刘亚坤,等.后续回击下限压型浪涌保护器的伏安特性及其级联配合[J].电工技术学报,2017,32(1):197-205.
HE Yuwei, QU Qianwei, LIU Yakun, et al. The V-I characteristics of voltage-limiting type SPD and its cascaded coordination under subse - quent lightning return stroke[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(1): 197-205.
- [9] 施广全,张义军,陈绍东,等.风力发电机组防雷技术发展综述[J].电网技术,2019,43(7):2477-2487.
SHI Guangquan, ZHANG Yijun, CHEN Shaodong, et al. Review of lightning protection technique progress of wind turbines[J]. Power System Technology, 2019, 43(7): 2477-2487.
- [10] 曾嵘,周旋,王泽众,等.国际防雷研究进展及前沿述评[J].高电压技术,2015,41(1):1-13.
ZENG Rong, ZHOU Xuan, WANG Zezhong, et al. Review of research advances and fronts on international lightning and protection[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(1): 1-13.
- [11] 付颖,乐波,余芳,等. ± 1 100 kV换流站直流MOA综合老化特性研究[J].电网技术,2020,44(8):3149-3155.
FU Ying, YUE Bo, YU Fang, et al. Study on integrated aging characteristics of DC MOV in ± 1 100 kV converter station[J]. Power System Technology, 2020, 44(8): 3149-3155.
- [12] 何金良,屠幼萍.氧化锌非线性电阻的等效计算模型[J].高压电器,1998,34(6):50-54.
HE Jinliang, TU Youping. Equivalent calculation model of ZnO nonlinear resistance[J]. High Voltage Apparatus, 1998, 34(6): 50-54.
- [13] CHEN Hongcai, DU Yaping. A comprehensive study on the nonlinear behavior of metal oxide varistors[C]//International Conference on Lightning Protection (ICLP). Estoril, Portugal: IEEE, 2016: 1-5.
- [14] 张桂红,郭洁,徐燕飞,等.金属氧化物避雷器陡波下模型的准确性分析[J].高电压技术,2007,33(3):83-86.
ZHANG Guihong, GUO Jie, XU Yanfei, et al. Accuracy of metal oxide surge arrester model under steep - front waves [J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(3): 83-86.

- [15] IEEE Working Group 3. 4. 11. Modeling of metal oxide surge arresters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(1):302-309.
- [16] PINCETI P, GIANNETTONI M. A simplified model for zinc oxide surge arresters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1999, 14(2):393-398.
- [17] 李志兵, 颜湘莲, 王 浩, 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, YAN Xianglian, WANG Hao, et al. Analysis of test and model for metal oxide arrester under steep-front wave[J]. High Voltage Engineering, 2012, 38(10): 2698 - 2706.
- [18] 陈 洁, 郭 洁, 王 磊, 等. 金属氧化物避雷器模型的陡波特性分析[J]. 电瓷避雷器, 2013(4):68-74.
CHEN Jie, GUO Jie, WANG Lei, et al. The V-A characteristics under steep-front waves of metal oxide surge arrester model[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(4):68-74.
- [19] 姚亚鹏, 郭 雄, 熊 易, 等. 金属氧化物避雷器仿真模型适用性研究[J]. 电瓷避雷器, 2018(4):138-143.
YAO Yapeng, WU Xiong, XIONG Yi, et al. Study on the applicability of simulation model of metal oxide arrester[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018(4):138-143.
- [20] 丛日立, 阎欣欣, 赵 理, 等. 金属氧化物避雷器在快速瞬态下的动态特性的数值研究[J]. 电瓷避雷器, 2020(3):191-196.
CONG Rili, YAN Xinxin, ZHAO Li, et al. Numerical study on dynamic characteristics of MOA under fast transient condition[J]. Insulators and Surge Arresters, 2020(3): 191-196.
- [21] 赵冬一, 李 凡, 汤 霖. 国际上基于数值仿真计算金属氧化物避雷器的研究进展[J]. 电瓷避雷器, 2018(4):22-36.
ZHAO Dongyi, LI Fan, TANG Lin. Research progress of metal oxide arresters based on numerical simulation calculation in the world[J]. Insulators and Surge Arresters, 2018 (4):22-36.
- [22] KHANMIRI D T, BALL R, MCKENZIE C, et al. Energy absorption capability of low voltage Metal Oxide Varistors in AC and impulse currents[C]//IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC). California, USA; IEEE, 2016: 3038-3042.
- [23] KHANMIRI D T, BALL R, LEHMAN B. Degradation effects on energy absorption capability and time to failure of low voltage metal oxide varistors[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 32(5):2272-2280.
- [24] 姚亚鹏, 刘崇新, 庄建煌. MOA冲击电流模型的建模仿真及试验研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(5):50-55.
YAO Yapeng, LIU Chongxin, ZHUANG Jianhuang. Modeling simulation and experimental study of impulse current model for MOAs[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(5):50-55.
- [25] 交流无间隙金属氧化物避雷器:GB/T 11032—2020[S]. 北京:中国标准出版社, 2020.
Metal-oxide surge arresters without gaps for AC systems: GB/T 11032—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [26] 低压电涌保护器(SPD)第11部分:低压电源系统的电涌保护器性能要求和试验方法:GB/T 18802. 11—2020[S]. 北京:中国标准出版社, 2020.
Low-voltage surge protective devices (SPD)-Part 11: Surge protective devices connected to low-voltage power systems requirements and test methods: GB/T 18802. 11—2020[S]. Beijing: Standards Press of China, 2020.
- [27] 陈新岗, 李 凡, 桑建平. 氧化锌压敏陶瓷伏安特性的微观解析[J]. 高电压技术, 2007, 33(4):33-37.
CHEN Xingang, LI Fan, SANG Jianping. Microcosmic analysis of U - I characteristic of ZnO pressure - sensitive ceramics[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(4):33-37.

王伟芳(1977—),女,硕士研究生,主要从事电力系统雷电防护研究工作(E-mail:593393148@qq.com)。

刘亚坤(1992—),男,博士,助理教授,主要从事雷电机理、防护方法和雷电测试技术等方面的研究工作(E-mail:lysky00@sjtu.edu.cn)。