

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.11.014

8/20 μs 冲击电流发生器源阻抗对压敏电阻器性能表征的影响研究

孙 伟¹, 李元晶¹, 孙晋茹²

(1. 西安建筑科技大学机电工程学院, 西安 710055; 2. 西安交通大学电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要:文中研究了不同源阻抗8/20 μs 冲击电流对压敏电阻冲击能量的影响规律。建立了8/20 μs 冲击电流发生器电路模型,进行了电路仿真研究;搭建了8/20 μs 冲击电流实验平台,对不同规格的压敏电阻进行冲击电流实验。研究表明:随着8/20 μs 冲击电流源阻抗减小,相同冲击电流幅值下通过压敏电阻的冲击能量增加;随着压敏电阻直流参考电压增加,冲击电流源阻抗对压敏电阻冲击能量的影响作用增强,但随着冲击电流幅值的提高,冲击电流源阻抗对通过压敏电阻冲击能量的影响作用减弱。因此,在一定冲击电流幅值以下的8/20 μs 冲击电流试验中,冲击电流发生回路的源阻抗不能选择的太小。研究结果对压敏电阻冲击电流测试的规范化具有一定的理论与工程应用价值。

关键词:冲击电流;源阻抗;压敏电阻;冲击能量

Influence of Source Impedance of 8/20 μs Impulse Current Generator on the Performance Characterization of Varistor

SUN Wei¹, LI Yuanjing¹, SUN Jinru²

(1. Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The effect of 8/20 μs impulse current generator with different source impedance on the impact energy of varistor was analyzed. A circuit model of 8/20 μs impulse current generator was established to conduct circuit simulation. Then, the experiment platform for 8/20 μs impulse current generator was set up to conduct impulse current test for the varistors with different specifications. The results show that the smaller the source impedance of 8/20 μs impulse current generator is, the larger the impact energy through the varistor in the same impulse current amplitude is; the higher the DC reference voltage of the varistor is, the stronger the effect of the source impedance on the impact energy is. However, with the increase of the impulse current amplitude, the effect of the source impedance on the impact energy weakens. Therefore, for the 8/20 μs impulse current test under a certain impulse current amplitude, the source impedance of the impulse current generator cannot be too small. This study may provide theoretical and engineering support for standardization of the impulse current test on varistor.

Key words: impulse current; source impedance; varistor; impact energy

0 引言

8/20 μs 冲击电流发生器广泛应用于压敏电阻的性能测试^[1-8]。实际测试中发现,不同源阻抗的冲

击电流发生器,在相同幅值冲击电流作用下,其测量结果存在较大差异,尤其是对小通流能量的压敏电阻。IEC 61643.1—2011浪涌保护器测试标准中规定,用具有8/20 μs 波形的冲击电流来测试压敏电阻,并规定波前、波尾时间容许偏差小于10%,反极

收稿日期:2017-05-20; 修回日期:2017-07-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51221005);陕西省重点科技创新团队(2012KCT-07)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51221005); Technological Innovation Team Funds of Shaanxi Province(2012KCT-07).

性振荡 $<20\%$ ^[1],但标准中没有对冲击电流发生器的回路参数、源阻抗以及冲击能量等做出详细规定。文[9-14]提出了冲击电流回路的线性电阻和非线性动态电阻的联合波形调整方法,文[15-22]对不同源阻抗冲击电流发生器对压敏电阻的限制电压的影响进行了研究。

文中开展了冲击电流发生器源阻抗对压敏电阻冲击能量的影响研究,通过建立压敏电阻冲击电流回路的仿真模型,得到冲击电流回路源阻抗和通过压敏电阻的冲击能量之间的关系规律,并通过实验验证了仿真计算的正确性,提出压敏电阻冲击电流试验的规范化设想,研究结果对冲击电流试验装置的设计、压敏电阻的研究及其应用具有一定的理论意义与工程应用价值。

1 压敏电阻冲击能量仿真研究

1.1 冲击电流发生回路

8/20 μs 冲击电流发生器的波形形成回路通常采用 RLC 回路来实现,其波形形成回路原理见图1。图1中: C 为储能电容; K 为放电开关; L 为回路总电感(包括开关等值电感、连线等值电感、负载等值电感以及调波电感等); R 是回路总电阻(包括连线等值电阻、开关等值电阻以及调波电阻等)。

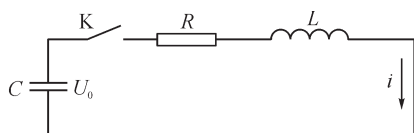


图1 8/20 μs 冲击电流回路原理图

Fig. 1 8/20 μs impulse current circuit schematic

当电路工作在欠阻尼状态时能产生 8/20 μs 冲击电流波,8/20 μs 电流波形的归一化解为: $\xi=0.47$; $T_1^*=0.92$; $i_m^*=0.56$ 。其中, ξ 、 T_1^* 、 i_m^* 分别为回路的阻尼系数、归一化的波前时间和归一化电流,只要 R 、 L 、 C 任一参数确定,其余参数均可求解^[10-13]。

为研究冲击电流发生回路的源阻抗对压敏电阻冲击能量的影响规律,文中设计了 4 组 8/20 μs 冲击电流回路参数见表 1。

表 1 8/20 μs 冲击电流发生回路参数

Table 1 Parameters of 8/20 μs impulse current circuit

组数	放电电容 $C/\mu\text{F}$	调波电感 $L/\mu\text{H}$	调波电阻 R/Ω	短路源阻 抗 R_s/Ω
1	C	L	R	R_s
2	$2C$	$L/2$	$R/2$	$R_s/2$
3	$3C$	$L/3$	$R/3$	$R_s/3$
4	$4C$	$L/4$	$R/4$	$R_s/4$

1.2 压敏电阻冲击电流仿真电路模型

压敏电阻的数学模型可以用指数函数来描述^[23],即: $V=kI^\alpha$ 。其中 k 为比例系数, α 为非线性系数。根据文[11]给出的压敏电阻非线性特性的拟合方法,可得出压敏电阻的不同区间的比例系数和非线性系数以及压敏电阻的三段拟合曲线,见图 2。

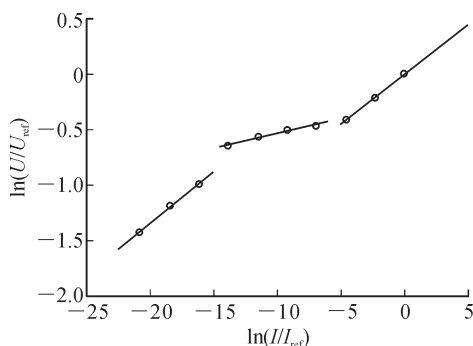


图2 压敏电阻($U_{1\text{mA}}=470\text{ V}$)的电压—电流关系

Fig. 2 Relationship of the voltage and current of varistor ($U_{1\text{mA}}=470\text{ V}$)

对于表 1 所选择的回路参数,在无负载情况下,输出 8/20 μs 冲击电流波的波形参数均满足 IEC 61643.1—2011、GB 18802.1—2011 的试验要求,带有压敏电阻的冲击电流发生回路见图 3。

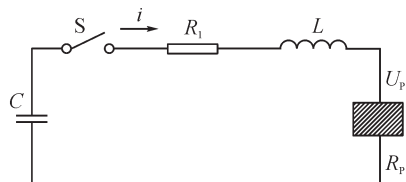


图3 带有压敏电阻的冲击电流回路

Fig. 3 Impulse current circuit with varistor

图3中: U_p 为压敏电阻两端的电压; i 为回路电流; R_p 为压敏电阻的动态等效电阻。在压敏电阻的动态电阻可忽略的情况下,回路输出冲击电流的波形基本上依靠线性参数 R_1 、 L 和 C 调波得到,但在压敏电阻动态电阻较大的情况下,或压敏电阻动态电阻变化范围较大情况下,非线性电阻对冲击电流回路输出波形参数的影响不能忽略。

根据上述的冲击电流发生回路,在 Simulink 中运用了如图 4 的压敏电阻冲击电流特性仿真回路,由于压敏电阻要用刚性求解器求解,所以要先将求解器设置成刚性求解器。在仿真中使用之前计算出的压敏电阻的结构参数分别填入 SurgeArrester 的参数设置对话框,设计试验方案。

1.3 源阻抗对冲击电流波形的影响

以直流 1 mA 电压为 910 V 的压敏电阻为例,仿真得出当冲击电流峰值分别为 1、2、5、10 kA 时,

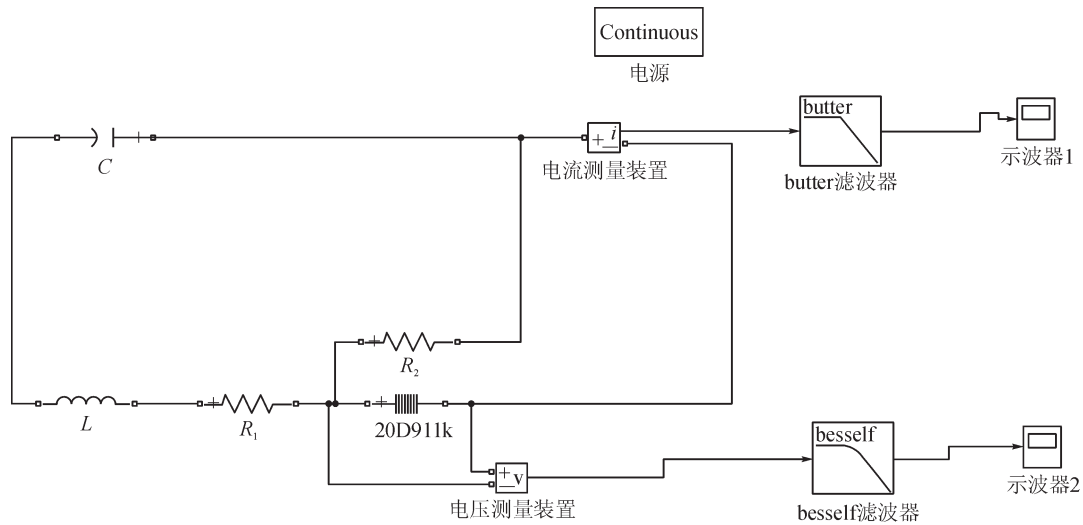


图4 压敏电阻冲击电流仿真回路

Fig. 4 Impulse current simulation circuit of varistor

回路源阻抗对冲击电流波形影响规律,见图5。

仿真结果显示:在冲击电流幅值相同情况下:

①随着冲击电流回路源阻抗的减少,冲击电流波的波前时间变短,波尾部分逐渐变长;②随着冲击电

流幅值增加,这种差异性逐渐减小;③当冲击电流幅值增加到一定程度,不同源阻抗冲击电流回路输出的冲击电流波形的变化趋势基本趋于一致,波形基本重合,如图5(d)所示。

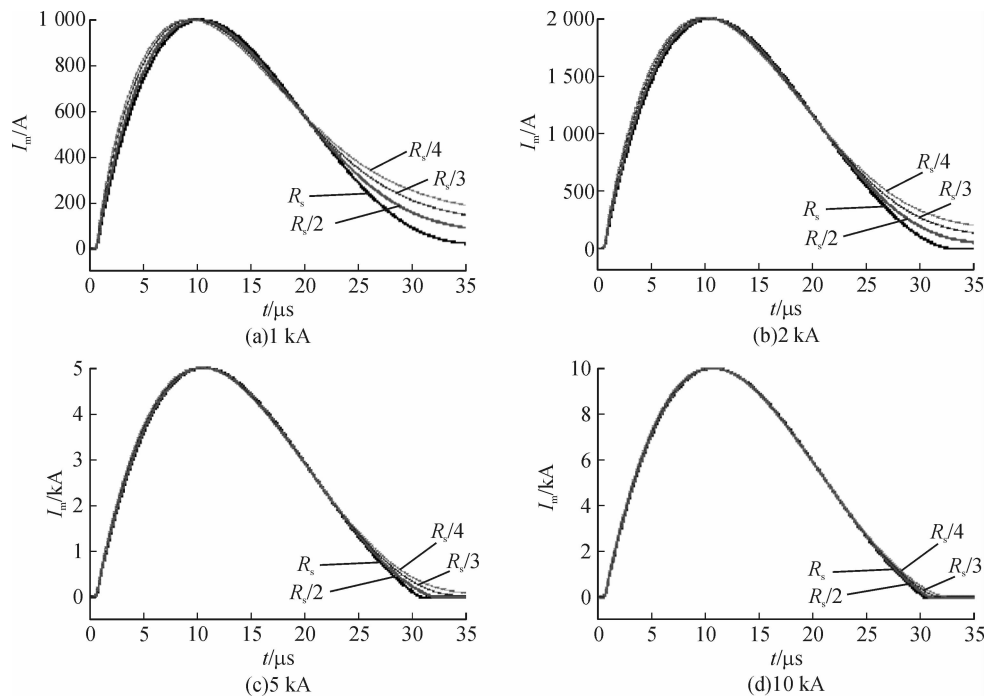


图5 源阻抗对冲击电流波形的影响

Fig. 5 Effect of source impedances on impulse current waveform

根据文[11]的研究结果,压敏电阻的动态阻抗随着冲击电流幅值的增加而减小。压敏电阻的动态阻抗串联在波形形成回路,随着冲击电流回路的源阻抗减小,动态电阻对冲击电流波形的影响就越大。在相同的冲击电流幅值下,源阻抗减小时,冲击电流回路的阻尼系数增加,相应的波前时间缩短,波尾时间增加。当冲击电流增大时,压敏电阻的动

态阻抗减小,对整个回路总调波电阻影响减小,所以当冲击电流幅值到一定程度时,波形变化曲线趋于一致,波形基本重合。

1.4 源阻抗对压敏电阻限制电压的影响

同样以直流1 mA电压为910 V的压敏电阻为例,仿真得出冲击电流峰值为1 kA情况下,回路源阻抗对压敏电阻限制电压的影响规律,见图6。

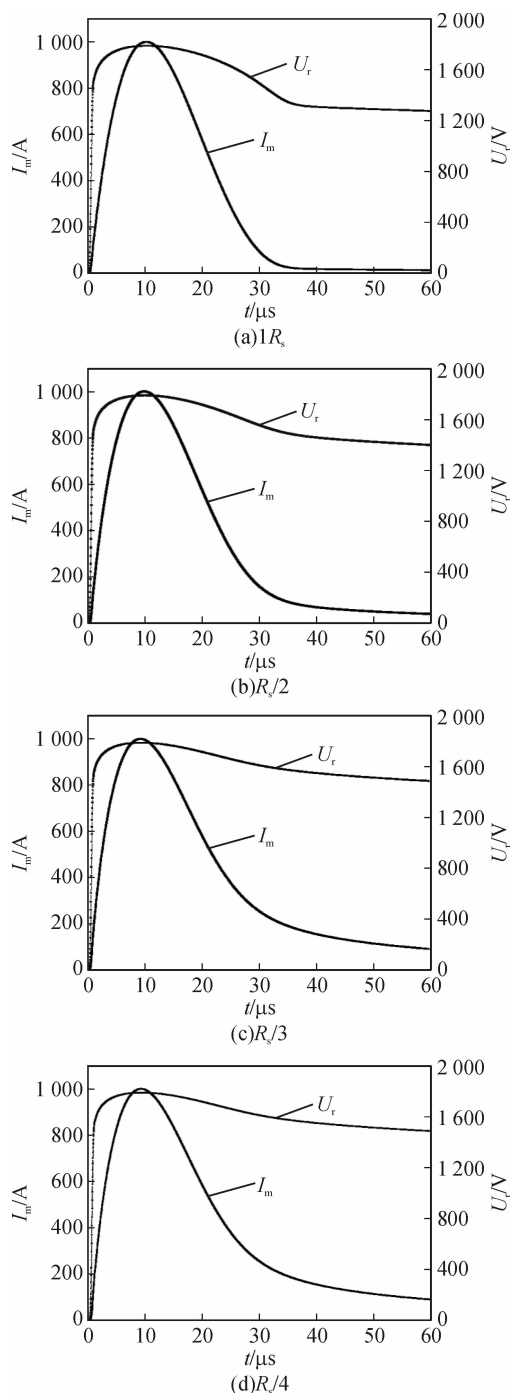


图6 源阻抗对压敏电阻限制电压的影响

Fig. 6 Effect of source impedances on clamping voltage of varistor

仿真结果显示：在冲击电流峰值相同情况下：

①随着冲击电流回路源阻抗的减少，压敏电阻限制电压的波尾部分逐渐变长；②当冲击电流发生回路的源阻抗减少到某一程度时，不同源阻抗冲击电流作用下，压敏电阻限制电压的最终电压幅值将基本稳定在确定值。

在相同冲击电流幅值的情况下，压敏电阻的限制电压相同，因此压敏电阻的动态阻抗(限制电

压峰值和冲击电流峰值之比)相同。但随着冲击电流回路源阻抗的减小，压敏电阻动态阻抗与回路线性调波电阻相比所占比例增加，对冲击电流波形的影响作用增强。因此，随着源阻抗的减少，动态调波电阻调波作用增强，致使冲击电流回路输出的电流波形尾部变得越来越长，成为不过零的单极性波。压敏电阻的限制电压只有当冲击电流过零才会随之跌落回零。所以，当冲击电流波形成为单极性的波形时，冲击残压值不会跌落，始终保持着较高的幅值。

1.5 源阻抗对压敏电阻冲击能量的影响

同样以直流 1 mA 电压为 910 V 的压敏电阻为例，仿真得出源阻抗与流过压敏电阻冲击能量之间关系，以及冲击电流峰值对流过压敏电阻冲击能量的影响规律，见图 7。

仿真结果显示：①在相同冲击电流峰值作用下，随着冲击回路源阻抗增加，流过压敏电阻的冲击能量减少。例如：在冲击电流峰值为 1 kA 条件下，当回路源阻抗从 $R_s/4$ 变为 R_s 时，流过压敏电阻的冲击能量减少了 24.22%；②随着冲击电流峰值增加，回路源阻抗对流过压敏电阻冲击能量的影响作用减弱。例如：在冲击电流峰值 10 kA 条件下，当回路源阻抗从 $R_s/4$ 变为 R_s 时，流过压敏电阻的冲击能量仅减少了 0.55%，比冲击电流峰值 1 kA 时，冲击能量缩小了 23.67%。

由图 7(a)的仿真结果可以明显看出，在 1 kA 冲击电流峰值作用下，随着回路源阻抗减小，波尾时间明显增大，其结果是流经压敏电阻的冲击能量增加。随着冲击电流峰值增加，回路源阻抗对冲击电流波形影响减弱，其结果是回路源阻抗对流经压敏电阻冲击能量的影响减小，如图 7(d)所示。

1.6 源阻抗对不同参考电压的压敏电阻冲击能量的影响

不同参考电压的压敏电阻在冲击电流作用下冲击能量的计算结果见图 8。

结果显示：①在冲击电流峰值相同的情况下，直流参考电压高的压敏电阻随着回路源阻抗的减少，所承受的冲击能量的变化要显著一些。如：在峰值 1 kA 冲击电流作用下，直流参考电压 910 V 的压敏电阻在回路源阻抗从 R_s 降低为 $R_s/4$ 时，冲击能量的变化率为 24.22%；而直流参考电压 470 V 的压敏电阻在回路源阻抗由 R_s 降低为 $R_s/4$ 时，冲击能量的变化率为 16.10%；②随着冲击电流峰值的增加，回路源阻抗对通过不同参考电压压敏电阻的冲击能量的影响作用减弱。如：在冲击电流峰值 10 kA 条

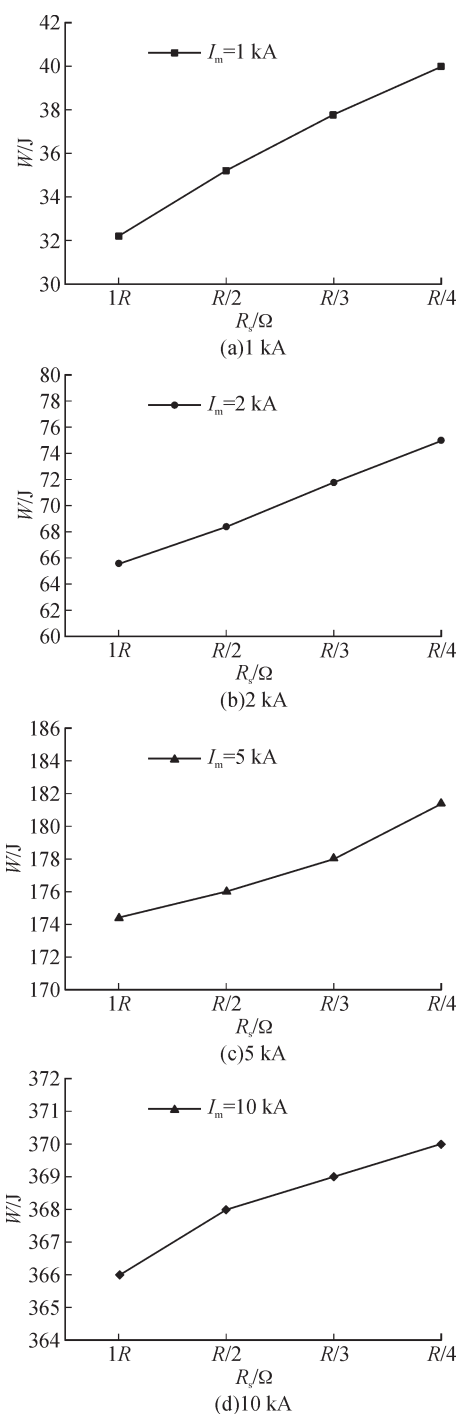


图7 源阻抗与冲击能量之间的关系

Fig. 7 Relationship of source impedances and impact energy

件下,直流参考电压 910 V 的压敏电阻在回路源阻抗从 R_s 降低为 $R_s/4$ 时,冲击能量的变化率为 0.55%;而直流参考电压 470 V 的压敏电阻在回路源阻抗从 R_s 降低为 $R_s/4$ 时,冲击能量几乎没有变化。

2 压敏电阻冲击能量的实验研究

2.1 实验方法及结果

使用表 1 中组数 1 和组数 3,建立了源阻抗分

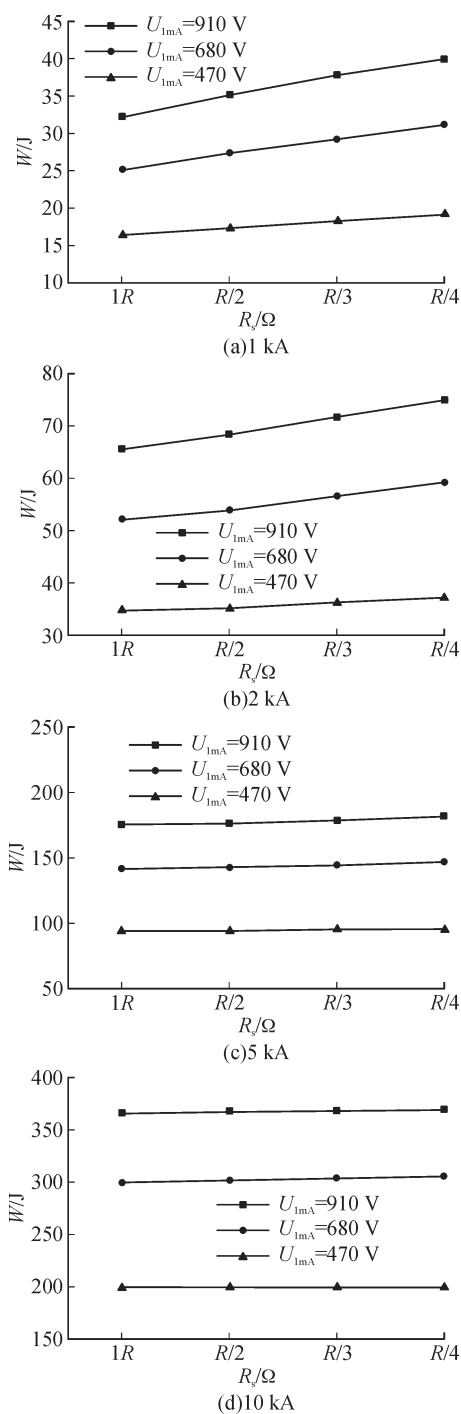


图8 不同直流参考电压压敏电阻源阻抗与冲击能量的关系

Fig. 8 Relationship of source impedance and impact energy with different DC reference voltage of varitors

别为 R_s 、 $R_s/3$ 的 8/20 μs 冲击电流发生回路,分别对直径为 $\phi 7 \text{ mm}$ 和 $\phi 14 \text{ mm}$ 、直流 1 mA 参考电压为 470 V 的两种规格的压敏电阻进行冲击试验,每次实验分别对压敏电阻冲击 20 次。实验结果分别见表 2-4。

2.2 实验结果分析

对比表 2、3 实验结果,不同源阻抗的冲击电流发生回路对压敏电阻的作用存在较大差异。回路源

表 2 7D471K 压敏电阻冲击电流实验结果(源阻抗 $R_s/3$)Table 2 Results of 7D471K's impulse current test (source impedance $R_s/3$)

实验项目	实验结果									
电流峰值/kA	1.712	1.752	1.728	1.720	1.760	1.744	1.800	1.760	1.744	1.792
U_{1mA} (冲击前)/V	478.9	476.9	476.3	475.9	475.9	473.6	473.0	473.0	467.4	465.1
U_{1mA} (冲击后)/V	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
U_{1mA} 变化率	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
外观变化	破裂	膨胀	膨胀	膨胀	膨胀	膨胀	膨胀	膨胀	膨胀	膨胀
实验结论	从外观上看,压敏电阻外观膨胀,冲击后无法测得 U_{1mA} ,说明压敏电阻已经失效。其中 1 片压敏电阻冲击后破裂,外观破坏较明显。									

表 3 7D471K 压敏电阻冲击电流实验结果(源阻抗 R_s)Table 3 Results of 7D471K's impulse current test (source impedance R_s)

实验项目	实验结果									
电流峰值/kA	1.720	1.762	1.780	1.760	1.768	1.754	1.850	1.860	1.784	1.782
U_{1mA} (冲击前)/V	476.9	475.9	475.3	472.9	473.9	472.6	472.0	475.0	476.4	468.3
U_{1mA} (冲击后)/V	475.8	475.9	474.8	473.9	473.9	473.8	472.8	474.6	473.8	470.0
$\Delta U_{1mA}/\%$	-0.23	0.00	-0.11	-0.21	0.00	2.54	1.70	-0.08	-0.55	0.36
外观变化	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常
实验结论	从外观上看,压敏电阻外观正常,冲击前后压敏电阻 U_{1mA} 变化率最大 2.54%。									

表 4 14D471K 压敏电阻的冲击电流实验结果(源阻抗 $R_s/3$)Table 4 Results of 14D471K's impulse current test (source impedance $R_s/3$)

实验项目	实验结果									
电流峰值/kA	2.072	2.136	1.960	2.224	2.256	2.200	2.328	2.200	2.576	
U_{1mA} (冲击前)/V	465.4	466.3	468.7	470.3	470.6	471.0	472.6	474.9	475.9	
U_{1mA} (冲击后)/V	464.4	477.9	468.7	483.2	470.6	486.1	484.8	473.6	472.9	
U_{1mA} 变化率/%	-0.2	2.5	0.0	2.7	0.0	3.2	2.6	-0.3	-0.6	
外观变化	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	正常	
实验结论	压敏电阻外观正常,没有试品被击穿, U_{1mA} 变化率最大 3.2%,试品性能良好。									

阻抗越小,在相同峰值 $8/20 \mu s$ 冲击电流作用下,流经压敏电阻的冲击能量越大,从而引起压敏电阻失效,严重时使压敏电阻发生开裂。实验结果符合图 7 所示的仿真结果。因此,在对直流参考电压较高,尤其是直径较小的压敏电阻进行冲击电流试验时,需要合理选择冲击电流发生回路的源阻抗;同时,在进行压敏电阻的性能测试和对比时,应当在相同的试验条件下进行测试。

对比表 2、4 实验结果,回路源阻抗相同,压敏电阻 1 mA 参考电压相同,不同直径的压敏电阻能够耐受的冲击能量存在较大差异。表 2 显示的实验结果,7D471K 压敏电阻在峰值 1.7 kA 左右的 $8/20 \mu s$ 冲击电流作用 20 次的情况下全部失效;表 4 显示的实验结果,14D471K 压敏电阻在峰值最高 2.5 kA 的 $8/20 \mu s$ 冲击电流作用 20 次的情况下,性能保持良好。实验结果反映出,压敏电阻耐受冲击能量的水平与流过压敏电阻的能量密度相关,在相

同条件下,直径大,能量密度小,耐受冲击能量的水平就高。

3 结论

文中采用电路仿真和实验的方法,研究了不同源阻抗 $8/20 \mu s$ 冲击电流对压敏电阻冲击能量的影响规律,研究结果显示:①相同冲击电流峰值作用下,回路源阻抗越大,压敏电阻承受的冲击能量越小。因此,对于通流容量小或者说直径较小的压敏电阻,冲击电流发生回路源阻抗 R_s 不能选择的太小;②不同冲击电流峰值作用下,采用不同源阻抗冲击电流回路测试同一试品时,压敏电阻限制电压的尾部会出现显著的变化,从而导致压敏电阻承受的冲击能量出现明显差异;③随着压敏电阻直流参考电压的增加, $8/20 \mu s$ 冲击电流回路源阻抗对压敏电阻冲击能量的影响作用增加,但随着 $8/20 \mu s$ 冲击电流峰值的增加,回路源阻抗对压敏电阻承受

冲击能量的影响作用减弱。对于直流参考电压不大于 910 V 的压敏电阻,当冲击电流峰值接近或大于 10 kA 时,冲击电流发生回路源阻抗对压敏电阻承受冲击能量的影响可以忽略不计。因此,在对压敏电阻进行 10 kA 以下的 8/20 μs 冲击电流试验时,冲击电流发生回路的源阻抗不能选择的太小。研究结果对规范过电压防护的试验具有一定的理论意义与工程应用价值。

参考文献:

- [1] 国际电工委员会. IEC 61643-1:2005 低压电涌保护器—第一部分:低压配电系统浪涌保护装置—要求和测试[S]. 2005.
International Electrotechnical Commission. IEC 61643-1: 2005 Low-voltage surge protective device-Part 1: Surge protective devices connected to low-voltage power distribution systems-requirements and tests[S]. 2005.
- [2] 卢燕. 电涌保护器的性能与试验方法研究[D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
LU Yan. Research on surge protection device capability and test methods[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2008.
- [3] 陈璞阳, 杨仲江. 氧化锌压敏电阻冲击老化过程中电容量变化的分析[J]. 电瓷避雷器, 2014(5): 116-121.
CHEN Puyang, YANG Zhongjiang. Analysis on capacitance variation during impulse current conditioning of ZnO varistor[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(5): 116-121.
- [4] 孙伟, 姚学玲, 陈景亮. ZnO 压敏电阻在 8/20 μs 脉冲电流作用下的动态伏安特性分析[J]. 低压电器, 2011(15): 1-4.
SUN Wei, YAO Xueling, CHEN Jingliang. Analysis of dynamic voltage current characteristics of ZnO varistors under 8/20 μs impulse current[J]. Low Voltage Electric, 2011(15): 1-4.
- [5] 陈景亮, 姚学玲, 孙伟. ZnO 压敏电阻组合波回路输出的仿真[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2390-2394.
CHEN Jingliang, YAO Xueling, SUN Wei. Simulation of combination waveform generator for ZnO varistors[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2390-2394.
- [6] 张桂红, 郭洁. 氧化锌非线性电阻片在不同冲击电流波形下的等值电路分析[J]. 电瓷避雷器, 2006(1): 37-41.
ZHANG Guihong, GUO Jie. The analysis of equivalent circuits of metal oxide surge varistor under different surge currents[J]. Insulators and Surge Arresters, 2006(1): 37-41.
- [7] 桑建平. 氧化锌压敏电阻片冲击大电流残压特性的研究[J]. 电瓷避雷器, 2005(3): 32-35.
SANG Jianping. Study on the characteristics of the residual voltage of the ZnO ceramic varistor at the heavy impulse current[J]. Insulators and Surge Arresters, 2005(3): 32-35.
- [8] 张谦, 柴健. ZnO 压敏电阻冲击电流作用下滞后时间的特性分析[J]. 电瓷避雷器, 2014(2): 48-51.
ZHANG Qian, CHAI Jian. Analysis of the lagging time characteristics for ZnO varistor under application of impulse current[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(2): 48-51.
- [9] FESER K, LUTZ M. Surge testing requirements analysis [EB/OL]. <http://www.haefely.com/30-downloads/>, 2015-09-27.
- [10] 陈景亮, 姚学玲, 孙伟. 脉冲电流技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2008.
CHEN Jingliang, YAO Xueling, SUN Wei. Pulse current technique[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 2008.
- [11] 姚学玲, 陈景亮. 压敏电阻对冲击电流回路输出特性影响的仿真[J]. 高电压技术, 2009, 35(9): 2250-2256.
YAO Xueling, CHEN Jingliang. Simulation of effect of varistors on output characteristics of impulse current circuit[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(9): 2250-2256.
- [12] 姚学玲, 陈景亮, 孙伟. 非线性电阻片冲击电流发生回路的研究[J]. 高压电器, 2005, 41(6): 412-416.
YAO Xueling, CHEN Jingliang, SUN Wei. Study on the impulse current for nonlinear resistances[J]. High Voltage Apparatus, 2005, 41(6): 412-416.
- [13] 陈景亮, 姚学玲. 压敏电阻限制电压测试回路参数的仿真计算[J]. 高电压技术, 2002, 28(12): 11-13.
CHEN Jingliang, YAO Xueling. The MATLAB simulation and calculation of parameters for impulse current circuit[J]. High Voltage Engineering, 2002, 28(12): 11-13.
- [14] 王巨丰, 胡习凯, 韦念胜, 等. 氧化锌非线性电阻片集肤效应的分析与探讨[J]. 电瓷避雷器, 2014(3): 88-95.
WANG Jufeng, HU Xikai, WEI Niansheng, et al. Analysis and discussion on the skin effect of zinc oxide nonlinear resistor[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(4): 88-95.
- [15] YAACOB M M, GHANI R A. Voltage-current characteristics of metal oxide varistors for low voltage telephone lightning protector under the application of multiple lightning impulse[C]//Conference Record of the 1998 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. Arlington, Virginia, USA: IEEE, 1998: 460-463.
- [16] DRABKIN M M. Surge protection of low-voltage AC power by MOV-based SPDs[C]//10th International Conference on Harmonics and Quality of Power. Riode Janeiro, Brazil: [s.n.], 2002: 13-16.
- [17] ROCKS A, HINRICHSSEN V. Application of varistors for overvoltage protection of machine windings in inverter-fed drives[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 6(8): 335-340.
- [18] HE J L, CHEN S M, ZENG R, et al. Electrical parameter statistic analysis and parallel coordination of ZnO varistors

(下转第 98 页)

- Mechanical Engineering, 2007, 18(1): 4-8.
- [8] 蔡丽, 李恩, 梁自泽, 等. 巡线机器人越障行为的模糊控制研究[J]. 微计算机信息, 2008, 24(34): 24-26.
CAI Li, LI En, LIANG Zize, et al. Fuzzy control of the inspection robot for obstacle-negotiation[J]. Control & Automation, 2008, 24(34): 24-26.
- [9] 朱兴龙, 王洪光, 房立金, 等. 自主越障巡检机器人质心调节控制[J]. 机器人, 2006, 28(4): 385-388.
ZHU Xinglong, WANG Hongguang, FANG Lijin, et al. Centroid adjustment control on autonomous obstacle negotiating inspection robot[J]. Robot, 2006, 28(4): 385-388.
- [10] 房立金, 王洪光. 架空线移动机器人行走越障特点[J]. 智能系统学报, 2010, 5(6): 492-497.
FANG Lijin, WANG Hongguang. Research on the characteristics of the movement and obstacle-clearing processes of a wire-suspended mobile robot[J]. Transactions on Intelligent Systems, 2010, 5(6): 492-497.
- [11] 吴华, 孟伶智, 柳长安, 等. 混杂动态系统的电缆隧道巡检机器人防摆控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(s1): 440-442.
WU Hua, MENG Lingzhi, LIU Chang'an, et al. Hybrid anti-swing control scheme for cable tunnel inspecting robot[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Natural Science Edition), 2013, 41(s1): 440-442.
- [12] 文雪峰, 佃松宜, 董航, 等. 双吊臂式架空线路机器人的攀爬机构研究[J]. 机械设计与制造, 2013(7): 168-170.
WEN Xuefeng, DIAN Songyi, DONG Hang, et al. Study on climbing mechanism of dual-arm robot for power line[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(7): 168-170.
- [13] 周俊, 冷鸿彬, 朱洪俊. 高压线巡检机器人越障机构设计[J]. 机械设计, 2012, 29(12): 25-27.
ZHOU Jun, LENG Hongbin, ZHU Hongjun. Analysis of influence on natural characteristics of gear by thermal effect[J]. Journal of Machine Design, 2012, 29(12): 25-27.
- [14] 凌烈, 王洪光, 李树军, 等. 基于输电线路行走越障任务的巡检机器人机构设计[J]. 机械设计与制造, 2012(10): 84-86.
LING Lie, WANG Hongguang, LI Shujun, et al. The inspection robot mechanism design based on the transmission line obstacle-navigation task[J]. Machinery Design & Manufacture, 2012(10): 84-86.
- [15] 宋屹峰, 王洪光, 姜勇, 等. 具备被动关节的巡检机器人越障性能研究[J]. 机械设计与制造, 2013(12): 83-86.
SONG Yifeng, WANG Hongguang, JIANG Yong, et al. Research on obstacle performance inspection robot with passive joints[J]. Machinery Design & Manufacture, 2013(12): 83-86.
- [16] 宋树伟, 阮毅, 李正. 基于多传感器的超高压输电线路巡检机器人越障控制[J]. 机床与液压, 2013, 41(7): 51-54.
SONG Shuwei, YUAN Yi, LI Zheng. Obstacle-navigation control of automatic inspection robot for extra-high voltage power line based on multi-sensor[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2013, 41(7): 51-54.
- [17] XIAO Xiaohui, WU Gongping, DU E, et al. Impacts of flexible obstructive working environment on dynamic performances of inspection robot for power transmission line[J]. Journal of Central South University of Technology, 2008, 15(6): 869-876.
- 严宇(1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为带电检修机器人。

(上接第91页)

- in low-voltage protection devices[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 131-137.
- [19] IMAI T, UDAGAWA T, ANDO H, et al. Development of high gradient Zinc oxide nonlinear resistors and their application to surge arresters[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1998, 13(4): 1182-1188.
- [20] FAN H, MILLER D B. Transition of MOV distribution arresters from capacitive to resistive during steep-front impulses[C]/IEEE international symposium on electrical insulation. Baltimore, MD, USA: IEEE, 1992: 452-456.
- [21] HAN S W, CHO H G, HE J L. The statistic analysis on principal electric parameters of MOV for surge arrester[C]/Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2: Asia Pacific. [S.l.]: IEEE, 2003: 2208-2211.
- [22] 张仁豫, 陈昌渔. 高电压试验技术[M]. 第2版. 北京: 清华大学出版社, 2003.
ZHANG Renyu, CHEN Changyu. High voltage testing technology[M]. 2nd ed.. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
- [23] ZOLA J G. Simple model of metal oxide varistor for Pspice simulation[J]. IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems, 2004, 23(10): 1491-1494.
- 孙伟(1965—), 男, 副教授, 主要从事过电压防护、高电压测试。