

耦合方式对浪涌保护器组合波输出波形特性影响的研究

姚学玲, 陈景亮, 孙伟

(西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要: 笔者建立了压敏电阻的仿真模型以及组合波耦合网络的 MATLAB 仿真电路, 研究了电容耦合和压敏电阻耦合方式对组合波短路电流波形参数的影响规律。耦合电容的加入使组合波短路电流的波前时间和半峰值时间减小, 回路虚拟阻抗增加, 且随着耦合网络的耦合电容容量的增加, 短路电流波的波前时间和半峰值时间增加, 虚拟阻抗减小; 压敏电阻耦合对组合波短路电流的影响规律和电容耦合相同, 对于同一规格压敏电阻, 随着电容上充电电压的增加, 短路电流波的波前时间和半峰值时间增加, 虚拟阻抗减小。在电容上充电电压相同情况下, 随着压敏电阻通过直流 1 mA 时的电压 U_{1mA} 的增加短路电流波的波前时间和半峰值时间显著减小, 而虚拟阻抗则显著增加。

关键词: 组合波; 电容耦合; 压敏电阻耦合; 波形参数

中图分类号: TM83

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)02-0036-04

Influence of Coupling Mode on Output Characteristics of Combination Wave Generator of Surge Protective Device

YAO Xue-ling, CHEN Jing-liang, SUN Wei

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The simulation model of varistors and simulation circuit of CWG (combination wave generator) are set up for studying the influences of capacitor coupling and varistor coupling modes on short current waveform parameters of CWG, and the simulation results are achieved. The coupling capacitors make the front time and half peak time of short current wave decrease, and virtual impedance increases. With the coupling capacitance increasing, the front time and half peak time of short current wave increase, and virtual impedance decreases. The coupling varistors have the same influence law as the coupling capacitors. For the same kind of varistors, the front time and half peak time of short current wave decrease, and virtual impedance increases with the storage capacitor charge voltage. But at the same storage capacitor charge voltage, the front time and half peak time of short current wave decrease, and virtual impedance increases remarkably with the U_{1mA} on varistor increasing.

Key words: combination wave; capacitor coupling; varistor coupling; waveform parameter

0 引言

ZnO 压敏电阻是具有晶界势垒的多晶化合物, 具有非常优良的电气特性, 广泛用来抑制电路或电源系统中的瞬态过电压^[1-7]。ZnO 压敏电阻作为重要的浪涌保护器 (SPD) 之一, 其冲击试验一般是在未加工工频电源状态下进行的, 而国际标准规定 SPD 的 1.2/50 μ s、8/20 μ s 组合波 (CWG) 试验必须在施加工频电源的情况下进行^[8-11]。为了将浪涌电源施加在 EUT 上而又不受工频供电电源的影响, 浪涌电源和 EUT 之间必须插入耦合网络 (CN), 见图 1。

CN 可采用电容耦合、阻容耦合、压敏电阻耦合和放电间隙/放电管耦合等, 由于 CN 是组合波回路的一部分, 对组合波开路电压的输出不会造成影响,

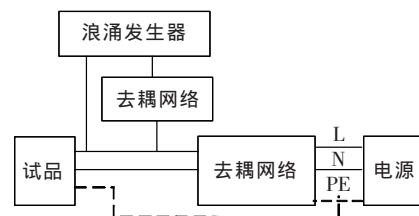


图 1 组合波试验原理框图

但不可避免地影响组合波短路电流的输出。笔者建立了组合波耦合网络电路的仿真模型, 研究了电容及压敏电阻耦合对组合波短路电流输出的影响规律。

1 电容耦合对组合波短路电流输出影响的仿真

组合波电路见图 2, 虚拟阻抗为 2 Ω 时回路参

收稿日期: 2008-03-24; 修回日期: 2008-06-21

作者简介: 姚学玲 (1966-) 女, 博士后, 副教授, 主要从事高电压大电流试验技术及过电压防护技术的研究。

数为： $C_1=8\ \mu\text{F}$ ， $L=10\ \mu\text{H}$ ， $R_1=15\ \Omega$ ， $R_2=1.2\ \Omega$ ， $R_3=23\ \Omega$ 。 C_2 为耦合电容， R_s 为分流器，EUT为被试品。图2(a)为带有EUT负载的组合波电路，图2(b)为带有EUT负载和耦合电容的组合波电路，图2(c)为EUT短路时带有耦合电容的组合波 MATLAB 仿真电路。

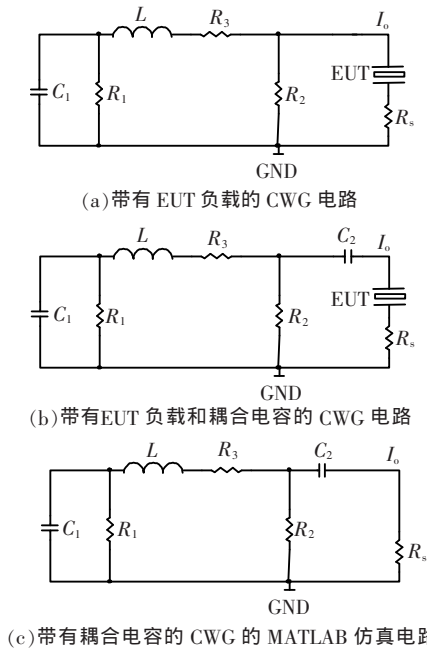
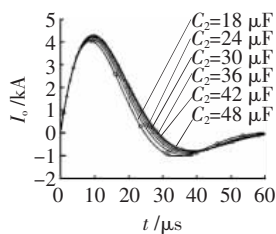


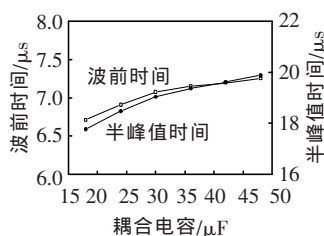
图2 CWG原理图

对于图2(c)，当不存在耦合元件时且储能电容电压为 $U_c=10\ \text{kV}$ 时，仿真输出参数为：开路电压 $U_{oc}=9.27\ \text{kV}$ ，短路电流 $I_0=4.48\ \text{kA}$ ，短路电流波的波前时间 $t_f=7.67\ \mu\text{s}$ ，半峰值时间 $t_r=21.59\ \mu\text{s}$ ，反极性振荡为 12.48%，虚拟电阻为 $2.07\ \Omega$ 。

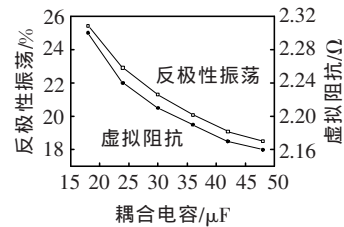
图3为耦合电容 C_2 加入后，其容量对短路电流波形参数的影响规律，其中图3(a)为耦合电容 C_2 从 $18\ \mu\text{F}$ 变化到 $48\ \mu\text{F}$ 时，短路电流波形的变化情况，图3(b)为短路电流波形的波前时间和半峰值时间随 C_2 变化的规律，图3(c)为短路电流波形的反极性振荡和组合波回路虚拟阻抗随 C_2 变化的规律。



(a) 对电流波形的影响



(b) 对电流波前时间和半峰值时间的影响



(c) 对电流反极性振荡和 CWG 虚拟阻抗

图3 耦合电容对短路电流波形的影响

从图3得出：耦合电容 C_2 的加入使组合波短路电流的波前时间和半峰值时间减小，反极性振荡和回路虚拟阻抗增加，且随着耦合电容 C_2 的增加，短路电流波的波前时间和半峰值时间均增加，反极性振荡和虚拟阻抗减少。具体来讲，当耦合电容 C_2 从 $18\ \mu\text{F}$ 变化到 $48\ \mu\text{F}$ 时，短路电流波的波前时间由 $6.7123\ \mu\text{s}$ 变化到 $7.2523\ \mu\text{s}$ ，变化量为 $0.54\ \mu\text{s}$ ；半峰值时间由 $17.77\ \mu\text{s}$ 变化到 $19.88\ \mu\text{s}$ ，变化量为 $2.11\ \mu\text{s}$ ；反极性振荡由 25.4% 变化到 18.5%，变化量为 6.9%；虚拟阻抗由 $2.3\ \Omega$ 变化到 $2.16\ \Omega$ ，变化量为 $0.14\ \Omega$ 。

为了减少耦合电容 C_2 对短路电流波形参数的影响，耦合电容 C_2 不能选的太小，要想同时满足文[8-11]标准，耦合电容 C_2 应在 $48\ \mu\text{F}$ 左右。但在工频供电电源作用下，耦合电容 C_2 的增大势必引起其容抗的减小，从而引起通过回路中调波电阻 R_1 、 R_2 、 R_3 以及储能电容 C_1 中的电流的增加，给调波电路的设计增加了难度。在工频电源电压 $U=380\ \text{V}$ 的情况下，通过调波电阻 R_1 、 R_2 的工频电流随耦合电容 C_2 变化的规律见图4。

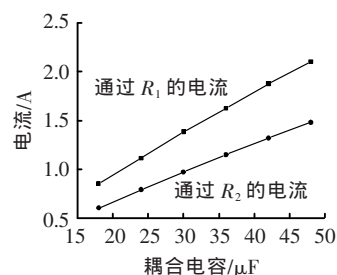


图4 调波电阻中的电流

由此得出：在工频电源电压不是太高以及组合波试验等级不太高的情况下（如 $6\ \text{kV}/3\ \text{kA}$ 组合波），电容耦合方式结构紧凑，是一种较为理想的耦合方式，但在工频电源较高（如 $AC\ 600\ \text{V}$ ）或组合波试验等级较高（ $30\ \text{kV}/15\ \text{kA}$ 或 $20\ \text{kV}/10\ \text{kA}$ ）时，电容耦合并不是最好的耦合方式。

2 压敏电阻耦合对组合波输出电流影响的仿真

2.1 压敏电阻的仿真模型

压敏电阻的数学模型可以用指数函数来描述^[12]，即： $U=kI^\alpha$ 。其中 k 为比例系数， α 为非线性系数。严

格的讲,由于各个区域所表现的特性不同,比例系数 k 和非线性系数 α 并不是常数,它们随着电流的改变而改变,但在局部电流区间内比例系数 k 和非线性系数 α 近似保持不变,因此可用分段的指数函数来描述其伏安特性

$$U=k_i I^{\alpha_i} \quad (i=1,2,\dots) \quad (1)$$

式(1)中, i 表示不同的电流区间。

为求得准确 k 和 α , 首先划分电流区间。将式(1)两边同时取对数进行线性化, 得到 $\ln U = \alpha_i \ln I + \ln k_i$ 并令 $y = \ln U$ 和 $x = \ln I$ 得

$$y = \alpha_i x + \ln k_i \quad (2)$$

由式(2)可见 $\ln U$ 与 $\ln I$ 呈一次线性函数, 只要将电压、电流数据 (U_j, I_j) 取对数并将所有 (x_j, y_j) 画在同一坐标系内, 即得 $\ln U$ 与 $\ln I$ 的关系曲线。如果在 (I_k, I_{k+1}) 范围内, (x_j, y_j) 基本上在同一直线上, 则该电流区间内 $\ln U$ 与 $\ln I$ 呈一次函数关系。对该区间内 n 个点 (x_j, y_j) 作一次函数拟合, 其一次项系数即为该电流区间的非线性系数 α_i , 常数项即为比例系数的对数 $\ln k_i$, 进而可求出 k_i 。为便于仿真研究, 将压敏电阻的伏安特性表达式写成

$$U/U_{ref} = k_i (I/I_{ref})^{1/\alpha_i} \quad (3)$$

式(3)中, I_{ref} 为参考电流, U_{ref} 为参考电流处的电压。

以 $\Phi 23-331K$ (直径为 23 mm, 通过直流 1 mA 时的电压 U_{1mA} 为 331 V, 以下同) 为例说明压敏电阻仿真模型的建立。表 1 为其电压与电流数据。

表 1 $\Phi 23-331K$ 的电流和电压数据

I/A	U/V	I/A	U/V
10^{-6}	170	10^{-1}	435
10^{-5}	218	10^0	448
10^{-4}	260	10^1	550
10^{-3}	360	10^2	750
10^{-2}	410	10^3	1 100

选压敏电阻的参考电流和参考电压 (I_{ref}, U_{ref}) 为 (1 000 A, 1 100 V), 根据表 1 和式(3)得到如图 5 的 U/U_{ref} 与 I/I_{ref} 的对数关系曲线。

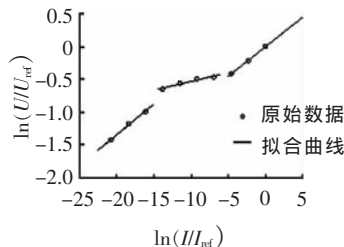
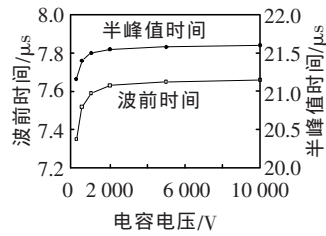


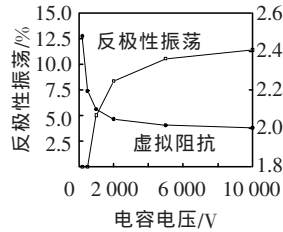
图 5 压敏电阻($\Phi 23-331K$)的电压-电流关系

2.2 耦合压敏电阻对组合波输出电流影响的仿真

压敏电阻耦合的组合波仿真电路和图 2(c) 相似, 只是耦合电容 C_2 用压敏电阻代替, 其仿真参数由 2.1 给出。图 6、7 分别为 $\Phi 23-180K$ 和 $\Phi 23-331K$

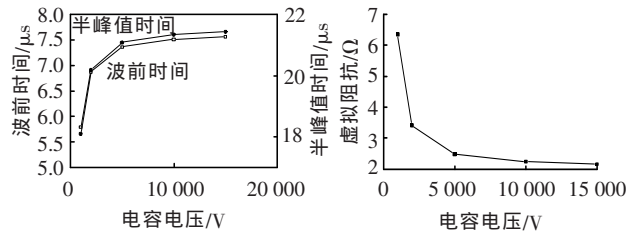


(a) 对电流波前时间和半峰值时间的影响



(b) 对电流反极性振荡和 CWG 虚拟阻抗

图 6 压敏电阻 $\Phi 23-180K$ 耦合对短路电流波形的影响



(a) 对电流前时间和半峰值时间的影响 (b) 对 CWG 虚拟阻抗的影响

图 7 压敏电阻 $\Phi 23-331K$ 耦合对短路电流波形的影响

耦合压敏电阻对短路电流的影响规律。

从图 6、7 可以看出: 耦合压敏电阻的限制电压越高, 对组合波短路电流波形参数的影响越大, 且随着电容上放电电压的增大, 耦合压敏电阻对短路电流波形参数的影响越小, 逐渐接近于不加耦合网络时的波形参数。当耦合网络的压敏电阻为 $\Phi 23-180K$ 且当储能电容上从 200 V 变化到 15 kV 时, 短路电流波的波前时间由 $7.35 \mu s$ 变化到 $7.67 \mu s$; 半峰值时间由 $21.16 \mu s$ 变化到 $21.66 \mu s$; 反极性振荡由 0% 变化到 11.70%; 虚拟阻抗由 2.48Ω 变化到 1.999Ω 。而当耦合网络的压敏电阻为 $\Phi 23-331K$ 且当储能电容上从 1 000 V 变化到 15 kV 时, 短路电流波的波前时间、半峰值时间和虚拟阻抗的变化范围分别为 $5.79 \sim 7.5625 \mu s$ 、 $18.1 \sim 21.43 \mu s$ 和 $2.16 \sim 6.434 \Omega$ 。

图 8 为不同规格压敏电阻对短路电流波形参数影响的规律。由此得出: 当用压敏电阻作为耦合元件时, 压敏电阻的 U_{1mA} 越高, 对短路电流波形参数的影响越大。

为保证组合波的输出范围, 压敏电阻的 U_{1mA} 不能太高, 但组合波试验主要是为了模拟 EUT 带电情况下遭受浪涌的情况, 耦合压敏电阻的 U_{1mA} 电压必须大于 EUT 上施加的工频电压的峰值, 否则, 耦合压敏电阻将处于导通, 长期有工频电流流过, 这将引起压敏电阻的老化及组合波回路调波元件的长期发热而影响波形输出。如用 $\Phi 23-680K$ 耦合压敏电阻

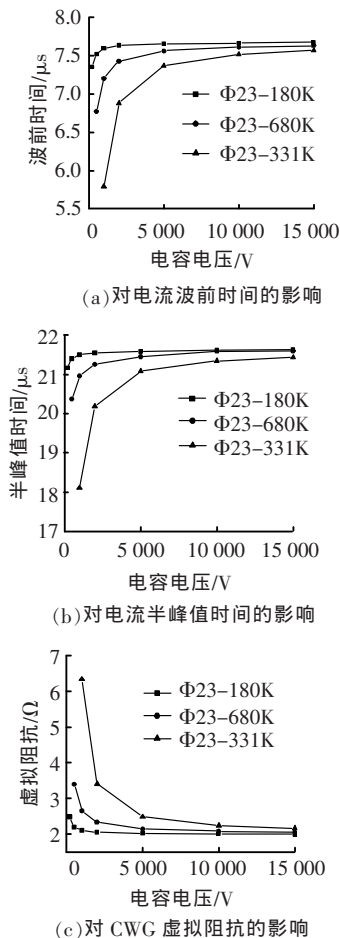


图8 不同压敏电阻对短路电流波形的影响

时,施加的工频电压的峰值不得超过 60 V,同时满足文[8-11]标准的最小输出电流在 2 kA 左右。如果 EUT 施加电压为 220 V,选用的耦合压敏电阻的 U_{1mA} 不小于 308 V,可选用 $\Phi 23-331K$ 压敏电阻作为耦合元件,同时满足文[8-11]标准的最小输出电流在 5 kA 左右。因此,压敏电阻耦合方式比较适用于组合波试验等级较高、工频电压不太大以及对组合波波形参数要求比较宽松的场所。

比较耦合网络对组合波短路电流波形的仿真结果得出,电容耦合和压敏电阻耦合方式各有优缺点,适用场合也受到一定的限制,而采用大通流容量的保护间隙,如 Phoenix、OBO、DEHN 等公司生产的标准浪涌保护间隙,这种保护间隙在浪涌电流通过时具有非常小的动态电阻,对组合波短路电流波形不会产生影 响,同时其电压保护水平在几百伏到几个千伏不等,因此可以根据组合波输出电压、电流等级的不同以及施加工频电源电压的大小,选择一组浪涌保护间隙作为组合波试验回路的耦合网络,产生同时满足文[8-11]标准等要求的开路电压波和短路电流波。

3 结论

笔者建立了压敏电阻的仿真模型及组合波耦合

网络的仿真电路,研究了电容和压敏电阻耦合对短路电流波形参数的影响规律,得出了以下结论:

(1)和未加任何耦合元件比较,耦合电容的加入,短路电流波前时间和半峰值时间减小,反极性振荡和虚拟电阻增加。

(2)压敏电阻对短路波形参数的影响规律和耦合电容的相同,对于同规格压敏电阻,随着储能电容电压的增加,短路电流波的波前时间和半峰值时间增加,虚拟阻抗减小;在储能电容电压相同情况下,随着压敏电阻 U_{1mA} 的增加,短路电流波的波前时间和半峰值时间显著减小,而虚拟阻抗则显著增加。

由上可知:电容耦合方式适宜于施加工频电压不太大、要求组合波输出电压与电流等级比较低的场合;压敏电阻耦合方式适用于组合波试验等级较高、工频电源电压不太大以及对组合波短路电流波形参数要求比较宽松的场合。

参考文献:

- [1] PHILIPP H R, LEVINSON L M. ZnO Varistor for Protection Against Nuclear Electromagnetic Pulses [J]. J. Appl. Phys., 1981, 52(2): 1 083-1 090.
- [2] MAHAN G D, LEVINSON L M, PHILIPP H R. Theory of Conduction in ZnO Varistor [J]. J. Appl. Phys., 1979, 50 (4): 2 799-2 812.
- [3] RAGHANI M Y. 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, USA, 1998: 460-463.
- [4] DRABKIN M M. Surge Protection of Low-voltage AC Power by MOV-based SPDs [C]// 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 2002: 13-16.
- [5] ABDELSALAM M, AHMED N A, ELHAMD I S. Varistor as a Surge Protection Device for Electronic Equipments [C]// IEEE International Conference on Industrial Technology, Royal Hammamet, Tunisia, 2004: 688-694
- [6] FAN Hong-bo, MILLER D B. Transition of MOV Distribution Arresters from Capacitive to Resistive During Steep-front Impulses [C]// Conference of IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Baltimore, 1992: 452-454.
- [7] ALANCHISTE C E T, JAMESFUNKE P E. Electronic System Protection Via Advanced Surge Protective Devices [J]. Digital Object Identifier, 2002(3): 2 244-2 247.
- [8] UL 1449. Transient Voltage Surge Suppressors[S]. 2005.
- [9] IEC 61643-1. Surge Protective Devices Connected to Low-voltage Power Distribution System, Part 1: Performance Requirements and Testing Methods[S]. 1998.
- [10] IEC 61000-4-5. Electromagnetic Compatibility (EMC), Part 4: Testing and Measurement Techniques Section 5: Surge Immunity Test[S]. 1995.
- [11] IEC 61643-21. Surge Protective Devices Connected to Telecommunication and Signaling Networks, Performance Requirements and Testing Methods[S]. 2000.
- [12] MAHAN G D, LEVINSON L M, PHILIPP H R. Theory of Conduction in ZnO Varistors[J]. J. Appl. Phys., 1997, 50(4): 2 799-2 812.