

文章编号: 1001-1609(2006)05-0343-03

用于防雷器带电试验组合波发生器电路参数的理论计算

孙伟, 姚学玲, 陈景亮, 徐传骥

(西安交通大学电气工程学院, 陕西 西安 710049)

Theoretical Calculation Applied in Circuit Parameters of Combination Wave Generator for SPD Charging Test

SUN Wei, YAO Xue-ling, CHEN Jing-liang, XU Chuan-xiang

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

摘要: 组合波信号发生器(CWG)主要用于浪涌保护器或电子设备电磁兼容试验,要求在虚拟阻抗 Z 为2的情况下,输出1.2/50 μ s开路电压波或8/20 μ s短路电流波。基于电路微分方程的方法对CWG等效电路进行数学计算,导出相应的数学关系,给出一套计算图表。对电路参数计算结果进行电路仿真,并将计算结果应用于实际CWG电路设计。同CWG标准参数要求对比,仿真结果最大偏差小于6%。实际设计的CWG参数最大偏差小于8%。结果表明,针对CWG电路参数的计算采用的方法是正确的,计算结果可以应用于CWG设计中电路参数的选取。

关键词: 组合波发生器; 虚拟阻抗; 电路参数; 电路仿真
中图分类号: TM834 文献标识码: A

Abstract: The combination wave generator is used mainly for surge protective devices or electromagnetic compatibility test. The output voltage wave, the output current wave and the output equivalent impedance (it is named virtual impedance Z) are important characteristics of CWG. According to IEC standard, the output waveforms, which include the 1.2/50 μ s open voltage wave or the 8/20 μ s short current wave, should be generated by CWG under the condition of $Z=2$. The paper aims to decide the parameters of CWG circuit through the circuit calculation. Firstly, from the CWG equivalent circuit differential equation, a set of charts for selecting circuit parameters are elicited, and according to these charts, the circuit parameters of CWG are chosen. Secondly, the designed circuit is simulated and developed, the tested results prove that the error is less than 6% and 8% comparing the simulated waves and the tested waves with the IEC standard respectively. It is verified that the method of calculation is correct.

Key words: combination wave generator(CWG); virtual impedance; circuit parameter; circuit simulation

0 引言

由于暂态过电压而导致的电子设备的故障日益增加^[1],严格对产品电磁兼容(EMC)性能的测试,越来越受到生产厂商的重视^[2]。在进行产品EMC测试中,除对设备进行工频电压试验外,还要进行雷电浪涌抗扰性试验。根据相关的IEC标准和国家标准要求,这类试验需要使用能产生1.2/50 μ s开路电压波、8/20 μ s短路电流波、输出等效阻抗(虚拟阻抗 Z)为2的组合波信号发生器(CWG)。

图1为浪涌保护器(SPD)浪涌抗扰度或EMC试验电路框图。被试品(CWG的接入负载)在浪涌电压的冲击下处于两种状态之一:开路状态;短路状态。CWG产生的冲击波形是接入负载的函数,当负载处于开路状态时,CWG输出1.2/50 μ s的开路电压波形;当负载处于短路状态时,CWG输出8/20 μ s的短路电流波形,输出虚拟阻抗 Z 为2^[3]。CWG输出的浪涌冲击通过耦合电容施加在被试品上;同时被试品通过退耦网络与供电电源连接,减少CWG产生的浪涌冲击对电网造成的污染。试验的方法通常是在工频电压(试品的电源供电电压)的正、负半波达到最大值时施加,正极性冲击在工频电压的正半波最大值时施加,负极性冲击在工频电压的负半

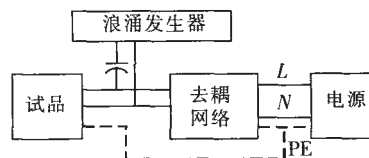


图1 CWG试验原理框图

收稿日期: 2005-11-07

作者简介: 孙伟(1965-),男,博士研究生,研究方向为高压与绝缘技术。

波最大值时施加^[4-5]。

1 CWG 电路参数的计算

CWG 波形形成回路的电路原理见图 2。在测试过程中, CWG 产生的浪涌冲击作用在试品两端, 此时试品可能处于两种状态之一: 开路状态; 短路状态。相应的等效电路见图 3。

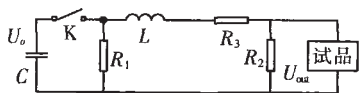


图 2 波形形成回路电路原理图

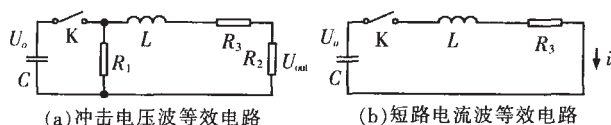


图 3 波形形成回路等效电路图

试品在浪涌冲击下处于开路时, 等效电路见图 3(a), 是标准的冲击电压发生电路, 输出端产生 1.2/50 μs 的开路电压波。开关 K 合上的最初时间内, 电容 C 经电阻 R₂, R₃ 向电感 L 充电, 形成冲击电压波的波前时间 T₀₁; 开关合上一段时间后, 电容 C 及电感 L 经电阻 R₁, R₂, R₃ 放电, 形成冲击电压波的半峰值时间 T₀₂, 其中和电容放电相比, 电感放电对冲击电压波 T₀₂ 的作用可略去不计。

试品在浪涌冲击下处于短路时, R₂ 两端短路, R₁ >> R₃, 忽略 R₁ 的作用, 等效电路如图 3(b), 输出端产生 8/20 μs 的短路电流波。

图 3(b) 所示的冲击电流发生电路一般工作在欠阻尼工作状态^[6], 电路的微分方程为:

$$LC \frac{d^2 u_c}{dt^2} + R_3 C \frac{du_c}{dt} + u_c = 0 \quad (1)$$

$$\text{其解为: } i = \frac{U_0}{L} e^{-\zeta t} \sin t \quad (2)$$

$$\text{式(2)中: } \zeta = \frac{R_3}{2L}; \quad \omega = \frac{1}{LC} - \left(\frac{R_3}{2L}\right)^2$$

令: $\zeta = \frac{R_3}{2(L/C)^{1/2}}$ 为电路的阻尼系数; 在 $\zeta < 1$ 条件下进行变换得:

$$i = \frac{U_0}{(L/C)^{1/2}} \cdot \frac{1}{(1-\zeta^2)^{1/2}} \cdot e^{-\zeta t} \cdot \sin \left[(1-\zeta^2)^{1/2} \frac{t}{(LC)^{1/2}} \right] \quad (3)$$

$$\text{令: } i^* = \frac{i}{U_0/(L/C)^{1/2}}; \quad t^* = \frac{t}{(LC)^{1/2}}$$

$$\text{则: } i^* = \frac{1}{(1-\zeta^2)^{1/2}} \cdot e^{-\zeta t^*} \cdot \sin \left[(1-\zeta^2)^{1/2} \cdot t^* \right] \quad (4)$$

式(4)中 i^* 是式(3)中 i 的归一化电流; 在 L, C 为常数时, t^* 是 t 的函数。由式(4)可知, 在给定一个值时, 可得出 $i^* \sim t^*$ 的关系曲线。由于冲击电流发

生电路一般工作在欠阻尼工作状态, 因此对式(4)只讨论 $0 < \zeta < 1$ 的情况。给定 ζ 的值为: 0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9; 由式(4)可以得出相应的 $i^* \sim t^*$ 的关系曲线见图 4。

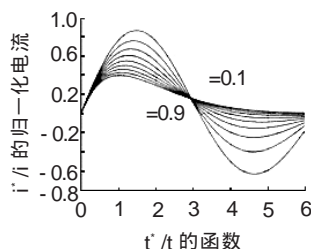


图 4 不同 ζ 值对应的 $i^* \sim t^*$ 关系曲线

从图 4 中看出, 式(4)代表的是一种衰减振荡, ζ 的大小影响到振荡衰减的强弱, ζ 越大, 反向振荡越小。

设 i_{m1}, i_{m2} 是 i 的正向峰值电流和反向峰值电流, i_{m1}^*, i_{m2}^* 是 i^* 的正向峰值电流和反向峰值电流; T₁₁, T₁₂ 是短路电流波的波头时间和波尾时间; T_{11}^*, T_{12}^* 是 T_{11}, T_{12}} 的函数。根据短路电流标准波定义, 反向振荡应小于 20%, 即 $i_{m2}^*/i_{m1}^* (\%) = i_{m2}/i_{m1} (\%) < 20\%$ 。对于波形参数为 8/20 μs ± 10% 的短路电流波, 应当满足 2.05 < T_{12}/T_{11} < 3.05, 并且 T_{12}/T_{11} = T_{12}^*/T_{11}^*。}}}}}

为了电路参数计算的需要, 根据式(4)可以得出 $i_{m2}^*/i_{m1}^*, \sim T_{12}^*/T_{11}^*$ 4 个关系曲线见图 5。

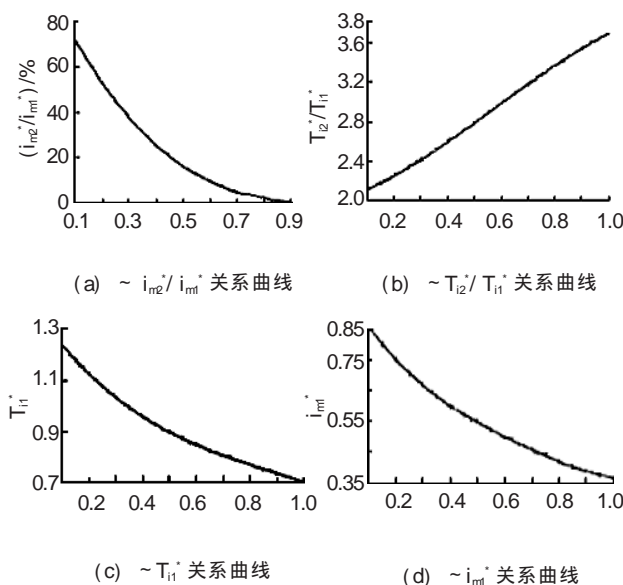


图 5 对应的不同参数关系曲线

根据 $i_{m2}^*/i_{m1}^* < 20\%$ 的要求, 从图 5(a) 可以得出, 当 $\zeta > 0.47$ 时即可满足反向振荡不大于 20% 的要求。从图 5(b) 可以得出, 当 $\zeta > 0.47$ 时, $T_{12}^*/T_{11}^* > 2.72$; 当 $\zeta < 0.62$ 时, $T_{12}^*/T_{11}^* < 3.05$, 因此 ζ 的取值范围应满足的条件为 $0.47 < \zeta < 0.62$ 。

在确定了 ζ 的取值范围后, 可以按照 ζ 的值, 根据图 5(c) 求出 T_{11}^*; 根据图 5(d) 求出 i_{m1}^*。求出上}

述参数后,可以按照实际设计的 CWG 系统要求,确定电路参数。

所研制的 CWG 对输出波形参数的要求是:输出短路电流为 8/20 μs/15 kA、开路电压为 1.2/50 μs/30 kV。可根据下面公式计算 CWG 回路参数。

对于图 3(a) 所示的开路电压, T_{U1} 和 T_{U2} 的计算公式如下:

$$T_{U1} = 3 \frac{L}{R_2 + R_3} \quad (5)$$

$$T_{U2} = 0.7 \frac{R_1(R_2 + R_3)}{R_1 + R_2 + R_3} C \quad (6)$$

回路的输出电压为:

$$U_{out} = U_0 \frac{R_2}{R_2 + R_3} \quad (7)$$

对于图 3(b) 所示的短路电流,计算公式如下:

$$= \frac{R_3}{2(L/C)^{1/2}} \quad (8)$$

$$i_{m1} = i_{m1}^* \frac{U_0}{(L/C)^{1/2}} \quad (9)$$

$$T_{i1} = T_{i1}^* (LC)^{1/2} \quad (10)$$

根据上述方法计算出的电路参数见表 1。

表 1 回路参数计算结果

	L / μH	C / μF	R ₁ /	R ₂ /	R ₃ /
=0.47	9.74	7.76	14.80	23.3	1.05
=0.62	9.45	9.84	10.48	22.4	1.225

根据上述计算结果,从式(7)中可以得出组合波输出电压 U_{out} 和电容上充电电压 U_0 的关系为:当 = 0.47 时, $U_0 = 1.04U_{out}$; 当 = 0.62 时, $U_0 = 1.05U_{out}$ 。考虑到系统回路中的其它因素作用,选取 $U_0 = 1.1U_{out}$, 可以满足输出电压和输出电流幅值的要求。

因此在进行系统调试时,选择电感范围在 9.45 ~ 9.74 μH, 电容范围在 7.76 ~ 9.84 μF 之间,配以合适的电阻参数,就可以得到输出 1.2/50 μs 开路电压波、8/20 μs 短路电流波、虚拟阻抗 $Z=2$ 的组合波。当电容上的充电电压达到 33 kV 时,开路电压和短路电流的幅值可以达到 30 kV 和 15 kA。

2 CWG 电路的仿真

为验证 CWG 回路参数计算的正确性,现对设计的电路进行仿真,仿真电路见图 3。在图 3(b) 中串联一个电流传感器电阻 $R_s = 0.001$, 其阻值远小于电阻 R_3 。表 2 为仿真输出的波形参数。

根据表 2 的仿真结果,开路电压波波前时间为 1.19 ~ 1.202 μs, 波尾时间为 51.8 ~ 51.9 μs, 偏差不超过 4%, 电压波无反极性振荡; 短路电流波波前时间为 7.77 μs, 波尾时间为 21 ~ 23 μs, 偏差不超过 6%, 反极性振荡 i_{m2}/i_{m1} (%) 为 7.5 ~ 16.7%, 小于规定的 20%; 虚拟阻抗 Z 为 1.96 ~ 1.98, 偏差不超过 2%。

表 2 电路仿真的波形参数

参数	标准值	L=9.74 μH, C=7.76 μF		L=9.45 μH, C=9.84 μF	
		仿真值	偏差 / %	仿真值	偏差 / %
i_m / kA	15	15.69	-	15.4	-
T_{i1} / μs	8	7.77	-2.8	7.77	-2.8
T_{i2} / μs	20	21.0	+5.0	23.0	+6.0
(i_{m2}/i_{m1}) / %	<20	16.7	-	7.5	-
U_{oc} / kV	30	30.73	-	30.42	-
T_{U1} / μs	1.2	1.19	-0.8	1.202	+0.17
T_{U2} / μs	50	51.8	+3.6	51.9	+3.8
Z /	2	1.96	-2.0	1.98	-1.0

完全满足试验要求。

3 CWG 发生器电路与实验

在理论计算与仿真基础上,研制了一套虚拟阻抗 $Z=2$ 的组合波信号发生器,电路参数为: $L=10$ μH, $C=8$ μF, $R_1=15$, $R_2=23$, $R_3=1.2$ 。轴管式分流器的阻值为 0.036 43; 无感电阻分压器的刻度因素为 52.36。表 3 为实际测量的波形参数同标准参数的对比。

表 3 实测波形参数与标准参数的对比

参 数	标准参数	实测参数	偏差 / %	
开路电压	U_{oc} / kV	-	18.52	-
	T_{U1} / μs	1.2	1.15	-4.1
	T_{U2} / μs	50.0	49.60	-0.8
短路电流	i_m / kA	-	8.81	-
	T_{i1} / μs	8.0	8.20	2.5
	T_{i2} / μs	20.0	19.60	-2.0
	(i_{m2}/i_{m1}) / %	<20	11.00	-
虚拟阻抗	Z /	2.0	2.10	5.0

实际测量结果,开路电压波波前时间为 1.15 μs, 波尾时间为 49.6 μs, 同标准参数相比偏差不超过 5%; 短路电流波波前时间为 8.2 μs, 波尾时间为 19.6 μs, 同标准参数相比偏差不超过 3%, 虚拟阻抗 Z 为 2.1, 同标准参数相比偏差为 5%。

4 结语

在进行 CWG 电路设计中,证明用理论计算的方法得出的电路参数,经过电路仿真和实际电路测试是正确的。在理论计算结果的基础上设计出的 CWG, 各项参数指标均能达到 IEC 及其他相关标准要求。在实际应用中,可以根据理论计算的结果作为选取 CWG 电路参数的依据。

参考文献:

- [1] Ermeler K, Pfeiffer W, Schoen D, et al. Surge Immunity of Electronic Equipment [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2000, 16(2): 12-16. (下转第 351 页)

电压最低^[10]。

GIS中的开关动作引起的VFTO及FTC, 会引发频率高达几百MHz的TEM, TEM通过传导和耦合的方式与控制电缆回路相互作用。高频的TEM会通过GIS的不连续点在电缆的外皮上感应出电流, 此电流会在电缆的中心导体上耦合产生感应电压。此类耦合属于感性耦合。计算分析表明: TEM的径向和轴向分量、电缆段的长度以及电缆的对地高度都会对上述感应电流和电压起决定作用。每个GIS变电站的开关动作都会产生复杂的电磁环境, 其波形、幅值和频率随电压等级、动作开关类型、开关的开合速度、母线电气特性等不同而相异。还发现: DS动作引起的电缆出线上的VFTO幅值高低变化远比CB动作引起的幅值变化明显^[11]。

文[12]中国外某学者就GIS中TEM在单端和双端接地的电缆段上引起的感应电流和电压进行了模拟计算, 计算中将控制电缆模拟为具有一定波阻抗的传输线。并且假定: 不计电缆外皮和中心导体上的感应电流和电压的衰减; 特定频率段内的电磁场的径向、轴向分量为常数; TEM主要频率范围为0.5~200MHz。从计算所得的结果中不难发现: 在非衰减的GIS暂态电磁环境中, 频率是决定电缆金属外皮上感应电流和导线上感应电压大小的主要因素; 一定长度的电缆线, 电场径向分量引起的感应电流小于轴向分量引起的感应电流。更为有趣的是, 通过分析控制电缆的径向场的波形可看出, 有一数值大约为50MHz的临界频率 f_c (f_c 与电缆对地高度无关)存在, 当TEM的频率 $f < f_c$ 时, 电缆单端接地时的感应电流较双端接地时小; 而当 $f > f_c$ 时, 电缆双端接地时的感应电流较小。在轴向场的分析中也能观察到相似的情况。电缆导体上的感应电压也存在类似的临界频率和特点, 变化情况相同。研究还发现随着电缆长度的增加, 电缆双端接地的保护作用不再突出。

TEM的主要频率高达百MHz, 这在很大程度上依赖于GIS的系统结构, 其中, 电缆的接地类型对控制电缆输出端的感应电压起很大的作用, 而电缆接地类型的选择却受电缆高度和长度的制约。

3 结语

(1) GIS中开关的频繁操作会引起频率高达数

百MHz的VFTO和FTC。众多研究试验表明: 由于VFTO幅值不高, 变压器的主绝缘可以耐受VFTO, 但其几十兆至几百MHz的高频、特高频分量会对变压器的匝间绝缘造成严重威胁, 此类事故在国内已不罕见。

(2) 通过分析国外某学者就GIS电缆出线上由于TEM产生的感应电压、感应电流的模拟计算结果, 发现: 感应电压和感应电流的径向场和轴向场分量都有一临界频率 f_c 存在。当TEM的频率 $f < f_c$ 时, 电缆单端接地时的感应电流较双端接地时小; 而当 $f > f_c$ 时, 电缆双端接地时的感应电流较小。对此问题, 目前还没有合理的解释, 有待于进一步的研究论证。

参考文献:

- [1] 陈水明, 许菁. 特快速暂态过电压及其对主变的影响[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005, 45(4): 573-576.
- [2] 史保壮, 李智敏. 超高压GIS中快速暂态过电压造成危害的原因分析[J]. 电网技术, 1998, 22(1): 1-3.
- [3] 何善庆. GIS中的快速暂态现象[J]. 高压电器, 1995, 31(2): 41-44.
- [4] Mohana Rao M, Joy M. Frequency Spectrum Analysis of Fast Transient Current (FTC) Due to Switching Operations in 245 kV GIS [C]// IEEE/PES Transmission and Distribution Conference, Asia-pacific. 2002.
- [5] Wiggins C M, Thomas D E. Transient Electromagnetic Interference in Substations[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1994, 9(4): 1869-1884.
- [6] 刘青. 750 kV GIS变电站中变压器的快速暂态过电压防护的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.
- [7] Shibuya Y, Fujita S. Analysis of Very Fast Transient Overvoltage in Transformer Winding [J]. IEE Proc-gener. Transm. Distrib., 1997, 144(5): 461-468.
- [8] Shibuya Y, Fujita S, Shimomura T. Effects of Very Fast Transient Overvoltages on Transformer [J]. IEE Proc. 1999, 146(4): 459-464.
- [9] Fujita S, Hosokawa N. Experimental Investigation of High Frequency Voltage Oscillation in Transformer Windings [J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 1998, 13(4): 1201-1207.
- [10] 陈良金. 750 kV 变电站雷电侵入波过电压的研究 [D]. 西安: 西安交通大学, 2005.
- [11] Vinod Kumar V, Joy Thomas M. Influence of Switching Conditions on the VFTO Magnitudes in a GIS[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2001, 16(4): 539-544.
- [12] Mohana Rao M, Joy Thomas M, Singh B P. Induced Voltage on Control Cables in a GIS Due to Transient EM Fields Generated During Switching Events [C]// Proceedings of INCEMIC. 2001-2002.

(上接第345页)

- [2] Grimes Chris. EMC Testing: Options for Manufacturers [J]. Engineering Technology, 2005, 8(6): 44-46
- [3] IEC 61000-4-5. Electromagnetic Compatibility (EMC) Testing and Measurement Techniques. Surge immunity test [S]. 1995.
- [4] GB 18802-1. 接入低压配电系统的电涌保护器. 第1部分: 性

- 能要求与试验方法[S].
- [5] GB/T 17626.5-1999. 电磁兼容试验和测量技术.浪涌(冲击)抗扰度试验[S].
- [6] 梁曦东, 陈昌渔, 周远翔. 高电压工程 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2003.