

非标准雷电冲击电压模拟技术研究

孙鹏宇¹ 江渝¹ 张晨萌² 谢施君² 王鑫¹ 王涛¹

(1. 输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学) 重庆 400044;

2. 国网四川省电力公司电力科学研究院 四川 成都 610041)

摘要: 变电站内实际遭受的雷电冲击电压与在高压设备试验中所用的标准雷电冲击电压存在很大差异。为探讨变电站内设备实际可以承受的非标准雷电冲击电压与标准雷电冲击电压(1.2/50 μs)的差异,设计了一种可以产生模拟非标准雷电暂态电压波形的电路,可对电路元件参数进行调节,研究电路中不同的元件参数对产生的非标准雷电冲击电压波形的影响。非标准雷电冲击电压波形大多是振荡型冲击电压波形,通过 Matlab Simulink 进行电路仿真,依据仿真设计出能够产生非标准振荡型冲击电压波形的电路。研究表明,仿真电路产生的电压波形与实际电路测量得到的冲击电压波形相比较基本一致。该研究为进一步探讨非标准雷电振荡型冲击电压对电介质击穿特性的试验奠定了基础。

关键词: 雷电侵入波; 非标准雷电电压; Simulink; 振荡型冲击电压; 电路设计

中图分类号: TM935 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2019)04-0024-04

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2019.04.006

Research on Simulation Technology for Non-standard Lightning Impulse Voltage

Sun Pengyu¹, Jiang Yu¹, Zhang Chenmeng², Xie Shijun², Wang Xin¹, Wang Tao¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China;

2. State Grid Sichuan Electric Power Research Institute, Chengdu 610041, Sichuan, China)

Abstract: The actual lightning impulse voltage suffered in substations is far from the standard lightning impulse voltage used in high-voltage equipment test. In order to discuss the difference between non-standard lightning impulse voltage and standard lightning impulse voltage (1.2/50 μs) actually tolerated by substation equipment, a circuit which can generate non-standard lightning voltage waveform is designed, the circuit component parameters are adjusted, and the influence of different component parameters on non-standard lightning impulse voltage waveform is studied. Most of non-standard lightning impulse voltage waveform are oscillating impulse voltage waveform, the circuit simulation is carried out with Matlab Simulink, and the circuit which can generate non-standard oscillating impulse voltage waveform is designed according to the simulation. The results show that the voltage waveform generated by the simulation circuit is basically consistent with the impulse voltage waveform measured by the actual circuit. This research lays a foundation for further exploring the dielectric breakdown characteristics of non-standard lightning impulse voltage.

Key words: lightning intruding surge; non-standard lightning voltage; Simulink; oscillating impulse voltage; circuit design

0 引言

电力设备特别是电压等级比较高的电力设备绝缘设计主要依据 1.2/50 μs 的标准雷电冲击(standard lightning impulse waveform, SLIW) 耐受电压^[1-4]。

然而,由于变电站内进线段衰减、折反射及绕组谐振等因素,变电站现场遭受的大多为非标准雷电冲击电压(non-standard lightning impulse waveform, NSLIW),其波前时间可能在百纳秒到数十微秒范围内变动,还会叠加频率为几百到几兆赫兹较高幅值的振荡^[5-9]。这与现行标准规定的 1.2/50 μs 标准

雷电冲击电压波形存在较大差异^[10-15],不利于高压电气设备的合理绝缘设计和绝缘考核^[16-20]。

多年来,重庆大学、华北电力大学等高校进行了大量的站内侵入冲击电压波形的在线监测研究,并得到了大量的雷电侵入冲击电压波形数据,取得显著进展。研究学者对多年的雷电侵入冲击电压波形数据进行了统计分析,进一步得到了变电站内雷电侵入冲击电压波形的典型特征,分析显示采集所得的雷电波形均呈现为振荡的衰减或上升的冲击电压波形^[21]。因此有必要设计出一种可以产生非标准雷电冲击电压的发生装置,对高压电气设备进行绝缘测试。

针对上述问题和需求,首先通过 Matlab Simulink 搭建电路仿真模型,通过运用电路理论等相关知识对仿真电路进行逻辑推导,进一步得出所设计电路产生的非标准雷电冲击电压的近似解析表达式,并在试验室条件下设计出能够产生非标准雷电冲击电压波形的装置。

1 非标准雷电冲击电压发生回路

所设计的非标准雷电冲击电压发生器的原理如图1所示。图1中: C 为冲击电压发生器等值电容; g_1 为冲击电压发生器等值放电球隙; R_1 、 R_2 分别为标准冲击电压发生器的波尾、波前电阻; L 为电路中线路及电阻电感(外接电感或线路杂散电感); R_3 、 R_4 为电路中线路的阻尼电阻; R_d 为波尾调节电阻,用于调节非标准冲击电压发生器的波尾时间 T_1 。当球隙 g_1 击穿时,发生器将标准的冲击电压施加到 C_s 上,使其充电,当 C_s 上的电压达到一定值时,击穿球隙 g_2 ,这时发生器将产生非标准雷电冲击电压并施加到测量试品两端。

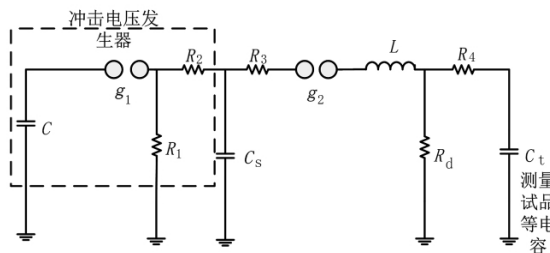


图1 非标准雷电冲击电压发生器原理图

由于非标准雷电冲击电压发生器电路中,阻尼电阻 R_3 、 R_4 相对于电路中其他电阻来说相对较小,这里为了方便计算忽略不计,当 g_1 、 g_2 球隙闭合时简化

的等效电路如图2所示。

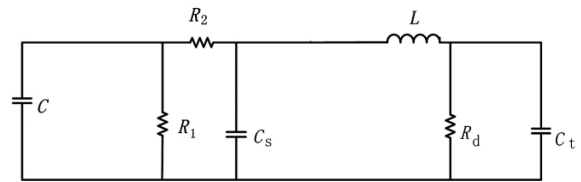


图2 非标准雷电冲击电压发生器等效回路

由图2可知非标准雷电冲击电压发生器等效回路是带有电感、电容、电阻的多阶回路,且电容 C 带有一定的初始电压值 $U_c(0_-)$,所以在这里用拉普拉斯变换来求解试品电容两端的电压 U 。非标准雷电冲击电压发生器等效回路的拉普拉斯运算电路如图3所示。

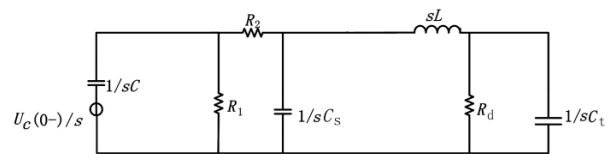


图3 发生器拉普拉斯运算电路

通过电路运算可求出:

$$U(s) = \frac{U_c(0_-)R_1R_d s C C_s}{[sCR_1 + sC_s(R_1 + R_2) + 1][(s^2L C_s + 1)(sC_tR_d + 1) + sC_sR_d]} \quad (1)$$

展开得:

$$U(s) = \frac{U_c(0_-)R_1R_d s C C_s}{\{[sCR_1 + C_s(R_1 + R_2)]s + 1\} [C_tR_dL C_s s^3 + L C_s s^2 + (C_tR_d + C_sR_d)s + 1]} \quad (2)$$

为方便计算,令 $a = U_c(0_-)R_1R_d C C_s$, $b = CR_1 + C_s(R_1 + R_2)$, $d = C_tR_dL C_s$, $e = L C_s$, $f = C_tR_d + C_sR_d$, 近似可得:

$$U(s) = \frac{a}{(bs + 1)(ds^2 + es + f)} \quad (3)$$

对式(3)进行分式拆分化简,得到有利于拉普拉斯反变换的式子为

$$U(s) = \frac{A}{s + \frac{1}{b}} + \frac{B \sqrt{\frac{4df - e^2}{4d^2}}}{(s + \frac{e}{2d})^2 + \frac{4df - e^2}{4d^2}} \quad (4)$$

式中 A 、 B 为由 a 、 b 、 d 、 e 、 f 构成的量。式(4)经拉普拉斯反变换后得:

$$U(t) = Ae^{-\frac{t}{b}} \varepsilon(t) + Be^{-\frac{e}{2d}t} \sin\left(\sqrt{\frac{4df - e^2}{4d^2}}t\right) \varepsilon(t) \quad (5)$$

由式(5)可知,所设计的非标准雷电冲击电压发生器产生的电压波形由一个负指数波形加一个振荡的正弦波形组成,波形满足非标准雷电冲击波的要求。

2 Matlab Simulink 仿真

根据非标准雷电冲击电压发生器等效回路构建发生器仿真模型,如图4所示。

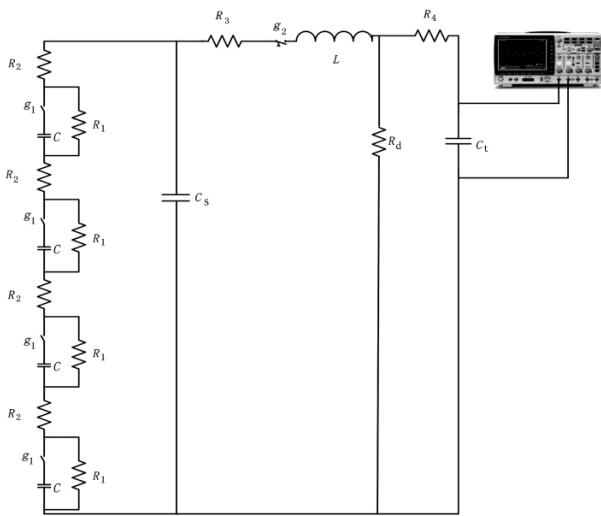


图4 发生器仿真模型

图4中,由4组电容C串联构成了四级标准的冲击电压发生器。假设电容C带有一定的初始电压 $U_c(0_-)$,开关 g_1 在0.01s时闭合,根据电路的有关计算设计出各元件参数,仿真出a、b两种波形。在a波形中设置 g_2 在0.01005s时闭合,a波形元件具体参数如表1所示。

在表1中,设置充电电容C的初始电压为40kV,四级串联的总充电电压为160kV,由于实际电路中电感与导线中存在电阻,这里设置电路中的阻尼电阻 R_3 、 R_4 分别为20Ω和10Ω。利用Matlab Simulink进行

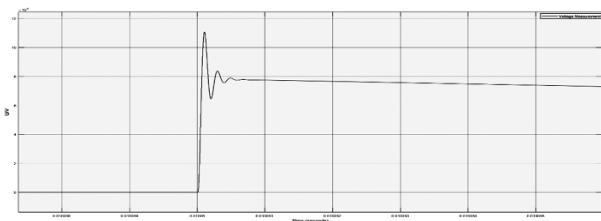


图5 冲击电压发生器振荡波形a

表1 a波形参数取值

| 元件 | $C_1/\mu\text{F}$ | R_1/Ω | R_2/Ω | R_3/Ω | R_4/Ω | R_d/Ω | C_s/pF | C_1/pF | $L/\mu\text{H}$ |
|----|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 参数 | 1 | 70 | 300 | 20 | 10 | 20 | 5070 | 390 | 2.2 |

表2 b波形参数取值

| 元件 | $C_1/\mu\text{F}$ | R_1/Ω | R_2/Ω | R_3/Ω | R_4/Ω | $R_d/\text{k}\Omega$ | C_s/pF | C_1/pF | $L/\mu\text{H}$ |
|----|-------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| 参数 | 1 | 70 | 300 | 20 | 10 | 20 | 425 | 390 | 2.2 |

仿真,在试验电容 C_1 两端得到的a波形如图5所示。

由图5可知:冲击电压发生器产生的波形在波峰处产生了下降的高频振荡,尽管由于电感电阻与线路中阻尼电阻的影响,振荡持续5个周期,但仍然符合非标准雷电冲击波的范围。

接下来改变电容 C_s 的值,其他元件参数保持不变,仿真出b波形,并在b波形中设置 g_2 在0.01001s时闭合。b波形元件的具体参数如表2所示,在试验电容 C_1 两端得到的波形如图6所示。

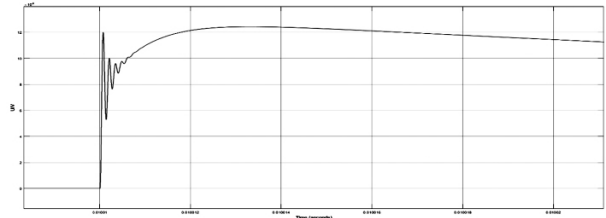


图6 冲击电压发生器振荡波形b

由图6可知:所设计的非标准雷电冲击电压发生器产生了在波峰附近出现高频振荡的波形,满足非标准雷电冲击波的要求,达到了预期的结果。



图7 非标准冲击电压发生器

3 实际设计电路运行结果

根据Matlab Simulink仿真电路设计出实际的非标准雷电冲击电压发生器,如图7所示。实际非标准雷电冲击电压发生器装置由四级标准冲击电压发生装置、外接设计电路、分压器测试装置构成。由于自然界中侵入变电站的雷电波多数呈负极性,这里设计发生器产生的电压也为负极性,其中主电容C

为 $1 \mu\text{s}$, 每级电容充电 40 kV 。

参照仿真电路 a 模型设计发生器其他元件参数, 调波电感 $L = 2.2 \mu\text{s}$, 波尾电阻 $R_d = 20 \text{ k}\Omega$, 测量实际发生器产生的非标准雷电冲击电压波形如图 8 所示。实测波前时间 T_1 为 $0.21 \mu\text{s}$, 波尾时间为 $55.1 \mu\text{s}$, 波峰值为 118.8 kV , 误差为 19.32% , 与仿真 a 波形结果相似, 符合非标准雷电冲击波的定义。

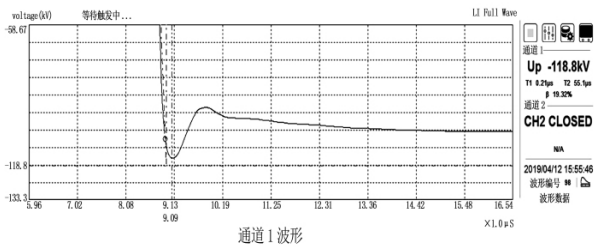


图 8 实际发生器产生的 a 波形

同样参照仿真电路 b 模型设计发生器其他元件参数, 设置电容 $C_s = 425 \text{ pF}$, 波尾电阻 $R_d = 20 \text{ k}\Omega$, 实际发生器产生的非标准雷电冲击电压波形如图 9 所示。实测波前时间 T_1 为 $12.50 \mu\text{s}$, 波尾时间为 $74.2 \mu\text{s}$, 波峰值为 107.0 kV , 误差为 12.64% , 与仿真 b 波形结果也相似, 符合非标准雷电冲击波的定义。

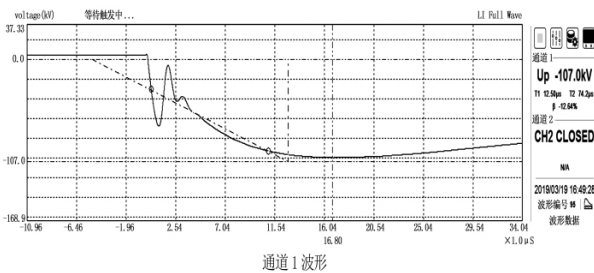


图 9 实际发生器产生的 b 波形

4 结 语

前面通过计算非标准雷电冲击电压回路的简化运算, 得到了试品电容两端电压与电路中元件的关系, 并据此构建了冲击电压发生装置。

通过对比仿真模型与实际电路的波形, 验证了实际得到的波形与仿真所得到的波形相似, 且与统计得到的非标准雷电波形一致, 进一步证实了设计的实际电路可以模拟产生变电站内侵入的非标准雷电波, 为接下来测量非标准雷电冲击电压对电介质击穿特性打下了基础。

参考文献

- [1] K. Nakanishi, S. Fujita, H. Kurita, et al. High Frequency Voltage Oscillation in Transformer Windings and Electrical Breakdowns Properties of Interturn Insulation Immersed in oil at VFT Voltage [C]// IEEE 1997 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Minneapolis, MN, USA, 1997: 490-493.
- [2] 张璐, 张乔根, 刘石, 等. 特快速瞬态过电压和雷电冲击作用下特高压 GIS 绝缘特性 [J]. 高电压技术, 2012, 38(2): 335-341.
- [3] 严璋, 朱德恒. 高电压绝缘技术(第二版) [M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [4] 谢施君, 曾嵘, 李建明, 等. 变电站雷电侵入过电压波形特征及其影响因素的仿真 [J]. 高电压技术, 2016, 42(5): 1556-1564.
- [5] 王喆, 张乔根, 王同磊, 等. 非标准雷电冲击电压下油纸绝缘击穿特性 [J]. 高电压技术, 2014, 40(9): 2931-2937.
- [6] Cox J H, Beck E. Lightning on Transmission Lines [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1930, 49(3): 857-865.
- [7] Norinder H. The Cathode Oscillograph as Used in the Study of Lightning and Other Surges on Transmission Lines [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1928, 47(2): 446-455.
- [8] Lewis W W, Foust C M. Lightning Investigation on Transmission Lines [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1930, 49(3): 917-928.
- [9] Lewis W W, Foust C M. Lightning Investigation on Transmission Lines - IV [J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers, 1934, 53(8): 1180-1186.
- [10] Gallet G, Leroy G, Lacey R, et al. General Expression for Positive Switching Impulse Strength Valid up to Extra Long Air Gaps [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1975, 94(6): 1989-1993.
- [11] Pignini A, Rizzi G, Garbagnati E, et al. Performance of Large Air Gaps under Lightning Overvoltages: Experimental Study and Analysis of Accuracy Predetermination Methods [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1379-1392.
- [12] Aleksandrov G N, Podporokyn G V. Analysis of Experimental Data on the Electric Strength of Long Air Gaps [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(2): 597-605.
- [13] Paris L, Cortina R. Switching and Lightning Impulse Discharge Characteristics of Large Air Gaps and Long Insulator Strings [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1968, 87(4): 947-957.

(下转第 53 页)



图 11 模拟测试和现场测试

5 结 语

从成功的场景应用示例,证明通过对视频监控数据的清洗、分析和基于卷积神经网络的特征提取、模型训练、检测等,实现视频监控系统的预警功能是技术可行、效果显著、前景广阔的。安全是企业发展的根本,对于电网而言,严控各类违章行为,杜绝事故发生是各级工作人员的首要职责。利用计算机技术保障人身、电网、设备的安全,提升优质服务水平是未来的发展方向,也是智能电网建设的重要组成部分。上述场景应用大数据对安全帽进行了成功检测,建议从技术和应用两方面进行更深入的研究:

- 1) 通过增加训练样本、优化训练模型,提升违章预警的准确度;
- 2) 通过扩展卷积神经网络学习规则,以实现智能预警功能场景扩充;
- 3) 研究成果可应用到更丰富的电力安全生产、经营服务等场景,有效提升电力生产安全管控能力和优质服务水平。

参考文献

[1] 肖东晖,林立. 电力系统统一视频监控平台解决方案[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(5): 74-79.

[2] 叶雄杰. 基于云存储的移动视频监控系统研究[D]. 广州: 广东工业大学, 2011.

[3] 许可. 卷积神经网络在图像识别上的应用的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2012.

[4] 吕敬钦. 视频行人检测及跟踪的关键技术研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2013.

[5] 宫世杰,王薇,郭乔进. 视频监控系统发展现状与趋势[J]. 科技技术创新, 2018(29): 81-82.

[6] 叶芳芳. 监控视频中异常行为检测研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.

[7] 李瑞峰,王亮亮,王珂. 人体动作行为识别研究综述[J]. 模式识别与人工智能, 2014, 27(1): 35-48.

作者简介:

邓平(1973), 工程硕士, 高级工程师, 主要研究方向为电力信息化、电力通信网运维技术与管;

郑鸿(1987), 硕士, 工程师, 主要研究方向为网络运行与信息安全技术;

罗冰峰(1988), 硕士, 工程师, 主要研究方向为通信电路、HDL、图像识别;

李明(1990), 硕士, 助理工程师, 主要研究方向为通信设备技术、物联网技术。(收稿日期: 2019-05-29)

(上接第 27 页)

[14] Udo T. Switching Surge and Impulse Sparkover Characteristics of Large Gap Spacings and Long Insulator Strings[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1965, 84(4): 304-309.

[15] Watanabe Y. Switching Surge Flashover Characteristics of Extremely Long Air Gaps[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, 86(8): 933-936.

[16] 杜林,刘伟明,王有元,等. 基于 CPLD 的电网过电压变频数据采集卡设计[J]. 高电压技术, 2008, 34(8): 1589-1593.

[17] 兰海涛. 高压电网过电压在线监测系统设计与实现研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2006.

[18] 兰海涛,司马文霞,姚陈果,等. 高压电网过电压在线

监测数据采集方法研究[J]. 高电压技术, 2007, 33(3): 79-82.

[19] 姚陈果,孙才新,米彦,等. 配电网过电压在线监测系统的设计与实现[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(9): 74-76.

[20] 平丽英. 变电站瞬时过电压在线监测系统的研制[D]. 北京: 华北电力大学, 2001.

[21] 吴婧瑜. 不同冲击电压波形作用下油纸绝缘的累积效应特性研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2016.

作者简介:

孙鹏宇(1994), 硕士, 研究方向为非标准雷电冲击电压的模拟技术;

江渝(1964), 教授, 工学博士, 主要研究方向为电力电子在系统中的应用。(收稿日期: 2019-05-08)