

The Simulation Experiment of Induction Lightning Overvoltage on the Distribution Line

Yu Liu¹, Zhanqing Yu², Ying Huang³, Zezhong Wang², Shaoan Wang², Rong Zeng², Guojun Lu¹, Jun Xiong¹

¹The Electric Power Test Research Institute of Guangzhou Power Supply Bureau, Guangzhou

²State Key Laboratory of Power System, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing

³College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang

Email: yzq@tsinghua.edu.cn

Received: Nov. 26th, 2013; revised: Nov. 27th, 2013; accepted: Dec. 5th, 2013

Copyright © 2013 Yu Liu et al. This is an open access article distributed under the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited. In accordance of the Creative Commons Attribution License all Copyrights © 2013 are reserved for Hans and the owner of the intellectual property Yu Liu et al. All Copyright © 2013 are guarded by law and by Hans as a guardian.

Abstract: The insulation level of 10 kV power distribution line is low, which is vulnerable to the direct lightning and induction lightning. Lightning is one of the important reasons for the accident of distribution network. In order to reduce lightning accidents and improve the power supply reliability of distribution network, it's important in theoretic and engineering to run the simulation and real-model experiment of induction lightning overvoltage on the distribution line, which is able to get real lightning data to provide a basis for the simulation of lightning overvoltage. In this paper, the basic idea of the simulation experiment is introduced first. Then, a rational experiment plan is designed according to our aim. Finally, the result of our experiment and simulation is compared, which can confirm the validity of the experiment.

Keywords: The Lightning Protection of Distribution Network; Induction Lightning Overvoltage; Simulation Experiment; Simulating Calculation

配电线路雷电感应过电压模拟实验研究

刘宇¹, 余占清², 黄颖³, 王泽众², 王绍安², 曾嵘², 陆国俊¹, 熊俊¹

¹广州供电局有限公司电力试验研究院, 广州

²清华大学电机系电力系统国家重点实验室, 北京

³三峡大学电气与新能源学院, 宜昌

Email: yzq@tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2013年11月26日; 修回日期: 2013年11月27日; 录用日期: 2013年12月5日

摘要: 10 kV 配电线路绝缘水平低, 易受直击雷和感应雷的危害, 雷击是造成配网事故的重要原因之一。为了减少雷害事故的发生, 提高配电网的供电可靠性, 开展配电线路雷电感应过电压模拟实验及真型实验研究可以获得真实雷电数据, 并且为雷电过电压仿真计算提供依据, 因此具有重要的工程意义和实用价值。本文首先介绍了雷电感应过电压模拟实验的基本思路, 然后根据相应的实验目的合理设计了实验方案, 最后将模拟实验结果与仿真计算结果进行了对比分析, 从而证实了模拟实验的有效性。

关键词: 配网防雷; 雷电感应过电压; 模拟实验; 仿真计算

1. 引言

雷击是造成配电线路故障的主要原因之一, 在雷

电活动剧烈的地区更是如此^[1,2]。根据雷电作用的原理, 雷电产生过电压导致闪络的途径主要有两种: 雷

电直击配电线路产生过电压和雷击架空线路附近地面引起的雷电感应过电压^[3]。即使配网输电线路的绝缘水平、导线间距和接地均达到较优情况,但直击雷击均较易引起无任何雷电过电压保护的输电线路绝缘闪络。然而在城区,由于建筑物及树木等的屏蔽作用,一般很少发生直击雷事故,引起城区配电线路故障的主要原因是雷电感应过电压。不管是直击雷还是雷电感应过电压,均对配网输变电的设备的安全稳定运行造成严重的威胁,严重影响供电可靠性,带来不良社会后果^[4]。

雷电感应过电压试验研究一般分为模拟实验和真型实验研究两种,雷电感应过电压模拟实验是对于真型实验的模拟重现,它相对容易开展实施,也容易对于各种参变量进行控制,开展规律性的研究,这是模拟实验的优势所在,但同时它的尺寸较小,各方面对于真实情况的重现也肯定存在程度不一的失真,从而导致最终结果的失真;真型实验不存在试验结果失真的问题,但开展起来相对困难,受气候、试验设备等各方面的影响较大,可控性较差,同时花费也要高于模拟实验。由此可见,二者各有其优缺点,因此需要根据实际情况选用合适的实验类型。

本文首先介绍了雷电感应过电压模拟实验的基本思路,然后根据相应的实验目的合理设计了实验方案,最后将模拟实验结果与仿真计算结果进行了对比分析,从而证实了模拟实验的有效性。最终希望通过此项工作对广州电网的真实雷电参数有一定的认识,从而有针对性、有差异性的改善和调整现有防雷措施,起到实际指导电网生产运行的作用。

2. 模拟实验基本思路

在不同的文献中,雷电感应过电压模拟实验的实验方案往往大相径庭,参数选择的差别也比较大^[5,6],这是因为在模拟实验方案设计时,很难面面俱到,使得各方面的失真同时做到最小,不同文献的侧重点不同,选择的实验方案自然也就不同。无法使得雷电感应过电压模拟实验各方面的失真同时做到最小,一方面是在技术条件上难以实现,提高一部分内容的仿真程度往往是以牺牲另一部分内容的仿真程度为代价;另一方面,这样做往往会提高实验的代价,使模拟实验失去原本具有的开展方便、代价低廉的优点。

因此雷电感应过电压模拟实验是否成功,很关键的一点在于能否理清模拟实验的基本思路,明确实验目的,并据此设计合理的实验方案,选择恰当的参数,使得在实际条件允许的情形下,重点关注对象的失真程度尽可能的小,同时又能够保持模拟实验开展方便、代价低廉的特点。

对于实际运行中的配电线路,和供电可靠性直接相关的是线路的跳闸率,而雷电感应过电压引起的线路跳闸主要和线路的耐雷水平以及当地的雷电活动情况有关,其中线路的耐雷水平又主要取决于线路感应过电压开始阶段的波形,因此在模拟实验中,希望测量得到的感应过电压波形在开始阶段尽可能的真实。

雷电感应过电压模拟实验中的缩小比例是一个比较关键的参数,由于雷电在电路上感应产生过电压本身是一个非线性系统,缩比取的太小,会导致实验结果失真程度太大,从而失去参考的价值;反过来如果取的过大,则会大大增加实验的成本与开展难度,失去模拟实验原有的灵活性^[7]。

长度的缩比 S_a 主要取决于实验场地的大小,由于很难改变电磁场在空间传播的速度,所以速度的缩比为1,从而时间的缩比就是 S_a ,进一步的,线路电容、电感的缩比也为 S_a ,从而电阻的缩比为1。电流幅值的缩比 S_i 则独立于长度的缩比,主要取决于实验采用的电源功率。

实际发生雷击时,雷电流的通道很长,即使乘以长度的缩比 S_a 以后也非实际的实验条件所能够接受,对于一条较短的模拟雷电流通道,开始阶段和实际情形吻合的较好,一旦电流到达通道顶端,发生反射,之后的发展过程失真度就比较大了^[8],好在本次实验侧重关注实验的开始阶段,但至少还是需要满足电流发展到通道顶部所需的时间大于电流波形上升到峰值的时间。此外还应该保证电流在模拟通道中发展的速度和在实际通道里发展的速度基本一致,以及模拟雷电流通道大致垂直于地面。

模拟架空线路的搭建就相对比较简单,只需要满足长度的缩比 S_a ,以及在两端连接相应的匹配阻抗就可以了。

3. 模拟实验实验方案设计

如图1所示为实验的整体方案,模拟线路两端连

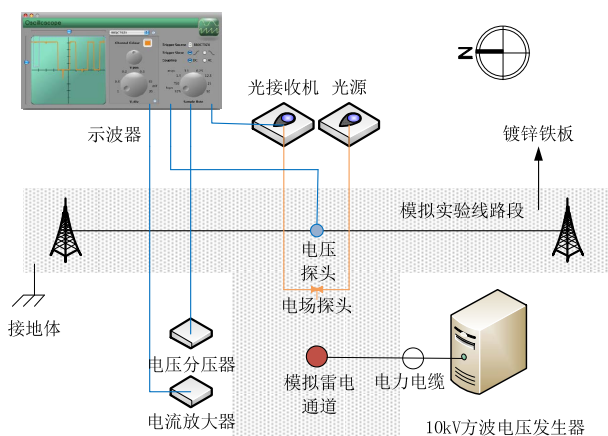


Figure 1. The total scheme of the experiment
图 1. 整体实验方案示意图

接阻值为 $620\ \Omega$ 的匹配阻抗, 下方铺设一片 $2\ \text{m} \times 15\ \text{m}$, 厚度为 $1\ \text{mm}$ 的镀锌铁板, 在模拟雷电流通道下方铺设一片 $3\ \text{m} \times 4\ \text{m}$, 厚度同样为 $1\ \text{mm}$ 的镀锌铁板作为理想大地的条件, 铁板通过铜编织带接地, 接地体由四根相距 $1\ \text{m}$, 深入土壤 $20\ \text{cm}$, 直径为 $1\ \text{cm}$ 的铁钎子互相连接而成, 具体如图 2 所示。

采用 $10\ \text{kV}$ 方波电压发生器^[9]作为实验用电源, 其基本原理如图 3 所示, $220\ \text{V}$ 的交流工频电压经过整流器整流以后变成直流高电压, 并对脉冲形成线进行充电, 当脉冲形成线上的电压幅值达到充有高压氮气的火花开关的闪络电压时, 形成高压方波, 并通过脉冲传输线传播出来, 它的实物照片如图 4 所示。当脉冲传输线末端连接模拟雷电流通道时, 形成的电流幅值大约为十几安培, 这时电流幅值缩比 S_i 的取值约为 $1/1000$ 。

$10\ \text{kV}$ 方波电压发生器产生的电流通过电力电缆传播到模拟雷电流通道上, 通道底部测量得到的电流信号通过一个 $10\ \text{A/V}$ 的电流放大器后接入示波器, 电流探头的照片如图 5(a)所示, 测量得到的电压信号通过一个变比为 $417:1$ 的分压器降压以后接入示波器, 分压器的照片如图 5(b)所示。

光源产生的光信号经过光纤传输, 经过一个电场探头^[10]把电场信号调制到光信号上, 并最终被光接收机接受, 接收机从光信号中解调出一个电压信号, 接入示波器, 电场探头如图 5(c)所示。模拟实验线路中点上感应产生的过电压直接使用一个电压探头进行测量, 电压探头的照片如图 5(d)所示。

实验地点设置在室内, 实验现场的照片如图 6 所



Figure 2. the grounding body device
图 2. 接地体实物图

示。模拟雷电流通道使用滑轮组吊起, 受到场地条件的制约, 长度的缩比 S_a 取 $1/20$, 模拟实验线路段长 $11\ \text{m}$, 距离地面 $0.5\ \text{m}$, 导线直径为 $0.5\ \text{mm}$, 对应一条长 $220\ \text{m}$, 距离地面 $10\ \text{m}$, 导线直径为 $1\ \text{cm}$ 的实际线路段, 模拟雷电流通道长 $6\ \text{m}$, 位于距离线路中心 $1.1\ \text{m}$ 处, 则对应实际长 $120\ \text{m}$, 距离线路中心 $22\ \text{m}$ 的雷电流通道, 电流从通道底部传播到顶部大约需要 $60\ \text{ns}$, 此后实验测量得到的结果将严重失真。由于把实验设在室内进行, 不会受到天气的影响, 实验的可操控性较强。

4. 模拟实验结果与仿真计算比较

4.1. 仿真计算理论

依据当代雷电感应过电压工程计算理论对非直击雷在电路上产生感应过电压的描述^[11,12], 首先雷电在云层和地面之间产生雷电通道, 发生回击过程时, 在通道中形成回击电流, 回击电流进一步在空间感应产生电磁场, 感应产生的电磁场最终耦合到线路上形成感应过电压。因此, 在仿真时需要雷电通道中的回击电流的分布、空间电磁场在时间和空间上的分布以及电磁场和线路的耦合关系加以准确建模。

文献[13]对以上三个模型进行详细论述, 分别采用 MTLE 雷电流回击模型、Cooray-Rubinstein 电磁场传播模型、Agrawal 场线耦合模型对线路中的雷电感应过电压仿真计算。

4.2. 实验结果分析

如第 2 小节所述, 测量得到的波形在 $60\ \text{ns}$ 以前较为真实, 电流探头测量得到的模拟雷电流通道底部的电流如图 7 所示。

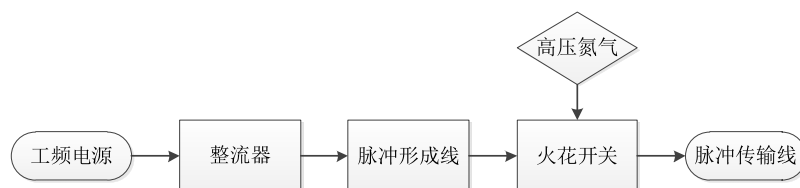


Figure 3. The fundamentals of the high pressure pulse generator
图 3. 方波电压发生器基本原理图



Figure 4. The high pressure pulse generator
图 4. 高压方波发生器实物图

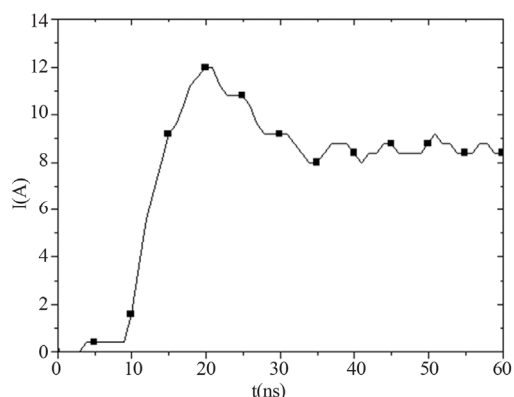


Figure 7. The current waveform at the channel base
图7. 通到底部的电流波形

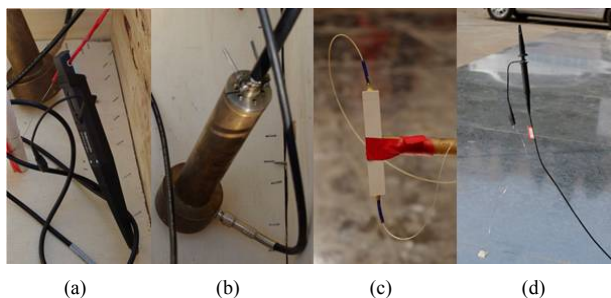


Figure 5. Measuring devices and their connections (a) Current probe; (b) Voltage divider; (c) Electric-field probe; (d) Voltage probe
图5. 测量设备及其连接方式 (a) 电流探头; (b) 分压器; (c) 电场探头; (d) 电压探头

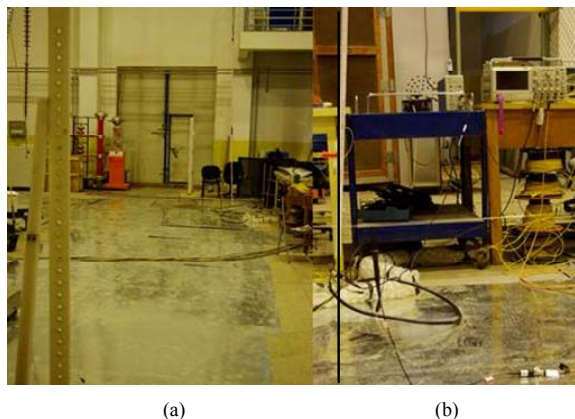


Figure 6. The experiment field (a) Side view; (b) Positive view
图 6. 实验现场照片 (a) 侧面; (b) 正面

运用文献[13]中的感应过电压计算方法，电流采用实际测量得到的电流波形，雷电流回击模型采用 MTLE 模型，其计算公式^[14]为：

$$I(z,t) = u\left(t - \frac{z}{v_f}\right) P(z) I\left(0, t - \frac{z}{v}\right) \quad (1)$$

式中： $u\left(t - \frac{z}{v_f}\right)$ 是 Heaviside 函数，当 $t > z/v_f$ 时 $u = 1$ ，否则 $u = 0$ ； $P(z) = \exp(-z/\lambda)$ 是雷电流通道的发展速度， v 是通道里电流的传播速度。

在本文中常数 λ 取 2000 m，认为雷电流通道的发展速度 $v_f = 1.3e^8$ m/s，雷电流通道长 6 m，模拟线路长 11 m，距离地面 0.5 m，和雷电流通道之间的距离为 1.1 m，认为此系统对于电流的幅值来说是线性的，将测量以及仿真计算得到的线路中点感应过电压都统一到电流峰值为 10 A 时的情形，结果如图 8 所示。

可以发现测量得到的电压峰值大约是计算得到的电压峰值的 3 倍，测量得到的电压波形达到峰值以后迅速下降并存在一个负向的峰值，计算得到的电压波形则缓缓的减小到零。

4.2.1. 电压与距离 d 的关系

当模拟实验线路距离地面的高度 h 保持 0.5 m 不变，模拟雷电流通道和模拟线路之间的距离 d 分别取

0.94 m、1.1 m、1.16 m、1.35 m，线路中点测量得到的电压，统一到电流峰值为 10 A 时的结果如图 9 所示。

可以发现当模拟线路和模拟雷电流通道之间的距离越近，电压波形的起始时间越早，电压的峰值也越大。测量以及仿真计算得到的电压峰值和距离 d 之间的关系如图 10 所示，在计算的过程中，为了保证其规律性，电流波形统一采用如图 7 所示的电流波形，同时为了方便观察，将计算得到的电压峰值统一放大到原来的 2.8 倍。可以发现计算以及测量得到的规律大致吻合，都随着距离 d 的增加而线性减小。

4.2.2. 电压与高度 h 的关系

类似于 3.1 中情况，当模拟线路和模拟雷电流通道之间的距离保持 1.16 m 不变，模拟线路距离地面的高度 h 分别取 0.34 m、0.4 m、0.46 m、0.5 m、0.6 m 时，线路中点测量得到的电压，统一到电流峰值为 10A 时的结果如图 11 所示，可见模拟线路距离地面越高

电压的峰值也越大。

测量以及计算得到的电压峰值和高度 h 之间的关系如图 12 所示，可以发现计算以及测量得到的规律大致吻合，都随着高度 h 的增加而线性增加。

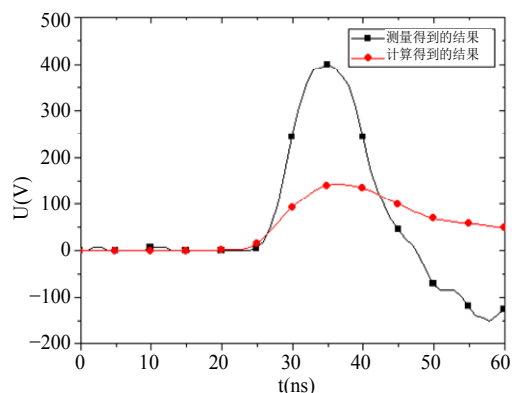


Figure 8. The overvoltage at the midpoint of the line
图8. 线路中点处的电压

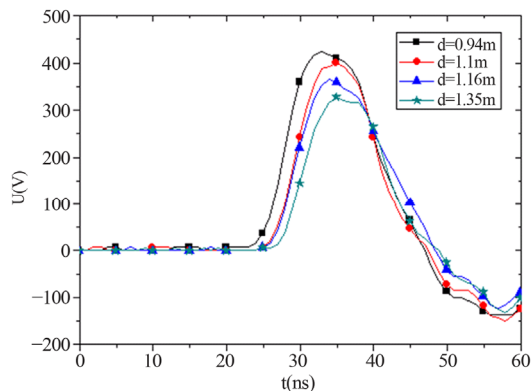


Figure 9. The relationship between induction overvoltage and the distance d
图9. 感应过电压和距离 d 的关系

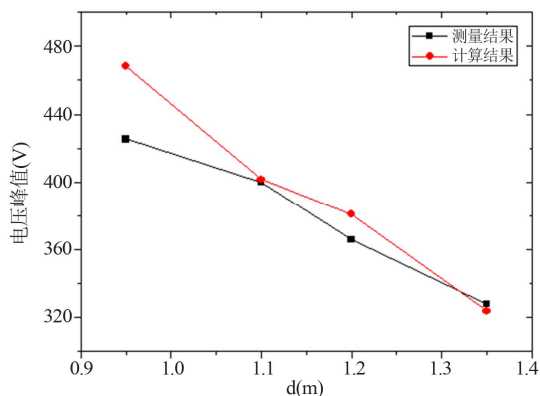


Figure 10. The relationship between the voltage spike and the distance d
图10. 电压峰值和距离 d 的关系

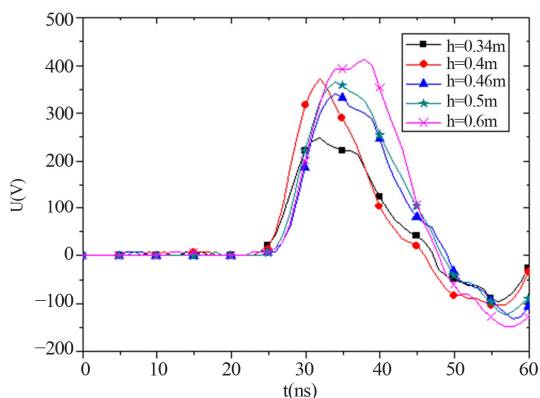


Figure 11. The relationship between induction overvoltage and the height h
图11. 感应过电压和高度 h 的关系

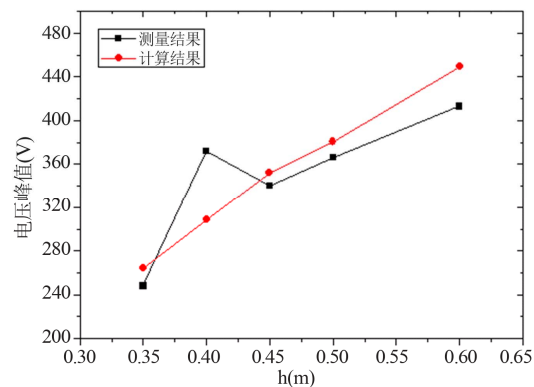


Figure 12. The relationship between induction overvoltage and the height h
图12. 电压峰值和高度 h 的关系

5. 结论

1) 雷电感应过电压模拟实验的实验方案设计差异性较大, 本次实验站在实际运行的角度, 重点关心线路的跳闸率, 因此希望测量得到的感应过电压波形在开始阶段尽可能的真实。

2) 基于以上实验思路与目的设计出的模拟实验方案, 在初始阶段 60 ns 内的波形较为真实, 此后实验测量得到的结果将严重失真, 满足了实验目的。

3) 将模拟实验测量得到的电压波形与仿真计算值进行了比较, 同时将测量得到的电压峰值随高度 h 以及距离 d 的变化规律和计算得到的结果进行了比较, 发现两者基本吻合, 电压峰值均随着高度 h 的增加而线性增加, 随着距离 d 的增加而线性减小。

6. 致谢

感谢清华大学电机系对此文工作所做出的贡献。

参考文献 (References)

- [1] 阮羚, 谷山强, 赵淳等 (2012) 鄂西三峡地区 220 kV 线路差异化防雷技术与策略. *高电压技术*, **1**, 157-166.
- [2] 王希, 李振, 彭向阳等 (2012) 耦合地线架设位置及根数对 500/220 kV 同塔 4 回线路防雷特性影响. *高电压技术*, **4**, 863-870.
- [3] 横山茂 (2008) 配电网雷害对策. 中国电力出版社, 北京, 15-17.
- [4] 莫芳红 (2009) 6~35kV 配电网防雷保护现状分析及改进措施. *机电信息*, **240**, 25-26.
- [5] Masaru, I., Koji, M. and Yasuji, H. (1999) Experimental study of lightning-induced voltage on an overhead wire over lossy ground. *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, **41**, 544-547.
- [6] Piantini, A., Janiszewski, J.M., Borghetti, A., Nucci, C.A. and Paolone, M. (2007) A scale model for the study of the LEMP response of complex power distribution networks. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **22**, 294-318.
- [7] Nucci, C.A. and Rachidi, F. (1999) Lightning induced overvoltage. *IEEE Transmission and Distribution Conference*, **4**, 1474-1478.
- [8] Yokoyama, S., Miyake, K. and Fukui, S. (1989) Advanced observations of lightning induced voltage on power distribution lines II. *IEEE Transactions on Power Engineering Review*, **9**, 1078-1087.
- [9] 毛志国, 邹晓兵, 刘锐, 刘骁, 何露芽, 王新新 (2007) 一种 10 kV 方波电压发生器. *高电压技术*, **10**, 41-44.
- [10] Zeng, R., Zhang, Y., Chen W.Y. and Zhang, B. (2008) Measurement of electric field distribution along composite insulators by integrated optical electric field sensor. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, **15**, 302-309.
- [11] Eriksson, A.J. and Meal, D.V. (1982) Lightning performance and overvoltage surge studies on a rural distribution line. *Generation, Transmission and Distribution*, **129**, 505-511.
- [12] De La Rosa, F., Valdivia, R., Perez, H. and Loza, J. (1988) Discussion about the inducing effects of lightning in an experimental power distribution line in Mexico. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **3**, 245-282.
- [13] 余占清, 曾嵘, 王绍安等. (2013) 配电网雷电感应过电压仿真计算分析. *高电压技术*, **2**, 415-422.
- [14] Rakov, V.A. (1997) Lightning electromagnetic fields: Modeling and measurements. *The 12th International Zurich Symposium on Electromagnetic Compatibility*, Zurich, 59-64.