

文章编号: 1001-1609(2006)06-0413-04

基于数值电磁场仿真计算的电力杆塔雷击浪涌响应研究

莫付江^{1,2}, 陈允平², 阮江军²

(1. 江苏大学电气信息学院, 江苏 镇江 212013; 2. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072)

Study on the Lightning Surge Response of Transmission Tower Based
the Numerical Electromagnetic Simulation

MO Fu-jiang^{1,2}, CHEN Yun-ping², RUAN Jiang-jun²

(1. College of Electrical Information, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China;
2. College of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

摘要: 在分析天线电磁场理论的基础上, 利用由该理论建立的数值电磁场仿真程序, 计算了电力输电线路杆塔浪涌响应, 并与传输线理论计算的浪涌响应进行了对比, 证明采用数值电磁场方法计算杆塔雷击浪涌响应是可行的, 可以用来计算雷击杆塔时架空线路上的感应过电压值。

关键词: 数值电磁场; 天线理论; 传输线理论; 电力杆塔; 浪涌响应; 波阻抗

中图分类号: TM75

文献标识码: A

Abstract: Based on the antenna theory, the numerical electromagnetic simulation program is set up in this paper, and the tower surge response is calculated. Comparing with transmission line theory, this method is proved feasible to analyze the surge response of power tower, and also usable in computing the induction voltage of overhead transmission lines.

Key words: numerical electromagnetic code; antenna theory; transmission line theory; transmission tower; lightning surge response; surge impedance

0 引言

雷电防护研究一直是电磁兼容和电力工程的一项非常重要的课题。尤其是随着电力系统控制、测量、保护设备的智能化及自动化程度的不断提高, 广泛应用的电子技术和计算机技术不可避免地降低了这些设备的抗干扰能力和防雷性能, 为电力系统可靠运行和安全管理带来潜在危险。因此, 明确雷击对一次、二次设备的影响程度及其应采取的相应防护措施, 是目前电力系统过电压防护和电力系统电磁兼容研究的主要课题。

已经研究出的雷击浪涌响应模型均是建立在实

验测量的雷电远区电磁场数据基础上^[1-3], 无论是广泛应用的工程方法, 或者是分布参数传输线模型, 甚至最初的电磁场计算方法, 都是仅考虑远区辐射电磁场与雷电流的关系。

但是, 在进行输电线路防雷性能计算时发现, 这种假设用在近雷击点是不能接受的。如利用传输线理论计算架空输电线路反击耐雷水平时, 这种假设会认为架空导线的雷击感应电压很低, 可以忽略^[4-6]。而实际上架空线的感应雷引起的过电压都很大, 雷击杆塔时不考虑导线感应过电压是没有说服力的。这个问题在实际过电压防护中也经常遇到, 从理论上分析, 对某些二次电力设备或电子设备采取的过电压防护措施是非常完善的, 可以保证在非常高的感应雷电流冲击下可靠地运行, 但实际运行中往往因雷击出现故障, 影响电力系统可靠运行, 却又找不到问题的症结所在^[1, 7-8]。

电力系统却与其它系统的雷电防护不同, 因为架空输电线路、输电线路杆塔、发电厂烟囱、变电站避雷针都具有引雷作用, 而相应的二次设备又大多处于100 m范围内。尤其在雷击杆塔时, 导线与雷击通道仅有几米到十几米的距离, 根据雷电流频谱分析及天线电磁场理论, 这些设备的雷电电磁场是近区场, 静电场是其主要成分, 辐射电磁场仅占很少一部分。

由无线电通信系统和电磁兼容理论建立的天线理论, 具有计算电流源产生的近区电磁场的功能。如果把雷击通道和雷击杆塔等效为载有电流的电流元, 且每个电流元的长度相比计算点距离为无穷小, 就可把雷击通道和杆塔等效成许多短天线, 通过所有电流元产生的电磁场的叠加, 即可求出雷击点附近任意点的电磁场。为了验证该理论方法计算雷击

收稿日期: 2006-02-16

作者简介: 莫付江(1964-), 男, 工程师, 博士研究生, 从事电力系统电磁兼容和电力系统过电压防护方面的研究工作。

杆塔浪涌响应的可行性, 在分析天线理论的基础上, 利用由该理论建立的数值电磁场程序, 计算了电力输电线路杆塔浪涌响应, 并与传输线理论计算的浪涌响应进行了对比, 结果证明采用该方法计算杆塔雷击浪涌响应是可行的, 可以对架空线路的感应电压进行分析。

1 雷击杆塔近区电磁场分析的基本原理

数值电磁场仿真程序是建立在天线理论基础之上的, 见图 1。

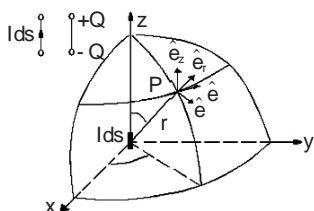


图 1 天线理论电磁场计算示意图

图 1 为最简单的辐射天线, 它为一种线元矢量 \vec{ds} 上有正弦电流的结构。假设正弦电流 $I(t) = \text{Re}[Ie^{j\omega t}]$, 其中 I 为一实数, ω 为角频率。根据电流连续性方程, \vec{ds} 两端将出现一对等值异性正弦电荷 $Q(t) = \text{Re}[Qe^{j\omega t}]$, 其中 $Q=I/j$ 。

可推出任意点 P 上的磁感应强度矢量 \vec{B} 为:

$$\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A} = -\hat{e}_\theta \frac{\mu_0}{4} Ids \sin \left[\frac{1}{j r} + \frac{1}{(j r)^2} \right] e^{j \omega t} \quad (1)$$

电场强度可以由麦克斯韦第一方程求出:

$$\vec{E} = \frac{\vec{\nabla} \times \vec{B}}{j \omega \mu_0} = -\frac{1}{4} \frac{\mu_0}{\omega} Ids \frac{2}{c} \left\{ \hat{e}_\theta 2 \cos \left[\frac{1}{(j r)^2} + \frac{1}{(j r)^3} \right] + \hat{e}_\theta \sin \left[\frac{1}{j r} + \frac{1}{(j r)^2} + \frac{1}{(j r)^3} \right] \right\} e^{j \omega t} \quad (2)$$

式(1)和式(2)分别代表赫兹偶极子所产生的磁感应强度和电场强度, 二者相结合可计算分析天线的辐射问题。

近区是指满足 $r \ll \lambda$, 即 $r \ll \lambda/2$, 但 $r > ds$ 的区域。近区里仅保留式(1)和式(2)中右边的高阶项。该区域里的磁通量密度 \vec{B} 和电场强度 \vec{E} 可近似表达如下:

$$\vec{B} = \hat{e}_\theta \frac{\mu_0}{4} \frac{Ids}{r^2} \sin e^{j \omega t} \quad (3)$$

$$\vec{E} = -j \frac{1}{4} \frac{\mu_0}{\omega} \frac{Ids}{r^3} (\hat{e}_\theta 2 \cos + \hat{e}_\theta \sin) e^{j \omega t} \quad (4)$$

式中由于 $r \ll \lambda$, 因而 $e^{jkr} \approx 1$ 。式(4)与静电偶极子所产生的电场强度公式形式相同, 式(3)与恒定电流源所产生的磁通量密度公式形式相同。因为近区内的滞后效应极其微小, 所以可近似认为电场强

度随时间变化的规律与电流随时间变化的规律相同。如果考虑 $i = \partial q / \partial t$, 即 $I = j \omega Q$, 则在讨论近区场时, 可将电流源视为一电偶极子。

2 杆塔雷击浪涌响应计算分析

通过以上分析, 对于雷击电力杆塔的情况, 可把雷击通道及杆塔电流分成长度远小于计算距离的单元, 计算雷击电流在任意处产生的电磁场, 然后把每个单元产生的电磁场叠加求出总的电磁场^[9]。

对于如图 2(a) 所示的电力杆塔, 不同的计算方法可以用不同的等效结构替代。如在传输线模型方法中, 常用图 2(b) 所示的传输线表示。而在数值电磁场仿真中, 由于建模只受计算单元数量的限制, 因此可以用最近似的模型。在数值电磁场计算中, 对图 2(a) 采用如图 2(c) 的简化模型。计算中假设大地为无损理想大地。

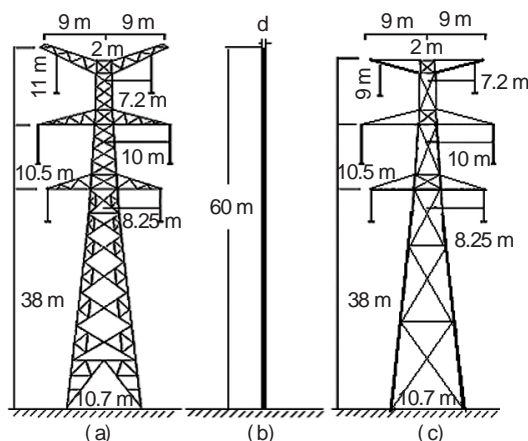


图 2 电力杆塔浪涌响应计算结构图

为了与输电线路耐雷水平计算一致, 采用斜角波激励雷电流, 见图 3, 其波形上升时间为 2.6 μs , 幅值为 1。计算斜角波时间间隔为 0.1 μs , 上限取 10 μs , 相应的频率为 0 Hz ~ 10 MHz, 频率间隔为 0.1 MHz。

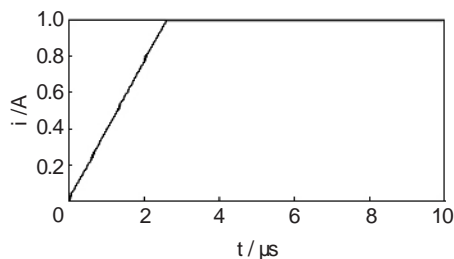


图 3 激励雷电流波形

由以上分析可以看出, 数值电磁场计算的是不同频率激励下的响应。对于雷击电流激励, 需要经过傅里叶变换将其变为频域值。在求出杆塔在雷电流频域激励下的响应后, 再经过傅里叶反变换求出时域响应。

斜角波函数的频谱见图 4, 可以看出其频率含量主要存在于 500 kHz 以下, 该频率波长为 600 m。

如果把杆塔分成长度为1m的电流元,根据上一节所述,分析计算点距杆塔小于100m,均为该雷击电流的近区场。图4给出了为便于计算杆塔频率响应而取的频率范围。

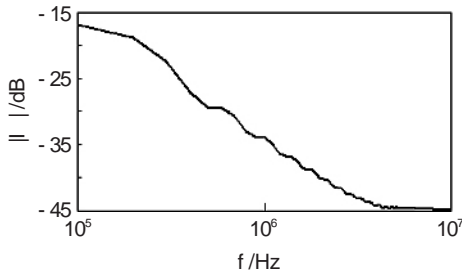


图4 激励雷电流频谱

在正弦电流 $i=i(t)\sin t$ 激励下,计算的杆塔阻抗曲线见图5,图中实线表示杆塔阻抗的模,虚线为阻抗的实部。此时的杆塔阻抗称为频域阻抗。图中峰值为杆塔电感和电容振荡频率,通过该频率可求出杆塔的等效电感和电容。

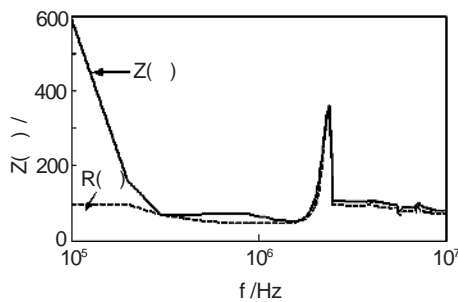


图5 杆塔的频域阻抗

对于杆塔的频域阻抗 $Z(\omega)$,可表示为电阻 $R(\omega)$ 和电抗 $X(\omega)$ 组成的复阻抗,其表达式为:

$$Z(\omega) = R(\omega) + jX(\omega) = V(\omega) / I(\omega) \quad (5)$$

则杆塔顶部电压的时域响应为:

$$V(t) = F^{-1}[V(\omega)] = F^{-1}[I(\omega)Z(\omega)] \quad (6)$$

式中: F^{-1} 表示傅里叶反变换。

利用式(6)计算出的塔顶电压时域曲线见图6中的曲线1。计算出浪涌响应后,可求出杆塔的浪涌阻抗(波阻抗),波阻抗的计算公式为:

$$Z = \frac{\max[V(t)]}{i(t_{\max})} \quad (7)$$

式中: $\max[V(t)]$ 为电压响应最大值; $i(t_{\max})$ 为电压响应取最大值时刻的电流值。也可通过对算出的频域阻抗进行傅里叶反变换,求出波阻抗函数为:

$$Z(t) = R(0) + \frac{2}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{X(\omega)}{\omega} \cos \omega t d\omega \quad (8)$$

为了便于比较,对图2所示的杆塔,同时采用等效传输线模型进行杆塔浪涌响应的计算,结果见图6中的曲线2。计算中,杆塔波阻抗采用的简化计算公式^[10]为:

$$Z = 60 \left(\lg \frac{2h}{d} - 1 \right) \quad (9)$$

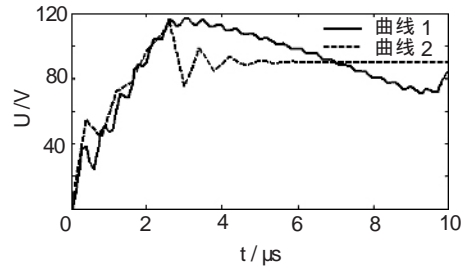


图6 杆塔顶部电压浪涌响应

式中: h 为杆塔高度; d 为杆塔等效半径。

式(8)不同于式(9),多出了电阻损耗量 $R(0)$,该电阻损耗实际上包括导体损耗和介质损耗。而传输线等效波阻抗计算公式(9)则没有计算电阻损耗。根据无损波阻抗计算公式 $Z = \sqrt{L/C}$,为了获得同样的波阻抗,必须提高杆塔的等效电感。因为采用传输线模型方法的等效电感要大于杆塔实测电感,这是杆塔传输线模型比电感模型计算的浪涌响应大的原因造成的^[11-12]。因此,需要对杆塔的电阻损耗进行深入分析研究,这对建立合理的杆塔等效电感模型有着重要的意义。

从图6可以看出,采用数值电磁场仿真计算的杆塔浪涌响应与传输线等效方法得出的杆塔浪涌响应是一致的,浪涌响应波阻抗最大值约为118Ω。而传输线模型浪涌响应曲线经过一段反复后幅值不再变化,这与推导波阻抗时,假设传输线模型为无损线是一致的。实际上,浪涌响应会随杆塔损耗而逐步降低的,仿真计算曲线也反映了这种变化。

为了说明雷击近区电磁场与远区辐射电磁场的不同,利用天线理论计算了在激励电流频率为100kHz时杆塔周围10~100m距离内,高度为30m水平面上的电场随距离的分布情况,见图7。可以看出在架空导线布置区域(距离杆塔中心8~15m)内,电场随距离快速变化,因此架空线路雷击感应过电压采用远区辐射电磁场计算方法是不合理的。

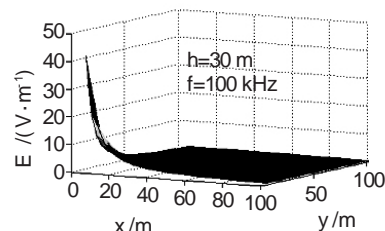


图7 杆塔周围雷击电场分布

3 结语

通过天线理论分析,得出电力系统雷电防护研究应加强近区电磁场理论分析研究,这是由电力系统的运行结构特点决定的。

通过采用数值电磁场程序对电力杆塔浪涌响应的计算,以及与等效传输线理论计算结果对比可以

看出, 该方法全面反映了雷电冲击下杆塔的物理特征, 它既反映了杆塔的电感和电容参数特性, 还体现了杆塔的损耗特性(包括传导损耗和介质损耗)。

初步计算了杆塔周围雷击电磁场的分布, 说明电场近区幅值远远大于远区辐射场。

笔者只是初步分析了数值电磁场程序用于分析电力杆塔雷击浪涌响应的效果, 而用该程序分析雷击杆塔时杆塔附近的电磁场分布情况, 进而计算出架空线路的感应过电压, 才是采用数值电磁场方法的最终目的。

参考文献:

[1] Shoory A, Moini R, Sadeghi S H H. Analysis of Lightning Electromagnetic Fields in the Vicinity of a Lossy Ground, Using a New Antenna Theory Model [C]// Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna, 2003, 1(6): 23-26.

[2] IEEE Working Group Report. Estimating Lightning Performance of Transmission Lines II, Updates to Analytical Models[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1993, 8(3):1254-1267.

[3] Groev L, Rachidi F. On Tower Impedance for Transient Analysis[J]. IEEE Trans. on Power Delivery, 2004, 19(3): 1238-1245.

[4] Baba Y, Ishii M. Numerical Electromagnetic Field Analysis on Measuring Methods of Tower Surge Impedance [J]. IEEE

Trans. on Power Delivery, 1999, 14(2): 630-635.

[5] Ishii M, Baba Y. Numerical Electromagnetic Field Analysis of Tower Surge Response[J], IEEE Trans. on Power Delivery, 1997, 12(1): 483-488.

[6] Rachidi F, Janischewskij W, Hussein A. M, et al. Current and Electromagnetic Field Associated with Lightning-return Strokes to Tall Towers [J]. IEEE Trans. on EMC, 2001, 43(3): 356-367.

[7] Pokharel R K, Ishii M, baba Y. Numerical Electromagnetic Analysis of Lightning Induced Over Ground of Finite Conductivity[J]. IEEE Trans. on EMC, 2003, 45(4): 651-656.

[8] Ishii M, Baba Y. Advanced Computational Methods in Lightning Performance. The Numerical Electromagnetics Code [C]// Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE. 2000, 4(1): 2 419-2 424.

[9] Goni M O, Cheng P T, Takahashi H. Theoretical and Experimental Investigations of the Surge Response of a Vertical Conductor [C]// Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002. Asia Pacific. IEEE/pes. 2002 2(10): 699-704

[10] Chowdhuri P, Li S, Yan P. Rigorous Analysis of Back-flashover Outages Caused by Direct Lightning Strokes to Overhead Power Line [J]. IEE Proc-gener. Transm. Distrib. 2002, 149(1): 58-65.

[11] 莫付江, 陈允平, 阮江军. 传输线杆塔模型与防雷性能计算研究[J]. 电网技术, 2004, 28(21): 80-84.

[12] 莫付江, 陈允平, 阮江军. 架空输电线路雷击感应电压过电压耦合机理及计算方法分析[J]. 电网技术, 2005, 29(6): 72-77.

(上接第 412 页) 行态实时电压、电流等电量参数; 故障分析包括相序电流故障、零序电流故障、主回路断相与 CT 断线故障、电源故障的分析; 故障分析处理包括反时限曲线处理、自动重合闸、故障存储、故障录波、CAN 总线通讯。

采用微型继电保护测试装置 PW30 进行模拟实验, 该装置能模拟各种故障, 输出的标准 50 Hz 交流电流有效值可达 90 A。图 8 为变换后的 3 种反时限特性曲线, 电流整定值 $I_{ps}=5 A$, 时间整定值 $T_{ps}=50 ms$, 其中横坐标为过流倍数, 纵坐标为延时时间, 曲线上的点为测试数据点。动作时间及动作电流值精度在 2% 以内。

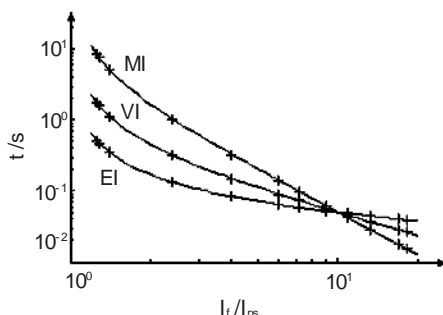


图 8 反时限特性曲线测试数据分布

针对保护装置所处的恶劣的电磁运行环境, 在数据采集通道, 对自具电源和控制面板等容易受到干扰的敏感部位加强了电磁兼容设计, 从而顺利通

过了瞬变脉冲群, 雷击浪涌和静电等抗干扰试验。对该装置的其它功能也做了相应的实验。总体性能均达到预期目标。

5 结语

设计的保护装置基于热量累积原理, 利用 3 种反时限特性对相序电流进行反时限保护, 同时, 可实现对相序和零序电流进行定时限保护, 电流动作值和动作时限精度达到 2%。该保护装置的特点是具有快速高精度的反时限特性处理能力, 故障诊断能力强。采用上位机对故障录波进行分析, 具有电源自具、液晶显示、CAN 总线通讯、电磁兼容性强等特点, 为 12 kV 终端用户开关柜保护和实现配电自动化提供了一种实用的解决方案。

参考文献:

[1] 武建文, 王小波. 一种终端用户开关柜微机保护装置 [J]. 高压电器, 2004, 40(2): 132-134.

[2] 陶 瑜. 三峡-广州直流输电工程 CAN 总线设计特点[J]. 电力设备, 2005, 6(6): 31-33.

[3] 徐厚东, 黄益庄. 微机反时限过流保护算法 [J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, 46(1): 1-4.

[4] 严支斌, 尹项根. 新型微机反时限过流保护曲线特性及算法研究[J]. 继电器, 2005, 33(8): 44-46.

[5] Benmouyal G. Design of a Multi-curve Time-overcurrent Relay [J]. IEEE Tans. on Power Delivery, 1990, 5(4):1 725-1 731.