

输电线路雷击暂态效应仿真分析

王 佳^{1,2}, 王晓辉²

(1. 北京交通大学 电气工程学院, 100044 北京; 2. 北京建筑工程学院 电气与信息工程学院, 100044 北京)

摘 要: 为了研究架空输电线路在雷击情况下的暂态特性, 提出了一种 ATP-EMTP 的仿真模型. 该模型同时考虑了输电线路参数的频变特性和冲击电晕效应, 利用 Marti 线路模型分析输电线路的频变特性, 通过自定义的电晕模块模拟冲击电晕效应. 运用镜像法推导了线路几何电容的表达式, 并在此基础上计算了发生电晕时线路的动态电容. 仿真结果表明, 冲击电晕效应对雷电过电压波的衰减和变形作用较参数频变特性严重, 而同时考虑输电线路参数的频变特性和冲击电晕效应更符合实际情况. 所提出的模型可精确地计算输电线路可能出现过电压水平, 为线路的绝缘设计和防雷保护等提供可靠的依据.

关键词: 输电线路; 雷击; 频变; 电晕; ATP-EMTP

中图分类号: TP391.9

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2012)09-0128-04

Simulation of lightning transient effects on transmission lines

WANG Jia^{1,2}, WANG Xiao-hui²

(1. School of Electric Engineering, Beijing Jiaotong University, 100044 Beijing, China;

2. Beijing University of Civil Engineering and Architecture, School of Electronic Information, 100044 Beijing, China)

Abstract: An ATP-EMTP simulation model is proposed for calculating lightning transient effects on transmission lines. Both frequency dependent of transmission line and impulse corona effect are considered in this model. The frequency dependent characteristic is analyzed by Marti line model and a user defined corona model is applied to simulate the effect of impulse corona. The expression of geometric capacitance is derived by means of image theory and the dynamic capacitance for line with corona is computed on this base. The simulation results show that the effect of corona plays a more important role than that of frequency dependent characteristic on lightning overvoltage, while it accords more with the facts to take both the effect of frequency dependent characteristic and that of impulse corona. The model presented in this paper can calculate the possible overvoltages on transmission line to provide reliable guidelines for insulating and lightning protection design of transmission line.

Key words: transmission line; lightning; frequency dependent; corona; ATP-EMTP

雷击输电线路时,将在线路上产生暂态过电压.使架空输电线上过电压波的传播发生衰减和畸变的因素有两个:1)由于非理想大地回路的存在和集肤效应,线路的径向参数与频率相关;2)由电晕引起横向参数的变化.因此从输电线路的绝缘优化设计、防雷保护和经济性等多方面考虑,要精确地分析和计算线路上可能出现的过电压水

平,须从上述两个方面开展对输电线路雷电暂态特性的研究.

现在对于输电线路频率相关性的研究成果经过不断改进和完善,已基本比较成熟,研究者^[1]常采用的是 Marti 线路模型.长期以来人们对电晕进行了大量理论和实验的研究,但是由于电晕这种物理现象的复杂性,仍然缺乏精密、有效的模型来描述电晕的影响.文献[2-4]中基于电晕放电的物理机制得到了电荷对电压的特性.鉴于冲击电晕放电现象的复杂性,文献中均在不同程度上对其进行了简化处理.还有学者^[5-7]考虑了宏

收稿日期: 2010-06-30.

作者简介: 王 佳(1969—),女,教授,博士研究生.

通信作者: 王佳, wangjia@bucea.edu.cn.

观电荷、电场强度与电压之间的关系,将电晕发展过程与电晕的外特性联系起来分析电晕的伏库特性。

一方面,考虑到输电线路参数的频变特性,要精确求解其暂态响应需在频域中进行求解。另一方面,当线路上的过电压幅值较高时将产生冲击电晕,并且冲击电晕的发展取决于过电压的幅值,因此需在时域中考虑冲击电晕的影响。文献[8]通过特征值法计算了同时考虑参数频变特性和电晕效应的输电线路电磁暂态特性。文献[9]提出了一种运用状态空间法计算参数具有频变特性的输电线路电晕影响的方法。文献[10]建立了包含频变参数线路和冲击电晕的等值计算电路,计算了线路的电磁暂态过程。用数值计算的方法分析带有电晕的频变输电线路的暂态特性,特别是在将频域中的线路参数转换到时域进行计算时,其过程实现起来较复杂。因此本文中建立了分析输电线路冲击电晕的动态模型,并将其作为 ATP-EMTP 程序中的自定义模块,并与程序中已有的比较成熟的 Marti 线路模型相结合,对考虑电晕影响的频变参数输电线路的暂态响应进行了仿真分析。

1 输电线路模型

1.1 参数频变模型

由于导线和大地在交变电磁场作用下具有集肤效应,输电线路的电阻和电感随着电流频率的变化而变化。此时,线路对于不同的频率分量呈现出不同的传输特性,将会直接影响其电磁暂态过程。

在 ATP-EMTP 程序中,对应于线路模型有 Bergeron、PI、JMarti、Noda、Semlyen 等多种模型,本文在考虑输电线路的参数频变特性时,采用了较为成熟的 JMarti 线路模型。该模型将线路特性阻抗的阻抗-频率特性用一个近似的阻抗函数进行拟合,利用此阻抗函数可表示出输电线路的等效电路。

1.2 电晕模型

雷击输电线路时,若在线路上产生的过电压幅值很大,一旦达到导线电晕的起始电压 V_c ,导体表面气体将游离放电,在导线周围形成电晕套。假设在未发生电晕时,导线呈现几何电容 C_g ,而当电晕发生时,导线的电容随着导线电压的变化而时刻变化,此时呈现动态电容 C_d 。本文基于导线周围的电场强度、空间电荷与导线电压之间的宏观联系,根据镜像法分别推导了线路电容的表

达式。

输电线路的结构及其镜像如图 1 所示。在计算中假设电晕的几何形状是环绕导体的均匀圆柱。导体表面的电场是常数,等于临界电场 E_i 。

当导线表面的电场达到并超过临界电场值时开始出现电晕。设 Q_c 为在临界电场时导体所带的电荷, r_0 为导体半径。则在距离导体镜像距离为 r 处的电场为

$$E = \frac{Q_c}{2\pi\epsilon_0 r} + \frac{Q_c}{2\pi\epsilon_0 (2h - r)}.$$

式中: ϵ_0 为真空中的介电常数。令 $r = r_0$ 可得到临界电场 E_i 为

$$E_i = \frac{Q_c \cdot 2h}{2\pi\epsilon_0 r_0 (2h - r_0)}.$$

由此可推得导体的起晕电压为

$$V_c = \int_{r_0}^h \frac{Q_c}{2\pi\epsilon_0 r} dr - \int_{2h-r_0}^h \frac{Q_c}{2\pi\epsilon_0 r} dr = \frac{Q_c}{2\pi\epsilon_0} \ln\left(\frac{2h - r_0}{r_0}\right). \quad (1)$$

将电荷 Q_c 带入式(1)得

$$V_c = E_i r_0 \left(\frac{2h - r_0}{2h}\right) \ln\left(\frac{2h - r_0}{2h}\right).$$

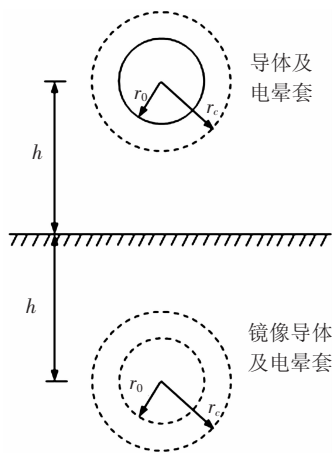


图1 电晕模型的导体结构

所以,线路的几何电容可表示为

$$C_g = \frac{Q_c}{V_c} = \frac{2\pi\epsilon_0}{\ln\left(\frac{2h - r_0}{r_0}\right)}.$$

对于动态电容的计算,本文采用的是目前普遍应用的由经验公式表示的电晕的伏库特性^[10]为

$$\frac{Q}{Q_c} = A + B\left(\frac{V}{V_c}\right)^{4/3}. \quad (2)$$

式中: Q 为电压瞬时值为 V 时线路及电晕的总电荷; A 、 B 为两个常数。正极性时, $A = 0$ 、 $B = 1.02$; 负极性时, $A = 0.15$ 、 $B = 0.85$ 。根据式(2)可得动态电容为

$$C_d = \frac{dQ}{dV} = C_g M \left(\frac{V}{V_c} \right)^{1/3}.$$

式中： M 为常数. 在正极性电晕时， $M = 1.36$ ；负极性电晕时， $M = 1.13$.

2 输电线路雷电暂态仿真

考虑到计及参数频变和电晕影响的输电线路的雷电暂态数值计算的复杂性,本文中运用通用的电磁暂态程序 ATP-EMTP 进行了仿真计算. 对于线路的频变参数特性,采用了程序中 LCC 线路模块中的 JMart 线路模型;对于电晕的影响,本文利用了程序中自定义模块的功能,建立了输电线路的冲击电晕模型,用一个 TACS 控制的 91 型时变电阻模拟冲击电晕^[11],当线路上某点的电压超过起晕电压时,用 13 型 TACS 开关将电晕模型插入到线路中,而在未发生电晕时,开关将电晕模型从线路中切除,线路模型如图 2 所示. 线路上任意点的时变电阻值由发生电晕时该点线路的电容得到

$$R_{\text{cori}} = \frac{u_i}{i_i} = \frac{u_i}{C_i du_i / dt}.$$

式中： $C_i = C_{di} - C_g$.

由于发生电晕时导线的对地电容是随电压而变化的,因此该模型实时地判断输电线路各点的电压值,以动态地修正导线的对地电容值,从而有效地反应电晕的发展过程及其对输电线路暂态响应的影

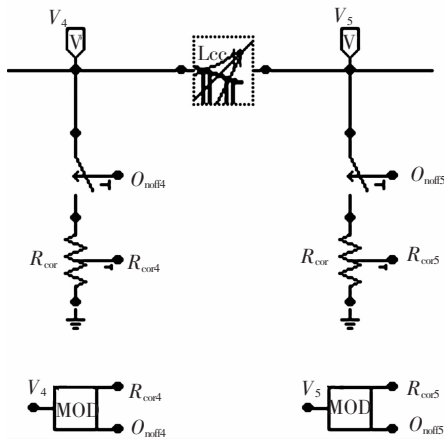


图 2 ATP 仿真电路模块

本文计算了单相线路的雷电暂态响应,所考虑的线路长为 10 km,共分为 10 段. 在计算中认为雷电压自线路的起点注入,线路划分得到的 11 个节点自雷击点开始依次编号. 雷电压波形如图 3 所示. 仿真中选定线路模型为 Jmart 模型,均匀土壤的电阻率设定为 $2\,000\,\Omega \cdot \text{m}$,Jmart 模型的最低频率点取为 10 Hz,每段线路长度为 1 km.

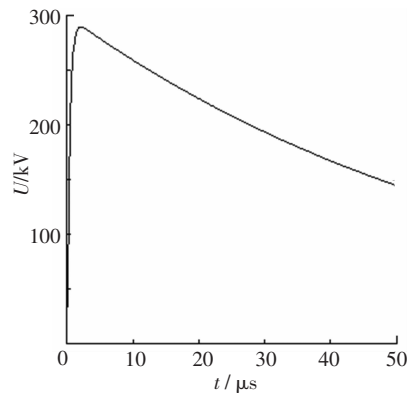


图 3 雷击点的雷电压波形

本文计算了线路上不同点处的冲击电压波形,图 4 所示为同时考虑了线路参数的频变特性和冲击电晕影响的输电线路冲击电压波形,图 5 为仅考虑电晕效应影响时的输电线路冲击电压波形.

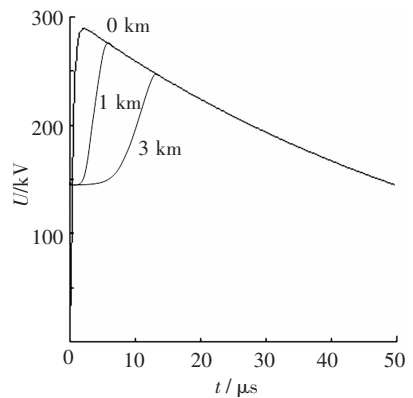


图 4 考虑频变和电晕效应时的电压波形

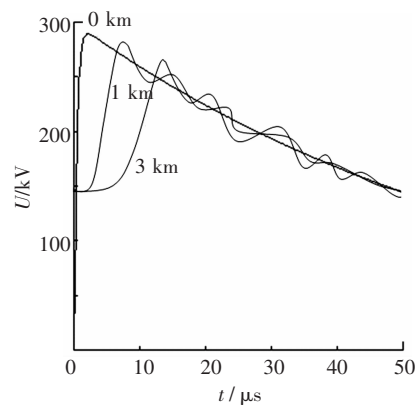


图 5 仅考虑电晕效应时的电压波形

比较图 4 和图 5 可以发现,当雷击输电线路时,线路发生了衰减和变形,而电晕引起的行波的衰减与变形远比线路参数频变的作用严重,但两者幅值相差不大. 这证明了电晕效应在输电线路雷电过电压波形的传播过程中起主要作用,但同时考虑线路参数的频变特性和冲击电晕效应更符合

合实际情况、结果更精确。图5中波形存在一定的高频振荡,其原因主要是暂态等值电路法采用梯形积分公式,当满足电晕发生条件时开关合上将会引入数值振荡,在电晕模拟支路中串联电阻可以有效地抑制高频振荡^[12]。

3 结 论

1)运用 ATP-EMTP 程序进行输电线路雷电暂态仿真的方法,并同时考虑了输电线路的频变参数特性和冲击电晕效应。

2)运用镜像法推导了输电线路的几何电容,并计算了发生电晕时的动态电容,反映了电晕的发生对于输电线路参数的影响。

3)运用程序中的 JMarti 线路模型结合自定义的电晕模型,计算了雷击时输电线路的暂态响应,其结果较精确,可为电网的防雷保护和设备的绝缘设计提供可靠的依据。

参考文献:

- [1] MARTI J R. Accurate modeling of frequency-dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations [J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1982, PAS-101(1):147-157.
- [2] TU Youping, ZENG Rong, LEE J B, *et al.* Numeral analysis model for shielding failure of transmission line under lightning stroke [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2):815-822.
- [3] AMETANI A. A method of a lightning surge analysis recommended in Japan using EMTP[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2):867-875.
- [4] YE Huisheng, HE Junjia, LI Hua, *et al.* Simulation of overvoltage and flashover caused by lightning stroke at

towers of HVDC transmission line [J]. Power System Technology, 2005, 29(21):31-35.

- [5] ADAM S, HUANG Weigang. Corona modeling for the calculation of transients on transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1986, 1(3):228-239.
- [6] 黄伟纲. 输电线路暂态计算的电晕模型 [J]. 高电压技术, 1987(1):15-21.
- [7] LI Xiarong, MALIK O P, ZHAO Zhida. A practical mathematical model of corona for calculation of transients on transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2):1145-1152.
- [8] RAMIREZ A, NAREDO J L, MORENO P, *et al.* Electromagnetic transients in overhead lines considering frequency dependence and corona effect via the method of characteristics [J]. International Journal of of Electrical Power & Energy Systems, 2001, 23(3):179-188.
- [9] FREITAS M A, KUROKAWA S, PISSOLATO J. Corona effect in frequency dependent transmission line models [C]//Proceedings of the 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, Latin America. Washington, DC: IEEE, 2008:1-7.
- [10] 束洪春,宣映霞,李义,等. 一种考虑冲击电晕及线路参数频变的电磁暂态仿真方法 [J]. 继电器, 2006, 34(9):26-29, 33.
- [11] 张纬钹,何金良,高玉明. 过电压防护及绝缘配合 [M]. 北京:清华大学出版社, 2002.
- [12] GALLAGHER T J, DUDURYCH I M. Model of corona for an EMTP study of surge propagation along HV transmission lines [J]. IEEE Proceedings Generation Transmission Distribution, 2004, 151(1):61-66.

(编辑 张 红)