

一种考虑冲击电晕及线路参数频变的电磁暂态仿真方法

束洪春^{1,2}, 宣映霞³, 李义⁴, 司大军², 于继来²

(1. 昆明理工大学, 云南 昆明 650051; 2. 哈尔滨工业大学, 黑龙江 哈尔滨 150001;

3. 昆明供电局, 云南 昆明 650051; 4. 云南华电镇雄发电有限公司, 云南 镇雄 657200)

摘要: 在对冲击电晕的伏库特性分析的基础上, 通过将线路分为多个不长的小段, 在每段线路两边插入考虑冲击电晕的附加电容, 从而既计及了冲击电晕对电磁暂态的影响, 又与现有的线路模型相兼容。通过雷击输电线路的电磁暂态仿真表明, 考虑冲击电晕与不考虑冲击电晕的电磁暂态过程相差很大, 因此在研究行波保护的雷电波干扰方法时应该考虑冲击电晕对电磁暂态过程的影响。

关键词: 冲击电晕; 电磁暂态; 输电线路

中图分类号: TM773

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2006)09-0026-04

0 引言

行波保护利用故障产生的高频行波信号实现超高速的动作, 而雷击也将引起行波过程, 并且雷击可能造成故障也可能不造成故障, 因此行波保护必须能够对其进行识别, 否则将会使保护误动或拒动。因此, 必须深入研究雷击与故障引起的电磁暂态特征, 并提出相应的识别方法^[1-3]。其中有两个因素对雷击引起的电磁暂态过程影响比较大: 输电线路的参数频变特性和冲击电晕。但是, 现有的电磁暂态计算软件中尚未见到电晕的电磁暂态模型, 对电晕的影响只是有估计的方法。根据估计的结果, 当雷击输电线路时, 电晕引起的行波的衰减与变形远比线路参数频变引起的严重^[4]。虽然文献[5]中提出了一种考虑冲击电晕的电磁暂态仿真方法, 但该方法无法考虑线路参数的频变特性且与现有的线路模型不兼容。此外, 电晕过程是强烈的非线性过程, 在求解时需要迭代, 使用现有的电磁暂态计算软件较难实现。因此本文在分析电晕伏库特性的基础上, 建立了电晕的等值电路模型, 并与现有且成熟的 Marti 线路模型有机结合, 提出了一种既考虑冲击电晕又考虑线路参数频变的电磁暂态仿真方法, 以便用于研究新的行波保护原理以及雷击与故障识别的行波方法。

1 冲击电晕的伏库特性

高幅值的雷电冲击波将在导线上产生强烈的冲击电晕。研究表明, 形成冲击电晕所需的时间非常

短, 正冲击时只需大约 0.05 μs, 负冲击时只需大约 0.01 μs, 而且与电压陡度的关系非常小。因此可以认为, 在不是非常陡的波头范围内, 冲击电晕的发生只与电压的瞬时值有关。但是不同的极性对冲击电晕的发展有显著的影响。

冲击电晕的伏库特性是研究与计算波衰减与变形的基础。所谓伏库特性, 就是波传播过程中, 导线上的冲击电压瞬时值 u 与导线上及其周围电晕套内的总电荷 q 的关系: $q = f(u)$ 。

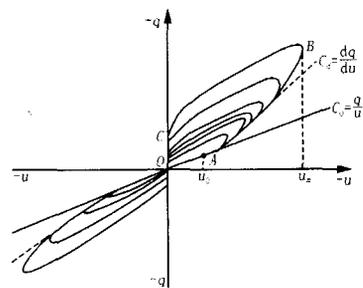


图 1 冲击电晕的伏库特性

Fig 1 V - Q characteristics of impulse corona

文献[4]给出了典型的电晕伏库特性曲线, 如图 1 所示, 呈现回环形。每一伏库特性可以分为三段: OA 段对应于电压 u 小于电晕起始电压 u_0 时的雷电波波头部分; AB 段对应于 $u > u_0$ 时的雷电波波头部分电晕发展阶段; 伏库特性的 BC 段对应于冲击电压峰值过后的波尾部分, 它几乎和 OA 段平行。其中单位长度动态电容可表示为:

$$\frac{-q}{q_0} = A + B \left(\frac{-u}{u_0}\right)^{4/3} \quad (1)$$

式(1)中: q 为电压瞬时值为 u 时的电荷; q_0 为电晕起始电压 u_0 时的电荷; 正极性时, 常数 $A = 0, B = 1.02$, 负极性时 $A = 0.15, B = 0.85$ 。此式对于分裂

基金项目: 国家自然科学基金项目(50347026, 50467002); 云南省科技攻关项目(2000B2-02, 2003GG10); 云南省应用基础研究项目(2002E0025M, 2004E0020M)

导线也基本上适用。

2 冲击电晕的电路等效

由于电晕过程中(处于电晕伏库特性中的 AB 段)动态电容 C_d 大于几何电容 C_0 , 这里定义电晕引起的附加电容 C_f 为

$$C_f = C_d - C_0 = MC_0 \left(|u/u_0| \right)^{1/3} - C_0 \quad (2)$$

那么根据电晕的伏库特性,可以得到如图 2 所示的冲击电晕等效电路。图 2 中, D_1 和 D_2 为理想稳压二极管, 稳压值为 u_0 。当 $|u| < |u_0|$ 时, D_1 和 D_2 不会导通, 只有 C_0 起作用, 与图 1 中的 OA 段相吻合; 当 $|u| > |u_0|$ 且 $|u|$ 不断增大时, D_1 和 D_2 将会导通, 向 C_f 充电, 此时电容 C_0 与 C_f 上的总电荷和 u 的关系刚好与图 1 中的 AB 段相吻合; 当 $|u|$ 开始下降时, D_1 和 D_2 由导通转为截止, 将 C_f 与电路的其它部分隔开, 相当于电路中只有电容 C_0 , 这与图 1 中的 BC 段相吻合。图 2 中的 R 用来表示电晕引起的空间电荷的消散过程, 由于空间电荷的消散过程比冲击电晕的发展过程长得多, R 值较大, 故在考虑冲击电晕的电磁暂态仿真中可以不考虑 R 的影响。从图 2 中可以看出电晕引起的能量损失有两部分, 一部分是电晕发展阶段 D_1 和 D_2 导通时在 D_1 和 D_2 上的功耗, 另一部分是电晕结束 C_f 放电所带来的能量损失。

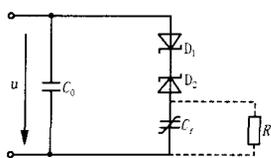


图 2 冲击电晕等效电路

Fig 2 Equivalent circuit of impulse corona

3 电磁暂态计算方法的实现

由于线路遭受雷击后, 线路上不同地点、不同时间的电压不同, 因此不同地点、不同时间电晕引起的附加电容 C_f 也不同。所以在考虑线路参数频变的情况下, 精确计及电晕的影响是十分困难的。此外, 电晕过程本来就是包含有一定的随机因素, 对其只能建立一个近似的数学模型, 在实际中不可能也没必要建立电晕的精确数学模型。因此, 本文通过将线路分为若干段来近似考虑冲击电晕对电磁暂态的影响, 在每一小段线路上认为 C_f 不随位置的变化而变化, 即认为一小段线路上的电压是相同的, 但 C_f 仍是沿线路分布的非线性电容。然后进一步将每一小段线路分布的 C_f 以集中参数的方式插入到线路的两边,

这样就可以继续使用现有的比较成熟的 Marti 线路模型, 形成如图 3 所示的考虑冲击电晕及参数频变的线路模型。图 3 中的 R 代表图 2 中的 D_1 和 D_2 。

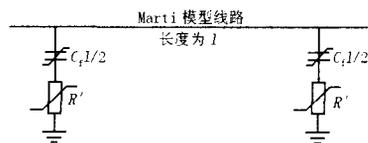


图 3 考虑冲击电晕及参数频变的线路模型

Fig 3 Line model for simulating impulse corona and frequency dependency

由于 C_f 是非线性电容, 用于数值计算还需要建立其等效数值计算模型。对于图 4 (a) 所示的非线性电容, 可以建立 4 (a) 所示的等值电路, 其中

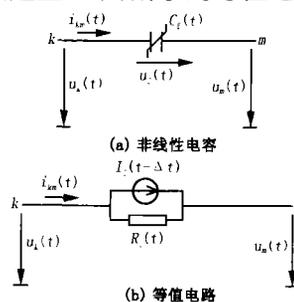


图 4 非线性电容的等值计算电路

Fig 4 Equivalent circuit of nonlinear capacitor for calculating

$$R_c(t) = \frac{t}{2C_f(t)} \quad (3)$$

$$I_c(t-t) = -I_c(t-2t) - \frac{2}{R_c(t-t)} \cdot [u_k(t-t) - u_m(t-t)] \quad (4)$$

从图 4 (b) 中可以看出, 计算 t 时刻的电压电流需要知道 t 时刻的 $C_f(t)$, 而 $C_f(t)$ 是电容电压 $u_c(t)$ 的非线性函数, 因此对 $C_f(t)$ 进行计算时需要迭代求解。考虑冲击电晕及参数频变的输电线路电磁暂态计算流程图如图 5 所示。计算思路为, 当没有发生电晕时(冲击电晕伏库特性处于 OA 段)不投入电晕附加电容 C_f , 当发生电晕时(冲击电晕伏库特性处于 AB 段)投入电晕附加电容 C_f , 当电晕过程结束时(冲击电晕伏库特性处于 BC 段)切除电晕附加电容 C_f 。图 5 中, t 为计算步长, 为很小的正数, 用于控制迭代精度。

4 暂态仿真验证

本文用于仿真的 500 kV 系统如图 6 所示, 其中线路 MN 长为 204.4 km, 线路杆塔结构与文献 [3] 中的相同, M 端系统相电势为 355.0° kV, N 端系

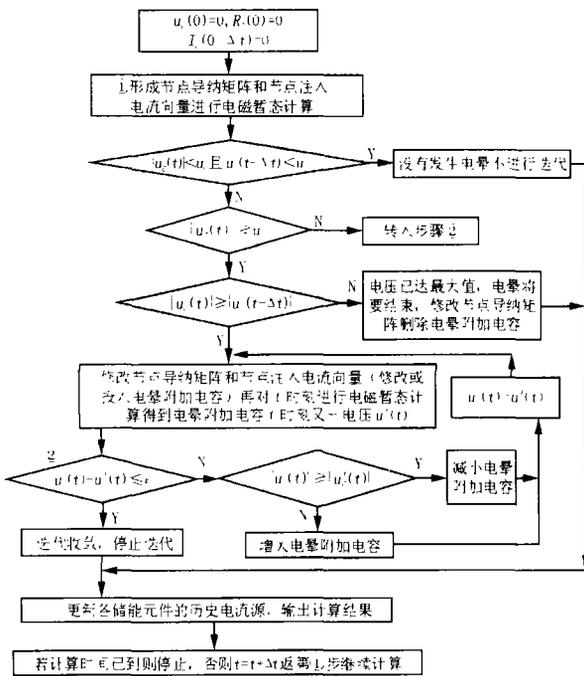


图 5 考虑冲击电晕及参数频变的输电线路电磁暂态计算流程图

Fig 5 Flow chart of simulating impulse corona and frequency dependency of line parameter

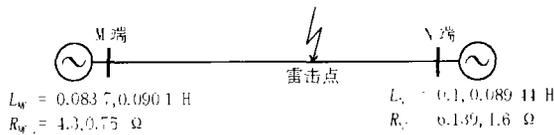


图 6 500 kV 系统仿真系统

Fig 6 500 kV power system for simulation

统相电势为 286 30°kV。通常计算线路故障的电磁暂态过程时,输电线路的避雷线认为零阻抗接地,在计算线路分布参数矩阵 R、L 和 C 时就把它做降阶处理,消去避雷线。而在对输电线路遭受雷击进行研究时,由于需要考虑雷击避雷线档距中央、雷

击杆塔等情况,而且避雷线并不是零阻抗接地,因此不应将线路分布参数矩阵 R、L 和 C 做降阶处理,即不应消去避雷线。当杆塔高度小于 40 m 时,可以近似地等效为电阻、电感串联的集中参数模型^[4],这里取铁塔的等值电感为 0.4 μH/m,铁塔的接地电阻 R_T 取为 10 Ω,则铁塔总的等值电感 L_T 为 14.8 μH。根据本文的计算方法可以建立图 6 系统的计算模型,其结构如图 7 所示。图 7 中,只考虑了雷击档距及其两个相邻档距线路的冲击电晕影响,这是因为这三个档距的避雷线上电压较高,而其它档距的雷电冲击电压已经很低,不会引起电晕,故雷电冲击电压较高的三个档距采用五根导体(三根导线加两根避雷线)的传输线模型,线路其它部分采用消去避雷线的三相导体传输线模型。在图 7 中,虚线表示避雷线, C_{fi}, i = 1, 2, ..., 9 表示电晕附加电容。本文中雷电流取 2.6 μs/50 μs 的标准波形^[6], 20 kA 的雷电流波形如图 8 所示,其中时间轴单位为 ms,此外本文中未作特殊说明时间轴单位均为 ms。假设在图 6 所示系统中,线路 MN 在距 M 端 154.7 km 的地方,避雷线档距中央遭受雷击,档距长度为 1.4 km。当幅值为 215 kA 的雷电流在 0 时刻作用于图 7 系统的雷击点时,雷击点与距雷击点最近杆塔塔顶电压如图 9 所示。同样在雷击点作用 215 kA 的雷电流而不考虑冲击电晕影响时,雷击点与距雷击点最近杆塔塔顶电压如图 10 所示。从图 9 和图 10 中可以看出,在考虑冲击电晕时,雷击点的电压最大幅值约为 20 000 kV,而不考虑冲击电晕时约为 33 000 kV,比考虑电晕时大了 65%;在考虑冲击电晕时,距雷击点最近杆塔塔顶电压最大幅值约为 1 200 kV,而不考虑冲击电晕时约为 1 600 kV,比考虑电晕时大了 33.3%。由此可见,冲击电晕对雷击引起的电磁暂态影响非常大,因此,在研究行波保护的雷电波抗干扰方法时应该考虑冲击电晕对电磁暂态过程的影响。

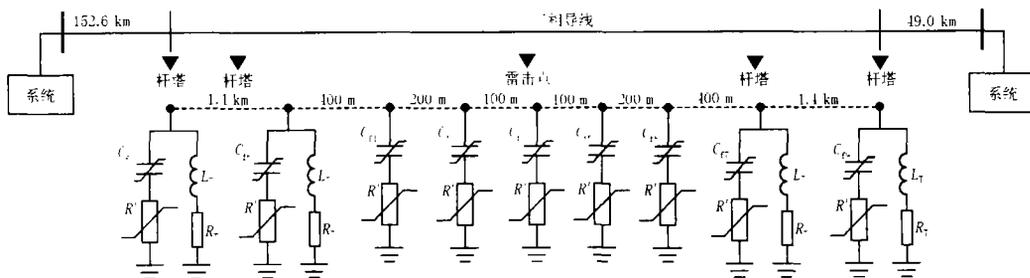


图 7 考虑电晕计算模型

Fig 7 Calculation model for simulating corona

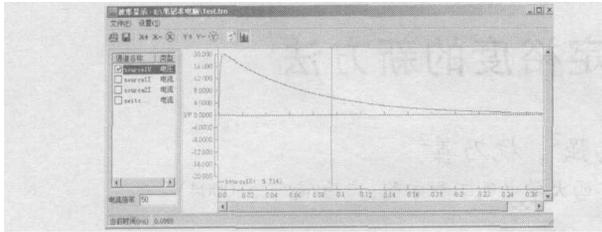


图 8 2.6 μs/50 μs 的雷电流波形

Fig 8 Waveform of 2.6 μs/50 μs lightning current

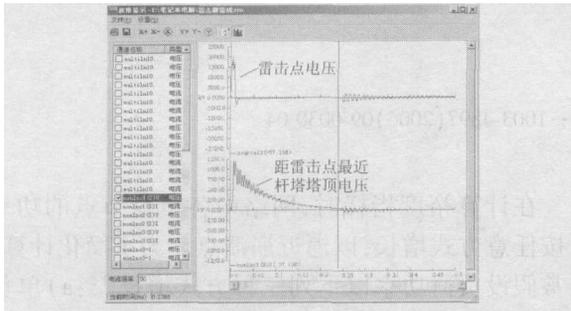


图 9 考虑电晕的雷击避雷线档距中央电压波形

Fig 9 Voltage waveforms caused by lightning striking on ground wire with corona model

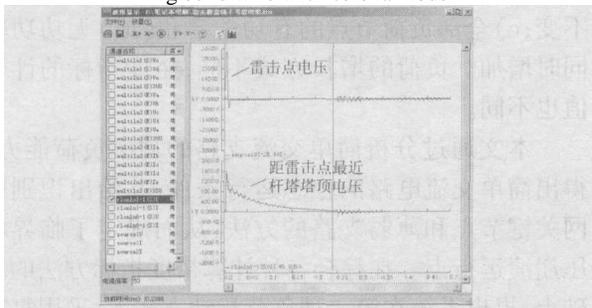


图 10 未考虑电晕的雷击避雷线档距中央电压波形

Fig 10 Voltage waveforms caused by lightning striking on ground wire without corona model

5 结论

本文在对冲击电晕的伏库特性分析的基础上,建立了电晕的等值电路模型,并结合现有的比较成熟的 Marti 频变参数线路模型,提出了一种既考虑冲击电晕又考虑参数频变的输电线路电磁暂态仿真方法。该方法通过将线路分为多个不长的小段,在每段线路两边插入考虑冲击电晕的附加电容,从而做到既计及了冲击电晕对电磁暂态的影响,又与现有的线路模型相兼容。此外,还给出了非线性电容的时域数值计算模型与公式以及对非线性电晕附加电容迭代求解的方法。雷击输电线路的电磁暂态仿真表明,考虑冲击电晕与不考虑冲击电晕的电磁暂态过程相差很大,因此在研究行波保护的雷电波抗

干扰方法时应该考虑冲击电晕对电磁暂态过程的影响。本文方法为行波保护等相关研究提供了有力的数字仿真试验平台。

参考文献:

- [1] 哈恒旭,张保会. 输电线路边界保护中雷电冲击与故障的识别[J]. 继电器, 2003, 31(4): 1-5.
HA Heng-xu, ZHANG Bao-hui The Study on Identification of Fault and Lightning Strokes in Boundary Protection for EHV Lines[J]. Relay, 2003, 31(4): 1-5.
- [2] 王钢,李海锋,赵建仓,等. 基于小波多尺度的输电线路直击雷暂态识别[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 139-144.
WANG Gang, LI Hai-feng, ZHAO Jian-cang, et al Identification of Transients on Transmission Lines Caused by Direct Lightning Strokes Based on Multiresolution Signal Decomposition[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 139-144.
- [3] 李海锋,王钢,赵建仓. 输电线路感应雷击暂态特性分析及其识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(3): 114-119.
LI Hai-feng, WANG Gang, ZHAO Jian-cang Study on Characteristics and Identification of Transients on Transmission Lines Caused by Indirect Lightning Stroke[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(3): 114-119.
- [4] 张纬钊,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.
ZHANG Wei-bo, HE Jin-liang, GAO Yu-ming Overvoltage Precaution and Insulation Coordination[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.
- [5] 戴玉松,颜怀梁. 考虑冲击电晕时的一种多相线等值电路模型[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(5): 339-343.
DAI Yu-song, YAN Huai-liang An Equivalent Circuit Model of the Multiphase Transmission Lines Affected by the Corona[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(5): 339-343.
- [6] Narita T, Yamada T, Zaima E, et al Observation of Current Wave Shapes of Lightning Strokes on Transmission Towers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2000, 15(1): 429-435.

收稿日期: 2005-09-21

作者简介:

束洪春(1961-),男,博士后,教授,博士生导师,主要研究新型继电保护与故障测距、数字信号处理及 DSP 应用、电力系统 CT 技术等; E-mail: kmshc@sina.com

(下转第 33 页 continued on page 33)

- ZHOU Shuang-xi, YANG Ning, FENG Zhi-hong Seeking PV Curves in Bulk Power System [J]. Power System Technology, 1996, 20(8): 4-8
- [9] 张尧,宋文南. 节点电压稳定临界状态和弱节点的确定 [J]. 中国电机工程学报, 1993, 13(6): 40-45.
- ZHANG Yao, SONG Wen-nan Determination of the Critical State of Voltage Stability in Load Buses and the Weakest Bus of the Power System [J]. Proceedings of the CSEE, 1993, 13(6): 40-45.
- [10] 段献忠,何仰赞,陈德树. 论电力系统电压稳定几种实用判据和安全指标 [J]. 电力系统自动化, 1994, 18(9): 36-41.
- DUAN Xian-zhong, HE Yang-zan, CHEN De-shu On Some Practical Criteria and Security Indices for Voltage Stability in Electric Power System [J]. Automation of Electric Power Systems, 1994, 18(9): 36-41.
- [11] 吴伯强. 负荷对电力系统电压稳定性的影响 [J]. 浙江水利水电专科学校学报, 2002, 14(1): 52-54.
- WU Bo-qiang Influence of Load on Voltage Stability in Power System [J]. Journal of Zhejiang Water Conservancy & Hydropower College, 2002, 14(1): 52-54.
- [12] 李劲波,郭银华. 一种静态电压稳定指标求解方法 [J]. 武汉水利电力大学学报, 1994, 27(5): 526-530.
- LI Jin-bo, GUO Yin-hua An Algorithm for Determining Index of Static Voltage Stability [J]. Journal of Wuhan University of Hydropower & Electrical Engineering, 1994, 27(5): 526-530.

收稿日期: 2005-09-26; 修回日期: 2005-12-03

作者简介:

李盛林 (1967-),男,工学硕士,研究方向为电力系统安全与控制;

卢勇 (1970-),男,工学硕士,研究方向为电力系统分析与计算;

卢志强 (1968-),男,硕士研究生,研究方向为电力系统分析与计算。E-mail: lu8757@tom.com

A new method for calculating stationary voltage stability margin

LI Sheng-lin¹, LU Yong¹, LU Zhi-qiang², HANG Nai-shan²

(1. Guangxi Electric Power Vocation Technical College, Nanning 530007, China;

2. Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The new calculating method of stationary voltage stability critical node is put forward by analyzing the ability of the load power of simple alternative circuit branch. Based on the collapsing node of the critical voltage, the suggestion that the stable margin of stationary voltage is proved reasonable by comparing with the different indications of calculated margin. Case of IEEE 5 node algorithm system is proposed as well.

Key words: power system; voltage stability; margin index

(上接第 29 页 continued from page 29)

宣映霞 (1974 -),女,工程师,从事负荷预测研究;

李义 (1966 -),男,高级工程师,从事电力系统新型继电保护研究。

A new electromagnetic transient simulation approach accounting for impulsive corona and frequency-dependence line parameters

SHU Hong-chun^{1,2}, XUAN Ying-xia³, LI Yi⁴, SIDa-jun², YU Ji-lai²

(1. Kunming University of Science and Technology, Kunming 650051, China; 2. Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China; 3. Kunming Power Supply Bureau, Kunming 650051, China;

4. Huadian Zhenxiong Power Generation Company, Zhenxiong 657200, China)

Abstract: On the basis of analyzing V-Q characteristic of impulsive corona, the influence of corona is considered by splitting the line into some short lines and inserting equivalent capacity of corona at both terminals of those short lines. As a result, both impulsive corona and frequency-dependence line parameters are included in electromagnetic transient simulation. Lots of simulations show the results including corona are quite different from the results that ignoring corona. The influence of impulsive corona should be considered when lightning strike on line is studied.

This project is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50347026, 50467002), Yunnan R&D Technologies Programme (No. 2000B2-02, 2003GG10), and Basic Research Project of Yunnan Province (No. 2002E0025M, 2004E0020M).

Key words: impulsive corona; electromagnetic transient; transmission line