

基于 Bergeron 模型的 500 kV 变电站雷击过电压计算

朱传华, 刘 念, 田冰冰, 崔东君, 刘 琨
(四川大学 电气信息学院, 四川 成都 610065)

摘要: 针对高压变电站可能遭受雷电侵入波而导致站内电气设备绝缘受损的问题, 利用 Bergeron 等值模型能够简化波在有限长线路上的多次折、反射问题, 方便网络方程和计算程序编写的优点, 提出了一种基于 Bergeron 等值模型分析计算雷击过电压的简易方法, 介绍了无损均匀导线和集中参数元件的 Bergeron 等值模型, 建立了 500 kV 变电站雷击过电压时各电气设备的数学模型。对某 500 kV 变电站进线段遭受雷电侵入波进行过电压计算, 得出设备上的过电压分布, 验证了所提方法的有效性。

关键词: Bergeron 模型; 500 kV 变电站; 分布参数元件; 集中参数元件; 雷击过电压计算

中图分类号: TM 86

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2010)12-0066-04

500 kV 变电站是电力系统的枢纽站, 电气设备多且昂贵, 一旦发生雷害事故, 停电的影响面很大。因此有必要对雷电侵入波在变电站电气设备上所产生的过电压进行分析计算^[1-2]。通过找出过电压的分布及变化规律, 寻求合适的避雷器配置方案和可靠的综合防雷保护措施, 以确保变电站电气设备上可能出现的最大过电压不会超过其绝缘水平。

变电站雷击过电压的计算是一个求解复杂网络中波的传播过程。电路网络中既有集中参数元件, 又有分布参数元件, 而波在有限长线路节点上发生的多次折、反射, 使得计算变得比较复杂, 必须采用合适的计算技巧。本文将 Bergeron 等值模型应用到雷击过电压计算中, 将对复杂网络的求解过程转化为比较通用的集中参数来求解。

1 Bergeron 等值模型

1.1 无损均匀导线的 Bergeron 等值模型

如图 1(a)所示的无损均匀导线, 其波阻抗为 Z , 长度为 l , 波在导线上传播一次的时间为 t_1 , 首端和末端的电压及电流分别为 $u_k(t)$ 、 $u_m(t)$ 、 $i_{km}(t)$ 和 $i_{mk}(t)$ 。端点上电流的正方向都取为从端点流向线路。根据混合波的概念可得下式:

$$i_{km} = \frac{1}{Z} u_k(t) + I_k(t-t_1) \quad (1)$$

$$i_{mk} = \frac{1}{Z} u_m(t) + I_m(t-t_1)$$

$$I_k(t-t_1) = -\frac{1}{Z} u_m(t-t_1) - i_{mk}(t-t_1) \quad (2)$$

$$I_m(t-t_1) = -\frac{1}{Z} u_k(t-t_1) - i_{km}(t-t_1)$$

其中, $t_1 = l/v_c$, v_c 为光速。

由式(1)和式(2)可得无损均匀导线在 t 时刻的等值电路, 如图 1(b)所示。

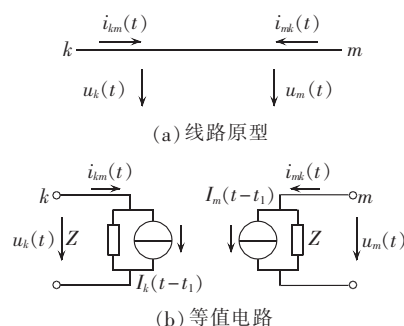


图 1 单相无损均匀导线的 Bergeron 等值模型
Fig.1 Bergeron equivalent model of single-phase lossless uniform conductor

1.2 集中参数元件的 Bergeron 等值模型

1.2.1 电感

如图 2(a)所示的集中参数电感 L , 电感的压降和流过的电流存在如下关系:

$$u_k(t) - u_m(t) = L \frac{di_{km}(t)}{dt} \quad (3)$$

对上式在 $t-\Delta t \sim t$ 进行积分, 得:

$$i_{km}(t) = i_{km}(t-\Delta t) + \frac{1}{L} \int_{t-\Delta t}^t [u_k(t) - u_m(t)] dt \quad (4)$$

利用梯形积分法对上式进行近似计算, 有

$$i_{km}(t) = \frac{\Delta t}{2L} [u_k(t) - u_m(t)] + I_L(t-\Delta t) \quad (5)$$

$$I_L(t-\Delta t) = i_{km}(t-\Delta t) + \frac{\Delta t}{2L} [u_k(t-\Delta t) - u_m(t-\Delta t)] \quad (6)$$

令 $R_L = 2L/\Delta t$, 可将式(5)改写为

$$i_{km}(t) = \frac{1}{R_L} [u_k(t) - u_m(t)] + I_L(t-\Delta t) \quad (7)$$

由上式可得电感的等值电路, 如图 2(b)所示, 其中, R_L 是电感上的等值计算电阻, $I_L(t-\Delta t)$ 是电感的等值电流源。

1.2.2 电容

仿照电感的分析方法, 如图 3 所示, 电容上的电压和流经电容的电流存在如下关系:

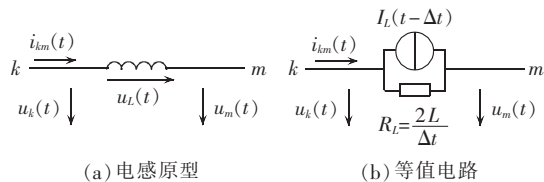


图 2 电感的 Bergeron 等值模型
Fig.2 Bergeron equivalent model of inductance

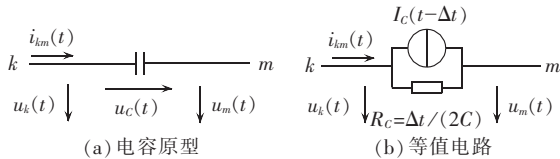


图 3 电容的 Bergeron 等值模型
Fig.3 Bergeron equivalent model of capacitance

$$i_{km}(t) = \frac{1}{R_C} [u_k(t) - u_m(t)] + I_C(t - \Delta t) \quad (8)$$
$$\begin{cases} R_C = \Delta t / (2C) \\ I_C(t - \Delta t) = -i_{km}(t - \Delta t) - \frac{1}{R_C} [u_k(t - \Delta t) - u_m(t - \Delta t)] \end{cases} \quad (9)$$

1.2.3 电阻

由于电阻是非储能元件,在 t 时刻,电阻两端电压和流过的电流与 t 时刻以前的压降和电流无关,故无需进行等值。

2 变电站雷击过电压时的建模分析

2.1 雷击方式的选取

变电站的雷电侵入波分为 3 种情况,即雷击杆塔顶部、雷击避雷线档距中央和雷电绕击导线。

雷电绕击导线的原理可借助绕击的电气几何模型进行分析^[3-4],该模型是以等击距的假设为依据的。由几何模型分析得出,当雷电流大于一定值时,就不会发生绕击;而雷电流较小时,绕击的可能性增大,但此时产生的过电压、过电流幅值都较小。

在线路防雷工程设计中,只要避雷线和导线之间的空气距离满足一定的要求,雷击避雷线档距中央引起的线路闪络跳闸可以忽略不计^[5]。

因此,将雷击杆塔顶部形成的雷电波作为侵入波来分析计算。

2.2 变电站雷击过电压数学模型

2.2.1 雷电侵入波数学模型

雷电侵入波用斜角波形的电压源来模拟,波前时间一般为 $1.2\ \mu\text{s}$,半峰值时间为 $50\ \mu\text{s}$ 。在分析变电站雷电侵入波时,只有当线路绝缘发生闪络之后,幅值等于线路雷电冲击绝缘强度的雷电波才能侵入变电站^[6]。考虑雷电流多为负极性,雷电侵入波的最大幅值为线路绝缘子串负极性的 50% 冲击闪络电压 $U_{50\%}$,对于 500 kV 的线路, $U_{50\%}$ 取 2 060~2 310 kV。

2.2.2 线路数学模型

在高压变电站,通常在时间 $1\ \mu\text{s} < t < 4\ \mu\text{s}$ 时呈现最大的雷击过电压幅值。因此,离变电站 1.5 km

及以上距离的点上反射,可以忽略不计,因为在雷电波传播速度为 $300\ \text{m}/\mu\text{s}$ 时,雷电波在这段线路上往返一次所需的时间超过 $10\ \mu\text{s}$,即在雷电过电压衰减后。凡是与变电站连接的进(出)线路,长度在 1.5 km 及以上均可认为是无穷长,在等值接线中它可用集中有效电阻表示,其值按线路的单相等值波阻抗计算。而变电站母线以及设备之间的连接导线应视为具有分布参数的有限长度线路,必须要考虑在线路节点上的多次折、反射。站内导线近似认为是无畸变线,波阻抗为一常数,不计电晕的影响^[7]。因此,站内导线在计算过程中可按均匀无损导线的 Bergeron 模型处理。与地平行的线路波阻抗由下式决定:

$$Z = 60 \ln(2h/r)$$

其中, h 为导线对地平均高度; r 为导线相线等值半径。500 kV 输电线路一般采用四分裂结构,其波阻抗约为 280 Ω ; 母线波阻抗为 300 Ω 。

2.2.3 变电站设备数学模型

变电站内设备如变压器、断路器、隔离开关、电压/电流互感器等的入口等值阻抗与频率相关,在频率大于 50~70 kHz 时,阻抗呈容性并且数值稳定,随频率增大改变很小^[8]。由于雷电侵入波持续时间短,等值频率很高,因此以上所列设备可以看作以入口电容参与过渡过程^[9]。500 kV 变电站电力设备入口等值电容参考值如表 1 所示。

表 1 设备的入口等值电容
Tab.1 Entrance equivalent capacitance of equipment

设备名称	入口电容值/pF	设备名称	入口电容值/pF
变压器	5000	断路器	800
电压互感器	3000	隔离开关(分/合)	150/300
电流互感器	1000	母线接地器	150

2.2.4 避雷器数学模型

由于 ZnO 避雷器具有优异的非线性伏安特性和较大的通流量,在 500 kV 变电站中得以广泛应用。ZnO 电阻片的非线性特性主要取决于晶界层,在低电场下其电阻率很高,当层间电位梯度达到 $10^4 \sim 10^5\ \text{V}/\text{cm}$ 时,其电阻率急剧下降到低阻状态,其伏安特性曲线如图 4 所示。

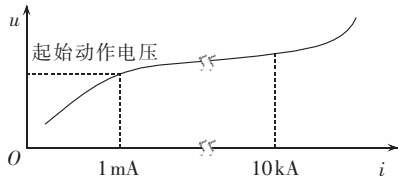


图 4 避雷器伏安特性曲线
Fig.4 Volt-ampere characteristic curve of arrester

在电压上升初期,即避雷器动作前,可将避雷器看作是线性的,此时对应的数学模型是一个线性函数 $u=ki$,避雷器动作后,则看作是非线性函数 $u=c i^\alpha$, k, c, α 可根据厂家提供的避雷器电气特性参数计算得到^[10]。

2.2.5 杆塔模型

杆塔的计算模型一般分为集中电感、单一波阻抗和多波阻抗模型^[11-13]。在工程近似计算时常将杆塔视为分布参数,按单一波阻抗模型考虑^[14]。杆塔的等值波阻抗一般取 150Ω ,其冲击对地电阻按照 150Ω 计算。

3 实例分析

以某 500 kV 变电站为例,该变电站设计方案为近期工程 2 组变压器,2 回进出线。为了简化分析,以单线单变的运行方式来研究雷击过电压,2 号主变压器投入,线路 1 向外输电,雷电波从线路 1 侵入变电站。变压器旁、母线上以及线路进出线上都接有避雷器,其主接线如图 5 所示。图中电流互感器、隔离开关、母线接地器等没有画出。

对于上面的主接线电路,可将其等效为只含电容、避雷器和线段的节点电路^[15],2 条不同线段的相交处附加了一个 10^{-10}pF 的电容,此电容甚小,不会影响计算结果,如图 6 所示。对节点进行编号,其中节点

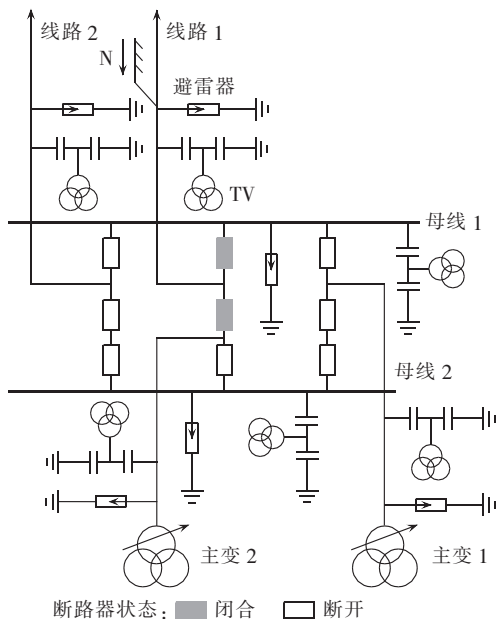


图 5 变电站主接线图

Fig.5 Main electrical connection diagram of substation

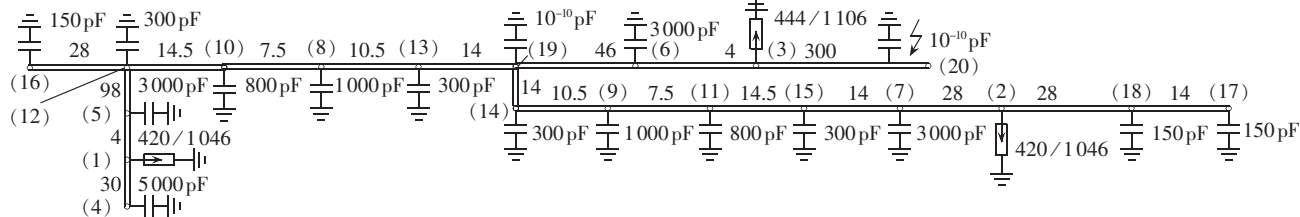


图 6 变电站等值电路图

Fig.6 Equivalent circuit for substation

(1)(2)(3)为避雷器,(4)为变压器,(5)(6)(7)为电压互感器,(8)(9)为电流互感器,(10)(11)为断路器,(12)~(15)为闭合的隔离开关,(16)(17)为断开的隔离开关,(18)为母线接地开关,(19)(20)为附加电容。对于上述节点电路可以按 7 个步骤进行计算分析,并采用 Matlab7.1 编写计算程序,计算流程如图 7 所示。

步骤 1:把变电站内的线段和电容转化成相应的

Bergeron 等值模型。

步骤 2:根据转化成的 Bergeron 等值模型和给定的变电站联接方式,生成节点导纳矩阵。

步骤 3:把电压源型的侵入波化为电流源型,并计算每时刻的侵入值。

步骤 4:选好合适的步长 Δt ,计算线段和电容的 Bergeron 等值模型中的电流源,并随时间不断更新。

步骤 5:列写节点电压方程,算出节点电压。

步骤 6:对有避雷器的节点,当节点开路电压达到避雷器的起始放电电压时,用迭代法解出避雷器的放电电流,并用放电后的电压值取代放电前的电压值。

步骤 7:求出每一节点的最大电压以及避雷器的放电时间和放电电流。

计算时,线路绝缘的 $U_{50\%}$ 取 2 300 kV,避雷器的起始动作电压选 597 kV,得到电气设备上最大过电压如表 2 所示。

表 2 电气设备上的最大过电压值

Tab.2 Overvoltage maximums of electrical equipments

设备名称	过电压值/kV	设备名称	过电压值/kV
变压器	1 254	断路器	984
电压互感器	1 051	隔离开关	925
电流互感器	996	母线接地器	1 134

图 7 过电压计算流程

Fig.7 Flowchart of overvoltage calculation

4 结论

a. Bergeron 等值计算模型主要特点是通过引入等值电流源的概念,利用各节点在不同时刻下的电压和电流之间的关系来代替行波的折、反射关系,使波在有限长线路上的多次折、反射问题的计算变得简单。

b. Bergeron 等值计算模型是由电阻和电流源并联组成的诺顿电路,由于这些元件的暂态等效离散电路具有统一的形式,给列写整个网络方程和编写计算程序带来很大方便。

c. 在变电站雷击过电压计算中,对于具有分布参数的有限长线路和站内电气设备的入口等值电容,可以分别转化为无损线的 Bergeron 等值模型和电容的 Bergeron 等值模型来计算,通过计算得出设备上的过电压分布,以寻求可靠的防雷保护措施。

参考文献:

- [1] 张纬钹,何金良,高玉明. 电力系统防护及绝缘配合[M]. 北京:清华大学出版社,2002:126-143.
- [2] 解广润. 电力系统过电压[M]. 北京:水利电力出版社,1985:206-218.
- [3] 陈维贤. 电网过电压教程[M]. 北京:中国电力出版社,1996:118-122.
- [4] 林福昌. 高电压工程[M]. 北京:中国电力出版社,2006:200-202.
- [5] 张志劲,廖瑞金,孙才新. 500 kV 同杆双回输电线路耐雷性能分析[J]. 重庆大学学报,2003,26(7):70-73.
ZHANG Zhijin, LIAO Ruijin, SUN Caixin. Analysis on the lightning protection performance of 500 kV double-circuit transmission line[J]. Journal of Chongqing University, 2003, 26(7):70-73.
- [6] 袁兆祥,周洪伟. 500 kV HGIS 变电站雷电侵入波的计算分析[J]. 高电压技术,2007,33(6):71-75.
YUAN Zhaoxiang, ZHOU Hongwei. Calculation and study of lightning intruding surge for 500 kV HGIS substation[J]. High Voltage Engineering, 2007, 33(6):71-75.
- [7] 中华人民共和国电力工业部. DL/T620-1997 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合[S]. 北京:中国电力出版社,1997.
- [8] 许颖,徐士珩. 交流电力系统过电压防护与绝缘配合[M]. 北京:中国电力出版社,2006:42-48.
- [9] 刘渝根,刘伟. 500 kV 变电站雷电入侵波研究[J]. 重庆大学学报,2000,23(3):17-19.
- [10] LIU Yugen, LIU Wei. Research on lightning intruded wave for 500 kV substation[J]. Journal of Chongqing University, 2000, 23(3):17-19.
- [11] 杨刚,张艳霞,陈超英. 电力系统过电压计算及避雷器的数字仿真研究[J]. 高电压技术,2001,27(3):64-66.
YANG Gang, ZHANG Yanxia, CHEN Chaoying. Power system transient overvoltage calculation and study of arrester's digital simulation[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(3):64-66.
- [12] 莫付江,陈允平,阮江军. 输电线路杆塔模型与防雷性能计算研究[J]. 电网技术,2004,28(21):80-84.
MO Fujiang, CHEN Yunping, RUAN Jiangjun. Study on transmission tower models and their lightning performance calculation[J]. Power System Technology, 2004, 28(21):80-84.
- [13] 张永记,司马文霞,张志劲. 防雷分析中杆塔模型的研究现状[J]. 高电压技术,2006,32(7):93-97.
ZHANG Yongji, SIMA Wenxia, ZHANG Zhijin. Summary of the study of tower models for lightning protection analysis[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(7):93-97.
- [14] 张颖,高亚栋,杜斌,等. 输电线路防雷计算中的新杆塔模型[J]. 西安交通大学学报,2004,38(4):365-368.
ZHANG Ying, GAO Yadong, DU Bin, et al. New tower model in calculation of lightning protection on transmission line[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2004, 38(4):365-368.
- [15] 匡洪海,肖仲平. 500 kV 变电站雷击保护的建模分析[J]. 高压电器,2008,44(5):409-412.
KUANG Honghai, XIAO Shenping. Modeling and analysis of lightning protection for 500 kV substation[J]. High Voltage Apparatus, 2008, 44(5):409-412.
- [16] 李福寿. 电力系统过电压计算[M]. 北京:水利水电出版社,1988:60-64.

(编辑:柏英武)

作者简介:

朱传华(1986-),男,湖北仙桃人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统过电压分析(E-mail: huahuaowo@126.com);
刘念(1956-),男,重庆人,教授,博士,主要研究方向为电力系统安全监控与故障诊断新技术;
田冰冰(1984-),女,河南洛阳人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统过电压分析;
崔东君(1984-),男,北京人,硕士研究生,主要研究方向为电气设备故障诊断新技术;
刘琨(1982-),男,山西长治人,硕士研究生,主要研究方向为电气设备故障诊断新技术。

Lightning overvoltage calculation based on Bergeron model for 500 kV substation

ZHU Chuanhua, LIU Nian, TIAN Bingbing, CUI Dongjun, LIU Kun

(School of Electrical Engineering and Information, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: As the lightning intruding wave may destroy the insulation of electrical equipments in high-voltage substation, a simple lightning overvoltage calculation method is proposed based on Bergeron equivalent model, which simplifies the multi-catadioptric problem of waves on the finite line, as well as the network equations and calculation program. The Bergeron equivalent models of lossless uniform conductor and lumped parameter elements are described and the mathematical models of 500 kV substation electrical equipments with lightning overvoltage are established. The overvoltage is calculated for 500 kV substation inlet line undergoing lightning intruding and its distribution on equipments is obtained, which proves the proposed method is effective.

Key words: Bergeron model; 500 kV substation; distributed parameter element; lumped parameter element; lightning overvoltage calculation