

DOI:10.12158/j.2096-3203.2019.05.009

特高压杆塔的非均匀传输线模型

余敬秋, 徐政

(浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要:随着输电电压等级的提高,线路杆塔也越来越高,其从底部到顶部空间结构变化也越大。如果特高压杆塔仍采用多波阻抗模型,则不能反应其呼高的空间结构变化所产生的影响。文中首先介绍了杆塔的多波阻抗模型,然后指出多波阻抗模型的不足,再从杆塔物理结构出发搭建了杆塔简化的非均匀传输线模型。文中还将杆塔呼高用多段波阻抗模拟,研究杆塔呼高空间结构变化对其电磁暂态特性的影响。最后,对比了非均匀传输线模型和分段多波阻抗模型下杆塔的雷电电磁暂态响应,表明相比于多波阻抗模型,非均匀传输线模型更适用于特高压杆塔雷电暂态分析。

关键词:特高压杆塔;多波阻抗模型;非均匀传输线模型;防雷分析;杆塔电磁暂态响应

中图分类号:TM72

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2019)05-0055-08

0 引言

国内外多年的线路运行经验表明,由雷击造成的线路跳闸事故占线路总跳闸事故的40%~70%^[1],在地形地貌复杂、高土壤电阻率以及落雷密度较高的地区,线路雷击跳闸事故尤为突出^[2-4]。相较于普通高度的杆塔而言,特高压杆塔遭受雷击时的过电压水平更高,对绝缘的要求也更高,因此杆塔建模的精确性直接影响到输电线路的防雷分析计算结果的可靠性。

工程上普遍采用的杆塔模型是Hara等提出的多波阻抗模型^[5-6],此模型以横担为节点将杆塔分为几个部分,每个部分用一段波阻抗等值。随着输电电压等级的提高,为了满足绝缘需求,杆塔也需随之增高。此时如果呼高仅用一段波阻抗来模拟,则不能反映呼高的空间结构变化对杆塔电磁暂态响应产生的影响。

针对杆塔模型的搭建,文献[7]在波阻抗模型基础上,将杆塔的呼高用11段波阻抗模拟,来研究塔身结构变化对杆塔雷电暂态特性的影响;文献[8]通过双锥天线理论和电磁场仿真提出了杆塔多波阻抗的计算公式;文献[9]通过双锥天线理论推导了杆塔的分段参数,并计及了杆塔不同部分之间的互耦作用;文献[10]搭建了复合材料杆塔的分段参数模型,杆塔金属部分的分段参数也是基于双锥天线理论推导而得。此外,尚无任何关于杆塔分布

参数模型的文献,亦没有文献讨论该模型在特高压杆塔电磁暂态分析中的应用。

文中提出了一种简化的非均匀传输线模型,将杆塔塔身等效为单柱结构,并通过双锥天线理论推导其非均匀分布参数,横担部分用波阻抗模拟。在此基础上分析了非均匀传输线模型在特高压杆塔电磁暂态分析中的适用性。通过比较杆塔的分段多波阻抗模型和非均匀传输线模型下的电磁暂态响应,验证了非均匀传输线模型更适用于特高压杆塔的雷电电磁暂态分析。

1 杆塔的多波阻抗模型

多波阻抗模型既考虑了杆塔中的波过程,又考虑了塔自身结构、尺寸对波阻抗取值的影响,相比传统的杆塔模型而言更符合实际情况。常见的多波阻抗模型有多层传输塔模型、多层传输塔简化模型、Hara多波阻抗模型以及西安交通大学多波阻抗模型^[6,11-16]。其中,采用Hara多波阻抗模型计算得到的暂态响应特性和实测值最为接近,如图1所示。

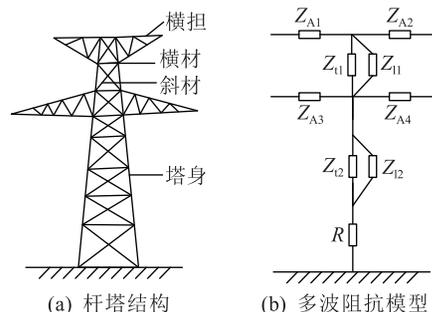


图1 杆塔结构及多波阻抗模型示意
Fig.1 Tower structure and multi-surge impedance model

收稿日期:2019-03-01;修回日期:2019-04-06

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目“±1100 kV 换流站高频特性及高频滤波器优化研究”(0711-160TL09413-001-007)

多波阻抗模型由塔身、支架和横担三部分组成,每部分的波阻抗 Z 用其尺寸和几何形状的公式表示。该模型考虑了横担和支架对波阻抗 Z 的影响,适合推广到结构复杂、高度较高的传输塔上。主要用于 500 kV 输电线路防雷计算,且需要修正塔身的波阻抗以解决最初的低耦合系数的影响^[17-18]。

塔身部分波阻抗为^[6]:

$$Z_{tk} = 60 \left(\ln \frac{2\sqrt{2}h_k}{r_{ek}} - 2 \right) \quad k = 1, 2 \quad (1)$$

式中: Z_{tk} 为塔身的波阻抗; h_k 为塔身的高度; r_{ek} 为塔身的等效半径。

支架部分波阻抗为:

$$Z_{lk} = 9Z_{tk} \quad k = 1, 2 \quad (2)$$

式中: Z_{lk} 为支架的波阻抗。

横担部分波阻抗为:

$$Z_{Ak} = 60 \ln \left(\frac{2h_k}{r_{Ak}} \right) \quad k = 1, 2, 3, 4 \quad (3)$$

式中: Z_{Ak} 为横担波阻抗; h_k 为横担对地高度; r_{Ak} 为杆塔连接处的横担宽度的 1/4。

2 杆塔的非均匀传输线模型

鉴于杆塔的呼高已经成为了杆塔的主要部分,仅用一段波阻抗模拟不能反映杆塔呼高空间结构变化对其暂态特性的影响,因此针对多波阻抗模型的这一不足,文中搭建了非均匀传输线模型。

杆塔塔身通常由 4 根主材组成,通过其他较短的横材和斜材连接。雷电流在杆塔的不同部分上的传播是一个涉及球面波的四维问题。文献[19]指出,雷电流在传播过程中有不超过 1% 的能量沿着斜材传播,而几乎不沿着横材传播。因此,在建模过程中可以不考虑这些较短的横材和斜材,即雷电流仅沿着塔身主材传播。因此可认为雷电流在杆塔中传播的主要模式是横电磁波,基于此可以推导出杆塔塔身的特征阻抗,进而推导出其分布参数。

杆塔塔身通常为梯形结构,由 4 个不平行导体组成的。在推导柱体微元参数时,塔身的每个立柱微元四导体系统可通过集束公式等效为一个单导体结构,公式如下^[9]:

$$r_{eq} = \sqrt[3]{4 \times r_{end} \times r_{circ}^3} \quad (4)$$

式中: r_{eq} 为四导体系统等值半径; r_{end} 为单根导体自身的半径; r_{circ} 为四导体系统的外接圆半径,如图 2 所示。外接圆半径求取公式为:

$$r_{circ} = \frac{d}{2\sin(\pi/4)} = \frac{d}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

式中: d 为导体间距。

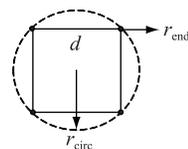


图 2 杆塔塔身横截面

Fig. 2 Tower cross section

如果每个立柱微元四导体系统均用圆形截面的等效导体近似,则杆塔塔身可以被建模为一个等值的圆柱形导体系统,如图 3 所示。

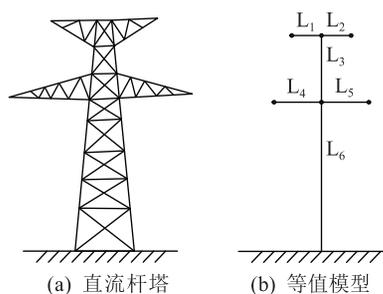


图 3 直流杆塔及其等值模型

Fig.3 DC tower and its equivalent model

因此,杆塔塔身的电磁暂态响应可由电报方程^[20]描述:

$$-\frac{\partial u(h,t)}{\partial h} = R(h)i(h,t) + L(h) \frac{\partial i(h,t)}{\partial h} - \frac{\partial i(h,t)}{\partial h} = C(h) \frac{\partial u(h,t)}{\partial h} \quad (6)$$

式中: $L(h)$, $R(h)$, $C(h)$ 分别为导体单位长度的电感、电阻和电容,随柱体微元的高度变化而变化。

电感 $L(h)$ 由三部分构成:

$$L(h) = L_C(h) + L_E(h) + L_C(h) \quad (7)$$

式中: $L_C(h)$ 反应了空气中的磁通作用; $L_E(h)$ 反应了大地并非理想导电平面; $L_C(h)$ 为导体的内电感。

电阻 $R(h)$ 由两部分组成:

$$R(h) = R_E(h) + R_C(h) \quad (8)$$

式中: $R_E(h)$ 了反应大地的有限导电性; $R_C(h)$ 为杆塔自身的内电阻。至于电容 $C(h)$, 则只包括几何电容 $C_C(h)$, 反应了导体周围的电场效应。

2.1 横担部分

水平横担 L_1 、 L_2 、 L_4 、 L_5 与地面平行。因此,将其等效为单导体系统后,其分布参数处处相等。即杆塔横担部分可用一段波阻抗模拟,且波阻抗 Z_A 可按如下公式计算^[21]:

$$Z_A = 60 \ln \frac{2h_{cross}}{r} \quad (9)$$

式中: h_{cross} 为横担对地高度; r 为杆塔连接处的横担宽度的 1/4。

2.2 塔身部分

杆塔的塔身 L_3 、 L_6 与地面垂直,因此受到大地影响,杆塔不同高度处的参数不同,即杆塔塔身部分可用非均匀传输线模型模拟。由于杆塔塔身部分的横截面半径远远小于其长度,因此雷电波可看作以球面波的形式在杆塔上传播,球面波的传播类似于双锥天线中横电磁波的传播。

图 4 所示为半径 r_{eq} 、高 H 的圆柱导体上一离地面高度为 h 的柱体微元 dh 。其中,微元中球面波的传播可看作是图 4 (b) 所示的双锥天线。

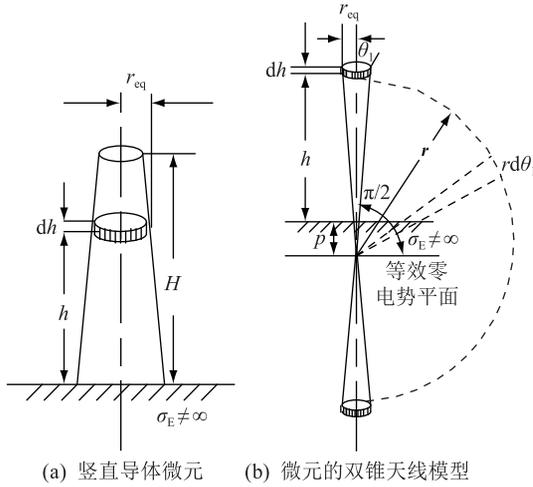


图 4 竖直导体微元及其双锥天线模型

Fig.4 Vertical conductor infinitesimal element and its biconical antenna model

图 4 中, p 为电磁波向大地传播的透入深度,其计算公式为^[20]:

$$p = \frac{1}{\sqrt{j\omega\mu_E\sigma_E}} \quad (10)$$

式中: μ_E 、 σ_E 分别为土壤的磁导率和电导率; ω 为角频率。

杆塔的塔身通常为梯形结构,因此塔身竖直导体微元等效半径的求取采用等比例法^[9],如图 5 所示。

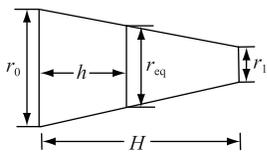


图 5 杆塔塔身竖直微元等效半径

Fig.5 Vertical infinitesimal equivalent radius of tower body

其等效半径为:

$$r_{eq} = r_0 - \frac{r_0 - r_1}{H}h \quad (11)$$

式中: r_0 为塔基的等效半径; r_1 为塔顶的等效半径; H

为杆塔的高度; h 为竖直微元所处的高度。

双锥天线中横电磁波的电场和磁场强度在球面坐标系 (r, θ, φ) 下可表示为^[22]:

$$\begin{cases} H_\varphi = A_0 e^{-i\beta r} / (r \sin\theta) \\ E_\theta = \sqrt{\mu/\varepsilon} H_\varphi \\ E_r = E_\varphi = H_\theta = H_r = 0 \\ \beta = \omega\sqrt{\mu\varepsilon} \end{cases} \quad (12)$$

式中: A_0 为矢量磁位; β 为相位常数; μ 、 ε 分别为空气介质的磁导率和介电常数; H_r 、 H_θ 、 H_φ 和 E_r 、 E_θ 、 E_φ 分别为球面坐标系下的磁场强度和电场强度。

故,对竖直微元“ dh ”而言,其电压 U 可由下式求得^[23]:

$$U = \int_{\theta_1}^{\pi/2} E_\theta r d\theta \quad (13)$$

式中: θ_1 为锥形天线锥角的一半; $\pi/2$ 为双锥天线竖直轴线与地面的夹角,如图 4(b) 所示。

由安培环路定理,流过微元的电流 I 为:

$$I = \int_0^{2\pi} H_\varphi r_{eq} d\varphi \quad (14)$$

将式(12)代入式(13)和式(14),化简得到:

$$U = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} A_0 e^{-i\beta r} \ln \left[\cot \left(\frac{\theta_1}{2} \right) \right] \quad (15)$$

$$I = 2\pi A_0 e^{-i\beta r} \quad (16)$$

联立式(15)和式(16)可得到圆锥天线的特征阻抗 Z_0 :

$$Z_0 = \frac{U}{I} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \left[\cot \left(\frac{\theta_1}{2} \right) \right] \quad (17)$$

根据几何关系:

$$\cot \left(\frac{\theta_1}{2} \right) = \frac{\sqrt{(h+p)^2 + r_{eq}^2} + (h+p)}{r_{eq}} \quad (18)$$

将式(18)代入式(17)中得:

$$\begin{aligned} Z_0 &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \frac{\sqrt{h^2 + r_{eq}^2} + h}{r_{eq}} + \\ &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \frac{\sqrt{(h+p)^2 + r_{eq}^2} + (h+p)}{\sqrt{h^2 + r_{eq}^2} + h} = \\ &= Z_C + Z_E \end{aligned} \quad (19)$$

$$Z_C = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \frac{\sqrt{h^2 + r_{eq}^2} + h}{r_{eq}} \quad (20)$$

$$Z_E = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}} \ln \frac{\sqrt{(h+p)^2 + r_{eq}^2} + (h+p)}{\sqrt{h^2 + r_{eq}^2} + h} \quad (21)$$

进而可得竖直导体的几何电感 L_C , 几何电容 C_C 如下:

$$\begin{cases} L_G = \sqrt{\mu\epsilon} Z_G \\ C_G = \mu\epsilon (L_G)^{-1} \end{cases} \quad (22)$$

则广义地电感为:

$$L_{EC} = \sqrt{\mu\epsilon} Z_E \quad (23)$$

地电感和地电阻分别为:

$$\begin{cases} L_E = \text{Re} L_{EC} \\ R_E = -\omega \text{Im} L_{EC} \end{cases} \quad (24)$$

由于导体在流经高频电流时会产生趋肤效应,因此当雷电流流入导体时,导体自身还存在内电感和内电阻,其计算式如下:

$$\begin{cases} Z_C = \sqrt{j\omega\mu_c\rho}/2\pi r_{eq} \\ L_C = \text{Im} Z_C/\omega \\ R_C = \text{Re} Z_C \end{cases} \quad (25)$$

式中: ρ 为导体的电阻率; μ_c 为导体的磁导率。

因此,可通过式(22)、式(24)和式(25)得到塔身 L_3 和 L_6 的分布电感参数 $L(h)$;通过式(24)和式(25)得到其分布电阻参数 $R(h)$;通过式(25)得到其分布电容参数 $C(h)$;通过式(9)得到水平横担部分 L_1 、 L_2 、 L_4 和 L_5 的波阻抗。基于以上便可搭建杆塔的非均匀传输线模型。

3 仿真分析

3.1 仿真模型及参数

文中计算所用的特高压杆塔的实际形状及其波阻抗模型如图 6 所示,其各项参数如表 1 所示。其中,塔身波阻抗 Z_1 、支架波阻抗 Z_1 、横担波阻抗 Z_A 可分别由式(1)、式(2)、式(3)计算得到, R 为杆塔接地电阻,设为 10Ω 。计算所得该模型波阻抗参数如表 2 所示。

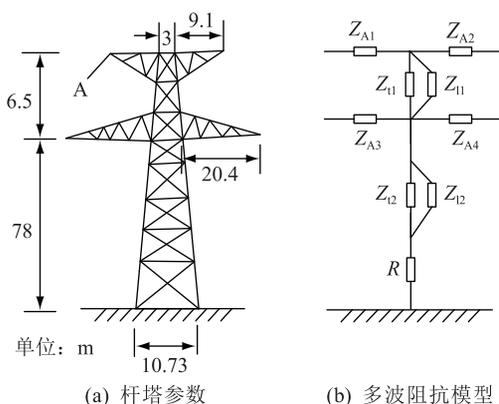


图 6 杆塔参数及多波阻抗模型

Fig.6 Tower parameters and multi-surge impedance model

雷电流采用双指数形式的电流源模型,雷电通道波阻抗取 300Ω ,幅值取 260 kA ,并取杆塔顶部作

表 1 杆塔的部分参数

Table 1 Part of tower parameters

项目	数值	项目	数值
材料	铁	导体根数	4
电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m}^{-1})$	9.09×10^{-7}	单根半径/m	0.1
磁导率/ $(\text{H} \cdot \text{m}^{-1})$	$4\pi \times 10^{-4}$	最大间距/m	10.73
地电阻率/ $(\Omega \cdot \text{m})$	30	最小间距/m	3.0

表 2 多波阻抗模型参数取值

Table 2 Parameter values of multi-surge impedance model Ω

参数	数值	参数	数值
Z_{A1}	288	Z_{A2}	288
Z_{A3}	270	Z_{A4}	270
Z_{11}	180	Z_{11}	1 620
Z_{12}	141	Z_{12}	1 269

为雷击点进行分析。绝缘子采用 1 pF 电容模拟,其闪络判据取先导法。杆塔两侧连接的输电线路采用 PSCAD 频率相关相域模型,远处的杆塔及输电线路采用 Bergeron 模型^[24],波阻抗取为 300Ω ,波速取为 $3 \times 10^8 \text{ m/s}$,如图 7 所示。

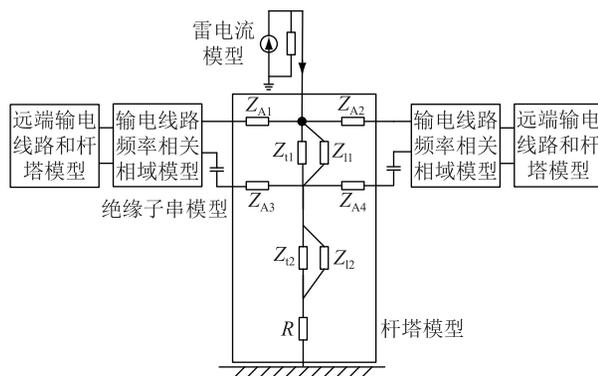


图 7 仿真模型示意

Fig.7 Simulation model

3.2 分段多波阻抗模型仿真结果分析

特高压杆塔的呼高较高,占据塔高的 50% 以上,且杆塔塔身从顶部到底部的结构、尺寸等变化很大。如果仅用一段波阻抗模拟,并不能反应杆塔自身空间结构变化对其电磁暂态特性的影响。因此,文中在多波阻抗模型的基础上,将杆塔的呼高划分为 4、6、8 段,分析呼高的精细化划分对杆塔电磁暂态特性的影响。改进后的杆塔模型如图 8 所示,呼高分段化后的各段波阻抗由式(1)、式(2)、式(3)进行计算,得到的呼高划分为 4、6、8 段时模型参数如表 3、表 4、表 5 所示。

文中采用 PSCAD 仿真软件分析雷击时杆塔的暂态特性,雷击点取在避雷线与杆塔的交接处,即图 6 中的 A 点,得到的塔顶电压波形如图 9 所示,波

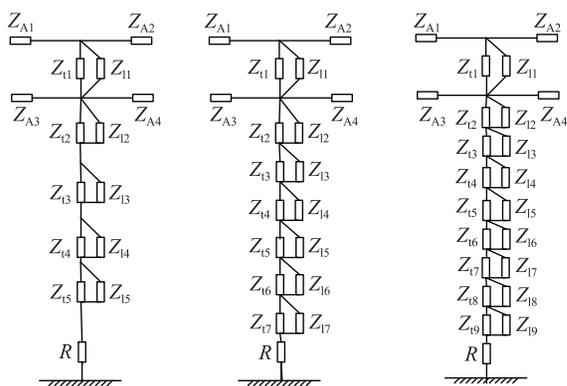


图8 杆塔呼高划分为4、6、8段时的杆塔模型

Fig.8 Tower model when the nominal height is divided into 4, 6, and 8 segments

表3 呼高划分为4段时的参数

Table 3 Parameters when the nominal height is divided into 4 segments Ω

参数	数值	参数	数值
Z_{A1}	288	Z_{A2}	288
Z_{A3}	270	Z_{A4}	270
Z_{11}	180	Z_{11}	1 620
Z_{12}	160	Z_{12}	1 440
Z_{13}	130	Z_{13}	1 170
Z_{14}	96	Z_{14}	864
Z_{15}	46	Z_{15}	414

表4 呼高划分为6段时的参数

Table 4 Parameters when the nominal height is divided into 6 segments Ω

参数	数值	参数	数值
Z_{A1}	288	Z_{A2}	288
Z_{A3}	270	Z_{A4}	270
Z_{11}	180	Z_{11}	1 620
Z_{12}	163	Z_{12}	1 467
Z_{13}	143	Z_{13}	1 287
Z_{14}	121	Z_{14}	1 089
Z_{15}	97	Z_{15}	873
Z_{16}	67	Z_{16}	603
Z_{17}	20	Z_{17}	180

峰附近的波动过程如图10所示。

从图9和图10中杆塔塔顶电压的波动过程可以看出：

(1) 随着杆塔呼高分段数增加,塔顶电压的幅值逐渐降低,相比于呼高用1段波阻抗模拟,呼高划分为8段时的过电压幅值下降了约15.6%。这是因为随着划分段数的增加,杆塔呼高的几何空间结构被更加细化地模拟,其波阻抗也被更加精细地划分为几个部分,各部分波阻抗值依次减小,因而塔顶电压峰值相应的减小。

表5 呼高划分为8段时的参数

Table 5 Parameters when the nominal height is divided into 8 segments Ω

参数	数值	参数	数值
Z_{A1}	288	Z_{A2}	288
Z_{A3}	270	Z_{A4}	270
Z_{11}	180	Z_{11}	1 620
Z_{12}	165	Z_{12}	1 485
Z_{13}	149	Z_{13}	1 341
Z_{14}	134	Z_{14}	1 206
Z_{15}	117	Z_{15}	1 053
Z_{16}	98	Z_{16}	882
Z_{17}	77	Z_{17}	693
Z_{18}	48	Z_{18}	432
Z_{19}	3	Z_{19}	27

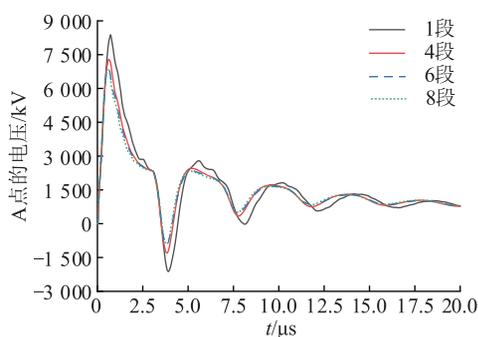


图9 不同分段模型下塔顶A点的电压仿真结果

Fig.9 Voltage simulation results at A point on the tower top under different segmental models

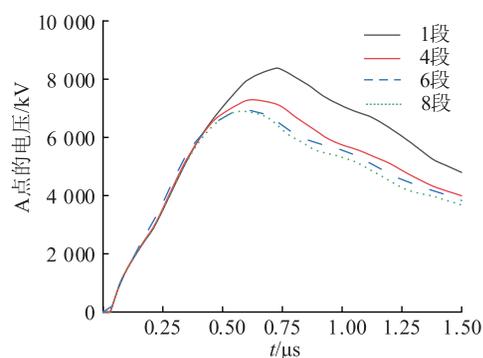


图10 不同分段模型下塔顶电压峰值附近波形

Fig.10 Waveform near peak voltage of tower top using different segmentation models

(2) 采用不同分段模型时,电压整体的波动趋势基本不变,说明杆塔呼高采用不同分段划分模型时,雷电波在杆塔上的传播过程基本相同。

(3) 随着杆塔呼高划分段数增加,塔顶电压的峰值出现的时刻越来越早,相比于呼高用1段波阻抗模型模拟时,呼高划分为8段时的过电压峰值出现的时刻提前约0.15 μs ,这是因为杆塔呼高划分段数越多,越接近地面的部分高度越小而等效半径越

大,因而越接近地面的部分的波阻抗就越小。因此,当雷电波还未传至塔底时,已经有部分反射波返回至塔顶,这部分反射波使得塔顶电压峰值时刻提前,峰值减小。

(4) 杆塔呼高划分段数增加时,电压峰值的下降梯度越来越小,当呼高划分为6段和8段时塔顶电压的波动差别不大,说明杆塔呼高分段数达到一定程度时,塔顶电压峰值达到饱和,此时再细分,对杆塔的电磁暂态响应影响不大。

综上所述,杆塔呼高划分得越细,杆塔上的波过程就越接近实际,杆塔呼高空间结构的变化就被模拟得越精确。但是,随着杆塔高度和结构的不同,达到饱和值的杆塔呼高分段数也就不同,因而多分段数的多波阻抗模型在以精度为需求的实际应用中需要试探达到饱和值时的分段数,因此该模型缺乏灵活性和可靠性。

3.3 非均匀传输线模型的仿真结果分析

为验证非均匀传输线模型的准确性和有效性,文章将非均匀传输线模型与不同分段数模型下的电磁暂态响应进行对比分析,得到塔顶的电压波形如图11所示,峰值附近的波形情况如图12所示。

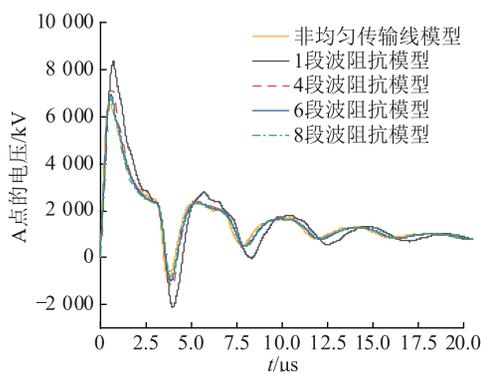


图11 采用不同模型时塔顶电压的仿真结果

Fig.11 Simulation results of tower top voltage using different models

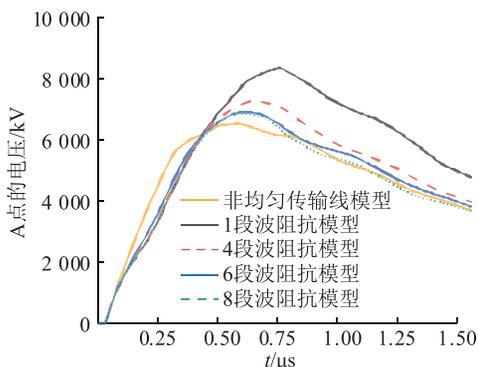


图12 采用不同模型时塔顶电压峰值附近波形

Fig.12 Waveforms near peak voltage of tower top using different models

从图11和图12可以看出,采用非均匀传输线模型所得的电压波形与呼高划分为8段时的波动趋势基本一致。二者的差别在于:

(1) 采用非均匀传输线模型所得的电压峰值比8段划分的多波阻抗模型低;

(2) 采用非均匀传输线模型所得的电压波形波动程度更大,但基本波动趋势一致。

从理论上讲,随着杆塔塔身竖直部分分段数增多,杆塔每部分的电磁暂态响应也将被模拟得更加精确。将杆塔塔身竖直部分分段,每段用波阻抗模型去模拟,可以理解为将杆塔的每一段都用均匀分布参数模拟。而非均匀传输线模型计及不同高度处杆塔微元的参数不同,相当于多波阻抗模型的划分的段数接近于无穷大,因而其波动过程比多分段数的多波阻抗模型复杂,峰值也相应地下降,所模拟的暂态过程也就更接近实际。

综上所述可得,采用非均匀传输线模型分析杆塔的电磁暂态响应比波阻抗模型更加精确,该模型体现了特高压杆塔的参数随着高度的降低和等效半径的增大而变化,因而更加接近于实际杆塔的暂态波动过程。在进行防雷分析计算中,采用非均匀传输线模型所得的计算精度更高,仿真结果更具可靠性和参考价值。

4 结论

文中对杆塔的多波阻抗模型进行了介绍,并搭建了杆塔的非均匀传输线模型,分析了不同分段数多波阻抗模型下杆塔的电磁暂态响应,并将非均匀传输线模型所得的响应与其对比,得出以下结论:

(1) 随着杆塔呼高分段数的增加,杆塔塔顶电压的波形峰值逐渐降低,峰值时间逐渐减小,杆塔的电磁暂态响应被模拟得更加精确,而且当杆塔分段数达到一定程度时,杆塔的暂态响应波形基本不变。

(2) 采用非均匀传输线模型所得杆塔的暂态响应与达到饱和时的多波阻抗模型非常接近,说明在防雷分析中采用非均匀传输线模型所得到的结果更具可靠性,规避了为达到足够的精度对多波阻抗模型分段数的试探。

(3) 文中建立的非均匀传输线模型与多段多波阻抗模型的电磁暂态响应一致。相比于多波阻抗模型,该模型能够更真实地反映杆塔空间结构的变化,更适合于特高压杆塔的雷电暂态分析。

(4) 杆塔模型的准确性决定了防雷保护仿真分析结果的可靠性。杆塔结构变得越来越复杂,普通

的多波阻抗模型已不再适用,必须建立更加精确的杆塔模型。未来杆塔的建模应基于其自身的物理结构,并且能较好地反应雷电流流经杆塔时产生的电磁场作用。

参考文献:

- [1] 王春杰,祝令瑜,汲胜昌,等. 高压输电线路和变电站雷电防护的现状与发展[J]. 电瓷避雷器,2010(3):35-46.
WANG Chunjie, ZHU Lingyu, JI Shengchang, et al. Present and development of lightning protection for HV transmission lines and substations[J]. Insulators and Surge Arresters, 2010(3):35-46.
- [2] GRANT I S, ANDERSON J G, HILEMAN A R, et al. A simplified method for estimating lightning performance of transmission lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(4):919-932.
- [3] 徐伟,路永玲,唐梦颖,等. 江苏电网近年雷电活动及输电线路雷击跳闸分析[J]. 电力工程技术, 2017, 36(6):106-110.
XU Wei, LU Yonglin, TANG Mengying, et al. Analysis of lightning activities and transmission line lightning strike tripping in Jiangsu power grid in recent years[J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(6):106-110.
- [4] 李培国. 国外对特高压输电线路雷击跳闸原因的一个新观点[J]. 电网技术,2000,24(7):63-65.
LI Peigu. A new viewpoint about lightning trip-out of UHV transmission lines [J]. Power System Technology, 2000, 24(7): 63-65.
- [5] 徐志鸿. 雷击下杆塔电位分布及变电站雷电侵入波的研究[D]. 北京:华北电力大学(河北),2006.
XU Zhihong. Lightning transient study of transmission tower and analysis of invaded wave to substation[D]. Beijing:North China Electric Power University (Hebei),2006.
- [6] HARA T, YAMAMOTO O. Modelling of a transmission tower for lightning-surge analysis [J]. Generation, Transmission and Distribution, IEE-Proceedings, 1996, 143(3):283-289.
- [7] 王东举,周浩,陈稼苗,等. 特高杆塔的多波阻抗模型设计及雷击暂态特性分析[J]. 电网技术,2007,31(23):11-16.
WANG Dongju, ZHOU Hao, CHEN Jiamiao, et al. Design of multi-surge impedance model for ultra-high transmission tower and analysis on its transient characteristic caused by lightning stroke[J]. Power System Technology, 2007, 31(23):11-16.
- [8] 杜林,糜翔,肖中男,等. 输电线路杆塔横担及斜材等效模型研究[J]. 高电压技术,2012,38(11):3025-3032.
DU Lin, MI Xiang, XIAO Zhongnan, et al. Equivalent model of cross arm and inclined holder of transmission tower. High Voltage Engineering. 2012, 38(11), 3025-3032.
- [9] GUTIERREZ J A R, MORENO P, NAREDO J L, et al. Non-uniform transmission tower model for lightning transient studies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2004, 19(2): 490-496.
- [10] HUANGFU Y, WANG S, WANG G, et al. Modeling and insulation performance. Analysis of composite transmission line tower under lightning overvoltage [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2015, 51(3):1-4.
- [11] 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.
- [12] 梁义明,葛栋. 同塔多回线路防雷计算中的杆塔模型[J]. 高电压技术,2006,32(1):76-77.
LIANG Yiming, GE Dong. Tower model in calculation of lightning protection on multi-circuit transmission line with same tower[J]. High Voltage Engineering. 2006, 31(1):76-77.
- [13] 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 Yin, GAO Yadong, DU Bin, et al. New tower model in calculation of lightning protection on transmission line [J]. Journey of Xi'an Jiaotong University. 2004, 38(4):365-368.
- [14] 杨庆,赵杰,司马文霞,等. 云广特高压直流输电线路反击耐雷性能[J]. 高电压技术,2008,34(7):1330-1335.
YANG Qing, ZHAO Jie, SIMA Wenxia, et al. Lightning back-flashover performance of the Yun-Guang UHVDC transmission lines. High Voltage Engineering. 2008, 34(7): 1330-1335.
- [15] 童凯,宣佳卓,许烽,等. 浙江电网特高压直流输电工程保护闭锁策略[J]. 浙江电力,2018,37(2):31-35.
TONG Kai, XUAN Jiazhao, XU Feng, et al. Protection locking strategy of Zhejiang UHVDC transmission project [J]. Zhejiang Electric Power, 2018, 37(2): 31-35.
- [16] 赵森林,卢亚军,吕鹏飞,等. 特高压直流保护动作策略优化[J]. 电力工程技术,2017,36(4):143-149.
ZHAO Senlin, LU Yajun, LYU Pengfei, et al. Optimization of UHVDC Protection Action Strategy [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(4):143-149.
- [17] 杨晓辉,尹玉君,寇晓适. 基于风险评估的特高压受端电网输电设备检修策略研究[J]. 电力工程技术,2017,36(2):72-75,93.
YANG Xiaohui, YIN Yujun, KOU Xiaoshi. Research on the maintenance strategy of UHV receiving end power grid transmission equipment based on risk assessment [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(2):72-75,93.
- [18] 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.
- [19] ISHII M, BABA Y. Numerical electromagnetic field analysis of tower surge response [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1997, 12(1):483-488.
- [20] NAREDO J L, MORENO P, SOUDACK A C, et al. Frequency independent representation of transmission lines for transient analysis through the method of characteristics [C] // Athens Power Tech, 1993. APT 93. Proceedings. Joint International

- Power Conference. IEEE, 1993:28-32.
- [21] ISHII M, KAWAMURA T, KOUNO T, et al. Multistory transmission tower model for lightning surge analysis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1991, 6(3):1327-1335.
- [22] JORDAN E C, ANDREWS C L. Electromagnetic waves and radiating systems[J]. American Journal of Physics, 1968, 19(19):477-478.
- [23] 杜林, 糜翔, 杨勇, 等. 雷击输电线路杆塔时的杆塔等效模型[J]. 高电压技术, 2011, 37(1):28-33.
DU Lin, MI Xiang, YANG Yong, et al. The equivalent model of transmission tower under lightning striking [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(1): 28-33.
- [24] IMECE A F, DURBAK D W, ELAHI H, et al. Modeling guidelines for fast front transients [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 11(1):493-506.

作者简介:



余敬秋

余敬秋(1996),男,博士在读,研究方向为直流输电与柔性直流输电(E-mail:yujingqiu@zju.edu.cn);

徐政(1962),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为大规模交直流电力系统分析、直流输电与柔性交流输电、风力发电技术与风电场并网技术。

Non-uniform transmission line model of UHV tower

YU Jingqiu, XU Zheng

(College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: As the transmission voltage level increases, the tower is also getting higher and higher, and its spatial structure changes from bottom to top greatly. The modeling of the Ultra-High Voltage (UHV) tower plays an important role in lightning protection analysis of transmission lines. If the UHV tower still adopts the multi-surge impedance model, the effects of changes in the spatial structure of its high altitude cannot be reflected. Therefore, the non-uniform transmission line model is developed based on the physical structure of the tower. To study the influence of the tower's spatial structure changes on its electromagnetic transient characteristics, the nominal height is modeled by several surge impedances. Finally, the lightning electromagnetic transient responses of the tower with the non-uniform transmission line model and with the multi-segment multi-surge impedance model are compared and analyzed. It shows that compared with the multi-surge impedance model, the non-uniform transmission line model is more suitable for lightning transient analysis of UHV tower.

Keywords: ultra-high voltage (UHV) tower; multi-surge impedance model; non-uniform transmission line model; lightning protection analysis; tower electromagnetic transient response

(编辑 江林)