110 kV输电杆塔的多波阻抗建模与雷击暂态响应分析

周利军¹,黄 林¹,王路伽¹,张 栋¹,刘 彬¹,徐 晗¹,陈斯翔² (1. 西南交通大学 电气工程学院,四川 成都 611756;2. 广东电网有限责任公司 佛山供电局,广东 佛山 528000)

摘要:为准确分析输电杆塔的雷击暂态响应,精确建立杆塔的波阻抗模型显得尤为重要。通过双锥天线原 理,建立垂直单根圆柱导体的波阻抗公式;考虑实际杆塔的倾斜因素和修正系数,利用ANSYS Maxwell进行 三维电磁场仿真,建立主架、斜材的波阻抗修正系数与分段长度、等效半径、主架上/下间距的关系,并推导 出主架、斜材的波阻抗计算公式。为反映雷电波在呼高部分的传播过程,将呼高部分细分为5段并完成建 模。针对典型的110 kV 同塔双回输电杆塔,利用 ATP-EMTP 暂态仿真软件进行建模分析,结果表明精细化建 模进一步凸显了雷电波在杆塔中的折反射过程,与 Hara 无损线塔模型相比,杆塔电位波形变化基本一致,横 担电位上升速度减慢,提前到达峰值且峰值降低,C 相横担峰值相差9.6%,峰值时间超前了0.023 μs,反映出 了呼高部分的波过程以及对整个雷击暂态响应过程的影响。

关键词:雷击暂态响应;精细化建模;波阻抗模型;双锥天线;ATP-EMTP

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202006023

0 引言

中图分类号:TM 72

158

雷电是引起架空输电线路反击跳闸事故的核心 因素,严重威胁着电力系统的安全与稳定性^[1-2]。据统计,2017年广东省110kV电压等级线路雷击跳闸 次数高达478次,约占雷击跳闸总次数的80.74%。 因此,针对110kV输电杆塔进行波阻抗建模,并准 确地分析其雷击暂态响应显得极为迫切。

目前,国内外学者针对输电杆塔进行了大量的 建模研究[34],模型大致可分为集中电感模型[5]、单一 波阻抗模型[6-13]、多波阻抗模型[14-18]。集中电感模型 的计算极为简化,无法反映雷电波在杆塔中的波过 程,并且只适用于高度较低的杆塔^[4]。单一波阻抗 模型的建立方法分为简化计算法与实际测量法:简 化计算法将结构复杂的杆塔简化等效为圆柱[67]、圆 锥^[8]、圆锥与圆柱^[10]进行计算,但单一简化的等效误 差较大;实际测量法[11-12]依据实测的杆塔电压波与 电流波的比值得出单一波阻抗,但该方法存在布线 困难、测量误差大、波形畸变等缺陷。多波阻抗模型 主要分为多层传输塔模型[14-15]、西安交通大学模 型^[16]、Hara 无损线塔模型^[17],其中 Hara 无损线塔模 型最具普遍代表性。Hara无损线塔模型的主要依据 为由实测数据得到的经验公式^[4],其应用最为广泛, 但呼高部分只用一段无损传输线表示,无法反映呼 高部分的雷电波过程以及对整个雷击暂态响应产生 的影响,此外随着杆塔的复杂化与高度的增加,实测 难度将增加。

收稿日期:2019-10-14;修回日期:2020-06-13

基金项目:广东电网有限责任公司科技项目(GDKJXM2018-2401)

Project supported by the Science and Technology Project of Guangdong Power Grid Co.,Ltd.(GDKJXM20182401)

因此,本文针对典型的110 kV 同塔双回输电杆 塔,考虑杆塔的实际结构与尺寸,将杆塔细分为8 段,其中呼高部分为5段,从而进行精细化建模,以 反映雷电波在呼高部分的波过程,并研究呼高部分 对雷击杆塔暂态过程的影响,进而建立更准确的雷 击杆塔暂态分析模型。针对杆塔的分段精细化建 模,首先依据双锥天线原理,建立单根垂直圆柱体的 波阻抗公式;其次引入修正系数,利用ANSYS Maxwell进行三维立体仿真,建立主架、斜材的波阻抗修正 系数与具体的分段长度、等效半径、主架上 / 下间距 之间的关系,进而得到主架、斜材的波阻抗计算公式; 最后利用ATP-EMTP软件建立雷击输电杆塔的暂态 分析模型,并与 Hara 无损线塔模型进行对比分析。 该暂态分析模型可为杆塔雷击暂态响应的准确分析 提供研究基础,并为杆塔防雷设计提供重要依据。

1 主架波阻抗建模

1.1 垂直单根圆柱体波阻抗求解

垂直单根圆柱导体的半径尺寸很小,沿其传播的电磁波接近球形,所以垂直单根圆柱体的波阻抗可利用镜像法和双锥天线原理导出^[18]。为便于研究,不考虑地面有限电导率的影响,将大地视为良导体^[19-20]。

图1为微元段示意图。取单根垂直圆柱体上的 一段微元dh,其等效半径为R,离地高度为h,圆锥顶 角为 θ_0 ,显然有 $r=\sqrt{h^2+R^2}$ 。不考虑垂直微元段之 间的耦合关系,利用镜像法可得到双锥天线模型,其 产生的瞬变电磁波表达式为^[18-19,21]:

$$H_{\varphi} = \frac{A \mathrm{e}^{\mathrm{-j}\beta r}}{r \sin \theta} \tag{1}$$

$$E_{\theta} = \frac{A e^{-j\beta r}}{r \sin \theta} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$$
(2)

$$H_{\theta} = H_r = E_r = E_{\varphi} = 0 \tag{3}$$

其中, H_{φ} 、 H_{θ} 、 H_{r} 分别为球坐标系中 φ 、 θ 、r方向上的 磁场强度; E_{θ} 、 E_{r} 、 E_{φ} 分别为球坐标系中 θ 、r、 φ 方向上 的电场强度;A为磁矢位; β 为相位常数; μ_{0} 为真空中 的磁导率,取值为 $4\pi \times 10^{-7}$ H / m; ε_{0} 为真空的介电常 数,取值为8.85×10⁻¹² F / m。



图1 微元段示意图

Fig.1 Schematic diagram of micro segment

微元 dh 相对于地面产生的电压可由式(4)求得 (默认大地为零电位),流过微元 dh 的电流可利用安 培环路定律求得,如式(5)所示。

$$U = \int_{\theta_0/2}^{\pi/2} E_{\theta} r \mathrm{d}\theta \tag{4}$$

$$I = \int_{0}^{2\pi} H_{\varphi} R \mathrm{d}\varphi \tag{5}$$

进而可求解得到
$$U = A e^{-j\beta r} \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \ln \frac{R}{\sqrt{R^2 + h^2} - h}$$

 $I=2\pi Ae^{-j\beta r}$,所以微元 dh 的波阻抗 Z_w为:

$$Z_{w} = \frac{U}{I} = 60 \ln \frac{R}{\sqrt{R^{2} + h^{2}} - h}$$
(6)

该微元段的波阻抗可用于代替一定长度的单根 垂直圆柱导体的波阻抗。由此可见,在不同高度处, 波阻抗的取值也不同^[22],且建模分段越细致,仿真分 析结果越准确^[23]。

1.2 主架波阻抗的建模分析

典型的110 kV 输电杆塔可分为主架、斜材、横 担3个部分,其中主架可视为4 根倾斜圆柱导体系 统,斜材为主架结构基础上敷设的倾斜导体,如附录 中的图 A1 所示。

图 2 为针对主架波阻抗的建模分析示意图。图 中, R 为圆柱体的等效半径; D_1 、 D_2 分别为上间距、下间距; l 为分段长度。可依据单根圆柱导体微元段的 波阻抗公式,结合波阻抗的基本定义,从电磁场的能量角度出发利用 ANSYS Maxwell 软件进行仿真分析,同时考虑倾斜因素,并引入修正系数 k_m ,最终推导出 4 根倾斜圆柱导体的系统波阻抗 Z_{main} 的计算公式为:

$$Z_{\text{main}} = \sqrt{\frac{L_{\text{main}}}{C_{\text{main}}}} = k_{\text{m}} Z_{\text{w}} = \sqrt{\frac{K_L}{K_c}} \sqrt{\frac{L}{C}}$$
(7)

其中, K_L 、 K_c 分别为电感、电容修正系数;L、C分别为 单根圆柱导体的电感、电容; L_{main} 、 C_{main} 分别为4根倾 斜圆柱导体的等效电感、等效电容。



图2 四导体系统

Fig.2 Four conductor system

根据电磁场理论,导体系统的电场总储能 $W_{\rm E}$ 、 磁场总储能 $W_{\rm M}$ 分别如式(8)、(9)所示^[24]。

$$W_{\rm E} = \frac{1}{2} \int_{V} DE \, \mathrm{d}V = \frac{1}{2} C U^2 \tag{8}$$

$$W_{\rm M} = \frac{1}{2} \int_{V} BH dV = \frac{1}{2} LI^2$$
 (9)

其中,**D**为电通量;**E**为电场强度;**B**为磁感应强度;**H** 为磁场强度;V为导体系统所在区域的体积。

综合式(7)—(9)可得电感修正系数 K_L 、电容修正系数 K_C 分别为:

$$K_{L} = \frac{L_{\text{main}}}{L} = \frac{W_{\text{mmain}}}{W_{\text{m}}} \tag{10}$$

$$K_c = \frac{C_{\text{main}}}{C} = \frac{W_{\text{emain}}}{W_e} \tag{11}$$

其中, W_{mmain} 、 W_{emain} 分别为4根倾斜圆柱导体系统的磁场能量、电场能量; W_m 、 W_e 分别为单根垂直圆柱导体系统的磁场能量、电场能量。设定施加在单根圆柱导体、4根倾斜圆柱导体2种工况下的电压、电流分别相等,由上述公式可知, K_L 、 K_c 的取值与激励源的大小无关,只要保证场的类型相同时激励源的取值也相同即可。

1.3 主架三维静电场建模分析

本节基于 ANSYS Maxwell软件进行单根圆柱导体、4 根倾斜圆柱导体 2 种工况下的电场仿真分析, 求得电场的总储能,进而确定电容修正系数。电场 仿真分析的基本步骤为建立仿真模型,给模型赋材 料、设定求解域边界、添加激励、网格剖分、检验与计 算。为增加模型计算的准确度,将求解域边界设置 为以模型尺寸为基准,向各个方向扩大1000倍,其 中地平面方向为仿真导体对地高度。由于是电场仿 真,所以给予模型的激励设定为电压源并取值为 100 V,地平面和其他求解域边界面上电压源的取值 设定为0。 为检验边界选取的合理性,在单根圆柱导体模型上沿着 Y轴的正半轴画一条分析线段,求解线上的能量密度的大小分布如图3所示。由图可见,在15 m以后,能量密度已经达到10⁻¹³的数量级,约等于0,所以求解域内能量的大小可代替整个场域的能量。



图3 轴线上能量密度分布

Fig.3 Energy density distribution on axis

单根圆柱导体、4 根倾斜圆柱导体的能量密度 云图分别见附录中的图 A2、A3。从图 A2 可见,单根 圆柱导体的能量密度在圆柱中心处最大,并向两边 逐级递减;由图 A3 可见,4 根倾斜圆柱导体系统中存 在很明显的屏蔽效应,其中心的能量密度很小,靠近 导体则能量密度逐渐增大,远离导体则能量密度又 开始递减。

为表征 4 根倾斜圆柱导体系统内部的耦合关系,在等效半径R=0.0946 m、上间距 D_1 =3.2 m、下间距 D_2 =4 m、分段长度l=5 m时,得到系统中导体的自电容与互电容的耦合矩阵为:

$$\boldsymbol{Z}_{c} = \begin{array}{ccccc} 1 & 2 & 3 & 4 \\ 83.996 & -11.759 & -11.754 & -6.7455 \\ -11.759 & 83.597 & -6.6926 & -11.727 \\ -11.754 & -6.6926 & 83.548 & -11.721 \\ -6.7455 & -11.727 & -11.721 & 83.711 \end{array}$$
(12)

其中,各电容单位均为pF。由式(12)可以看出,各 导体的自电容、任意相邻两导体间的互电容、任意两 对角导体的互电容都分别相等。

本文选取了典型的3基110 kV 同塔双回输电 杆塔进行仿真研究,对其进行分8段处理,得到的 仿真结果见附录A中的表A1,部分典型数据如表1 所示。

表1 分段尺寸以及电容修正系数值

Table 1 Sectional dimensions and capacitance correction factor values

R/cm	D_1/m	D_2/m	l/m	h/m	$W_{\rm emain}$ / J	$W_{\rm e}$ / J	K_{C}
7.00	1.1	1.5	4.0	38.9	6.75358×10 ⁻⁷	3.07248×10 ⁻⁷	2.1981
7.00	1.5	2.0	4.0	34.9	7.34626×10^{-7}	$3.07248{ imes}10^{-7}$	2.3910
7.00	2.0	2.4	3.9	30.9	7.71857×10^{-7}	3.01894×10^{-7}	2.5567
8.23	2.4	3.2	5.0	27.0	$9.75812{ imes}10^{-7}$	$3.77762{\times}10^{-7}$	2.5831
9.46	3.2	4.0	5.0	22.0	1.07026×10^{-6}	$3.91420{ imes}10^{-7}$	2.7343
10.69	4.0	4.8	5.0	17.0	1.15462×10^{-6}	$4.05341{ imes}10^{-7}$	2.8485
11.93	4.8	5.6	5.0	12.0	1.23371×10 ⁻⁶	4.18808×10^{-7}	2.9458
13.65	5.6	6.5	7.0	7.0	1.58037×10 ⁻⁶	5.52966×10 ⁻⁷	2.8580

利用遗传编程算法,显式地辨识出电容修正系数 K_c 与R、 D_1 、 D_2 、l的表达式为:

$$K_{c} = 2.666 \, 3 + 0.145 \, 4 \, D_{2} - \frac{0.562 \, 1}{D_{2}} + \frac{0.007 \, 683 \, D_{1}}{R} - \frac{0.102 \, 9 \, l + 0.000 \, 592 \, 8 \, l D_{2}^{2} - 0.010 \, 37 \, D_{2}^{2}}{(13)}$$

经计算,均方误差 MSE(Mean Squared Error)为 2.021×10⁻⁵,平均绝对误差 MAE(Mean Absolute Error)为 0.003 331, 拟合优度达到 0.993 3。利用分段 的 $R_{x}D_{1}_{x}D_{2}_{x}l$,根据式(13)即可得出 K_{c}_{o}

1.4 主架三维静磁场建模分析

参考电容修正系数 K_c的获取方法,利用 ANSYS Maxwell 软件分别在单根圆柱导体、4 根倾斜圆柱导体2种情况下搭建三维仿真模型进行静磁场仿真分析,求解磁场的总储能,依据式(10)求得电感修正系数 K_L。

模型激励设置为电流源激励,取值为1A;由于 单导体系统、四导体系统的静磁场仿真都为开断导 体,为了保证形成电流回路,设置求解域在Z方向的 值为0,其他方向设置为以模型尺寸为基准扩大100 倍。四导体系统的磁场仿真云图见附录中的图A4。

此外,可从另一角度对电感系数K_L进行求解。 首先假设有一电流I_i注入4根倾斜圆柱导体中,整个 系统的磁场总能量设为W,并且近似认为流经每个 圆柱导体的电流大小为0.25I_i。这里将单根圆柱导 体、任意两相邻圆柱导体、任意两对角线上圆柱导体 存储的磁场总能量分别记为W₁、W₂、W₃,根据磁场能 量守恒定律,4根倾斜圆柱导体系统的磁场总能 量为:

$$W = 4W_1 + 8W_2 + 4W_3 \tag{14}$$

参考式(9)和式(14),推导得4根倾斜圆柱导体的等效电感L_{main}为:

$$L_{\text{main}} = \frac{1}{4} \left(L_i + 2M + M_{\text{diag}} \right) \quad i = 1, 2, 3, 4 \quad (15)$$

其中,L_i为每根倾斜圆柱导体的自感;M为任意两相 邻圆柱导体间的互感;M_{diag}为编号为任意两对角的 圆柱导体间的互感。

将*L*_{main}与单根垂直圆柱体支柱的电感*L*_i相比后,即可得到杆塔主架电感修正系数*K*_i为:

$$K_{L} = \frac{L_{\text{main}}}{L_{i}} = \frac{L_{i} + 2M + M_{\text{diag}}}{4L_{i}}$$
(16)

可利用所建的4根倾斜圆柱导体的磁场仿真模型设置求解 L_i 、M、 M_{diag} 。仿真运行前在项目管理窗口右击 Parameters,选择 Assign,点击 Matrix,选中4个电流激励;运行结束后,右击 Results,选择 Solution data,查看求解结果。最终仿真及计算结果见附录中的表A2,部分典型数据如表2所示,杆塔分段的尺寸数据和表1一致,所以表2中不再赘述。

从仿真结果来看,电感修正系数K₁基本为常数,

表2 自感、互感及电感修正系数值

Table 2 Self-inductance, mutual inductance and

I / mH	M/mH	M / m H		K_L	
	<i>M</i> / IIIII	M _{diag} / IIIII	仿真值	计算值	误差
0.8085	0.003943	0.003662	0.2548	0.2536	0.001 240 878
0.8096	0.003916	0.003637	0.2552	0.2535	0.001611714
0.7886	0.003774	0.003502	0.2548	0.2535	0.001346674
1.0150	0.004877	0.004530	0.2559	0.2535	0.002344797
1.0150	0.004847	0.004498	0.2558	0.2535	0.002327080
1.0148	0.004826	0.004478	0.2558	0.2535	0.002295731
1.0112	0.004812	0.004464	0.2558	0.2535	0.002339755
1.4178	0.006730	0.006243	0.2553	0.2535	0.001779457

取值范围为0.254~0.256;从计算结果来看,电感修 正系数K_L在0.253和0.254之间波动,也可视为常数, 二者的误差在10⁻³的数量级,经验证其对最终主体 波阻抗的影响很小,所以本文综合仿真值与计算值 取平均值,得到电感修正系数为0.2543。

因此,综合 K_c 、 K_L 、式(7)可得主体的波阻抗计算 公式为:

$$Z_{\text{main}} = Z_{\text{w}} \Big[0.254 / (2.666 \, 3 + 0.145 \, 4 \, D_2 - 0.562 \, 1/D_2 + 0.007 \, 683 \, D_1/R + 0.000 \, 592 \, 8 \, lD_2^2 - 0.102 \, 9 \, l - 0.010 \, 37 \, D_2^2 \Big]^{\frac{1}{2}}$$
(17)

2 斜材波阻抗建模

2.1 理论分析

为了精确建立输电杆塔斜材的波阻抗模型,考 虑搭建含斜材主架的三维立体仿真模型,以最大限 度地还原输电杆塔的架构与尺寸。含斜材的主架的 三维立体仿真模型如附录中的图 A5 所示。因此,可 结合电磁场理论与三维仿真模型,参考式(7)引入斜 材波阻抗修正系数 k_x,分析含斜材的主架波阻抗与 不含斜材的主架波阻抗之间的关系,如式(18)所示。

$$k_{z} = \frac{Z_{z}}{Z_{\text{main}}} \frac{\sqrt{L_{z}/C_{z}}}{\sqrt{L_{\text{main}}/C_{\text{main}}}} = \sqrt{\frac{W_{\text{mz}}}{W_{\text{mmain}}}} \sqrt{\frac{W_{\text{emain}}}{W_{\text{ez}}}} = k_{1}k_{2} (18)$$

其中, Z_x 为含斜材的主架波阻抗; L_x 为含斜材的主架 等效电感; C_x 为含斜材的主架等效电容; W_{mx} 为含斜 材的主架磁场能量; W_{ex} 为含斜材的主架电场能量; k_1 为磁场修正系数; k_2 为电场修正系数。

2.2 仿真建模分析

基于 ANSYS Maxwell 软件,搭建含斜材的主架 的三维结构仿真模型如附录中的图 A5 所示,分析时 考虑杆塔的实际尺寸,包括圆柱导体的等效半径 R、 上间距 D₁、下间距 D₂、分段长度 l。斜材采用圆柱导体 近似表征,斜材和主架的每个连接处都用1个球体 进行光滑连接,以减小周围电磁场受不均匀结构的 影响。三维静电场下的仿真云图见附录中的图 A6。

选取3基110 kV输电杆塔并将其作分8段处

理,任一段圆柱体的等效半径R、上间距 D_1 、下间距 D_2 、分段长度l以及 k_1 、 k_2 、斜材波阻抗修正系数 k_z 、斜 材波阻抗系数k的仿真结果见附录中的表A3,部分 典型数据如表3所示,此外,仿真段的高度与表1 一致。

表3 分段尺寸与修正系数值

Table 3 Sectional size and values of

correction coefficient

<i>R</i> / m	D_2 / m	D_1 / m	l / m	k_1	k_2	$k_{\rm z}$	k
0.0700	1.5	1.1	4.0	0.81235	0.97659	0.79333	3.8387
0.0700	2.0	1.5	4.0	0.81610	0.97091	0.79236	3.8160
0.0700	2.4	2.0	3.9	0.77648	0.96676	0.75068	3.0108
0.0823	3.2	2.4	5.0	0.76057	0.96470	0.73372	2.7555
0.0946	4.0	3.2	5.0	0.82673	0.96336	0.79644	3.9126
0.1069	4.8	4.0	5.0	0.81351	0.96311	0.78350	3.6189
0.1193	5.6	4.8	5.0	0.77087	0.96345	0.74270	2.8864
0.1365	6.5	5.6	7.0	0.82026	0.96122	0.78844	3.7269

由仿真结果可知,含斜材的主架波阻抗小于不 含斜材的主架波阻抗小,即 k₂恒小于1,这与文献 [17]的结果相契合。因此将含斜材的主架波阻抗等 效为斜材波阻抗并联不含斜材的主架波阻抗,如式 (19)所示,最终得出斜材波阻抗Z,如式(20)所示。

$$Z_{z} = \frac{Z_{\text{main}} Z_{s}}{Z_{\text{main}} + Z_{s}} = k_{z} Z_{\text{main}}$$
(19)

$$Z_{s} = \frac{k_{z}}{1 - k_{z}} Z_{\text{main}} = k Z_{\text{main}}$$
(20)

利用遗传编程算法,辨识出斜材波阻抗系数k与R、 D_1 、 D_2 、l的显式表达式如式(21)所示。

$$k = 3.419 - \frac{4.9}{D_2} + 297.93 R - \frac{6 D_2^{5.352 \cos(5.9476 D_2)}}{1000 l D_2} -$$

 $0.0581D_1 - 0.5572\cos(13870.582lD_2) \quad (21)$

经计算, MSE为0.01226, MAE为0.0745, 拟合 优度达到了0.9491。利用该表达式,结合具体的分 段尺寸数据R、 D_1 、 D_2 、l的大小,即可得出斜材波阻 抗系数k,进而得出斜材波阻抗。

因此,结合式(20)、式(21),可得斜材的波阻抗 计算公式为:

$$Z_{s} = \left[3.419 - \frac{4.9}{D_{2}} + 297.93 R - \frac{6 D_{2}^{5.352 \cos(5.9476 D_{2})}}{1000 l D_{2}} - 0.058 1 D_{1} - 0.557 2 \cos(13870.582 l D_{2}) \right] Z_{\text{main}} (22)$$

3 案例分析

本节选取某110 kV 同塔双回直线杆塔 SZ2-30 作为案例,并将其作分8段处理,进行建模分析,并 与 Hara 无损线塔模型、双锥天线模型进行对比分 析。尺寸参数、精细化模型计算结果分别如表4、5 所示,Hara 无损线塔模型、双锥天线模型的计算结果 分别如附录中的表 A4、A5 所示。上述表中, r_A 为横 担的等效半径,一般取为横担与杆塔连接处的横担 宽度的 1/4; w_g 、 w_u 、 w_m 、 w_L 分别为避雷线所在横担、上 横担、中横担、下横担的长度; Z_A 为横担的波阻抗,计 算公式如式(23)所示^[17];R'为双锥天线模型所用的 杆塔等效半径,计算公式如式(24)所示^[10]。

162

$$Z_{\rm A} = 60 \ln \frac{2h}{r_{\rm A}} \tag{23}$$

$$R' = \frac{w_{\rm g} + w_{\rm u} + w_{\rm m} + w_{\rm L}}{8} \tag{24}$$

表4 分段尺寸与离地高度

Table 4 Sectional dimensions and heights above ground

段号	R/cm	D_1/m	D_2/m	l/m	h/m	$r_{\rm A}/{ m m}$	横担长度 / m
1	7.00	0.8	1.2	3.0	41.8	0.5	$4.8(w_{\rm g})$
2	7.00	1.2	1.6	4.6	38.8	0.5	$5.8(w_{\rm u})$
3	7.00	1.6	2.0	4.2	34.2	0.5	$7.4(w_{\rm m})$
4	8.33	2.0	2.8	6.0	30.0	0.5	$6.4(w_{\rm L})$
5	9.66	2.8	3.6	6.0	24.0	_	_
6	10.90	3.6	4.4	6.0	18.0	_	_
7	12.32	4.4	5.2	6.0	12.0	_	_
8	13.65	5.2	6.0	6.0	6.0	—	_

表5 精细化模型计算结果

Table 5 Calculated results of refined model

段号	$k_{\rm m}$	k	$Z_{_{ m w}}/\Omega$	$Z_{ m main}/\Omega$	$Z_{_{ m s}}/\Omega$	$Z_{\rm A}/\Omega$
1	0.34479	5.0765	425.1	146.6	748.6	307.2
2	0.34104	3.1752	420.6	143.5	458.8	302.7
3	0.32633	3.7735	413.1	134.8	511.6	295.1
4	0.32644	2.8592	394.8	128.9	370.1	287.3
5	0.31575	3.7489	372.5	117.6	442.1	_
6	0.307 88	2.8670	348.0	107.1	308.4	_
7	0.30206	2.8784	316.0	95.5	275.7	_
8	0.29740	3.9106	268.6	79.9	312.8	_

Hara 无损线塔模型的波阻抗计算方法可参考 文献[17]。依据表 5、表 A4、表 A5 的计算数据,在 EMTP 中搭建雷击杆塔暂态仿真模型如附录中的 图 A7 所示。雷电流模块选择 Heidler,雷电流波形 设置为 2.6 / 50 μs,雷电通道波阻抗设定为 400 Ω; 波阻抗选择分布式参数线路模型,波速设置为 2.1× 10⁸ m / s^[12];接地模块利用简单的纯电阻代替,其在 平原地区一般取值为 10 Ω。

精细化模型的暂态电位仿真结果如图4所示。 由图可见,雷电压波形在杆塔中传输时呈衰减的趋势,并带有较大程度的振荡,这种振荡是由于杆塔的 波阻抗与接地电阻模块的阻抗不匹配而发生折反射 现象,一部分折射透入大地,另一部分反相后反射回 到雷击注入点;杆塔塔顶、上横担、中横担、下横担的 电位变化趋势完全一致,只是峰值随高度的降低而 减小。

C相横担处电位对比如图5所示。由图可见,本 文建立的精细化模型与Hara无损线塔模型在C相横



Fig.4 Potential distribution of tower top and cross-arm

担处的电位变化趋势基本一致,峰值相差为9.6%; 精细化模型的电压峰值时刻超前 Hara 无损线塔模 型电位峰值时刻,超前时间 $\Delta t \approx 0.023 \ \mu s$ 。然而双锥 天线模型的电位峰值比 Hara 无损线塔模型和精细 化模型分别高出 25.3%和 37.5%,差距较大;此外, 双锥天线模型的电位峰值时刻比 Hara 无损线塔模 型提前了 0.105 \mu s,比精细化模型提前了 0.082 \mu s (Δt_1),峰值时刻的超前是由于双锥天线模型将输电 杆塔简单等效为一根圆柱体,忽略了杆塔的复杂结 构,尤其是斜材,另有实测数据表明,无斜材的导体 系统比有斜材的导体系统到达电位峰值所需的时间 更短^[17]。因此,单一使用双锥天线模型时等效误差 较大,不宜用于暂态分析,而精细化模型明显优于双 锥天线模型,且其考虑了斜材、横担等杆塔负载结构 对雷击暂态响应的影响。



图5 C相横担处电位对比



本文所建立的精细化模型与 Hara 无损线塔模 型之间的峰值误差以及峰值电位时刻的差异性,是 由于呼高部分被细分化后,雷电波在杆塔中的折反 射过程得到了进一步的体现,更具真实性。对于输 电杆塔的呼高部分,随着高度的降低与等效半径的 增大,单根垂直导体、主架、斜材的波阻抗值都减小, 这就导致了与Hara 无损线塔模型相比,在雷电波到 达输电杆塔塔底之前,部分雷电反射波已反射回雷 击注入点,这部分反射波不仅使得雷击点、各横担电 位上升速度减慢,提前到达峰值,而且峰值减小。综 上表明了本文所建模型的正确性。

4 结论

针对典型的110 kV 输电杆塔的雷击暂态响应 建模,本文建立了杆塔的精细化模型,并利用 EMTP 进行了雷击输电杆塔暂态响应分析,主要结论如下。

(1)根据双锥天线原理以及镜像法导出单根垂 直圆柱导体在不同高度处的波阻抗公式,再结合 ANSYS Maxwell软件与电磁场理论,导出4根倾斜 圆柱导体系统的波阻抗公式,并建立了主架波阻抗 与分段长度、等效半径、上/下间距之间的关系。

(2)依据主架的波阻抗公式及实际的分段尺寸, 在主架有、无斜材的情况下,分别建立对应的三维仿 真模型,结合电磁场理论,导出斜材的波阻抗计算 公式。

(3)选取典型的3基110 kV 输电杆塔进行分段 精细化建模,依据实际尺寸,计算出各分段波阻抗并 在EMTP中搭建出雷击杆塔暂态分析模型。结果表 明,杆塔C相横担电位与Hara无损线塔模型的变化 基本一致,但其峰值相差9.6%,且电位峰值时刻超 前于Hara无损线塔模型的电位峰值时刻,明显优于 双锥天线模型。

(4)对输电杆塔呼高部分的精细化建模可进一步体现雷电波在杆塔中的折反射过程。呼高部分细分化后,波阻抗减小,反射波快速反射回雷击点,从而使各横担电位上升速度减慢,提前到达峰值且峰值降低,进一步反映出呼高部分对整个雷击暂态响应的影响,贴近真实情况,为杆塔防雷设计提供了重要的研究基础。

附录见本刊网络版(http://www.epae.cn)。

参考文献:

[1] 李瑞芳,曹晓斌,张先怡,等. ±800 kV / 500 kV 交直流混联输 电线路反击耐雷水平[J]. 电力自动化设备,2015,35(10):101-106,114.

LI Ruifang, CAO Xiaobin, ZHANG Xianyi, et al. Back-flashover resistance level of ±800 kV / 500 kV AC-DC hybrid transmission lines[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10):101-106, 114.

[2] 缪希仁,林瑞聪. 基于关联维数与极端学习机的高压输电线路 雷击过电压故障识别[J]. 高电压技术,2016,42(5):1519-1526.

MIAO Xiren, LIN Ruicong. Lightning over-voltage fault identification of high-voltage transmission line based on correlation dimension and extreme learning machine [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(5):1519-1526.

- [3] ARAUJO A R J,KUROKAWA S. A tutorial about tower transmission models for the analyses and prediction of backflashovers[J]. IEEE Latin America Transactions, 2017, 15(8): 1432-1438.
- [4]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.

- [5] 电力工业部.交流电气装置的过电压保护和绝缘配合:DL/T 620-1997[S].北京:中国电力出版社,1997.
- [6] JORDAN C A. Lightning computations for transmission lines with overhead ground wires part II[J]. General Electric Review, 1934, 34: 180-185.
- [7] WAGNER C F, HILEMAN A R. A new approach to the calculation or the lightning performance or transmission lines Ⅲa simplified method: stroke to tower[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part Ⅲ: Power Apparatus and Systems, 1960, 79(3):589-603.
- [8] SARGENT M A, DARVENIZA M. Tower surge impedance[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, PAS-88(5):680-687.
- [9] CIGRE SC33-WG01. CIGRE guide procedure for estimating the lightning performance of transmission line[R]. [S.l.]:CIG-RE SC33-WG01,1991.
- [10] YAMADA T, MOCHIZUKI A, SAWADA J, et al. Experimental evaluation of a UHV tower model for lightning surge analysis
 [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(1):393-402.
- [11] BREUER G D, SCHULTZ A J, SCHLOMANN R H, et al. Field studies of the surge response of a 345-kV transmission tower and ground wire[J]. Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. Part Ⅲ:Power Apparatus and Systems, 1957, 76(3):1392-1396.
- [12] KAWAI M. Studies of the surge response on a transmission line tower[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1964, 83(1): 30-34.
- [13] 朱传华,刘念,田冰冰,等. 基于 Bergeron 模型的 500 kV 变电站 雷击过电压计算[J]. 电力自动化设备,2010,30(12):66-69.
 ZHU Chuanhua,LIU Nian,TIAN Bingbing, et al. Lightning overvoltage calculation based on Bergeron model for 500 kV substation[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(12): 66-69.
- [14] 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.
- [15] ITO T, UEDA T, WATANABE H, et al. Lightning flashovers on 77 kV systems: observed voltage bias effects and analysis[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(2):545-550.
- [16] 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):365-368,372.
 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):365-368,372.
- [17] HARA T, YAMAMOTO O. Modeling of a transmission tower for lightning surge analysis [J]. IEE Proceedings-Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(3):283-289.
- [18] JORDAN E C, BALMAIN K G. Electromagnetic waves and radiating systems [M]. 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1968: 380-388.
- [19] GUTIERREZ R J A, MORENO P, NAREDO J L, et al. Nonuniform transmission tower model for lightning transient studies [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(2):490-496.
- [20] 牧原,曾楚英. 杆塔波阻抗的研究[J]. 高电压技术,1992,18 (2):9-13.

MU Yuan, ZENG Chuying. Study of tower surge impedance [J]. High Voltage Engineering, 1992, 18(2):9-13.

[21] HUANGFU Y P, WANG S H, WANG G L, 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.

164

[22] 束洪春,曹璞璘,张广斌,等. 雷电流波形参数检测视角下的±800 kV 直流输电线路反击电磁暂态分析[J]. 电力自动化 设备,2011,31(9):1-9.

SHU Hongchun, CAO Pulin, ZHANG Guangbin, et al. Electromagnetic transient analysis of back flashover in ±800 kV DC transmission line to acquire lightning parameters [J]. Electric Power Automation Equipment, 2011, 31(9):1-9.

- [23] 兰贞波,赵常威,阮江军.海底电缆-架空线线路雷击过电压分析与计算[J].电力自动化设备,2014,34(10):133-137.
 LAN Zhenbo,ZHAO Changwei,RUAN Jiangjun. Analysis and calculation of submarine cable-overhead line lightning overvoltage[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(10): 133-137.
- [24] 冯慈璋,马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京:高等教育出版 社,2000:53-129.

作者简介:



周利军(1978—),男,浙江杭州人,教 授,博士研究生导师,博士,主要从事电气 设备状态检测与故障诊断方面的研究工作 (**E-mail**:zhoulijun@swjtu.cn);

 黄 林(1995—),男,四川眉山人,硕 士研究生,主要从事电力系统接地技术方面
 的研究工作(E-mail:L.Huang_swjt@foxmail. com)。

周利军 com

(编辑 任思思)

Multi-wave impedance modeling and lightning strike transient response analysis of 110 kV transmission tower

ZHOU Lijun¹, HUANG Lin¹, WANG Lujia¹, ZHANG Dong¹, LIU Bin¹, XU Han¹, CHEN Sixiang²

(1. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 611756, China;

2. Foshan Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid Co., Ltd., Foshan 528000, China)

Abstract: In order to accurately analyze the lightning strike transient response of transmission tower, it is very important to accurately establish the wave impedance model of the tower. Based on the principle of double cone antenna, the wave impedance formula of vertical single cylindrical conductor is established. Considering the tilt factor of the actual tower and the correction coefficients, the 3D electromagnetic field simulation is carried out by using ANSYS Maxwell to establish the relationship between the correction coefficients of the wave impedance of main frame and inclined material and the segment length, the equivalent radius and the top and the bottom distance of main frame, then the wave impedance formulas of main frame and inclined material are derived. In order to reflect the propagation process of thunder and lightning wave in the high part, the high part is divided into 5 segments and the modeling is completed. The EMTP transient simulation software is used to analyze the typical 110 kV double-circuit transmission lines on the same tower. The results show that the refined modeling further highlights the process of lightning reflection and refraction in the tower, and compared with the Hara lossless tower model, the wave form change of pole-tower potential is basically the same, the rise speed of the crossarm potential slows down, the peak value of the cross-arm potential reaches ahead of time and the peak value decreases, the peak value difference of the cross-arm in phase C is 9.6%, and the peak time is $0.023 \mu s$ ahead, which reflects the wave process of the high part and the influence on the transient response of the whole lightning stroke process.

Key words: lightning strike transient response; refined modeling; wave impedance model; double conical antenna; ATP-EMTP





Fig.A1 Typical 110kV power transmission tower





Fig.A2 Cloud diagram of energy density of single cylindrical conductor





附录

	Iun	leili beetto	nui unnei	biolis ana	cupacitance correct	on factor values		
<i>R</i> /cm	D_2/m	D_1/m	<i>L</i> /m	h/m	$W_{\rm emain}/{ m J}$	$W_{ m e}/{ m J}$	K _C	
7.000	1.50	1.100	4.0	38.9	6.75358×10 ⁻⁷	3.07248×10 ⁻⁷	2.1981	
7.000	2.00	1.500	4.0	34.9	7.34626×10 ⁻⁷	3.07248×10 ⁻⁷	2.3910	
7.000	2.40	2.000	3.9	30.9	7.71857×10^{-7}	3.01894×10 ⁻⁷	2.5567	
8.230	3.20	2.400	5.0	27.0	9.75812×10 ⁻⁷	3.77762×10 ⁻⁷	2.5831	
9.460	4.00	3.200	5.0	22.0	1.07026×10^{-6}	3.91420×10 ⁻⁷	2.7343	
10.690	4.80	4.000	5.0	17.0	1.15462×10^{-6}	4.05341×10 ⁻⁷	2.8485	
11.930	5.60	4.800	5.0	12.0	1.23371×10^{-6}	4.18808×10^{-7}	2.9458	
13.650	6.50	5.600	7.0	7.0	1.58037×10^{-6}	5.52966×10 ⁻⁷	2.8580	
7.000	1.60	1.200	4.0	36.1	6.90499×10 ⁻⁷	3.07248×10 ⁻⁷	2.2474	
7.000	2.00	1.600	4.1	32.1	7.50023×10^{-7}	3.12014×10 ⁻⁷	2.4038	
7.000	2.40	2.000	4.0	28.0	7.82672×10^{-7}	3.07248×10 ⁻⁷	2.5474	
8.100	3.43	2.400	4.0	24.0	8.73515×10^{-7}	3.20380×10 ⁻⁷	2.7265	
9.480	4.70	3.430	5.0	20.0	1.10789×10^{-6}	3.91630×10 ⁻⁷	2.8289	
10.840	6.00	4.700	5.0	15.0	1.22020×10^{-6}	4.07420×10 ⁻⁷	2.9950	
12.200	7.30	6.000	5.0	10.0	1.31587×10^{-6}	4.22123×10 ⁻⁷	3.1173	
13.560	8.60	7.300	5.0	5.0	1.39487×10^{-6}	4.35409×10 ⁻⁷	3.2036	
7.000	1.20	0.818	4.0	38.9	6.25851×10 ⁻⁷	3.07248×10 ⁻⁷	2.0370	
7.000	2.00	1.600	3.9	30.9	7.29844×10^{-7}	3.01894×10^{-7}	2.4176	
8.230	2.74	2.000	5.0	27.0	9.31315×10^{-7}	3.77762×10^{-7}	2.4654	
9.463	3.48	2.740	5.0	22.0	1.03112×10^{-6}	3.91420×10^{-7}	2.6343	
10.690	4.22	3.480	5.0	17.0	1.11487×10^{-6}	4.05341×10 ⁻⁷	2.7504	
11.927	4.96	4.220	5.0	12.0	1.19568×10^{-6}	4.18047×10^{-7}	2.8602	
13.650	6.00	4.960	7.0	7.0	1.53876×10^{-6}	5.52966×10^{-7}	2.7827	

表 A1 分段尺寸以及电容修正系数值 TableA1 Sectional dimensions and capacitance correction factor values





I /mall			K_L				
L_i/mH	<i>M</i> /mH	M _{diag} /mH	仿真值	计算值	误差		
0.8085	0.003943	0.003662	0.2548	0.2536	0.001240878		
0.8096	0.003916	0.003637	0.2552	0.2535	0.001611714		
0.7886	0.003774	0.003502	0.2548	0.2535	0.001346674		
1.0150	0.004877	0.004530	0.2559	0.2535	0.002344797		
1.0150	0.004847	0.004498	0.2558	0.2535	0.00232708		
1.0148	0.004826	0.004478	0.2558	0.2535	0.002295731		
1.0112	0.004812	0.004464	0.2558	0.2535	0.002339755		
1.4178	0.006730	0.006243	0.2553	0.2535	0.001779457		
0.8084	0.003932	0.003651	0.2548	0.2536	0.001236982		
0.8287	0.003991	0.003705	0.2548	0.2535	0.001257905		
0.8088	0.003870	0.003591	0.2549	0.2535	0.001363741		
0.8198	0.003923	0.003644	0.2558	0.2535	0.002304524		
1.0243	0.004878	0.004531	0.2542	0.2535	0.000724259		
1.0253	0.004846	0.004499	0.2548	0.2535	0.001320141		
1.0254	0.004818	0.004472	0.2556	0.2534	0.002182364		
1.0232	0.004803	0.004455	0.2566	0.2534	0.003148894		
0.8080	0.003989	0.003706	0.2547	0.2536	0.001103233		
0.7885	0.003797	0.003524	0.2548	0.2535	0.001323077		
1.0138	0.004899	0.004550	0.2556	0.2535	0.00205201		
1.0137	0.004858	0.004510	0.2556	0.2535	0.002048273		
1.0140	0.004838	0.004489	0.2556	0.2535	0.002092222		
1.0139	0.004820	0.004472	0.2556	0.2535	0.002071469		
1.4200	0.006760	0.006274	0.2557	0.2535	0.002188196		

表 A2 自感、互感及电感修正系数值



TableA2 Values of self-inductance, mutual inductance and inductance correction factor

图 A5 含斜材的主架的三维仿真模型 Fig.A5 3D simulation model of the main frame with inclined material



图 A6 三维静电场下的仿真云图 Fig.A6 Simulation cloud diagram under three-dimensional electrostatic field

<i>R</i> /m	D_2/m	D_1/m	<i>l/</i> m	k_1	k_2	kz	k
0.07000	1.50	1.100	4.0	0.81235	0.97659	0.79333	3.8387
0.07000	2.00	1.500	4.0	0.81610	0.97091	0.79236	3.8160
0.07000	2.40	2.000	3.9	0.77648	0.96676	0.75068	3.0108
0.08230	3.20	2.400	5.0	0.76057	0.96470	0.73372	2.7555
0.09460	4.00	3.200	5.0	0.82673	0.96336	0.79644	3.9126
0.10690	4.80	4.000	5.0	0.81351	0.96311	0.78350	3.6189
0.11930	5.60	4.800	5.0	0.77087	0.96345	0.74270	2.8864
0.13650	6.50	5.600	7.0	0.82026	0.96122	0.78844	3.7269
0.07000	1.60	1.200	4.0	0.83198	0.97508	0.81125	4.2980
0.07000	2.00	1.600	4.1	0.76367	0.97037	0.74104	2.8616
0.07000	2.40	2.000	4.0	0.81265	0.96664	0.78554	3.6628
0.08100	3.43	2.400	4.0	0.78933	0.96498	0.76169	3.1962
0.09480	4.70	3.430	5.0	0.76206	0.96156	0.73276	2.7420
0.10840	6.00	4.700	5.0	0.79139	0.96048	0.76012	3.1687
0.12200	7.30	6.000	5.0	0.73931	0.96014	0.70984	2.4464
0.13560	8.60	7.300	5.0	0.81685	0.96044	0.78454	3.6412
0.07000	1.20	0.818	4.0	0.81096	0.98201	0.79637	3.9108
0.07000	2.00	1.600	3.9	0.78575	0.97050	0.76257	3.2117
0.08230	2.74	2.000	5.0	0.79708	0.96800	0.77157	3.3777
0.09463	3.48	2.740	5.0	0.80321	0.96584	0.77578	3.4598
0.10690	4.22	3.480	5.0	0.76933	0.96512	0.74250	2.8835
0.11927	4.96	4.220	5.0	0.81991	0.96493	0.79116	3.7883
0.13650	6.00	4.960	7.0	0.75959	0.96271	0.73126	2.7211

表 A3 分段尺寸与修正系数值 TableA3 Sectional size and values of correction coefficient

表 A4 Hara 无损线塔模型结构划分及计算结果

TableA4 Structure division and calculated results of Hara lossless tower model										
段号	<i>R</i> /cm	h∕m	D_1/m	r _B ∕cm	R _B /m	$Z_{ m main}/\Omega$	Z_{s}/Ω	$Z_{ m A}/\Omega$		
1	7	41.8	0.8	20.3	6	140.0	1260.4	307.2		
2	7	38.8	1.2	20.3	6	129.5	1165.4	302.7		
3	7	34.2	1.6	20.3	6	117.6	1058.5	295.1		
4	7	30.0	2.0	20.3	6	106.4	957.6	287.3		

表 A5 双锥天线模型结构划分与计算结果

TableA5 Structure division and calculated results of double conical antenna model								
段号	h/m	<i>R'/</i> m	Z/Ω					
1	41.8	3.05	198.7					
2	38.8	3.05	194.3					
3	34.2	3.05	186.7					
4	30	3.05	178.9					
5	24	3.05	165.6					
6	18	3.05	148.5					
7	12	3.05	124.7					
8	6	3.05	85.7					



图 A7 雷击杆塔暂态仿真模型 Fig.A7 Transient simulation model of lightning striking tower