

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2019.09.025

基于FDTD和EMTP的特高压大跨越线路雷击暂态过程对比分析

谢文炳¹, 赵贤根², 肖佩², 傅智为¹, 吴文斌¹, 何俊佳²

(1. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福州 350000; 2. 华中科技大学强电磁工程与新技术国家重点实验室, 武汉 430074)

摘要: 大跨越线路的杆塔高、档距长, 反击闪络风险高, 准确分析其雷击暂态过程, 对于保证特高压线路的安全运行具有重要意义。文中针对淮南—上海特高压工程南通—苏州段的大跨越输电线路, 分别建立了该线路雷击暂态过程的FDTD和EMTP模型, 得到了大跨越线路的杆塔横担与塔顶电压、导线电压和绝缘子串过电压, 并开展了对比分析, 结果表明: 采用Hara提出的杆塔多波阻抗模型, EMTP计算得到的横担和塔顶电压远大于FDTD计算结果; 若不考虑感应分量, EMTP计算得到的导线电压大于FDTD计算结果; 上述结果导致EMTP计算得到的绝缘子串过电压远高于FDTD计算结果。

关键词: 大跨越线路; 特高压; 雷电暂态特性; FDTD; EMTP; 感应分量; 注入分量

Comparative Analysis on Lightning Surge Response of UHVAC Large-span River-crossing Transmission Line Based on FDTD and EMTP

XIE Wenbing¹, ZHAO Xiangen², XIAO Pei², FU Zhiwei¹, WU Wenbin¹, HE Junjia²

(1. State Grid Fujian Electric Power Corporation Research Institute, Fuzhou 350000, China; 2. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology of Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: For accurate analysis of lightning surge response of large-span river-crossing transmission line to ensure the safety of a power system, FDTD and EMTP models of the Nantong-Suzhou river-crossing transmission line in the Huainan-Shanghai UHVAC project are built. The voltages of the tower top, crossarms, phase conductors and insulator strings are calculated via both of the models, and comparative analysis is carried out. It is concluded that: 1) EMTP achieves much higher voltages of the tower top and crossarms than FDTD if the multistory transmission tower model proposed by Hara is used for the EMTP model; 2) EMTP achieves much higher voltages of phase conductors than FDTD if the induced voltage from the current in lightning channel is ignored; and 3) EMTP achieves much higher over-voltages of insulator strings than FDTD.

Key words: large-span river-crossing transmission line; UHVAC; lightning surge response; FDTD; EMTP; induced voltage; injected current

0 引言

大跨越线路的杆塔高、档距长, 反击闪络风险高。准确分析其雷击暂态过程, 并进行有针对性的防雷设计, 对于保证特高压线路的安全运行具有重要意义。

分析输电线路雷击暂态过程的方法主要包括基于行波法的EMTP和电磁场数值计算法。

基于行波法的EMTP程序多用于工程计算, 假设电磁波沿着杆塔以TEM模型进行传播, 将杆塔等效为波阻抗模型^[1-2]。然而, 雷击高杆塔时, 波的传播不再遵循平行平面波模式, 如考虑到杆塔与避雷

线之间的耦合、电磁波的传输时间、感应电流等因素的影响,行波法的计算结果可能会带来一定的误差^[3]。

电磁场数值算法主要包括感应电荷准静法和FDTD法。詹花茂采用感应电荷准静法分析了江阴大跨越线路的雷击暂态过程^[3],但该方法无法考虑杆塔的实际结构,只能将其简化为圆柱体。FDTD^[4-8]方法可以考虑线路和杆塔的实际三维结构,通过直接求解 Maxwell 方程组,获得计算空间的电场和磁场的时空分布,通过积分可以获得任意点的电压或电流的时域波形。原则上,FDTD方法较行波法计算结果更为准确,但建模比较复杂,计算效率低,工程应用有所限制。

目前建设的特高压工程中的跨越线路杆塔高度高,雷击暂态过程复杂,基于行波法的EMTP程序能否满足工程计算要求,需要进行深入探讨。因此,文中以淮南—上海特高压工程南通—苏州段的大跨越线路为对象,分别建立该跨越线路雷击暂态过程的FDTD和EMTP模型,仿真计算大跨越线路的雷击暂态过程,并对两种方法的计算结果进行了对比分析。

1 大跨越线路参数

淮南—上海特高压工程南通—苏州段的大跨越线路段的平断面见图1,跨越杆塔的结构尺寸见图2。跨越杆塔的高度为419 m,比岸边锚塔高300 m。南通侧跨越塔的左、右档距分别为1 565 m和2 150 m,苏州侧跨越塔的左、右档距分别为2 150 m和1 338 m。2根地线型号均为OPGW-350,直径24.7 mm,直流电阻0.362 Ω/km ;导线型号为AACSR/HES-500/280,导线分裂数为6,分裂间距550 mm,子导线直径36.4 mm,直流电阻为0.067 32 Ω/km ;绝缘子串(含金具)长度取16 m。江中两基跨越杆塔间线路的弧垂为170 m。

2 基于FDTD的雷击暂态过程仿真分析

2.1 仿真模型与计算条件

FDTD应用于输电线路雷电暂态特性分析时,杆塔和导线的处理方式、网格大小和吸收边界条件的选择,都会影响计算结果。为了保证文中FDTD仿真模型的处理方式和计算条件的正确性,文中首先与文[4]中500 kV同塔双回输电杆塔的暂态冲击响应试验结果进行了对比。

仿真模型见图3(a),其中,杆塔采用阶梯近似处

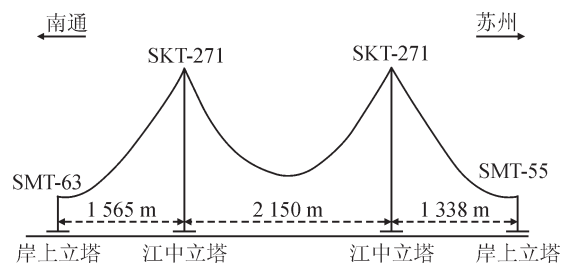


图1 大跨越线路平断面

Fig. 1 Plane fracture of river crossing transmission line

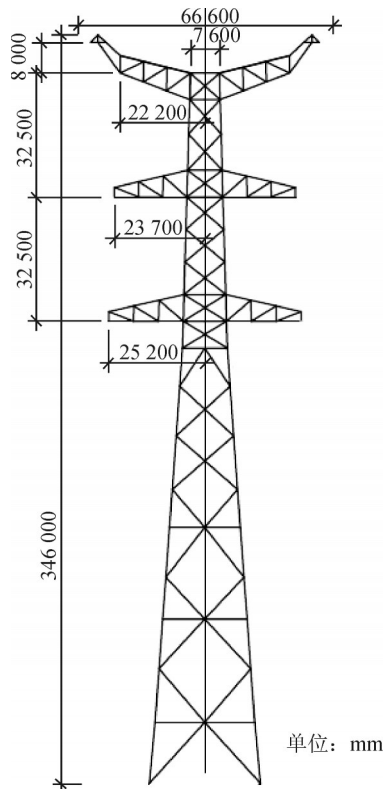


图2 SKT-271跨越杆塔结构尺寸

Fig. 2 Structure and size of the river crossing tower
SKT-271

理^[9];导地线采用等效半径,并进行细线修正^[10];采用Liao's二阶吸收边界条件^[11];采用大小为2 m×2 m×2 m的均匀网格。

仿真计算获得的塔顶电位和横担电位见图3(b)~(e)中实线,与试验测量结果(图3(b)~(e)中虚线)的波形和幅值均比较吻合,幅值最大误差为8%。

上述对比证明了文中FDTD仿真模型的处理方式和计算条件的正确性。

基于验证过的处理方法和计算条件,文中建立了大跨越线路雷电暂态分析的FDTD仿真模型,见图4。模型中杆塔和导地线的处理方式前文相同,其中,地线等效半径为12.35 mm,导线等效半径为420.10 mm,导线和地线的悬垂线方程简化为抛物线方程进行处理。仿真计算空间取5 000 m(长)×100 m

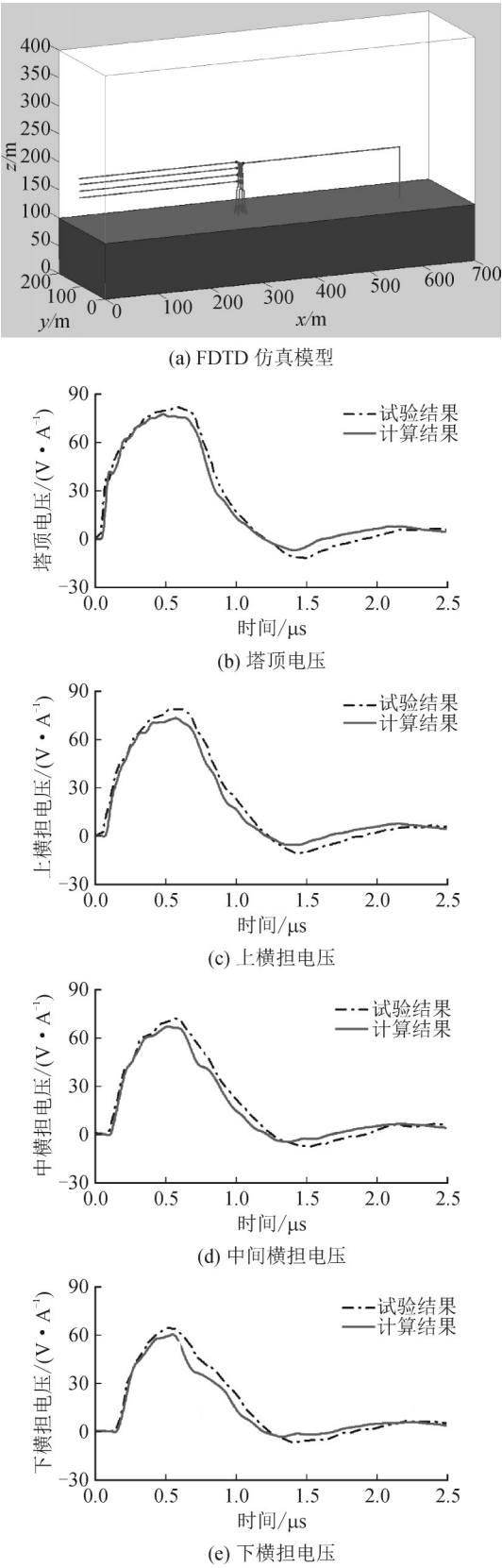


图3 仿真计算条件验证

Fig. 3 Verification of the calculation conditions

(宽)×800 m(高), 网格大小与吸收边界条件与前文相同。土壤电阻率取 $200 \Omega \cdot \text{m}$ 。

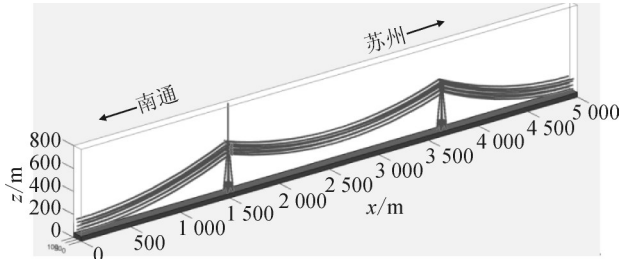


图4 大跨越线路雷电暂态分析的FDTD仿真模型

Fig. 4 Model based on FDTD for analyzing lightning surge response of river crossing transmission line

雷电回击通道采用的方式见图5, 采用图5进行模拟^[12], 雷电回击速度随通道电介质相对介电常数 ϵ_r 和通道周围电介质厚度 d 的变化规律见表1, 文中取 $\epsilon_r=9$ 、 $d=8 \text{ m}$, 回击通道中波速约为 $0.67c$ (c 为光速), 该波速符合自然雷和人工引雷类观测结果 ($c/3 \sim 2c/3$)^[13], 对应的雷电通道特征波阻抗为 $0.23 \sim 0.47 \text{ k}\Omega$ ^[14], 远小于自然雷电或人工引雷试验的观测值 $0.6 \sim 2.5 \text{ k}\Omega$, 为了更接近雷电回击通道阻抗的经验值, 文中在雷击通道和雷电流源之间插入一个 800Ω 的电阻。雷电流源采用 $2.6/50 \mu\text{s}$ 双指数波, 幅值取 100 kA 。

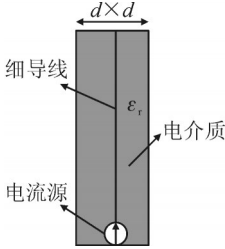


图5 雷电通道模拟示意图

Fig. 5 Sketch of the model of the lightning channel

表1 雷电回击速度与 d 和 ϵ_r 的关系

Table 1 Relationship between return stroke velocity and d and ϵ_r

电介质空间 $d \times d / \text{m}^2$	雷电回击通道中波速	
	$\epsilon_r=9$	$\epsilon_r=50$
4×4	0.74c	0.68c
8×8	0.67c	0.59c
地面上半空间	0.33c	0.14c

雷击南通侧跨越塔 SKT-271 塔顶, 分别测量塔顶电压、横担电压、导线电压和绝缘子串两端电压。绝缘子串两端电压通过对导线——横担的 Z 轴方向电场进行积分获得, 其他电压通过对观测点——吸收边界的水平方向电场进行积分获得。

2.2 仿真结果

FDTD 计算得到的横担和塔顶电压、导线电压和绝缘子串过电压见图6。图6中, 绝缘子串过电压

包括:雷电流注入杆塔、地线系统所产生的电压(简称注入分量),和雷电通道中电荷、电流波在输电线上所感应的电压(简称感应分量)。

图6(a)表明,跨越塔的塔顶和横担电压在 $2.6\mu\text{s}$ 左右达到峰值,也即高杆塔的横担和塔顶电压到达峰值的时刻由雷电流波头时间决定,这是因为跨越塔高达419 m,雷电流波从雷击塔顶到负反射波第一次返回塔顶的时间约为 $3.1\mu\text{s}$,大于雷电流波头时间。同时由于塔身的折反射和损耗,跨越塔上相、中相和下相横担的电压峰值逐渐降低。

图6(b)表明,上相、中相和下相导线电压的幅值依次降低,分别占各相横担电压幅值的29%、21%和19%。导线电压分别到达峰值的时刻逐渐增大,分别为 2.8 、 3.9 、 $4.7\mu\text{s}$,均大于横担电压达到峰值的时刻。

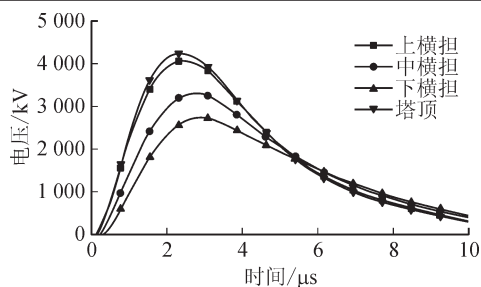
图6(c)表明,雷击特高杆塔线路时,上相、中相和下相绝缘子串过电压幅值差别并不大,相对于上相绝缘子串过电压,中相降低了4.3%,下相降低了10.7%。

3 基于EMTP的雷击暂态过程仿真分析

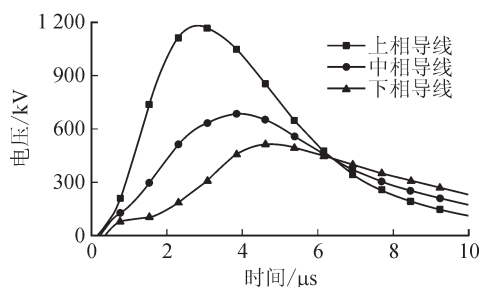
3.1 仿真模型与计算条件

建立了大跨越线路的雷电暂态分析的EMTP仿真模型,见图7。

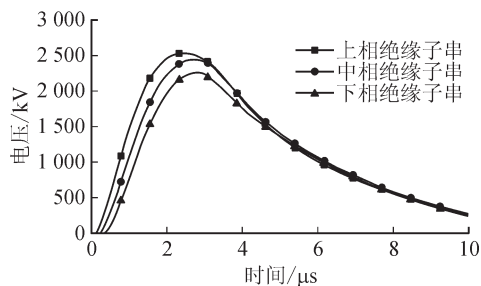
杆塔模型采用Hara提出的多波阻抗模型,根据文[15-16]的计算方法,图6中塔身和横担的波阻抗值见表2。试验测得雷电流波在杆塔中的传播速度



(a) 横担和塔顶电压



(b) 导线电压



(c) 绝缘子串过电压

图6 FDTD计算结果

Fig. 6 Results calculated by FDTD

约为光速的85%~90%^[4],文中取 $0.9c$ 。

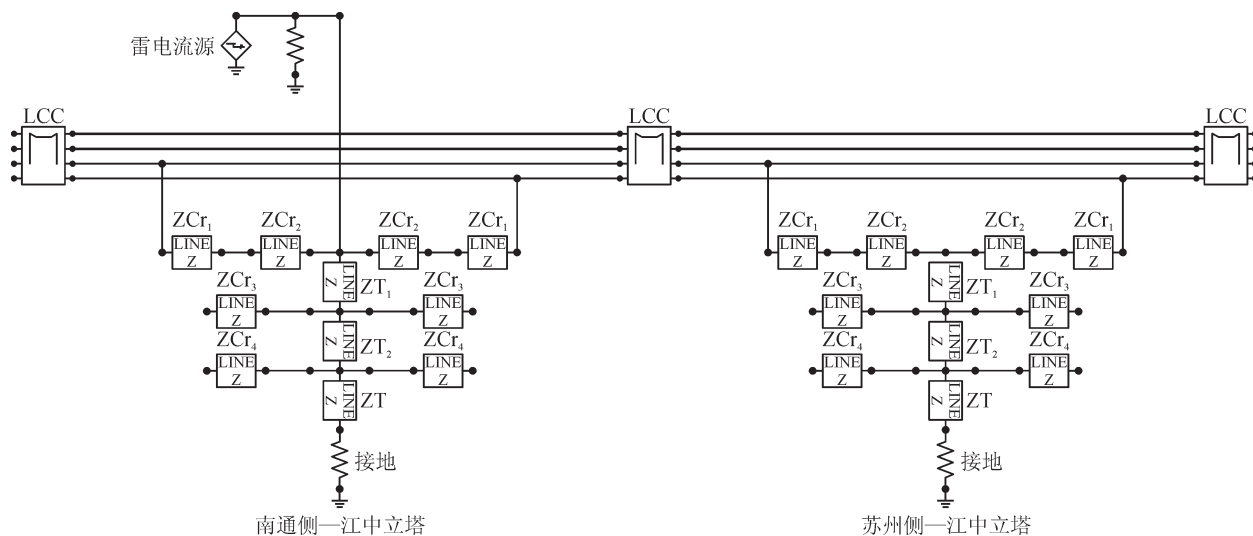


图7 大跨越线路雷电暂态分析的EMTP仿真模型

Fig. 7 Model based on EMTP for analyzing lightning surge response of river crossing transmission line

线路模型采用EMTP中的J.Marti模型^[17]。J.Marti模型将杆塔间导线按照抛物线或悬垂线处理,其等效处理方法适用于两基杆塔挂点高度相差

不大的情况。然而,在大跨越线路中跨越塔与锚塔的高度差较大,约为300 m,杆塔间线路形状近似为抛物线或悬垂线的半边。因此,文中将跨越塔靠近

岸边侧线路的档距加倍,弧垂设为 300 m,则 J. Marti 模型的半边便可以近似模拟跨越塔和锚塔之间的线路。由于雷击南通侧江中跨越塔塔顶,若雷电流波在线上传播速度为光速,则反射波从锚塔传至跨越塔的时间大于 10 μs ,若仿真时间取 10 μs ,则上述处理不会影响雷击杆塔处的雷电暂态特性。

表 2 多波阻抗模型的波阻抗取值

Table 2 Value of surge impedance in the multistory transmission tower model			
参数名	波阻抗/ Ω	参数名	波阻抗/ Ω
Z_{Cr1}	324	Z_{T1}	172
Z_{Cr2}	283	Z_{T2}	163
Z_{Cr3}	364	Z_T	155
Z_{Cr4}	368	—	—

根据 FDTD 模型中接地极参数,计算得到工频接地电阻值为 3 Ω ^[18],文中冲击系数选 0.7,则 EMTP 模型中接地电阻值为 2.1 Ω 。

雷电流源由理想电流源和并联电阻构成。理想电流源的波形和幅值与 FDTD 模型保持一致,并联电阻取 1.15 k Ω (0.35 k Ω +0.8 k Ω),其中,0.35 k Ω 为 FDTD 模型中雷电通道波阻抗中间值,0.8 k Ω 则为雷电通道模型中串入的电阻阻值。

虽然美国和日本在输电线路防雷计算中认为感应分量较小而不予以考虑,但文[19]的研究结果表明感应分量对导线高度比较敏感,考虑跨越杆塔高度较高,文中将分别采用规程法^[20]、武汉大学公式^[19]、武高所公式^[19]和 Golde 公式^[21]计算感应分量的幅值。

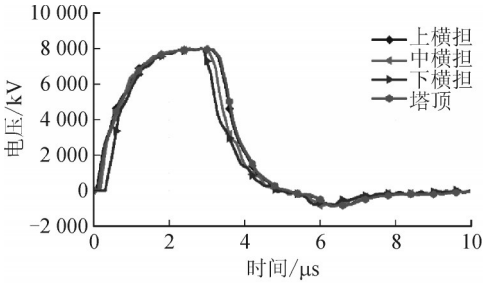
3.2 仿真结果

不考虑感应分量,EMTP 仿真得到的横担和塔顶电压、导线电压、绝缘子串过电压见图 8。

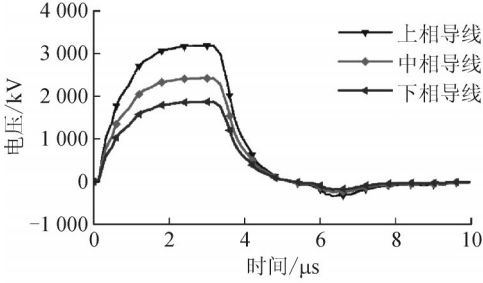
图 8(a)表明,杆塔横担和塔顶电压均在 $t=2.6 \mu\text{s}$,即雷电流波头时间达到相同的峰值;在 $t=2.8 \mu\text{s}$,即负反射波第一次从塔底返回塔顶后迅速降低。

图 8(c)表明,杆塔上相、中相和下相的绝缘子串过电压注入分量逐渐升高,主要是因为 EMTP 计算结果中横担电压峰值相同,而地线雷电流分量在导线上的耦合电压依次降低(见图 8(b))。

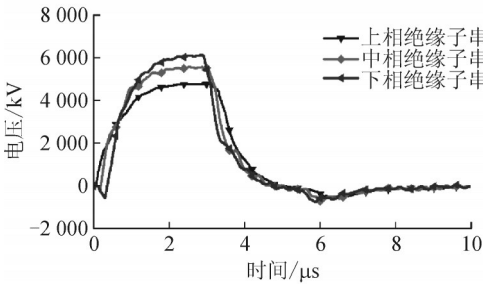
采用不同感应电压计算公式得到的结果见表 3,其中,括弧外的数字为感应分量幅值,括弧内的数字为感应分量与对应相注入分量幅值(图 8(c))的比值。虽然文[19]建议在输电线路防雷计算中应考虑感应分量,但也强调感应分量的影响有限,不宜过分夸大,而表 3 中的计算结果表明,现有的感应



(a) 横担和塔顶电压



(b) 导线电压(不考虑感应分量)



(c) 绝缘子串过电压(不考虑感应分量)

图 8 EMTP 计算结果

Fig. 8 Results calculated by EMTP

电压计算公式在处理较高的线路时,计算得到的感应分量所占比例偏大,说明表 3 中的感应电压计算公式并不适用于大跨越特高杆塔线路。因此,后面章节的对比分析中,EMTP 计算结果均不考虑感应分量。

表 3 雷电通道电流波在导线上的感应电压 U_i 峰值

Table 3 Peak value of phase conductor voltage induced from the current in the lightning channel kV			
计算方法	上相	中相	下相
规程法 ^[20]	7 867(1.63)	7 944(1.42)	7 635(1.24)
武汉大学公式 ^[19]	2 839(0.59)	2 867(0.51)	2 756(0.45)
武高所公式	3 194(0.66)	2 362(0.42)	1 699(0.28)
Golde 公式 ^[21]	5 047(1.05)	5 047(0.9)	5 047(0.82)

4 对比分析

4.1 杆塔横担和塔顶电压

对比图 6(a)中 FDTD 和图 8(a)中 EMTP 计算得到的杆塔横担和塔顶电压,可以发现:

1)FDTD 计算获得的上相、中相、下相横担和塔

顶电压峰值比 EMTP 计算结果分别降低了 48.8%、58.1%、65.4%和 46.6%。

2)FDTD 计算得到的横担电压峰值从上至下依次降低,而 EMTP 计算得到的横担电压峰值却相同,主要是因为杆塔多波阻抗模型没有考虑雷电波的衰减,而且简化了波在塔身和横担中传播的折反射过程。

3)对比 FDTD 和 EMTP 计算得到的横担和塔顶电压波形的波尾可以发现,FDTD 计算结果波尾变化过程较缓,而 EMTP 则在负反射波返回后迅速降低,因此,将高杆塔等效为多波阻抗模型,可能会夸大地面反射波的作用。

4.2 导线电压

对比图 6(b)中 FDTD 和图 8(b)中 EMTP 计算得到的导线电压发现:FDTD 计算获得的上相、中相、和下相导线峰值比 EMTP 计算结果分别降低了 63.4%、71.7%和 72.0%,而且 FDTD 计算得到的相导线电压达到峰值的时刻各异,而 EMTP 计算得到的相导线电压达到峰值的时刻几乎一致。造成 FDTD 与 EMTP 计算结果差异较大的原因主要包括以下两个方面。

1)EMTP 线路模型中导地线耦合系数基于 TEM 波推导而来,远大于雷击杆塔时导地线的实际耦合系数,见表 4,表中雷击杆塔模式定义为各相绝缘子串过电压达到峰值时刻对应的导、地线耦合系数^[22]。因此,当地线中流过相同的雷电流时,EMTP 计算得到的相导线耦合电压将远高于 FDTD 计算结果,从而导致 EMTP 计算得到的导线电压偏高。

表 4 导线与地线耦合系数

Table 4 Coupling factors between phase conductor and earth conductor

参数	上相	中相	下相
TEM 模式	0.455(100%)	0.372(100%)	0.314(100%)
雷击杆塔模式	0.268(59%)	0.147(40%)	0.062(20%)

2) EMTP 计算得到的线路电压没有考虑感应分量,而感应分量与注入分量极性相反,因此不考虑感应分量会导致 EMTP 计算得到的导线电压偏高。由于绝缘子串过电压中注入分量与感应分量两者的峰值并非同时出现^[19],因此考虑感应分量后,FDTD 计算得到的各相导线电压在不同时刻到达峰值。

4.3 绝缘子串过电压

对比图 6(c)中 FDTD 和图 8(c)中 EMTP 计算得到的导线电压发现:FDTD 计算得到的上相、中相和下相绝缘子串过电压比 EMTP 计算结果分别降低了 47.0%、55.6%和 62.9%;而且 FDTD 计算得到的上相、中相和下相绝缘子串过电压依次降低,而 EMTP 则正好相反。

造成上述差异的原因在 4.1 节和 4.2 节已经予以讨论,对比两种方法中横担电压和导线电压的绝对差

值发现,横担电压计算结果的差异是导致绝缘子串过电压计算结果差异较大的主要原因。因此,有必要对 Hara 提出的杆塔多波阻抗模型的适用范围进行研究。

为排除输电线路模型及导线感应电压的影响,文中采用上述的 FDTD 和 EMTP 计算模型,仅对单基杆塔进行仿真分析。杆塔的塔头与图 2 中杆塔保持一致,杆塔呼高分别取 50、100、200、300、346 m(杆塔实际呼高),EMTP 计算得到的上相、中相和下相横担电压与 FDTD 计算结果的比值见图 9。

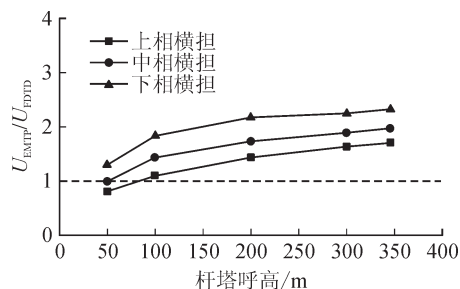


图 9 不同呼高下,EMTP 计算得到的横担电压与 FDTD 计算结果的比值

Fig. 9 The ratio of cross-arm voltage calculated by EMTP to that by FDTD under different tower height

计算结果表明,随着杆塔高度降低,EMTP 和 FDTD 仿真得到的杆塔横担雷电过电压幅值逐渐趋于一致,当杆塔呼高降至 50 m 时,EMTP 计算得到的上相、中相和下相横担电压分别为 FDTD 计算结果的 80%、99%和 130%。因此,Hara 提出的杆塔多波阻抗模型更适用于杆塔高度较低(譬如:杆塔呼高在 50 m 以下)的场合,对于杆塔呼高超过 50 m 的高杆塔,Hara 多波阻抗模型中的波阻抗构成及其波阻抗计算公式需要进行修正。

5 结论

文中以淮南—上海特高压工程南通—苏州段的大跨越高杆塔线路为对象,分别建立了大跨越线路段雷电暂态特性仿真计算的 FDTD 模型和 EMTP 模型,计算获得了大跨越特高杆塔线路雷电暂态特性,对比仿真结果得到如下结论。

1)采用 Hara 提出的杆塔多波阻抗模型,FDTD 计算获得的上相、中相、下相横担和塔顶电压峰值比 EMTP 计算得到的相应值分别降低了 48.8%、58.1%、65.4%和 46.6%。

2)规程法、武汉大学公式、武高所公式和 Golde 公式计算得到的大跨越线路的感应分量比重偏大,并不适合于大跨越特高杆塔线路。忽略感应分量,FDTD 计算获得的上相、中相、和下相导线峰值比 EMTP 计算结果分别降低了 63.4%、71.7%和 72.0%。

3)采用 Hara 提出的杆塔多波阻抗模型,不考虑

感应分量, FDTD计算得到的上相、中相和下相绝缘子串过电压比EMTP计算结果分别降低了47.0%、55.6%和62.9%。

4) 改变跨越杆塔呼高进行计算的结果表明, 随着杆塔高度降低, EMTP和FDTD仿真得到的杆塔横担雷电过电压幅值逐渐趋于一致, 当杆塔呼高降至50 m时, EMTP计算得到的上相、中相和下相横担电压分别为FDTD计算结果的80%、99%和130%。

综上, 针对大跨越特高杆塔线路的雷电暂态特性, EMTP仿真结果偏大。因此, 针对大跨越特高杆塔线路雷电暂态特性分析的EMTP模型还有待进一步完善, 主要包括杆塔多波阻抗模型的修正和感应分量计算公式的修正。

参考文献:

- [1] 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 characteristics caused by lightning stroke[J]. Power System Technology, 2007, 31(23): 11-16.
- [2] 胡吉磊. 舟山与大陆联网大跨越370 m高塔防雷设计研究[D]. 华北电力大学, 2011.
HU Jilei. The study on the lightning prevention design of 370 m tower used in the large crossing of Zhoushan[D]. North China Electric Power University, 2011.
- [3] 詹花茂. 输电线路特高杆塔雷电过电压的理论与试验研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2002.
ZHAN Huamao. Theoretical and experimental study on lightning voltage of ultra-high transmission tower[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2002.
- [4] MOTOYAMA H, KINOSHITA Y, NONAKA K, et al. Experimental and analytical studies on lightning surge response of 500 kV transmission tower[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2009, 24(4): 2232-2239.
- [5] TAKAMI J, TSUBOI T, YAMAMOTO K, et al. Lightning surge response of a double-circuit transmission tower with incoming lines to a substation through FDTD simulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(1): 96-104.
- [6] TAKAMI J, TSUBOI T, YAMAMOTO K, et al. Lightning surge into a substation at a back-flashover and review of lightning protective level through the FDTD simulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2014, 21(3): 1044-1052.
- [7] TRAN H T, BABA Y, NAGAOKA N, et al. FDTD simulation of lightning surges on overhead wires in the presence of corona discharge[J]. IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2012, 54(6): 1234-1243.
- [8] CHENGUO Y, HAO W, YAN M, et al. Finite difference time domain simulation of lightning transient electromagnetic fields on transmission lines[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2013, 20(4): 1239-1246.
- [9] 吴耀辉. 基于FDTD的雷击杆塔瞬态响应仿真研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
WU Yaohui. Analytical studies on lightning surge response simulation of transmission tower by FDTD[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2012.
- [10] NODA T, YOKOYAMA S. Thin wire representation in finite difference time domain surge simulation[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2002, 17(3): 840-847.
- [11] LIAO Z, WONG H L, YANG B, et al. A transmitting boundary for transient wave analysis[J]. Science in China (Series A), 1984, 27(10): 1063-1076.
- [12] BABA Y, RAKOV V A. Electromagnetic models of the lightning return stroke[J]. Journal of Geophysical Research, 2007, 112(D4): 1984-2012.
- [13] RAKOV V A. Lightning return stroke speed: A review of experimental data[C]//27th International Conference on Lightning Protection (ICLP)[S.l.]: [s.n.], 2004: 1-7.
- [14] GORIN B N, SHKILEV A V. Measurements of lightning currents at the Ostankino tower[J]. Elektrichestvo, 1984(8): 64-65.
- [15] HARA T, YAMAMOTO O. Modelling of a transmission tower for lightning - surge analysis[J]. IEE Proceedings - Generation, Transmission and Distribution, 1996, 143(3): 283-289.
- [16] HARA T, YAMAMOTO O, HAYASHI M, et al. Empirical formulas of surge impedance for single and multiple vertical cylinder[J]. T. IEE Japan, 1990(110): 129-137.
- [17] MARTI J R. Accurate modelling of frequency - dependent transmission lines in electromagnetic transient simulations[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982(1): 147-157.
- [18] 林福昌. 高电压工程[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
LIN Fuchang. High voltage engineering[M]. Beijing: China Electrical Power Press, 2006.
- [19] 刘强, 谷定燮, 张元芳. 雷击杆塔塔顶时导线上感应电压敏感性分析[J]. 高电压技术, 2005, 31(3): 31-33.
LIU Qiang, GU Dingxie, ZHANG Yuanfang. Sensitivity analysis of lightning performance calculations for transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(3): 31-33.
- [20] 交流电气装置的过电压保护和绝缘配合: DL/T 620—1997[S]. 1997.
Overvoltage protection and insulation coordination for ac electrical installations: DL/T 620—1997[S]. 1997.
- [21] GOLDE R H. Lightning[M]. Physics of lightning, London: Academic Press Inc., 1977: 377.
- [22] BABA Y, ISHII M. Numerical electromagnetic field analysis on lightning surge response of tower with shield wire[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(3): 1010-1015.

谢文炳(1988—), 男, 工程师, 主要研究方向为输电线路运维技术。