

高压输电导线三维工频电磁场计算与测量

陈楠¹, 文习山¹, 刘波², 蓝磊¹, 李晔³

(1. 武汉大学 电气工程学院, 湖北省 武汉市 430072; 2. 襄樊供电公司调度通信中心, 湖北省 襄樊市 441000; 3. 宁夏电力科学研究所, 宁夏回族自治区 银川市 750002)

Calculation and Measurement of Three-Dimensional Power Frequency Electrical and Magnetic Field Under Transmission Line

CHEN Nan¹, WEN Xishan¹, LIU Bo², LAN Lei¹, LI Ye³

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China;

2. Dispatch and Communication Center of Xiangfan Electric Power Company, Xiangfan 441000, Hubei Province, China;

3. Ningxia Electric Power Research Institute, Yinchuan 750002, Ningxia Hui Autonomous Region, China)

ABSTRACT: To calculate power frequency electric and magnetic fields (PFEMF) generated by high voltage transmission line or space-crossing transmission lines accurately, based on charge simulation method (CSM) and Biot-Savart theorem, a universal model to calculate three dimensional PFEMF is built according to catenary equation, then the distribution of PFEMF under ordinary 330 kV double circuit transmission line on the same tower and that under the crossing transmission lines are calculated and measured. Calculation and measurement results show that as for the transverse distribution of PFEMF along the measured points perpendicular to the midspan, the results calculated by three-dimensional model under the calculation height of the conductor that is chosen as the minimum height above ground are very close to those calculated by two-dimensional model and are close to the measured results as well; at the projection beneath the crossing point of crossing transmission lines, the calculation results of PFEMF are close to the measured results, thus the effectiveness of the proposed calculation model of crossing transmission lines is verified. The causes leading to the error between the calculation results of PFEMF and its measured results are analyzed, and related factors influencing the calculation results by three-dimensional calculation model are emphatically discussed, and the reasonable number of divided conductor segments is given.

KEY WORDS: high voltage transmission line; power frequency electric and magnetic fields (PFEMF); catenary; crossing; field measurement; charge simulation method (CSM)

摘要:为准确计算高压输电线路以及交叉跨越输电线路的工频电磁场,基于模拟电荷法和毕奥-萨瓦定律,根据悬链线方程建立了输电导线的三维电磁场通用计算模型。计算和测量了常规同塔双回线路以及交叉跨越导线下方的工频电磁

场分布,结果表明,在垂直档距中央的横向分布上,三维模型计算结果与二维模型导线计算高度取最小对地高度时的计算结果十分接近,且均与实测值比较吻合;交叉跨越导线下方交叉点投影位置,工频电磁场计算值与测量值也吻合较好,验证了交叉跨越导线计算模型的有效性。此外,分析了导线下方工频电磁场计算值与测量值的误差来源,着重讨论了影响三维计算模型计算结果的相关因素,给出了导体线单元剖分段数的合理值。

关键词: 高压输电导线; 工频电磁场; 悬链线; 交叉跨越; 现场测量; 模拟电荷法

0 引言

高压输电线路地面电磁场强度是确定线路最小对地高度及划定线路走廊宽度的重要依据^[1-3]。随着公众环保意识的加强,对导线工频电磁场的准确计算越发具有重要意义。目前计算导线工频电磁场的方法有很多,但大多采用二维计算模型,将导线视为与地面平行的无限长直导线,导线对地高度取最小对地高度或平均对地高度^[4-7]。实践表明,对于普通高压输电导线,二维计算结果一般误差较小,能够满足工程要求;但对于某些档距较长、弧垂较大的线路,二维简化模型误差较大^[8]。因此有学者提出了输电导线三维电磁场计算模型,考虑弧垂的影响获得了比较理想的计算结果^[9-15];但研究成果仅限于仿真计算,没有进行现场验证。此外,超、特高压输电线路设计时,可能会遇到跨越较低电压等级送电线路的情况^[16],空间交叉跨越导线属于不平行导线结构,必须建立三维模型计算求解。对于空间交叉跨越导线产生的电磁场,目前还没有相关

计算实例，也没有现场测量数据。

为此，本文根据悬链线方程建立导线下方工频电磁场三维计算模型，根据实际线路参数计算了常规输电导线和交叉跨越输电导线下方的工频电磁场，并分析了计算结果与实际测量数据的误差来源，为实际工程提供参考。

1 输电导线三维电磁场计算模型

图1和图2分别为三相输电导线以及交叉跨越导线空间三维电磁场计算模型。针对工频电场，本文采用有限长模拟线电荷法计算导线周围的三维电场分布^[9]。该方法将导体划分为多个线单元，认为每一单元内线电荷呈线性分布。根据设定的边界条件和线性单元的端点坐标建立电位系数矩阵，在三维空间直角坐标系下求解线性单元电荷。求得所有线性单元电荷后，依据叠加原理可计算空间3个方向上的电场强度 E_x 、 E_y 、 E_z 。实际计算时，忽略绝缘子串的影响，只将线电荷设在导线和杆塔导体轴线上(铁塔构架等效为圆形截面)^[10-11]。将导线和杆塔划分为 M 个线单元、 N 个节点，并对大地作镜像，匹配点选在导体单元的表面。

针对工频磁场，采用有限长载流细导线模型和

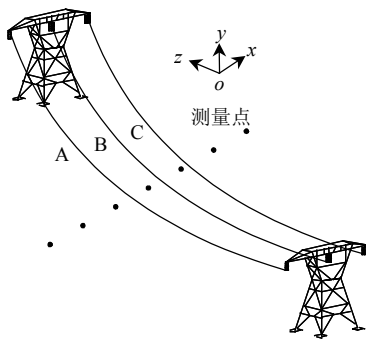


图1 三相输电导线三维电磁场计算模型
Fig. 1 Three-dimensional computation model of electromagnetic field for 3-phase transmission lines

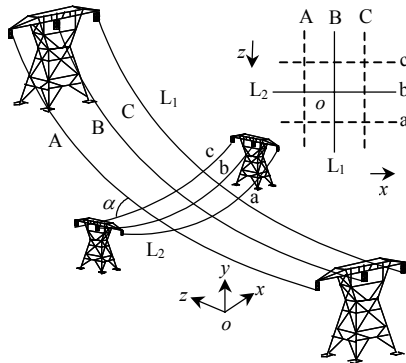


图2 交叉跨越输电导线三维电磁场计算模型
Fig. 2 Three-dimensional computation model of electromagnetic field for transmission lines crossed in space

毕奥-萨瓦定律计算空间交叉跨越导线周围的空间磁场^[14]。对于空间任一载流导线段 AB ，假设所载电流为 i_{ab} ，由毕奥-萨瓦定律可知其在点 P 产生的磁场为

$$\mathbf{B} = \frac{\mu_0 i_{ab}}{4\pi} \int_A^B \frac{d\mathbf{l} \times \mathbf{r}_0}{r^2} \quad (1)$$

式中： \mathbf{r}_0 为线元 $d\mathbf{l}$ 指向点 P 的单位矢量； μ_0 为真空磁导率。只须知道 P 、 A 、 B 3点的坐标和负载电流 i_{ab} ，即可求得点 P 的磁场强度 \mathbf{B} 。复杂的多载流导线可视为由多个载流导线段组成，根据叠加定理，导线周围任一点的磁场为每一载流导线段在该点磁场的矢量和。

2 导线弧垂计算

输电导线可用周期性的悬链线进行描述^[17]。参考图1和图2计算模型，沿导线方向取为 z 方向，竖直方向取为 y 方向，若坐标原点取在导线悬挂点(z 始端)，则悬链线方程^[18]为

$$y = -\frac{\sigma_0 h}{\gamma L_{h=0}} \left[\sinh \frac{\gamma l_h}{2\sigma_0} + \sinh \frac{\gamma(2z - l_h)}{2\sigma_0} \right] - \left[\frac{2\sigma_0}{\gamma} \sinh \frac{\gamma z}{2\sigma_0} \sinh \frac{\gamma(l_h - z)}{2\sigma_0} \right] \sqrt{1 + \left(\frac{h}{L_{h=0}} \right)^2} \quad (2)$$

式中： $L_{h=0} = \frac{2\sigma_0}{\gamma} \sinh \left(\frac{\gamma l_h}{2\sigma_0} \right)$ ； l_h 、 h 分别为两悬挂点的水平、垂直距离； γ 为单位长度导线所受重力与导线截面的比值，可根据导线型号查表得到； σ_0 为导线最低点的应力。由式(2)可计算得到导线各离散点的对地高度，需要注意的是，当原点位置发生变化时，式中的 z 相应地要改变。此外，对于同一档距的多条线路，认为它们具有相同的弧垂变化规律。

导线的应力随导线比载和气候因素的改变而改变，对于相同档距的导线，已知某种气候条件下的比载和应力，可根据导线状态方程计算另一种气候条件下的导线应力，从而获得指定气候条件下的弧垂。导线状态方程^[17]可表示为

$$\sigma_n - \frac{l^2 g_n^2}{24\beta\sigma_n^2} = \sigma_m - \frac{l^2 g_m^2}{24\beta\sigma_m^2} - \frac{\alpha}{\beta} (\theta_n - \theta_m) \quad (3)$$

式中： g_m 、 θ_m 、 σ_m 为已知状态下的比载、温度和应力； g_n 、 θ_n 、 σ_n 为另一种气候条件下的比载、温度和应力； α 为导线膨胀系数； β 为导线弹性系数。

3 现场测量

为验证本文算法，选取银川地区2条典型输电

线路进行现场实测。测量仪器采用 PMM8053B 电磁辐射分析仪,工频测量分析型探头选用可以同时测量工频电场和磁场的 EHP-50C,其测量频域为 5 Hz~100 kHz,电场强度测量量程为 0.01 V/m~100 kV/m,显示分辨率为 0.001 V/m;磁场强度测量量程为 1 nT~10 mT,显示分辨率为 1 nT。该电磁分析仪对测量值的处理包括算术平均、方均根 (root mean square, RMS) 平均和空间平均 3 种模式,本文测量时采用 RMS 平均模式,以确保工频电磁场测量值和计算值均为有效值。导线档距和交叉跨越导线交叉角度采用瑞士 Leica TC1102C 全站仪测量,该仪器采用真正的同轴测距系统,提供精密的无棱镜距离测量,保证导线交叉角的测量误差小于 0.5°。

测量时探头宽带选择 1 000 Hz,主测量仪器与探头通过光纤连接,读取测量结果时人与探头的距离至少保持 2.5 m,以减小人体对测量结果的影响^[19]。测量时间为 14:30—16:30,环境温度为 28~31℃,相对湿度低于 60%。

4 普通输电导线算法验证

4.1 线路参数

某 330 kV 同塔双回输电线路如图 3 所示,线路参数见表 1。以档距正中央为坐标原点,导线三相坐标系指导线某端悬挂点的空间位置。导线比载根据导线型号查表得到,考虑测量条件,取为自重比载。根据测量时的环境温度,计算导线应力为 43.6 N·mm⁻²,进而得到最大弧垂为 13.84 m。导线运行电压和运行电流均由当地变电站提供。



图 3 330 kV 同塔双回线照片

Fig. 3 Photo of a 330 kV double-circuit line on the same tower

4.2 计算与测量结果对比

利用本文方法计算该导线下方距地 1.5 m 处的工频电磁场,图 4 和图 5 所示为导线下方工频电磁场三维分布。计算结果表明,导线下方工频电磁场随着导线弧垂的增大而增大。电场强度最大值为

表 1 某 330 kV 同塔双回线参数

Tab. 1 Calculation parameters for a 330 kV double-circuit line on the same tower

参数	330 kV 同塔双回线	
A 相坐标/m	A ₁ (-5.8, 42, -197.4)	A ₂ (7.6, 34, -197.4)
B 相坐标/m	B ₁ (-6.1, 26, -197.4)	B ₂ (6.1, 26, -197.4)
C 相坐标/m	C ₁ (-7.6, 34, -197.4)	C ₂ (5.8, 42, -197.4)
地线 1 坐标/m	(-3.7, 45.6, -197.4)	
地线 2 坐标/m	(3.7, 45.6, -197.4)	
档距/m	394.8	
导线型号	LGJ-630/45	
导线半径/mm	16.8	
地线半径/mm	7.25	
分裂数	2	
分裂间距/mm	500	
比载/(N·m ⁻¹ ·mm ⁻²)	0.030 91	
应力/(N·mm ⁻²)	43.6	
运行电压/kV	348.87	349.01
运行电流/A	146.87	154.31

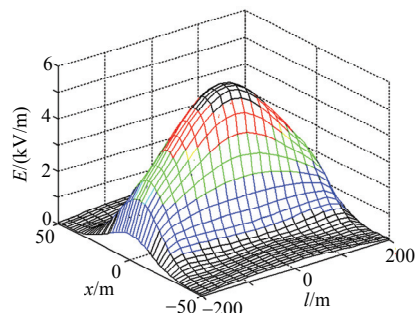


图 4 线路下方三维电场分布

Fig. 4 Three-dimensional electric field distribution under the line

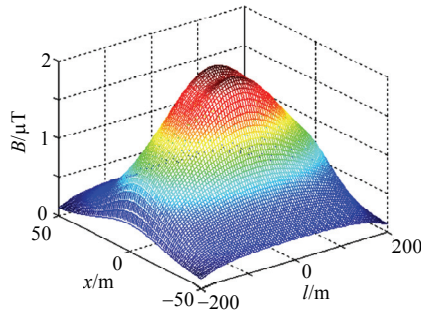


图 5 线路下方三维磁场分布

Fig. 5 Three-dimensional magnetic field distribution under the line

5.608 kV/m,位于导线档距正中央;磁场强度最大值为 1.983 μT,位于 II 回 B 相导线弧垂最大处;导线下方电磁场与导线运行电压电流成正比。三维模型下导线下方工频电磁场分布同时反映沿导线横向和纵向的变化情况,相对二维模型,三维模型能更全面、准确地反映地面附近场强的分布。

以档距正中央为坐标原点,沿垂直导线方向每隔一定距离测量地面上方 1.5 m 处的工频电磁场强度。为对比仿真计算结果与实测数据,分别在二维^[4]和三维计算模型下计算了测量点的工频电磁场

强度。在利用二维模型进行计算时,选取导线最小对地高度($H_{\min} = H - S$)和平均高度($H_{\text{av}} = H - 2S/3$)分别作为计算高度进行计算, H 为导线悬挂点高度, S 为最大弧垂。图6和图7给出了不同计算模型和计算条件下测量点的仿真结果及实测结果。可以看出,在垂直档距中央的工频电磁场横向分布上,三维模型计算值与二维模型取最小对地高度的计算值几乎重合,三维模型计算值略小于此时二维模型的计算值,且两者均与实测值比较接近。而二维模型取平均对地高度时在距导线中心距离小于15m时的计算值要明显小于测量值,大于15m后计算值和测量值误差逐渐减小。由此可见,当仅考虑弧垂最大处工频电磁场的横向分布时,采用二维计算模型且导线计算高度取最小对地高度是合理的。当考察整个档距内的电磁场分布状况时,二维模型无法反映沿导线弧垂方向电磁场的变化状况,而三维模型则可以全面、准确地反映这种不均匀分布状况。此外,当涉及空间不平行带电导体模型时,如交叉跨越输电导线,只能借用三维模型计算其周围的场强。

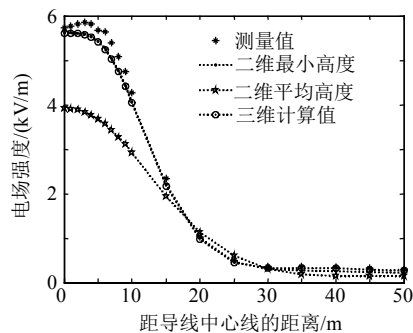


图6 二维和三维模型下档距中央电场强度计算值与测量值对比

Fig. 6 Two-dimensional and three-dimensional calculated electric field under the midspan compared with the measured data

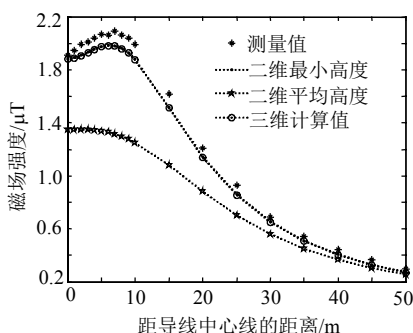


图7 二维和三维模型下档距中央磁场强度计算值与测量值对比

Fig. 7 Two-dimensional and three-dimensional magnetic field under the midspan compared with the measured data

4.3 误差分析

图6和图7的计算结果表明,导线下方工频电磁场测量值大于计算值。对于工频电场,计算时并未考虑导线电晕的影响,实际上导线电晕产生空间电荷,对导线下方的工频电场稍有加强作用^[20-21]。导线运行电压、运行电流和最大弧垂是影响工频电磁场计算结果的关键因素,本文验证时导线电压电流与最大弧垂均为实际运行值,故误差相对较小。实际应用中应尽量根据实际运行方式和运行环境获取准确的计算参数。对于三维计算模型,导体线单元划分精度将影响计算结果,图8和图9所示为单档距导线不同剖分段数 N 时工频电磁场的计算值。由图可知,电磁场计算值随 N 增大而增大,且当 N 增大到一定值时,电磁场计算值趋于稳定。对于工频电场和磁场, N 分别取50和20比较合适,此时既能保证计算精度,又能节约计算时间。此外,对于档距中央的电磁场横向分布,考虑档距对计算点的对称性,参与计算的档距个数对电磁场计算值影响很小,实际工程中可以忽略不计,因此建立单档距模型即可满足计算要求^[22-23]。对于其他位置,建立3档距计算模型可以满足计算精度^[22]。文献[22]同时表明,忽略不同大地电阻率下镜像电流引入的工频磁场计算误差也可忽略不计。

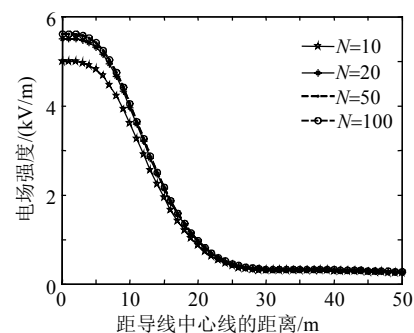


图8 N 变化时档距中央工频电场计算值

Fig. 8 Effect of N on electric field under the midspan calculated with three-dimensional model

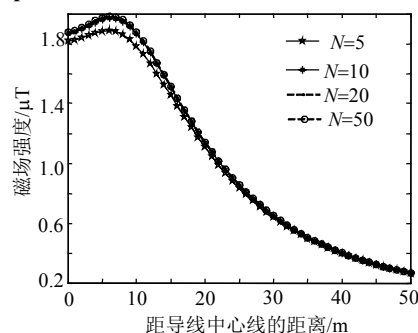


图9 N 变化时档距中央工频磁场计算值

Fig. 9 Effect of N on magnetic field under the midspan calculated with three-dimensional model

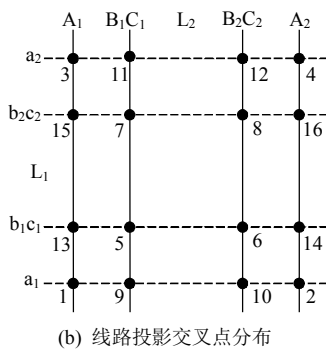
5 交叉跨越导线算法验证

5.1 线路参数

图10为某220/110kV交叉跨越输电导线,表2为2条线路的基本参数。计算时坐标原点选在2导线的交叉中心,根据表2所给导线比载和应力数据,计算得到2条导线的最大弧垂分别为7.54和4.17m。



(a) 实际线路



(b) 线路投影交叉点分布

图10 某220/110kV交叉跨越导线

Fig. 10 Space-crossed 220 kV and 110 kV lines

表2 某交叉跨越导线计算参数

Tab. 2 Calculation parameters for space-crossed lines

参数	220 kV 线路	110 kV 线路
运行电压/kV	230.1	114.8
负载电流/A	201.8	104.9
A ₁ 相坐标/m	(-5, 32, 0)	(-124, 18, -5)
B ₁ 相坐标/m	(-4, 26, 0)	(-124, 14, -4)
C ₁ 相坐标/m	(-4, 38, 0)	(-124, 22, -4)
A ₂ 相坐标/m	(5, 32, 0)	(-124, 18, 5)
B ₂ 相坐标/m	(4, 38, 0)	(-124, 22, 4)
C ₂ 相坐标/m	(4, 26, 0)	(-124, 14, 4)
导线型号	LGJ-400/50	LGJ-300/25
导线半径/mm	13.70	11.88
分裂数/根	2	2
分裂间距/mm	450	400
比载/(N·m ⁻¹ ·mm ⁻²)	0.033 46	0.031 74
应力/(N·mm ⁻²)	49.97	85.7
交叉角/(°)	82.7	

5.2 计算与测量结果对比

由于该交叉跨越导线均为同塔双回线路,线路布局较为复杂,测量主要考察导线交叉点正下方的电磁场强度。被测线路杆塔上相横担和下相横担等长,上相导线与下相导线投影在y平面重合,因此在y平面会有16个投影交叉点,图10(b)对其进行

了编号,其中B₁C₁等表示B₁相和C₁相重叠的投影线。表3列出了各交叉点的电磁场强度测量值和计算值,结果表明:测量值与计算值基本吻合,平均误差较小,但也存在个别测量点误差较大。造成误差除前文分析原因以外,由于测量点的精确定位有一定难度,模型计算点与实际测量点存在一定偏差,这是导致个别测量点误差较大的主要原因。

表3 现场测量数据与计算结果对比

Tab. 3 Comparison between measurement data and computation result

交叉点	电场强度测量值/(kV/m)	电场强度计算值/(kV/m)	误差/%	磁场强度测量值/μT	磁场强度计算值/μT	误差/%
1	1.696	1.664	1.90	1.170	1.289	-9.21
2	1.389	1.304	6.51	1.236	1.374	-10.05
3	1.341	1.304	2.84	1.244	1.374	-9.43
4	1.709	1.664	2.69	1.160	1.289	-10.00
5	1.652	1.617	2.19	1.127	1.254	-10.10
6	1.461	1.342	8.87	1.232	1.351	-8.83
7	1.421	1.342	5.88	1.251	1.313	-4.71
8	1.708	1.617	5.65	1.195	1.254	-4.73
9	1.831	1.649	11.01	1.221	1.279	-4.56
10	1.507	1.342	12.28	1.400	1.351	3.65
11	1.458	1.342	8.65	1.399	1.351	3.61
12	1.809	1.649	9.76	1.538	1.279	20.25
13	1.867	1.629	14.63	0.920	1.282	-28.26
14	1.451	1.306	11.11	1.247	1.313	-5.00
15	1.571	1.306	20.25	1.311	1.351	-2.94
16	1.769	1.629	8.62	1.191	1.282	-7.14

6 结论

1) 本文建立了输电导线三维工频电磁场计算模型,能够考虑环境温度与导线比载对导线弧垂的影响,准确计算常规导线和交叉跨越导线下方的工频电磁场。

2) 对同塔双回输电导线进行的计算表明,三维模型下导线下方工频电磁场计算值能同时反映沿导线横向和纵向的变化情况。考察导线档距中央工频电磁场的横向分布时,采用二维计算模型且导线计算高度取最小对地高度时的计算结果与三维计算结果十分接近,且均与实测值比较吻合,此时可采用二维模型进行计算以节省计算时间。

3) 三维计算模型下导体线单元划分精度将影响计算结果,计算表明,对于工频电场和磁场,剖分段数N分别取50和20可以满足计算要求。

4) 对某交叉跨越导线下方工频电磁场的计算和测量表明,在交叉点投影位置,计算值与测量值吻合较好,验证了本文交叉跨越导线三维计算模型的有效性。

参考文献

- [1] 刘振亚. 特高压电网[M]. 北京: 中国经济出版社, 2005: 311-317.
- [2] 国家电网公司东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 52-56.
- [3] 粟福珩. 高压输电的环境保护[M]. 北京: 水利电力出版社, 1989: 14-22.
- [4] HJ/T24—1998, 500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价技术规范[S].
- [5] Sarma M P, Janischewskij W. Electrostatic field of a system of parallel cylindrical conductors[J]. IEEE Trans on Power Apparatus and Systems, 1969, 88(7): 1069-1079.
- [6] 张启春, 阮江军, 喻剑辉, 等. 高压架空线下空间场强的数学模型[J]. 高电压技术, 2000, 26(1): 19-21.
Zhang Qichun, Ruan Jiangjun, Yu Jianhui, et al. Mathematical models for electric field under high voltage overhead line[J]. High Voltage Engineering, 2000, 26(1): 19-21(in Chinese).
- [7] 张宇, 郑伟, 文武, 等. 架空线路分裂线路表面电位梯度的数值计算[J]. 高电压技术, 2005, 31(1): 23-25.
Zhang Yu, Zheng Wei, Wen Wu, et al. Numerical calculation of electric field intensity on the surface of bundle conductors of overhead transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(1): 23-25(in Chinese).
- [8] 文武, 彭磊, 张小武, 等. 特高压大跨越架空线路三维工频电场计算[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1821-1825.
Wen Wu, Peng Lei, Zhang Xiaowu, et al. 3D Power frequency electric field calculation of multi-span UHV overhead line[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 821-1825(in Chinese).
- [9] Lee B Y, Park J K, Min S W, et al. An effective modeling method to analyze the electric field around transmission lines and substations using a generalized finite line charge[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3): 1143-1150.
- [10] 卢铁兵, 肖刊, 张波, 等. 超高压输电线路铁塔附近的三维工频电场计算[J]. 高电压技术, 2001, 27(3): 24-26.
Lu Tiebing, Xiao Kan, Zhang Bo, et al. Calculation of electric field distribution near EHV power towers[J]. High Voltage Engineering, 2001, 27(3): 24-26(in Chinese).
- [11] 彭迎, 阮江军. 模拟电荷法计算特高压架空线路 3 维工频电场[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 69-73.
Peng Ying, Ruan Jiangjun. Calculation of three dimensional harmonic electric field around ultra high voltage overhead line based on the charge simulation method[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 69-73(in Chinese).
- [12] Mamishev A V, Nevels R D, Russell B D. Effects of conductor sag on spatial distribution of power line magnetic field[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1996, 11(3): 1571-1576.
- [13] Gomollon J A, Palau R. Steady state 3-D-field calculations in three-phase systems with surface charge method[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(2): 919-924.
- [14] 胡白雪. 超高压及特高压输电线路的电磁环境研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [15] 肖冬萍, 何为, 张占龙, 等. 特高压输电线路工频磁场三维优化模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(12): 116-120.
Xiao Dongping, He Wei, Zhang Zhanlong, et al. Three-dimension optimization model for power frequency magnetic field of UHV transmission lines[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(12): 116-120(in Chinese).
- [16] DL/T 5092—1999, 110~500 kV 架空送电线路设计技术规程[S].
- [17] 邵天晓. 架空送电线路的电线力学计算[M]. 北京: 中国电力出版社, 2003: 65-87.
- [18] 彭一琦. 考虑气象条件的输电导线工频电场计算新方法[J]. 高电压技术, 2010, 36(10): 2507-2512.
Peng Yiqi. Novel method for transmission line power frequency electric field calculation considering the weather condition[J]. High Voltage Engineering, 2010, 36(10): 2507-2512(in Chinese).
- [19] DL/T988—2005, 高压交流架空送电线路、变电站工频电场和磁场测量方法[S].
- [20] 李伟, 张波, 何金良, 等. 超特高压交流输电线路电晕对地面电场的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(11): 2288-2294.
Li Wei, Zhang Bo, He Jinliang, et al. Influence of corona effect on ground level electrical field under EHV/UHV AC transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(11): 2288-2294(in Chinese).
- [21] 郑亚利, 俞集辉, 汪泉弟, 等. 电晕放电对超高压输电线路工频电场的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(4): 872-876.
Zheng Yali, Yu Jihui, Wang Quandi, et al. Impact of corona discharge on the power frequency electric field intensity in the extra-high voltage transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(4): 872-876(in Chinese).
- [22] Adel Z E D. Magnetic-field calculation under EHV transmission lines for more realistic cases[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2009, 24(4): 2214-2222.
- [23] Adel Z, E D, Mohamed A A W. The effects of the span configurations and conductor sag on the electric-field distribution under overhead transmission lines[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(4): 2891-2902.



陈楠

收稿日期: 2010-11-28.

作者简介:

陈楠(1984), 男, 博士研究生, 从事电磁场数值计算、输电导线电晕电场以及电磁环境等方面的研究, E-mail: chennan135246@126.com;

文习山(1962), 男, 教授, 博士生导师, 从事防雷接地、过电压保护、电缆绝缘监测与电磁场数值计算等方面研究工作, E-mail: xswen@wuhee.edu.cn;

刘波(1983), 男, 本科, 助理工程师, 研究方向为电力系统运行与调度。

(责任编辑 马晓华)