

特高压输电线路分裂导线表面电位梯度的计算及其特性分析

牛 林,杜至刚,赵建国

(山东大学 电气工程学院,山东 济南 250061)

摘要: 通过对工程中计算导线表面电位梯度的常用数学模型进行准确度校验,提出逐步镜像法由于具有较高的计算精确度,而且最大误差远小于可以接受的工程误差限值,适合我国在进行特高压输电线路设计和电磁环境研究时使用。基于逐步镜像法,计算了 1 000 kV 交流单回和同塔双回输电线路的导线表面电位梯度,重点分析了线路对地高度、导线分裂根数、子导线半径、导线布置形式和双回路相序布置方式等因素对特高压线路分裂导线表面电位梯度取值特性的影响。

关键词: 特高压输电线路; 分裂导线; 表面电位梯度

中图分类号: TM 723

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)10-0005-05

0 引言

特高压电网具备长距离、大容量和低损耗的送电能力,是符合中国国情、适应未来电网发展趋势的输电方式,可以在更大范围内优化我国资源配置方式,满足未来我国电力需求持续增长的需要,促进电网与电源协调发展,推动电力技术和电工制造业技术升级,实现电力工业跨越式发展^[1-2]。

在特高压输电线路的设计过程中,电晕特性(电晕损耗、无线电和电视干扰、可听噪声等参数)是导线选型的重要参考依据,而导线表面的电位梯度是计算这些参数的关键数据,所以导线表面电位梯度的计算精确度直接影响导线的合理选型和布置。如果设计值偏大,则会造成投资成本的增加;如果设计值偏小,则投运后的线路很可能在电晕效应方面超出控制指标,引起一系列的问题。可见,导线表面电位梯度的计算直接关系到线路造价、经济运行和对周围环境的影响,是输电部门所关心的主要问题之一,对它的确定要求采用尽可能精确的计算方法。

特高压输电线路一般采用多分裂导线来解决由电晕引起的环境影响问题^[3]。通过深入调研超高压输电线路的各种设计方案^[4-6],同时,结合“中国特高压交流试验示范工程对日咨询活动”的考察成果^[7],总结得出目前工程中用于计算分裂导线表面电位梯度的方法主要有马克特-门格尔法^[8]、逐步镜像法^[9]和电荷模拟法^[10]。在此,在详细分析以上 3 种方法基本原理的基础上,相应建立了求取表面电位梯度的数学模型;针对美国电气和电子工程师协会(IEEE)提供的典型特高压输电线路结构,利用上述 3 种模型分别对分裂导线的表面电位梯度进行计算,通过对计算结果的准确度校验,提出逐步镜像法适合我国在进行特高压输电线路设计时使用;基于逐步镜像

法,利用自行编制的软件程序,计算了 1 000 kV 交流单回和同塔双回架空输电线路的导线表面电位梯度,并重点分析了线路对地高度、导线分裂根数、子导线半径、导线布置形式和双回路相序布置方式等因素对特高压线路分裂导线表面电位梯度取值特性的影响,为我国开展特高压输电线路的优化设计提供参考。

1 工程中计算表面电位梯度的常用方法及其数学模型

1.1 计算条件的简化

为了便于工程分析与计算,对特高压架空输电线路模型作以下简化和处理:

- a. 大地为无穷大导体平面,电位为零;
- b. 导体为相互平行同时与地面平行的无限长光滑圆柱形导体,导体表面为等位面;
- c. 导体支撑物(包括铁塔、金具和绝缘子等)及任何其它邻近物体的影响可忽略不计;
- d. 导线间水平间距为常数,导线高度为平均对地高度。

简化后,求解输电线路表面电位梯度问题可转化为二维交变电场问题,在工频条件下可作为二维静电场问题分析。

1.2 常用计算方法的原理分析及其建模

1.2.1 马克特-门格尔法

马克特-门格尔法的基本原理最早是由马克特和门格尔提出的,用等效的单根导线代替分裂导线,先用麦克斯韦电位系数法决定总电荷,然后再把该分裂导线作为孤立导体对待,认为每根子导线电荷相同,求出平均电位梯度和最大电位梯度。下面描述其具体计算步骤和数学模型。

- a. 为了求取各个相导线的电荷,按照保持对地电容相等的原则,将分裂导线用一虚拟的等效单根圆柱形导线代替,其半径由下式给定:

$$r_{eq} = R \sqrt{n r / R} \quad (1)$$

式中 R 为分裂导线的半径; n 为子导线的根数; r 为子导线的半径。

b. 用麦克斯韦电位系数法决定每根等效导线的电荷, 此即导线上的总电荷:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{U} \quad (2)$$

式中 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{U}$ 分别是导线上的电荷和电压的列矩阵; $\mathbf{P}$ 是由导线的自电位系数和互电位系数组成的矩阵, 它们可以直接用镜像法求得。

c. 把分裂导线作为孤立导体对待, 即忽略了其它相线的影响, 并认为总电荷均匀分配在每根子导线上, 每根为 Q/n (Q 为每根等效导线的电荷)。按此, 分裂导线中子导线的平均表面电位梯度由下式计算:

$$E_{av} = \frac{Q}{2 \pi \epsilon n r} \quad (3)$$

d. 由于屏蔽效应, 实际表面电位梯度在分裂导线外部要更大些, 而在内部则小些。分别计算分裂导线的平均最大及平均最小表面电位梯度:

$$E_{\max} = E_{av} [1 + (n-1)r/R] \quad (4)$$

$$E_{\min} = E_{av} [1 - (n-1)r/R] \quad (5)$$

沿导线圆周上任一点 t 的电位梯度则由下式计算:

$$E_t = E_{av} \left[1 + \frac{r}{R} (n-1) \cos \theta \right] \quad (6)$$

式中 θ 为 E_t 与 $E_{\max}$ 之间的夹角。

1.2.2 逐步镜像法

逐步镜像法的基本原理是在一个多导体组成的体系中, 每一导体用一系列置于该导体内的镜像电荷来代替, 使表面维持等电位面, 一旦这一条件满足, 就可根据这些镜像电荷计算导体表面的电位梯度。用逐步镜像法计算分裂导线表面电位梯度时, 对每根子导线是单独处理的, 因此, 能够仔细考虑到每根子导线所处位置的不同, 计及每一子导线彼此间及大地和架空地线的影响, 得到每根子导线各自所带的电荷量及表面电位梯度大小和分布均不相同这一实际情况, 是一种较精确的计算方法。下面描述其具体计算步骤和数学模型。

a. 根据交流三相(多相)或直流不同极性分裂导线中每根子导线和地线的具体位置、尺寸和所加电压, 用麦克斯韦电位系数法先求出每根子导线的电荷值:

$$\mathbf{Q} = \mathbf{P}^{-1} \mathbf{U} \quad (7)$$

式中 $\mathbf{Q}$ 为每根子导线单位长度的电荷; $\mathbf{P}$ 为子导线自由电位系数和互电位系数; $\mathbf{U}$ 为子导线电位。

b. 所求得的每根子导线上的电荷都可以用一系列的镜像电荷来表示。子导线内的镜像电荷按下列方法求取: 求某一子导线内的镜像电荷时, 可假设除该子导线外所有子导线的电荷都集中在各自的中心; 每一电荷在该子导线内镜像电荷的大小等于原电荷, 但符号相反, 位于该子导线中心至每一电荷的连线上, 距该子导线中心距离为

$$\delta_{ij} = r_i^2 / D_{ij} \quad (8)$$

式中 r_i 为第 i 根子导线的半径; D_{ij} 为第 i 根子导线至第 j 个电荷的距离。

c. 导线表面电压的校核。子导线内镜像电荷的大小、符号和位置确定后, 为了检验它们正确与否、能否用于实际计算以及计算误差是否在允许范围内, 首先每根子导线表面选择若干点, 计算出它们的电位, 并和实际电位比较, 当误差在规定范围内后再进行正式计算。当计算精度一定时, 镜像次数决定于各子导线之间的距离与导线半径之比, 比值越大, 镜像次数越少。当该比值大于 10 时, 只镜像一次便能使误差小于 0.2%。对于特高压输电线路而言, 分裂间距与子导线半径之比一般均超过 20, 故只进行一次镜像便能求得足够精确的解^[9]。

d. 子导线表面电位梯度的计算。需要指出的是, 计算表面电位梯度时, 其它相(或另一极)的分裂导线和地线电荷的作用应同时考虑进去。

$$E_{kx} = \sum_{i=1}^{snm+n_0} - \frac{\partial P_{ki}}{\partial x} Q_i \quad (9)$$

$$E_{ky} = \sum_{i=1}^{snm+n_0} - \frac{\partial P_{ki}}{\partial y} Q_i \quad (10)$$

$$E_k = \sqrt{E_{kx}^2 + E_{ky}^2} \quad (11)$$

式中 E_k 为子导线表面点 k 的电位梯度 (kV/cm); E_{kx} 、 E_{ky} 为电位梯度 E_k 在 x 和 y 方向的分量; P_{ki} 为第 i 个电荷在子导线表面点 k 的电位系数; s 为每根子导线中镜像电荷数; n 为每根分裂导线中子导线根数; m 对交流为相数, 对直流为极性数; n_0 为地线的根数; i 为电荷序号。

1.2.3 电荷模拟法

电荷模拟法的基本原理是人为在导线内部设置若干假想线电荷来代替导线表面连续分布的电荷, 假想电荷产生的等位面必须和导线表面吻合, 按此要求求出假想电荷。由于假想电荷的个数、位置和电荷本身都是可变的, 因此涉及到如何优选的问题。一般的做法是先设 s 个线电荷均匀分布在直径为 d_{eq} (小于子导线直径) 的圆周上, 然后在导线表面选出 s 个“轮廓点(KP)”, 由于导线电位已知, 故可列出 s 个麦克斯韦方程式, 求出原来所设的 s 个电荷值, 然后再在导线表面选出若干个“检查点(AP)”, 以考察该点的计算电位和导线电压的差别大小, 若误差大于允许值, 则重新改变电荷数目或位置, 再进行计算, 直到误差小于允许值为止。为了提高计算精度和节省计算时间, 这里介绍了一种优化求解模拟电荷的方法, 所用轮廓点的数目大于假想模拟电荷数, 然后根据误差分析中的最小二乘法原理, 求解电荷的近似解^[10]。下面描述其具体计算步骤和数学模型。

a. 设分裂导线中每根子导线的模拟电荷数为 s , 并令其均匀分布在直径为 d_{eq} 的圆周上, 在每根子导线的表面选出 $t = ks$ 个轮廓点, 这样导线表面任一轮廓点 i 的电位可由下式表示:

$$U_i = \sum_{j=1}^{snm+n_0} P_{ij} Q_j \quad (12)$$

式中 P_{ij} 为第 j 个模拟电荷至导线表面 i 点的电位系数; Q_j 为第 j 个模拟电荷; n 为每根分裂导线中子导线根数; m 对交流为相数,对直流为极性数; n_0 为地线的根数。

b. 把在第 i 个轮廓点的计算电位和实际电位之差取为 $\Delta\Phi_i$,则误差的平方之和 R 为

$$R=\sum_{i=1}^{tnm+n_0}\Delta\Phi_i^2=\sum_{i=1}^{tnm+n_0}\left[\sum_{j=1}^{snm+n_0}(P_{ij}Q_j-\Phi_i)\right]^2\quad(13)$$

c. 对于误差的平方,也可按照使重要部分的误差变得更小的目的来加权。为把 R 取得更小,可以通过改变 Q_j 的数值来达到:

$$\partial R/\partial Q_j=0\quad(14)$$

d. 由式(14)可以形成 $snm+n_0$ 个以 Q_j 作为未知数的联立一次方程式,即

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1(snm+n_0)} \\ \vdots & & \vdots \\ a_{(snm+n_0)1} & \cdots & a_{(snm+n_0)(snm+n_0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ \vdots \\ Q_{snm+n_0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_{snm+n_0} \end{bmatrix}\quad(15)$$

式中 $a_{kj}=\sum_{i=1}^{snm+n_0}(P_{ik}P_{ij});b_k=\sum_{i=1}^{tnm+n_0}(P_{ik}\Phi_i)$ 。

e. 根据求出的模拟电荷 Q ,可以计算导线的表面电位梯度,方法与逐步镜像法中步骤 d 相同。

2 计算模型的评估与优选

2.1 线路的基本参数

采用美国电气和电子工程师协会提供的典型特高压输电线路,其结构参数:导线采用 8 分裂导线,其子导线直径 $d_c=3.556\text{ cm}$,分裂间距 $s=45.72\text{ cm}$,相间距离 $D=15.24\text{ m}$,对地距离 $h=21.34\text{ m}$,导线布置方式如图 1 所示,计算电压用 $1\,100\text{ kV}$ 。

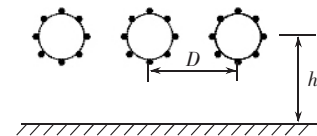


图 1 相导线在杆塔上的布置方式
Fig.1 Phase conductor layout on tower

2.2 计算方法的准确度校验

分别使用马克特-门格尔法、逐步镜像法和电荷模拟法对图 1 中分裂导线的平均电位梯度(average bundle gradient) g_a 、平均最大电位梯度(average maximum bundle gradient) g_{am} 和最大电位梯度(maximum bundle gradient) g_{lm} 进行计算,表 1 给出了计算结果;同时,使用文献[11]中推导出的精确的解析法进行计算,但由于其计算步骤复杂、计算时间较长,不适用于工程计算,所得到的结果只作为参考基准[12],

表 1 特高压交流输电线路导线表面电位梯度计算结果比较

Tab.1 Calculated surface voltage gradients of different methods for UHV AC transmission lines kV/cm

计算方法	中相			边相		
	g_a	g_{am}	g_{lm}	g_a	g_{am}	g_{lm}
马克特-门格尔法	13.78	16.45	16.45	12.39	14.78	14.78
逐步镜像法	13.72	16.62	16.67	12.33	14.94	15.54
电荷模拟法	13.74	16.54	16.70	12.35	14.98	15.58
解析法	13.70	16.59	16.63	12.31	14.91	15.50

用于校验上述不同方法的准确度,相对误差值如表 2 所示。

表 2 不同计算方法的准确度校验
Tab.2 Accuracy verification for different calculation methods %

计算方法	中相计算值的相对误差			边相计算值的相对误差		
	g_a	g_{am}	g_{lm}	g_a	g_{am}	g_{lm}
马克特-门格尔法	0.584	-0.844	-1.082	0.649	-0.871	-4.645
逐步镜像法	0.146	0.181	0.240	0.162	0.201	0.258
电荷模拟法	0.292	-0.301	0.421	0.325	0.469	0.516

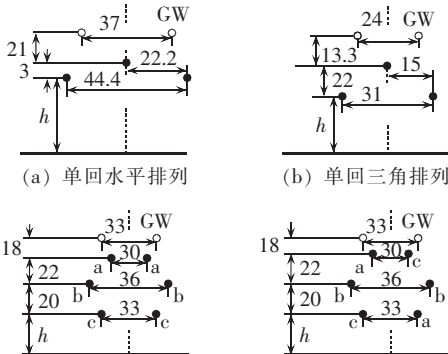
马克特-门格尔法虽然计算方法简单,并且对于 4 分裂及其以下导线具有足够好的精确度[8],但是从表 2 所得的计算结果误差看,用它来计算特高压输电线路最大电位梯度时相对误差可达到 -4.645% ,超过了可以接受的误差限值 $\pm 2\%$ [4],这是由于分裂导线子导线间电场的相互影响随着其数目的增多而增大所造成的。电荷模拟法和逐步镜像法相比,计算所需时间较长,从表面电位梯度各个参数量的校核看,准确度没有逐步镜像法高,但考虑了在电荷个数和位置的优选后,准确度可能进一步提高。可见,逐步镜像法是目前工程中较为实用和精度较高的一种计算方法,适宜于我国在进行特高压输电线路的优化设计和电磁环境研究时使用。

3 1 000 kV 交流特高压输电线路表面电位梯度的特性分析

基于逐步镜像法,利用自行编制的软件程序,分析导线的对地距离、分裂根数、子导线半径、布置形式以及双回路时两回路间电压的相序布置等因素对特高压线路分裂导线表面电位梯度取值特性的影响,给出我国在设计特高压线路时,对于减小分裂导线表面电位梯度值需要遵循的依据。

3.1 特高压输电线路的结构参数

我国 1000kV 同塔单回和同塔双回特高压交流输电线路塔型的初设结构如图 2 所示(数值单位为 m;GW 表示架空地线)[13-14],有关参数按以下情况考虑:



(c) 双回路同相序垂直排列 (d) 双回逆相序垂直排列

图 2 我国 1000 kV 输电线路的各种初设塔型结构
Fig.2 Different preliminary tower layouts for Chinese 1000 kV transmission lines

a. 同塔单回路的导线分别采用 $8\times\text{LGJ}-400$ 、 $8\times\text{LGJ}-500$ 和 $8\times\text{LGJ}-630$ 这 3 种形式,分裂间距为 400 mm,考虑水平排列和三角排列 2 种情况;

b. 同塔双回路的导线分别采用 $8\times\text{LGJ}-630$ 、 $8\times\text{LGJ}-800$ (分裂间距 400 mm) 和 $10\times\text{LGJ}-300$ (分裂间距 375 mm) 这 3 种形式,考虑同相序垂直排列和逆相序垂直排列 2 种情况。

计算电压采用我国 1 000 kV 级特高压输电线路的最高运行电压 1 100 kV。

3.2 交流特高压线路表面电位梯度的特性分析

分别计算了同塔单回路和同塔双回路在不同导线排列方式、不同对地高度、不同导线型号下,特高压输电线路各相分裂导线的最大表面电位梯度,计算结果见表 3、4。

表 3 单回路中不同分裂导线和对地高度下的最大表面电位梯度值

Tab.3 Maximum surface voltage gradients of different conductor bundles with different heights and single-loop layouts kV/cm

排列方式	导线型号	相别	平均高度/m			
			22	25	26	27
单回水平排列	$8\times\text{LGJ}-400$	边相	17.35	17.18	17.13	17.08
		中相	18.22	18.21	18.20	18.20
	$8\times\text{LGJ}-500$	边相	15.85	15.69	15.64	15.60
		中相	16.65	16.63	16.63	16.63
	$8\times\text{LGJ}-630$	边相	14.99	14.34	14.30	14.26
		中相	15.22	15.21	15.20	15.20
单回正三角排列	$8\times\text{LGJ}-400$	边相	17.69	17.50	17.45	17.41
		中相	16.43	16.48	16.50	16.51
	$8\times\text{LGJ}-500$	边相	16.16	15.99	15.94	15.90
		中相	15.01	15.05	15.06	15.08
	$8\times\text{LGJ}-630$	边相	14.77	14.61	14.57	14.53
		中相	13.72	13.76	13.77	13.78

表 4 双回路中不同分裂导线和对地高度下的最大表面电位梯度值

Tab.4 Maximum surface voltage gradients of different conductor bundles with different heights and double-loop layouts kV/cm

排列方式	导线型号	相别	平均高度/m			
			22	25	26	27
双回同相序排列	$8\times\text{LGJ}-630$	上相	13.25	13.27	13.27	13.28
		中相	15.17	15.19	15.20	15.20
		下相	14.86	14.62	14.55	14.49
	$8\times\text{LGJ}-800$	上相	11.95	11.96	11.97	11.97
		中相	13.68	13.70	13.71	13.71
		下相	13.40	13.18	13.12	13.06
	$10\times\text{LGJ}-300$	上相	14.85	14.87	14.88	14.88
		中相	17.10	17.12	17.13	17.13
		下相	16.70	16.43	16.35	16.27
		上相	15.13	15.13	15.13	15.13
双回逆相序排列	$8\times\text{LGJ}-630$	中相	15.17	15.19	15.20	15.20
		下相	15.58	15.45	15.41	15.38
		上相	13.64	13.64	13.64	13.65
	$8\times\text{LGJ}-800$	中相	13.68	13.70	13.71	13.71
		下相	14.05	13.93	13.90	13.87
		上相	17.02	17.02	17.02	17.02
	$10\times\text{LGJ}-300$	中相	17.10	17.12	17.13	17.13
		下相	17.55	17.40	17.35	17.32
		上相	15.13	15.13	15.13	15.13
		下相	15.58	15.45	15.41	15.38

3.2.1 导线离地高度的影响

经过计算分析可知,单回线路在 $8\times\text{LGJ}-400$ 、 $8\times\text{LGJ}-500$ 和 $8\times\text{LGJ}-630$ 这 3 种分裂形式下,相导线水平排列时,随着导线对地高度的增大,导线表面电位梯度逐渐减小,且中相导线表面电位梯度大于边相导线表面电位梯度;相导线按正三角排列时,随着导线对地高度的增大,导线表面电位梯度也逐渐减小,但中相表面电位梯度小于边相导线表面电位梯度。

同塔双回路在 $8\times\text{LGJ}-630$ 、 $8\times\text{LGJ}-800$ 和 $10\times\text{LGJ}-300$ 这 3 种分裂形式下,同相序导线随着对地高度的增大,上相和中相导线表面电位梯度都有所增大,下相导线表面电位梯度减小;逆相序导线随着对地高度的增大,上相和中相导线表面电位梯度都有一定的增大,但上相增值很微弱,下相表面电位梯度减小。

3.2.2 分裂导线根数的影响

输电线路结构采用图 2(a),比较 $6\times\text{LGJ}-630$ 、 $7\times\text{LGJ}-630$ 和 $8\times\text{LGJ}-630$ 这 3 种不同分裂根数时子导线表面的最大电位梯度,计算结果如表 5 所示。由表 5 可见,随着分裂根数的增多,子导线表面电位梯度会明显下降。

表 5 分裂导线根数不同时最大表面电位梯度的比较

Tab.5 Maximum surface voltage gradients of bundles with different conductor number

导线结构	分裂间距/mm	对地高度/m	最大电位梯度/(kV·cm ⁻¹)	
			边相	中相
$6\times\text{LGJ}-630$	400	25	17.38	18.18
$7\times\text{LGJ}-630$	400	25	15.66	16.42
$8\times\text{LGJ}-630$	400	25	14.34	15.21

3.2.3 子导线半径的影响

表 3、4 计算结果表明,当塔型和其它线路参数一定时,增加子导线半径可有效降低导线表面电位梯度,子导线半径增大 10 %,电位梯度可下降 8 %。

3.2.4 导线布置形式的影响

当导线结构和对地高度相同时,导线布置形式对表面电位梯度的影响较大。例如图 2 中单回路 1 000 kV 线路,导线对地高度 25 m,导线 $8\times\text{LGJ}-630$ 由水平排列改成正三角排列时,边相最大表面电位梯度值由 14.3 kV/cm 增加至 14.61 kV/cm,仅增加了 2.17 %;而中相最大表面电位梯度值由 15.21 kV/cm 减小至 13.76 kV/cm,却减小了 9.53 %。由此可见,在设计新线路选择导线布置形式时,应考虑到三角布置对减小导线表面电位梯度和节省线路走廊这一个有利因素。

3.2.5 双回路相序布置方式的影响

由表 4 可见,对于特高压同塔双回路输电线垂直排列的方式下,在两回路间相序布置不同时将使导线表面电位梯度取值有很大差别。同相序排列 abc/abc(自上而下)时,表面电位梯度取值较小,其相应的线路损耗也较低,而在逆相序排列 abc/cba 时,电位梯度取值较大,其相应的线路损耗也较高。

通常,由这 2 种布置方式带来的线路损耗值相差 12 %。

4 结语

a. 通过对工程中计算导线表面电位梯度的常用数学模型进行准确度校验,提出逐步镜像法由于具有较高的计算精确度,而且最大误差远小于可以接受的工程误差限值 $\pm 2\%$,适合我国在进行特高压输电线路设计和电磁环境研究时使用。

b. 基于逐步镜像法,计算分析了 1 000 kV 交流同塔单回和同塔双回架空输电线路导线表面电位梯度的取值特性,给出我国在设计特高压线路时,对于减小分裂导线表面电位梯度值需要遵循的依据,为我国开展特高压输电线路的优化设计提供参考,这对保证输电线路经济运行和节约工程投资有着重要的意义。

参考文献:

- [1] 刘振亚. 全面建设小康社会需要坚强的国家电网[N]. 北京:人民日报,2005-05-11(9).
- [2] 杜至刚,牛林,赵建国. 发展特高压交流输电,建设坚强的国家电网[J]. 电力自动化设备,2007,27(5):1-5.
DU Zhi-gang, NIU Lin, ZHAO Jian-guo. Developing UHV AC transmission and constructing strong state power grid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2007, 27(5):1-5.
- [3] KUTUZOVA N B, TIKHODEEV N N. UHV AC power transmission lines conductor bundle features [C]//Proceedings of the 11th International Workshop of UHVAC Transmission Technology. Beijing, China; [s.n.], 2005:75-87.
- [4] General Electric Co. Transmission line reference book 345 kV and above[M]. California:Electric Power Research Institute, 1982.
- [5] 能源部东北电力设计院. 电力工程高压送电线路设计手册[M]. 北京:水利电力出版社, 1991.
- [6] 阿历克山德罗夫. 动力系统输电能新方法[M]. 陈维贤,译. 北京:水利电力出版社, 1992.
- [7] 赵建国,牛林. 日本特高压交流输电技术的研究与实践——参加对日咨询的考察见闻[J]. 电力系统及其自动化学报, 2007, 19(1):28-33.
- ZHAO Jian-guo, NIU Lin. Research and application of UHV AC transmission technologies in Japan [J]. Proceedings of the EPSA, 2007, 19(1):28-33.
- [8] 栗福珩. 高压输电的环境保护[M]. 北京:水利电力出版社, 1989.
- [9] SHAO Fang-yin. Phase conductor arrangement and power frequency electromagnetic environment for UHV transmission line [C]//Proceedings of the 11th International Workshop of UHVAC Transmission Technology. Beijing, China; [s.n.], 2005:58-66.
- [10] HOFFMANN J N, PULINO P. New developments on the combined application of charge simulation and numerical methods for the computation of electric fields [J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 1995, 10(2):1105-1111.
- [11] ALESSANDRINI V, FANCHIOTTI H. Exact solution of electrostatic problem for a system of parallel cylindrical conductors [J]. Applied Physics, 1974, 45(8):3649-3661.
- [12] IEEE Corona and Field Effects Subcommittee Report - Radio Noise Working Group. A survey of methods for calculating transmission line conductor surface gradients [J]. IEEE Transaction on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(6):1996-2007.
- [13] 易辉,熊幼京. 1 000 kV 交流特高压输电线路运行特性分析[J]. 电网技术, 2006, 30(15):1-7.
YI Hui, XIONG You-jing. Analysis on operating characteristic for 1 000 kV AC UHV transmission line [J]. Power System Technology, 2006, 30(15):1-7.
- [14] WAN Bao-quan, WU Xiong, LU Yao, et al. The research on radio interference produced by double AC UHV transmission lines on the same tower [C]//Proceedings of the 2th International Workshop of UHVAC Transmission Technology. Beijing, China; [s.n.], 2006:181-185.

(责任编辑:李育燕)

作者简介:

牛 林(1980-),男,山东济宁人,博士研究生,研究方向为电磁环境分析、特高压输电技术(E-mail:niulin@mail.sdu.edu.cn);

杜至刚(1957-),男,河北深泽人,博士研究生,研究方向为电网规划、特高压输电技术;

赵建国(1955-),男,山东乳山人,教授,博士研究生导师,研究方向为特高压输电技术、电力系统运行分析与控制、柔性交流输电等。

Calculation and characteristic analysis of surface voltage gradient for UHV transmission conductor bundle

NIU Lin, DU Zhi-gang, ZHAO Jian-guo

(School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China)

Abstract: Based on the accuracy verification of different mathematic models for calculating the conductor surface voltage gradient in engineering, it is pointed out that, the successive image method has higher accuracy and its maximum error is less than the engineering allowable limits, suitable for the design and electromagnetic environment research of UHV transmission lines. The conductor surface voltage gradient of 1 000 kV UHV AC single- and double-loop lines on the same tower is calculated by the successive image method and its influencing factors are analyzed in detail, such as height above ground, number and radius of subconductors, layout of phase conductors, phase order of double-loop lines and so on.

Key words: UHV transmission lines; conductor bundle; surface voltage gradient