

不同塔型输电线路工频电场强度的计算与分析

采用模拟电荷法计算了不同塔型的输电线路工频电场强度。根据计算结果,对各种塔型工频电场强度大小和分布特性进行对比和分析,优选出有效降低工频电场强度的输电线路塔型。

王 杰 李 坡 董 达 马兴旺/国网冀北电力有限公司检修分公司
盛财旺/全球能源互联网研究院

0 引言

随着经济的飞速增长,国内的电力需求也越来越旺盛。目前我国主要的发电方式为火力发电,火力发电所需的煤炭资源主要分布在西北地区,然而电力需求最大的地区却为华东、华中等经济发达地区。为了降低长距离输电过程中的电力损耗,国家电网公司大力发展和建设超高压、特高压输电线路,以实现大容量、远距离输电。随之而来的高压输电线路所产生的电场问题也越来越受到广大人民群众和监管部门的关注。

《建设项目环境保护分类管理名录》规定,500 kV及以上电压等级和500 kV以下电压等级在敏感区,要编制环境影响报告书;500 kV以下电压等级在非敏感区,要编制环境影响报告表^[1]。如何尽量地降低高压输电线路的电场强度成为了环境保护的重要课题。高压输电线路工频电场限值,各国不尽相同,根据HJ/T 24—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》,离地面1.5 m高处,输电线路工频电场的限值为4 kV/m。

1 计算方法

模拟电荷法基于电磁场理论的唯一性定理,从数学的观点来看,模拟电荷法属于等效源的方法,其以等效原理为基础,在静态场或准静态场中应用广泛。由于模拟电荷法自身的特点,特别适合求解开域问题。在用模拟电荷法计算高压架空线路下电场分布的过程中,需要作如下简化:①把工频电场看成准静态场;②把大地看成是电位为零的良导体;③忽略杆塔、绝缘子和金具等对电场的影响。

输电线路工程设计中,假设架空线是没有刚性的柔性索链。作出这种假设的原因在于,架空线的档距比架空线的截面尺寸大很多,同时架空线是由多股铝线或多股钢线构成的绞合线,架空线的刚性对其悬挂空间曲线形状的影响很小,所以架空线只能承受拉力而不能承受弯矩,其次假设作用在架空线的比载是均匀分布的^[2]。根据以上两种假设,悬挂在两基杆塔间的架空线呈悬链线形状,如图1所示。

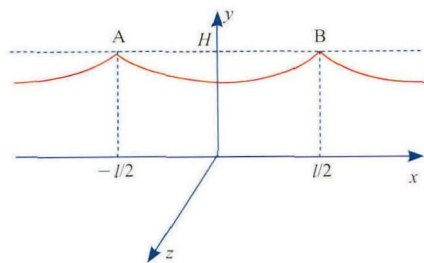


图1 等高悬挂点架空线示意图

本文只讨论悬挂点等高的情况,等高悬挂点架空线的方程为^[3]

关键词/Keywords

输电线路·
工频电场·
塔型·

国家自然科学基金(50977002)。

y = \frac{l}{a} \left[\operatorname{ch} \left(\frac{ax}{l} \right) - \operatorname{ch} \left(\frac{a}{2} \right) \right] + H \tag{1}

式中， $a = \gamma l / \sigma_0$ ； γ 为架空线在给定条件下的比载； l 为架空线的档距； H 为导线悬挂点高度； σ_0 为弧垂最低点处的轴向应力，即水平应力。

1.1 等效电荷的计算

模拟电荷的电位表达式为

\begin{pmatrix} \varphi_1 \\ \varphi_2 \\ \vdots \\ \varphi_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \lambda_{11} & \lambda_{12} & \cdots & \lambda_{1n} \\ \lambda_{21} & \lambda_{22} & \cdots & \lambda_{2n} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ \lambda_{n1} & \lambda_{n2} & \cdots & \lambda_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \tau_n \end{pmatrix} \tag{2}

式中， φ_n 为输电线电位矩阵； τ_n 为模拟线电荷密度矩阵； λ_{nn} 为输电线的电位系数矩阵，该矩阵为 n 阶方阵， n 为导线数目。

1.2 电位系数的计算

首先将导线均匀地分成 N 段，然后在每段导线上设置 m 个模拟电荷，每段导线表面设置 m 个匹配点。设第 k 根导线第 j 段的线电荷密度为 τ_{kj} ，则其在第 k 根导线第 i 段的匹配点产生的电位为

\varphi(\vec{r}) = \frac{\tau_{jk}}{4\pi\epsilon_0} \int_R \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_n|} dR \tag{3}

式中， r 为线电荷的位矢量； r_n 为匹配点 n 的位矢量； ϵ_0 为空气介电常数。

由此可知，匹配点 n 对于第 k 根导线第 j 段的电位系数为

\lambda_{jn} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \int_R \frac{1}{|\vec{r} - \vec{r}_n|} dR \tag{4}

根据式（4）就可以得出，在线电荷及其镜像电荷的共同作用下，式（2）中输电线的电位系数矩阵 λ_{nn} 。

1.3 电场强度的计算

通过式（2）求得各段导线的线电荷后，就可以进行电场强度的计算。设架空线下一场点 P 的坐标为 (x_0, y_0, z_0) ，则第 k 段导线对场点 P 产生的 x 方向的电场强度为

E_{x1} = \sum_{k=1}^N \frac{\tau_k}{4\pi\epsilon_0} \int_L \frac{(x_0 - x)}{|\vec{l} - \vec{l}_p|^3} dL \tag{5}

式中， l 为第 k 段导线的位矢量； l_p 为场点 P 的位矢

量； τ_k 为第 k 段导线的线电荷密度。

同理可知第 k 段导线的镜像电荷对场点 P 产生的 x 方向的电场强度为

E_{x2} = \sum_{k=1}^N \frac{\tau_k}{4\pi\epsilon_0} \int_{L_j} \frac{(x_0 - x)}{|\vec{l}_j - \vec{l}_p|^3} dL_j \tag{6}

式中， l_j 为第 k 段导线镜像电荷的位矢量。

则 x 方向的合成电场强度 $E_x = E_{x1} + E_{x2}$ 。同理可求得 y 和 z 两个方向的合成电场强度 E_y 和 E_z 。

2 不同塔型输电线路工频电场强度的计算

不同的塔型，其结构尺寸也不一样，导线的型号及排列方式也可能不同。紧凑型线路的导线排列方式为倒三角，酒杯塔的导线排列方式为水平排列，猫头塔的导线排列方式为正三角。在这三种塔型中分别选出一种型号作分析比较，其参数如下表所示。

表 塔型参数表

杆塔类型	紧凑型	酒杯塔	猫头塔
电压等级/kV	500	500	500
杆塔型号	CZ31	ZT1	ZMV1
导线布置方式	倒三角	水平排列	正三角
架设方式	单回路	单回路	单回路
导线型号	6 × LGJ-300/40	4 × LGJ-400/35	4 × LGJ-400/35
导线相间距离/m	水平：3.35	水平：12.4	水平：6.88
	垂直：5.8		垂直：10.175
对地高度/m	27	27	27

表1中，紧凑型线路对地高度为中相导线的对地高度，酒杯型线路对地高度为三相导线的对地高度，猫头型线路对地高度为边相导线的对地高度。

从环保的角度考虑，以额定电压的1.05倍作为计算电压，导线年平均应力 $\sigma_{\text{pca1}} = 0.25\sigma_{\text{cal}}$ 。在无风、无冰天气条件，档距同为400 m，其他条件都一样的情况下，分别计算这三种塔型输电线截面上距中心导线50 m、离地高度为1.5 m范围内的电场强度分布，计算结果如图2所示。

从图2中可以看出，采用酒杯塔和猫头塔时，电场分布曲线为马鞍形，而紧凑型线路下方的电场分布曲线为单峰形。在其他参数相同的情况下，在距离线路中心约3 m处，紧凑型线路下方的

电场强度最大，猫头塔次之，最小的为酒杯塔。在距离线路中心约3~5 m处，猫头塔线路下方的电场强度最大，紧凑型次之，最小的为酒杯塔。在距离线路中心大于5 m区域，紧凑型线路下方的电场强度最小。因此，采用紧凑型塔能有效地降低线路下方的电场强度。

3 输电线路工频电场环境影响的减缓及控制措施

- 1) 输电线路在初期的走廊路径选择时，尽量避开城镇、工业区、学校和居民区等的人口活动密集的区域，对自然风景区、文物古迹等敏感区也应尽量避让。如因条件所限而必须经过这些区域时，应采取适当提高杆塔高度、优化相序排列、合理选择导线间距以及采用紧凑型塔等方式，以降低工频电场强度。
- 2) 工作人员在巡线时需配备防护用具，如防护服、屏蔽服和专用护目镜等，尽可能减少作业时间和非作业停留时间。对运行中的电力线路，要定期进行监测。对辐射超标的线路，积极采取技改措施处理^[4-5]。
- 3) 在条件允许的情况下，在输电线路下方平行架设一根或多根屏蔽线，并将屏蔽线良好接地^[6-10]。

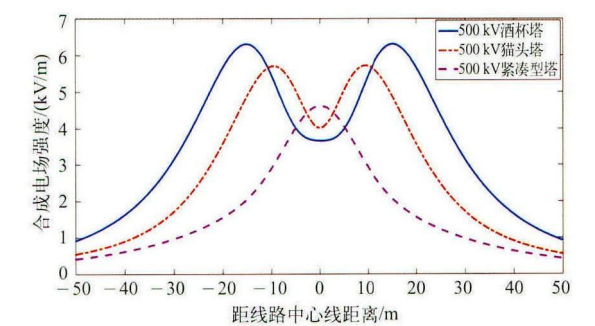


图2 各塔型电场分布图

4 结束语

1) 计算了紧凑型塔、猫头塔和酒杯塔三种塔型的线路工频电场强度。根据计算结果得出，紧凑型塔线路能有效地降低线下电场强度。根据环境保护规定、电力法及线路运行规程的相关规

定，提出了减缓和控制线下电场强度的措施，保证电力线路快速发展的同时兼顾环保。

2) 紧凑型线路不仅在电磁环境保护方面比较大的优势，且由于其占用的走廊面积小等优点被广泛应用。但紧凑型线路由于其相间距离较小，在大风天气、覆冰跳跃等恶劣天气条件下，容易发生相间间隔棒断裂和相间短路跳闸事故。针对这种情况，可将该区段的紧凑型线路杆塔改成常规的酒杯塔，增大相间距离，降低舞动跳闸事故发生的概率。

参考文献

- [1] 张伟. 高压、超高压交流输电线路电磁环境的研究[J]. 华电技术, 2007, 29(1): 47-50.
- [2] 孟遂民, 孔伟. 架空输电线路设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [3] 许杨. 高压输电线路工频电磁效应研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2007.
- [4] 佟瑶, 纪伟光, 殷晓红, 等. 输电线路工频电磁场监测分析及防护措施[J]. 黑龙江电力, 2013, 35(2): 178-181.
- [5] 肖冬萍. 特高压交流输电线路电磁场三维计算模型与屏蔽措施研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2007.
- [6] 刘振亚. 特高压交流输电工程电磁环境[M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [7] 国家环境保护总局. HJ/T 24—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].
- [8] 冯磁璋, 马西奎. 工程电磁场导论[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
- [9] Fiaz J. Distribution of magnetic field of power lines with different configurations[C]. Power India Conference, 2006.
- [10] Xu L, Li Y, Yu J, et al. Research on electric field of high-voltage transmission line power frequency[C]. Interuation Couference on Power System Techuology, 2006: 1-4.

(收稿日期: 2016-01-14) **EA**