

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2017.08.002

重冰区同塔双回交流输电线路电磁环境仿真研究

谢庆¹, 任洁¹, 李至峪¹, 王幼男¹, 黄河¹, 王楠²

(1. 华北电力大学河北省输变电设备安全防御重点实验室, 河北 保定 071003; 2. 贵州电力设计研究院, 贵阳 550002)

摘要: 随着输配电网电压等级的提高和覆盖范围的扩大,电磁环境与线路覆冰问题日益突出,而目前对于覆冰条件下输电线路的电磁环境特性关注较少。为此文中使用SES-EnviroPlus软件,针对重冰区220 kV同塔双回交流输电线路电磁环境进行仿真计算。通过改变相间距离、分裂根数、子导线外径、分裂间距、导线高度,研究了不同参数对电磁环境的影响,并对比了有/无覆冰时的电磁环境差异。仿真结果表明:在文中所取参数区间内,仅有电场强度超出限值;导线覆冰会使线路周围电磁环境恶化,但不改变线路参数对电磁环境的作用规律。针对重冰区220 kV同塔双回线路设计,笔者从电磁环境的角度出发提出了相关建议。该研究结果对重冰区输电线路设计具有指导意义并能提供一定的定量依据。

关键词: 电磁环境; 同塔双回; 覆冰; 电场强度; SES软件

Simulation Study on Electromagnetic Environment of AC Double-circuit Transmission Lines in Heavy Icing Area

XIE Qing¹, REN Jie¹, LI Zhiyu¹, WANG Younan¹, HUANG He¹, WANG Nan²

(1. Hebei Provincial Key Laboratory of Power Transmission Equipment Security Defense, North China Electric Power University, Hebei Baoding 071003, China; 2. Guizhou Electric Power Design Institute & Research Institute, Guiyang 550002, China)

Abstract: With the increasing voltage levels and growing coverage of transmission lines, the problems of electromagnetic environment and icing become worse. However, less attention has been paid to the electromagnetic environment of transmission lines in icing condition. Therefore, a simulation analysis on the electromagnetic environment of 220 kV AC double-circuit transmission lines in heavy icing area is conducted in this study by means of the software SES-EnviroPlus. The effects of the parameters, such as phase distance, split number, conductor diameter, bundle interval and conductor height, on the electromagnetic environment are investigated, and the characteristics of the electromagnetic environments with and without icing condition are compared. The results show that among the four environmental parameters, only electric field intensity is beyond the limit. A conclusion is drawn that the electromagnetic environment becomes worse in icing area, but the effect rules of the parameters on the electromagnetic environment remain the same. In addition, some suggestions for the design of 220 kV AC double-circuit transmission line in heavy icing area are offered in respect of electromagnetic environment.

Key words: electromagnetic environment; double-circuit transmission line; icing; electric field intensity; SES software

0 引言

随着输电线路电压等级的升高,电磁环境问题

日益严重^[1-2]。交流输变电工程的电磁环境因子主要包括工频电场、工频磁场、无线电干扰和可听噪声等^[3]。考虑到社会环保意识的增强,电网发展在满足负荷要求的基础上还必须承担起建设环境友好型

收稿日期:2017-02-17; 修回日期:2017-04-15

基金项目:国家自然科学基金项目(51307060);河北省自然科学基金面上项目(E2015502081)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(51307060), Natural Science Foundation of Hebei Province (E2015502081).

社会的义务^[4]。因此,开展交流输电线路电磁环境研究具有重要意义。

针对各类电磁环境因子,国内外学者展开广泛研究并提出了各种计算方法。国际大电网会议第 36.01 工作组提出使用等效电荷法计算工频电场,使用安培环路定律计算工频磁场。西屋、BPA 等单位提出了计算无线电干扰的经验公式和激发函数法,以及计算可听噪声的经验公式^[3]。近年来的相关研究增强了计算方法的准确度及适用范围^[5-8]。针对不同条件及参数对电磁环境的影响,科学研究也取得了丰硕成果。文[9]研究了复杂地形下输电线路电磁环境特性,文[10-12]分别探讨了塔型、导线参数、导线表面最大电场对电磁环境的影响。同塔双回输电线路有利于缩减走廊占用、增大输电容量,已成为电网建设的发展趋势^[13]。目前已有对同塔双回线路电磁环境的研究,但大多集中在不同参数配置下电磁环境的分析^[14-15],并未考虑覆冰等自然条件对电磁环境的影响。而中国西部高海拔地区线路覆冰现象严重,因此开展重冰区同塔双回输电线路电磁环境研究显得十分必要,对国家生态建设及西电东送项目具有重要意义。

文中利用加拿大 SES 公司开发的 SES-Enviro Plus 软件,针对重覆冰、高海拔地区 220 kV 同塔双回交流输电线路电磁环境进行计算,得到了重冰区输电线路电磁环境特性及重要影响因素,并对线路建设提出相关建议。

1 重冰区输电线路电磁环境仿真方法

1.1 仿真参数

文中以贵州省自然条件为例,对重冰区 220 kV 同塔双回线路电磁环境进行研究。仿真所用导线型号为 JL/G1A-500/45,地线型号为 LBGJ-100-20AC,线路平均档距 400 m,典型塔型见图 1,杆塔呼称高取 30 m。计算电压取 220 kV,电流取 400 A。

贵州属喀斯特地貌,土壤电阻率取 $1\,500\,\Omega\cdot\text{m}$ 。由于高海拔使空气稀薄,分子平均自由行程增大,有利于电晕发生,使电磁环境进一步恶化。因此采用贵州省内较高的海拔进行电磁环境校验,取 2 000 m。仿真采用的典型气象条件组合见表 1,取覆冰时的温度为 $-5\,^{\circ}\text{C}$ 。

1.2 覆冰对输电线路电磁环境的影响

在重冰区,输电线路覆冰将影响比载、应力,进而影响弧垂,改变导线对地高度,并导致电磁环境的变化。按照输电线路斜抛物线模型^[16],视前后档间无高差,计算出无冰无风和覆冰有风情况下输电线路

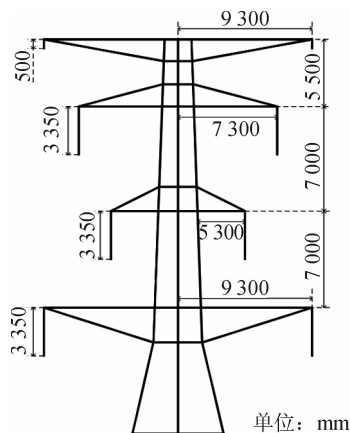


图 1 220 kV 同塔双回线路杆塔示意图

Fig. 1 The type of tower for 220 kV double-circuits transmission line

表 1 重冰区气象条件组合

气象条件	温度/ $^{\circ}\text{C}$	风速/ $(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	冰厚/mm
最高气温	40	0	0
最低气温	-20	0	0
设计覆冰	-5	15	20
年平均气温	10	0	0
最大风速	-5	25	0

弧垂,结果见表 2。

表 2 有/无覆冰时的线路弧垂

线路	无冰弧垂	覆冰弧垂
220 kV 导线	18.04	18.95
220 kV 地线	12.13	15.23

除影响线路对地高度外,覆冰还会对线路附近电场分布造成畸变,从而引起电磁环境的变化。有关研究表明,覆冰使线路表面粗糙化并导致线路起晕电压降低,约为无冰情况下的 50%^[17-21]。输电线路电磁环境因子与线路表面状况及电晕有直接的联系,因此可通过研究覆冰对线路表面的影响来判定其对电磁环境的作用。根据 Peak 起晕判据,起晕场强与导线表面系数 m 成正比。由经验数据,对于光滑钢芯铝绞线, $m=0.82\sim 0.9$ ^[3]。文中取正常运行线路的表面系数为 $m=0.9$;覆冰时导线表面粗糙,等效于降低了导线表面系数,取值 $m=0.4$ 。

文中通过改变导线对地高度、调整导线表面系数的方法,使用 SES-EnviroPlus 软件进行覆冰对输电线路电磁环境影响的仿真。其中,计算无线电干扰采用的是 IREQ 积分方法,计算可听噪声采用的是 IREQ 经验方法^[22]。

1.3 限值规定

依照《500 kV 超高压送变电工程电磁辐射环境影响评价规范》,以 4 kV/m 作为居民区工频电场限值,普遍认为 500 kV 以下电压等级输变电设备也可执行此标准。推荐使用 ICNIRP 关于对公众全天暴露的工频限值 0.1 mT 作为磁感应强度的评价标准。

依据《110 kV–750 kV 架空输电线路设计规范》要求,距输电线路边导线外 20 m 处,离地 2 m 高且频率为 0.5 MHz 时无线电干扰限值为 53 dB; 距输电线路边导线外 20 m 处,湿导线条件下可听噪声限值为 55 dB。

2 仿真结果与分析

有关研究表明,同塔双回线路相导线逆相序排列可有效降低地面电场强度^[13,15],而场强往往是制约线路走廊宽度的重要因素。因此,文中仿真过程中采用逆相序的导线布置方法。使用 1 节中参数,相导线二分裂,分裂间距 400 mm,以大雨条件校验无线电干扰,以小雨条件(湿导线)校验可听噪声。将以上参数组合作为典型运行参数。

2.1 相间距离的影响

下相高度不变,使上、中相垂直距离和中、下相垂直距离依次增/减 1 m,得到 5 个相间距离组合。仿真得到离地 1.5 m 高的最大电场强度 $E_{\max}^{1.5}$ 和磁感应强度 $B_{\max}^{1.5}$,距离边导线 20 m 线路下方离地 2 m 高无线电干扰 RP 和可听噪声 AN^2 ,见表 3。

表 3 不同相间距离对应电磁环境值

Table 3 The electromagnetic environment in different phase distances

相间距离/m		$E_{\max}^{1.5}/(\text{kV} \cdot \text{m}^{-1})$	$B_{\max}^{1.5}/\mu\text{T}$	RP/dB	AN^2/dB
上中相	中下相				
5.39	6.40	4.69	9.01	44.31	34.32
6.32	7.21	4.84	9.39	43.88	33.31
7.28	8.06	4.97	9.71	43.54	32.49
8.25	8.94	5.08	9.96	43.30	31.80
9.22	9.85	5.16	10.15	43.15	31.23

各相间距离下,输电线路电磁环境相对线路中央横向分布见图 2。图 2 中数字 1~5 分别表示由小到大的 5 组相间距离。

由表 3 可见,典型运行参数下,线路下方最大电场强度超出限值,磁感应强度、无线电干扰、可听噪声均符合要求。

由图 2 可知,随相间距离增大,线路下方电场强度和磁感应强度变大,而无线电干扰和可听噪声变小,其中可听噪声减小尤为显著。考虑到磁感应

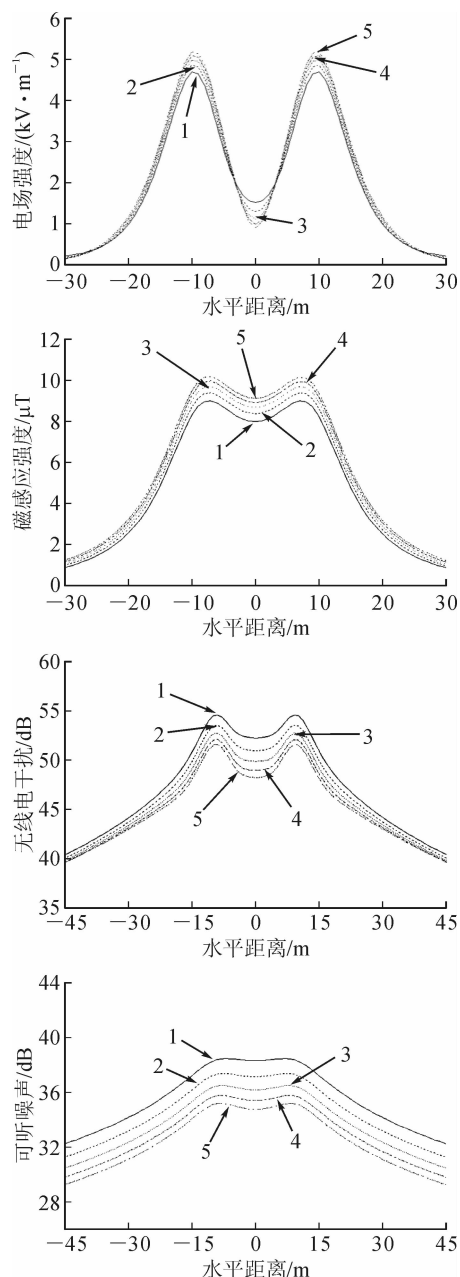


图 2 不同相间距离下电磁环境横向分布

Fig. 2 Distribution curves of electromagnetic environment in different phase distances

强度、无线电干扰、可听噪声都远小于相关限值,因此着重考虑对电场强度的影响。由表 3,在该例所取相间距离区间内,距离每增加 1 m,最大场强依次升高 0.15、0.13、0.11、0.08 kV/m。因此在满足电气间隙要求情况下,减小相间距离,可以减小地面电场强度,并缩减建设投资。

2.2 分裂根数的影响

使用典型运行参数,改变导线分裂根数,依次取 2 分裂、3 分裂、4 分裂。仿真结果见表 4。

输电线路电磁环境横向分布见图 3。图 3 中数字 1~3 分别表示 2 分裂、3 分裂、4 分裂导线。

表 4 不同分裂根数对应电磁环境值

Table 4 The electromagnetic environment in different split numbers

参数	分裂根数		
	2分裂	3分裂	4分裂
$E_{\max}^{1.5}/(\text{kV}\cdot\text{m}^{-1})$	4.97	5.66	6.22
$B_{\max}^{1.5}/\mu\text{T}$	9.71	9.71	9.71
Rf/dB	43.54	31.80	23.23
AN^2/dB	32.49	29.67	27.44

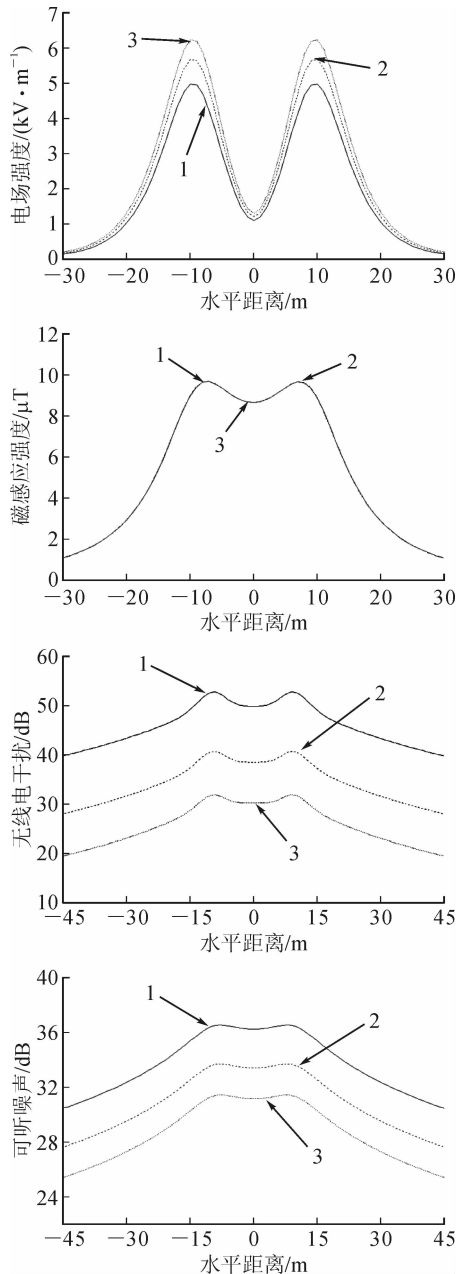


图 3 不同分裂根数下电磁环境横向分布

Fig. 3 Distribution curves of electromagnetic environment in different split numbers

由表 4 及图 3 可知,随分裂根数增多,线路下方电场强度显著变大,磁感应强度基本不变,无线

电干扰和可听噪声显著变小。这是因为分裂根数增多,相导线等效半径增大,表面场强减小引起电晕强度衰减,因而无线电干扰和可听噪声减小。减少分裂根数,可以减小地面场强,缩短线路走廊宽度。然而分裂数减少会造成电能输送容量的受限,应该同时考虑电磁环境的约束和输送能力的要求。

2.3 子导线外径的影响

使用典型运行参数,改变子导线外径,依次取 28.5、30.0、31.8、32.7、34.7 m。仿真结果见表 5。

表 5 不同导线外径对应电磁环境值

Table 5 The electromagnetic environment in different conductor diameters

参数	子导线外径/mm				
	28.5	30.0	31.8	32.7	34.7
$E_{\max}^{1.5}/(\text{kV}\cdot\text{m}^{-1})$	4.94	4.97	5.00	5.02	5.05
$B_{\max}^{1.5}/\mu\text{T}$	9.71	9.71	9.71	9.71	9.71
Rf/dB	45.13	43.54	41.78	40.95	39.49
AN^2/dB	32.79	32.49	32.15	32.00	31.67

输电线路电磁环境横向分布见图 4。图 4 中数字 1~5 分别表示由小到大 5 组子导线外径。

由表 5 及图 4 可知,随导线外径增大,线路下方电场强度略微增大,磁感应强度基本不变,无线电干扰和可听噪声变小。子导线外径变化对电场强度影响不大,这是因为分裂导线对空间场强的影响主要取决于等效半径,而对等效半径起主要作用的是分裂间距和分裂根数,子导线外径对等效半径作用较小。如果无线电干扰、可听噪声较大时,宜采用较大外径的子导线以削弱其影响,并且此时电场强度、磁感应强度基本保持不变。

2.4 分裂间距的影响

使用典型运行参数,改变相导线分裂间距,依次取 300、350、400、450、500 mm。仿真结果见表 6。

输电线路电磁环境横向分布见图 5。图 5 中数字 1~5 分别表示由小到大 5 组分裂间距。

由表 6 及图 5 可知,随分裂间距增大,线路下方电场强度略微增大,磁感应强度基本不变,无线电干扰和可听噪声增大。可通过减小分裂间距来控制电磁环境各值。但导线分裂间距减小时易发生次档距振荡,并且线路的自然功率将下降^[23]。因此相导线分裂间距不宜过小。

2.5 导线对地高度的影响

使用典型运行参数,改变相导线对地高度,依次取下相高度为 30、30.5、31、31.5、32 m。仿真结果见表 7。

输电线路电磁环境横向分布见图 6。图 6 中数

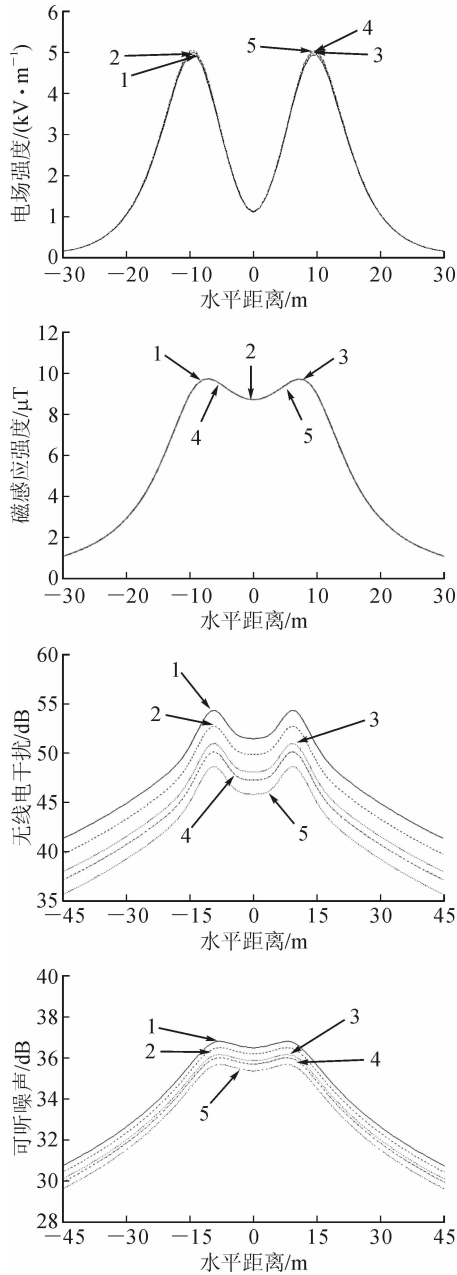


图4 不同导线外径电磁环境横向分布

Fig. 4 Distribution curves of electromagnetic environment in different conductor diameters

表6 不同分裂间距对应电磁环境值

Table 6 The electromagnetic environment in different bundle expansions

参数	分裂间距/mm				
	300	350	400	450	500
$E_{\max}^{1.5}/(\text{kV}\cdot\text{m}^{-1})$	4.82	4.90	4.97	5.04	5.09
$B_{\max}^{1.5}/\mu\text{T}$	9.71	9.71	9.71	9.71	9.71
RF/dB	42.34	42.94	43.54	44.14	44.66
AN^2/dB	32.14	32.30	32.49	32.68	32.88

字 1~5 分别表示由小到大 5 组导线高度。

由表 7 及图 6 可知,随着导线高度增大,线路

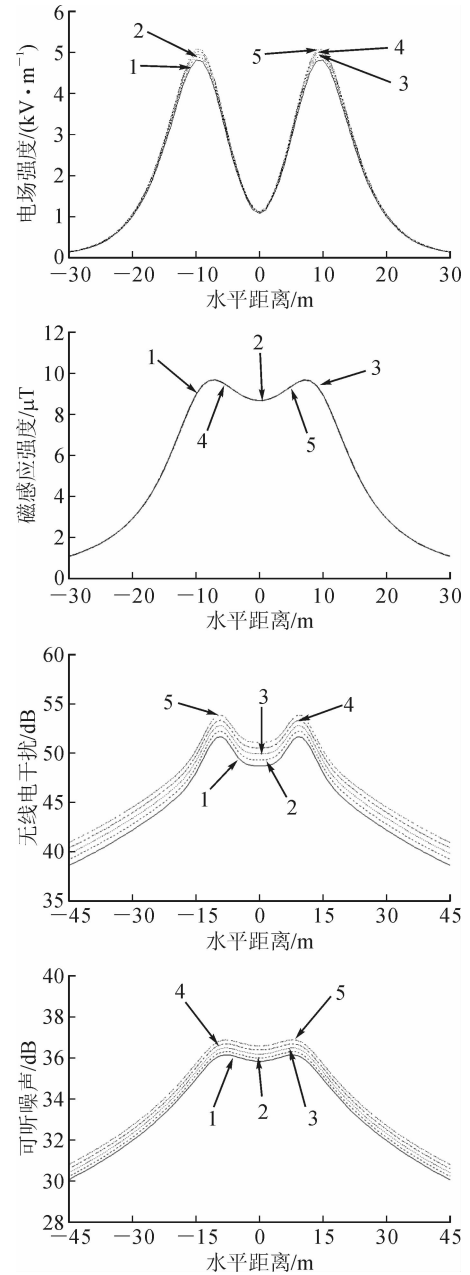


图5 不同分裂间距电磁环境横向分布

Fig. 5 Distribution curves of electromagnetic environment in different bundle expansions

表7 不同导线高度对应电磁环境值

Table 7 The electromagnetic environment in different conductor heights

参数	下相高度/m				
	30.0	30.5	31.0	31.5	32.0
$E_{\max}^{1.5}/(\text{kV}\cdot\text{m}^{-1})$	4.97	4.50	4.09	3.74	3.43
$B_{\max}^{1.5}/\mu\text{T}$	9.71	8.86	8.13	7.51	6.97
RF/dB	43.54	43.29	43.08	42.88	42.71
AN^2/dB	32.49	32.41	32.31	32.26	32.19

下方电磁环境各值均减小,这是因为激励源(导线)距离测试点越来越远的缘故。由表 7,在该例所取区

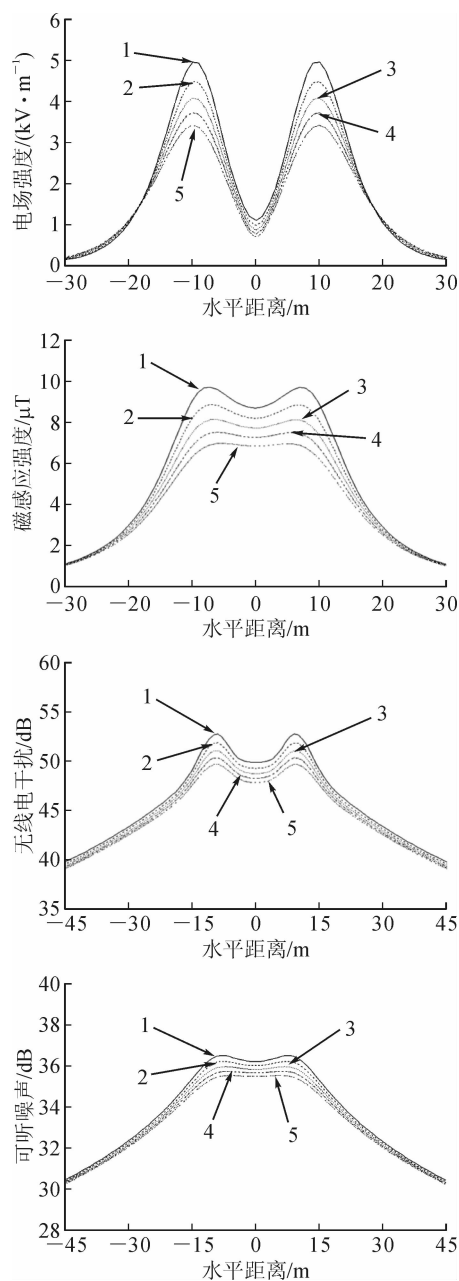


图 6 不同导线高度电磁环境横向分布

Fig. 6 Distribution curves of electromagnetic environment in different conductor heights

间内,相导线每升高 0.5 m, $E_{\max}^{1.5}$ 依次降低 0.47、0.41、0.35、0.31 kV/m。可见随导线对地距离增加,场强减小程度减缓。因此,当导线对地距离增加到一定程度,再靠抬高导线来减小地面附近的电场强度,经济投入会比较大。

3 覆冰对电磁环境特性的影响

改变气象条件参数,文中对无冰时 220 kV 同塔双回线路电磁环境进行仿真,得到典型运行参数下电磁环境各值,与覆冰情况作对比见表 8。

通过调整各线路参数取值,获得了电磁环境变

表 8 220 kV 线路有/无覆冰对应电磁环境值

Table 8 The electromagnetic environment in different conductor conditions

线路状态	$E_{\max}^{1.5}/(\text{kV}\cdot\text{m}^{-1})$	$B_{\max}^{1.5}/\mu\text{T}$	RP/dB	AN/dB
覆冰	4.97	9.71	43.54	32.49
无冰	4.16	8.23	42.09	32.34

化特性。与覆冰时的仿真结果对比,总结二者异同之处如下:

1)覆冰条件下,输电线路各类电磁环境极值均大于无冰条件下的值,电场强度和磁感应强度的增幅尤为显著,都在 20%左右。可见覆冰会造成输电线路电磁环境的恶化。按照场强 4 kV/m 的限值确定线路走廊宽度,则在典型运行参数下覆冰线路的走廊宽度大于无冰线路。因此重冰区同塔双回输电线路的设计应重点考虑覆冰对电磁环境带来的不利影响。

2)有/无覆冰条件下,电磁环境各值随线路各参数的变化特性基本相同。因此,覆冰不影响线路参数对电磁环境的定性作用规律。

3)覆冰时电磁环境各值、无冰时电场强度和无线电干扰值随偏离线路中央的距离呈双峰状(M 形状)变化,极值出现在偏离线路中央一段距离的位置。无冰时的磁感应强度和可听噪声有呈单峰状变化趋势,极值可能会出现在线路中央。此类规律可为确定最大电磁影响发生位置提供依据。

输电线路的工频电场由带电导线产生,由于电场分布易于受周围物体的影响,因此输电线路的表面覆冰将对周围电场造成严重畸变。为进一步说明覆冰对线路周围电场的畸变作用,笔者利用 Maxwell 软件对覆冰前后带电导体周围电场强度进行有限元建模计算。其中导体材料为铝,直径取 30 mm,外加电压为 100 kV,冰厚 15 mm,冰柱长 50 mm,其他材料属性及模型求解设置与文[18]相一致。仿真结果见图 7。

由图 7 可见,未覆冰导体表面电场分布均匀,覆冰后导体表面电场分布畸变严重,最大场强明显高于无冰情况。求解导体下方 10 m 位置的电场强度可得,无冰导体下为 2.20 kV/m,而覆冰情况下为 2.54 kV/m。由此可见,覆冰显著增大导体表面及导体下方的电场强度,输电线路的电场强度受覆冰影响明显。然而,与工频电场不同的是,只要不是磁性物质,工频磁场通常不会由于该物体的存在而发生畸变。因此覆冰本身对线路周围磁场分布影响不大,磁感应强度的变化主要是由线路弧垂的增大而引起的。

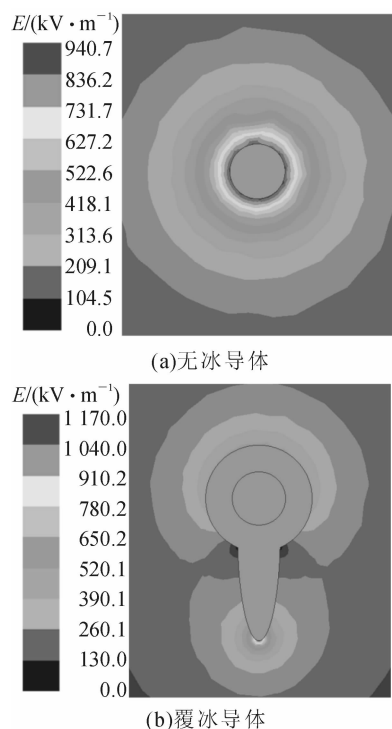


图7 覆冰前后导体表面电场分布

Fig. 7 Electric field distribution on conductors

输电线路的无线电干扰及可听噪声主要由线路的电晕放电产生。电晕形成的脉冲电流沿导线向注入点两边流动,从而在导线周围产生无线电干扰场。同时,电晕放电造成的空间电荷运动将改变空气压力,产生可听噪声。通常电晕强度越大,无线电干扰及可听噪声越强。由上述仿真结果,覆冰将显著提高导体表面的电场强度,进而增大线路的电晕强度。同时,考虑到覆冰条件下线路弧垂的增大,覆冰将使线路下方无线电干扰及可听噪声增强。

4 结论

1)笔者借助 SES-EnviroPlus 软件,采用改变导线对地高度、调整导线表面系数的方法来模拟覆冰条件,针对重冰区 220 kV 同塔双回交流输电线路电磁环境特性进行仿真研究。

2)导线覆冰使线路下方的电场强度、磁感应强度、无线电干扰及可听噪声增大,其中电场强度和磁感应强度的增幅尤为显著,都在 20%左右。但覆冰不影响线路参数对电磁环境各值的定性作用规律。可见覆冰造成输电线路电磁环境恶化,因此重冰区线路在设计时应重点考虑覆冰对电磁环境的不利影响,留有足够裕度。

3)针对文中选取的线路参数及自然环境,输电线路在覆冰条件下的磁感应强度、无线电干扰及可听噪声均符合相关限值,只有电场强度超出限值要

求。可见,电场强度是重冰区 220 kV 同塔双回输电线路设计的主要限制因素,也是线路走廊宽度的主要决定因素。

4)通过分析线路参数对电磁环境因子的作用规律,得出在满足电气间隙、输送容量等设计要求的前提下,重冰区 220 kV 同塔双回输电线路宜采取逆相序布置方式,并采用较小的相间距离、子导线外径、分裂间距,及较少的分裂根数,以达到限制线路下方电场强度的目的。

5)提高导线对地高度能够有效缓解覆冰线路的电磁环境问题、缩短线路走廊宽度,但该方法经济投入较大,需要进行权衡考虑从而取得最优的线路架设高度。

参考文献:

- [1] 黄道春,阮江军,文武,等. 特高压交流输电线路电磁环境研究[J]. 电网技术,2007,31(1):6-11.
HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, WEN Wu, et al. Study on electromagnetic environment of UHV AC transmission lines[J]. Power System Technology, 2007, 31(1): 6-11.
- [2] ZHANG Youquan, WANG Fei, WANG Shaocan, et al. The analysis and countermeasures for the influencing of power grid engineering electromagnetic environment[C]//ERPE 2014 International Conference on Energy Research and Power Engineering. Dalian, China; ERPE, 2014: 747-750.
- [3] 邬雄,万保权. 输变电工程的电场环境[M]. 北京:中国电力出版社,2009.
WU Xiong, WAN Baoquan. Power transmission project electromagnetic environment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009.
- [4] 张文亮,周孝信,印永华,等. 华北-华中-华东特高压同步电网构建和安全性分析[J]. 中国电机工程学报,2010,30(16):1-5.
ZHANG Wenliang, ZHOU Xiaoxin, YIN Yonghua, et al. Composition and security analysis of North China-Central China-East China' UHV synchronous power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(16): 1-5.
- [5] 汪泉弟,罗扬,杨帆,等. 超高压输电线下建筑物临近区域三维电场仿真[J]. 高压电器,2013,49(10):1-6.
WANG Quandi, LUO Yang, YANG Fan, et al. Three-dimensional simulation of electric field around building under EHV transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(10): 1-6.
- [6] 赵永生,张文亮. 同走廊高压交、直流输电线路混合电场分析[J]. 高电压技术,2014,40(3):923-929.
ZHAO Yongsheng, ZHANG Wenliang. Hybrid electric field analysis of HVAC and HVDC transmission lines in one corridor[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(3): 923-929.
- [7] YANG K, LEE D, HWANG G, et al. New formulas for pre

- dicting audible noise from overhead HVAC lines using evolutionary computations[J]. IEEE Transaction on Power Delivery, 2000, 15(4): 1243-1251.
- [8] NIU Lin, ZHAO Jianguo, YANG Jian, et al. Sparse Bayesian learning mechanism for research of audible noise in UHV transmission project[C]//2010 8th IEEE International Conference on Control and Automation. Xiamen, China: IEEE, 2010: 258-262.
- [9] 周宏威, 左 鹏, 邹 军, 等. 复杂地形情况下高压交流输电线路电磁环境特性分析[J]. 电网技术, 2011, 35(9): 164-169.
- ZHOU Hongwei, ZUO Peng, ZOU Jun, et al. Analysis on electromagnetic environment characteristics of high-voltage AC transmission lines passing through complex terrains[J]. Power System Technology, 2011, 35(9): 164-169.
- [10] 宋 刚, 赵录兴, 陈稼苗. 500 kV 双回路垂直排列紧凑型输电线路电磁环境[J]. 电力建设, 2013, 34(11): 45-50.
- SONG Gang, ZHAO Luxing, CHEN Jiamiao. Electromagnetic environment of 500 kV double-circuit vertical arrangement compact power transmission line[J]. Electric Power Construction, 2013, 34(11): 45-50.
- [11] 王广周, 张嵩阳, 闫 东, 等. 500 kV 超高压输电线路电磁环境影响因素分析及其防护对策[J]. 高压电器, 2010, 46(8): 93-96.
- WANG Guangzhou, ZHANG Songyang, YAN Dong, et al. Analysis of influencing factors on electromagnetic environment under 500 kV EHV transmission lines with prevention strategies[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(8): 93-96.
- [12] 袁海燕, 庄燕飞, 姚金霞, 等. 导线表面最大场强对直流输电线路电磁环境的影响分析[J]. 高压电器, 2013, 49(10): 7-12.
- YUAN Haiyan, ZHUANG Yanfei, YAO Jinxia, et al. Influence analysis of conductor surface maximum electric field strength on DC transmission line electromagnetic environment[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(10): 7-12.
- [13] 张广洲, 张业茂, 万保权, 等. 特高压同塔双回线路导线布置的优化[J]. 高电压技术, 2008, 34(9): 1839-1843.
- ZHANG Guangzhou, ZHANG Yemao, WAN Baoquan, et al. Optimization of conductor configuration for UHV double-circuits transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(9): 1839-1843.
- [14] HUANG Daochun, RUAN Jiangjun, HUO Feng. Study on the electromagnetic environment of 1 000 kV AV double-circuit transmission lines in China[C]//IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition. Seattle, USA: IEEE, 2009: 1-7.
- [15] 李凌燕, 杜志叶, 阮江军, 等. ± 800 kV/ ± 500 kV 混压双回直流线路的电磁环境分析及改善研究[J]. 高压电器, 2016, 52(9): 26-33.
- LI Lingyan, DU Zhiye, RUAN Jiangjun, et al. Electromagnetic environment analysis on ± 800 kV/ ± 500 kV double-circuit DC transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(9): 26-33.
- [16] 孟遂民, 孔 伟. 架空输电线路设计[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- MENG Suimin, KONG Wei. Overhead transmission line design[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2007.
- [17] 刘云鹏, 朱 军, 朱 雷, 等. 覆冰对交流导线电晕起始特性影响规律的研究[J]. 高压电器, 2014, 50(1): 37-41.
- LIU Yunpeng, ZHU Jun, ZHU Lei, et al. Influence of icing to the corona inception characteristics of the AC power transmission lines[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(1): 37-41.
- [18] 王尧玄, 蒋兴良, 袁 超, 等. 混合淞覆冰对输电线路光滑导线起晕电压的影响[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 441-449.
- WANG Yaoxuan, JIANG Xingliang, YUAN Chao, et al. Influence of mixed-phase ice on corona inception voltage of smooth conductor for transmission lines[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 441-449.
- [19] 邓元实, 贺含峰, 刘凤莲, 等. 光纤光栅器件在输电线路覆冰监测中的应用[J]. 电瓷避雷器, 2014(3): 39-43.
- DENG Yuanshi, HE Hanfeng, LIU Fenglian, et al. Application of fiber bragg grating device in icing monitoring system of transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(4): 39-43.
- [20] 朱昌成, 蓝 磊. 复合涂料在输电线路防覆冰中的试验研究[J]. 电瓷避雷器, 2014(5): 25-30.
- ZHU Changcheng, LAN Lei. Experimental study of RTV coating in anti-icing of transmission lines[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(5): 25-30.
- [21] 盛道伟. 覆冰绝缘子闪络机理的研究与发展[J]. 电瓷避雷器, 2014(6): 50-54.
- SHENG Daowei. Present study and progress on flashover mechanism of iced insulators[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(6): 50-54.
- [22] 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.
- HU Baixue. Research on electromagnetic environment of power frequency EHV and UHV transmission lines[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2006.
- [23] 贺建国, 朱普轩, 甘 波, 等. 750 kV 输电线路子导线分裂间距合理取值研究[J]. 电网技术, 2012, 36(5): 42-46.
- HE Jianguo, ZHU Puxuan, GAN Bo, et al. Study on rational choice of intra-bundle conductor spacing for 750 kV transmission lines[J]. Power System Technology, 2012, 36(5): 42-46.

谢 庆(1979—),男,博士后,副教授,主要从事电气设
备在线监测与故障诊断方面的研究。

任 洁(1994—),女,硕士研究生,主要从事高电压与绝
缘技术方面的研究。