

doi:10.11835/j.issn.1000-582X.2016.06.001

高压交直流同塔输电线路无线电干扰 与可听噪声的计算

邹 军¹, 王思颖², 李本良³

(1.清华大学 电机系电力系统国家重点实验室, 北京 100084; 2.三峡大学电气与新能源学院,
湖北 宜昌 443002; 3.国网北京经济技术研究院, 北京 102209)

摘 要: 为了寻求一种适合交直流同塔架设线路的无线电干扰与可听噪声计算方法, 从理论上分析了混合线路表面场强的特点, 利用线性叠加原理求出混合线路表面场强, 并结合晴天和雨天对交流和直流线路电晕程度的不同影响, 提出在同一种天气状况下计算交直流线路无线电干扰与可听噪声。用 3 种计算无线电干扰与可听噪声的方法, 分晴天和雨天情况进行计算比较, 结果表明 3 种方法中 BPA 修正公式计算值最大, 该方法可视为目前计算交直流同塔线路无线电干扰与可听噪声的有效方法。

关键词: 交直流混合输电线路; 电磁环境; 无线电干扰; 可听噪声

中图分类号: TM721.3

文献标志码: A

文章编号: 1000-582X(2016)06-001-10

Calculation of radio interference and audible noise of high voltage AC/DC hybrid lines mounted on the same tower

ZOU Jun¹, WANG Siying², LI Benliang³

(1. State Key Lab of Power System, Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, P.R.China; 2. College of Electrical Engineering & New Energy, China Three Gorges University, Yichang 443002, Hubei, P.R.China; 3. State Power Economic Research Institute, Beijing 102209, P.R.China)

Abstract: It aims to search for a proper calculation method of radio interference and audible noise to AC/DC hybrid lines arranged on the same tower. First, the characteristics of surface field strength were analyzed theoretically; second, the synthesized field strength was calculated with linear superposition theorem; then the principle, which contains radio interference and audible noise of hybrid lines should be computed in the same weather, was proposed in this paper combined with influence of humidity to corona. The results of three calculation methods were compared and calculated in a sunny and a rainy day. And it indicates the BPA correction formula is an effective method to calculate radio interference and audible noise of AC/DC hybrid lines at present.

Keywords: AC/DC hybrid transmission line; electromagnetic environment; radio interference; audible noise

收稿日期: 2016-07-12

基金项目: 国家电网科学技术资助项目(SGTJ0000KXJS1400081)。

Supported by Science and Technology Project of State Grid (SGT J0000KXJS1400081).

作者简介: 邹军(1971-), 男, 清华大学教授, 博士生导师, 主要从事输电线路方向研究(Tel)010-62781211, (E-mail)zoujun@tsinghua.edu.cn.

王思颖(联系人), 男, 三峡大学硕士研究生, 主要研究方向为输电线路电磁环境, (Tel) 010-62791807, (E-mail)wangsiying527@126.com.

特高压输电技术在远距离、大容量输电方面有明显的优势和重要的作用^[1-3],随着中国用电的增加、特高压线路的建设、全国联网以及西电东送工程的实施,在河西走廊输电通道紧张的地区,可能出现交流 750、330 kV 线路和直流 ± 800 kV、 ± 1100 kV 线路同塔架设的情况,交直流线路间相互作用会使同塔线路电磁环境问题比单纯的交流线路以及直流线路更加严重。

无线电干扰与可听噪声是由电晕产生的。当交直流线路同塔架设时,线路表面的电晕情况与单纯交流线路以及单纯直流线路有所不同。国内外针对无线电干扰与可听噪声已有大量研究^[4-12],对于单纯交流线路和单纯直流线路、同塔多回交流线路和同塔多回直流线路,以及交流与直流线路共走廊架设的情况,其无线电干扰与可听噪声的计算方法都已成熟。但现有的计算方法并未考虑到晴雨天气对线路电晕程度影响,且均不能直接用于特高压交直流线路同塔架设时的无线电干扰与可听噪声计算。

笔者提出需要考虑相同天气情况计算交直流同塔线路的无线电干扰与可听噪声。利用线性系统叠加原理计算交直流同塔线路表面场强,并由此计算混合线路的无线电干扰和可听噪声。研究比较了文献[13]中的合成算法和提出的改进合成法,以及文献[14]中 BPA 修正公式法的计算结果。从计算结果来看,BPA 修正算法的计算结果最大,并有试验推算验证公式修正项,可认为目前该计算公式有一定的适用性。

1 混合线路导线表面场强

1.1 混合线路表面场强特点

交流和直流线路所加电压性质不同。交流线路施加的电压为 3 个相位相差 120° 的正弦电压,而直流线路施加的电压为定值电压。由于线路之间感应电荷的作用,交流线路施加的电压会在直流线路上感应出正弦变化的电荷,而这个变化的电荷会改变直流线路表面的电场强度状况,相当于增加了一个纹波场强;同理,直流线路施加的电压会在交流线路上感应出固定的电荷,相当于在交流线路表面增加了一个偏置场强。此时,直流线路表面电场强度就不再是恒定值,而交流线路表面场强的峰值与有效值之间就不再有 $\sqrt{2}$ 的关系。混合线路表面场强特性如图 1 所示,可以看出,此时线路表面场强可以看作一个直流偏置场强与一个交流纹波场强相互叠加的合成场强。

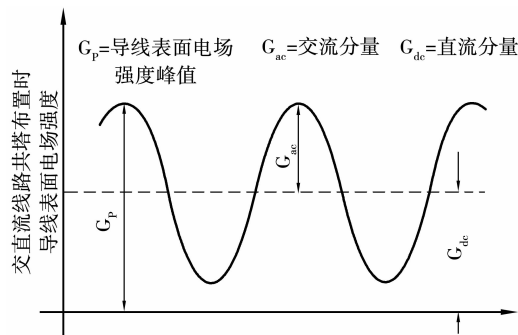


图 1 交直流线路共塔布置时导线表面场强示意图

Fig.1 Schematic diagram of surface field strength of AC/DC transmission lines mounted on the same tower

1.2 混合场线路表面场强计算方法

由以上分析可知,在混合场中线路表面场强包含交流分量和直流分量。交直流混合线路可以看作一个线性系统,导线表面电场强度可以利用叠加原理进行计算,其原理如图 2 所示。

图 2 中(a)图表示计算导线表面场强直流分量,此时将交流线路接地处理;(b)图表示计算交流分量,此时将直流线路接地处理。然后利用马克特—门格尔法分别计算出交流分量与直流分量场强值,将两部分场强值进行叠加,得到混合场的导线表面场强。

$$Q = C \cdot V, \quad (1)$$

其中: C 为线路感应矩阵, V 为线路对地电压矩阵, Q 为线路上的电荷矩阵。由此可以求出交流加电压、直流接地时,交流线路上的电荷分量,即 Q_{ac1} ;以及直流加电压、交流接地时,直流线路上的电荷分量,即 Q_{dc1} ,如

式(2)和式(3)。

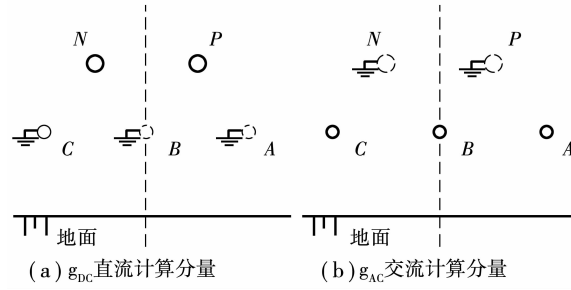


图2 交直流线路同塔布置时导线表面场强示意图

Fig.2 Schematic diagram of surface field strength of AC/DC transmission lines mounted on the same tower

$$Q_{ac1} = Q_{ac} \begin{cases} V_{ac} \neq 0 \\ V_{dc} = 0 \end{cases} = C \cdot V \begin{cases} V_{ac} \neq 0 \\ V_{dc} = 0 \end{cases}, \quad (2)$$

$$Q_{dc1} = Q_{dc} \begin{cases} V_{ac} = 0 \\ V_{dc} \neq 0 \end{cases} = C \cdot V \begin{cases} V_{ac} = 0 \\ V_{dc} \neq 0 \end{cases}, \quad (3)$$

同理,也可以求出交流接地、直流加电压时,交流线路上的电荷分量,即 Q_{ac2} ;以及直流接地、交流加电压时,直流线路上的电荷分量,即 Q_{dc2} ,如式(4)和式(5)。

$$Q_{ac2} = Q_{ac} \begin{cases} V_{ac} = 0 \\ V_{dc} \neq 0 \end{cases} = C \cdot V \begin{cases} V_{ac} = 0 \\ V_{dc} \neq 0 \end{cases}, \quad (4)$$

$$Q_{dc2} = Q_{dc} \begin{cases} V_{ac} \neq 0 \\ V_{dc} = 0 \end{cases} = C \cdot V \begin{cases} V_{ac} \neq 0 \\ V_{dc} = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

在分别求出线路上的分量电荷后,可以用高斯定理分别求出每部分的场强分量,如式(6)。

$$g_{ac1} = \frac{Q_{ac1}}{2\pi\epsilon_0 nr}, \quad (6)$$

式中: n 为导线分裂数; q 为导线所带电荷分量; r 为子导线半径,m;

同理,可以求出 g_{ac2} 、 g_{dc1} 和 g_{dc2} 。考虑线路相互作用对场强的影响后,导线表面综合场强可以看作非周期正弦函数,利用式(7)和式(8)可以算出交流和直流导线表面场强的等效有效值。

$$g_{rms(ac)} = \sqrt{g_{ac1}^2 + g_{ac2}^2}, \quad (7)$$

$$g_{rms(dc)} = \sqrt{g_{dc1}^2 + g_{dc2}^2}. \quad (8)$$

利用式(9)和式(10)可以算出交流和直流导线表面场强峰值。混合线路导线表面场强可采用线性叠加原理计算的说明见附录。

$$g_{max(ac)} = |g_{ac1}| + |g_{ac2}|, \quad (9)$$

$$g_{max(dc)} = |g_{dc1}| + |g_{dc2}|. \quad (10)$$

2 不同天气情况下交直流线路电晕的特征分析

2.1 晴天和雨天情况下输电线路电晕特性分析

交流线路施加 50 Hz 交变电压,晴天时电晕主要出现在线路表面有毛刺、棱角等局部区域,导线起晕后表面场强会基本维持在起晕场强不变;而在雨天情况下由于雨水的附着作用,导线表面粗糙度降低,起晕电压降低,导线表面产生电晕的区域由此增多,线路电晕程度增加^[15-17]。

而直流线路与交流线路电晕机理明显不同。相比负极线路,直流正极线路电晕脉冲幅值大,分布不规则。随着雨天情况的湿度增加,正极导线电晕流注头部电离减弱,从而使进入流注通道的平均电子密度下降,电晕脉冲幅值降低^[18-19]。

2.2 晴天和雨天情况下交直流线路无线电干扰与可听噪声的特点分析

线路无线电干扰与可听噪声与电晕放电脉冲的幅值大小有直接关系。雨天交流线路上的雨滴会形成高电场点,从而产生脉冲幅值很大的电晕放电,雨天的无线电干扰与可听噪声比晴天大的多。而对于直流线路而言,随着下雨时间增加湿度上升,线路电晕脉冲幅值逐渐降低,因此产生的无线电干扰与可听噪声比晴天时要小^[20]。

一般在晴天情况下,电压等级相同的直流线路的无线电干扰和可听噪声会比交流线路大 5~8 dB;而在雨天,交流线路会比直流线路大 15~25 dB。但是为了减少地面离子流情况,交直流线路同塔架设时一般采用直流在上交流在下的布置方式。由于晴雨天对交直流线路电晕的影响作用正好相反,2 种天气情况下无线电干扰与可听噪声差值很大,而不能忽略天气因素对 2 种线路带来的影响,需要在同一种天气情况下计算同塔交直流线路的无线电干扰与可听噪声。

3 无线电干扰与可听噪声计算方法

研究采用 3 种方法:1)合成法;2)改进合成法;3)BPA 修正公式法。合成法没有考虑交直流线路相互之间的影响,仅将交流和直流线路单独计算后进行合成;改进合成法(图中简称改进法)考虑交直流线路相互作用,通过式(7)、(8)算出表面场强等效有效值然后代入经验公式进行计算;BPA 修正公式法(图中简称 BPA)是文献[14]中的方法,其利用导线表面场强峰值计算。合成法和改进合成法使用的计算公式如下。

3.1 不考虑直流线路影响时交流线路无线电干扰与可听噪声的计算公式

3.1.1 交流线路无线电干扰计算公式

交流线路的无线电干扰晴天(50%)RI 值计算公式采用美国 BPA 邦纳维尔电力公司经验公式^[16]

$$RI_{ac} = 46 + 120 \lg \left(\frac{g_{\max}}{17.56} \right) + 40 \lg \left(\frac{d}{3.51} \right) \cdots + 10 [1 - (\lg(10f))^2] + \frac{H}{300} + C_1 - C_2, \quad (11)$$

式中:RI_{ac}为单相线路的无线电干扰,dB(μV/m);g_{max}为导线表面场强最大值,kV/cm;d为子导线直径,cm;f为无线电干扰频率,取 0.5 MHz;H为海拔高度,取 0 m。

$$C_a = 10 \lg(DW^2 + ESU^2 + EIND^2), \quad (12)$$

式中:当 $D \leq \frac{12h_c h_a}{\lambda}$ 时, $DW = \frac{h_c}{KD}$; $D > \frac{12h_c h_a}{\lambda}$ 时, $DW = \frac{h_c}{KD} \cdot \frac{12h_c h_a}{\lambda D}$;

其中 $K = \frac{2\pi}{\lambda}$, $f(\rho) = \frac{2+0.3\rho}{2+\rho+0.6\rho^2}$, $\rho = \frac{52.5D}{\delta\lambda^2}$, $ESU = \frac{f(\rho)h_c}{KD}$;天线高度 $h_a = 2$ m; h_c 为导线平均高度, D

为导线与天线之间距离; δ 为大地电导率。 C_1 指 $h_a = 13.7$ m, $D = 21$ m, $\delta = 4$ mS/m 时的 C_a 值, C_2 为 C_a 在参考状态和测量状态下的值。

交流线路雨天(95%)值可以通过统计经验值计算出来,计算公式如下^[14]

$$RI_{ac雨} = RI_{ac晴} + 24(\text{dB}). \quad (13)$$

3.1.2 交流线路可听噪声计算公式

对于交流线路的可听噪声雨天(95%)AN 值,采用美国邦纳维尔电力公司(BPA)的经验预测公式进行计算^[3]

$$SLA = 10 \lg \sum_{i=1}^Z 10^{[(PWL(i) - 11.4 \lg(D_i) - 5.8)/10]}, \quad (14)$$

式中:SLA 为交流线路的 A 计权声级, dB(A); Z 为交流相数;

$$PWL(i) = -164.6 + 120 \lg(g_{\max}) + 55 \lg(d_{eq}), \quad (15)$$

$$d_{eq} = 0.58n^{0.48}d, \quad (16)$$

式中:PWL 为某一相产生的声功率级, dB; d_{eq} 为交流导线等效直径, mm。

交流线路可听噪声晴天(50%)值的计算公式如下^[14]

$$AN_{ac晴} = AN_{ac雨} - 25(\text{dB}). \quad (17)$$

3.2 不考虑交流线路影响时直流线路无线电干扰与可听噪声的计算公式

3.2.1 直流线路无线电干扰计算公式

对于直流线路的无线电干扰晴天(50%)值,采用 CISPR 推荐的双极直流线路计算公式^[15]

$$RI_{dc} = 38 + 1.6(g_{max} - 24) + 46\lg(r) + \dots + 5\lg(n) + 33\lg\left(\frac{20}{D}\right), \quad (18)$$

式中: RI_{dc} 为正极导线的无线电干扰, $\text{dB}(\mu\text{V}/\text{m})$; r 为子导线半径, cm ; n 为导线分裂数。

直流线路无线电干扰雨天(95%)值的计算公式如下^[14]

$$RI_{dc雨} = RI_{dc晴} - 5(\text{dB}). \quad (19)$$

3.2.2 直流线路可听噪声计算公式

直流线路可听噪声值的计算采用 BPA 的双极直流线路计算公式进行计算^[3]

$$AN_{dc} = -133.4 + 86\lg(g_{max}) \dots + 40\lg(d_{eq}) - 11.4\lg D, \quad (20)$$

$$d_{eq} = d, n \leq 2; d_{eq} = 0.66n^{0.64}d, n \geq 3, \quad (21)$$

式中: AN_{dc} 为正极导线的可听噪声, $\text{dB}(\text{A})$; d_{eq} 为直流导线等效直径, 单位为 mm 。

直流线路可听噪声雨天(95%)值的计算公式如下^[14]

$$AN_{dc雨} = AN_{dc晴} - 6(\text{dB}). \quad (22)$$

3.3 交直流线路计算分量的合成方法

由于无线电干扰频带很宽, 工程中主要计算其 0.5MHz 的分量, 并由分贝计量。在计算交直流线路分量的合成值时, 需将其各自计算值返回到实名值后进行几何相加^[3], 即

$$RI_{晴} = 20\lg\left(\sqrt{10^{\frac{RI_{ac晴}}{10}} + 10^{\frac{RI_{dc晴}}{10}}}\right), \quad (23)$$

式中: $RI_{晴}$ 为混合场晴天(50%)无线电干扰值; $RI_{ac晴}$ 为交流线路晴天(50%)无线电干扰值; $RI_{dc晴}$ 为直流线路晴天(50%)无线电干扰值。

对于交直流混合线路的可听噪声 AN , 交流线路和直流线路都会产生可听噪声, 其计算方法是将所有导线产生的可听噪声 AN 值返回到实名制中进行算术相加。 Z 代表交直流线路总数^[3]。

$$AN_{晴} = 10\lg \sum_{i=1}^Z 10^{[AN_{晴}(i)/10]}, \quad (24)$$

同理, 可以求出交直流同塔线路雨天情况下的无线电干扰 $RI_{雨}$ 以及可听噪声 $AN_{雨}$ 。

4 算例分析

研究列举 2 种算例, 分别为 $\pm 800 \text{ kV}$ 与 750 kV 线路同塔和 $\pm 1100 \text{ kV}$ 与 330 kV 同塔架设情况。本节对叠加原理计算表面场强方法进行了验证, 然后对以上 2 种塔形进行了计算, 并比较了 3 种方法在晴天和雨天两种天气下的计算结果。

4.1 电场强度计算验证

为了验证线性叠加原理计算导线表面场强方法的准确性, 在此采用模拟电荷法与之进行校验。以 $\pm 800 \text{ kV}$ 直流线路和 330 kV 同塔架设情况为例, 采用模拟电荷法在单根导线表面取 100 个校验点, 计算周期分为 100 份进行计算。模拟电荷法与线性叠加法的计算对比图如图 3。

可以看出, 叠加算法计算结果与模拟电荷法计算结果很接近, 两者差值最大仅有 $0.72 \text{ kV}/\text{cm}$, 2 种方法的计算结果非常接近, 可以证明用叠加算法计算交直流混合线路导线表面电场强度是可行并准确的。

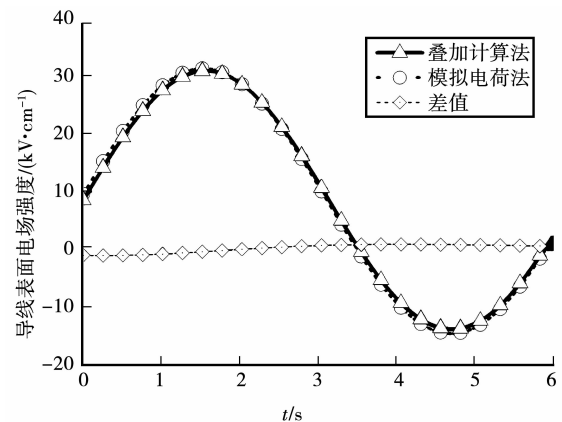


图3 导线表面电场强度计算方法校验图
Fig.3 Calibration of calculation method of electric field intensity on conductor surface

4.2 参数设定

特高压直流线路与交流线路塔型布置情况如图 4 和图 5。750 kV 交流线路平均高度取 23 m, 330 kV 线路取 15 m。计算点距最外侧导线 20 m。天线高度选为 2 m, 大地电阻率 $100 \Omega \cdot \text{m}$, 测量频率 0.5 MHz, 海拔设为 0 m。

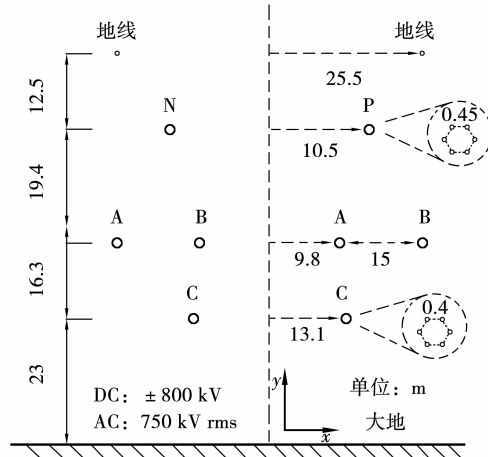


图 4 直流 $\pm 800 \text{ kV}$ 与交流 750 kV 流线路同塔布置示意图
Fig.4 Schematic diagram of $\pm 800 \text{ kV}/750 \text{ kV}$ transmission lines
mounted on the same tower

$\pm 800 \text{ kV}$ 直流线路型号 $6 \times \text{JL}/\text{G3A}-900/40$, 线路直径 39.9 mm , 分裂间距 450 mm ; $\pm 1100 \text{ kV}$ 直流线路型号 $8 \times \text{JL}/\text{G3A}-1250/70$, 线路直径 47.35 mm , 分裂间距 500 mm ; 750 kV 交流线路型号 $6 \times \text{JL}/\text{G1A}-400/50$, 线路直径 27.6 mm , 分裂间距 400 mm ; 330 kV 交流线路型号 $2 \times \text{JL}/\text{G1A}-400/35$, 线路直径 26.82 mm , 分裂间距 400 mm ; $\pm 800 \text{ kV}$ 直流线路上方地线型号是 $\text{JLB20A}-150$, 直径为 15.75 mm 。 $\pm 1100 \text{ kV}$ 直流线路上方地线型号为 $\text{LBGJ}-240-20\text{A}$, 直径为 20 mm 。

4.3 直流 $\pm 800 \text{ kV}$ 与交流 750 kV 线路同塔布置算例分析

直流 $\pm 800 \text{ kV}$ 与交流 750 kV 线路同塔布置时, 交流线路和直流线路的电压相差较小。其导线布置情况如图 4 所示。交流线路呈倒三角布置, 直流线路布置在交流线路上方。导线表面场强计算结果见表 1 与表 2。

表 1 直流 $\pm 800 \text{ kV}$ 与交流 750 kV 线路同塔布置时
导线表面场强峰值计算情况 (kV/cm)

Table 1 Calculation peak value of $\pm 800 \text{ kV}/750 \text{ kV}$
mounted on the same tower (kV/cm)

线路类型	E_{peak1}	E_{peak2}	E_{peak}	$(E_{\text{peak}}/E_{\text{peak1}})/\%$
正极	20.41	22.51	2.02	9.46
A 相	23.78	25.92	2.14	9.00
B 相	20.89	23.29	2.40	11.49
C 相	21.51	21.71	0.20	0.93

当直流和交流线路电压等级相当时, 直流线路表面场强增量很小。交流线路表面场强增量与直流线路距离有直接关系, 第二回交流线路 C 相峰值场强增量不足 1% , 但由于 A 相和 B 相与直流线路相距较近, 其增量分别能够达到 8.6% 和 10% 。将导线表面的场强折算到有效值后, 发现交直流线路相互作用对场强有效值的影响较小, 直流线路有效值变化约为 1.5% , 交流线路 A 相与 B 相约为 1.7% , C 相变化百分比不足 1% 。

表 2 直流±800 kV 与交流 750 kV 线路同塔布置时导线表面场强有效值计算情况(kV/cm)

Table 2 Calculation RMS value of ±800 kV/750 kV mounted on the same tower(kV/cm)

线路类型	E_{rms1}	E_{rms2}	E_{rms}	$(E_{rms}/E_{rms1})/\%$
正极	20.41	20.73	0.32	1.57
A 相	16.82	17.11	0.29	1.72
B 相	14.77	15.09	0.32	2.17
C 相	15.21	15.09	0.11	0.72

无线电干扰与可听噪声计算曲线如图 5 和图 6。改进合成法的计算结果基本处于合成法和 BPA 修正公式计算结果之间,在交直流线路电压等级相当情况下,3 种计算方法结果相差也不大,无线电干扰与可听噪声差值均在 5 dB 以内。

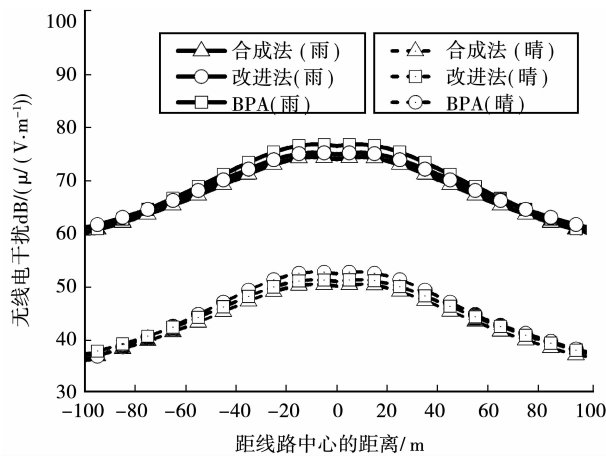


图 5 直流±800 kV 与交流 750 kV 线路同塔布置时混合场无线电干扰值计算曲线

Fig.5 Calculation curves of hybrid radio interference of ±800 kV/750 kV Transmission lines mounted on the same tower

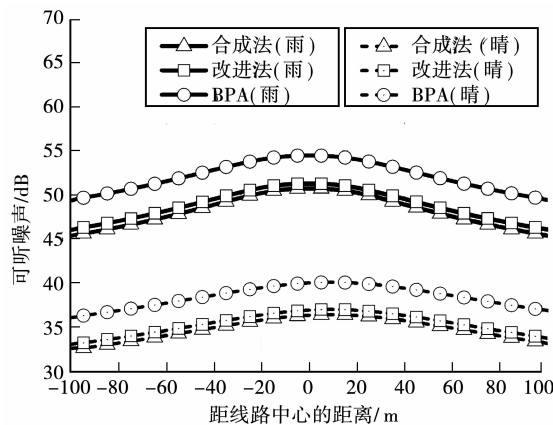


图 6 直流±800 kV 与交流 750 kV 线路同塔布置时混合场可听噪声值计算曲线

Fig.6 Calculation curves of hybrid audible noise of ±800 kV/750 kV Transmission lines mounted on the same tower

从计算曲线可以看出,由于交直流线路分裂数均大于 4,在交直流线路电压等级相差 100 kV 以内、分裂数较多情况下,单根子导线上的平均场强增量并不大。总体来看,修正公式法的计算值比研究提出的综合场强法大 3 dB 左右,但 2 者都呈现相同变化趋势。当交直流线路表面场强相互作用较小时,3 种方法计算结果相差很小,修正公式法比合成法和改进合成法大 3 dB 左右,说明当场强变化不大时,3 种方法计算结果近似。

4.4 直流 ±1 100 kV 与交流 330 kV 线路同塔布置算例分析

直流 ±1 100 kV 与交流线路 330 kV 同塔布置时(如图 7),直流电压等级远大于交流电压等级。其导线表面场强计算情况见表 3 和表 4。

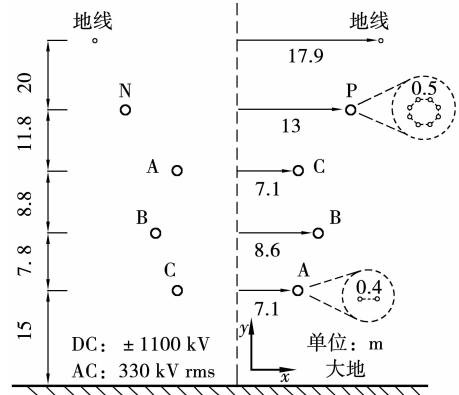


图 7 直流 ±1 100 kV 与交流 330 kV 线路同塔布置示意图

Fig.7 Schematic Diagram of ±1 100 kV/330 kV Transmission lines mounted on the same tower

表 3 直流 ±1 100 kV 与交流 330 kV 线路同塔布置时导线表面场强峰值计算情况 (kV/cm)

Table 3 Calculation peak value of ±1 100 kV/330 kV mounted on the same tower(kV/cm)

线路类型	E_{peak1}	E_{peak2}	E_{peak}	$(E_{peak}/E_{peak1})/\%$
正极	19.37	20.09	0.72	3.72
A 相	22.74	24.56	1.82	8.02
B 相	23.13	27.96	4.83	20.88
C 相	22.04	33.81	11.77	53.40

表 4 直流 ±1 100 kV 与交流 330 kV 线路同塔布置时导线表面场强有效值计算情况 (kV/cm)

Table 4 Calculation RMS value of ±1 100 kV/330 kV mounted on the same town(kV/cm)

线路类型	E_{rms1}	E_{rms2}	E_{rms}	$(E_{rms}/E_{rms1})/\%$
正极	19.37	20.09	0.72	3.72
A 相	16.08	16.18	0.10	0.62
B 相	16.36	16.98	0.62	3.79
C 相	15.59	19.38	3.79	24.31

当交流线路电压等级较低时,其分裂数较少,靠近直流线路的交流相表面场强变化非常大,第二回 C 相峰值增量能够超过 10 kV/cm,峰值变化百分比超过了 50%。此时,靠近直流线路的交流相会由于直流线路的偏置作用,产生更为剧烈的电晕现象。无线电干扰与可听噪声计算曲线如图 8 和图 9。BPA 修正公式的无线电干扰计算值比改进合成法大 9 dB 左右;可听噪声计算值比改进合成法大 3 dB 左右,比合成法大 3.8 dB。

从计算曲线中可以看出,当交流与直流线路电压等级相差 2 倍以上时,3 种方法的计算结果差异很明显。改进合成法与 BPA 修正公式法的计算结果也有较大差异。

综合比较 3 种方法计算结果后发现,修正公式法的计算值最大,其次为改进合成法,最小的是合成法。由于 BPA 修正公式是通过将双回交流共塔线路改造成交直流共塔线路并进行试验所获得的,而该公式有试验结论支撑,因此推荐 BPA 修正公式法为交直流

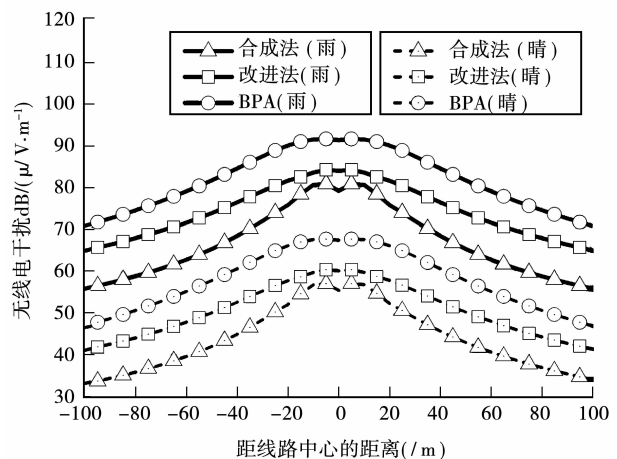


图 8 直流 ±1 100 kV 与交流 330 kV 线路同塔布置时混合场无线电干扰值计算曲线

Fig.8 Calculated curves of hybrid radio interference of ±1 100 kV/330 kV transmission lines mounted on the same tower

共塔架设线路的无线电干扰与可听噪声计算方法。合成法没有考虑交直流线路相互之间影响对场强的作用;而改进合成法仅用考虑影响后的场强代入合成法公式,而没有考虑场强变化后对公式其他计算项的影响。这2种方法对于交直流线路共走廊架设情况,计算结果和实测结果比较接近,而对于共塔架设情况没有试验验证和数据支撑,所以从研究角度来看暂时不推荐这2种方法。

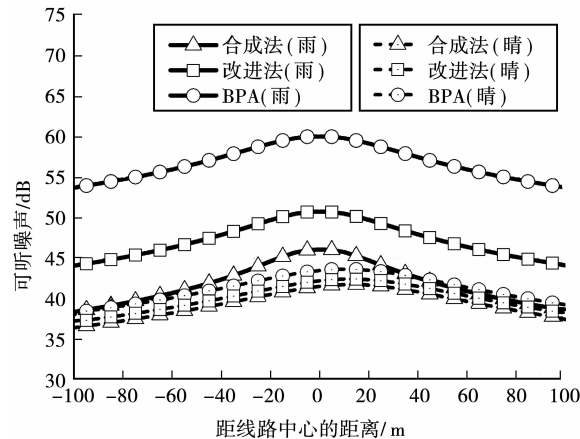


图9 直流±110 kV与交流330 kV线路同塔布置时混合场可听噪声值计算曲线

Fig.9 Calculated curves of hybrid audible noise of ±110 kV/330 kV transmission lines mounted on the same tower

5 结论

主要针对交直流线路同塔架设情况,分析了混合线路表面场强的特点,并考虑天气情况对交直流线路电晕影响的不同,提出需要在相同天气情况下计算交直流同塔架设时的无线电干扰与可听噪声。结论如下:

1) 交直流线路同塔架设时,线路距离较近,彼此间有相互作用影响。研究分析得出交直流同塔时导线表面场强具有交流分量和直流分量,并利用线性叠加原理准确有效地计算了导线表面的综合场强值。

2) 由于晴雨天天气状况交流直流线路电晕影响情况不同,对交直流线路会产生不同的作用,大雨情况下交流线路的电晕情况最严重,其无线电干扰与可听噪声最大;而直流线路则刚好相反,其在晴天情况下的电晕情况最严重,无线电干扰与可听噪声最大。因此提出,需要在相同天气情况下计算交直流同塔线路的无线电干扰与可听噪声计算。

3) 根据计算结果,电压等级相差较小的交直流同塔线路,改进合成法和BPA修正公式法的计算结果相差不大,可能是由于表面场强变化较小,BPA修正公式的修正项影响不大;而当交直流线路电压等级相差较大时,两种方法的计算结果相差很大。由于BPA经过试验线路对公式其余项进行修正,可认为该方法为目前交直流同塔线路无线电干扰与可听噪声计算较为适用的方法。

参考文献:

- [1] 刘振亚.特高压直流输电工程电磁环境[M].北京:中国电力出版社,2008.
LIU Zhenya. Electromagnetic environment of UHVDC transmission project[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2008. (in Chinese)
- [2] 刘振亚.特高压直流输电线路[M].北京:中国电力出版社,2009.
LIU Zhenya. UHVDC transmission lines [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009. (in Chinese)
- [3] 邹雄,万保权.输变电工程的电磁环境[M].北京:中国电力出版社,2009.
WU Xiong, WAN Baoquan. Electromagnetic environment of power transmission and transformation project [M]. Beijing: China Electric Power Press, 2009. (in Chinese)
- [4] Juette G W, Charbonneau H, Dobson H I, et al. CIGRE/IEEE survey on extra high voltage transmission line radio noise[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1973, PAS-92(3):1019-1028.

- [5] Juette G W. Comparison of radio noise prediction methods with CIGRE/IEEE survey results[J]. Power Apparatus & Systems IEEE Transactions on, 1973, PAS-92(3): 1029-1042.
- [6] Olsen R G, Schennum S D, Chartier V L. Comparison of several methods for calculating power line electromagnetic interference levels and calibration with long term data[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1992, 7(2): 903-913.
- [7] Chartier V L, Stearns R D. Formulas for predicting audible noise from overhead high voltage AC and DC lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1981, PAS-100(1): 121-130.
- [8] Kolcio N, Ware B J, Zagier R L, et al. Apple grove 750 kV project statistical analysis of audible noise performance of conductors at 775 kV[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1974, PAS-93(3): 831-840.
- [9] 邬雄, 万保权, 路遥. 1000kV 级交流输电线路电磁环境的研究[J]. 高电压技术, 2006, 32(12): 55-58.
WU Xiong, WAN Baoquan, LU Yao. Investigation of electromagnetic environment of 1000 kV AC line[J]. High Voltage Engineering, 2006, 32(12): 55-58. (in Chinese)
- [10] 万保权, 邬雄, 刘涤尘, 等. 西北 750 kV 输电线路的无线电干扰研究[J]. 高电压技术, 2003, 29(3): 41-41.
WAN Baoquan, WU Xiong, LIU Dichen, et al. Study on radio interference of 750 kV transmission line in the northwest[J]. High Voltage Engineering, 2003, 29(3): 41-41. (in Chinese)
- [11] Perry D E, Chartier V L, Reiner G L. BPA 1100 kV transmission system development corona and electric field studies[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, PAS-98(5): 1728-1738.
- [12] Lacroix R, Charbonneau H. Radio Interference from the First 735-kV Line of Hydro-Quebec[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1967, 31(4): 932-939.
- [13] 吴桂芳, 袁春峰, 陆家榆, 等. 特高压直流线路与交流线路同走廊时混合电磁环境的计算[J]. 电网技术, 2010, 34(2): 14-19.
WU Guifang, YUAN Chunfeng, LU Jiayu, et al. Electromagnetic environment calculation of hybrid EHV transmission line arranged in the same corridor[J]. Power System Technology, 2010, 34(2): 14-19. (in Chinese)
- [14] Chartier V L, Sarkinen S H, Stearns R D, et al. Investigation of Corona and Field Effects of AC/DC Hybrid Transmission Lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus & Systems, 1981, PAS-100(1): 72-80.
- [15] 中华人民共和国国家电力公司, 中华人民共和国电力行业标准: DLT 691-1999, 高压架空送电线路无线电干扰计算方法[S]. 2000.
DLT 691-1999, Calculation Method of Radio Interference for High Voltage Overhead Transmission Lines[S], 1999.
- [16] Oresick C F, Lux R A, Wickham D S, et al. Apparatus and method for correcting the voltage on a photoconductive device; US5164776[P]. 1992.
- [17] 孟晓波, 惠建峰, 卞星明, 等. 交流电晕脉冲特性随气压湿度变化的规律[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(28): 128-135.
MENG Xiaobo, HUI Jianfeng, BIAN Xingming, et al. AC corona pulse characteristics along with changes in humidity and air pressure[J]. Proceeding of the CSEE, 2011, 31(28): 128-135. (in Chinese)
- [18] 惠建峰, 关志成, 王黎明, 等. 正直流电晕特性随气压和湿度变化的研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(33): 53-58.
HUI Jianfeng, GUAN Zhicheng, WANG Liming, et al. Study on corona of positive DC line along with changes in humidity and air pressure[J]. Proceeding of the CSEE, 2007, 27(33): 53-58. (in Chinese)
- [19] 卞星明, 惠建峰, 黄海鲲, 等. 气压和湿度对正直流电晕流注脉冲特性的影响[J]. 高电压技术, 2009, 35(10): 2371-2382.
BIAN Xingming, HUI Jianfeng, HUANG Haikun, et al. Investigation of corona stream of positive DC line along with humidity and air pressure[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(10): 2371-2382. (in Chinese)
- [20] 卞星明, 惠建峰, 黄海鲲, 等. 负直流电晕流注脉冲特性随气压和湿度变化的规律[J]. 中国电机工程学报, 2010, 35(10): 134-142.
BIAN Xingming, HUI Jianfeng, HUANG Haikun, et al. The regular pattern of corona stream of negative DC line along with changes in humidity and air pressure[J]. Proceeding of the CSEE, 2010, 35(10): 134-142. (in Chinese)
- [21] 倪光正, 杨仕友, 钱秀英, 等. 工程电磁场数值计算[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010.
NI Guangzheng, YANG Shiyu, QIAN Xiuying, et al. Engineering numerical calculation of electromagnetic fields[M]. Beijing: Mechanical Industry Press, 2010. (in Chinese)