

几种 1 000 kV 交流特高压输电线下可听噪声预测公式的评估

俞集辉, 杨越, 何健, 杨光, 季娟

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030)

摘要: 特高压输电线下可听噪声大小的预测是特高压建设中最关键的一环。根据我国对特高压输电的电压等级与分裂导线的限制, 筛选出了适用于计算我国特高压输电线下可听噪声大小的 4 种经验公式, 并且通过对比计算结果和实测值, 分别得到相导线水平和正三角排列时, 最适合用于预测可听噪声大小的两种计算公式。

关键词: 可听噪声; 预测公式; 交流输电线; 特高压; 影响因素

中图分类号: TM723; TN972

文献标志码: A

文章编号: 1001-1609(2009)04-0001-04

Evaluations of Several Audible Noise Predicting Formulas for 1 000 kV UHV AC Transmission Lines

YU Ji-hui, YANG Yue, HE Jian, YANG Guang, JI Juan

(State Key Laboratory of Power Transmission & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: Prediction of audible noise under UHV transmission lines is the most important factor in planning and constructing UHV transmission lines. Based on China's requirements to voltage level and bundle conductor, this paper presents four audible noise predicting formulas, among which the best two audible noise predicting formulas for horizon phase conductors and triangle phase conductors are chosen according to comparisons of calculated results.

Key words: audible noise; predicting formula; AC transmission lines; UHV; impact factors

0 引言

随着我国电网输电电压的增大, 研究特高压、远距离送电技术, 实现电力资源在较大范围的优化配置变得越来越迫切^[1]。与 500 kV 超高压输电线路相比, 特高压输电所带来的环境问题成为影响其可行性的关键问题之一^[2,3], 如果处理不好, 就会影响输电线路附近人员的正常工作和休息。因此, 特高压输电的噪声问题, 必须慎重对待。

由于过去的电压等级不够高, 输电线路引起的可听噪声通常很小, 所以目前国内对此领域研究很少, 一般都只是侧重于分析噪声的影响因素。

笔者对不同机构进行长期试验后总结出来的 6 种经验公式进行对比, 分析了它们的适用范围; 在结合我国特高压输电线路对于电压等级和导线要求的基础上进行仿真, 得出了最适合用于计算我国特高压输电线下的可听噪声的预测公式。

1 可听噪声的影响因素

可听噪声是由输电线路表面电晕放电现象所引

起的, 因此影响电晕放电的主要因素是导线表面的电位梯度, 这些因素大致可分以下两类^[4-7]。

1.1 线路自身参数

导线分裂数: 导线分裂数增多, 可听噪声减小。四分裂或四分裂以下, 对可听噪声影响相对较小; 四分裂以上, 影响较大。

导线半径: 导线半径增大, 可听噪声减小。

分裂导线间距: 分裂导线间距增加, 可听噪声减小。但是为了保证导线表面的电场强度差距不致过大, 一般要求分裂导线间距为 30~50 cm。

导线老化程度: 导线老化程度越高, 噪声水平越高。原因有二: 随着导线老化程度的加强, 最初在导线上涂抹的油脂已经没有了, 表面更加粗糙, 根据皮克定理可知, 表面越粗糙, 起晕场强就越低; 由于之前油脂的关系, 导线表面从憎水变为亲水, 更进一步增大了噪声水平。

导线高度: 导线对地高度增加, 可听噪声减小。

线路自身的参数对于可听噪声的影响是最大的, 改变以上参数都可以明显地减小输电线下可听噪声的大小, 但是也不能一味地改变参数, 以求降低

收稿日期: 2008-08-25; 修回日期: 2008-12-13

作者简介: 俞集辉(1944), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事电磁场理论及应用的科研和教学工作。

噪声。首先,由于改变参数所带来的成本增加非常明显,有时甚至呈几何级数增长;其次,如果某些参数超过一定值,导线周围的电场情况会发生变化,现在的公式就不能再用。所以,在选择线路的参数时,一定要综合考虑各方面因素。

1.2 周围环境

雨水:雨水增大,可听噪声增加。雨水是环境中对可听噪声的影响最大的因素,雨天的可听噪声可以比晴天高 17~24 分贝。这是因为雨水在导线上形成的水滴会使表面场强发生较大畸变,使局部场强增大,电晕源点增多,电晕放电强度增加,以致可听噪声加大。

空气密度:电晕放电的起始电压也随空气密度的增大而增加。

除了以上主要的影响因素外,还有其他一些情况也会影响可听噪声的大小,比如:树木的叶子、建筑物和大地等会影响声波的反射和散射;季节、温度的变化引起的空气密度的改变;周围的鸟和小虫以及他们在电线上面的粪便,会影响可听噪声的大小。

上述因素都与可听噪声的大小有关,所以在讨论可听噪声的大小时,一定要说明具体的模型、参数以及测试环境。

2 可听噪声的预测公式

2.1 计量方式

要预测可听噪声的大小,首先需要清楚噪声如何描述和它的计量方式。

对传输线上噪声的完整描述必须要包含以下 3 点:①声音随时间的变化;②声音的空间分布和;③声音的频率。然而,一般声音总是处于变化之中,所以一般噪声的计量方法不可能将 3 个因素完全包含。现在通用的是 A 声级,它根据人耳对于声音的敏感度进行加权(例如,对于人耳比较敏感的 500~3 000 Hz,它的权系数就比其他频段的要大),然后将所有频段的噪声叠加得到总的噪声大小,以此来描述某点的噪声,再通过各点噪声的大小来描述整个空间的可听噪声。

2.2 预测公式

可听噪声的计算公式^[8-12]大体可分两大类:一是对于特定几何结构所得出的公式;二是适用各种几何形状的一般公式。

第 1 类公式的通式是在相同的结构、不同的尺寸下面测量得到的。这类公式主要包含 AEP 公式和 Ontario Hydro 公式,只适用于和测试类型相同结构的线路。因为这两个公式都是在单回路水平结构下测试的,而且测试电压都不大于 1 000 kV,并不适用于我国的特高压输电线路。

第 2 类公式是对单相导线的噪声进行叠加来计

算整个线路的噪声。因此,它就具有普遍适用性,适用所有的线型。这类公式的通式为

单相线路的 A 声级 AN 为

$$AN = k_1 f_1(g) + k_2 f_2(n) + k_3 f_3(d) + k_4 f_4(D) + AN_0 + k \quad (1)$$

线路的 A 声级 SL 为

$$SL = 10 \log \sum_{i=1}^3 10^{AN_i/10} \quad (2)$$

此类公式所包含的 6 个公式及其测试条件和适用范围如下。

(1)BPA 公式

$$AN = 120 \log g + k \log n + 55 \log d - 11.4 \log D + AN_0 \quad (3)$$

式(3)中,g 为最大电位梯度的平均值。

$$k = \begin{cases} 26.4 & \text{当 } n \geq 3 \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } n < 3 \text{ 时} \end{cases} \quad AN_0 = \begin{cases} -128.4 & \text{当 } n \geq 3 \text{ 时} \\ -115.4 & \text{当 } n < 3 \text{ 时} \end{cases}$$

测试条件为雨天 L₅₀,适用范围为 230~1 500 kV,分裂导线不大于 16 根,导线半径在 1~3.25 cm 的线路。

(2)EDF 公式

$$AN = 15 \log n + 4.5d - 10 \log D + AN_0 \quad (4)$$

式(4)中,AN₀ 依赖于 g 的选取;测试条件为大雨;适用范围为 400~1 500 kV,分裂导线根数不大于 6,导线半径在 1~3 cm 的线路。

(3)ENEL 公式

$$AN = 85 \log g + 18 \log n + 45 \log d - 10 \log D - 71 + K \quad (5)$$

式(5)中,g 为最大电位梯度的平均值;K = $\begin{cases} 3 & \text{当 } n=1 \text{ 时} \\ 0 & \text{当 } n \geq 2 \text{ 时} \end{cases}$;测试条件为大雨;适用范围为 400~1 200 kV,分裂导线根数不大于 10,导线半径在 1~2.5 cm 的线路。

(4)FGH 公式

$$AN = 2g + 18 \log n + 45 \log d - 10 \log D - 0.3 \quad (6)$$

式(6)中,g 为最大电位梯度的平均值;测试条件为最大雨的情况下;适用范围为分裂导线根数不大于 6,导线半径在 1~3 cm 的线路。

(5)GE 公式

L₅ 雨的可听噪声为

$$AN_5 = -665/g + 20 \log n + 44 \log d - 10 \log D - 0.02D + AN_0 + K_1 + K_2 \quad (7)$$

式(7)中,g 为最大电位梯度的平均值;

$$AN_0 = \begin{cases} 75.2 & \text{当 } n < 3 \text{ 时} \\ 67.9 & \text{当 } n \geq 3 \text{ 时} \end{cases}; K_1 = \begin{cases} 7.5 & \text{当 } n=1 \\ 2.6 & \text{当 } n=2 \\ 0 & \text{当 } n \geq 3 \end{cases};$$

$$K_2 = \begin{cases} 0 & \text{当 } n < 3 \\ 22.9(n-1)d/B & \text{当 } n \geq 3 \end{cases}; B \text{ 为等效半径。}$$

L₅₀ 雨的可听噪声为

$$AN_{50} = AN_5 - \Delta A \quad (8)$$

式(8)中,ΔA = $\begin{cases} 14.2g/g - 8.2 & \text{当 } n < 3 \\ 14.2g/g - 10.4 - 8[(n-1)d/B] & \text{当 } n \geq 3 \end{cases}$;

$$g_c = \begin{cases} 24.4(d^{0.24}) & \text{当 } n \leq 8 \\ [24.4(d^{0.24}) - 0.25(n-8)] & \text{当 } n > 8 \end{cases};$$

测试条件为雨天的 L_{50} 和 L_5 ; 适用范围为 230~1 500 kV, 分裂导线根数不大于 16, 导线半径在 1~3 cm 的线路。

(6)IREQ 公式

$AN=72\log g+227\log n+45.8\log d-11.4\log D-57.6$ (9) 式(9)中, g 为最大电位梯度; 测试条件为最大雨; 适用范围为 345~1 500 kV, 分裂导线根数不小于 2。

根据文[2], 我国交流特高压输电线路将要采用 1 000 kV 电压等级和分裂导线数为 8 的导线 (单回路采用 8 500, 双回路采用 8 630), 所以, 第 2 类经验公式中的 EDF 公式和 FGH 公式都不适用。

综上所述: 根据我国特高压输电的等级, 第 1 类公式并不适用; 根据我国对于特高压输电导线的要求, 第 2 类公式中的 EDF 公式和 FGH 公式并不适用, 所以可以用的只有 BPA、IREQ、ENEL 和 GE 这 4 种。下面的工作就是对比这 4 种预测公式。

3 模型仿真及结果分析

将常用的平行和正三角结构的输电线路模型进行仿真, 其结构模型可参见下面的图 1、2, 导线参数可参见表 1。

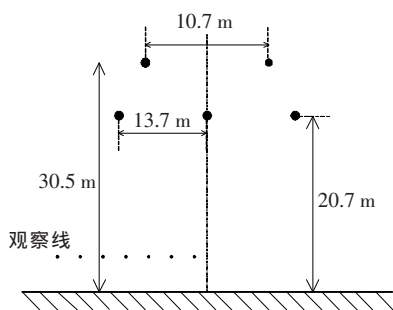


图 1 相导线水平排列

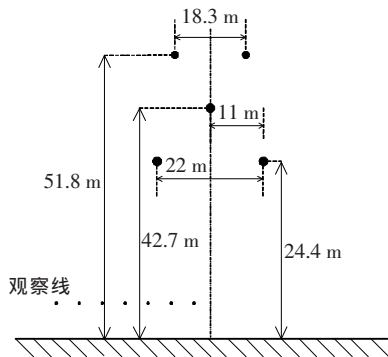


图 2 相导线正三角排列

根据上面所说的 4 个公式用加拿大 SES 公司的 CDEGS 软件进行计算。笔者将根据观测点距离输电线路的远近, 分为两步来研究噪声, 具体如下。

表 1 水平和正三角排列的导线参数

模型	水平	正三角
电压等级/kV	775	1 200
导线分裂数	4	8
导线半径/cm	1.27	2.03
导线间距/cm	45.7	40.9

3.1 输电线较远范围的可听噪声

取观测点较远的时候, 很容易看出噪声预测公式的整体走向, 所以, 文中取观测点到输电线中心最远距离为 500 m, 分别用 4 种预测公式进行计算。又因为距离较远的时候, 相线的排列对噪声影响不大, 两种相导线排列方式的噪声大小差不多, 文中只取大雨情况下的正三角排列, 具体预测结果图形见图 3。

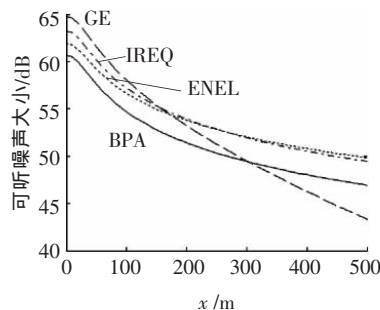


图 3 正三角排列 500 m 时各种公式的噪声预测

由图 3 可以看出, IREQ、BPA 和 ENEL 曲线的走势基本相同, 这是因为它们的公式结构类似, 而相比之下的 GE 公式斜率就偏大。在输电导线的中心处, 4 种公式计算的结果相似, 在约 160 m 处, 3 种计算公式的结果重合, 之后差异变大。从这 4 条线的趋势可以看出, 如果观测点再远, 它们的差异会越大, BPA 公式还有可能算出噪声大小为 0 或者甚至负值, 这显然不对。但是, 研究可听噪声的目的是为了保证输电线附近居民的正常生活, 所以, 我们关心的重点并不是观测线距离输电线很远处的可听噪声, 下面重点说明输电线附近的可听噪声大小。

3.2 输电线附近的可听噪声

由上面的趋势可以发现, 采用不同的公式, 计算出来的同一条线路的预测噪声值不相同。为了使预测值尽可能准确, 在具体计算时, 应选择最能反映实际噪声值大小的公式。

图 4~7 反映了相导线水平和正三角排列下距离输电线中心 50 m 范围内可听噪声计算值和实测值的关系。测量时, 从最外侧导线的正下方开始, 每隔 5 m 取一点。季节的不同也会影响噪声值的大小, 所以文中所选数据均为声压计在夏季或秋季对实验线路进行多次测量所得的。仿真计算中, BPA、ENEL 和 IREQ 公式只能用于计算小雨或大雨情况下噪声的大小, 因此, 在大雨或小雨情况下, 必须对其加上

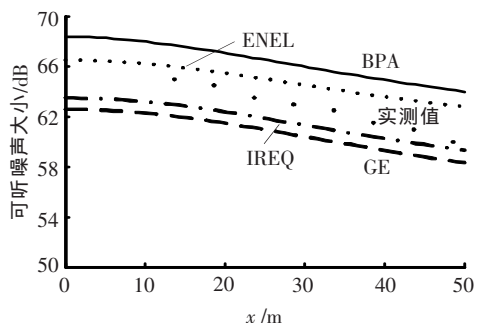


图4 水平排列 50 m 大雨时各种公式的噪声预测

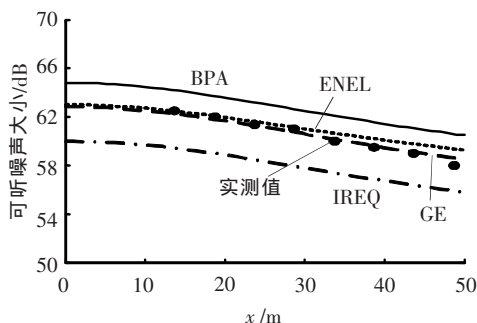


图5 水平排列 50 m 小雨时各种公式的噪声预测

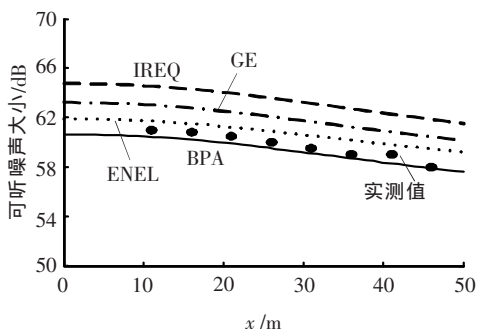


图6 正三角排列 50 m 大雨时各种公式的噪声预测

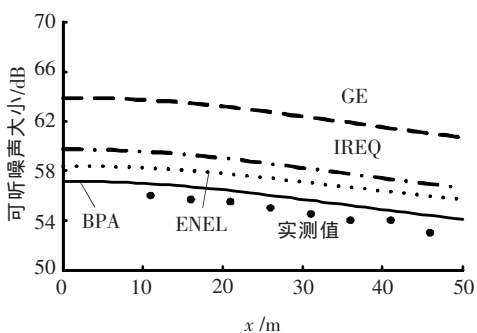


图7 正三角排列 50 m 小雨时各种公式的噪声预测

一个修正值。SES 软件公司在对大量数据研究的基础上,将 3.5 dB 作为 3 种公式的修正值。

3.2.1 相导线水平排列

如图 4 所示,大雨情况下,BPA 与 GE 方法的计算值与实测值^[11]差别较大,不能很好地反映真实值,并且 BPA 曲线修正时也会引入误差而导致预测值的不准确,因此不建议用它们来计算可听噪声值的大小。

由图 5 可以看出,小雨情况下,BPA 与 IREQ 曲线的实测值^[11]差别较大,所以可听噪声大小的计算不宜选用 BPA 与 IREQ 方法。

综上所述,相导线水平排列时,在大雨情况下,计算可听噪声不宜选用 BPA 与 GE 方法;在小雨情况下,计算可听噪声不应采用 BPA 与 IREQ 方法。所以,相导线平行排列方式的输电线下可听噪声大小的计算用 ENEL 方法较好。

3.2.2 相导线正三角排列

如图 6 所示,大雨情况下,实测值^[12]的下方只有 BPA 曲线,往上依次是 ENEL、IREQ 和 GE。实测值位于 BPA 与 ENEL 曲线之间,GE 和 IREQ 曲线与实测值差别较大,所以大雨时宜用 BPA 与 ENEL 公式来计算可听噪声大小。

如图 7 所示,小雨情况下,实测值位于 4 条曲线的下方,曲线由下到上依次是 BPA、ENEL、IREQ 和 GE。所以,由最接近实测值^[12]的 BPA 曲线来反映实际值效果最佳,而且小雨时的 BPA 并没有引入修正值,减少了误差的产生。

综上所述,在相导线正三角排列大雨时宜选用 BPA 或 ENEL 方法,小雨时采用 BPA 效果最佳。所以,在计算相导线正三角排列方式的输电线下可听噪声大小时,应选用 BPA 方法。

4 结语

文中列举了 6 种不同机构总结出来的计算交流输电线下可听噪声的经验公式,然后根据我国特高压输电的电压等级和我国对于特高压输电分裂导线的规定,筛选出 4 种能够用于计算我国特高压输电线下可听噪声大小的预测公式。

笔者分别在相导线水平与正三角排列下将这 4 种公式进行计算与对比,发现 ENEL 公式在相导线水平排列时,最能反映噪声的大小,而 BPA 公式在相导线正三角排列时最佳。所以,对我国将要建成的 1 000 kV 特高压输电线在相导线水平和正三角排列时,应分别选用 ENEL 公式和 BPA 公式对其下方的可听噪声大小进行预测。

在特高压输电线路的建设中,选择最佳的噪声计算公式可以更好地预测可听噪声的大小,从而选择更合适的参数,以达到节约建设成本的目的。

参考文献:

- [1] 吴桂芳,陆家榆,邵方殷.特高压等级输电的电磁环境研究[J].中国电力,2005,38(6):24-27.
- [2] 刘振亚.特高压电网[M].北京:中国经济出版社,2005.
- [3] TAYLOR E R,CHARTIER V L,RICED N.Audible Noise and Visual Corona from HV and EHV Transmission Lines and Substation Conductors-Laboratory Tests[J].IEEE Transactions on

(下转第 15 页)

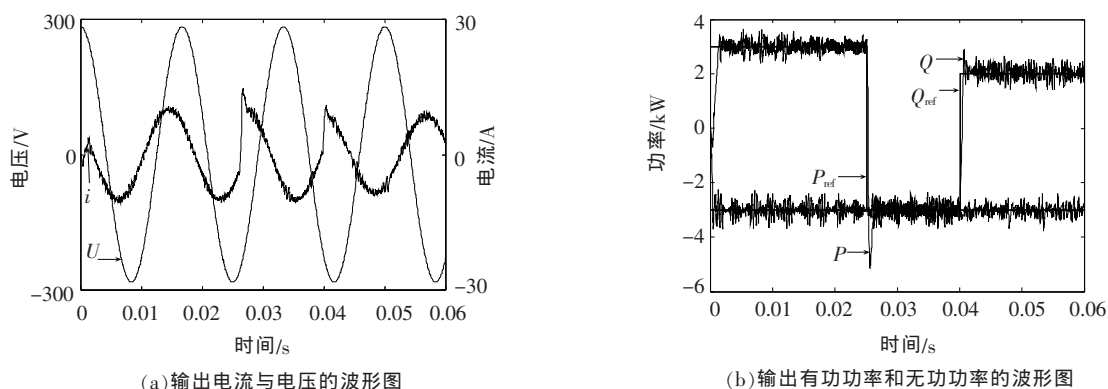


图7 有功和无功给定突变时的响应

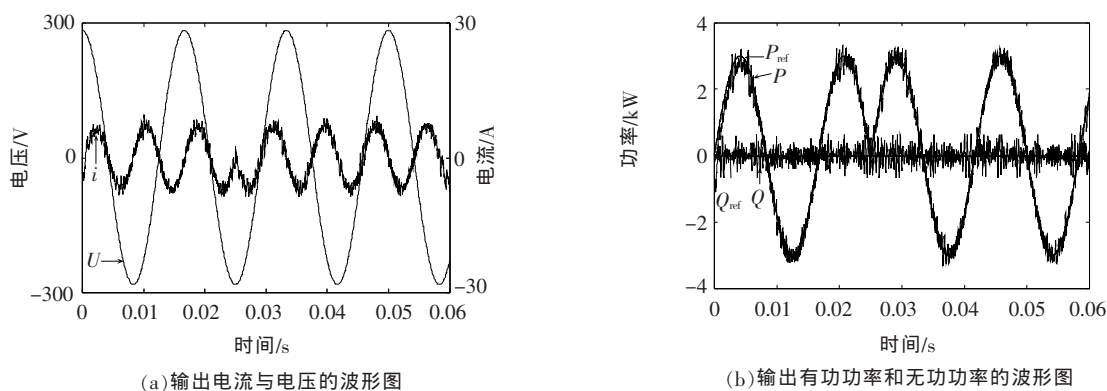


图8 有功给定突变时的响应

而变化,而无功功率保持为0不变。

从以上波形图可看出,实际电流和实际功率都很好跟踪了指令值,同时调节时间比较短,尽管超调量相对比较大,但是基本实现了能量的双向流动。

4 结语

设计了一种电子平衡负荷,并用软件仿真验证了该设计的可行性,该设计方法具有普遍性,为不平

衡负荷的实现提供了一定的指导作用。

参考文献:

- [1] 李定安,伊瀬敏史.三相可逆不平衡负荷シミュレータの開発[Z].電気学会半導体電力変換研究会資料,2006.
- [2] 刘志刚,李宝昌,汪至中,等.电能反馈型电子负载的设计与实现[J].铁道学报,2001,23(3):27-30.
- [3] 张崇巍,张兴.PWM整流器及其控制[M].北京:机械工业出版社,2003.

(上接第4页)

- [4] 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.
- [5] 郭雄.特高压输电的电磁环境研究[J].电力系统通信,2006,27(164):1-5.
- [6] 王小凤,周浩.我国1000kV特高压交流输电线路电磁环境的研究[J].环境科学与技术,2007,30(6):23-26.
- [7] CHARTIER V L, BLAIR D E. Effect of Bundle Orientation on Transmission Line Audible and Radio Noise[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1994, 9(3): 1538-1544.
- [8] LUNDQUIST J, BOVERI A B. Results from AC Transmission Line Audible Noise Studies at the Anneberg EHV Test Station [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1990, 5(1): 317-323.
- [9] IEEE Committee Report. A Comparison of Methods for Calculating Audible Noise of High Voltage Transmission Lines [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1982 (101): 4090-4099.
- [10] OLSEN R G, STIMSON B. Predicting VHF/UHF Electromagnetic Noise from Corona on Power-line Conductors [J]. IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, 1988(30):13-22.
- [11] KOLCIO N, DIPLACIDO J, DIETRICH F M. Apple Grove 750 kV Project-two Year Statistical Analysis of Audible Noise from Conductors at 775 kV and Ambient Noise Data [J]. Ibid., 1977, 96(2):560-570.
- [12] 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(98):1728-1738.