

# 输电线路可听噪声研究综述

谭 闻<sup>1</sup>, 张小武<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 国网电力科学研究院, 湖北 武汉 430074)

**摘要:** 笔者较全面地阐述了输电线路可听噪声控制的重要意义和这些年来国内外的研究成果, 说明了导线表面空气电晕放电是交直流输电线路噪声问题产生的原因。系统地分析了交直流输电线路可听噪声的两大类影响因素, 即线路结构、设计和施工方面的影响与大气及环境等外部条件的影响。归纳了降低输电线路可听噪声的方法, 提出目前工程中较为可行的措施是增加分裂导线的直径和分裂数, 改变分裂导线的间距。介绍了国外交直流输电线路可听噪声的限值及目前开展的特高压交直流输电线路可听噪声的限值情况, 交流输电线路按照 55 dB(A) 进行限制, 直流输电线路在平原地区按照 45 dB(A) 进行限制, 在高海拔地区按照 45~50 dB(A) 进行限制。

**关键词:** 特高压; 输电线路; 可听噪声; 电晕; 环境保护

中图分类号: TM401

文献标志码: B

文章编号: 1001-1609(2009)03-0109-04

## Research Review on Audible Noise Control of Transmission Line

TAN Wen<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-wu<sup>2</sup>

(1. College of Electrical and Electronics Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. State Grid Electric Power Research Institute, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The importance and recent achievements in audible noise control of transmission line are reviewed, and gas corona discharge is referred to the source of audible noise of AC or DC high voltage transmission line. The factors resulting in audible noise of AC or DC high voltage transmission line are analyzed, including the structure, design and construction of the transmission line, as well as the atmosphere and environment. The measures to reduce audible noise of transmission line are summed up, and such engineering solutions to reduce the audible noise as increasing the diameter of bundled conductors, increasing the bundle numbers and changing the interval between bundled conductors are considered applicable. The limits of audible noises of AC and DC transmission lines abroad are introduced. The audible noise limits for Chinese UHVAC and UHVDC projects are listed, e.g. 55 dB(A) for UHVAC transmission line, 45 dB(A) for UHVDC transmission line in plain, and 45 dB(A) to 50 dB(A) for UHVDC transmission line in high-altitude areas.

**Key words:** ultra high voltage; transmission line; audible noise; corona; environment protection

## 0 引言

特高压交直流输电线路的电晕将会造成电晕离子电流、电晕损耗、无线电干扰和可听噪声等多方面的后果, 和输电线路电磁环境直接相关。而电压等级发展到特高压阶段, 电磁环境问题已成为特高压交直流输电线路设计、建设和运行中必须考虑的重大技术问题。

输电线路电晕放电产生的可听噪声, 与有同一声压级的一般环境噪声相比, 通常更令人厌烦。根据国外超高压和特高压线路的研究经验, 导线电晕

引起的可听噪声必须限制在一定的水平才不会引起沿线居民的投诉和抱怨, 对于特高压线路, 可听噪声将是选择导线结构、影响费用以及确定输送电压的主要因素。

国外对输电线路可听噪声的研究始于 20 世纪 60 年代, 和对特高压输电的研究几乎同步进行, 研究涉及输电线路噪声的产生机理、声学特征、测试方法和降噪措施等。美国、日本、意大利等国都在各自的特高压试验基地进行了长期的实测数据, 并提出了预测特高压输电线路对称分裂导线可听噪声的公式; 美国和意大利对非对称分裂导线的可听噪声也进行了实测, 但未得到有效的预测公式<sup>[1-6]</sup>。各国对

收稿日期: 2008-11-12; 修回日期: 2009-02-13

基金项目: 国家电网公司重点科技项目: 输变电工程可听噪声测试与分析(13028)。

作者简介: 谭 闻(1988), 女, 大学本科生, 研究方向为电气工程及其自动化。

输电线路噪声的研究也逐步从试验研究转向构筑理论分析的数学模型,如建立输电线路声源数学模型,对运行线路的噪声预估,同时出现了一批模拟计算软件,如 SoundPLAN、sysnoise 等进行输电线路噪声场的分析计算<sup>[7-10]</sup>。各国对交直流特高压输电线路的可听噪声也制定了相应的限值,但是还没有统一的标准。

我国对输电线路噪声的研究始于 20 世纪 90 年代,主要研究单位包括中国电力科学研究院、武汉高压研究院、中南电力设计院等科研机构和电网运行单位。国内对输电线路噪声的研究集中在对运行线路可听噪声的现场测量和降噪措施上,近年来,随着特高压交直流输电工程的开展,国内对可听噪声进行了更加深入、细致的研究工作,电科院、武高院、清华大学等科研机构对很多线路进行了可听噪声的预估计算和实测,并利用电晕笼对不同直径、分裂方式、表面状态和大气环境下的导线进行了包括可听噪声在内的试验,为特高压交直流线路导线的选择提供了重要参考数据<sup>[11-16]</sup>。我国对输电线路的可听噪声也未制定相关标准,在 500 kV 线路设计时由于采用 4 分裂导线,可听噪声水平很低,不加以控制;在 750 kV 输电线路设计中,对可听噪声提出了按照 58 dB(A)作为设计限值<sup>[11]</sup>。

## 1 交直流输电线路可听噪声问题的提出

输电线路因电晕产生的可听噪声是 500 kV 以上电压等级才出现的问题。可听噪声是导线周围空气电离放电时所产生的、人耳能够直接听得见的噪声,是一种声频干扰。交流输电线路可听噪声有两个特征分量:一部分是由正极性流注放电产生的宽频带噪声(破裂声、吱吱声或嘶嘶声),这是交流噪声的主要成分;另一部分是由于电压周期变化,使导线带电离子往返运动产生的纯音(哼声和嗡嗡声),频率是 50 Hz 的倍频。直流输电线路电晕产生的噪声主要来源于正极性流注放电,噪声中明显烦恼的分量是脉冲性的,随机发生的流注放电发出的不连续的“噼啪”声,以较高声压的声波形式传播,噪声中不含有纯音。

过去由于电压等级不高,输电线路引起的可听噪声通常很小,没有引起人们的注意。目前国内已经有多条交流 500 kV 及直流±500 kV 输电线路投入运行;交流 750 kV 同塔双回输电线路已在西北电网运行;特高压交直流输电线路也在建设之中,输电线路的可听噪声问题显得越来越突出。对于 1 000 kV 及以上的特高压线路,可听噪声将成为很突出的矛盾,使得线路附近的居民以及在邻近线路工作的人们感觉到烦躁不安,严重时可以使人们难以忍受。所以可听噪声问题如果处理不好,可能会影响输电线路附近人员的正常生活和工作<sup>[14]</sup>。

## 2 交直流输电线路可听噪声的影响因素

交直流输电线路电晕产生的可听噪声受多方面因素的影响。大致可分为两大类:第 1 类因素是线路结构、设计和施工方面的影响;第 2 类因素是大气及环境等外部因素的影响。

第 1 类因素的影响主要表现为不同线路导线排列方式、导线直径、导线扭绞、相间距离、导线对地高度以及单/双回路、分裂形式等,这些参数的影响相对于交直流基准线路来讲,在 3~5 dB。导线表面的不光滑或划伤,会使电场分布集中而出现电位梯度大的部位,形成放电源,这种现象常常与施工过程有关,所以新运行的线路其噪声电平常会高于该线路长期运行后的稳定值<sup>[2-5]</sup>。但大体来说,第 1 类因素的影响可以通过设计进行控制,并且当线路建成或运行一段时间以后,可听噪声基本上可以保持稳定。

但第 2 类因素的影响则不然,人们无法控制天气与环境条件,影响到可听噪声的变化范围也较大,主要包括大地导电率、气压、相对湿度、紫外线辐射强度、风速、雨、雪、雾等天气的影响等方面。

大量的实例数据表明,超高压和特高压交流输电线路出现电晕噪声主要发生在潮湿的雨雪天气,由于下雨的概率比雾和雪大,尤其是毛毛雨或小雨、中雨时,水滴在导线上碰撞或聚集,会产生大量沿导线随机分布的电晕放电,每次放电都发生爆裂声。大雨时产生的电晕噪声最大,但由于大雨时的背景噪音也很大,使得大雨时可容许的电晕噪声比雨后和雾天可容许的电晕噪声大得多,一般以雨后湿导线或雨天电晕噪音统计分布中 50%的噪音水平作为衡量的基础,而且一般以线路走廊边缘电晕噪音的大小作为控制的标准。由于雨天电晕噪音的产生过程十分复杂,随机因素多,分散性大,故很难从理论上精确预测电晕噪音的公式,各国对可听噪声的预测都是通过电晕笼内模拟或在试验线段上长期实测数据的统计、分析而演绎得出的<sup>[2]</sup>。

直流输电线路在雨天时,导线的起晕场强比晴天的时候低,导线周围的离子比晴天的时候多;下雨初期,导线表面离子浓度不大时,电晕放电比晴天时的稍强;下雨延续一段时间后,导线起晕场强进一步降低,导线表面离子增加,使得导线不规则的面都被较浓的电荷所包围,减小了电晕放电强度,使得可听噪声较晴天反而有所减小。空中飘落物附在导线上会使局部表面场强增大,可听噪声增加,这些飘落物会随季节变化,夏季较多。因此,在确定直流输电可听噪声的限值时,应重点考虑夏季晴天的情况<sup>[12,13]</sup>。

国内外目前也有多条交直流输电线路运行在海拔地区,国内正在建设的特高压交直流输电线路也要经过甘肃、青海、云南、西藏等海拔在 2 000~5 000 m 的地区。由于海拔高度的升高,导线表面的

电子更容易获得比低海拔地区更高的碰撞动能,易于游离,此外高海拔地区紫外线辐射强度较强,导线的起晕场强较低,造成了可听噪声的升高<sup>[11-14]</sup>。国内外的测试及试验研究结果表明:对于交流输电线路用于工程上的可听噪声海拔修正量,以海拔1 000 m为基准,每增加1 000 m线路可听噪声增加1.5~2 dB<sup>[15]</sup>;对于直流输电线路用于工程上的可听噪声海拔修正量,以海拔1 000 m为基准,每增加1 000 m,线路可听噪声增加约2 dB<sup>[12,13]</sup>。

很多研究结果表明,导线表面不同状况对可听噪声有明显的影 响,特高压试验基地还对交流导线表面涂油脂、用洗涤剂清洗、用喷砂处理、绕包白布带4种状况进行了电晕特性的试验,得出了4种状况对可听噪声的影响规律<sup>[1]</sup>。清华大学对导线表面存在污秽时,直流导线的电晕特性进行了试验研究,发现涂污导线的可听噪声的变化存在明显的极性效应,导线涂污之后对可听噪声的影响很大,且正负极性电晕噪声的变化不同,正极性导线产生的可听噪声明显大于负极性导线<sup>[16]</sup>。

笔者认为考虑输电线路可听噪声的影响因素时,应着重考虑地域、天气等外界环境条件的影 响。目前每种环境因素对于可听噪声的影响仅有定性的结论,而没有准确、定量的计算方法。同一条输电线路通过的地区环境条件是复杂多变的,可听噪声的影响因素往往不止一个(如在高海拔地区,就同时受到气压、温度、湿度、降雨等多种因素的影响),试验线段和电晕笼在试验过程前后也同样会出现环境条件变化的情况,这些因素导致了可听噪声的研究结果特别是试验结果一般只适用于特定的线路和环境状况,不能进行推广,有一定的局限性。因此,笔者认为:在理论上深入研究各种环境条件对于输电线路可听噪声的影响规律,得出有价值的定量的计算方法;在试验条件允许的情况下,利用电晕笼进行各种单环境因素(如气压、湿度、温度、降雨等)对导线可听噪声的影响规律进行试验研究,可以有利于研究者更清晰地认识外界环境对于输电线路可听噪声的影响规律,指导输电线路的建设。

导线表面状况对可听噪声影响的结论可以指导电力运行部门如何对实际运行的导线进行维护,降低可听噪声,也有较大的实际意义。

### 3 降低可听噪声的措施

国内外的研究结果表明,采用以下方法可以降低输电线路可听噪声,交直流的措施基本相同。

(1)对于交直流输电线路,采用对称分布的子导线时,适当增加分裂数,增大导线截面、控制分裂导线间距,以减小导线表面场强,降低可听噪声水平,这也是目前普遍采用的方法<sup>[17,18]</sup>。

文<sup>[17,18]</sup>的研究结果表明,可听噪声随导线直

径和分裂数的增加而减少。在离边相垂投影点15 m处检测情况来看,子导线分裂数目增加,可听噪声降低较快,分裂数从6增到8,噪声可降低4~5 dB(A);导线直径增加,可听噪声下降得非常明显,如8分裂导线,子导线直径从30 mm增大到40 mm,湿导线的可听噪声可下降6 dB(A)及以上,大雨的可听噪声也可下降6.5 dB(A)左右。而增加导线离地平均高度,对电晕可听噪声的影响较小,且所花费的代价太大,一般不推荐采用。文<sup>[19,20]</sup>的研究结果也说明通过增加分裂数和导线截面的方法可以有效降低直流输电线路可听噪声。

(2)采用子导线非对称分裂方式,可使每相子导线分配的电荷均匀,降低导线表面电场,从而减小可听噪声,但这种方法会对线路施工检修、辅助金具的材料工艺、导线防舞动以及杆塔应力设计等提出严格要求。

(3)采取附加子导体,即在对称分裂子导线束中再加1根子导线,以达到改善和减小各子导线表面电荷分布,从而达到减小表面电场强度的目的,其相应的可听噪声水平要比对称分裂方式降低约12 dB(A)<sup>[21]</sup>,但附加子导线会增加导线重量,引起局部过热,并容易造成舞动碰线。因杆塔重量会有所增加,需要特殊的子导线间隔棒,或者将附加子导线分为长10 m的一段分别装设在需要的地方以降低工程费用和施工难度。

(4)改变导线结构,采用外层梯形或Z形结构的导线,使导线表面光滑,减少电晕放电,以降低可听噪声<sup>[21]</sup>。

对于超高压和特高压线路,从经济上的考虑,通常导线表面电场强度在正常运行时,即为起始电晕强度的80%左右,这主要是由于常用的钢芯铝绞线是用圆铝线绞制而成,导线的表面较粗糙,粗糙系数一般为0.8左右。当采用外层梯形或Z形结构的导线时,其表面粗糙系数在0.95以上,使电晕临界电场强度提高,导线在正常运行时不易发生电晕,也就降低了可听噪声。

(5)在导线上涂抹既能不影响导线散热,又能有较高老化寿命的亲水涂料等,使导线在大雾、毛毛雨及雨停后附着在导线表面上的水滴吸收到线股之间而不易形成水滴,减小雨水滴沿导线随机分布的电晕源点,从而减小因此而产生的电晕放电,以达到降低可听噪声的效果。国外特高压试验基地曾进行了上述试验研究,取得了一定的效果,但是没有在实际线路中采用<sup>[1]</sup>。

综上所述,降低特高压输电线路可听噪声的措施很多,但笔者认为在工程中较为可行的措施为:增加分裂导线的直径和分裂数,改变分裂导线的间距。在个别地段可采用增加杆塔线间距离和增加导线离地高度来达到降低电晕可听噪声的目的,对一些高海

拔地区和城市周围对噪声限制较严格的地带可采用改变导线结构的形式,采用扩径导线或异型导线(外层为梯形或Z形型线)来降低可听噪声水平。对采用子导线非对称分布、采用附加子导线和导线表面涂沫亲水性涂料等措施会造成设计、施工和运行的不便,如何进行合理的工程应用,仍需进一步研究。

#### 4 输电线路可听噪声限值

##### 4.1 交流输电线路可听噪声限值

目前为止,各国并未正式制订交流特高压输电线路可听噪声的限制标准,只是根据国情,在各自交流特高压线路设计规范中提出了限制值,一般在50~60 dB(A)。可听噪声控制的目的是使其不影响人们的正常工作和生活,过分强调减小噪声将导致线路建设成本的增加。美国在研究特高压输电时,对敏感区和非敏感区采取了不同的限值,日本在输电线路工程设计中也根据线路经过的不同地方采用不同的导线,将可听噪声控制在不同值。

我国特高压输电线路的建设,邻近居民住房执行GB 3096-1993《城市区域环境噪声标准》的要求,参考国外特高压交流输电线路可听噪声限值研究结果,我国1000 kV级特高压交流输电线路距边相投影外20 m处可听噪声 $L_{50}$ 的设计限制确定为55 dB(A),若按全天候来考虑,超过 $L_{50}$ 的可听噪声时间就很小了,在好天气时,也只有约40 dB(A)左右,可以符合以居住、文教机关为主的区域的噪声标准<sup>[11]</sup>。

##### 4.2 直流输电线路可听噪声限值

控制直流输电线路噪声主要应考虑不使线下的人产生烦恼和不影响附近居民休息。由于直流输电线路在晴天产生持续的可听噪声,在一般地区,应将其控制在基本无投诉的水平,即52.5 dB(A)以下。

在国际上,直流输电线路的可听噪声限值一般取40~45 dB(A)。目前,我国±800 kV特高压直流输电线路可听噪声按照国家1类区夜间标准(45 dB(A))执行;在海拔高度大于1000 m且线路经过非居民区时,可听噪声按照2类夜间标准(50 dB(A))执行,临近民房仍按照1类夜间标准(45 dB(A))执行<sup>[12,13]</sup>。

#### 5 输电线路可听噪声控制研究的发展趋势

对于输电线路可听噪声控制而言,应不断研究和完善线路噪声的产生和传播理论、影响因素、预测模型和测试方法;利用特高压试验线路和电晕笼研究降低可听噪声的有效方法,并将它们用于工程实际。

#### 参考文献:

[1] Electric Power Research Institute. Transmission Line Reference Book 345 kV and Above, 2nd Edition[M]. Palo Alto, California: Electric Power Research Institute, 1987.  
[2] TAYLOR E R, CHARTIER V L, RICE D N. Audible Noise

and Visual Corona from HV and EHV Transmission Lines and Substation Conductors Laboratory Tests[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1969, 88 (5):666-679.

- [3] COMBER M G, NIGBOR R J. Audible Noise Performance of Regular and Asymmetric Bundles and Effect of Conductor Aging on Project UHV's Three-phase Test Line [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1979, 98(2): 561-572.
- [4] VINH T, SHIH C H, KING J V, et al. Audible Noise and Corona Loss Performance of 9-conductor Bundle for UHV Transmission Lines[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1985, 104(10): 2764-2770.
- [5] LUNDQUIST J. 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.
- [6] LEKGANYANE M J, IJUMBA N M, BRITTEN A C. Corona Audible Noise Measurements in a Small Indoor Corona Cage under HVDC Voltages [C]// 2006 International Conference on Power System Technology, New York, USA, 2006: 1-5.
- [7] TRINH N G, MARUVADA P S. A Method of Predicting the Corona Performance of Conductor Bundles Based on Cage Test Results [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1977, 96(1): 312-325.
- [8] KIRLCHAM H, GAJDA W J. A Mathematical Model of Transmission Line Audible Noise [J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1983, 102(3): 718-728.
- [9] LIU Yi-lu, ZAFFANELLA L E. Calculation of Electric Field and Audible Noise from Transmission Lines with Non-parallel Conductors [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1492-1497.
- [10] YANG K H, LEE D I, HWANG G H, et al. New Formulas for Predicting Audible Noise from Overhead HVAC Lines Using Evolutionary Computations [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2000, 15(4): 1243-1251.
- [11] 刘振亚. 特高压交流输电技术研究成果专辑 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [12] 刘振亚. 特高压直流输电技术研究成果专辑 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [13] 中国南方电网公司. ±800 kV 直流输电技术研究 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [14] 胡白雪. 超高压及特高压输电线路的电磁环境研究[D]. 杭州: 浙江大学电气工程学院, 2006.
- [15] 邬雄, 万保权, 张广州, 等. 750 kV 输变电工程电磁环境的研究[R]. 武汉: 国家电力公司武汉高压研究所, 2002.
- [16] 赵宇明, 麻敏华, 关志成, 等. 导线污秽对高压直流输电线路电晕特性的影响[J]. 高电压技术, 2007, 33(12): 49-54.
- [17] 曾庆禹. 特高压输电线路电气和电晕特性研究[J]. 电网技术, 2007, 31(19): 1-8.
- [18] TANABE K, TAKEBE T, ISOZAKI M. Reduction of Audible Noise Using Asymmetrical Bundles for 1000 kV Transmission Lines: Full-scale Test Results of Akagi Test Line [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1996, 11(3): 1482-1491.
- [19] 吴桂芳. 我国±500 kV 直流输电工程的电磁环境问题[J]. 电网技术, 2005, 29(11): 5-8.
- [20] 张文亮, 陆家榆, 鞠勇. ±800 kV 直流输电线路的导线选型研究[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(27): 1-6.
- [21] 叶鸿声, 袁志磊, 赵连岐. 降低特高压输电线路电晕可听噪声的措施[J]. 电力建设, 2007, 28(8): 1-5.