

高压输电线路电气和电晕特性研究

曾仁远

佛山电力设计院有限公司 广东 佛山 528200

摘要：本文聚焦高压输电线路电气和电晕特性。先阐述电气特性基础理论，包括电气参数构成、不同电压等级差异及环境因素影响，并介绍分析方法与仿真建模。接着剖析电晕特性，涵盖电晕放电物理机制与效应表现形式。最后探讨电气与电晕特性的协同优化，涉及导线结构、绝缘配合及经济性分析，为高压输电线路优化提供理论支撑与实践参考。

关键词：高压输电线路；电气特性；电晕特性

引言：高压输电线路作为电力传输的关键环节，其电气和电晕特性直接影响电力系统的稳定性与可靠性。电气特性决定了线路的输电能力与效率，而电晕特性不仅造成能量损耗，还会产生无线电干扰等不良影响。深入研究二者特性，探索协同优化策略，对降低输电成本、减少对环境及通信系统的干扰、提升电力传输质量意义重大，是当前电力领域的重要课题。

1 高压输电线路电气特性基础理论

1.1 输电线路电气参数构成

高压输电线路的电气参数是描述其电气性能的基础，主要包括电阻、电感、电容和对地电导。电阻反映了电流通过导线时因导体材料本身的电阻特性而产生的能量损耗，其大小与导线的材料、截面积和长度有关。在长距离输电中，电阻损耗是影响输电效率的重要因素之一。电感是导线中电流变化时产生自感电动势的特性参数，它与导线的几何形状、排列方式以及周围介质的磁导率相关。电感的存在使得电流的变化不能瞬间完成，在交流输电系统中会引起电压和电流的相位差，影响功率因数和输电能力^[1]。电容则体现了导线之间以及导线与大地之间存在电场分布而具有的储能特性。当导线施加交流电压时，导线之间和导线对地之间会形成电容电流，电容的大小取决于导线的间距、高度和导线的半径等因素。对地电导主要考虑了导线表面绝缘子的泄漏电流以及空气中的电晕放电等因素引起的微小电流，虽然其数值相对较小，但在一些特殊情况下也会对线路的电气性能产生一定影响。这些电气参数相互关联，共同决定了高压输电线路在正常运行和故障状态下的电气特性。

1.2 不同电压等级电气特性差异

不同电压等级的高压输电线路在电气特性上存在显著差异。从输电能力方面来看，电压等级越高，线路的输送功率越大。这是因为输送功率与电压的平方成正比，

提高电压可以显著增加输电容量，满足大规模电力传输的需求。例如，220kV线路与500kV线路相比，在相同的导线截面和输送距离下，500kV线路的输送功率要大得多。在电气参数方面，随着电压等级的升高，导线的几何尺寸和间距通常会增大。这使得线路的电感和电容参数发生变化，进而影响线路的波阻抗和传播速度等特性。高电压等级线路的波阻抗相对较低，有利于提高电力系统的稳定性。同时，高电压下电晕放电现象更为明显，电晕损耗也会增加。不同电压等级线路的绝缘水平要求不同，高电压等级需要更可靠的绝缘设计来保证线路的安全运行，这也会导致线路的结构和成本有所不同。

1.3 环境因素对电气特性的影响

环境因素对高压输电线路的电气特性有着多方面的影响。温度是影响导线电阻的重要因素之一，根据电阻温度系数，导线的电阻会随着温度的升高而增大。在高温环境下，导线的电阻损耗增加，导致线路的输电效率降低。同时，温度变化还会引起导线的热胀冷缩，改变导线的弧垂和张力，影响线路的机械安全。湿度对电晕放电和绝缘性能有显著影响。在高湿度环境中，空气中的水分会形成水膜，降低导线表面的电阻，增加电晕放电的可能性，导致电晕损耗增大。此外，湿度还会影响绝缘子的绝缘性能，潮湿的绝缘子表面容易发生闪络现象，威胁线路的安全运行。风速对线路的影响主要体现在导线的振动和舞动上。强风会引起导线的振动，长期振动可能导致导线疲劳损伤，影响导线的使用寿命。而导线的舞动则可能引发导线间距减小，导致相间短路等故障。冰雪天气会在导线上积聚冰雪，增加导线的重量，导致导线弧垂增大，甚至可能使导线断裂，造成线路故障。

2 高压输电线路电气特性分析方法与仿真建模

2.1 电气参数计算方法

计算高压输电线路的电气参数有多种方法。对于电阻的计算,通常根据导线的材料电阻率和几何尺寸,利用电阻定律进行计算。在实际工程中,还需要考虑导线的集肤效应,即交流电流在导线中分布不均匀,靠近导线表面的电流密度较大,这会导致导线的有效电阻增大。集肤效应的影响可以通过引入集肤效应系数来进行修正。电感的计算可以采用安培环路定律和磁通量法,对于单根导线,其自感可以通过计算导线周围的磁通量得到;对于多根导线组成的线路,还需要考虑导线之间的互感^[2]。电容的计算则基于高斯定律,通过计算导线之间和导线对地之间的电场分布来确定电容值。在实际计算中,为了简化计算过程,常常采用一些近似公式和经验数据。例如,对于分裂导线,可以通过等效半径的方法将其简化为单根导线进行电容计算。随着计算机技术的发展,数值计算方法如有限元法、矩量法等也被广泛应用于电气参数的精确计算中。

2.2 电气特性仿真模型构建

构建高压输电线路的电气特性仿真模型是分析线路性能的重要手段。常用的仿真软件有PSCAD、MATLAB/Simulink等。在构建仿真模型时,首先需要根据线路的实际情况确定模型的参数,包括导线的电气参数、线路的长度、拓扑结构等。对于简单的均匀传输线,可以采用分布参数模型,将线路看作是由无数个微元段组成,每个微元段具有电阻、电感、电容和对地电导,通过求解传输线方程来分析线路的电气特性。对于复杂的输电线路,如含有非线性元件(如避雷器)或存在不均匀分布参数的情况,需要采用更精确的模型。在仿真模型中,还需要考虑电源的特性、负荷的模型以及故障情况下的模型。例如,在分析线路的短路故障时,需要建立故障点的等效模型,模拟故障时的电流和电压变化。通过仿真模型,可以模拟不同工况下线路的电气特性,如稳态运行时的功率传输、电压分布,暂态过程中的过电压和过电流等,为线路的设计、运行和维护提供理论依据。

3 高压输电线路电晕特性基础理论

3.1 电晕放电的物理机制

电晕放电作为高压输电线路中极为常见的一种局部放电现象,其形成有着特定的物理过程。在高压输电线路正常运行时,导线表面会形成一定的电场分布。当导线表面的电场强度超出空气的击穿场强这一临界值时,空气这一原本良好的绝缘介质便开始发生改变。空气中的分子在强电场的作用下,获得足够的能量从而发生电离,原本呈中性的分子分解为电子和离子。在强电场的定向驱动下,电子会朝着正极方向飞速加速运动,而离

子则向负极方向移动。在电子运动途中,会与空气中的大量中性分子发生剧烈碰撞。这种碰撞使得中性分子也被激发而电离,进而产生出更多的电子和离子,就像雪崩一样,数量急剧增多,这一过程便被称为电子崩。随着电子崩持续发展,大量的电荷迅速聚集在导线表面附近的区域,逐渐形成了电晕层。电晕层中的电子和离子在电场力的持续作用下不断做加速运动,从而产生了电流。与此同时,电晕放电过程还伴随着多种物理现象,如发出可见光,我们能看到导线周围有光晕出现;还会产生热量,使周围空气温度升高;并且会发出声音,产生嘶嘶的声响^[3]。电晕放电可分为正电晕和负电晕两种类型。正电晕起始相对容易,起始电压较低,但放电强度相对较弱;负电晕起始难度较大,起始电压较高,不过一旦产生,放电强度则较强。电晕放电不仅会造成能量损耗,还会产生无线电干扰和可听噪声,对周边环境和通信系统带来诸多不利影响。

3.2 电晕效应的表现形式

电晕效应在高压输电线路运行中有着多种明显的表现形式,主要包括电晕损耗、无线电干扰和可听噪声等方面。电晕损耗是电晕放电过程中不可避免的能量损失。在电晕放电时,电子与空气分子频繁碰撞,使分子处于激发态,部分分子还会被电离。而当这些被激发和电离的带电粒子复合时,会以光和热的形式释放出能量,进而造成功率损耗。电晕损耗的大小并非固定不变,它与导线的电场强度紧密相关,电场强度越大,电晕损耗通常也越大。同时,导线表面状况也起着重要作用,表面粗糙、有污秽等都会增加电晕损耗。环境条件的影响也不容忽视,在恶劣天气如雨、雾、雪等情况下,空气湿度增大,电晕损耗会显著增加。无线电干扰是电晕放电产生的又一不良效应,电晕放电过程中产生的脉冲电流会激发电磁波,这些电磁波会向周围空间广泛辐射。无线电通信、广播等设备对电磁波较为敏感,电晕放电产生的电磁波会对其正常工作产生干扰,影响通信质量和广播效果。其干扰的频率范围较广,主要集中在对中短波通信影响较大的频段。可听噪声则是电晕放电时,带电粒子在电场中高速运动,与空气分子不断碰撞,使空气分子产生振动而发出的声音。可听噪声的频率一般在20Hz-20kHz之间,这个频率范围正好处于人耳能够感知的区间,会对周围居民的日常生活和工作造成困扰。此外,电晕放电还可能产生臭氧和氮氧化物等有害气体,对大气环境造成污染,危害生态平衡和人体健康。

4 高压输电线路电气与电晕特性的协同优化

4.1 导线结构优化设计

导线结构优化设计作为协同优化高压输电线路电气与电晕特性的关键举措,意义重大。分裂导线的应用能大幅降低导线表面电场强度,有效抑制电晕放电。将一根导线分裂成多根子导线并保持一定间距,其原理在于分散了电荷分布。合理选择分裂导线的参数至关重要,子导线数量、分裂间距和子导线半径等因素相互关联。增多子导线数量可在一定程度上优化电场,但会增加成本和施工难度;合适的分裂间距能平衡电场分布和机械强度;子导线半径则影响导电性能和电场强度。在满足输电容量要求下,优化这些参数可降低电晕损耗,减少无线电干扰。此外,新型导线材料和截面形状也发挥着重要作用。铝合金导线导电性能优于传统导线,能降低电阻损耗,提高输电效率。异形导线通过独特形状改变表面电场分布,避免电场集中,降低电晕起始电压。同时,优化导线排列方式,如水平排列、三角形排列等,可根据实际地理环境和电气需求,调整导线间电场,提升线路整体性能,保障电力稳定传输。

4.2 线路绝缘配合与电晕控制协同策略

线路绝缘配合与电晕控制的协同策略,是确保高压输电线路安全可靠运行的坚实基础。绝缘配合并非孤立考量,而是要综合线路的电压等级、运行环境以及过电压水平等多方面因素。不同电压等级对绝缘强度的要求差异显著,运行环境中的污秽、湿度等细微变化,都会对绝缘性能产生不可忽视的影响,而过电压水平更是直接决定了绝缘子需承受的最大电压冲击。基于此,科学合理地选择绝缘子的类型、数量和布置方式至关重要,这是保证线路在各种复杂工况下都能实现可靠绝缘的关键。同时,在绝缘配合过程中,必须时刻兼顾电晕控制要求。一旦绝缘设计不合理,就极易导致电场分布不均,进而加剧电晕放电现象,造成不必要的能量损耗和设备损害。例如,在挑选绝缘子时,应优先选择具备良好防污闪和耐电晕性能的产品。通过合理调整绝缘子串长和片数,既能满足绝缘要求,又能有效降低导线对地电场强度,减少电晕损耗。另外,采用均压环、屏蔽环等金具,能够进一步改善绝缘子周围的电场分布,提高绝缘子闪络电压,从多个维度有效控制电晕放电,为线

路的长期稳定运行提供有力保障。

4.3 基于特性优化的线路经济性分析

基于电气与电晕特性优化的线路经济性分析,是评估优化措施成效的核心环节。在进行经济性分析时,需全面综合线路的建设成本、运行成本和维护成本等因素。优化导线结构和绝缘配合等措施,虽会在初始建设阶段增加成本,如采用分裂导线需购置更多子导线,使用新型绝缘子材料成本也较高,但从长远运行来看,效益显著。以分裂导线和新型绝缘子为例,尽管材料和施工费用增加,但能有效减少电晕损耗,降低因电晕产生的能量浪费^[4]。同时,可减少故障发生率,避免因故障导致的停电损失,提高线路的可靠性和输电效率。通过建立科学合理的经济性分析模型,对不同优化方案进行细致的成本效益分析,对比各方案在不同时间段的成本投入和收益情况。综合考虑各项因素后,能够精准选择出最优方案,实现高压输电线路在电气性能、电晕特性和经济性方面的协同优化,为电力系统的可持续发展提供坚实有力的支持。

结束语

高压输电线路电气和电晕特性研究对于保障电力系统稳定运行、提升输电效益至关重要。通过对电气特性基础理论的剖析、分析方法的探索以及电晕特性形成机制与效应的研究,明确了二者相互影响的关系。协同优化策略从导线结构、绝缘配合等多方面入手,兼顾了电气性能提升与电晕控制。未来,持续深入研究将推动高压输电技术不断进步,实现更高效、可靠的电力传输。

参考文献

- [1]李端磊.高压输电线路电气和电晕特性研究[J].电力设备管理,2022(13):17-19.
- [2]董铁柱.特高压输电线路电气和电晕特性研究[J].百科论坛电子杂志,2020(12):1718.
- [3]王志超.高压输电线路电气设计中存在的问题及解决对策[J].自动化应用,2023,64(S2):89-91.
- [4]王琼.高压输电线路电气设计问题及完善对策探究[J].电力设备管理,2021(09):71-72+74.