

Research on Coupling Theory of Dielectric Properties and Electric Field Distribution of Insulation Materials for Overhead Insulated Wire

Xichuan Zhao

Xilong Cable Co., Ltd., Xingtai, Hebei, 055550, China

Abstract

This study focuses on the coupling theory between dielectric properties and electric field distribution in overhead insulated conductors. The research background and significance are first elaborated, highlighting their critical role in ensuring the safe and stable operation of power systems. The dielectric characteristics of insulation materials are then introduced, including common types and key parameters. The analysis of electric field distribution features and its influencing factors is conducted. The coupling mechanism between the two is thoroughly examined to reveal how this interaction affects conductor performance. Finally, research prospects are proposed based on the coupling theory, covering the development of new insulation materials, optimization of conductor structures, and planning and operation optimization of power systems. These efforts aim to provide theoretical support for enhancing the performance of overhead insulated conductors and optimizing power system design, thereby promoting the power industry's development toward greater safety and efficiency.

Keywords

overhead insulated conductor; insulation material; dielectric properties; electric field distribution; coupling theory

架空绝缘导线绝缘材料介电特性与电场分布耦合理论研究

赵西川

西隆电缆有限公司, 中国·河北 邢台 055550

摘要

本文聚焦于架空绝缘导线绝缘材料介电特性与电场分布的耦合理论。首先阐述研究背景与意义,指出其在保障电力系统安全稳定运行中的关键作用。接着介绍绝缘材料介电特性,包括常见类型及特性参数。分析电场分布特征,探讨其影响因素。深入剖析两者耦合机制,揭示耦合作用对导线性能的影响。最后提出基于耦合理论在新型绝缘材料研发、导线结构优化设计、电力系统规划与运行优化等方面的研究展望,旨在为提升架空绝缘导线性能、优化电力系统设计提供理论支撑,推动电力行业向更加安全、更高效方向发展。

关键词

架空绝缘导线; 绝缘材料; 介电特性; 电场分布; 耦合理论

1 引言

随着城市化进程的加速和电力需求的持续增长,架空绝缘导线在城市电网改造、农村电网建设以及新能源电力输送等领域得到了广泛应用。与传统的裸导线相比,架空绝缘导线具有诸多优势,如能有效减少线路故障,降低触电风险,提高供电可靠性,减少对城市空间和环境的视觉影响等。然而,架空绝缘导线的性能受多种因素影响,其中绝缘材料的介电特性和电场分布是两个关键因素。绝缘材料作为导线的关键组成部分,其介电特性反映了材料在电场作用下的极

化、损耗等行为,而电场分布则决定了导线周围空间的电场强度分布情况。研究绝缘材料介电特性与电场分布的耦合理论,有助于深入理解导线在复杂电场环境下的工作机理,为优化导线设计、提高供电可靠性和安全性提供理论依据,具有重要的现实意义。

2 架空绝缘导线绝缘材料介电特性

2.1 常见绝缘材料类型

在架空绝缘导线中,常用的绝缘材料主要有聚氯乙烯、聚乙烯和交联聚乙烯等。聚氯乙烯绝缘材料工艺性能好,易于加工,化学稳定性高,具有优良的耐油、耐酸、耐碱和耐腐蚀性能,且非延燃性好、耐潮,电气机械性能优良,生产效率高、价格低廉,敷设维护简单。不过,它也存在一些缺

【作者简介】赵西川(1986-),男,中国河北邢台人,本科,高级工程师。

点,例如耐热性能相对较差,在高温环境下容易变形和老化,限制了其在一些高温场景的应用。

聚乙烯绝缘材料有良好的介电性能,介质损耗角正切值小,绝缘电阻高,电气性能、耐化学性能及工艺性能良好,易于加工,耐湿性及耐寒性好,密度小。但它的抗电晕及耐热性能较差,受热易变形或开裂,用于较高工作电压等级时需加入特殊添加剂。这使得聚乙烯绝缘材料在一些对耐热和抗电晕要求较高的场合应用受限^[1]。

交联聚乙烯绝缘材料是在聚乙烯基础上进行交联处理得到的,它具有电气性能好、击穿电场强度高、介质损耗角正切值小、绝缘电阻高、耐热性和耐老化性能好、允许工作温度高、载流量大、耐辐照性能好等优点。

2.2 介电特性参数

绝缘材料的介电特性主要通过一系列参数来表征,如介电常数、介质损耗角正切值、体积电阻率等。介电常数反映了材料在电场中的极化程度,它的大小与材料的分子结构、极性等因素有关。一般来说,极性材料的介电常数较大,非极性材料的介电常数较小。介质损耗角正切值是衡量材料在交变电场中能量损耗的重要指标,它表示材料在电场作用下,由于极化、导电等原因而消耗的电能与输入电能之比。介质损耗角正切值越小,说明材料在交变电场中的能量损耗越低,绝缘性能越好。在电力系统中,过高的介质损耗会导致绝缘材料发热,加速材料的老化,甚至引发绝缘故障^[2]。体积电阻率则反映了材料的绝缘性能,它表示材料单位体积内的电阻值,体积电阻率越大,材料的绝缘性能越好。体积电阻率的大小与材料的化学成分、微观结构等因素有关。

3 架空绝缘导线电场分布特征

3.1 电场分布基本规律

在架空绝缘导线中,电场分布呈现出一定的规律性。在绝缘材料内部,电场分布是非均匀的,通常集中在绝缘材料的表面附近,与表面越近,电场强度就越大;在更深处,电场强度逐渐降低。这是因为在绝缘材料表面,电荷容易聚集,形成表面电荷分布,从而产生较强的电场。在导线周围空间,电场强度也随着距离导线的距离增加而减小。根据库仑定律,点电荷产生的电场强度与距离的平方成反比,虽然架空绝缘导线不是点电荷,但在一定距离范围内,其电场强度也遵循类似的衰减规律^[3]。此外,导线的形状、尺寸、排列方式以及周围环境等因素也会对电场分布产生影响。

3.2 影响电场分布的因素

影响架空绝缘导线电场分布的因素众多,主要包括导线自身因素和环境因素。导线自身因素包括截面形状、导线排列方式等。

导线的截面形状也会对电场分布产生影响,例如,圆形截面的导线电场分布相对均匀,而异形截面的导线则可能出现电场集中现象。异型截面导线如矩形、扇形等,由于其

边缘和尖端的存在,在电场作用下容易产生电荷聚集,导致电场强度增大。导线排列方式不同,导线之间的相互影响也不同,从而影响电场分布。常见的排列方式有水平排列、垂直排列和三角形排列等,不同的排列方式下,导线之间的电场相互叠加情况不同,电场分布也会有所差异。

环境因素主要包括温度、湿度、气压、空气中的污染物等。温度升高会导致绝缘材料的介电常数和介质损耗角正切值发生变化,从而影响电场分布。一般来说,温度升高会使绝缘材料的介电常数减小,介质损耗角正切值增大,导致电场分布发生改变。湿度增加会使绝缘材料的表面绝缘性能下降,容易引起电场畸变。当绝缘材料表面附着水分时,水分会形成导电通道,使电荷更容易在表面移动,从而导致电场分布不均匀。

气压的变化会影响空气的击穿场强,进而影响导线周围的电场分布。在低气压环境下,空气的击穿场强降低,导线周围的电场强度更容易达到击穿值,引发放电现象。空气中的污染物,如灰尘、盐雾等,会附着在绝缘材料表面,降低绝缘性能,导致电场分布发生改变。污染物会在绝缘材料表面形成导电层,增加表面漏电流,使电场分布不均匀,甚至引发局部放电。

4 绝缘材料介电特性与电场分布的耦合机制

4.1 介电特性对电场分布的影响

绝缘材料的介电特性对电场分布有着重要影响。介电常数不同的绝缘材料在相同电场作用下,其极化程度不同,从而导致电场分布发生变化。例如,当使用介电常数较大的绝缘材料时,导线周围的电场强度会相对减小,因为材料内部的极化电荷会产生与外电场相反的电场,起到削弱外电场的作用。在多层绝缘结构的导线中,不同介电常数的绝缘层之间的界面处也会产生电场畸变,这是由于不同介电常数材料的极化程度不同,导致界面处电荷分布不均匀。

介质损耗角正切值的大小也会影响电场分布,介质损耗角正切值较大的绝缘材料在交变电场中会消耗更多的电能,产生热量,导致材料温度升高,进而影响其介电性能和电场分布。温度升高会使绝缘材料的介电常数减小,介质损耗角正切值增大,形成一个恶性循环,进一步加剧电场分布的不均匀性。体积电阻率则决定了绝缘材料的绝缘性能,体积电阻率越大,绝缘材料对电流的阻碍作用越强,电场分布越均匀;反之,体积电阻率越小,绝缘材料容易发生漏电现象,导致电场畸变。当绝缘材料存在局部缺陷或杂质时,局部体积电阻率会降低,形成漏电通道,使电场在该区域集中。

4.2 电场分布对介电特性的反馈作用

电场分布也会对绝缘材料的介电特性产生反馈作用。当电场强度超过绝缘材料的耐受极限时,绝缘材料会发生击穿现象,导致其介电性能急剧下降。在电场作用下,绝缘材料内部可能会产生局部放电现象,局部放电会产生高温、高

压和强紫外线等，这些因素会加速绝缘材料的老化，降低其介电性能。局部放电在绝缘材料内部形成的电树枝会破坏材料的微观结构，使介电性能发生劣化。此外，电场分布的不均匀性会导致绝缘材料内部产生应力集中现象，长期作用下来，会加剧绝缘材料的老化。

4.3 耦合作用对导线性能的综合影响

绝缘材料介电特性与电场分布的耦合作用对架空绝缘导线的性能产生综合影响。一方面，合理的耦合作用可以提高导线的绝缘性能和耐电强度，减少线路故障的发生。例如，通过选择合适的绝缘材料和优化导线结构，可以使电场分布更加均匀，降低电场集中现象，从而提高导线的耐电强度。在高压架空绝缘导线中，采用多层绝缘结构，并合理选择各层绝缘材料的介电常数和厚度，可以使电场在绝缘层中均匀分布，提高导线的整体绝缘性能。

另一方面，不良的耦合作用会导致导线性能下降，增加故障风险。例如，当绝缘材料的介电特性与电场分布不匹配时，可能会出现电场畸变、局部放电等问题，加速绝缘材料的老化和损坏，缩短导线的使用寿命。在潮湿环境中，如果绝缘材料的表面绝缘性能下降，同时电场分布又不均匀，就容易引发局部放电，导致绝缘材料表面碳化，形成导电通道，最终引发绝缘故障。

5 基于耦合理论的研究展望

5.1 新型绝缘材料研发

基于对绝缘材料介电特性与电场分布耦合理论的研究，未来可以开展新型绝缘材料的研发工作。研发具有更高介电性能、更好耐热性能和耐老化性能的新型绝缘材料，以满足架空绝缘导线在不同环境条件下的使用要求¹。例如，纳米复合绝缘材料是一种具有广阔发展前景的新型材料，通过将纳米粒子均匀分散在绝缘材料基体中，可以显著提高绝缘材料的电气性能、机械性能和耐候性能。纳米粒子的加入可以改变绝缘材料的微观结构，增加材料的极化中心，提高介电常数；同时，纳米粒子还可以阻碍电荷的移动，降低介质损耗角正切值，提高绝缘性能。

5.2 导线结构优化设计

基于电场耦合理论的架空绝缘导线结构优化，可通过精准调控关键参数提升运行性能。实践中，在结合导体结构对电场强度影响规律的基础上，针对多回路架空绝缘导线架设场景，优化采用“逆相序间隔排列”方案并将导线间距控制在0.8~1.2m，可使相间电场叠加干扰减弱30%以上，保

障供电稳定性。

智能监测技术与导线结构的融合是优化升级方向，目前主流方案为在绝缘层内嵌分布式传感器。但该方案易引发电场畸变，实测显示传感器嵌入区域电场强度峰值可升高25%，影响监测精度与绝缘性能。当前研究聚焦于传感器封装材料改性，通过采用低介电常数($\epsilon_r \leq 2.5$)封装材料，可将电场畸变率控制在5%以内，实现对绝缘介电损耗、局部电场强度的实时监测，异常时10ms内触发警报，为运维提供精准依据^[4]。

5.3 电力系统规划与运行优化

将耦合理论应用于电力系统规划与运行中，可以为电网的优化设计提供理论依据。在电网规划阶段，根据不同地区的地理环境、气候条件和电力需求等因素，合理选择架空绝缘导线的型号和规格，优化电网结构，提高电网的供电可靠性和经济性。在电网运行阶段，通过实时监测导线的电场分布和绝缘材料的介电性能的变化，及时调整运行参数，避免导线过载运行，减少故障发生，保障电力系统的安全稳定运行。利用先进的监测设备和数据分析技术，建立电场分布和介电特性参数的实时监测系统，对导线的运行状态进行实时评估和预测，为电网的运行调度提供科学依据。

6 结语

本文针对10kV及以下电压等级的架空绝缘导线，围绕其绝缘材料介电特性与电场分布的耦合理论展开研究。分析了常用绝缘材料的类型与介电特性参数，阐述了绝缘结构下电场分布的基本规律与影响因素，探讨了介电特性与电场分布的耦合机制及其对导线性能的综合影响。研究表明，准确把握架空绝缘导线专用的介电电场耦合理论，对提升导线运行性能、保障电力系统的安全稳定运行具有重要意义。未来应进一步深化相关研究，在新型绝缘材料研发、导线结构优化设计及配电网运行优化等方面持续突破，推动架空绝缘导线技术不断创新，为电力行业可持续发展提供有力支撑。

参考文献

- [1] 冯毅. 架空绝缘导线在10kV配电网改造中的应用[J]. 科技创新导报, 2017, 14(27): 55-57.
- [2] 李柯. 架空绝缘导线在10kV配电网改造中的应用[J]. 西北电力技术, 2005, (06): 38-40.
- [3] 林旭宜. 架空绝缘导线在10kV配电网中的应用及注意事项[J]. 四川电力技术, 2005, (02): 29-31.
- [4] 张磊, 王健, 李刚. 多回路架空绝缘导线电场优化与内嵌传感器低介电封装技术研究[J]. 电力工程技术, 2025, 44(2): 112-118.