

电力输电线路间隔棒多体非线性性能分析

刘 博

内蒙古送变电有限责任公司 内蒙古 呼和浩特 010020

摘 要: 文章聚焦电力输电线路间隔棒多体非线性性能分析。阐述了间隔棒的作用、工作原理与安装方式及其在输电线路中的重要性。介绍多体非线性性能分析的基础理论,包括多体系统动力学、非线性力学基本概念及分析方法。分析材料特性、结构设计参数、运行环境对间隔棒性能的影响,呈现了静态力学特性、非线性行为观察及关节橡胶垫作用的分析结果,为间隔棒研发和应用提供科学依据。

关键词: 电力输电线路; 间隔棒; 多体非线性

1 电力输电线路间隔棒概述

1.1 间隔棒的作用

电力输电线路间隔棒是高压输电线路关键部件,对保障线路安全稳定运行意义重大。高压输电线路多采用分裂导线形式,即把大导线分裂成若干小导线,各子导线需保持一定距离和相对位置。间隔棒首要作用是固定分裂导线,确保子导线间距符合设计要求,防止在风力、覆冰等自然因素及短路电流等电气因素作用下,子导线相互靠近甚至碰撞,避免导线因碰撞受损,降低断股、断线事故概率,保障线路机械完整性。间隔棒能有效抑制分裂导线的微风振动,微风振动是输电线路在微风作用下产生的高频、低幅振动现象,长期持续会使导线疲劳损伤,减少使用寿命。间隔棒通过改变导线振动模式,将振动能量分散到各子导线,降低单根导线振动幅度,减轻微风振动危害,提高线路运行可靠性。间隔棒还能改善导线电晕特性,减少电晕放电带来的能量损失和无线电干扰,对提高线路电能质量和环保性能意义重大。

1.2 工作原理与安装方式

间隔棒工作原理基于其独特结构和力学特性。它通常安装在分裂导线子导线之间,与子导线连接形成稳定力学系统。当导线受外力作用时,间隔棒能承受并传递外力,使子导线保持相对稳定位置。间隔棒内部一般设有阻尼装置或弹性元件,能在导线振动时吸收和消耗振动能量,起到减振作用^[1]。间隔棒安装方式多样,常见有垂直安装和水平安装。垂直安装时,间隔棒沿导线垂直方向布置,一般装在导线档距中间位置,用于固定子导线上下间距;水平安装则沿导线水平方向布置,主要控制子导线水平距离。安装时需专用工具将间隔棒准确固定在子导线上,确保连接牢固可靠。安装间距根据导线分裂形式、档距大小及运行环境等因素确定,通过计算和实际试验确定合理间距,以保证间隔棒充分发挥作用。

1.3 在输电线路中的重要性

间隔棒在输电线路中的重要性不言而喻。从机械安全角度看,它能有效防止导线因碰撞受损,保障线路机械强度和稳定性。在强风、暴雪等恶劣自然环境下,间隔棒可维持分裂导线正确间距,避免导线相互缠绕或碰撞导致线路故障,确保电力持续稳定输送。从电气性能方面考虑,间隔棒对改善导线电晕特性至关重要。电晕放电会产生能量损失,降低输电效率,还会产生无线电干扰和可听噪声,影响周边环境和居民生活。间隔棒通过合理固定子导线,减少导线表面电场集中,降低电晕放电发生概率,提高线路电气性能和环保水平。另外间隔棒能延长导线使用寿命。通过抑制微风振动等有害振动,减少导线因疲劳损伤产生的断股、断线等问题,降低线路维护成本和停电检修次数,提高电力供应可靠性和经济性。

2 多体非线性性能分析基础理论

2.1 多体系统动力学基础

多体系统动力学是研究由多个刚体或柔体通过运动副相互连接而成的系统在力作用下的运动规律和动力学特性的学科。在电力输电线路间隔棒的多体非线性性能分析中,将间隔棒及其连接的子导线视为一个多体系统。该系统中的各个子导线可以看作是柔体,因为它们在外力时会发生变形;而间隔棒则可视作具有一定刚度和阻尼特性的连接部件。多体系统动力学的基本方程通常基于牛顿-欧拉方法或拉格朗日方法建立。牛顿-欧拉方法通过分析每个刚体或柔体的受力情况和运动状态,建立运动微分方程;拉格朗日方法则以系统的动能和势能为基础,通过拉格朗日函数建立动力学方程。在建立多体系统动力学方程时,需要考虑各物体之间的约束关系、外力作用以及物体的惯性特性等因素。通过对这些方程的求解,可以得到系统在各种工况下的运动响应,

如位移、速度、加速度等,为分析间隔棒的多体非线性性能提供理论基础。

2.2 非线性力学基本概念

非线性力学是研究物体在非线性条件下力学行为的学科,在间隔棒的多体非线性性能分析中,存在多种非线性因素。例如,导线的材料非线性,导线在受力过程中,其应力-应变关系并非线性,随着应力的增加,导线的弹性模量会发生变化,表现出非线性的力学特性;几何非线性也是重要因素之一,当导线发生较大变形时,其几何形状的改变会导致力的传递和分布发生变化,进而影响系统的动力学响应;另外,接触非线性也不容忽视,间隔棒与子导线之间的接触面在受力过程中会发生相对滑动和变形,接触力与接触变形之间呈现出复杂的非线性关系^[2]。非线性力学问题的求解通常比线性问题更为复杂,需要采用特殊的数值方法和算法。在间隔棒的多体非线性性能分析中,有限元法可以用于模拟导线的变形、间隔棒的受力以及两者之间的相互作用,为深入理解间隔棒的非线性性能提供有力工具。

2.3 间隔棒多体非线性性能分析方法

间隔棒多体非线性性能分析方法主要包括理论分析、数值模拟和实验研究三个方面。理论分析基于多体系统动力学和非线性力学的基本理论,建立间隔棒多体系统的力学模型和动力学方程,通过解析或半解析的方法求解方程,得到系统的性能参数和响应规律。然而由于间隔棒多体系统的复杂性,理论分析往往难以得到精确的解,主要用于对系统性能进行初步的预测和分析。数值模拟是当前间隔棒多体非线性性能分析的主要手段之一,利用有限元软件、多体动力学软件等工具,建立间隔棒多体系统的数值模型,通过设置合理的边界条件、载荷和材料参数,进行数值计算和分析。数值模拟可以直观地展示间隔棒在各种工况下的应力分布、变形情况以及动力学响应,为间隔棒的设计和优化提供依据。实验研究则是通过搭建实际的实验平台,对间隔棒多体系统进行物理实验。在实验中,可以模拟不同的运行环境和工况,测量间隔棒的各项性能指标,如应力、应变、振动频率等,验证理论分析和数值模拟的结果。实验研究具有直观、可靠的特点,但成本较高、周期较长,通常作为理论分析和数值模拟的补充和验证手段。综合运用这三种方法,可以全面、深入地分析间隔棒的多体非线性性能,为间隔棒的研发和应用提供科学依据。

3 间隔棒多体非线性性能影响因素

3.1 材料特性对性能的影响

间隔棒的材料特性对其多体非线性性能有着重要影

响。间隔棒通常由金属、橡胶等材料制成,不同材料的力学性能差异较大。金属材料具有较高的强度和刚度,能够承受较大的外力作用,但在长期受力或复杂工况下,可能会发生疲劳损伤,导致性能下降。例如,间隔棒的金属框架在受到导线振动和风力等循环载荷作用时,可能会出现微裂纹,随着裂纹的扩展,框架的强度和刚度会逐渐降低,影响间隔棒对子导线的固定效果和减振性能。橡胶材料则主要用于间隔棒的阻尼部件,如关节橡胶垫。橡胶的弹性模量、阻尼系数等材料参数直接影响其减振效果。弹性模量决定了橡胶垫在受力时的变形能力,弹性模量过大,橡胶垫变形困难,减振效果不佳;弹性模量过小,则橡胶垫可能无法提供足够的支撑力,导致间隔棒稳定性下降。阻尼系数反映了橡胶垫消耗振动能量的能力,阻尼系数越大,橡胶垫吸收和消耗振动能量的能力越强,减振效果越好。橡胶材料的老化性能也会影响间隔棒的长期性能,老化后的橡胶垫可能会出现硬化、开裂等现象,降低其减振效果和使用寿命。

3.2 结构设计参数的作用

间隔棒的结构设计参数对其多体非线性性能起着关键作用。结构设计参数包括间隔棒的形状、尺寸、连接方式等。例如,间隔棒的框架结构形式会影响其对子导线的固定效果和整体刚度。不同的框架结构,如三角形框架、四边形框架等,在承受外力时的力学响应不同^[3]。三角形框架具有较好的稳定性,能够在较大外力作用下保持结构的完整性;而四边形框架在受力时可能会发生变形,影响对子导线的固定精度。间隔棒的尺寸也会影响其性能,尺寸过大,会增加间隔棒的重量和成本,同时可能会影响导线的电气性能;尺寸过小,则可能无法提供足够的支撑力和减振效果。连接方式的设计同样重要,合理的连接方式能够确保间隔棒与子导线之间的连接牢固可靠,减少连接部位的应力集中和磨损。

3.3 输电线路运行环境的影响

输电线路的运行环境对间隔棒的多体非线性性能有着显著影响。风力是影响间隔棒性能的重要因素之一。强风会使导线产生较大的振动和摆动,增加间隔棒所承受的动态载荷。在风力作用下,导线可能会发生舞动,舞动是一种大幅度的、低频的振动现象,对间隔棒的固定和减振功能提出了更高的要求。如果间隔棒的设计或性能不能满足舞动工况下的要求,可能会导致间隔棒损坏或子导线间距失控,引发线路故障。覆冰也是运行环境中不可忽视的因素,导线覆冰后,重量增加,且覆冰的不均匀性会导致导线受力不平衡,产生额外的扭转和振动。间隔棒需要在覆冰工况下保持对子导线的有效固

定,防止因覆冰引起的导线碰撞和损伤。覆冰还可能改变间隔棒周围的空气动力学特性,影响导线的振动模式和间隔棒的减振效果。温度变化也会对间隔棒的性能产生影响,温度升高或降低会导致导线热胀冷缩,改变子导线之间的间距,同时也会影响间隔棒材料的力学性能,如金属材料的弹性模量、橡胶材料的硬度等。在极端温度条件下,间隔棒可能会出现性能下降甚至损坏的情况,影响输电线路的安全运行。

4 间隔棒多体非线性性能分析结果

4.1 静态力学特性分析

通过对间隔棒多体系统进行静态力学分析,可以得到在不同工况下间隔棒的应力分布和变形情况。在正常工作状态下,间隔棒主要承受导线的重力、风力等静态载荷。分析结果表明,间隔棒的金属框架部分在承受导线重力时,应力分布相对均匀,但在连接部位和框架的薄弱环节可能会出现应力集中现象。如果应力集中超过材料的许用应力,可能会导致框架出现裂纹或变形,影响间隔棒的使用寿命和固定效果。在考虑风力作用时,静态力学分析显示,随着风力的增大,间隔棒所承受的横向力增加,导致框架发生横向变形。同时风力还会引起导线的摆动,使间隔棒与子导线之间的连接部位受到额外的拉力和剪力作用。合理的间隔棒结构设计能够分散这些应力,减少应力集中,提高间隔棒在静态载荷作用下的稳定性。

4.2 非线性行为观察

在间隔棒多体非线性性能分析中,非线性行为的观察是重要内容之一。通过数值模拟和实验研究,可以观察到间隔棒在动态载荷作用下的非线性力学响应。例如,在微风振动工况下,导线的振动频率和振幅会随着风速和导线参数的变化而发生非线性变化。间隔棒的阻尼部件(如关节橡胶垫)在振动过程中会发生非线性的变形,其阻尼系数也会随着振动频率和振幅的变化而改变。这种非线性阻尼特性使得间隔棒能够更好地适应不同频率和振幅的振动,有效地吸收和消耗振动能量。在短路电流等极端工况下,间隔棒会受到巨大的电磁力和热应力作用。电磁力会导致间隔棒发生瞬间变形,而热

应力则可能引起间隔棒材料的热膨胀或热损伤。这些非线性行为对间隔棒的性能和可靠性提出了严峻挑战。通过非线性行为观察,可以深入了解间隔棒在各种极端工况下的性能表现,为间隔棒的设计改进提供依据。

4.3 关节橡胶垫的作用

关节橡胶垫在间隔棒中起着至关重要的减振和缓冲作用。在静态力学特性分析中,关节橡胶垫能够承受部分导线的重力,并通过自身的弹性变形分散应力,减少金属框架所承受的载荷。在动态载荷作用下,关节橡胶垫的非线性阻尼特性使其成为有效的减振元件。当导线发生振动时,橡胶垫会发生变形,将振动能量转化为热能散发出去,从而降低导线的振动幅度^[4]。实验研究表明,不同材料和结构的关节橡胶垫对间隔棒的减振效果有显著影响。例如,采用高阻尼橡胶材料制成的橡胶垫,其减振效果明显优于普通橡胶垫。另外,橡胶垫的厚度、硬度等参数也会影响其减振性能。通过优化关节橡胶垫的设计,如调整橡胶垫的材料、形状和尺寸等,可以进一步提高间隔棒的减振效果,延长导线的使用寿命,保障输电线路的安全稳定运行。

结束语

电力输电线路间隔棒多体非线性性能分析对保障输电线路安全稳定运行意义重大。通过对其作用、原理、重要性的阐述,以及基础理论、影响因素和性能分析结果的探讨,深入了解了间隔棒的性能特点。未来,应进一步优化间隔棒的材料、结构和设计,充分考虑运行环境的影响,以提升其性能和可靠性,为电力供应的稳定性和经济性提供更有力的保障。

参考文献

- [1]孙强,蔡振华,蔡宁,等.输电线路用调距间隔棒的优化设计[J].机电信息,2018,No.570(36):162-163.
- [2]汪嵘嵘,樊绍胜.输电线路间隔棒安装机器人运动控制方法研究[J].电力学报,2024,39(04):309-322.
- [3]戴金,方伟,彭苗.输电线路间隔棒安装机器人平衡驱动系统设计[J].电子设计工程,2024,32(11):33-36+41.
- [4]李万棉.电力工程及其输电线路设计与施工的技术问题[J].广西电业,2023,(03):65-69.