

变电站软导线短路工况拉力研究

杨 硕

中国能源建设集团新疆电力设计院有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000

摘要: 本文围绕变电站软导线短路工况拉力展开研究,先分析短路工况的产生机制与电气力学特征,再解析软导线自身属性、短路工况参数、外部环境对拉力的影响,接着介绍理论分析、仿真模拟、试验测试三类研究方法,最后从选型、安装布置、防护加固提出拉力控制优化方向,为保障变电站软导线安全运行提供系统的技术参考。

关键词: 变电站; 短路工况; 软导线拉力; 影响因素; 优化措施

引言: 变电站软导线是电力传输的关键部件,短路工况下其承受的拉力易引发形变甚至断裂,威胁变电站安全。短路工况具有瞬时大电流、电磁力骤增特点,会显著改变软导线受力状态。因此,深入研究变电站软导线短路工况拉力,明确影响因素、完善研究方法、提出优化策略,对提升变电站运行可靠性意义重大,本文就此展开详细探讨。

1 变电站短路工况特性分析

1.1 短路工况的产生机制

变电站内短路故障的常见诱因包括设备绝缘损坏与接线故障等。设备长期运行后,绝缘层可能因老化、高温、湿度变化等因素逐渐失去绝缘性能,无法有效隔离不同电位的导体,导致导体间直接接触形成短路;接线故障多源于接线端子松动、连接部位氧化或接线错误,破坏原有电路结构,使电流偏离正常路径形成短路回路^[1]。短路电流的形成过程始于电路绝缘破坏或接线异常,此时电路电阻急剧下降,根据欧姆定律,电压不变情况下电流会急剧增大形成短路电流。短路电流的传播路径遵循电阻最小原则,从故障点出发,通过变电站内的母线、电缆、变压器等设备形成闭合回路,可能流经不同电压等级的电路,对沿途设备产生冲击,若未及时切断,会持续对系统造成影响。

1.2 短路工况下的电气与力学特征

短路电流具有显著的瞬时冲击特性,故障发生瞬间电流迅速攀升至峰值,峰值大小与系统容量、短路点位置相关,随后在较短时间内逐渐衰减至稳定值,整个过程持续时间较短,但瞬时产生的能量极大,易对设备造成损害。短路电流通过软导线时会产生电磁力,其作用原理基于安培力定律,电流在磁场中会受到力的作用,软导线中流动的短路电流会在周围产生磁场,相邻导线或导体间因电流方向不同产生吸引力或排斥力,这些电磁力直接作用于软导线,使软导线承受拉力。短路工况

下软导线所处的动态受力环境发生明显变化,正常运行时软导线主要承受自身重力与环境风力,受力状态相对稳定;短路发生后,电磁力的突然施加使软导线受力急剧增大,且电磁力随电流变化呈现动态波动,导致软导线处于复杂的动态受力状态,可能出现振动、形变甚至断裂风险。

2 软导线拉力的影响因素解析

2.1 软导线自身属性因素

软导线的材质特性直接影响拉力承受能力,不同导电材料的强度参数存在差异,例如铜材质软导线的抗拉强度通常高于铝材质,在相同拉力作用下更难发生形变或断裂;强度参数较高的材质能承受更大拉力,而强度较低的材料在较小拉力下就可能出现损伤。软导线的结构参数与拉力存在密切关联,截面尺寸越大,导线承受拉力的能力越强,相同拉力作用下截面尺寸大的导线应力更小;股数越多的软导线柔韧性更好,但拉力分布会更分散,需考虑股间受力均匀性;长度较长的软导线在受力时易产生更大形变,可能间接改变实际承受的拉力大小。软导线的安装形态对拉力分布有显著作用,弧垂越大,导线在自身重力作用下的下垂程度越明显,两端悬挂点处的拉力会相应变化;不同悬挂方式(如固定悬挂、张力悬挂)会改变导线的受力支撑点,固定悬挂使导线在悬挂点处受力集中,张力悬挂则能通过调节张力使拉力更均匀分布在导线整体。

2.2 短路工况参数因素

短路电流大小与持续时间对软导线瞬时拉力影响显著,短路电流越大,产生的电磁力越强,软导线所受瞬时拉力也越大,可能超出导线承受极限;短路持续时间越长,软导线在高拉力状态下承受的作用时间越久,不仅易导致瞬时拉力累积效应,还可能加剧导线的疲劳损伤。短路电流方向变化会改变软导线受力方向及拉力数值,当电流方向改变时,相邻导线间的电磁力方向会从

吸引力转为排斥力或反之，导致软导线受力方向随之变化；受力方向的改变可能使导线原有拉力平衡被打破，进而引发拉力数值的波动，增加导线受力复杂性^[2]。短路工况下周边设备对软导线拉力存在约束效应，绝缘子作为软导线的支撑部件，其自身强度与安装角度会限制导线的形变范围，若绝缘子强度不足，可能在导线拉力作用下损坏，间接影响导线拉力传递；杆塔的稳定性会影响导线悬挂点的牢固程度，稳定的杆塔能为导线提供可靠支撑，使拉力正常传递，而不稳定的杆塔可能在拉力作用下发生偏移，改变导线实际承受的拉力。

2.3 外部环境辅助因素

环境温度变化通过影响软导线物理性能间接改变拉力，温度升高会使软导线材质的弹性模量下降，相同形变下所需拉力减小，可能导致导线在原有拉力作用下出现更大形变；温度降低则会使导线材质变脆，抗拉性能下降，此时即使拉力不变，导线也更易发生断裂。低温伴随的覆冰会增加导线自重，覆冰厚度随导线直径减小而增长更快，额外重量与短路拉力叠加会显著提升总负荷。风力、振动等环境因素与短路工况叠加会对软导线拉力产生综合作用，风力会对软导线施加横向作用力，与短路工况下的纵向拉力结合，使导线处于复杂的复合受力状态，拉力数值与分布会发生改变；振动会使软导线产生周期性形变，这种形变会导致拉力出现周期性波动，长期振动叠加短路工况下的瞬时高拉力，会加速导线疲劳，降低其承受拉力的能力，增加断裂风险。潮湿环境中导线表面附着的污秽形成导电膜，也可能间接影响受力稳定性。

3 软导线拉力研究方法与技术路径

3.1 理论分析方法

理论分析方法以电磁学与力学理论为基础构建软导线拉力计算模型，先明确短路工况下电磁力产生的物理原理，结合软导线的受力特点，将导线视为弹性体纳入力学分析框架，综合考虑重力、电磁力等多作用力，同时引入导线材料的疲劳特性初始参数与环境介质（如空气阻力）的影响系数，建立能更精准反映实际受力状态的计算模型，模型构建后还需通过小范围试验数据进行初步校准，提升基础模型可靠性。推导短路电流与软导线拉力之间的数学关联公式时，需引入电磁力计算相关参数（如电流密度、导线间距）与力学分析参数（如弹性模量、截面惯性矩），通过公式变形与整合，消除次要变量干扰，将短路电流变量与拉力结果直接关联，形成可量化计算的数学表达式，标注公式适用的电流范围与导线规格边界条件，避免超范围应用导致误差。分析

不同参数变化对拉力计算结果的敏感性时，需固定其他参数，逐一改变目标参数（如短路电流大小、导线截面尺寸），观察拉力计算结果的变化幅度，结合工程实际需求判断各参数对拉力影响的强弱程度，为后续研究提供明确的参数优化方向，针对敏感性极高的参数，需在后续仿真与试验中重点关注其精度控制。

3.2 仿真模拟研究

仿真模拟研究需先选择适配的仿真软件，电磁仿真软件可精准计算短路电流产生的电磁力分布，结构力学仿真软件能模拟软导线在力作用下的形变与拉力传递，根据研究需求选择单一软件或组合使用多类软件，同时需对软件计算精度进行前期校验，通过导入已知工况的标准数据，对比软件计算结果与标准值的偏差，确定误差修正系数。构建变电站软导线与短路工况的仿真模型时，需先建立几何模型，还原软导线的实际长度、悬挂方式及与周边设备的相对位置，细化导线表面纹理与连接节点细节，对导线接头等易受力集中部位进行网格加密处理；再设置物理参数，输入软导线的材质特性（如密度、弹性模量）、短路电流参数（如峰值、持续时间）及周边设备的力学参数，添加环境阻尼系数等修正项，确保模型与实际场景高度一致，模型建成后需进行空载运行测试，排查几何干涉或参数冲突问题。模拟不同短路场景下软导线拉力的动态变化过程时，需设置多种短路类型（如三相短路、单相短路）与参数组合，同时加入短路电流叠加谐波的极端场景模拟，运行仿真程序后，提取不同时刻软导线各部位的拉力数据，分析拉力峰值出现时间、变化趋势、衰减速率等规律，形成完整的拉力数据图谱，还需对仿真数据进行平滑处理，去除高频干扰信号，保证数据可用性。

3.3 试验测试验证

试验测试验证需先设计短路工况模拟试验平台，平台需具备调节短路电流大小、持续时间等参数的功能，能模拟变电站内不同短路场景，同时配备固定软导线样本的装置与环境温湿度控制模块，增设振动模拟组件以还原变电站实际振动环境，确保试验条件与实际运行环境相近，平台搭建后需进行满负荷试运行，验证各组件协同工作稳定性。对软导线样本进行拉力测试时，将样本按实际安装方式固定在试验平台上，检查传感器安装精度与数据传输稳定性，对传感器进行零点校准与量程标定，启动平台模拟短路工况，通过安装在导线上的拉力传感器实时采集试验过程中的拉力数据，记录拉力随时间变化的完整曲线，同步记录环境参数变化，每个试验场景需重复测试3-5次，取数据平均值减少偶然误差^[3]。对比试验数据与理论计算、

仿真结果时,需从拉力峰值、变化趋势、稳定状态、波动幅度等维度进行分析,若三者数据偏差较小,说明理论计算模型与仿真模型的准确性较高;若存在较大偏差,则需回溯检查模型参数设置、软件计算逻辑或试验操作流程,修正完善研究方法,同时将验证后的可靠数据纳入数据库,为后续同类研究提供数据支撑,确保研究结果的可靠性与工程适用性。

4 短路工况下软导线拉力控制与优化方向

4.1 软导线选型优化

软导线选型优化需紧密结合短路工况参数与拉力需求,针对不同短路电流大小、持续时间等参数,提出适配的材质与结构建议,选型时还需参考导线的热膨胀系数,避免温度变化引发额外拉力波动。短路电流较大、拉力需求高的场景,优先选择抗拉强度高、韧性好的材质,这类材质能更好承受瞬时冲击拉力,减少断裂风险;结构上可选用多股绞合形式,多股结构能分散拉力,避免单一导线受力集中导致的局部损坏,可根据导线使用年限动态调整选型标准,老旧导线需适当提高强度冗余。明确不同短路风险等级下软导线的强度匹配标准,短路风险等级高(如短路频率高、电流峰值大)的区域,软导线强度需高于常规区域,确保强度储备充足;风险等级低的区域,可在满足安全前提下选择性价比更高的规格,平衡安全性与经济性,避免过度设计造成资源浪费。

4.2 安装与布置优化

安装与布置优化通过调整软导线悬挂方式、弧垂设计减少短路工况下的拉力集中。悬挂方式可采用张力悬挂替代传统固定悬挂,张力悬挂能通过调节张力装置使拉力均匀分布在导线全长,避免固定悬挂时悬挂点处的拉力集中,张力装置需选用耐腐蚀材质以适应变电站复杂环境;弧垂设计需根据导线长度、跨度及短路拉力特性调整,合理增大弧垂可在短路时为导线提供一定形变空间,缓冲瞬时拉力冲击,降低局部受力峰值,且弧垂值需结合季节温度变化预留调整余量。合理规划软导线与周边设备的相对位置,增大导线与绝缘子、杆塔等设备的安全距离,避免短路拉力导致导线与设备碰撞;同

时优化设备支撑结构布局,确保设备对导线的约束作用均匀,减少因约束不均引发的附加拉力,降低拉力对设备的额外负荷与损坏风险。

4.3 防护与加固措施

防护与加固措施针对高拉力风险区域(如短路故障频发的母线连接部位、大跨度导线段),提出专项防护结构设计方案。可在导线外侧加装耐磨、抗拉的防护套管,防护套管能增强导线表面抗损伤能力,同时在拉力作用下辅助分散应力,套管接口处需做好密封处理防止水汽侵入;对跨度较大的导线段,增设中间支撑装置,中间支撑能缩短导线有效受力长度,降低整体拉力负荷,减少形变与断裂概率。制定短路工况后软导线拉力检测与加固的运维策略,短路故障发生后,需及时通过专业设备检测导线拉力变化,判断是否存在拉力异常或结构损伤;若发现拉力超出安全范围或导线出现细微裂纹,立即采取加固措施,如更换受损段、增加辅助拉力构件,恢复导线正常受力状态,同时设定定期复检周期,记录每次检测数据形成台账,避免隐患累积影响后续运行安全。

结束语

变电站软导线短路工况拉力研究至关重要。通过全面分析短路工况特性、软导线拉力影响因素,采用多种研究方法与技术路径,明确了不同因素对拉力的作用机制。提出的软导线选型、安装布置优化及防护加固等措施,为降低短路时软导线拉力风险提供了有效方案。未来可进一步结合实际工程验证与完善,推动变电站安全运行水平提升。

参考文献

- [1] 郟鑫,文韬,韩彬,等.考虑变电站内接线和拓扑瞬态调整的断路器短路电流分析[J].电力建设,2024,45(7):113-121.
- [2] 钱牧涵.220kV高压变电站接地短路电流的建模与分析[J].电气技术与经济,2024(10):347-349.
- [3] 鲁志伟,董威,冷赫,等.变电站外短路时架空地线分流系数的计算方法[J].东北电力大学学报,2023,43(2):18-24.