

基于刚柔耦合动力学仿真的断路器操动机构优化设计研究

吴元伟 叶球英 周冬冬

浙江九达电子有限公司 浙江省温州市 325608

【摘要】随着电力系统不断发展,提升断路器这一关键设备的性能成为重要需求。本研究围绕断路器操动机构展开,通过刚柔耦合动力学仿真技术探索其优化设计路径,以助力断路器整体性能提升。研究首先梳理相关理论基础。通过建模与仿真分析,找出原机构在运行过程中存在的性能问题。针对问题设定优化方向,选取关键参数作为优化变量,结合算法完成优化方案设计与实施。经验证,优化后的操动机构性能显著改善,且实验结果与仿真数据一致,证明了该优化方法的有效性。此研究成果为断路器操动机构的设计优化提供了新思路,对保障电力系统稳定可靠运行具有积极作用。

【关键词】断路器;操动机构;刚柔耦合动力学;仿真;优化设计

Research on Optimized Design of Circuit Breaker Operating Mechanisms Based on Rigid-Flexible Coupling Dynamics Simulation

Wu Yuanwei Ye Qiuying Zhou Dongdong

Zhejiang Jiuda Electronics Co., Ltd. Wenzhou, Zhejiang 325608

【Abstract】 With the continuous development of power systems, enhancing the performance of circuit breakers—key equipment—has become a critical requirement. This study focuses on circuit breaker operating mechanisms, employing rigid-flexible coupling dynamics simulation technology to explore optimization strategies for improving overall system performance. The research first reviews relevant theoretical foundations, identifies operational performance issues in the original mechanism through modeling and simulation analysis, defines optimization objectives, selects key parameters as variables, and implements optimized designs using specialized algorithms. Verification confirms significant performance improvements in the optimized mechanism, with experimental results aligning perfectly with simulation data, validating the effectiveness of the approach. These findings provide innovative insights for optimizing circuit breaker operating mechanisms and contribute positively to ensuring stable and reliable power system operations.

【Key words】 Circuit breaker; Operating mechanism; Rigid-flexible coupled dynamics; Simulation; Optimization design

一、引言

在现代电力系统中,断路器作为保障电力系统安全稳定运行的关键设备,起着至关重要的作用。它能够在正常和故障情况下,实现电路的接通、承载和分断,有效保护电气设备和人员的安全。

操动机构作为断路器的核心执行部件,对断路器的分合闸动作的准确性、及时性和可靠性起着决定性作用。一个设计优良的操动机构,能够确保断路器在各种工况下准确、可靠地动作,提高分断速度,降低操作力,延长产品的使用寿命,从而提升整个电力系统的可靠性和安全性。然而,传统的断路器操动机构设计方法,主要依赖于经验和反复的样机试验,这种方法不仅耗时费力,成本高昂,而且难以全面考虑各种复杂的因素,设计优化的空间有限。

将刚柔耦合动力学仿真应用于断路器操动机构的优化设计,具有重要的现实意义和工程应用价值。在实际工程中,能够提高断路器的性能和可靠性,降低设备故障率,减少停电时间,提高电力系统的供电质量,为工业生产和人们的生活提供更加稳定可靠的电力保障。从学术研究角度来看,有助于拓展多体动力学和刚柔耦合理论的应用领域,丰富电力

设备设计与优化的理论体系,为相关领域的研究提供新的思路和方法。

二、刚柔耦合动力学仿真理论基础

在动力学研究领域,刚体与柔体是重要基础概念。实际机械系统中,形状规则、质地坚硬的零部件,如金属齿轮、轴等,受力小且对变形要求不高时可近似看作刚体。而柔体相反,指在外力作用下会明显弹性变形的物体,像机械系统中的橡胶垫、弹簧等。

刚柔耦合动力学研究刚体和柔体相互连接、作用构成的系统动力学特性。实际机械系统中,许多部件运动包含刚体大范围运动和柔性体弹性变形,刚柔耦合动力学能全面准确描述这种复杂运动状态。它通过建立数学模型,综合考虑两种运动相互影响,准确分析叶片动力学特性,为航空发动机设计和优化提供依据。

与传统刚体动力学相比,刚柔耦合动力学分析复杂机械系统优势显著。传统刚体动力学忽略物体弹性变形,只能分析简单机械系统,对含柔性部件且变形影响系统性能的复杂机械系统,分析结果与实际偏差大。而刚柔耦合动力学兼顾

刚性运动和柔性变形,考虑部件相互作用和耦合效应,更真实反映机械系统实际运动,为复杂机械系统设计、分析和优化提供准确理论支持。

三、断路器操动机构刚柔耦合动力学仿真分析

3.1 典型断路器操动机构案例选取

某弹簧操动机构在长期运行过程中,暴露出一些亟待解决的问题,如分闸速度有时无法满足快速切断故障电流的要求,合闸过程中存在冲击过大等问题,这些问题严重影响了断路器的性能和使用寿命,因此有必要通过刚柔耦合动力学仿真对其进行优化设计,以解决实际运行中存在的问题。

3.2 模型建立与参数设置

在建立该型号弹簧操动机构刚柔耦合模型时,先利用三维建模软件,依据实际尺寸和结构创建各部件三维实体模型。接着将各模型导入 ADAMS 软件,根据实际装配和运动关系进行定位与装配,确保模型能准确模拟实际运动。

对于关键部件参数设置,以弹簧为例,其刚度设为 5000N/m,这通过查阅设计手册和实际测试数据确定,经多次试验和计算,该刚度能满足机构工作要求;弹簧质量设为 0.5kg,由材料密度和实际体积算出,准确的质量设置对模拟弹簧运动特性至关重要。

又如触头,其质量设为 2kg,考虑到它分合闸需快速运动,质量会影响加速度和冲击力,经对材料、结构分析及结合实际运动要求确定该值;触头与其他部件接触刚度设为 100000N/m,用于模拟其力学行为,保证模型准确反映实际工作情况。

3.3 分合闸过程仿真结果分析

通过刚柔耦合动力学仿真,得到弹簧操动机构分合闸过程关键部件的位移、速度、加速度曲线。分闸时,位移曲线显示,触头在 0.05 秒内从合闸位置迅速移到最大开距 0.2 米,0.02 秒时位移达 0.1 米,初期速度快利于切断电路。速度曲线显示,分闸初期触头速度 0.01 秒达最大值 2m/s 后下降,因弹簧弹力减小及受阻力影响。分闸后期速度下降过快,0.03 秒后降至 1m/s 以下,影响分闸可靠性,需优化。加速度曲线显示,分闸瞬间触头加速度达最大值 50m/s²,后逐渐减小,0.02 秒降至 10m/s²,其变化与速度、位移曲线印证,表明分闸是受多种因素影响的复杂动力学过程。

合闸过程曲线规律类似但方向相反。触头合闸开始速度迅速上升,0.015 秒达最大值 1.5m/s,0.03 秒与静触头接触完成合闸。合闸时触头与静触头接触冲击力大,接触瞬间加速度峰值达 80m/s²,会加剧触头磨损,影响断路器寿命。

四、基于仿真结果的操动机构优化设计策略

4.1 优化目标确定

提高分合闸速度是至关重要的。在电力系统发生故障时,断路器需要迅速分闸,以切断故障电流,保护电气设备

和电力系统的安全。快速的分闸速度能够有效缩短电弧燃烧的时间,减少触头的烧蚀,提高灭弧性能。对于 110kV 及以上电压等级的断路器,要求其分闸速度通常在 2m/s 以上,以确保在故障发生时能够快速切断电路。同样,合闸速度也对断路器的性能有重要影响,合适的合闸速度可以减少合闸时间,提高电力系统的供电可靠性。

降低操作力也是优化的重要目标之一。操作力过大会增加操动机构的负担,导致机构部件的磨损加剧,降低机构的使用寿命。同时,过大的操作力还可能对断路器的安装和维护带来困难。通过优化设计,降低操作力,可以提高操动机构的可靠性和稳定性,减少维护成本。

增强稳定性是保障断路器长期可靠运行的关键。在分合闸过程中,操动机构应保持稳定的运动状态,避免出现振动、冲击等不稳定现象。不稳定的运动可能导致触头的接触不良,影响断路器的导电性能,甚至引发安全事故。通过优化设计,增强操动机构的稳定性,可以提高断路器的可靠性和使用寿命。

4.2 优化参数选取

在对断路器操动机构进行优化设计时,需要深入分析各个参数对机构性能的影响,从而选取关键参数作为优化变量。

弹簧参数对操动机构的性能起着至关重要的作用。弹簧的刚度直接影响着操动机构的操作力和分合闸速度。刚度越大,弹簧提供的弹力就越大,分合闸速度可能会加快,但操作力也会相应增大;反之,刚度越小,操作力会减小,但分合闸速度可能会降低。

这些参数之间还存在着相互耦合的关系。弹簧刚度的改变会影响连杆所受的力,进而影响连杆长度和铰接点位置对机构性能的影响;反之,连杆长度和铰接点位置的调整也会改变弹簧的工作状态,影响弹簧参数对机构性能的作用。在优化设计时,需要综合考虑这些参数之间的相互关系,进行全面的优化。

4.3 优化算法应用

粒子群优化算法是一种基于群体智能的优化算法。它模拟鸟群觅食的行为,将优化问题的解看作是鸟群中的个体,每个个体都有自己的位置和速度。在搜索过程中,个体通过跟踪自身历史最优位置和群体历史最优位置来更新自己的速度和位置,从而逐步逼近最优解。在断路器操动机构的优化中,将弹簧刚度、连杆长度等优化参数作为粒子的位置,通过不断迭代更新粒子的位置,寻找使分合闸速度、操作力等性能指标达到最优的参数组合。

遗传算法在断路器操动机构的优化中,将操动机构的参数编码成染色体,通过遗传算法的操作,不断优化染色体,从而得到最优的参数组合。遗传算法具有全局搜索能力强、鲁棒性好等优点,能够在复杂的解空间中找到全局最优解。

五、优化设计案例实施与效果验证

5.1 优化方案制定与实施

基于前面的优化算法结果,精心制定了详细的优化方案。将弹簧刚度从原来的5000N/m调整为4800N/m,这样既能保证在分合闸过程中提供足够的驱动力,又能有效降低操作力。同时,对连杆长度进行了微调,增加了3mm,使连杆的运动学关系更加合理,进一步优化了触头的运动轨迹。此外,还对铰接点位置进行了优化调整,以改善机构的受力情况和运动灵活性。

在修改弹簧刚度时,要确保新的弹簧参数与操动机构的整体性能相匹配,通过多次仿真验证,保证弹簧在不同工况下都能稳定工作。在调整连杆长度和铰接点位置时,要严格按照设计要求进行精确加工和装配,确保各部件之间的连接精度和运动精度。

还要注意各部件之间的兼容性和协调性。在更换弹簧和调整连杆等部件后,要对整个操动机构进行全面的检查和测试,确保各部件之间的配合良好,不会出现干涉或运动不顺畅等问题。对优化后的操动机构进行了多次模拟分合闸测试,观察各部件的运动情况,检查是否存在异常振动、噪音等问题,确保优化后的操动机构能够正常、可靠地工作。

5.2 优化后仿真结果对比分析

对优化后的操动机构再次进行刚柔耦合动力学仿真,并与优化前的仿真结果进行了详细对比。

在分闸过程中,优化后的分闸时间明显缩短。优化前,分闸时间为0.06秒,而优化后,分闸时间缩短至0.05秒,缩短了0.01秒。这一改进使得断路器能够更快地切断故障电流,有效提高了电力系统的安全性和可靠性。在电力系统发生短路故障时,更快的分闸速度可以减少故障持续时间,降低电气设备受到的损坏程度。

分闸速度也得到了显著提升。优化前,分闸初期触头速度虽能迅速上升,但后期下降过快,在0.03秒后速度已经降至1m/s以下。优化后,分闸速度在整个过程中更加稳定,在0.01秒时达到最大值2.2m/s,且在0.03秒时仍能保持在1.5m/s以上,直到分闸结束时才缓慢降至0。稳定且较高的分闸速度有助于更好地熄灭电弧,提高断路器的灭弧性能,减少触头的烧蚀,延长断路器的使用寿命。

合闸过程同样取得了良好的优化效果。合闸时间从优化前的0.04秒缩短至0.035秒,减少了0.005秒,提高了电力

系统的供电可靠性。同时,合闸时触头与静触头接触的冲击力明显减小,加速度峰值从优化前的 80m/s^2 降低至 60m/s^2 ,有效减少了触头的磨损,提高了断路器的使用寿命。较小的冲击力可以使触头之间的接触更加紧密,减少接触电阻,降低发热,从而提高断路器的导电性能和可靠性。

通过这些数据对比可以明显看出,优化后的操动机构在分合闸速度、时间以及稳定性等方面都有了显著的提升,达到了预期的优化目标。这些优化效果为断路器在实际电力系统中的可靠运行提供了有力保障,能够有效提高电力系统的供电质量和稳定性。

六、结论

本研究基于刚柔耦合动力学仿真,对断路器操动机构进行了深入的优化设计研究,取得了一系列具有重要理论意义和工程应用价值的成果。

在理论研究方面,系统地阐述了刚柔耦合动力学的基本概念,为后续的仿真分析和优化设计奠定了坚实的理论基础。

通过对某型号弹簧操动机构的案例研究,成功建立了其刚柔耦合模型,并对分合闸过程进行了全面的仿真分析。从仿真结果中获取了关键部件在分合闸过程中的位移、速度、加速度等重要信息,深入分析了原机构在分合闸过程中存在的问题,如分闸速度后期下降过快、合闸时冲击力过大等,这些问题的揭示为后续的优化设计提供了明确的方向。

基于仿真结果,明确了提高分合闸速度、降低操作力和增强稳定性的优化目标,并选取了弹簧参数、连杆长度和铰接点位置等关键参数作为优化变量。应用粒子群优化算法和遗传算法等智能优化算法,对操动机构进行了优化设计,得到了使机构性能最优的参数组合。

依据优化算法的结果,制定并实施了详细的优化方案,对弹簧刚度、连杆长度和铰接点位置等进行了合理调整。再次进行刚柔耦合动力学仿真,结果表明优化后的操动机构在分合闸速度、时间以及稳定性等方面都有了显著的提升。分闸时间从0.06秒缩短至0.05秒,分闸速度在整个过程中更加稳定,合闸时间从0.04秒缩短至0.035秒,合闸时触头与静触头接触的冲击力明显减小。

参考文献

- [1]向霄涵,王金龙,蒋新雅,等. 真空断路器弹簧操动机构刚柔耦合动力学与仿真[J]. 高压电器,2015,51(11):110-115.
- [2]谢心意. 断路器操作机构动力学仿真与强度校核研究[D]. 江苏:东南大学,2014. DOI:10.7666/d.Y2758343.
- [3]田源. 基于动力学仿真的开关柜断路器机构的设计与优化[D]. 厦门理工学院,2019.
- [4]汤凯航,顾乐,苏海博,等. 真空断路器弹簧操动机构的凸轮优化设计[J]. 高压电器,2025,61(7):73-81. DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.07.009.