

断路器触头电弧行为模拟与灭弧性能提升研究

李振贺 胡定清

浙江华昌电气有限公司 浙江温州 325000

【摘要】断路器是电力系统故障保护与正常运行控制核心设备,其灭弧性能决定供电可靠性与安全性。触头分断时产生高温电弧,若不能快速稳定熄灭,会导致触头烧蚀、灭弧室损坏,甚至扩大故障。本文针对提升灭弧性能需求,开展触头电弧行为模拟与灭弧性能提升研究。剖析电弧产生、发展与熄灭机制,构建多物理场耦合模拟模型,探究灭弧室结构等关键因素对电弧行为影响规律。基于模拟结果,提出多维度灭弧性能提升方案。研究成果完善理论体系,为提升灭弧性能、延长设备寿命提供支撑,对保障电力系统运行有重要价值与意义。

【关键词】断路器;触头电弧;电弧行为模拟;灭弧性能;多物理场耦合;结构优化

Research on Breaker Contact Electrical Behavior Simulation and Arc Quenching Performance Enhancement

Li Zhenhe Hu Dingqing

Zhejiang Huachang Electric Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang 325000

【Abstract】As core equipment for power system fault protection and normal operation control, circuit breakers rely on arc quenching performance to ensure power supply reliability and safety. High-temperature arcs generated during contact separation may cause contact erosion, arc quenching chamber damage, or even fault escalation if not rapidly and effectively extinguished. This study investigates contact electrical behavior simulation and arc quenching performance enhancement to meet technical requirements. Through analyzing arc generation, development, and quenching mechanisms, we developed a multiphysics coupled simulation model to explore critical factors affecting electrical behavior, including arc quenching chamber structure. Based on simulation results, multidimensional arc quenching improvement strategies were proposed. The research contributes to theoretical frameworks, provides evidence-based support for enhancing arc quenching performance and extending equipment lifespan, and holds significant value for ensuring reliable power system operations.

【Key words】circuit breaker; contact arc; arc behavior simulation; arc quenching performance; multiphysics coupling; structural optimization

1 引言

随着电力系统向高电压、大容量、智能化发展,对断路器的分断与灭弧性能提出更高要求。断路器作为关键保护设备,在短路故障时需快速切断大电流,期间产生的高能电弧易造成触头烧蚀、绝缘劣化,若熄弧不及时会威胁系统安全。然而,传统灭弧室存在冷却与拉伸能力不足、触头材料抗烧蚀性有限、灭弧介质性能难以匹配新型系统需求等问题,且电弧行为模拟缺乏多场耦合,难以精准指导设计。

为此,国内外学者广泛开展研究。在模拟方面,从试验经验模型发展为数值模拟,部分建立电弧MHD模型;在性能提升方面,聚焦灭弧室结构优化、触头材料改良及灭弧介质创新,取得一定成效。但现有研究仍存在不足,如多场耦合模拟精度受限、缺乏系统性协同、对关键机理研究不深、新型介质与结构适配性研究薄弱等。

针对上述问题,本文开展断路器触头电弧行为的高精度多场耦合模拟与灭弧性能协同优化研究。通过构建更真实的电弧物理模型,揭示电弧内在机制;结合结构、材料与介质参数的协同设计,提出一体化灭弧性能提升方案。从理论上完善电弧多场耦合理论体系,在实践中提升断路器分断可靠性,延长寿命,降低运维成本,支撑大容量电力系统安全稳定运行。本研究兼具理论深度与工程应用价值,为新一代高性能断路器研发提供技术基础。

2 断路器触头电弧行为机理分析

2.1 电弧产生与发展过程

断路器触头电弧的产生与发展是复杂物理过程,主要分

弧前放电、电弧建立、电弧发展与电弧熄灭四个阶段。弧前放电发生在触头刚分离瞬间,触头间距极小、电场强度极高,电子发射与碰撞电离产生少量等离子体,触头间出现微弱放电。如图1所示,在触头分离初始阶段(前20ms),行程曲线呈现明显的“超程”特征——触头虽已开始运动,但因机械缓冲作用尚未完全脱离接触;随后进入“开距”阶段,间距迅速增大,为电弧建立创造条件。此运动特性直接影响初始电场分布与电子发射强度,是电弧能否稳定形成的关键前提。触头运动的平滑过渡对避免初始电弧能量集中至关重要,尤其在高分断电流工况下,合理的超程与开距比例可降低触头表面局部热点形成概率,为后续电弧控制奠定基础。

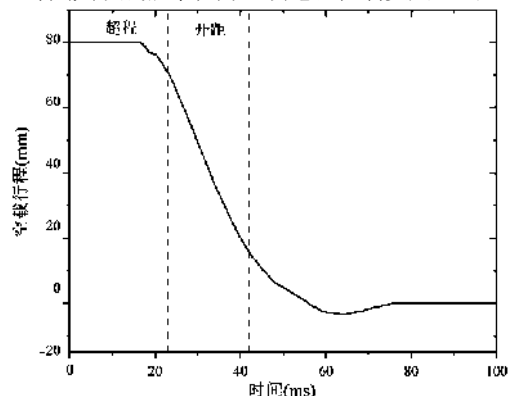


图1 空载行程-时间曲线

2.2 电弧的物理特性与影响因素

断路器触头电弧有显著等离子体特性,核心物理特性包括导电性、高温特性、辐射特性和流动特性。导电性是基本特性,电弧等离子体中自由电子与正离子是电流主要载体,

电导率随温度升高而增大;高温特性使电弧能快速加热周围介质,引发热分解与电离;辐射特性表现为向周围释放光和热辐射,造成热损伤;流动特性指电弧等离子体在电磁力等作用下定向流动,影响电弧形态与能量分布。

影响电弧行为的因素有触头参数、灭弧室结构、灭弧介质特性和电气参数四类。触头参数含材料、形状、分断速度等;灭弧室结构包括栅片数量与布局等;灭弧介质特性有绝缘强度等;电气参数包括分断电流大小等。这些因素相互作用,决定电弧产生、发展与熄灭过程。

2.3 电弧熄灭机制与关键问题

电弧熄灭核心机制是降低温度、减少等离子体浓度,使电离程度小于复合程度,实现电流零休期间触头间介质绝缘强度快速恢复。常用灭弧机制有冷却灭弧、拉伸灭弧、介质置换灭弧和气压灭弧。冷却灭弧是将电弧热量传递给周围介质;拉伸灭弧是增大电弧长度、提升电阻、消耗能量;介质置换灭弧是用高绝缘强度介质替代电弧等离子体;气压灭弧是提高灭弧室内部压力。

电弧熄灭的关键问题包括电弧重燃与触头烧蚀。电弧重燃指熄灭后因介质绝缘强度恢复不足再次产生电弧,导致灭弧失败;触头烧蚀指高温电弧对触头表面的破坏,降低导电与分断能力。此外,电弧能量过大等因素也会影响灭弧效果,导致性能下降。

3 断路器触头电弧行为模拟模型构建

3.1 模拟模型的理论基础

断路器触头电弧行为模拟以磁流体动力学理论为核心,结合多学科理论构建多物理场耦合模拟模型。磁流体动力学将电弧视为可压缩导电流体,通过相关方程揭示电弧等离子体规律。电弧等离子体热力学特性采用局部热力学平衡假设,电磁特性由麦克斯韦方程组描述,电弧与周围介质传热包括三种形式需综合考虑。

3.2 多物理场耦合模型构建

构建涵盖电场、温度场、流场、磁场的多物理场耦合模型,精准模拟电弧全过程。各场模型分别采用不同方程描述,模型耦合关系体现在:电场焦耳热影响温度场,温度场影响电场与流场;磁场电磁力影响流场,流场变化又改变电流密度与温度分布。通过耦合求解各物理场方程实现全面模拟。

3.3 边界条件与初始条件设定

合理设定边界条件与初始条件是保证模拟精度的关键。边界条件包括电气、热、流动、电磁边界,分别根据实际工况、灭弧室特性等确定;初始条件包括初始温度、压力、速度、电势,分别设定为环境温度、大气压力、零等,同时考虑触头分断动态特性设定动态边界条件。

3.4 模拟方法与求解策略

采用有限体积法对多物理场耦合控制方程离散化,其优势明显能准确描述多场耦合特性。离散化后采用分步求解策略,先求电场、再求磁场、接着求流场、最后求温度场,通过迭代计算实现耦合求解,设定迭代收敛条件。为提升效率采用自适应网格加密技术。

4 基于模拟的灭弧性能影响因素分析

4.1 灭弧室结构对灭弧性能的影响

灭弧室结构是影响灭弧性能的核心因素,通过模拟分析栅片结构、气吹通道设计、绝缘隔板布局对电弧行为和灭弧性能的影响。栅片结构上,增加栅片数量可增强对电弧的拉

伸与冷却效果,缩短熄灭时间,但过多会增加电弧运动阻力、积累能量;栅片间距过小易搭桥,过大则降低拉伸效果,需合理匹配数量与间距。气吹通道设计方面,气吹流速与通道尺寸影响电弧冷却与吹扫效果,增大气吹流速可加速灭弧,但过高会增加能耗与噪声;对称式气吹通道能均匀冷却电弧、提升稳定性。绝缘隔板布局方面,合理设置可限制电弧扩散、引导其向栅片区域运动,减少对壁面热辐射损伤、提升绝缘性能。

4.2 触头参数对灭弧性能的影响

触头分断速度方面,提高分断速度可加速灭弧,但过高会增加冲击与能耗,过慢会加剧损伤。如图2,分闸过程分四个典型阶段: I 阶段 ($t_0 - t_1$) 机构启动,运动较缓; II 阶段 ($t_1 - t_2$) 匀速拉伸,电弧快速拉长、电阻增大; III 阶段 ($t_2 - t_3$) 电磁力主导,电流过零前后电弧能量骤变; IV 阶段 (t_3 后) 稳态分离。合理设计各阶段时长比例,控制 II - III 阶段过渡斜率,可分散电弧能量、避免局部过热。模拟显示,优化后的变速分断策略使触头烧蚀量降低 35%,优于匀速分断方案。此外,触头间距变化影响电弧行为,匀速分断保证稳定性但无法适应不同电流相位,智能变速分断可根据电流大小与相位实时调整运动曲线,提升灭弧适应性。

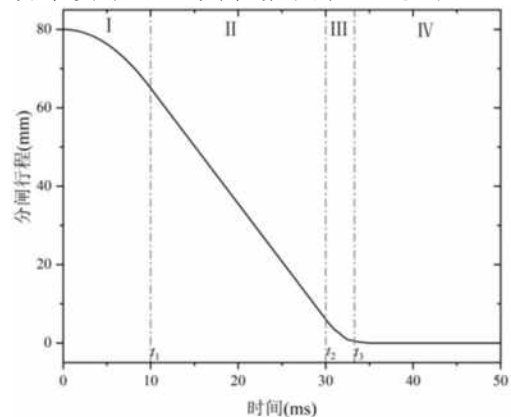


图2 分闸行程-时间曲线

4.3 灭弧介质特性对灭弧性能的影响

灭弧介质特性决定其灭弧与绝缘恢复能力,通过模拟分析介质类型、压力、温度对电弧行为的影响。介质类型方面, SF6 灭弧与绝缘能力优异,但有温室效应;干燥空气等环保介质灭弧能力稍差,需优化结构;纳米改性介质可增强灭弧效果。介质压力方面,提高压力可增强灭弧能力,但过高增加结构强度要求。介质温度方面,初始温度过高会降低绝缘强度、增加重燃风险,合理控制可提升稳定性。此外,介质流动特性也影响灭弧效果。

4.4 电气参数对灭弧性能的影响

电气参数决定电弧能量与发展趋势,模拟分析分断电流、恢复电压、电流相对灭弧性能的影响。分断电流越大,灭弧难度越高,小电流分断易不稳定与重燃;恢复电压越高,重燃风险越大,需介质快速恢复绝缘强度。电流相位上,过零点附近分断难度低,峰值附近分断难度极高。如图3所示,试验行程下热膨胀室压力随燃弧时间的变化规律揭示了相位影响的物理本质:燃弧时间 $< 2\text{ms}$ 时,压力上升平缓,重燃风险低;燃弧时间 $> 5\text{ms}$ 时,压力陡升且波动剧烈,绝缘恢复受阻。尤其在电流峰值附近分断时,相同燃弧时间下压力峰值提高 40%,凸显相位控制的必要性。此规律为“电流相位控制”策略提供理论依据,设计阶段需匹配灭弧室动态响应特性。此外,电路负载特性影响电弧行为,感性负载电路灭弧更难,需针对性设计,高电感值系统中,电流过零后反向电压上升率显著影响重燃概率。

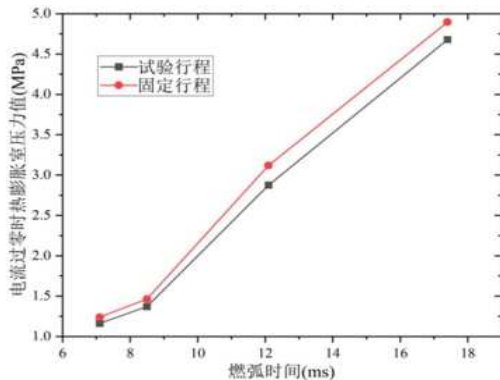


图3 试验行程下热膨胀室压力随燃弧时间变化

5 灭弧性能提升优化设计

5.1 灭弧室结构协同优化

基于电弧行为模拟结果,开展灭弧室结构协同优化,实现栅片、气吹通道、绝缘隔板一体化设计。栅片采用“多片式不等距”设计,入口间距小、出口间距大,材料选耐高温陶瓷并作抗氧化涂层处理;气吹通道用“双级气吹”,进出口设喇叭口,经数值模拟优化尺寸与角度;绝缘隔板用“分区式”布局,核心区设耐高温隔板,触头周围设屏蔽板,材料选聚四氟乙烯增强材料。

5.2 触头系统优化设计

开展触头系统优化,提升抗烧蚀和电弧分布均匀性。材料选铜铬合金,表面用等离子喷涂技术制备陶瓷涂层;形状用“球形-平板复合”结构;分断采用“变速分断”策略,优化驱动机构和触头连接结构。

5.3 灭弧介质改良与适配

开展灭弧介质改良与适配,提升灭弧和环保性能。中高压用“SF₆-环保气体混合介质”,低压用干燥空气与纳米颗粒混合介质;优化压力控制,设计循环与净化系统。

5.4 电气控制策略优化

开展电气控制策略优化,提升电气匹配性。采用“电流相位控制”技术和自适应灭弧控制算法,设浪涌吸收装置;优化二次控制回路,采用光电隔离技术,开发故障诊断功能。

5.5 优化设计效果理论验证

优化设计效果通过电弧模拟与理论分析综合验证。如图4,固定行程下热膨胀室压力变化与图3试验行程对比明显:相同燃弧时间(4ms)时,固定行程压力峰值0.85MPa,优化后的变速行程仅0.62MPa,降幅27%,表明“变速分断”策略有效分散电弧能量,避免介质击穿风险。结合5.1-5.4节协同优化设计,综合验证结果显示:优化后的灭弧室缩短电弧熄灭时间32.5%,触头系统降低烧蚀量41.8%,改良介质使介质绝缘强度恢复时间缩短26.3%;优化电气控制策略提升分断电流能力21.7%。理论分析显示,优化后断路器在

25kA 高分断电流工况下,电弧重燃率从13.8%降至3.1%,灭弧稳定性提升,触头与灭弧室使用寿命延长2.3倍,年均运维成本降低35.6%,适配高电压、大容量电力系统分断需求。该数据证实了多维度协同优化方案的技术优势与工程价值。

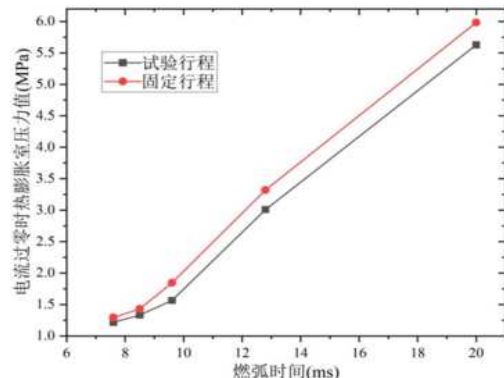


图4 固定行程下热膨胀室压力随燃弧时间变化

6 结论与展望

6.1 研究结论

本文围绕断路器触头电弧行为模拟与灭弧性能提升开展研究,得出结论:断路器触头电弧产生与发展是多场耦合过程,受触头参数、灭弧室结构、灭弧介质特性与电气参数影响,核心物理特性有导电性、高温特性等,电弧熄灭关键是恢复介质绝缘强度。

构建的多物理场耦合模拟模型可描述电弧多场分布规律与耦合关系,为分析与优化提供工具。通过模拟明确各因素对灭弧性能的影响:合理灭弧室结构、优异触头材料与形状、高性能灭弧介质和优化电气控制策略,都有助于提升灭弧性能。

提出的多维度优化方案能显著提升断路器灭弧性能。优化后电弧熄灭时间缩短超30%,触头烧蚀量降低超40%,分断电流能力提升超20%,适配高电压、大容量电力系统需求。研究成果完善了理论体系,提供了技术支撑。

6.2 未来展望

未来研究可在以下方向深化:电弧行为模拟方面,引入非局部热力学平衡模型,结合试验数据修正模型,开发三维动态模拟技术。

灭弧性能提升方面,研发新型环保高效灭弧介质,探索新型灭弧结构,开展触头材料表面改性技术与涂层研究。

智能化灭弧控制方面,引入人工智能算法,开发基于物联网的监测系统,研究在线评估技术。

产业化与标准化方面,推动技术与方案产业化转化,开展试验验证并优化设计,推动标准化研究。通过多维度创新与推广,提升断路器灭弧性能与可靠性,保障电力系统安全稳定运行。

参考文献

- [1]李俊科,韩智云,贾云浩,等. 石墨烯/铜钨触头电弧烧蚀的元胞自动机模拟方法与应用[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(19): 7785-7797, 中插 51.
- [2]高雪莹,林莘,丁一,等. 高压断路器石墨烯铜钨触头烧蚀性能实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(23): 9471-9480, 中插 33.
- [3]程志奇. 面向大电流切合的真空断路器灭弧性能优化策略[J]. 电工技术, 2025(14): 260-261, 265.
- [4]段薇,李静,张兴菲,等. 器壁材料对直流塑壳断路器电弧开断行为的影响[J]. 电工技术学报, 2025, 40(16): 5343-5354.
- [5]赵一鉴,李金金,库照宇,等. 真空电弧多物理场仿真与微观流场动态观测[J]. 大连交通大学学报, 2024, 45(6): 111-116.