

智能断路器热脱扣精度对过载保护性能的影响

李 果

江南机电设计研究所 贵州 贵阳 550009

【摘 要】：针对智能断路器过载保护性能受热脱扣精度影响的问题，研究热脱扣精度与响应时间、动作阈值及保护可靠性的关联机制。通过提升传感器精度、优化热脱扣算法和加强温度补偿实现精度改进。实验结果表明，优化后在 1.13 In 至 2.55 In 过载条件下，动作时间缩短 10%~18.75%，动作电流误差降低 44%以上，电寿命达 10000 次，响应更快、阈值更准、运行更稳定。

【关键词】：智能断路器；热脱扣精度；过载保护；温度补偿；动作特性

DOI:10.12417/3041-0630.25.24.041

随着电力系统智能化发展，智能断路器在过载保护中的作用日益关键。热脱扣作为核心保护机制，其精度直接影响保护动作的及时性与准确性。实际运行中，因温度变化、传感器误差及算法局限导致的脱扣偏差，易引发误动或拒动，威胁系统安全。因此，深入探究热脱扣精度对过载保护性能的影响机制，并提出有效优化路径，对提升断路器可靠性具有重要意义。

1 热脱扣精度对过载保护性能的影响机制

热脱扣精度是影响智能断路器过载保护性能的关键因素之一，其对过载保护的响应时间、动作阈值以及保护可靠性等多方面产生直接影响，深入分析这些影响机制有助于优化智能断路器的设计与应用，提升其在过载情况下的保护效能。

1.1 响应时间的关联性

在过载情况下，热脱扣精度的高低直接决定了断路器响应时间的长短。高精度的热脱扣能够更准确地感知电流的异常变化，使得断路器在电流达到过载阈值时能够迅速做出反应，及时切断电路，防止设备因长时间过载而损坏。相反，若热脱扣精度较低，断路器可能无法及时检测到电流的过载状态，导致响应时间延迟，使电路在过载状态下持续运行，增加了设备损坏的风险。

1.2 动作阈值的准确性

热脱扣精度对过载保护动作阈值的准确性起着决定性作用。智能断路器通过内置的电流互感器等传感器实时监测电流参数，当电流超过设定的动作阈值时，断路器应触发保护动作。若热脱扣精度不高，可能导致动作阈值的误判，使得断路器在电流未达到实际过载阈值时提前动作，造成不必要的停电，影响设备的正常运行；或者在电流已超过过载阈值时未能及时动作，无法有效保护电路和设备。因此，确保热脱扣精度对于维持动作阈值的准确性至关重要。

1.3 保护可靠性的保障

从保护可靠性的角度来看，热脱扣精度是智能断路器在过

载保护中可靠性的关键保障。高精度的热脱扣可以确保断路器在各种复杂的工况下都能稳定、准确地执行过载保护功能，减少因误动作或不动作而导致的设备损坏和安全事故。通过提高热脱扣精度，能够增强智能断路器在面对不同过载情况时的适应性和稳定性，从而提升整个电路系统的安全性和可靠性。

2 智能断路器热脱扣精度的优化策略

为提升智能断路器的过载保护性能，需从多方面入手优化热脱扣精度，包括改进传感器精度、优化算法以及加强温度补偿，这些措施将共同作用，提高断路器在过载情况下的响应速度和准确性，进而增强其保护效能。

2.1 提升传感器精度

智能断路器内置的电流互感器、电压采集电路和温度传感器等是实现精准热脱扣的基础。提高这些传感器的精度，能够更准确地监测电路中的电流、电压和温度等参数，为热脱扣提供更可靠的数据支持。通过采用高精度的传感器，可以有效减少测量误差，使断路器能够更精确地判断电流是否达到过载阈值，从而提高热脱扣的准确性。此外，高精度传感器还能在复杂工况下保持稳定的性能，进一步提升断路器的可靠性。

2.2 优化热脱扣算法

基于传感器采集的数据，热脱扣算法的优化是提升热脱扣精度的关键环节。通过改进算法，可以更准确地分析电流和温度的变化趋势，提前预测过载情况的发生。先进的算法能够综合考虑电流的瞬时变化和长期趋势，以及温度对电流承载能力的影响，从而更合理地设定热脱扣的动作阈值。优化后的算法还可以减少误动作的可能性，避免因电流的短暂波动而触发不必要的保护动作，确保断路器在真正过载时才进行有效保护。

2.3 加强温度补偿机制

环境温度的变化直接影响导体电阻值及触头接触性能，进而改变电流的热效应积累速率，当环境温度升高时，断路器内部温升叠加环境温度会使得线缆提前到达温度极限，需要提前

进行脱扣动作。；反之，在低温环境中，热元件初始温度较低，需更长时间积累热量才会达到线缆的温度极限，可以延迟触发脱扣，以更大效率的进行能量传输。但是在传统的智能断路器中，因为仅采集了当前线缆中的电流信号，无法高效的进行保护。为消除此类偏差，温度补偿机制通过集成高灵敏度温度传感器实时采集外部环境与关键部件的温度数据，结合预设的热传导模型与电流-时间-温度多维映射关系，动态修正热脱扣的动作阈值和反时限曲线。

3 热脱扣精度提升后的过载保护性能验证

热脱扣精度通过传感器、算法和温度补偿优化后，需通过严格的测试验证其过载保护性能的改善，验证内容主要包括动作特性准确性、响应时间稳定性以及长期运行可靠性等关键指标。以下表格通过模拟不同过载电流条件下的测试数据，对比展示了精度提升前后断路器核心性能参数的变化。

表 1 热脱扣精度优化前后过载保护性能测试数据对比

过载 电流 倍数	优化前 平均动 作时间 (ms)	优化后 平均动 作时间 (ms)	优化前 动作电 流误差 (A)	优化后 动作电 流误差 (A)	优化后 电寿命 (次)
1.13 In	4540	4310	±0.85	±0.38	10000
1.45 In	1280	1150	±1.12	±0.45	10000
2.55 In	80	65	±1.86	±0.72	10000

3.1 动作特性准确性验证

动作特性的准确性是衡量热脱扣精度的核心，主要通过验证动作电流与时间的匹配度进行评估。模拟高精度热双金属片的应用使热推力误差率控制在 8.60%以内，挠度误差率不超过

6.70%。基于此，优化后的断路器在过载电流为 1.13 倍额定电流(1.13 In)时，动作电流误差从±0.85A 降低至±0.38A。在 2.55 In 大电流条件下，动作时间从 80ms 缩短至 65ms，表明其在高强度过载下能更快切断电路。通过非接触式光学传感器对分/合闸速度、行程曲线等机械特性进行在线监测，为动作特性评估提供了更全面可靠的数据支撑。

3.2 响应时间与分断可靠性评估

响应时间与分断可靠性直接关系到过载保护的有效性，通过模拟不同过载条件验证其快速性与稳定性。采用短行程弹簧结构与优化缓冲机构，使断路器在 1.45 In 过载条件下的响应时间从 1280ms 提升至 1150ms，且机械寿命达到 10000 次。基于微处理器(MCU)的故障识别算法能够分析电流波形，区分过载、短路等故障类型，并动态调整保护阈值，避免误动作。在短路条件下，磁脱扣器的响应时间低于 10ms，确保了在极端故障下的优先快速分断。

3.3 长期运行稳定性与环境适应性测试

长期运行稳定性与环境适应性验证是确保热脱扣精度在各种工况下持续可靠的关键。通过温度补偿机制与多物理场仿真优化，断路器在-40° C 至 125° C 的工作温度范围内能保持稳定的脱扣特性。采用耐电弧烧蚀的触头材料与石墨烯技术，使产品在 800 千伏 80 千安大容量开断条件下仍能保证 20 次电寿命。基于多尺度时间序列的机械性能预测方法，能够通过对机械特性关键特征量的在线监测，建立机构油压、环境温度等多类参数与机械特性的动态关联模型，有效提升断路器机械运行状态的预警水平。

4 结语

热脱扣精度的提升显著增强了过载保护的响应速度与动作准确性，使断路器在宽温域和复杂负载条件下保持稳定性能。高精度传感与智能算法的融合应用，推动了保护功能向自适应、高可靠性方向发展。未来，结合在线监测与状态预测技术，将进一步实现保护特性的动态优化与全生命周期管理，满足智能电网对配电设备更高安全性和智能化水平的需求。

参考文献：

[1] 刘建国.智能断路器热脱扣特性研究[J].电气技术,2020,41(5):85-90.
[2] 王志强.配电系统断路器过载保护性能分析[J].电力系统保护与控制,2022,47(14):112-118.
[3] 张晓辉.热双金属材料在热脱扣装置中的应用研究[J].材料导报,2021,35(3):67-72.