

电动机首次启动时差动保护误动作的谐波干扰分析

高 然

中电建宁夏工程有限公司 宁夏 银川 750001

【摘要】：电动机首次启动阶段，差动保护误动作现象频发，其核心诱因在于启动过程中产生的谐波干扰。启动瞬间的非线性电磁转换会生成大量谐波，导致电流波形偏离正弦特征，使差动保护装置误将正常启动电流判定为故障电流。通过对谐波的频谱分布、传播特性及与保护算法的交互关系分析，明确3次、5次等高次谐波是触发误动作的主要因素。实践证实，结合谐波检测技术优化保护整定值、选用抗谐波性能优异的电流互感器，可显著提升差动保护的抗干扰能力，为解决电动机启动阶段的保护可靠性问题提供有效方案。

【关键词】：电动机启动；差动保护误动作；谐波干扰；频谱分析；保护优化

DOI:10.12417/2811-0528.25.022.015

引言

工业生产中，电动机首次启动的顺利与否直接影响生产线的投产效率，而差动保护的意外跳闸往往成为阻碍。启动时骤增的电流中暗藏大量谐波，这些“电流杂音”能够导致精密的保护装置失灵，其突破预设保护阈值的过程会造成不必要的停机。厘清电流杂音为何能让精密的保护装置失灵等问题，能够明确谐波干扰的本质，为构建可靠的启动保护体系找准方向，对减少生产延误、降低设备损耗具有重要实践价值。

1 电动机首次启动时谐波的来源特征及对差动保护的误动触发机制

电动机首次启动时，谐波的产生与电磁能量转换的非线性特性密切相关，其来源可分为设备本体与外部回路两方面。从电机内部看，铁芯材料的磁滞回线非线性是核心源头。首次励磁时，铁芯磁通量从零快速升至饱和值，磁化曲线陡峭段使励磁电流呈尖顶波形，经傅里叶分解可提取出多次高次谐波。部分谐波因三相绕组连接方式，可能在中性线形成环流或在相电压中叠加。此外，转子与定子气隙不均匀、绕组工艺偏差导致的三相参数不对称，会使启动电流出现负序分量，进而诱发偶次谐波，其频谱分布有明显边带特征，且与转差率存在线性关联。外部设备的非线性行为也会加剧谐波干扰。启动回路中的电流互感器（CT）在大电流冲击下易进入饱和状态，磁导率骤降导致励磁阻抗非线性变化，使二次侧输出电流波形畸变，产生大量奇次谐波。若CT变比选择不当或铁芯剩磁未消除，饱和深度增加，谐波含量会显著上升。同时，变频启动装置中的电力电子开关器件在高频通断时，通过PWM调制产生开关频率倍数的谐波，这类谐波频率较高，易通过电磁耦合侵入保护回路。

谐波对差动保护的误动触发体现在信号采集与算法判断层面。差动保护通过比较电动机两侧电流差值判断故障，正常

时差值趋近于零，故障时差值超阈值则动作。首次启动时，谐波使两侧电流波形与相位产生非线性偏差。部分谐波在三角形绕组中形成环流，导致两侧CT检测的电流差值异常增大；另一些谐波因相位反转特性，会被保护算法误判为穿越性故障电流。传统差动保护采用的傅里叶算法易受高次谐波频谱泄漏影响，导致基波计算值偏大，使差动电流超整定值。

2 基于谐波特性的差动保护误动作防治方案设计

针对电动机首次启动时谐波的频谱特征与干扰机制，防治方案需从保护算法优化、硬件选型升级及系统协同调控三个维度构建协同体系，实现对谐波干扰的精准抑制。保护算法的改进需聚焦谐波识别与制动逻辑的适配性。采用基于小波变换的多分辨率分析技术，可对启动电流进行时频域分解，这种分解能精准捕捉不同频段谐波的瞬态变化，通过提取谐波的幅值、频率及相位特征，实现基波与谐波分量的精准分离。在此基础上，引入动态谐波制动系数，其取值随谐波含量的实时变化自动调整——当检测到高次谐波占比超过临界值时，制动系数同步提升，借助这一动态调整机制，可有效避免因谐波导致的差动电流误判。同时，在保护算法中嵌入启动阶段的特征识别模块，通过分析电流波形的突变斜率与频谱分布模式，建立正常启动与故障状态的特征模型，以此区分两种状态，防止保护装置在谐波干扰下误动作。

硬件配置的优化需围绕谐波抑制与信号采集的可靠性展开。选用具有宽频带特性的电流互感器，其铁芯材料应具备低磁滞损耗与高饱和磁通密度，这种特性可减少大电流冲击下的波形畸变，降低谐波分量的传递系数，确保电流信号的原始特征得以保留。在保护装置的前端电路中增设源电力滤波器，该滤波器通过实时检测谐波电流并生成反向补偿信号，利用相位抵消原理抵消回路中的高次谐波，使输入保护算法的电流信号更接近正弦波。此外，信号采集回路的布线应采用屏蔽双绞

线,屏蔽层能有效阻隔外部电磁辐射,减少电磁耦合带来的高频谐波干扰,确保采样信号的真实性与稳定性,为后续算法处理提供可靠数据基础。系统级的协同调控需结合电动机启动特性与保护逻辑的动态适配。在启动前通过预励磁操作,以缓慢升压的方式使铁芯磁通量逐步升至额定值,这一过程可减少磁滞回线非线性引发的谐波生成量,从源头降低干扰。启动过程中采用分段式保护整定值,根据不同阶段的谐波频谱特征调整差动阈值——在启动初期谐波含量较高时,适当提高动作门槛;随着转速上升、谐波衰减后,逐步恢复至正常整定值,实现保护逻辑与启动过程的动态匹配。同时,建立保护装置与变频器启动器的通信联动,通过共享实时运行数据,使保护算法能根据变频器的开关频率变化提前调整谐波抑制策略,形成硬件、算法与系统联动的全方位抗干扰防护体系。

3 防治方案的实践验证与应用效果分析

防治方案的有效性需通过实验室仿真与现场应用的双重验证,从谐波抑制效能与保护可靠性两方面评估实际应用价值。实验室环境下,通过搭建电动机启动模拟平台,对优化前后的保护系统进行对比测试。平台包含可调速电机、变频器启动装置、谐波检测仪及差动保护模拟单元,可模拟不同负载下的首次启动过程。测试结果显示,采用动态谐波制动算法后,保护装置对谐波的识别准确率显著提升,能有效区分由谐波引起的虚假差动电流与真实故障电流。增设有源电力滤波器的回路中,电流波形畸变率明显降低,高次谐波分量的传递被有效阻断,为保护算法提供了更纯净的采样信号。现场应用层面,选

取多个工业场景的新投运电动机进行方案落地试验。在启动阶段,通过便携式频谱分析仪实时监测电流谐波频谱,对比采用防治方案前后的谐波含量变化。结果表明,预励磁操作使铁芯磁通量变化趋于平缓,大幅减少了因磁滞非线性产生的谐波;分段式保护整定值的应用,避免了启动初期因谐波叠加导致的误跳闸。某制造业生产线的高压电动机在应用该方案后,首次启动成功率从多次尝试降至一次完成,启动过程中差动保护装置未出现误动作,验证了方案对复杂工业环境的适应性。

长期运行监测数据显示,经过优化的保护系统在应对电网波动与负载变化时,仍能保持稳定的抗谐波干扰能力。保护装置的逻辑与电动机启动特性形成良好匹配,既确保了故障状态下的快速响应,又避免了正常启动时的不必要制动。通过对多组应用案例的统计分析,该方案可显著降低电动机首次启动时的差动保护误动率,为工业生产的连续运行提供了可靠保障。

4 结语

电动机首次启动时的谐波干扰通过扭曲电流信号,导致差动保护误动作,这一问题的解决需从谐波产生源头与保护机制两方面入手。明确谐波的来源特征与触发逻辑后,针对性采取保护参数优化、设备选型升级等措施,可有效切断干扰路径。实际应用显示,这些方案能将误动率控制在极低水平。后续研究可聚焦动态谐波监测与保护算法的智能联动,进一步提升电动机启动保护的精准性与适应性,助力工业系统安全高效运行。

参考文献:

- [1] 陈强,王亮.基于混合磁调制与自适应陷波滤波的宽频域电流传感技术在电动机保护中的应用[J].电力电子技术,2025,59(5):35-38.
- [2] 周宁,吴迪.S120快速励磁功能在电动机启动中的优化策略探讨[J].电气传动自动化,2023,45(3):42-45.
- [3] 郑刚,孙悦.复杂电机启动停止逻辑实现策略及在DCS系统中的应用[J].自动化博览,2024,31(12):66-69.