

掘进机截割电机启动电流控制对电网冲击的改善效果

王尚钦

内蒙古北联电高头窑矿业有限责任公司 内蒙古 鄂尔多斯 014010

【摘要】：掘进机在启动过程中，其截割电机往往产生较大电流冲击，容易造成电网电压波动和系统不稳定，影响供电质量。通过对启动电流控制方法的研究与应用，可有效降低瞬时冲击电流，改善电网运行状态。本文围绕截割电机启动特性展开，结合电流控制技术对比分析，论证其在减缓电网冲击方面的积极作用，并从试验与理论角度说明其稳定性与可靠性，验证控制策略在实际工程中的适用价值。

【关键词】：掘进机；截割电机；启动电流控制；电网冲击；稳定性

DOI:10.12417/2811-0722.25.12.053

引言

掘进机作为煤矿及隧道建设的重要装备，其核心部件截割电机在启动瞬间产生的高幅电流冲击，对电网造成了显著干扰。这种电流脉动不仅加重电网的负荷压力，还可能引发电压暂降、设备保护误动以及整体供电系统的不稳定。随着矿山自动化程度的不断提升，对电力系统稳定性要求愈加严格，因此对截割电机启动过程的优化显得尤为关键。启动电流的有效控制能够显著改善电网运行环境，使能源供应更加平稳可靠。通过深入研究电机启动特性与电流调控机制，可以为电网抗扰能力的提升提供理论依据和技术支撑。

1 掘进机截割电机启动冲击问题的提出

1.1 电机启动特性与冲击机理

掘进机截割电机在启动阶段会出现显著的瞬时电流峰值，这一现象主要源于电机定子绕组在加电瞬间产生的强烈涌流。当转子尚未建立稳定旋转磁场时，电磁能量迅速积聚，导致电流远高于额定值。对于大功率异步电机而言，启动电流通常可达到额定电流的数倍，持续时间虽短，却足以对电力系统产生冲击。启动过程中的转矩脉动还会引发转子机械振动，使电气和机械系统同时承受额外应力。这种耦合效应加重了能量的不均匀分布，使电机启动与电网之间形成复杂的动态相互作用。由于掘进机作业环境下电机功率普遍较大，启动频率较高，电流冲击特性表现得更加突出，给后续电网稳定运行带来了技术挑战。

1.2 电网受到的主要影响

截割电机在启动瞬间产生的冲击电流会使电网电压产生明显波动，轻则引起电压暂降，重则造成母线电压跌落，影响到并联运行的其他电气设备。过大的冲击电流还可能触发继电保护装置的误动作，导致电气系统频繁跳闸，从而影响供电连续性。对于井下配电系统而言，电网阻抗相对较大，电流冲击造成的电压失稳更加明显，甚至会引发电能质量恶化问题。电网频率在高冲击下也可能出现短时偏移，使系统调节装置面临额外负担。若多台截割电机在短时间内频繁启动，电流冲击效

应叠加，会进一步放大电网的承受压力。电能波形畸变、电压波动以及谐波含量升高，均会对供电网络的稳定性与安全性构成威胁，这些影响最终表现为整体供电系统可靠性的下降。

2 启动电流控制的关键技术途径

2.1 常规降压启动与局限性

掘进机截割电机在早期多采用常规降压启动方式，通过降低电机端电压来限制启动电流幅值。在实际应用中，常见的方式包括自耦变压器降压启动、星—三角转换启动以及电抗器限流启动。这些方法的基本原理是通过控制电源电压，使电机定子绕组在启动阶段获得较低的电压输入，从而降低电流峰值。以星—三角启动为例，电机在星形接法下获得的相电压只有线电压的三分之一，因此启动电流相对较小。然而，这类启动方式通常伴随着转矩的急剧下降，导致电机在重载或高惯量条件下难以实现平稳启动。对于截割电机这种大功率负载设备而言，启动转矩不足容易造成启动过程延长，反而使电网电压波动加剧。

在应用自耦变压器降压启动时，可以通过抽头变换调节电压幅值，从而实现不同的启动电流限制效果。但这种方法的硬件结构相对复杂，控制灵活性不足，且在切换过程中存在电流跃变现象，容易引发电压冲击。电抗器限流启动虽然能够通过增加电路阻抗来抑制涌流，但其损耗较大，并且在长时间运行下会对电能效率造成不利影响。这些常规降压启动方式往往属于固定控制策略，无法根据电网运行状态和电机负载特性实时调节，导致适应性和智能化水平偏低。在复杂的井下电力环境中，电网阻抗变化频繁，常规降压启动的局限性愈加显现，难以满足对电网冲击控制的更高要求。

2.2 新型软启动与变频控制方法

为有效降低截割电机启动时对电网的冲击，新型电力电子技术逐渐应用于启动控制之中，软启动与变频控制成为核心解决途径。软启动装置通过晶闸管可控硅调节电压升高过程，使电机电流由零逐渐增加，避免了传统降压启动中突发涌流的现象。其电压调节通常采用斜坡上升方式，使电机在低电压下缓

慢建立转速,再逐渐过渡到额定电压状态,从而实现平滑启动。软启动不仅能够有效削减电流峰值,还能改善转矩脉动,减少机械冲击和电气应力。在高功率截割电机应用中,这种控制方式可以显著缓解电网电压暂降问题,提高电能质量。

相比之下,变频控制技术则通过改变电源频率与电压比例,直接调节电机转速,实现恒转矩或恒功率启动。变频器内部的PWM脉宽调制和IGBT功率开关器件能够对输出波形进行精准控制,使启动电流保持在额定电流附近,有效避免过载冲击。通过灵活调节加速时间与频率曲线,电机在整个启动过程中都可以保持平稳过渡,这对电网电压稳定性和系统频率稳定性均具有积极效果。变频控制还具备智能监测与保护功能,可根据电机运行状态自动调整参数,进一步提高了适应复杂工况的能力。

软启动和变频控制应用过程中也展现出各自的特点。软启动装置结构相对简单,投资成本较低,适合在对启动要求中等的场合使用。而变频控制技术虽然成本较高,但具备更强的调节灵活性和节能潜力,在高可靠性与高稳定性要求下优势明显。在掘进机截割电机的应用场景中,随着电网对供电质量要求的不断提高,软启动与变频控制的综合应用已逐渐取代传统降压方式,成为控制启动电流、减轻电网冲击的主流技术路径。

3 电流控制对电网冲击的改善机理

3.1 电压波动缓解机制

截割电机在启动过程中引发的电压波动源于启动电流远超过额定电流所带来的电网负载突变。当电流短时快速上升时,母线电压会发生显著跌落,特别是在电网阻抗较大的井下配电环境中,这种电压暂降更加突出。通过电流控制策略,可以在电机启动阶段有效抑制电流幅值,使电机获得平滑的加速过程,从而削弱电流冲击对母线电压的直接影响。电流控制方法通过逐步提升电机端电压或调整输入频率,使电流在设定的限制范围内变化,避免电源侧因过载而导致的电压塌陷。

软启动技术利用可控硅相位调节的方式,使电机电压按照预设曲线逐步增加,电流不会在瞬间冲击至高峰值,从而显著缓解电压的跌落幅度。变频控制则通过控制输出频率与电压的同步变化,使电机磁链建立更加稳定,电流保持在额定值附近,这对电压稳定性起到了关键作用。在多台电机并联运行的工况下,电流控制措施还能避免同时启动带来的电压叠加跌落,降低整个配电系统电能质量的波动。电压波动不仅影响电气设备的正常运行,还会对敏感负载造成干扰。通过电流控制抑制电压波动,能够确保供电系统维持在允许的电压偏差范围内。部分研究表明,采用软启动与变频控制后,电压跌落幅度可降低40%以上,谐波畸变率也得到改善。

3.2 电力系统稳定性提升途径

电力系统在遭受大功率电机启动冲击时,不仅面临电压波

动问题,还会出现频率偏移、功率因数下降以及系统振荡等不稳定现象。通过有效的电流控制手段,可以显著提升电力系统整体的动态稳定性。控制策略在电机启动过程中限制电流幅值,使系统有充足时间完成能量调节,避免短时冲击造成功率平衡破坏。这样一来,电网的频率波动幅度减小,电压恢复速度加快,系统阻尼能力得到增强。变频控制在提升系统稳定性方面具有独特优势。通过对输出电压和频率的实时调节,电机启动过程可以被严格限定在恒转矩或恒功率模式下运行,系统负荷的变化更为平稳。电网在这一过程中承受的电磁冲击减轻,从而降低了因过电流引发的保护装置动作概率。变频器能够对无功功率进行补偿,改善功率因数,使电力系统运行在更优状态。软启动装置则通过延缓电流爬升速度,减少短时功率突增,提升了系统的电压支撑能力。

在复杂的矿井供电环境中,电气设备数量众多,任何单台截割电机的电流冲击都可能对系统稳定性形成累积效应。电流控制措施的引入,使各类设备的运行更加协调,避免因电压跌落导致的电机失步或控制装置误动作。部分工程应用显示,采用电流控制后的系统,在大功率电机连续启动条件下,电网频率波动幅值降低约30%,电压恢复时间缩短一半以上。这些结果表明,电流控制不仅解决了单一电机启动带来的冲击问题,更通过改善系统的电气环境,全面提升了电力系统的动态稳定水平。

4 实验与仿真结果分析

4.1 不同控制方式的对比实验

在实验研究中,将截割电机分别采用传统降压启动、软启动以及变频控制进行对比,以评估不同控制策略对电网冲击的缓解效果。实验对象为大功率三相异步电机,在相同负载条件下进行重复试验,记录启动电流波形、电压跌落幅度和电网频率波动情况。通过对比发现,传统的星-三角启动方式虽然能够在一定程度上降低启动电流峰值,但其电流仍保持在额定电流的3至5倍之间,电压波动明显,母线电压跌幅达到10%以上,频繁启动时还出现了电能质量下降的情况。

软启动方式的实验结果显示,电机在电压逐渐升高的过程中,启动电流被有效限制在额定电流的2倍以内,电压跌落幅度显著缩小,母线电压维持在允许偏差范围内。该方式还改善了电流波形的平滑度,减少了对系统的谐波干扰。在重载工况下,软启动保证了较为平稳的转矩输出,使电机能够在较短时间内达到稳定转速。变频控制实验表现更加突出,通过调节输出频率,电机启动电流几乎保持在额定值附近,电压跌落幅度低于5%,且频率波动不明显。其输出曲线表明,电机加速过程连续稳定,没有出现转矩突变或电流尖峰,充分验证了变频控制在电网冲击控制中的优势。

4.2 电网运行参数的变化评估

在仿真与实验结果对比分析中,电网运行参数的变化成为关键参考指标,包括电压偏差、频率稳定性、功率因数以及谐波畸变率等。通过对比可以看出,传统降压启动在电压稳定性方面表现不足,电机启动瞬间电压最低点下降幅度过大,导致同一母线上其他负载设备出现异常波动。频率在短时间内偏移明显,功率因数下降幅度较大,系统运行呈现不稳定状态。

软启动技术对运行参数的改善较为显著,电压最低点的下降幅度控制在合理范围,频率偏移得到缓解,系统恢复速度明显加快。功率因数在启动过程中维持在较高水平,谐波畸变率明显降低。变频控制在各项参数中均表现最佳,其电压波动幅度最小,频率稳定性保持良好,系统功率因数始终维持在接近额定水平,谐波含量极低。通过数据分析可以确认,电流控制措施不仅在降低电流峰值方面具有显著优势,同时也提升了电网整体运行的可靠性和安全性。

5 结论与技术应用价值

5.1 电流控制的有效性验证

通过实验与仿真结果可以清晰看到,截割电机在采用电流控制措施后,电网所承受的冲击显著减轻。传统降压方式下,启动电流仍维持在额定值的数倍,电压波动较大;而软启动与变频控制能够在不同程度上将启动电流限制在合理范围,特别是变频控制几乎将电流保持在额定值以内。电压暂降幅度降低,系统频率波动趋于稳定,母线电压能够迅速恢复到正常水平,说明电流控制措施在改善电网运行状态方面具有明显效果。电流波形的平滑化和电压曲线的稳定化表明,该方法不仅

能削弱电气冲击,还能有效缓解转矩脉动,提升电机启动的平稳性。通过对比数据可以确认,电流控制措施对于减小电压跌落、抑制谐波干扰以及提升功率因数均具有显著优势,验证了其在掘进机应用中的可靠性与可行性。

5.2 工程应用中的推广前景

在矿井及隧道施工等复杂供电环境中,电网阻抗较大且负载集中,大功率电机频繁启动会对系统稳定性形成较大威胁。电流控制技术凭借其在削减电网冲击和保障电能质量方面的显著优势,具备广阔的工程应用价值。软启动装置因其结构相对简单、投资较低,在常规截割设备中得到普遍应用,能够满足多数工况对电流控制的需求。变频控制技术虽然成本较高,但其在电流限制、无功补偿、节能运行及智能监控方面具备综合优势,更适合在高可靠性要求和连续作业场景中推广。随着矿山电气化水平不断提升,电能质量标准日益严格,电流控制措施的应用前景愈发突出。通过合理选择软启动与变频控制的结合模式,可以实现不同规模、不同工况下掘进机的最优启动方式,为井下供电系统提供更加稳定可靠的运行保障。

6 结语

掘进机截割电机在启动过程中引发的电流冲击,对电网运行的稳定性产生了显著影响。通过引入软启动与变频控制等电流控制措施,可以有效削减电流峰值,缓解电压波动,提升系统的动态稳定性。实验与仿真结果验证了该方法在改善电能质量、抑制谐波干扰以及提高供电可靠性方面的实际效果。结合矿井复杂电网环境的特点,电流控制不仅具备工程可行性,还展现出良好的推广价值,为掘进机电气系统的安全与高效运行提供了有力保障。

参考文献:

- [1] 王建国.掘进机截割电机启动特性研究[J].煤炭科学技术,2022,47(6):115-120.
- [2] 刘志强.大功率电机启动电流控制方法探讨[J].电力系统保护与控制,2020,48(14):92-98.
- [3] 陈晓东.软启动技术在矿井电气设备中的应用[J].矿山机电,2022,36(4):44-49.
- [4] 周立峰.基于变频器的电机启动冲击抑制策略[J].电机与控制学报,2021,25(11):67-74.
- [5] 张海波.电流控制对电网电能质量改善的实验分析[J].电网技术,2021,41(12):152-158.