

地铁供电系统电压波动与闪变控制策略

章 滨

福州地铁集团有限公司运营事业部 福建 福州 350011

摘要：随着城市轨道交通的迅猛发展，地铁供电系统的稳定性和电能质量对于确保地铁运营的安全、高效以及乘客的舒适度至关重要。特别是在AC 10kV或DC 1500V高压供电环境下，由地铁列车频繁启停引起的冲击性负荷导致的电压波动与闪变问题尤为突出。本文深入分析了地铁供电系统中电压波动与闪变的具体成因，重点探讨了针对地铁列车频繁启停这一根本性问题的控制策略，旨在为地铁供电系统的优化设计和实际运营提供切实可行的解决方案。

关键词：地铁供电系统；电压波动；电压闪变；冲击性负荷；控制策略

引言

地铁供电系统作为城市轨道交通的核心组成部分，其稳定性和电能质量直接关系到地铁列车的平稳运行和乘客的乘坐体验。在AC 10kV或DC 1500V的高压供电环境中，地铁列车频繁启停产生的冲击性负荷是导致电压波动与闪变的主要原因。因此，研究并实施有效的控制策略来抑制这种电压波动与闪变，对于提升地铁供电系统的整体性能和可靠性具有重要意义。

1 电压波动与闪变的成因分析

地铁供电系统中电压波动与闪变的现象，其根源确实深植于地铁列车的频繁启停操作之中。为了更深入地理解这一现象，可以从电动机的冲击性负荷特性、供电系统的响应特性以及对地铁列车和其他设备的影响三个方面进行更为具体和详细的分析。

1.1 电动机的冲击性负荷特性

启动阶段的详细分析：地铁列车在启动阶段，电动机需要克服列车的静摩擦力和加速阻力，因此会瞬间从供电系统中吸收巨大的电能。这一过程中，电动机的电流会急剧增加，形成所谓的“启动电流冲击”。根据欧姆定律，电流的增加会导致供电线路上的电压暂降，这种暂降的幅度和持续时间与列车的启动特性、供电系统的阻抗以及负荷情况紧密相关。电压暂降不仅会影响列车的启动性能，还可能对供电系统中的其他敏感设备（如信号设备、通讯设备等）造成干扰或故障。

制动阶段的详细分析：在制动阶段，列车通过电动机的再生制动将动能转化为电能回馈给供电系统。然而，如果供电系统（特别是直流供电系统）中的电能无法被及时吸收或转移，就会导致局部电压升高，形成“过电压”现象^[1]。过电压不仅可能损坏列车的电气设备（如绝缘材料、电容器等），还可能对供电系统中的其他设备（如变压器、开关设备等）造成损害或引发保护装置

的误动作。

1.2 供电系统的响应特性

自动调节机制的局限性：地铁供电系统通常设计有自动调节机制（如自动电压调节器、无功补偿装置等）以应对负荷的变化。然而，这些机制在面对列车频繁启停造成的快速负荷变化时，可能无法及时、准确地作出反应。特别是当多个列车在同一时间段内集中启停时，冲击性负荷的叠加效应会使得供电系统的自动调节机制更加难以应对，从而导致电压的波动和闪变加剧。

系统稳定性的挑战：电压波动和闪变会直接影响供电系统的稳定性。一方面，它们可能导致供电系统中的设备（如变压器、开关设备等）承受额外的应力，加速设备的老化和损坏；另一方面，它们还可能引发供电系统的振荡或失稳现象，对地铁列车的正常运行构成严重威胁。

1.3 对地铁列车和其他设备的影响

对列车运行性能的影响：电压过低可能导致列车动力不足，无法按预定速度加速或保持运行速度，从而影响地铁的运营效率和乘客的出行体验。电压过高则可能损坏列车的电气设备（如牵引电机、控制电路板等），导致列车故障或停运。此外，电压波动还可能引起列车控制系统的误动作或不稳定运行，对列车的安全构成威胁。

对其他设备的详细影响：供电系统中的变压器、开关设备、电缆等也可能因电压波动和闪变而承受额外的应力。例如，变压器可能因过电压而损坏绕组或绝缘材料；开关设备可能因电压波动而误动作或损坏触点；电缆则可能因长期承受电压波动而老化、破裂或引发火灾等安全事故。此外，电压波动和闪变还可能对地铁车站的照明设备、信号设备、通讯设备等造成干扰或故障，影响地铁的正常运营和乘客的安全。

2 电压波动与闪变的检测方法

2.1 调幅波检测

调幅波检测是提取电压波动信号的关键技术之一，它基于波动电压可以被视为一种特殊的调幅波的原理。在这种调幅波中，工频额定电压作为载波，而电压波动分量则作为调制信号，其频率范围通常在0.05~35Hz之间。为了准确地检测出这个波动分量，研究者们开发了多种波动电压检出方法。其中，平方解调检波法是一种常用的方法。它首先将电压信号进行平方处理，然后利用解调技术提取出波动分量。全波整流检波法则是通过全波整流的方式，将电压信号中的负半周翻转为正半周，再经过滤波处理得到波动分量。而半波有效值检波法则是只取电压信号的正半周或负半周进行计算，得到其有效值作为波动分量的度量^[2]。这些方法各有优缺点，选择哪种方法取决于具体的应用场景和检测要求。但它们的共同目标是准确地提取出电压波动分量，为后续的分析和处理提供可靠的数据支持。

2.2 闪变值的获得

在获取了电压波动信号之后，下一步是计算闪变值。闪变值是用来衡量电压闪变对人眼视觉刺激程度的一个指标。为了得到准确的闪变值，需要根据人眼视感度曲线进行相应的处理。人眼视感度曲线反映了人眼对不同频率的电压波动的敏感程度。在低频段，人眼对电压波动的敏感程度较高；而在高频段，敏感程度逐渐降低。因此，在计算闪变值时，需要对电压波动信号进行加权处理，以模拟人眼的视感度特性。国际电工委员会（IEC）给出了检测电压闪变的设计规范，其中推荐了带通和视感度加权滤波器的方法。带通滤波器用于滤除电压信号中的高频噪声和低频干扰，保留与闪变相关的频率成分。而视感度加权滤波器则根据人眼视感度曲线对保留的频率成分进行加权处理，得到最终的闪变值。通过这种方法，可以准确地计算出电压闪变对人眼视觉的刺激程度，为评估地铁供电系统的电能质量和制定改善措施提供重要的依据。

3 地铁供电系统电压波动与闪变的控制策略

3.1 强化列车启停管理

首先，可以采用先进的列车自动监控系统（ATS）和列车自动控制系统（ATC），实现列车运行的实时监控和自动调度。通过智能算法分析列车运行状态和客流情况，自动调整列车运行速度和停靠时间。智能调度系统应具备故障预测和应急响应功能，当供电系统出现故障或电压波动异常时，能够迅速调整列车运行计划，避免列车因供电问题而频繁启停。在智能调度系统的基

础上，保留一定的人工干预权限。当系统出现异常情况或需要特殊调度时，调度员可以根据实际情况进行人工调整，确保列车运行的安全和顺畅。通过培训和演练提高调度员的应急处理能力和协同工作效率，确保在紧急情况下能够迅速响应并做出正确决策。其次，利用大数据分析技术，对地铁线路的客流数据进行深入挖掘和分析。通过了解乘客的出行规律、高峰时段、热门站点等信息，为列车运行图的优化提供数据支持。根据客流分析结果，合理安排列车发车间隔和停靠站点，避免在客流低谷时段列车空载运行，减少不必要的启停。建立实时客流监测和反馈机制，根据地铁站点的实际客流情况，动态调整列车运行图。例如，在突发大客流情况下，可迅速增加列车频次，缩短发车间隔，以满足乘客出行需求。此外，可以建立监测与评估体系。在地铁供电系统和列车上安装电压、电流等监测设备，实时监测供电系统的电压波动和闪变情况以及列车的运行状态和参数。通过对监测数据的分析和处理，评估列车启停管理策略的效果以及供电系统的稳定性和可靠性。根据评估结果对策略进行持续优化和改进。

3.2 采用无功补偿装置

无功功率的变动是导致电压波动与闪变的重要因素。为了有效改善和抑制这种现象，维持系统的无功功率平衡成为关键。在此背景下，无功补偿装置的应用显得尤为重要。静止无功补偿器（SVC）是一种先进的无功补偿装置，它能够根据系统无功功率的需求进行自动补偿。SVC通过调节其内部的可控电抗器和电容器，实现无功功率的快速补偿，从而稳定系统电压。SVC具有响应速度快、补偿精度高等优点，适用于各种复杂的电力系统环境。有源电力滤波器（APF）是另一种有效的无功补偿装置。与SVC不同，APF不仅能够补偿无功功率，还能够对谐波进行抑制。它通过向系统注入与谐波电流相反方向的电流，实现谐波的消除，从而改善电压质量。APF具有高度的灵活性和适应性，能够根据系统的实际需求进行精确控制。无功补偿装置的应用能够显著提高地铁供电系统的功率因数，降低线路损耗，改善电压质量。通过自动补偿无功功率，这些装置能够有效地抑制电压波动与闪变，提高供电系统的稳定性和可靠性^[3]。同时，它们还能够延长电气设备的使用寿命，降低维护成本，为地铁的安全运营提供有力保障。在实施无功补偿装置的策略时，需要对地铁供电系统进行全面的分析和评估。根据系统的实际需求和负荷特性，选择合适的无功补偿装置类型和容量。同时，还需要对装置的安装位置、运行方式等进行优化设计，确保装置能够充分发

挥其补偿效果。通过科学合理的配置和运行管理，无功补偿装置将为地铁供电系统的稳定运行提供有力支持。

3.3 加强供电系统保护

为了确保地铁供电系统在电压波动发生时能够保持稳定，并迅速、准确地应对各种异常情况，加强供电系统保护显得尤为重要。首先，应设置完善的电压保护装置。这些装置包括过电压保护器、欠电压保护器等，它们能够在电压波动超出设定范围时迅速动作，切断故障电路，防止设备受损。过电压保护器通常采用限流、分压等原理，将过高的电压限制在安全范围内；而欠电压保护器则能够在电压过低时切断电路，保护设备免受低电压的冲击。其次，加强供电系统的继电保护也是关键。继电保护装置能够检测供电系统中的各种故障，如短路、断路等，并在故障发生时迅速动作，切除故障部分，保证系统的正常运行。为了提高继电保护的准确性和可靠性，应采用先进的保护算法和高质量的保护设备，确保在电压波动等异常情况下能够正确动作^[4]。此外，还应加强供电系统的监测和预警机制。通过实时监测供电系统的电压、电流等参数，及时发现异常情况，并采取相应的措施进行处理。同时，建立完善的预警机制，能够在电压波动等异常情况发生前进行预警，为处理故障争取宝贵的时间。

3.4 优化供电系统结构

优化供电系统结构是提高地铁供电系统可靠性和稳定性，减小电压波动和闪变发生概率的重要手段。首先，采用双回路供电是一种有效的优化措施。双回路供电意味着为每个供电区域或重要设备提供两条独立的供电线路。当其中一条线路发生故障时，另一条线路可以迅速切换并承担全部负荷，从而确保供电的连续性。这种结构不仅提高了供电系统的冗余度，还减小了因单一故障导致的电压波动和闪变。其次，合理设计主站主变压器的分接头数量也是优化供电系统结构的关键。主变

压器是供电系统中的核心设备，其分接头的数量和位置直接影响到供电电压的稳定性和调节能力。通过合理设计分接头数量，可以确保在不同负荷条件下，主变压器都能够提供稳定的输出电压，从而减小电压波动和闪变的发生概率。此外，优化供电系统结构还包括合理选择电缆截面、优化供电半径、提高设备绝缘水平等措施。这些措施可以有效地降低供电系统的阻抗和损耗，提高供电电压的质量，进一步减小电压波动和闪变的发生概率。优化供电系统结构是提高地铁供电系统可靠性和稳定性，减小电压波动和闪变发生概率的重要措施。通过采用双回路供电、合理设计主站主变压器的分接头数量以及合理选择电缆截面等措施，可以有效地提高供电系统的稳定性和可靠性，为地铁的安全运营提供有力保障。

结语

地铁供电系统电压波动与闪变对地铁电气设备的正常运行和乘客的舒适度具有显著影响。通过采用强化列车启停管理、采用无功补偿装置、加强供电系统保护和优化供电系统结构等控制策略，可以有效抑制电压波动与闪变，提高地铁供电系统的稳定性和电能质量。未来，随着技术的不断进步和地铁交通系统的快速发展，地铁供电系统电压波动与闪变的控制策略将进一步完善和优化。

参考文献

- [1]欧家宝.地铁低压配电系统电压波动应对措施[J].门窗,2019,(12):237.
- [2]李惠萍.城市地铁低压配电网电压波动分析与仿真研究[J].信息技术,2021,(08):161-166.
- [3]李琪菡,张德银,罗英,等.地铁功率波动的概率分布特性分析[J].电测与仪表,2020,57(03):26-31+45.
- [4]陈志健.巴基斯坦拉合尔橙线地铁供电电压波动处置研究[J].现代城市轨道交通,2022,(12):101-106.