

地铁供电系统电能损耗分析与节能降耗技术实践

蒋威

徐州轨道交通运营有限公司, 中国·江苏 徐州 221000

摘要: 在节能减排背景下, 国家大力倡导公共出行, 地铁作为公共交通的重要组成部分, 具有准点率高、占地面积少、运量大等优势, 不仅能够为公众的出行提供便利保障, 同时还有效缓解了路面交通拥堵问题。在整个地铁系统中, 供电系统电能消耗量较大, 积极推进节能降耗措施, 有利于满足国家可持续发展要求。下文首先从地铁供电系统各环节的电能损耗分析入手, 随后讨论了地铁供电系统的节能降耗技术, 仅供参考。

关键词: 地铁工程; 供电系统; 节能降耗

Power loss analysis and energy saving technology practice of metro power supply system

Jiang Wei

Xuzhou Rail Transit Operation Co., Ltd., China Jiangsu Xuzhou 221000

Abstract: In the context of energy conservation and emission reduction, the state vigorously advocates public travel. As an important part of public transport, the subway has the advantages of high punctuality, small floor area and large traffic volume, which can not only provide convenience for public travel, but also effectively alleviate the problem of road traffic congestion. In the whole metro system, the power consumption of the power supply system is large. Actively promoting energy conservation and consumption reduction measures is conducive to meeting the requirements of national sustainable development. The following article starts with the analysis of the power loss of each link of the subway power supply system, and then discusses the energy saving and consumption reduction technology of the subway power supply system, for reference only.

Keywords: Subway engineering; Power supply system; Energy saving

0 引言

在社会经济快速发展, 公众生活水平逐步提升的背景下, 私家车数量日益增多, 同时交通拥堵问题更为严重, 为缓解公众的出行压力, 地铁逐步成为现阶段人们出行所选择的主要方式。为了全面提升地铁项目的建设和运营效率, 需积极推进地铁供电系统节能降耗策略, 以实现降低运营成本、保护生态环境的发展目标。

1 地铁供电系统各环节电能损耗分析

1.1 牵引网环节电能损耗分析

牵引网损耗主要与结构参数、运行条件、供电方式等息息相关。从结构参数方面来看, 截面面积以及导线材质决定牵引网阻抗。截面越大导电率越高, 同时损耗越低, 特别是在投入使用年限久远的线路, 导线截面偏小, 存在磨损老化问题, 无形中增加了整体损耗。另外, 现有的回流系统以走行轨为主, 阻抗较大, 在增加损耗的同时还可能产生杂质、杂散电流问题。从运行条件方面来看, 牵引网损耗与负荷电流及其平方成正比相关关系而列车运行速度、

载客量、行车密度等又会影响负荷电流, 特别是在高峰运营时段损耗明显增多, 环境温度的升高必将造成导线电阻的增大, 在夏季更为明显。从供电方式方面来看, 牵引网损耗与供电臂长短息息相关, 单边供电损耗高于双边供电损耗, 但双边供电方式的保护配置相对复杂。

1.2 牵引变电所环节电能损耗分析

牵引变电所的电能损耗与整流变压器和整流器件息息相关, 其中整流变压器的损耗又涉及铁耗、铜耗两种。投入年限较久的变压器铁芯材质较差, 在低负载运行的情况下, 铁耗占总损耗比例七成以上, 对于整流器件来说, 自身损耗较低, 特别是现代 24 脉波整流机组的效率能达到 98% 以上, 损耗占比却不足 15%。从运行方式层面来看, 若变压器数量过多, 则会出现单台变压器负荷率偏低的情况, 使变电总损耗升高 30% 以上。

1.3 列车牵引系统环节电能损耗分析

列车牵引系统的损耗主要来自牵引电机和牵引变流器。传统异步电机存在励磁铜耗, 该部分损耗占电机总损

耗的 30%–40%，低速轻载工况下电机效率低于 85%。牵引变压器采用 IGBT 器件后，效率提升至 97% 以上，但老旧变压器产品的效率比新型产品低 5%–8%。制动方式层面，电阻制动会直接浪费制动能量，再生制动可回收 20%–30% 的制动能量，不过再生制动的能量回收率受行车密度影响，行车密度越低，能量回收率也越低。

1.4 低压配电系统环节电能损耗分析

降压变压器和配电电缆与低压配电系统的损耗息息相关。其中变压器损耗主要涉及铜耗和铁耗两种，前期设计的变压器存在容量偏大的情况，运行阶段负载率低于 30%，其中的铁耗总占比超过 70%，影响了整体运行效率。另外接入低压配电系统的各类设备自身运行都会产生不同程度的损耗，其中环控通风制冷系统是低压配电系统中能耗占比最高的部分，涵盖冷水机组、冷却泵等多类大功率设备，受地铁地下运营的环境要求限制，该系统需长时间连续运行，传统变频模式下，即便环境温度变化或客流降低，设备仍维持固定功率运行，产生了大量不必要的能耗。与此同时，照明系统损耗也不容忽视，所有地铁车站都位于地下，全区域需采用人工照明且 24 小时不间断运行，传统低效光源如白炽灯发光效率较低，大部分电能都转化为热能散失，加之部分线路未采用智能控制，非运营区域仍保持满负荷照明，进一步增加了照明损耗。

门梯系统损耗：每个地铁站都配置多台自动扶梯、客梯和站台屏蔽门，自动扶梯在非高峰时段客流量极小甚至长时间无乘客乘坐时依然保持额定转速运行，屏蔽门频繁开关也会产生一定的能耗累积，这类设备不合理运行带来的损耗占比逐步提升。

变压器损耗：降压变电所的配电变压器在将中压转换为低压的过程中，会产生铁损（空载损耗）和铜损（负载损耗），如果变压器选型不合理、长期处于轻载或者过载运行状态，都会额外增加变压器的电能损耗。

2 地铁供电系统节能降耗措施

2.1 优化系统设计，从源头降低损耗

系统设计是决定地铁供电系统能耗水平的源头，在设计阶段进行合理优化，可以在不增加太多建设成本的前提下，从源头降低运营阶段的能耗，获得长期的节能收益。

首先，进行牵引变电所布点与容量的合理规划。分析牵引供电系统的功能需求以及供电可靠性，以此为基础，与线路客流分布、站间距离等特点相结合，确定牵引变电所的具体位置，尽可能实现牵引变电所的均匀分布，避免使用过长的供电臂，将牵引网的阻抗以及电能损耗降至最

低。与此同时，预测远期客流情况，科学配置牵引变压器的容量，将正常运行模式下变压器的负载率保持在 40%–70% 之间，避免因容量过大造成空载损耗问题，或者因容量不足造成过载损耗增加。

其次，实施牵引网结构的优化设计。设计牵引网的过程中，应尽量采用电阻率低、导电性能好的接触网材料，并通过增加导体截面积的方式，将牵引网的固有阻抗降至最低。另外，设置走行轨的均流线，减少回流系统的阻抗，降低牵引网的回流损耗。比如说，在沙尘较多的区域，需使用抗污染、腐蚀性强的接触网材料，将环境因素的不良影响降至最低。

最后，优化线路纵断面设计。列车牵引能耗问题与线路坡度息息相关，在上坡期间，列车需额外消耗能量，在下坡阶段制动能也随之增加。为此，就需要做好设计阶段的优化处理，减少线路的大坡度路段，并科学控制平均坡度，最大化降低列车牵引能耗。而针对既有线路来讲，可结合坡度的实际情况，进行列车运行策略的优化，在下坡段保持惰行，以减少列车能耗。

2.2 推进设备升级改造，提升设备能效

设备的能效水平直接决定了能耗的高低，对既有高能耗设备进行升级改造，选用高效节能设备，是降低供电系统损耗最直接有效的手段。

首先，变压器和电缆的优化选择。变压器是牵引变电所与低压配电系统的核心能耗设备，传统变压器的能耗较高，将其更换为能效比大于 0.98 的节能型变压器，相同负载下能耗可降低约 20%，满载运行时损耗仅为传统变压器的 60%，短期即可通过节能收益回收改造成本。针对早期建成的线路，可结合设备大修计划，逐步替换传统高能耗变压器，降低变电环节损耗。在进行电缆选型的过程中，需正视传统老旧电缆中所存在的不足，尽量选择低电阻率、高导电性能的新型电缆，以降低线路传输损耗。相关研究表明，使用新型电缆后，列车线路损耗可有效降低 15%，以年为单位进行估算，省电量可达到 10 万千瓦，并且此类电缆的耐热性能和抗老化性能更强，不仅可以延长设备的使用寿命，同时有效提升了系统的安全性和可靠性。

其次，进行列车牵引系统的升级处理。对于使用异步牵引电机的既有线路，在实施车辆大修时需逐步做好更换处理，使用永磁同步牵引系统，不仅可将异步电机的励磁损耗消除，还能降低牵引能耗 10%–20%。此类方式虽然一次性改造成本较高，但后续收益极为可观，特别是在运营年限较长并且还存有一定剩余使用寿命的线路中较

为适用。与此同时,科学应用VVVF交流变频变压传动系统,以弥补传统变阻调压系统中所存在的不足,避免调速过程中的能耗浪费。

再次,优化车辆选型,降低车辆自重。新建线路优先选用铝合金车体的地铁车辆,相比传统钢制车体可降低车辆自重10%-20%,有效降低牵引能耗,同时还能减少轮轨磨损,降低维修成本,改善列车运行品质,减少振动噪声,提升乘客体验。推广采用动拖混合编组模式,结合线路运行速度、站间距等条件,选择合理的动拖比,在满足牵引性能的前提下降低能耗。

最后,进行再生制动能量回收利用系统的升级。现阶段,我国部分地铁线路的再生制动能量回收率急需提升,应积极组织再生制动系统的升级改造工作,借助加装储能装置、逆变回馈装置等方式,将所回收的制动电能应用于电网或者存储再利用,在日积月累中具有重要的节电作用。同时,在供电系统条件允许的情况下,可选择逆变回馈型再生能量回收装置,实现回收电能向中压电网的直接传输,为车站其他设备的使用提供电能支持,进一步保证了能量的高效利用。

2.3 优化运行策略,降低运营过程能耗

在不改变现有设备的前提下,通过优化运行策略,可以实现零成本或低成本节能,节能收益十分可观,是目前既有线路节能的重要手段。

首先,进行列车运行图和驾驶策略的优化调整。在地铁列车运行过程中,加速行驶、巡航行驶、惰行行驶、制动行驶等不同阶段的能耗差异显著。运行图设计需根据实际情况增加自然惰行区段,借助列车惯性减少不必要的加速制动,具有降低牵引能耗的重要作用。我国使用此方法的案例众多,通过优化运行图的方式可在不涉及任何设备投入的情况下,降低列车公里牵引能耗,节能作用不言而喻。与此同时,还需进行自动列车运行系统控制参数的调整,以线路不同区段的路况、限速、坡度等条件为依据,制定科学的加减速策略,提前预判弯道、道岔等需要减速的区段,避免无效加速后再进行紧急制动,促进能耗的降低。

其次,进行低压配电系统运行策略的调整。在地铁车站中,照明、空调、通风等设备所需要的能源消耗占总能耗的二至三成。利用智能监控系统,可根据具体的客流情况,进行照明、通风等设备运行状态的自动化调整,分区开启相应设备,节省电能消耗。与此同时,根据电网峰谷电价和负荷需求实施分段供电策略。特别是针对照明、空

调等负荷设备,此种供电策略的运用可有效降低电网高峰时段的设备出力,将负荷转移至低谷时段,在减少电网峰值损耗的同时,还具有节约电费支出的重要作用。目前,在地铁线路供电方式选择阶段,可灵活应用集中供电与分散供电相结合的策略,保证供电的可靠性,并最大化降低线路损耗。

最后,优化列车运力匹配。根据不同时段的客流预测,合理安排发车密度,避免高峰期运力不足、平峰期运力过剩的情况,平峰期适当增大行车间隔,减少不必要的列车运行,降低总能耗。同时,做好列车载重管理,合理安排车底运用,避免过度编组造成的载重浪费,进一步降低单位运量的能耗。

2.4 搭建智能化能源管理系统,提升精细化管理水平

智能化能源管理系统是实现节能降耗的重要工具,通过对全系统能耗数据的实时监测、分析与优化,可以挖掘潜在的节能空间,实现精准节能。

首先,搭建具有数据采集、数据处理、能源分析、能源优化等功能的能源管理系统,实时采集、牵引供电设备不同环节的能耗数据,利用算法分析识别具体的能耗异常情况以及节能空间,并自动生成优化策略,为供电设备的动态化调整提供支持。通常此种管理系统的运用能够节约整体能源15%左右,节能作用显著。比如说地铁车站通过与智能供电系统相结合,不仅能够拓展能源管理功能,还可以实时监测牵引网牵引变电所、列车等具体环节的能耗情况,配合构建能耗考核指标体系,以车辆公里牵引能耗为核心,分析比对不同线路、时段的能耗情况,根据所预测的高能耗环节,展开针对性的运行优化和节能改造。

其次,大力推广人工智能节能技术的运用。对于车站环控等辅助用电系统,灵活应用混合模型和人工智能算法的智能节电系统,并在固定的间隔时间段内完成关键参数的全局寻优,实现对地铁车站空调、通风、照明设备等参数的动态调整,在考虑乘客日常出行舒适需求的前提下,将能耗降至最低。特别是此类技术的应用无需涉及大范围的设备改造,只需进行部分软件算法的增加就能实现升级,在保证正常运行的同时,节能潜力巨大,改造成本投入较低。另外,智能化能源管理系统在与虚拟电厂技术结合运用的过程中,可参与电网需求侧响应,借助削峰填谷的方式降低电网损耗,并获得相应需求响应收益,有效提升系统的节能经济效益。

2.5 推广应用新能源,构建绿色供电体系

在“双碳”目标背景下,推广应用可再生能源,逐

步优化地铁供电的能源结构，是实现地铁低碳运营的长期方向。

首先，可利用地铁车站、车辆段、停车场的屋顶、地面空间建设分布式光伏发电项目，将太阳能转化为电能，供车站照明、空调、扶梯等设备使用，减少对市政电网电能的消耗。

其次，积极落实光储直柔新型配电系统的推广应用。为确保新能源的就地消纳，实现能源的高效利用，需要将光伏发电储能系统与配电系统相结合，并灵活应用智能节能控制系统，实现对电网的需求侧响应，在降低能耗的同时减少碳排放量。必要时，还可从光伏、风电等可再生能源基地直接购电，实现牵引供电的源头零碳化，为我国地铁项目的全面绿色转型提供支持。

3 结语

总之，在城市交通工程建设水平逐渐提升的过程中，轨道交通运营规模日益扩大，所存在的能源消耗问题备受关注。为满足国家节能减排要求，需积极推进地铁供电系统的电能损耗分析工作，并制定科学的节能降耗策略，灵活应用先进的技术措施，在保证地铁运行稳定性的同时，降低整体能源消耗。特别是在智能化技术和新能源技术不

断优化的过程中，地铁供电系统的节能技术将逐步朝着先进方向迈进，为地铁行业实现国家“双碳”目标提供重要的技术支持。

参考文献：

- [1] 曹思聪. 地铁供电系统节能降耗技术实践探究[J]. 建筑工程技术与设计, 2023, 11(21): 111-113.
 - [2] 荀径, 赵娇, 孙玉霖等. 基于数据挖掘的城轨系统电能消耗模式分析[J]. 北京交通大学学报, 2020, 44(5): 8-16.
 - [3] 赵智军. 地铁供电系统节能降耗技术应用研究[J]. 电工技术, 2025(1): 70-72, 78.
 - [4] 吴凡. 地铁供电系统节能降耗技术应用研究[J]. 城市建筑空间, 2021, 28(S1): 257-258.
 - [5] 徐艳. 地铁低压供电系统节能降耗策略研讨[J]. 通讯世界, 2024, 31(6): 88-90.
 - [6] 袁传祥. 地铁低压配电系统节能降耗技术分析与应用[J]. 科学与信息化, 2024(18): 172-174.
- 作者简介：蒋威（1991.04-），男，汉族，安徽宿州人，大学本科，中级职称，研究方向：城市轨道交通供电系统。