

doi: 10.3969/j.issn.1672-6073.2025.02.016

地铁车站直流照明系统集中整流方案研究

刘雅杰¹, 余 龙²

(1. 广州市扬新技术研究有限责任公司, 广州 510540; 2. 广州白云电器设备股份有限公司, 广州 510460)

摘要: 传统地铁车站直流照明系统分散整流方案存在系统供电可靠性较低、系统电源效率偏低、不便于设备的统一维护和电能质量的统一治理以及配电线电缆损耗和电缆造价可进一步降低等缺点或不足。为了解决上述问题, 提出地铁车站直流照明系统集中整流方案。分析地铁车站直流照明系统分散整流方案的系统架构、方案的现状和不足; 介绍集中整流方案的系统架构、直流电源配置、方案对现有系统的改动范围、系统关键配置; 依据具体工程应用数据, 详细对比两种整流方案的系统损耗、系统造价、系统谐波含量和系统运行可靠性。研究结果表明, 集中整流方案的馈电线电缆用量比分散整流方案少, 其系统造价更有优势; 集中整流方案的馈电线电缆损耗比分散整流方案低, 系统电源效率比分散整流方案高, 电源模块的运行工况更好, 其系统稳定性更优, 系统谐波含量更低, 因此集中整流方案更适用于地铁车站直流照明系统。

关键词: 地铁车站; 直流照明系统; 分散整流; 集中整流

中图分类号: U231

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2025)02-0111-08

Research on Centralized Rectification Scheme for DC Lighting System in Metro Station

LIU Yajie¹, YU Long²

(1. Guangzhou Yangxin Technology Research Co., Ltd., Guangzhou 510540;

2. Guangzhou Baiyun Electrical Equipment Co., Ltd., Guangzhou 510460)

Abstract: The existing decentralized rectification scheme for direct current (DC) lighting systems in metro stations faces several challenges, including low power supply reliability and efficiency, high cable costs, significant distribution losses, and difficulties in unified equipment maintenance and power quality management. To address these issues, this paper proposes a centralized rectification scheme for metro station DC lighting systems. The study begins with an analysis of the system architecture, current status, and limitations of the existing decentralized scheme, followed by a detailed presentation of the proposed centralized solution, including its system architecture, DC power supply configuration, key components, and required system modifications. A comprehensive comparison between the two schemes is conducted using actual engineering data, focusing on system losses, costs, harmonic content, and operational reliability. The results demonstrate that compared to the decentralized scheme, the centralized rectification scheme requires less feeder cable usage and achieves lower system costs. It also shows significant improvements in reducing cable losses, increasing system power efficiency, and decreasing harmonic content. Furthermore, the power modules in the centralized scheme operate under more favorable conditions, leading to enhanced

收稿日期: 2024-03-04 修回日期: 2024-07-11

第一作者: 刘雅杰, 男, 本科, 助理工程师, 主要从事轨道交通低压直流供电系统设计与技术研究, liuyj@bpgroup.com.cn

基金项目: 广州市重点研发计划科技专项项目(2024B03J1379)

引用格式: 刘雅杰, 余龙. 地铁车站直流照明系统集中整流方案研究[J]. 都市轨道交通, 2025, 38(2): 111-118.

LIU Yajie, YU Long. Research on centralized rectification scheme for DC lighting system in metro station[J]. Urban rapid rail transit, 2025, 38(2): 111-118.

system stability. Based on these advantages, the centralized rectification scheme proves to be a more suitable solution for DC lighting systems in metro stations.

Keywords: metro station; DC lighting system; decentralized rectification; centralized rectification

直流照明系统是指进行直流供配电的照明系统,系统主要由直流电源、配电线路、直流断路器、低压直流保护装置和末端 LED 灯具负荷等组成。其中,直流电源可由现有的交流电源经整流变换装置变换得来,也可通过分布式能源(如光伏、储能等)的接入转换而来。直流照明系统和传统交流照明系统相比,直流配电不存在相序问题,无需考虑交流配电系统中各相功率平衡的要求,且配电只需两芯线缆,可使照明系统的架构得到简化;直流配电没有线路电抗损耗,也不传输无功功率,直流照明系统损耗会较交流照明系统小,系统电能质量也更优^[1];直流照明系统架构下,LED 灯具驱动电源内部可去除 AC/DC 整流单元电路,驱动电源的电解电容容易损坏的问题可得到解决^[2],使得驱动电源的寿命延长,进而可减少灯具驱动电源的备品备件库存需求,相应的维护工作量也可减少。

目前,因直流照明系统较交流照明系统更具优势,且随着电力电子技术和低压直流配电技术的快速发展,直流照明系统已经在国内部分城市的地铁线路中有了成功应用案例^[3-5],如在太原地铁、宁波地铁、苏州地铁、深圳地铁、上海地铁、合肥地铁等线路中都有应用。在上述应用中,地铁车站直流照明系统的整

流电源模块采用高频开关电源,照明电压等级采用 DC 220 V,整流电源设置方案采用在照明配电室的各照明配电箱中分散设置若干个小容量的高频开关电源模块(简称“分散整流方案”)。而通过相关应用案例的研究发现,分散整流方案存在系统供电可靠性较低、系统电源效率偏低、不便于设备的统一维护等缺点,系统架构和配电线缆损耗及电缆造价可进一步简化等缺点或不足^[4-5]。

地铁车站直流照明系统的整流电源设置方案,除了分散整流方案外,也可选择在变电所 0.4 kV 开关柜室内配置大容量的高频开关电源柜对各照明负荷进行集中整流^[4](简称“集中整流方案”)。目前,集中整流方案已经在其他行业有成功应用案例,但其尚未在地铁车站中应用。

鉴于此,本文通过分析现有的地铁车站直流照明系统分散整流方案,结合现有技术提出了地铁车站直流照明系统集中整流方案,以解决目前分散整流方案存在的不足。

1 地铁车站直流照明系统分散整流方案现状

地铁车站直流照明系统分散整流方案系统架构如图 1 所示,在车站照明配电室的各照明配电箱中分散

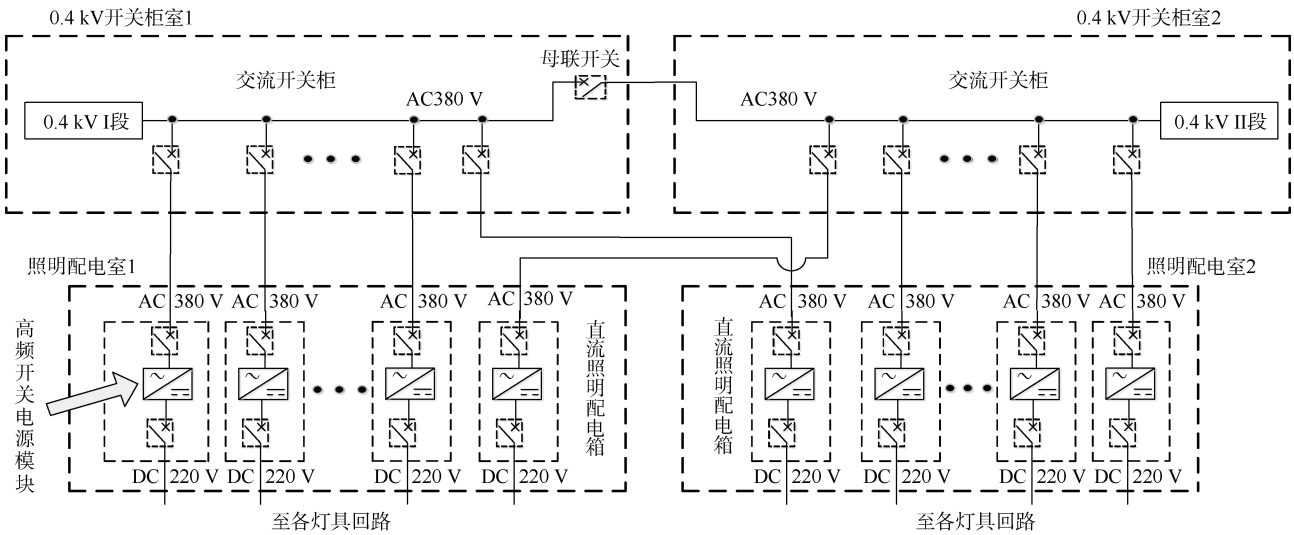


图 1 地铁车站直流照明系统分散整流方案系统架构

Figure 1 System architecture of decentralized rectification scheme for DC lighting system in metro station

设置了若干个高频开关电源模块,用以将变电所 0.4 kV 开关柜室馈出至照明配电室的 AC 380 V 电源整流转换成 DC 220 V, 然后各照明配电箱再将 DC 220 V 电源馈至各灯具回路。

分散整流方案对地铁车站照明配电系统的改动较小, 主要变化有: 各照明配电箱中增设了若干个高频开关电源模块、其箱体体积需加大并改为直流类型、各照明配电箱馈至末端灯具的电源改为直流以及照明配电室的土建和通风措施可能需要变动, 而 0.4 kV 开关柜室的土建和室内变配电设备以及 0.4 kV 开关柜室馈电至各照明配电室的电缆配置等均未发生变化。

在研究中发现, 地铁车站直流照明系统分散整流方案存在一些不足, 主要如下:

1) 系统可靠性较低: 在分散整流方案中, 高频开关电源模块按各照明配电箱进行设置, 其配电灵活性较高、故障影响范围较小。但在常规设计中, 地铁车站照明配电室的空间较狭小、通风条件较差^[4], 不利于高频开关电源模块散热, 模块运行工况较恶劣, 使得模块在工作中因热量积累而易出故障导致退出运行, 进一步降低了系统的可靠性。

2) 不便于设备的统一维护和系统电能质量的统一治理: 在分散整流方案中, 根据数量众多且分散设置在各照明配电箱中的高频开关电源模块, 需相应设置的系统运维监控点数量多、主控制系统后台采集的

数据量大、现场运维人员的检修工作量大等, 同时, 系统需配备的电能质量治理装置(有源滤波装置等)也多。

3) 系统效率偏低: 系统中分散配置了大量小功率的高频开关电源模块, 其模块整流效率普遍较低^[6](考察了市场上主流产品, 基于成本考虑, 大多数小功率开关电源器件工作在硬开关状态, 同时, 其器件选型和内部电路设计及控制策略并不满足效率最优目标), 进而导致整个系统的效率偏低。

4) 配电线缆损耗、电缆造价可进一步简化或降低: 在分散整流方案中, 0.4 kV 开关柜室馈电至各照明配电室中各照明配电箱的电缆仍为交流 4 芯电缆。

2 地铁车站直流照明系统集中整流方案

2.1 系统架构

地铁车站直流照明系统集中整流方案系统架构如图 2 所示。因地铁车站照明系统中公共区照明为一级负荷、设备区照明为二级负荷、广告照明为三级负荷, 为了保障相应等级照明负荷的供电可靠性, 参照以往相关工程案例设计和相关规范^[7-8], 同时考虑系统后期的扩展和高频开关电源模块的故障影响范围等因素, 在集中整流方案中, 在 0.4 kV 开关柜室 1 和 2 内会分别配备 2 套高频开关电源柜。室内其中一套高频开关电源柜用作公共区照明负荷整流用, 另一套用作设备区照明和广告照明两种负荷整流用。高频开关电源柜将照明负荷的 AC 380 V 电源集中整流转换成 DC 220 V,

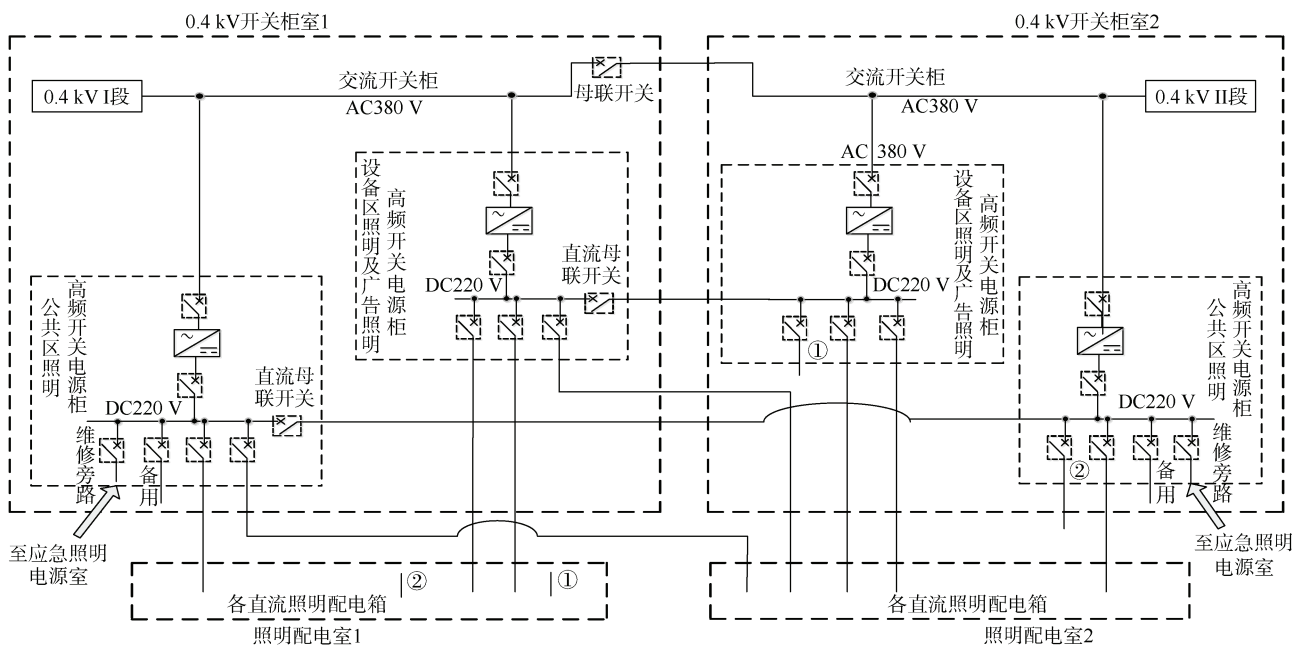


图 2 地铁车站直流照明系统集中整流方案系统架构

Figure 2 System architecture of centralized rectification scheme for DC lighting system in metro station

然后将 DC 220 V 电源馈出至各照明配电室的各照明配电箱中,最后再由照明配电箱馈电至各灯具回路。其中,公共区照明高频开关电源柜中可预留一路馈线用作应急照明负荷的维修旁路。

集中整流方案对地铁车站照明配电系统的改动较大,主要变化有:0.4 kV 开关柜室内增设了两面大容量的高频开关电源柜、0.4 kV 开关柜室馈电至各照明配电室的电源由 AC 380 V 改为 DC 220 V、照明配电箱改为直流类型、各照明配电箱馈至末端灯具的电源改为直流等。

而就常规地铁变电所设计,0.4 kV 开关柜室内会预留一定的空间,在其中增加少量柜体,不需要进行土建改动;室内配备的空调系统能解决大功率高频开关电源模块的散热问题,模块运行工况良好不易出故障;模块集中设置,便于统一运营、维护、管理及电能质量的集中治理^[5]。照明负荷集中整流后,0.4 kV 开关柜室馈电至照明配电室的各回路电缆芯数可由 4 芯减少为 2 芯,其中,电缆截面可与原交流电缆保持一致或稍微增大^[9],可大大减少电缆的投资。

地铁车站直流照明系统集中整流方案和分散整流方案相较于原交流照明系统方案的变动对比明细如表 1 所示。

表 1 集中整流方案与分散整流方案相较于原交流照明系统的变动点明细

Table 1 Comparison of system modifications between centralized and decentralized rectification schemes versus original AC lighting system

变动点	原交流照明系统	分散整流方案	集中整流方案
0.4 kV 开关柜室	—	无变动	增设高频开关电源柜
0.4 kV 开关柜室馈至各照明配电箱的电缆配置	每回路 4 芯电缆	无变动	每回路电缆芯数减少 2 芯,电缆截面规格不变或稍微增大,传输电能改为直流
照明配电室	—	需扩大室内面积,增加通风及散热措施,照明配电箱需改动	土建无变动,照明配电箱需改动
照明配电箱	箱内器件为交流类型,无电源模块	箱内器件改为直流类型,增设电源模块,箱子体积增大	箱内器件改为直流类型,无电源模块,箱子体积不变
配电箱至灯具的馈线回路	传输 AC 220 V 电源	传输 DC 220 V 电源	传输 DC 220 V 电源

2.2 系统直流电源配置

在集中整流方案中,为了保障相应等级照明负荷的供电可靠性,参照以往相关工程案例设计和有关规范,同时考虑系统后期的扩展、高频开关电源模块的故障影响范围及模块的均流问题,照明负荷的高频开关电源模块可按“用二备一”冗余原则进行配置^[7,9]。以某地铁标准车站为例,该车站传统交流照明配电方案中,各 0.4 kV 开关柜室内的照明负荷回路明细如表 2 所示。结合表 2 中数据可推断集中整流方案中各照明负荷的高频开关电源模块配置,明细如表 3 所示。经技术比选,方案设计选定了 15 kW、22 kW 两种功率等级的高频开关电源模块,则地铁车站直流照明系统集中整流方案共需在 0.4 kV 开关柜室内配置 222 kW 容量的高频开关电源模块。

表 2 原交流照明方案 0.4 kV 开关柜室照明负荷回路明细
Table 2 Lighting load circuit distribution of 0.4 kV switchgear room in the original AC lighting scheme

设备房	照明抽屉回路	回路容量/kW	馈线走向
0.4 kV 开关柜室 1	站厅 A 端公共区照明总箱 1	15	照明配电室 1
	站厅 B 端公共区照明总箱 2	10	照明配电室 2
	站台 A 端公共区照明总箱 1	8	照明配电室 1
	站台 B 端公共区照明总箱 2	6	照明配电室 2
	A 端设备区照明总箱 1	5	照明配电室 1
	B 端设备区照明总箱 2	5	照明配电室 2
0.4 kV 开关柜室 2	A 端广告照明总箱	15	照明配电室 1
	站厅 B 端公共区照明总箱 1	10	照明配电室 2
	站厅 A 端公共区照明总箱 2	15	照明配电室 1
	站台 A 端公共区照明总箱 2	8	照明配电室 1
	站台 B 端公共区照明总箱 1	6	照明配电室 2
	B 端设备区照明总箱 1	5	照明配电室 2
	A 端设备区照明总箱 2	5	照明配电室 1
	B 端广告照明总箱	15	照明配电室 2

表 3 集中整流方案高频开关电源模块配置明细

Table 3 Configuration specifications of high-frequency switching power supply modules in centralized rectification scheme

设备房	照明负荷回路	回路容量/kW	高频开关电源配置/kW	备注
0.4 kV 开关柜室 1	公共区照明	39	66	3 个 22 kW 模块
	设备区照明	10		
	广告照明	15	45	
0.4 kV 开关柜室 2	公共区照明	39	66	3 个 22 kW 模块
	设备区照明	10		
	广告照明	15	45	

2.3 系统关键配置

2.3.1 直流母联开关

在集中整流方案中,高频开关电源柜馈线端的直流母线上可配置直流母联开关,在系统正常运行时处于合闸状态,用以联络两个 0.4 kV 开关柜室同类别高频开关电源柜的输出,使系统中两个直流电源点共同向直流母线供电。这可解决由于高频开关电源模块的容量限制,当系统中某处(如直流照明配电箱处)发生短路故障时,系统可能无法提供足够的短路容量产生足够驱动相应节点直流断路器断开的持续电流,进而导致故障未得到有效处理的问题^[9],提高系统的电源可靠性和供电能力。其中,直流母联开关的选型可与高频开关电源柜直流总馈线开关一致。直流母联开关的配置重点主要是和与高频开关电源柜直流总馈线开关和分馈线开关的保护动作配合。

2.3.2 系统分级保护保障措施

地铁车站直流照明系统集中整流方案一般为 4 级低压直流配电架构,含高频开关电源柜的直流总馈线开关和分馈线开关,以及直流照明配电箱的直流进线开关和各灯具支路的分馈线开关。在项目研究和工程实施中发现,因高频开关电源柜的直流总馈线开关、分馈线开关和直流母联开关器件,甚至是直流配电箱的直流进线开关的动作电流值较高(超过两个直流电源点的输出电流之和),当系统中相关节点发生短路故障时,可能出现即使直流母联开关联络两个直流电源点为短路点提供较大的短路电流也跳不开相应节点直流断路器的情况,不能实现高频开关电源柜的直流总馈线开关、分馈线开关和直流母联开关等直流开关的正确动作,不能满足系统分级保护的需求。

在工程实施中可采取在相应的直流断路器中加装分励脱扣线圈,并配以 PLC 装置或继电保护装置,通过霍尔传感器和继电保护装置采集到相应节点的电量变化值(一般为 di/dt 信号),再通过装置预设的控制逻辑驱动相应的直流断路器分励脱扣线圈动作,实现系统中各级直流开关的正确动作。

另外,高频开关电源模块内部半导体器件的关断时间是微秒级的,在直流断路器还未切除系统短路电流时,模块会自行关闭并造成全系统失电。因此,模块的内部电路设计和优化显得极其重要,其限流和稳流时间要能支撑系统中相关节点断路器的正确动作。

2.3.3 更多负荷供电可靠性保障措施

系统中配备的智能照明控制系统(如直流电力载

波通信照明控制系统),在系统发生极度严重的故障时,如通过直流母联开关联络的两个同类别高频开关电源柜中的大部分模块因故障退出运行时,系统电源不足以支撑所有照明负荷的供电需求,照明控制系统会检测并下发控制指令到单灯控制器将下属控制的所有灯具的亮度调暗,以保证系统电源的供应,而不至出现系统全失电的现象。

0.4 kV 开关柜室中其中一台高频开关电源柜是给设备区照明负荷和广告照明负荷共同供电用的,而广告照明负荷的负荷重要性会更低,当系统出现故障时,可通过高频开关电源柜预设的控制逻辑切除广告照明负荷的馈线开关,以保证设备区照明负荷的供电可靠性。

3 方案分析与对比

3.1 系统损耗

地铁车站直流照明系统的损耗主要来自直流断路器、配电线缆、高频开关电源 3 个部分的损耗,其中,直流断路器的损耗数值较低,可忽略其影响。

3.1.1 系统配电线缆损耗

两种整流方案配电线缆损耗量的主要区别在于,在集中整流方案中,0.4 kV 开关柜室至各照明配电箱的馈电回路电缆芯数由 4 芯减少为 2 芯,其电缆型号和配电距离 L 未发生改变,电缆截面可与原交流电缆保持一致或稍微增大^[9]。仍以上文中提到的某地铁站数据为例,其原交流照明方案 0.4 kV 开关柜室馈电至各照明配电箱的回路电缆明细及改为集中整流方案后电缆变化明细如表 4 所示。

表 4 0.4 kV 开关柜室至各照明配电箱的馈电回路电缆明细
Table 4 Feeder cable specifications from 0.4 kV switchgear room to lighting distribution boxes

电缆起点	电缆终点	原交流 电缆规格	直流电缆 规格方案	配电 距离/m
0.4 kV 开关 柜室 1	站厅 A 端公共区照明总箱 1	4×35+1×16	2×50	329
	站厅 B 端公共区照明总箱 2	4×25+1×16	2×35	182
	站台 A 端公共区照明总箱 1	4×25+1×16	2×35	310
	站台 B 端公共区照明总箱 2	4×25+1×16	2×35	179
	A 端设备区照明总箱 1	4×25+1×16	2×35	334
	B 端设备区照明总箱 2	4×25+1×16	2×35	185
0.4 kV 开关 柜室 2	A 端广告照明总箱	4×35+1×16	2×50	336
	站厅 B 端公共区照明总箱 1	4×25+1×16	2×35	184
	站厅 A 端公共区照明总箱 2	4×35+1×16	2×50	331
	站台 A 端公共区照明总箱 2	4×25+1×16	2×35	327
	站台 B 端公共区照明总箱 1	4×25+1×16	2×35	187
	B 端设备区照明总箱 1	4×25+1×16	2×35	196
	A 端设备区照明总箱 2	4×25+1×16	2×35	335
	B 端广告照明总箱	4×35+1×16	2×50	192

在电缆额定运行工况下，忽略电能质量及绝缘介质等因素的影响^[10]，配电电缆的损耗主要取决于电缆线芯电阻的大小，线缆损耗公式如下。

直流系统(单级接线)线路损耗公式为：

$$P_{\text{line,DC}}(t) = \frac{P_{\text{DC}}(t)^2}{U_{\text{DC}}^2} r_{\text{DC}} L \quad (1)$$

交流系统(三相系统)线路损耗公式为：

$$P_{\text{line,AC}}(t) = \frac{P_{\text{AC}}(t)^2}{U_{\text{AC}}^2 \text{COS}^2 \phi} r_{\text{AC}} L \quad (2)$$

其中， $U_{\text{DC}}=220 \text{ V}$ ，为直流单级电压； $U_{\text{AC}}=380 \text{ V}$ ，为交流线电压；交流系统功率因数 $\text{COS}\phi$ 取 0.9； r_{AC} 为分散整流方案中 0.4 kV 开关柜室馈电至各照明配电箱的线缆电阻； r_{DC} 为集中整流方案中 0.4 kV 开关柜室馈电至各照明配电箱的线缆电阻；因末端灯具照明负荷的实际功率不会改变，即 $P_{\text{DC}}=P_{\text{AC}}$ 。

由上述公式及表 1 和表 4 的数据可推，0.4 kV 开关柜室至各照明配电箱的馈电线缆损耗为：分散整流方案中 $P_{\text{line,AC}}=2.5715 \text{ kW}$ ；集中整流方案， $P_{\text{line,DC}}=1.806 \text{ kW}$ 。则集中整流方案与分散整流方案的线缆损耗比值为

$$\frac{P_{\text{line,DC}}}{P_{\text{line,AC}}} \approx 0.7023。$$

即直流照明系统电压等级选 DC 220 V，同时，直流电缆的规格截面较原交流电缆增大时(在预算可控范围内)，集中整流方案的线损要比分散整流方案的低，集中整流方案的线损仅占分散整流方案的 70%。考虑到交流电缆存在线路电抗损耗和因集肤效应存在集肤电阻等因素，两种整流方案的线损差距可进一步增大。

同时，若是将直流照明系统的电压 U_{DC} 提高至 375 V，对标交流 380 V 电压等级，则由交直流系统线路损耗之比

$$\frac{P_{\text{line,AC}}}{P_{\text{line,DC}}} = \frac{U_{\text{DC}}^2}{U_{\text{AC}}^2 \text{COS}^2 \phi} \times \frac{r_{\text{AC}}}{r_{\text{DC}}}$$

可知， $P_{\text{line,DC}}$ ，即集中整流方案的线损将进一步缩小。

3.1.2 高频开关电源损耗

分散整流方案中，高频开关电源模块按各个照明配电箱的容量进行配置，其单个照明配电箱的容量较小，方案中选用的模块主要为小功率级别。集中整流方案中，高频开关电源模块按若干个照明配电箱的总容量进行配置，方案中选用的模块功率级别会较分散整流方案的大。

查阅市场上主流的高频开关电源产品，在单瓦功

率级别价格相当条件下，大功率的高频开关电源模块其内部电路设计和采用的元器件种类(功率开关管采用碳化硅功率 MOSFET，高频整流电路中使用的二极管为快恢复二极管等)使得其效率普遍比小功率的高^[11]。

表 5 为以往工程供货中某厂家的 6 kW 和 22 kW 两种功率等级的高频开关电源模块的实测效率明细。其中，测试过程中保持模块恒定额定电流输出，调节负载按 10% 的量级阶梯从 50% 逐渐加到满载测算的负载变化过程中高频开关电源模块的效率。

表 5 某厂家 6 kW 和 22 kW 两种功率等级的高频开关电源模块实测效率明细

Table 5 Measured efficiency of 6 kW and 22 kW high-frequency switching power supply modules from a manufacturer

模块 功率级别	效率/%					
	50% 负载	60% 负载	70% 负载	80% 负载	90% 负载	100% 负载
6 kW	86.5	86.9	87.9	90.6	91.1	91.7
22 kW	87.7	88.3	88.9	91.3	92.9	93.5

实际工程配置时，高频开关电源模块并不会满功率输出，由表 5 可知，模块效率以 70% 负载率进行选择，其中，6 kW 功率级别的高频开关电源模块的效率为 87.9%，22 kW 功率级别的高频开关电源模块的效率为 88.9%。由变换器的损耗公式 $P_{\text{损耗}}=P_{\text{功率}} \times (1-\eta_{\text{效率}})$ 可知，同样容量配置下，集中整流方案的高频开关电源损耗要比分散整流方案的低。

3.2 系统谐波含量差异

在地铁车站直流照明配电系统中，两种整流方案都会配置相应数量和规格的高频开关电源模块，而高频开关电源模块因内部电路结构与功率半导体元器件的特性等因素，导致在电源模块工作时会产生调制谐波、交流电网不平衡和奇次谐波流入直流侧产生直流电压谐波的现象^[12]；同时，由于直流配电系统的惯性比较低，源荷的功率波动或投切都容易导致系统直流电压产生非周期性的波动^[12]，进而影响整个系统的稳定工作。

以上文提到的地铁车站照明系统的数据和配置为例，在厂内搭建两种测试系统，分别模拟直流照明系统的集中整流方案和分散整流方案，具体结果和测试系统描述如表 6 所示。

表6 两种整流方案的系统谐波含量测量
Table 6 Measured harmonic content comparison
between two rectification schemes

方案	不同时刻下的系统谐波含量/%			平台概况
	测试数据 1	测试数据 2	测试数据 3	
集中整流	17.3	15.6	14.9	系统配备了 1 台 66 kW 的高频开关电源柜, 柜内含 3 个 22 kW 的模块
分散整流	18.5	19.7	17.5	系统分散配备了 6 个高频开关电源模块, 分别为 2 个 6 kW、2 个 11 kW、2 个 15 kW

其中, 测试中选用的高频开关电源模块为以往工程供货中某厂家的 6 kW、11 kW、15 kW、22 kW 四种功率等级; 系统使用的交流电源为同一个; 负载为 LED 灯具。

由表 6 中数据可知, 集中整流方案的谐波含量比分散整流方案的略低。但是, 值得注意的是此为厂内测试环境, 其系统条件工况较优, 而实际现场各个高频开关电源模块的运行情况较复杂, 不会时刻保持恒定理想状况, 并且各模块对系统的影响可能会出现叠加或抵消等不确定情况(即因谐波的相位, 会出现分散整流方案的系统谐波含量比集中整流方案低的情况)^[13]。笔者将持续关注和跟进地铁车站直流照明系统集中整流方案现场的运行和实测数据。

3.3 系统运行可靠性

地铁车站直流照明系统分散整流方案的高频开关电源模块均分散设置于各照明配电室的各直流照明配电箱中, 其配电灵活性较高、故障影响范围较小。但是, 地铁车站照明配电室的常规设计中, 其室内的空间较狭小、通风条件较差、并且位于地下, 这不利于高频开关电源模块的散热, 尤其是夏天整体温度较高, 使得高频开关电源模块在运行中因硬件散热不畅而易出故障导致模块退出(尤其是模块内部电路的控制芯片等器件, 热量积累导致器件损坏, 模块的控制逻辑等运行策略不能继续实施), 这反而降低了整个直流照明系统的运行可靠性。

集中整流方案的高频开关电源模块统一集中设置在 0.4 kV 开关柜室, 地铁车站 0.4 kV 开关柜室的常规设计中, 室内空间较大且室内配备的空调系统能解决大功率电源模块的散热问题, 使得高频开关电源模块的运行工况良好, 不会出现因硬件散热不畅而容易出现模块故障退出的问题。

同时, 在集中整流方案中, 当柜中多个高频开关电源模块因故障退出运行时, 为了保障重要负荷及重要照明区域的可靠供电, 可采取以下措施: 通过高频开关电源柜系统微处理器中预设的控制逻辑切除广告照明负荷甚至是部分次要回路或冗余回路的直流馈出断路器, 通过联络两个 0.4 kV 开关柜室高频开关电源柜的输出使得两个直流电源点共同向系统中的直流照明负荷供电, 通过智能照明控制系统降低灯具的亮度而减少系统电源功率需求, 这些措施可提高系统的电源可靠性和供电能力。

在集中整流方案中, 整个直流照明系统的运行可靠性比分散整流方案的高。

3.4 系统造价

地铁车站直流照明系统集中整流方案和分散整流方案的主要成本差异体现在高频开关电源模块容量、配电线缆用量和直流开关器件等方面。

1) 高频开关电源造价差异。仍以文中该地铁车站数据为例, 基于和集中整流方案高频开关电源容量一样的配置原则考虑, 则由表 1 可知, 分散整流方案共需配置 258 kW 容量的高频开关电源模块; 而集中整流方案配置了 222 kW 容量的高频开关电源模块。按 3 000 元/kW 的容量市场均价计算, 集中整流方案需花费 66 万元, 分散整流方案需花费 77.4 万元, 则集中整流方案可比分散整流方案节省 11.4 万的高频开关电源造价。

2) 配电线缆造价差异。两种整流方案的配电线缆用量差异在于 0.4 kV 开关柜室至各照明箱的馈线电缆, 两种整流方案的线缆用量、电缆规格由表 4 可知, 其电缆型号为 WDZB1-YJY 型。按以往工程项目造价计算, 0.4 kV 开关柜室至各照明配电箱的馈线电缆, 分散整流方案需花费 46.027 万元, 集中整流方案需花费 29.173 万元, 则集中整流方案可比分散整流方案节省 16.854 万元的配电线缆造价。

3) 开关器件造价差异。直流开关器件主要设置于高频开关电源柜内和照明配电箱中, 两种整流方案相比, 集中整流方案中多了 4 个高频开关电源柜中的直流总馈线开关和 16 个直流分馈线开关, 以及两种方案中照明配电箱的进线开关有交、直流类型的区别, 则集中整流方案在开关器件上的费用比分散整流方案多约 5 万元。

综上所述, 地铁车站直流照明系统集中整流方案可比分散整流方案节省 23.254 万元。单个地铁车站站

点节省约 25 万元, 整线推广的经济效益非常可观。

4 结束语

为了解决现有分散整流方案存在的不足, 如系统供电可靠性较低、系统电源效率偏低、不便于设备的统一维护, 以及简化系统架构和降低配电线缆损耗及电缆造价, 提出了地铁车站直流照明系统集中整流方案, 并从系统架构、系统电源配置、相较于原交流系统的变动范围、系统造价、系统损耗、系统运行可靠性、系统谐波含量等进行详细论述。研究发现, 在集中整流方案中, 地铁车站的系统损耗、系统造价、系统运行可靠性等要比分散整流方案更具优势。其中, 若将地铁车站直流照明系统的电压等级提高至 DC 375 V, 集中整流方案的配电线缆损耗可进一步降低。

国内应用的地铁车站直流照明系统尚无采用集中整流方案, 可借鉴的案例不足, 对于两种整流方案的系统谐波含量、电压偏差等关键电能质量参数对比及采用了集中整流方案的地铁车站直流照明系统的实际运行效果, 今后还需进一步深入研究和进行现场实际工程测试。

参考文献

- [1] 王德发, 秦岭. 城市轨道交通全直流照明系统设计探讨[J]. 都市轨道交通, 2019, 32(6): 63-66.
WANG Defa, QIN Ling. Full DC lighting system for urban rail transit[J]. Urban rapid rail transit, 2019, 32(6): 63-66.
- [2] 许琼果, 刘光伟, 周斌. 轨道交通直流照明系统研究综述[J]. 广东电力, 2023, 36(1): 20-28.
XU Qiongguo, LIU Guangwei, ZHOU Bin. Review of DC power distribution lighting system in the rail transit[J]. Guangdong electric power, 2023, 36(1): 20-28.
- [3] 李旭东, 段盼平. 太原地铁 2 号线车站公共区直流照明系统方案设计[J]. 中国新技术新产品, 2020(17): 81-82.
- [4] 陈由超. 直流照明系统在地铁车辆段中的应用浅析[J]. 福建建材, 2020(11): 44-46.
CHEN Youchao. Analysis on the application of DC lighting system in metro depot[J]. Fujian building materials, 2020(11): 44-46.
- [5] XIE Jian, CHE Jiabin. Application of DC power supply technology in urban rail transit lighting system[C]//2020 7th International Forum on Electrical Engineering and Automation (IFEEA). Hefei, China. IEEE, 2020: 85-88.
- [6] 李汝婷. 低噪声 LED 数字驱动电源研究与设计[D]. 西安:

西安电子科技大学, 2019.

LI Ruting. Research and design of low noise LED digital driving power supply[D]. Xi'an: Xidian University, 2019.

- [7] 国家能源局. 电力工程直流电源系统设计技术规程: DL/T 5044—2014[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
National Energy Bureau of the People's Republic of China. Technical code for design of DC auxiliary power supply system for power engineering: DL/T 5044—2014[S]. Beijing: China Electric Power Press, 2015.
- [8] 中国工程建设标准化协会. 直流照明系统技术规程: T/CECS 705—2020[S]. 北京: 中国计划出版社, 2020.
Technical specification for DC lighting system: T/CECS 705—2020[S]. Beijing: China Planning Press, 2020.
- [9] 李家旭, 向东, 阙帆, 等. 基于直流配电与控制的城市轨道交通照明设计与应用[J]. 都市轨道交通, 2023, 36(3): 153-159.
LI Jiaxu, XIANG Dong, QUE Fan, et al. Design and application of urban rail transit lighting based on DC power distribution and control[J]. Urban rapid rail transit, 2023, 36(3): 153-159.
- [10] 陈德. 计及电能质量问题的电缆损耗智能评估[D]. 广州: 广东工业大学, 2021.
CHEN De. Intelligent evaluation of cable loss considering power quality problems[D]. Guangzhou: Guangdong University of Technology, 2021.
- [11] 韩文凯. 低压大功率开关电源高频变压器研究与优化设计[D]. 天津: 天津理工大学, 2023.
HAN Wenkai. Research and optimization design of high frequency transformer for low voltage and high power switching power supply[D]. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2023.
- [12] 张磊, 徐恭德, 孙慧如, 等. 直流配用电系统电能质量问题探讨[J]. 供用电, 2023, 40(10): 28-34.
ZHANG Lei, XU Gongde, SUN Huiru, et al. Discussion on the power quality of DC distribution system[J]. Distribution & utilization, 2023, 40(10): 28-34.
- [13] 王宁, 袁杰, 焦晋荣, 等. 直流配电网多变流器纹波谐振问题研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 77-83.
WANG Ning, YUAN Jie, JIAO Jinrong, et al. Ripple resonance of DC distribution network with multiple converters[J]. Electric power automation equipment, 2017, 37(7): 77-83.

(编辑: 王艳菊)