



城市轨道交通可逆牵引变电所供电方案对比

孙建军¹, 陈苏南¹, 孟 勤¹, 邓皓天², 尹 坤¹

(1. 青岛地铁集团有限公司, 山东 青岛 266000;

2. 西南交通大学 电气工程学院, 四川 成都 611756)

摘要: 随着轨道交通的快速发展, 为实现低碳经济目标, 文章研究聚焦于城市轨道交通牵引变电所的供电方案对比, 旨在探索实现轨道交通系统综合节能的最优策略。文章重点关注再生制动能量的高效利用以及其对系统整体能耗的影响, 并对传统整流机组供电方案与结合再生制动能量利用设备供电方案的牵引能耗差异进行了对比分析。以青岛地铁9号线为案例, 模拟分析了各供电方案下的整体能耗表现, 结果显示在高密集发车条件下, 储能结合供电方案能显著降低供电系统牵引能耗, 减少13.76%的日牵引能耗; 采用能量调度管理系统的全双向变流器供电方案在不同发车间隔下均能有效降低能耗, 减少14.65%的日牵引能耗。

关键词: 城市轨道交通; 供电方案; 节能技术; 再生制动能量利用

中图分类号: U223.6

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)02-0158-05

0 引言

轨道交通为我国经济社会高速发展发挥着基础性、先导性、战略性和服务性的重要作用^[1]。截至2022年底, 中国城市轨道交通运营线路总长度10 287.45 km, 地铁占比77.84%^[2], 轨道交通是能耗大户, 且总体能耗指标还在呈不断增长态势。结合国家战略, “碳达峰”和“碳中和”是我国“十四五”时期必须着手推进的一项重要工作。因此, 为实现低碳经济目标, 需开展轨道交通综合节能研究。

列车制动产生的电能约占牵引总能量的30%以上^[3], 对再生制动能量的有效利用是节能降耗的关键。城市轨道交通牵引变电所安装不同的再生制动能量利用设备, 对供电系统整体能耗有极大的影响。文献[4]系统而全面地介绍了逆变式和储能式再生制动能量利用技术。文献[5]分别从设计和运营两阶段建立地面再生制动能量利用装置的节能效果评估模型。文献[6]探讨并提出“源-荷-储-运-网-维”贯通的大系统综合节能解决方案。文献[7]将储能技术在城市轨道交通中运用的优势进行分析, 对未来发展提出展望。

在现有研究基础上, 本文对城市轨道交通牵引变

电所的供电方案进行详细梳理与比较, 并以青岛地铁9号线为分析实例, 模拟真实运行情况对比各供电方案下的整体能耗, 提供具有前瞻性和系统性的城市轨道交通供电方案。

1 牵引能耗分析

1.1 牵引能耗构成

在城市轨道交通供电系统中, 牵引能耗占整个系统能耗的主要部分。相比于电气化铁路, 城市轨道交通线路短、站点多、启停频繁, 会产生较多的再生制动能量^[8-9]。由于再生制动能量的存在, 牵引能耗统计也较为复杂。

为简化分析牵引能耗的构成情况, 忽略牵引变流装置的效率因素影响, 定义供电系统的牵引能耗 W_{TR} , 具体计算式为

$$W_{TR} = \int_0^{T_h} P_{TR}(t) dt = W_T - W_F + W_R + W_{Soc_out} - W_{Soc_in} \quad (1)$$

式中: T_h 为运行总时间; $P_{TR}(t)$ 为 t 时刻线路上列车牵引功率之和; W_T 为从牵引供电系统吸收的能量; W_F 为再生制动时流向电网交流侧的能量; W_R 为由主变电所返回电网的能量; W_{Soc_out} 、 W_{Soc_in} 分别为储能装置放电、充电的能量。

通信作者: 邓皓天, 男, 研究方向为城市轨道交通柔性牵引供电; E-mail: 2805459734@qq.com

引用格式: 孙建军, 陈苏南, 孟勤, 等. 城市轨道交通可逆牵引变电所供电方案对比[J]. 机车电传动, 2025(2): 158-162. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.102.

Citation: SUN Jianjun, CHEN Sunan, MENG Meng, et al. Comparison of reversible traction substation power supply solutions for urban rail transit [J]. Electric drive for locomotives, 2025(2): 158-162. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.102.

1.2 再生制动能量利用技术

城市轨道交通再生制动能量利用装置主要有消耗型、回馈型以及储能型3类^[10]。回馈型和储能型再生制动能量利用装置相较于消耗型有明显的优势: ①提高再生制动能量利用率, 降低牵引供电的能耗; ②稳定网压, 提高列车的受电质量, 延长牵引网设备的使用寿命; ③替代制动电阻, 减少制动电阻发热量, 降低风扇和空调等环控设备的投资及运营维护成本; ④可减少或取消车载制动电阻, 减轻车重, 从而减少闸瓦损耗, 降低列车维护成本。

定义再生制动能量利用率 η 为

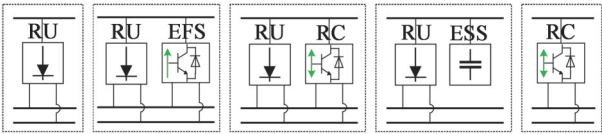
$$\eta = (W_{RE} - W_R - W_{tran}) / W_{RE} \times 100\%$$
 (2)

式中: W_{RE} 为总的再生制动能量; W_{tran} 为车载制动电阻及地面制动电阻消耗的能量。

2 城市轨道交通供电方案

传统牵引变电所仅采用整流机组, 如图1中(a)所

示, 这种供电方案中列车的制动能量只能通过牵引网向邻近的列车传递或通过制动电阻消耗, 可能造成能量的跨区间传输、再生制动能量发热耗费和牵引网压大幅波动等问题。搭载回馈型和储能型再生制动能量利用设备的城市轨道交通牵引变电所可有效解决这些问题, 如整流机组(Rectifier unit, RU)、逆变回馈装置(Energy feedback system, EFS)、双向变流器(Reversible converter, RC)、储能装置(Energy storage system, ESS)等构成组合式牵引变电所供电方案(RU-EFS, RU-RC, RU-ESS)或单一的双向变流器供电方案。如图1中(b)~图1(e)所示。各供电方案优缺点及典型应用线路如表1所示。



(a)方案1 (b)方案2 (c)方案3 (d)方案4 (e)方案5
图1 牵引变电所供电结构

Fig. 1 Structure of traction substation power supply

表1 牵引变电所供电方案对比

Table 1 Comparison of traction substation power supply solutions

项目	RU	RU-EFS	RU-RC	RU-ESS	RC
优点	效率最高, 控制简单, 经济性最优	效率较高, 存在能馈通路, 经济性较优	效率较高, 存在能馈通路, 牵引网压可控	再生制动能量利用率高, 控制较为容易	牵引网压可控, 可实现能量优化调度
缺点	空载电压易受外部电源电压影响, 无法提供能量回馈路径	空载电压易受外部电源电压影响, EFS存在大量闲置时段	所需RC容量较大, 造价较贵, 控制较为复杂	储能设备价格昂贵, 维护成本高, 储能设备寿命有限	所需RC容量极大, 效率较低, 控制较为复杂, 工程造价高
线路	北京地铁6号线一期	苏州轨道交通2号线	无锡至江阴城际线	青岛地铁3号线	丽江有轨电车1号线

传统牵引供电系统下辖的所有牵引所往往采用相同的供电方案。然而, 随着牵引供电技术的发展, 出现了储能型和回馈型再生制动能量利用设备结合的供电方案, 如苏州轨道交通2号线徐图港站采用了RU-EFS方案, 而桐泾公园站则采用了RU-ESS方案。

由于RC内部使用了IGBT等全控型器件, 可控性较强, 因此, 采用RC的牵引供电系统可实现能量优化调度管理。图2为含能量调度管理系统的牵引供电系统示意图, 双向变流器、降压负荷、主变电所及列车

车的状态信息经由通信网络传输至中心服务器, 通过特定算法得到更优的双向变流器控制参数, 从而改善牵引网压, 避免功率跨区间流动, 降低牵引供电系统的能耗水平。

3 仿真计算

由于牵引所各供电方案中搭载设备不同, 在仿真计算时对牵引所整体状态的判断与切换也有所区别。不同牵引所状态如下: ①RU: 整流、关断; ②RU-EFS: 整流、恒压逆变、恒功率逆变、关断; ③RU-ESS: 整流、恒压充电、恒功率充电、恒压放电、恒功率放电、关断; ④RU-RC: 协同整流、RU单独整流、RC单独整流、恒压逆变、恒功率逆变、关断等。计及牵引所状态切换策略的交直流统一潮流计算在文献[11]中有详细叙述, 利用该潮流计算模型进行后续算例对比。

4 算例

4.1 算例参数

青岛地铁9号线一期工程示意图如图3所示, 全长

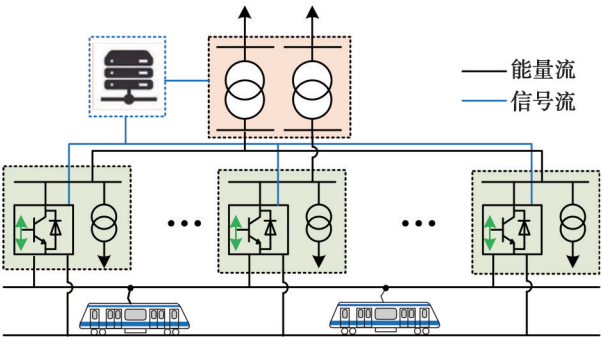


图2 能量调度管理系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of energy dispatching management system

16.63 km, 该工程设置主变电所1座、车站13座、牵引降压混合变电所6座。主变电所均由110 kV电缆接入, 安装容量约 $2\times 25\text{ MV}\cdot\text{A}$, 接触轨电阻率约 $0.008\text{ }\Omega/\text{km}$, 回流轨电阻率约 $0.008\text{ }\Omega/\text{km}$, 降压所负载率为20%, 本文仿真所用列车参数如表2所示, 该地铁线路远期的全日运行计划如表3所示。

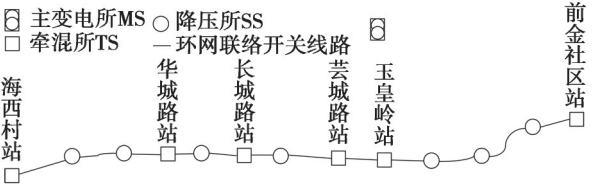


图3 地铁线路示意图

Fig. 3 Schematic diagram of metro line

表2 列车参数

Table 2 Train parameters

参数项目	参数值或说明
编组	2动1拖/4动2拖
负载	AW2
额定电压/V	1 500
最大制动电压/V	1 800
受流方式	接触轨受流
辅助功率/kW	200
结构速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	100
是否有车载制动电阻	否

表3 远期全日行车计划

Table 3 Forward full-day train operation plan

发车间隔/s	134	257	300
运行时间/h	4	11	3

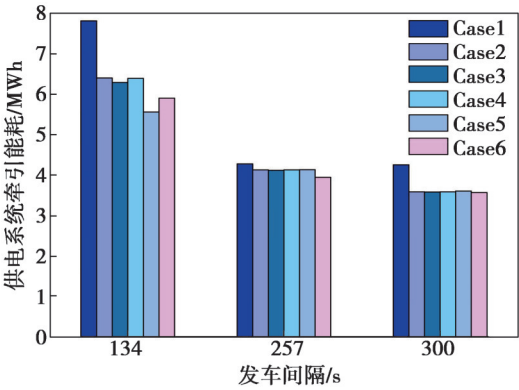
4.2 能耗对比

将不同供电方案分为以下6种案例进行仿真, 除回馈结合案例外, 其余案例中全线牵引所安装设备相同:

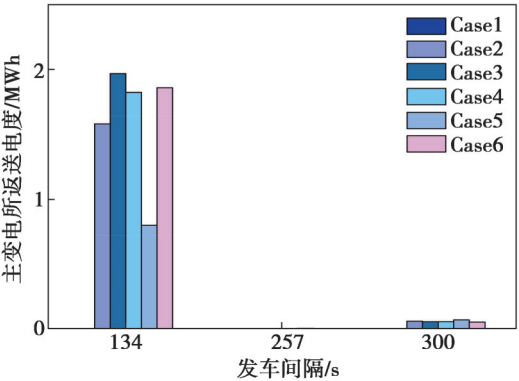
- ① Case1为RU供电方案, RU额定容量 $2\times 3\text{ }000\text{ kW}$ 。
- ② Case2为RU-EFS供电方案, RU额定容量 $2\times 3\text{ }000\text{ kW}$, EFS额定容量 $2\text{ }000\text{ kW}$, EFS启动电压 $1\text{ }720\text{ V}$ 。
- ③ Case3为RC供电方案, RC安装容量 $2\times 3\text{ }000\text{ kW}$, RC整流启动电压 $1\text{ }760\text{ V}$, 逆变启动电压 $1\text{ }800\text{ V}$, 下垂率1%。
- ④ Case4为RU-RC供电方案, RU额定容量 $3\text{ }000\text{ kW}$, RC安装容量 $3\text{ }000\text{ kW}$, RC整流启动电压 $1\text{ }680\text{ V}$, 逆变启动电压 $1\text{ }720\text{ V}$, 下垂率1%。
- ⑤ Case5为储馈结合方案, 在华城路站牵引所和玉皇岭站牵引所安装RU-ESS, 其余牵引所安装RU-EFS, ESS安装容量为 160 MJ , 充电电压为 $1\text{ }730\text{ V}$, 放电电压为 $1\text{ }610\text{ V}$, RU额定容量为 $2\times 3\text{ }000\text{ kW}$, EFS额定容量为 $2\text{ }000\text{ kW}$, EFS启动电压 $1\text{ }720\text{ V}$ 。

⑥ Case6为RC供电方案, 加入能量调度管理系统, RC安装容量为 $2\times 3\text{ }000\text{ kW}$ 。

按照式(1)计算各供电方案下的牵引能耗, 如图4所示。



(a) 供电系统牵引能耗



(b) 主变电所返送电度

图4 牵引能耗及返送电度

Fig. 4 Traction energy consumption and energy feedback

观察图4 (a)的3种发车间隔, Case1无法利用经过邻车吸收后剩余的再生制动能量, 供电系统牵引能耗最高。Case2和Case4的牵引能耗几乎相同, 由于RC容量更大, 反馈到中压环网的能量更多, 因此主变电所返送电度也更高。Case3中RC通过改变控制参数的方式抬升牵引网网压, 减少跨区间电流传输时的损耗, 并且相较于EFS, 有更多的容量反馈再生制动能量, 因此Case3牵引能耗低于Case2, 同时也导致了Case3的主所返送电度高于Case2。发车间隔越稀疏, Case3的牵引能耗和Case2越接近, 说明RC整流时的效率低于RU。

发车间隔为134 s时, 列车再生制动能量较多, EFS和RC向中压环网传输了大量的再生制动能量, 其中无法被消纳的能量由主变电所返送至外部电源, 不仅损失能量, 而且会冲击电网。Case5在第二和第五牵引所用储能式再生制动利用装置代替回馈式, 再生制动能量流入牵引网使得网压上升, 抬升至ESS启动电压时, ESS开始充电, 储存供电范围内的再生制动能量, 供后续牵引列车时使用, 减少了EFS的反馈能耗, 避免了过多的反馈能耗导致的主变电所逆功率倒送。

在 134 s 发车间隔时 Case5 的牵引能耗降低极为明显, 与之相对的是主变电所返送电量大量较少, 再生制动能量利用率可达 94.52%, 在 6 种供电方案中最高。

Case6 搭载能量调度管理系统, 以牵引能耗最低为目标, 由智能优化算法迭代求解 RC 装置的控制参数, 无论是在密集的发车间隔下还是在稀疏的发车间隔下, 其供电系统牵引能耗都较低, 由表 4 可知再生制动能量利用率相较于 Case3 只是略有提升, 直流侧网络损耗的减少才是供电系统牵引能耗降低的主要原因。除 Case1、Case5 外其余供电方案再生制动能量利用率相差不大。

表 4 再生制动能量利用率

Table 4 Regenerative braking energy utilization

供电方案	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
$\eta/\%$	83.49	91.01	90.23	90.51	94.52	90.68

表 5 为依据全日行车计划及供电系统牵引能耗计算的各供电方案全日能耗, 整体供电系统全日牵引能耗由小到大依次为 Case6、Case5、Case3、Case4、Case2、Case1, 因此以 Case1 为参考, Case2 能耗降低 10.18%, Case3 能耗降低 10.80%, Case4 能耗降低 10.22%, Case5 能耗降低 13.76%, Case6 能耗降低 14.65%。

表 5 远期全日牵引能耗

Table 5 Forward full-day traction energy consumption

供电方案	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5	Case6
全日牵引能耗/MWh	91.07	81.80	81.23	81.76	78.54	77.73

5 结论

本文以城市轨道交通供电系统为研究对象, 研究不同供电方案下的牵引能耗, 为城市轨道交通供电方案设计提供参考, 主要结论如下:

①在发车间隔较为密集、再生制动能量过大的地铁线路, 储馈结合供电方案对供电系统牵引能耗降低极为明显, 在实际供电系统案例中, 相较于整流机组供电方案能降低 13.76% 的日牵引能耗, 再生制动能量利用率达到 94.52%。

②全双向变流器供电方案搭载能量调度管理系统具有普适性, 在密集和稀疏的发车间隔下都能降低较多的供电系统牵引能耗, 其日牵引能耗相较于整流机组供电方案降低 14.65%。

参考文献:

[1] 刘杰, 陈锦渠, 彭其渊, 等. 城市轨道交通网络可靠性和运输服务质量评估[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(2): 395-402.

LIU Jie, CHEN Jinqu, PENG Qiyuan, et al. Reliability and service quality evaluation for urban rail transit network[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2021, 56(2): 395-402.

[2] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2022 年度统计和分析报告[J]. 城市轨道交通, 2023(4): 13-15.

China Association of Metros. Urban rail transit 2022 statistics and analysis report[J]. China metros, 2023(4):13-15.

[3] 曹雪铭, 张弛, 黄健, 等. 基于 EMR 的地铁供电系统仿真技术研究[J]. 铁道机车车辆, 2022, 42(5): 116-123.

CAO Xueming, ZHANG Chi, HUANG Jian, et al. Research on simulation technology of metro power supply system based on EMR[J]. Railway locomotive & car, 2022, 42(5): 116-123.

[4] 刘继宗, 张祖涛, 王浩, 等. 城轨交通制动能量利用技术研究现状与展望[J]. 西南交通大学学报, 2024, 59(6): 1322-1345.

LIU Jizong, ZHANG Zutao, WANG Hao, et al. Braking energy utilization in urban rail transit: status and prospects[J]. Journal of southwest jiaotong university, 2024, 59(6): 1322-1345.

[5] 刘炜, 张骥, 马庆安, 等. 含地面再生制动能量利用装置的供电设计和节能指标评估[J]. 都市快轨交通, 2021, 34(6): 32-38.

LIU Wei, ZHANG Jian, MA Qingan, et al. Power supply design of ground regenerative braking energy utilization device and the energy-saving effect evaluation indices[J]. Urban rapid rail transit, 2021, 34(6): 32-38.

[6] 冯晓云, 黄德青, 王青元, 等. 轨道交通列车综合节能研究综述[J]. 铁道学报, 2023, 45(2): 22-34.

FENG Xiaoyun, HUANG Deqing, WANG Qingyuan, et al. Overview on comprehensive energy saving schemes for rail transit train operation system[J]. Journal of the China railway society, 2023, 45(2): 22-34.

[7] 金勇, 黄先进, 石春珉, 等. 城市轨道交通地面储能技术应用综述[J]. 电工技术学报, 2024, 39(15): 4568-4582.

JIN Yong, HUANG Xianjin, SHI Chunmin, et al. Review on wayside energy storage technology for urban rail transit[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2024, 39(15): 4568-4582.

[8] 沈小军, 魏鸿扬. 基于旁路直流回路的城轨交通再生制动能量调度研究[J]. 电工技术学报, 2021, 36(15): 3308-3316.

SHEN Xiaojun, WEI Hongyang. Study of regenerative braking energy flowing of urban rail transit based on bypass DC loop[J]. Transactions of China electrotechnical society, 2021, 36(15): 3308-3316.

[9] ZHANG Chenchen, LU Dongyin, XIAO Xuemei, et al. Modeling and analysis of global energy consumption process of urban rail transit system based on petri net[J]. Journal of rail transport planning & management, 2022, 21: 100293.

- [10] 吕锦琦. 城轨交通再生制动能量回馈系统研究[D]. 扬州: 扬州大学, 2023.
LYU Jinqi. Research on the regenerative braking energy feedback system of urban rail transit[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2023.
- [11] 刘炜, 姜颖, 张戡, 等. 计及城市轨道逆变回馈装置的交直流统一供电计算[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4381-4391.
LIU Wei, LOU Ying, ZHANG Jian, et al. Unified AC/DC power supply calculation taking into account urban rail inverter feedback devices[J]. Transactions of China electro-technical society, 2019, 34(20): 4381-4391.

Comparison of reversible traction substation power supply solutions for urban rail transit

SUN Jianjun¹, CHEN Sunan¹, MENG Meng¹, DENG Haotian², YIN Kun¹

(1. Qingdao Metro Group Co., Ltd., Qingdao, Shandong 266031, China;

2. School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, Sichuan 611756, China)

Abstract: To pursuit low-carbon economy objectives amid the rapid development of rail transport, this study focuses on comparing traction substation power supply solutions for urban rail transit. The aim is to explore optimal strategies for achieving comprehensive energy conservation in rail transit systems. The research emphasized the efficient utilization of regenerative braking energy and its effect on overall system energy consumption. A comparative analysis was conducted between traditional rectifier power supply solutions and alternatives incorporating regenerative braking energy utilization equipment, to highlight differences in traction energy consumption. In a subsequent case study based on Qingdao metro line 9, simulations were conducted to analyze overall energy consumption performance under various power supply solutions. The results revealed that, under high-density train operation conditions, the energy storage-feedback integrated supply demonstrated a 13.76% reduction in daily traction energy consumption, which significantly decreased the traction energy consumption of the power supply system. Meanwhile, the fully reversible converter supply combined with an energy dispatching management system achieved a reduction of up to 14.65% in daily traction energy consumption across different train departure intervals.

Keywords: urban rail transit; power supply solution; energy-saving technologies; regenerative braking energy utilization