

城市轨道交通可逆牵引变电所供电方案对比

王元贵

重庆市铁路（集团）有限公司，重庆，401120；

摘要：轨道交通是城市交通体系的重要组成部分，凭借其舒适、快捷和便利的特点，近年来成为城市人民出行的首选交通方式。在我国推行低碳环保战略的新时代，如何优化城市轨道交通供电模式，提高能源利用效率是保障节能环保理念得到有效落实的关键。本文以我国某城市现有轨道交通系统为例，总结影响牵引变电所供电能耗的因素进行综述，并分别对不同可逆牵引变电所供电方案进行对比分析，总结更满足新时代城市轨道交通需要的供电方案并加以推广应用，为未来我国城市轨道交通发展提供更好的助力。

关键词：城市轨道交通；可逆牵引；变电所；供电方案对比

DOI：10. 64216/3080-1508. 25. 04. 050

引言

我国城市轨道交通主要以地铁、轻轨和有轨电车作为主流制式，据不完全统计，我国每年城市轨道交通的能耗量达到 270.23 亿千瓦时，其中牵引能耗约为 141.50 亿千瓦时，占比约为城市轨道交通总能耗的 53%。由此可见，有效改变牵引供电模式是降低城市轨道交通能耗的关键途径之一，如何根据实际情况选择适合的供电方案、优化供电模式、采用节能技术是实现节能环保理念的关键，同时也是我国实现“碳达峰”与“碳中和”的关键举措。基于我国城市轨道交通现有供电模式需要研究人员加以优化创新，通过对比总结不同供电方案在能耗量方面的实际差异，从而为未来我国城市轨道交通供电模式提供数据支撑。

1 城市轨道交通的能耗分析

1.1 城市轨道交通的能耗构成分析

得益于我国近年来对节能环保战略的高度重视，以及节能设备与技术的不断开发，我国城市轨道交通在能耗方面逐年取得一定进步。相关调查统计结果如下表 1

表 1 我国城市轨道交通能耗表

指标	2023 年	2024 年	同比
总电能耗（兆瓦时）	2529406.09	2702252.06	6.83%
车公里总电能耗（千瓦时/公里）	3.56	3.54	-0.42%
人公里总电能耗（千瓦时/人次公里）	0.104	0.102	-1.34%
CO2 排放总量（tCO2）	13572793.10	14500284.57	6.83%

1.2 城市轨道交通的再生制动能量

再生制动能量是指城市轨道交通在车辆制动过程中所回收的能量，通常城市轨道交通的再生制动能量占比可达到总牵引能耗的 30%到 50%左右，因而对再生制

所示。调查结果显示，我国城市轨道交通的二氧化碳排放量得到明显降低，但电能耗量呈现增长趋势，总电能耗量同比增长达到 6.83%。在城市轨道交通运行中，电能耗量占据总能耗量的 95%以上，而电能耗量则主要由牵引能耗、通风系统、照明系统及各类辅助系统能耗组成，其中牵引能耗占比超过 50%。与传统铁路交通相比，城市轨道交通具有站点多、停车频繁、通车线路短等特点，因而在城市轨道交通运行过程中产生的再生制动能量较多，导致牵引能耗的构成结构较为复杂。通常城市轨道交通消耗的电能主要来自城市高压电网及变电所，城市轨道交通的牵引电能耗可按照如下公式计算：

$$W_{TR} = \int_0^{T_h} P_{TR}(t) dt = W_T - W_F + W_R + W_{Soc-out} - W_{Soc-in}$$

该公式中 T_h 表示城市轨道交通的总运行时长， P_{TR} 则表示城市轨道交通在 t 时刻的牵引功率之和； W_T 表示城市轨道交通来自牵引供电系统的总电能， W_F 表示再生制动时城市轨道交通流向电网交流侧的能量， W_R 表示由牵引变电所返回高压电网的能量，而储能装置的放电和充电能量则分别由 $W_{Soc-out}$ 和 W_{Soc-in} 表示^[1]。

动能量进行有效回收利用能够显著降低城市轨道交通的牵引能耗。通常城市轨道交通产生的再生制动能量可分为储能型、消耗型和回馈型三种。通常我国城市轨道交通针对再生制动能量多通过逆变装置实现回收，例如

我国广州地铁和南京地铁均已实现逆变装置的全线路覆盖，能够显著降低能耗率接近 20%。城市轨道交通再生制动能量的利用率可按照如下公式进行计算：

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

其中 WRE 表示轨道交通总再生制动能量数值，Wtran 表示由于车载及地面制动电阻所产生的能量消耗量。对于城市轨道交通而言，如何有效降低制动电阻、提高再生制动能量的回收率与利用率是降低城市轨道交通牵引能耗量的关键，可分别从加强能量调度、降低制动电阻、提高再生制动能量利用率等方面进行研究^[2]。

2 城市轨道交通可逆牵引变电所供电方案介绍

传统城市轨道交通的牵引供电模式多为直流和交流供电，由城市高压电网或变电所提供电能，通过降压、交流等处理后采用直流或交流的形式将电能供给城市轨道交通车辆。由于车速变化导致对于电能牵引与制动的要求较高，为保证车辆稳定行驶因而需要对牵引供电系统

进行分区域、分段处理，以此来保证供电稳定。通常采用直流供电行驶的城市轨道交通，其供电制式多选定 1500V 的直流电，此制式的供电电压往往在 1100V 到 1900V 之间。牵引变电所作为对电能进行降压、升压、输出的主要场所，多采用整流机组形式进行供电，即牵引变电所负责对城市轨道交通车辆提供电能，如下图 1 中方案 1 所示。传统牵引变电所在供能中存在的问题多为能耗量较高，由于电能需要远距离输送因而导致电能损耗较大，同时牵引电网容易产生大幅度波动，影响供电质量及稳定性^[3]。

而针对城市轨道交通的供电问题，可通过增加节能装置的方式改变传统可逆牵引变电所的供电模式，例如在整流机组中增设双向变流器、逆变回馈装置、储能装置等，提高整流机组对再生制动能量的利用率，以此来起到节能降耗效果。各类牵引供电所供电方案的优缺点如下表 2 所示。

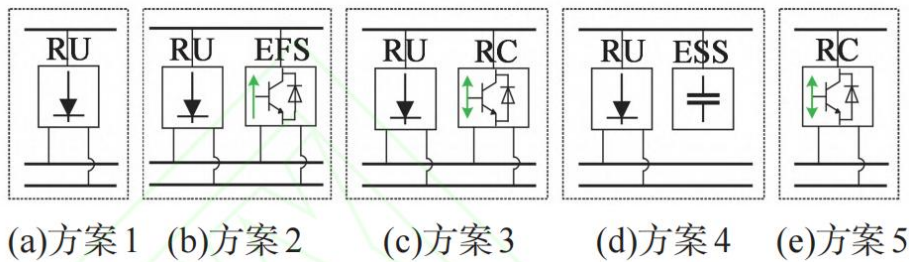


图 1 城市轨道交通的牵引供电方案
表 2 各类牵引供电所供电方案的优缺点

项目	优点	缺点
整流机组	供电效率高、控制简单、经济性高	供电不稳定，再生制动能量利用率低
整流机组+逆变回馈装置	供电效率高、经济性高、再生制动能量利用率高	受外部电源影响严重、逆变回馈装置利用率低
整流机组+双向变流器	供电效率高、牵引网电压可灵活调控	对双向变流器容量要求高，整体造价高、控制难度高
整流机组+储能装置	再生制动能量利用率高、控制简单	设施成本高、维护成本高
双向变流器	牵引网电压可灵活调控	对双向变流器容量要求高，整体造价高、控制难度高

3 城市轨道交通可逆牵引变电所供电方案对比

为探究不同城市轨道交通可逆牵引变电所供电方案在能耗及能源利用率方面的差异，本文选定我国某市轨道交通作为研究对象，分别对不同供电方案建立仿真模型，通过仿真模型计算不同供电方案下城市轨道交通的牵引能耗进行对比分析。该城市轨道交通路线全长约为 16.6km，共计包括 13 个站点，城市轨道交通供电由 1 座主变电所以及 6 座牵引降压混合变电所负责。城市轨道交通全路线均采用 110KV 电缆进行连接，安装容量为 50MV · A，该轨道交通的接触轨道电阻率为 0.0083

Ω / km。该线路车辆的额定电压为 1500KV，最大可达制动电压为 1800KV，无车载制动电阻。该轨道交通线路的发车间隔分为 134 秒、257 秒和 300 秒三类。

针对该城市轨道交通线路分别提出不同供电方案，并构建仿真模型对牵引能耗量及再生制动能量利用率进行对比。本文提出的供电方案包括以下几类：

(1) 整流机组供电方案，采用整流机组额定容量为 2×3000kW。

(2) 整流机组+逆变回馈装置供电方案。其中整流机组额定容量为 2×3000kW，逆变回馈装置额定容量为 2

000kW，启动电压为1720V。

(3) 双向变流器供电方案，其中双向变流器的额定容量为 $2 \times 3000\text{kW}$ ，整流启动电压为1760V，逆变启动电压为1800V，下垂率为1%。

(4) 整流机组+双向变流器供电方案，其中整流机组额定容量为3000kW，双向变流器安装容量为3000kW，整流启动电压为1680V。逆变启动电压为1800V，下垂率为1%。

(5) 储馈结合供电方案，储馈结合利用储能型和回馈型再生制动能量，轨道交通全线牵引所分别安装储能装置及逆变回馈装置，其中储能装置参数如下：安装容量：160MJ；充电电压：1730V；放电电压：1610V。整流机组额定容量为 $2 \times 3000\text{kW}$ ，逆变回馈装置参数如下：额定容量：2000kW；启动电压：1720V。

(6) 双向变流器+能量调度系统供电方案，双向变流器安装容量为 $2 \times 3000\text{kW}$ 。

4 结论

4.1 不同可逆牵引变电所供电方案牵引能耗对比结果

分别对6组仿真模型的牵引能耗量进行计算，结果如下图2所示。结果显示，无论任何发车间隔传统整流机组单独供电模式的牵引能耗最高，由于整流机组供电方案无法对再生制动能量进行利用，因而导致牵引能耗量较高。其他几种供电方案对比发现，采用整流机组+逆变回馈装置与整流机组+双向变流器方案的牵引能耗量基本保持持平，由于该轨道交通的再生制动能量较多，因而两种供电方案的牵引能耗量也基本保持相同，但深入计算发现，两种供电方案的反送电度明显更高，由于选用双向变流器的容量较大，因而能够为中压电网反馈更多的电能。而双向变流器供电方案与整流机组+逆变回馈装置供电方案对比发现，双向变流器供电方案的牵引能耗略低于整流机组+逆变回馈装置供电方案。由于双向变流器能够升高牵引电网的电压，因而能够有效减少电能传输过程中的损耗，同时双向变流器的额定容量更大，能够反馈更多再生制动能量，因而双向变流器供电方案的整体牵引能耗明显更低，同时返送电度也高于整流机组+逆变回馈装置供电方案。根据仿真结果可发现，当发车间隔越短时，双向变流器供电方案的牵引能耗比整流机组+逆变回馈装置供电方案更低，说明发车间隔越短时双向变流器获取的再生制动能量越多，由此

可见双向变流器的整流效率高于逆变回馈装置^[4]。

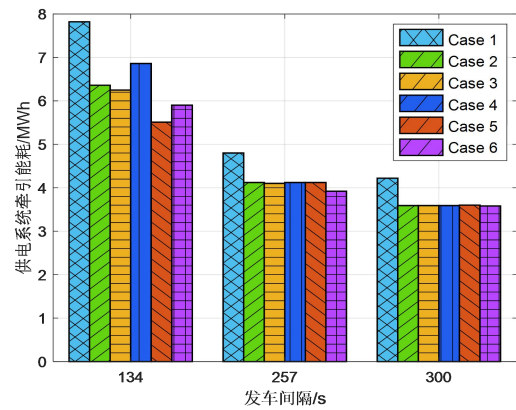


图2 不同可逆牵引变电所供电方案对比结果

6组供电方案的实际牵引能耗量如下表3所示。结果显示，与传统整流机组供电相比，其他供电方案均能够有效降低牵引能耗。其中双向变流器+能量调度系统供电方案的全日牵引能耗量最低，与传统供电模式相比采用双向变流器+能量调度系统供电方案能够降低牵引能耗约15%左右。6组供电方案中储馈结合供电方案与双向变流器+能量调度系统供电方案的牵引能耗量最低，说明通过智能化能量管理能够有效优化城市轨道交通供电模式，降低能耗的同时提升电能利用率^[5]。

本文提出的能量调度系统采用通信网络负责数据传输，通过算法根据双向变流器的实际参数进行分析，从而自动调整双向变流器参数，保证牵引网电压控制在合理范围内，避免引发牵引网波动。而双向变流器+能量调度系统供电方案中均使用全控型器件作为供电设备，以此来提高能量调度系统与供电系统的可控性与灵活性，根据实际运行情况及需求实现精准能量调度管理。

表3 6组供电方案的实际牵引能耗量

供电方案	全日牵引能耗量/MWh	与传统模式相比牵引能耗降低幅度
整流机组供电方案	91.1	0%
整流机组+逆变回馈装置供电方案	81.8	-10.18%
双向变流器供电方案	81.2	-10.81%
整流机组+双向变流器供电方案	81.7	-10.22%
储馈结合供电方案	78.5	-13.76%
双向变流器+能量调度系统供电方案	77.7	-15.65%

4.2 不同可逆牵引变电所供电方案再生制动能量利用率比较

再生制动能量利用率直接影响不同供电方案的牵引能耗，6组供电方案的再生制动能量利用率如下表4所示。结果显示，采用储馈结合供电方案时，轨道交通

的再生制动能量利用率达到最高。采用逆变回馈装置和双向变流器能够对再生制动能量进行汇集并输送到中压环网中,而多余再生制动能量则直接输送到逆变供电所,由供电所将再生制动能量分配到外部电源中。虽然能够提高再生制动能量的利用率,但大量再生制动能量容易损失同时对电网稳定性容易带来冲击。而采用储馈结合供电方案则将传统回馈式再生制动利用装置更换为储能型装置,从而有效实现对再生制动能量的储存利用。当轨道交通实际供电满足需要时,多余的再生制动能量能够通过储能装置进行储存,以供后续轨道交通使用。由于再生制动能量流入牵引网导致整体网压升高,当牵引网实际电压达到储能装置的启动电压时储能装置即可自动启动运行,当再生制动能量不足时由于牵引网电压无法达到储能装置启动电压,因而此时正常进行供电。通过储能的方式有效避免再生制动能量对牵引网稳定性造成影响,同时还能够有效实现再生制动能量的储存与利用^[6]。

表 4 6 组供电方案的再生制动能量利用率比较

供电方案	再生制动能量利用率 (%)
整流机组供电方案	83.5
整流机组+逆变回馈装置供电方案	91.0
双向变流器供电方案	90.2
整流机组+双向变流器供电方案	90.5
储馈结合供电方案	94.5
双向变流器+能量调度系统供电方案	90.7

5 结束语

综上所述,城市轨道交通作为城市交通的重要组成

部分,其能耗量是影响城市经济及未来发展的关键,针对不同供电方案的牵引能耗需要通过仿真模型加以计算,明确其中最节省电能的可逆牵引变电所供电方案并加以选用,以此来提高城市轨道交通的能源利用率,为我国节能环保战略推行提供更好的助力。同时借助技术创新优化传统城市轨道交通供电模式,助力我国城市轨道交通实现技术升级。

参考文献

- [1] 孙建军,陈苏南,孟勐,等.城市轨道交通可逆牵引变电所供电方案对比[J/OL]. 机车电传动,1-5[2025-07-07].
- [2] 李立颖,周丹,林珊,等.考虑主变电所资源共享的城市轨道交通供电系统无功补偿方案[J]. 城市轨道交通研究,2024,27(02):53-57.
- [3] 李国庆,王琦,高东升,等.城市轨道交通供电系统低碳节能技术发展综述[J]. 都市轨道交通,2022,35(06):75-82.
- [4] 郑欣,叶青,赵文彬.城市轨道交通用电负荷参数化建模方法及应用分析[J]. 城市轨道交通研究,2022,(S1):42-47+54.
- [5] 王洪杰,林珊,潘家颖.城市轨道交通供电系统线间联络环网应用研究[J]. 城市轨道交通研究,2022,25(10):76-81.
- [6] 何斌,张华志,温建民,等.城市轨道交通智能供电系统框架及功能设计[J]. 现代城市轨道交通,2022,(08):80-83.