

苏州轨道交通列车再生制动能量吸收装置应用情况分析

邹文骏

(苏州市轨道交通集团有限公司运营一分公司,215101,苏州//工程师)

摘 要 介绍了地铁再生制动能量吸收装置的类型及应用情况,比较分析了各种再生制动能量吸收装置的特点。介绍了苏州地铁 2 号线和 4 号线上安装的再生制动能量吸收装置的具体应用情况。实际应用情况表明,中压逆变回馈型再生制动能量吸收装置运行稳定、节能效果显著。

关键词 苏州轨道交通;再生制动;能量吸收装置;逆变回馈;双向变流

中图分类号 U260.35⁺9

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.05.005

Application Condition Analysis of Suzhou Rail Transit Train Regenerative Braking Energy Absorption Device

ZOU Wenjun

Abstract The types and application of regenerative braking energy absorption devices in metro are introduced. The characteristics of various regenerative braking energy absorption devices are compared and analyzed. The specific application of regenerative braking energy absorption device installed on Suzhou Metro Line 2 and Line 4 is expounded. The practical application shows that the medium voltage inverter feedback regenerative braking energy absorption device operates stably and has remarkable energy-saving effect.

Key words Suzhou Rail Transit; regenerative braking; energy absorption device; inverter feedback; bidirectional current converting

Author's address Suzhou Rail Transit Group Co., Ltd., 215101, Suzhou, China

根据国内现有数据统计,列车能耗约占地铁总能耗的 50%,列车的再生制动能量约为电客车耗电量的 30%~40%。再生制动能量如能得到充分利用,可大大降低地铁的运营成本,实现节能降耗。

1 列车再生制动能量吸收装置分类

列车的再生制动能量若不被邻近列车吸收将导致接触网网压升高,一般通过制动电阻消耗列车的再生制动能量。采用电容储能型、能馈型再生能量回收技术,可吸收剩余的列车再生制动能量,减少列车机械制动磨损,提高运营安全性、可靠性,节约电能,降低运营成本。列车再生制动能量吸收装置分类如图 1 所示。

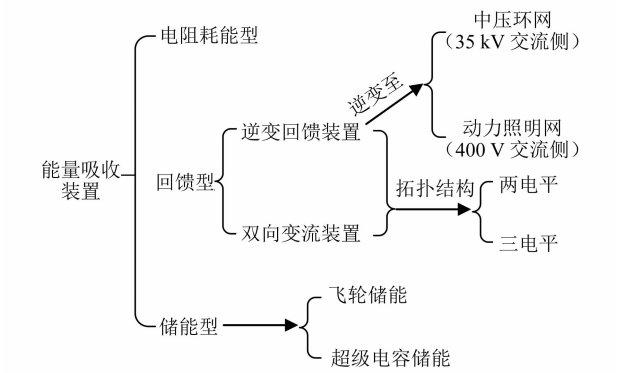


图 1 列车再生制动能量吸收装置分类

Fig. 1 Classification of train regenerative braking energy absorption device

1.1 电阻能耗型

电阻能耗型再生制动能量吸收装置不仅无节能效果,而且导致能源浪费并造成热污染,因此不主张使用。

1.2 回馈型

回馈型再生制动能量吸收装置包括逆变回馈装置和双向变流装置。

逆变回馈装置将列车再生制动产生的过多能量反馈到中压环网供其它设备使用,如图 2 所示。

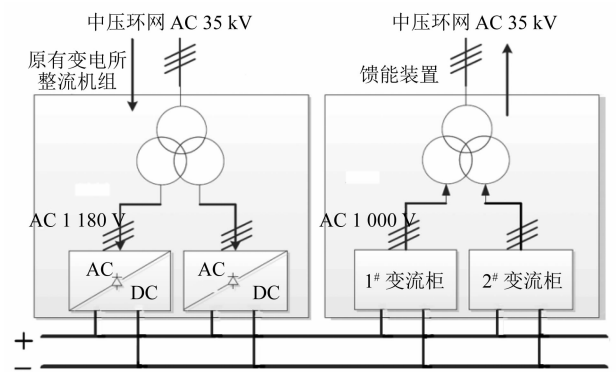


图 2 中压逆变回馈装置运行示意图

Fig. 2 Schematic diagram of medium voltage inverter energy feeding device operation

如图 2 所示,箭头表示能量的流动方向,变电所内原有的整流机组能量流动方向为:中压环网交流通过整流机组变压后变为 DC 1 500 V,该电流供列车牵引使用。有逆变回馈装置的变电所的能量流动方向为:先将牵引网上过高电压通过 2 台变流柜及隔离变压器变为 35 kV 交流电返回到中压环网上,该电流供其他设备使用,从此达到稳定网压及节能的目的。

目前,逆变回馈装置技术成熟,且在国内外已有非常广泛的应用,是城市轨道交通领域列车再生制动能量吸收的主要方式和发展方向之一。逆变回馈装置又分为中压回馈装置和低压回馈装置两种,其在国内的应用情况如下表 1 所示。

表 1 逆变回馈型装置在国内轨道交通线路中的应用情况

Tab. 1 Application of inverter feedback device in domestic rail transit lines

线路	能馈形式	容量/MW	使用性质
郑州地铁 1 号线	低压回馈+制动电阻	1.20	挂网
南京地铁 1 号线	低压回馈	0.65	挂网
南京地铁宁天线	中压回馈	2.50	挂网
郑州地铁 1 号线一期	中压回馈	1.20	挂网
郑州地铁 1 号线二期	中压回馈	4.00	工程应用

双向变流装置是为提高供电可靠性、实现整流器快速更换维护、稳定网压、节约能源而发展出来的双向变流器技术。双向变流装置还可作为 24 脉波整流器的补充。最早使用该装置的线路是日本首都圈新都市铁道筑波快捷线。该装置于 2016 年 6 月在长沙地铁 1 号线全线投入运行,于 2019 年在宁波地铁 2 号线宁波大学站挂网运行,而后在北京地铁 10 号线挂网运行。

1.3 储能型

储能型再生制动能量吸收装置包括飞轮储能和超级电容储能两种。两者的节能效果相近,但飞轮储能结构复杂难以实际应用,超级电容储能则更易实现。

飞轮储能的基本原理是:列车制动电能带动飞轮旋转,电能转移至飞速旋转的飞轮内;当列车启动时,飞轮则将存储的动能以电能的形式释放出来。目前,该装置在国外有部分应用,比如里昂、巴黎、伦敦等城市的地铁,只是一些示范性工程,无大范围应用。2019 年,北京地铁房山线广阳城站安装了 1 套飞轮储能再生制动能量吸收装置。

超级电容储能的基本原理是:列车再生制动能量被吸收到超级电容中,当供电区间内有列车需取流时,该装置将所储存的电能释放出去。超级电容储能装置有储能和稳定网压两种可以相互切换的工作模式。西门子和庞巴迪生产的超级电容储能器已经应用于国外 DC 750 V 和 DC 600 V 的轻轨和地铁线路。

储能型再生制动能量吸收装置在国内的应用虽然起步较晚,但发展很快。具体情况如表 2 所示。

表 2 储能型再生制动能量吸收装置在国内的应用情况

Tab. 2 Application of energy storage regenerative braking energy absorption device in China

线路	能馈形式	使用性质	合作模式
北京地铁广阳城站	飞轮储能	挂网	试验合作
青岛地铁 3 号线	超级电容储能	挂网	试验合作
广州地铁 6 号线	超级电容储能	挂网	试验合作
北京地铁八通线	超级电容储能	挂网	试验合作

2 各类列车再生制动能量吸收装置特点分析

35 kV 中压逆变回馈方式能满足电能质量要求,对电网电压冲击影响相对较小,且逆变回馈容量不受限制;再生制动能量利用率高,能够满足列车制动需求;可有效控制直流牵引网电压,适用于中大运量城市轨道交通工程。但低压逆变回馈方式的逆变回馈装置容量受车站动力变压器容量的限制,适用于中小运量城市轨道交通工程。

四种列车再生制动能量吸收装置特点对比如表 3 所示。整流器+回馈变流器与双向变流器的特点对比如表 4 所示。

表 3 四种再生制动能量吸收装置特点对比表

Tab.3 Comparison of characteristics of four regenerative braking energy absorption devices

对比项目	电阻耗能型	逆变回馈型	飞轮储能型	超级电容储能型
节能	无	好	较好	较好
对接触网的影响	单向稳压	单向稳压	双向稳压	双向稳压
对交流电网的影响	无	THD≤3%	无	无
经济成本	较低	价格适中	价格偏高	较高
能否满足再生能量负荷	能	能	需多套并联	需多套并联
国产化	成熟	竞争激烈	无	试验、试制

注:THD——总谐波失真。

表 4 整流器+回馈变流器与双向变流器特点对比表

Tab.4 Comparison of characteristics of rectifier + feed-back converter and bidirectional converter

对比项目	整流器+回馈变流器	双向变流器
电能质量	谐波较大,功率因素较低	谐波较小,功率因素较高
直流电压波动	较大	较小
节能效果	较好	好
设备成本	较低	成本较低
应用情况	大量应用	宁波地铁 2 号线挂网,北京地铁 10 号线挂网

3 列车再生制动能量吸收装置在苏州轨道交通的应用情况

目前,列车再生制动能量吸收装置已在苏州轨道交通 2 号线和 4 号线挂网应用。2 号线全长约 42.0 km,列车采用 5 节编组(B 型车)。4 号线全长约 52.8 km,其中主线 42.0 km、支线 10.8 km,列车采用 6 节编组(B 型车)。

3.1 苏州轨道交通 2 号线能馈装置应用情况

苏州轨道交通 2 号线徐图港站安装的是中压逆变回馈系统,桐泾公园站安装的是超级电容储能系统。

3.1.1 徐图港站中压逆变回馈装置应用情况

1) 装置构成及主接线:该站中压逆变回馈系统包含 4 台柜体,分别为 1 台主控柜、2 台变流器柜及 1 台变压器柜。该装置柜体间电气接线图如图 3 所示。

2) 装置主要技术参数:徐图港站中压逆变能馈装置主要技术参数如表 5 所示。

3) 装置容量:根据 2 号线线路参数和供电系统参数,对骑河站至劳动路站区段共 3 个供电分区的高峰期、平峰期列车再生制动能量回收量进行估算。列车编组为 3 动 2 拖,车辆为 B 型。根据车辆参数对列车运行过程中牵引制动功率曲线进行估

算,再将计算结果代入牵引供电仿真模型中,结果如图 4 所示。

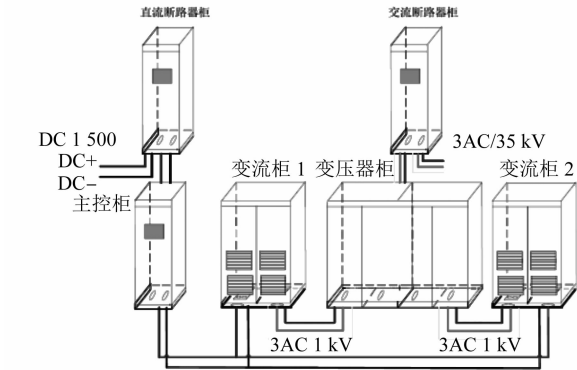


图 3 徐图港站中压逆变能馈装置电气连接图

Fig.3 Diagram of electrical connection of medium voltage inverter energy feeding device in Xutugang Station

表 5 徐图港站中压逆变能馈装置主要技术参数

Tab.5 Main technical parameters of medium voltage inverter energy feeding device in Xutugang Station

项目	参数
直流侧标称电压/V	DC 1 500
直流侧最高电压/V	DC 1 950
交流侧标称电压/kV	AC 35
启动电压/V	1 650~1 950(可调)
持续运行额定功率/MW	2
断续运行额定功率/MW	3
交流侧功率因数	>0.95
效率	≥0.95
系统响应时间/s	≤1
交流侧谐波 THD/%	≤3
直流侧纹波系数/%	≤1

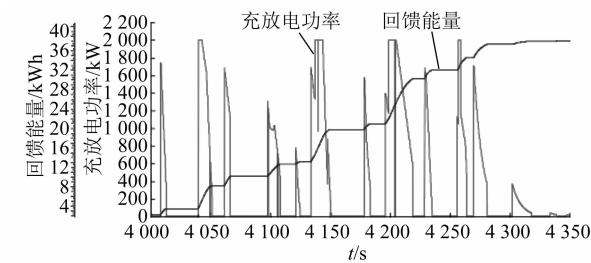


图 4 徐图港站逆变回馈装置仿真计算结果

Fig.4 Simulation calculation results of inverter feedback device in Xutugang Station

根据图 4 仿真计算结果,作为科研项目,在徐图港站安装了额定功率 2 MW 逆变回馈装置,于 2019 年 1 月投入运行。后因厂家原因设备停运。

3.1.2 桐泾公园站超级电容储能装置应用情况

1) 装置构成及主接线:该站超级电容储能系统包含 5 台柜体,分别为 1 台控制柜、2 台变流器柜和 2 台超级电容柜,另外在变电所 DC 1 500 V 馈线柜

中并入 1 台储能系统用直流馈线柜。该装置柜体间电气接线图如图 5 所示。

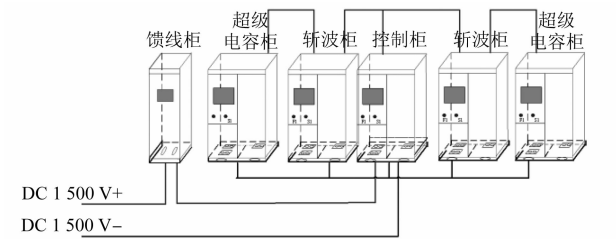


图 5 桐泾公园站超级电容储能装置电气连接图
Fig. 5 Electrical connection diagram of super capacitor energy storage device in Tongjing Park Station

2) 装置主要技术参数:桐泾公园站超级电容储能装置主要技术参数如表 6 所示。

表 6 桐泾公园站超级电容储能装置主要技术参数表
Tab. 6 Main technical parameters of super capacitor energy storage device in Tongjing Park Station

项目	参数
额定工作电压/V	DC 1 500
允许电网电压波动范围/V	DC 900~2 000
额定功率/MW	1
峰值功率/MW	1.4
最大吸收电流(电容侧)/A	1 520
系统等效发热功率/kW	15
系统效率/%	>93

3) 装置容量:根据 2 号线线路参数和供电系统参数,对山塘街站至宝带桥南站区段共 3 个供电分区的高峰期、平峰期列车再生制动能量回收量进行估算。列车编组为 3 动 2 拖,车辆为 B 型。根据车辆参数对列车运行过程中牵引制动功率曲线进行估算,再将计算结果代入牵引供电仿真模型中,结果如图 6 所示。

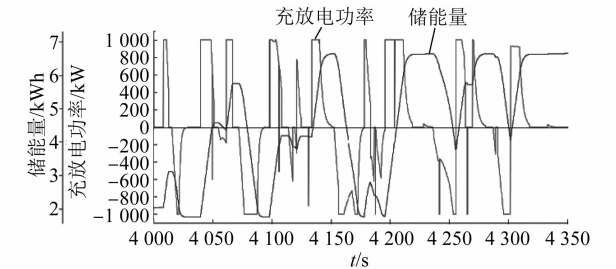


图 6 桐泾公园站电容储能装置仿真计算结果
Fig. 6 Simulation calculation results of capacitor energy storage device in Tongjing Park Station

根据图 6 仿真计算结果,作为科研项目,在桐泾公园站安装了额定功率 1 MW 的超级电容储能装

置,于 2019 年 1 月投入运行。

4) 装置节能效果:桐泾公园站超级电容储能装置运行稳定。该设置的充电阈值为 1 740 ~ 1 750 V,放电阈值为 1 610~1 620 V,设备投运至今已实现正向节电 35.7 万 kWh,平均每天节电量约为 1 000 kWh。

3.2 苏州轨道交通 4 号线能馈装置应用情况

苏州轨道交通 4 号线支线苏州湾北站安装的是中压逆变回馈型装置,主线苏州湾东站安装的是双向变流型能馈装置。

3.2.1 苏州湾北站中压逆变回馈型装置应用情况

1) 装置构成及主接线:该站中压逆变回馈装置额定功率为 2 MW,整套系统主要包括 DC 1 500 V 直流柜、逆变柜、隔离变压器、交流开关柜及配套电缆。其核心设备是采用三电平拓扑结构模块化设计的逆变柜,有利于减小网侧电流谐波。该装置逆变模块主电路拓扑图如图 7 所示。

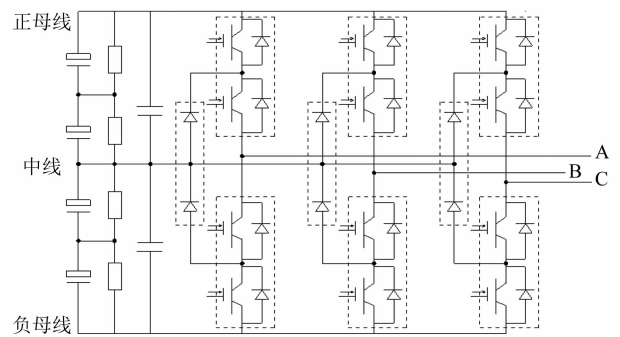


图 7 苏州湾北站中压逆变回馈型装置逆变模块主电路拓扑图
Fig. 7 Main circuit topology diagram of inverter module of medium voltage inverter feedback device in Suzhouwan North Station

2) 装置主要技术参数:苏州湾北站中压逆变回馈型装置主要技术参数如表 7 所示。

表 7 苏州湾北站中压逆变回馈型装置主要技术参数
Tab. 7 Main technical parameters of medium voltage inverter feedback device in Suzhouwan North Station

项目	参数
额定直流电压/V	DC 1 500
直流侧最高电压/V	DC 2 000
额定交流侧电压/kV	AC 35
额定功率/MW	2
启动电压值/V	1 600~1 800(可调)
逆变输出额定交流电压/V	AC 1 000
功率因数	>0.99
效率/%	>96
电压 THD/%	<3
电流 THD/%	<4

- [2] 闵捷. 城轨列车再生制动的节能控制系统研究[D]. 株洲: 湖南工业大学, 2018.
MIN Jie. Study on energy-saving control system for regenerative braking of urban rail trains[D]. Zhuzhou: Hunan University of Technology, 2018.
- [3] 王世杰. 城轨列车再生制动能量回馈控制系统研究[D]. 北京: 北方工业大学, 2018.
WANG Shijie. Research on regenerative braking energy feedback control system of urban rail[D]. Beijing: North China University of Technology, 2018.
- [4] 万宇翔, 张钢. 城市轨道交通列车再生制动能量回收技术研究[J]. 科技创新与应用, 201(31): 161.
WAN Yuxiang, ZHANG Gang. Research on regenerative braking energy recovery technology of urban rail transit train[J]. Technology Innovation and Application, 201(31): 161.
- [5] 周俊. 城市轨道交通逆变回馈式再生制动的研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
ZHOU Jun. Research on inverter feedback regenerative braking for urban rail transit[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [6] 王旭升. 地铁再生能量超级电容储能变流器研制[D]. 成都: 西南交通大学, 2018.
WANG Xusheng. Development of supercapacitor energy storage converter for regeneration energy of subway[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2018.
- [7] 高博. 基于逆变回馈的地铁再生制动能量回收方案研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.
GAO Bo. Research on regenerative braking energy recovery scheme for metro based on inverting feedback[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2018.
- [8] 张钢, 刘志刚, 牟富强. 双向变流器在城轨牵引供电系统中的应用[J]. 都市快轨交通, 2014(4): 109.
ZHANG Gang, LIU Zhigang, MOU Fuqiang. Application of bi-directional converter in urban railway traction power supply system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014(4): 109.
- [9] 陈琪, 孙才勤, 严长辉. 长沙地铁 1 号线双向变流型再生电能吸收装置[J]. 电气化铁道, 2017(3): 21.
CHEN QI, SUN Caiqin, YAN Changhui. Bi-directional converter type regenerative electric energy absorption device for Changsha Metro Line 1[J]. Electric Railway, 2017(3): 21.
- [10] 于正航. 模块化城市轨道交通再生制动储能系统研究与设计[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2018.
YU Zhenghang. Research and design of modular regenerative braking energy storage system for urban rail transit train[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2018.

(收稿日期: 2021-12-10)

(上接第 20 页)

据累积较少, 故本次线网末班车研究未将 5 号线的换乘站纳入其中, 后续针对新线与既有线的末班车匹配性进行研究, 进一步优化苏州轨道交通线网末班车衔接关系。

参考文献

- [1] TING C J. Transfer coordination in transit network[D]. College Park: University of Maryland, 1997.
- [2] 徐瑞华, 李璇. 城市轨道交通网络末班车衔接方案的综合优化[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2012(10): 1510.
XU Ruihua, LI Xuan. Comprehensive optimization for connection scheme of last trains in urban mass transit network[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2012(10): 1510.
- [3] 郭建媛, 贾利民, 秦勇. 运行计划约束下的动态可达性分析与计算[J]. 交通运输系统工程与信息, 2015(1): 118.
GUO Jianyuan, JIA Limin, QIN Yong. Analyzing and computing dynamic accessibility with constraints of schedule[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2015(1): 118.
- [4] 徐杰, 张新, 郭建媛. 基于末班车时刻表的城市轨道交通客流诱导系统的研究[J]. 中国铁道科学, 2014(2): 111.
XU Jie, ZHANG Xin, GUO Jianyuan. Research on passenger guidance system of urban rail transit network based on timetable of last train[J]. China Railway Science, 2014(2): 111.
- [5] 吴建军, 尹浩东, 郭欣, 等. 基于复杂网络的城市轨道交通末班车衔接研究[J]. 电子科技大学学报(社科版), 2018(5): 51.
WU Jianjun, YIN Haodong, GUO Xin, et al. Coordination of the last train in urban rail transit based on complex network[J]. Journal of UESTC (Social Sciences Edition), 2018(5): 51.
- [6] 徐瑞华, 张铭, 江志彬. 基于线网运营协调的城市轨道交通首末班列车发车时间域研究[J]. 铁道学报, 2008(2): 7.
XU Ruihua, ZHANG Ming, JIANG Zhibin. Study on departure time domain of the first and last trains of urban mass transit network based on operation coordination[J]. Journal of the China Railway Society, 2008(2): 7.
- [7] 张凌翔, 吴强, 陈颖雪. 时空可达性服务水平下的上海轨道交通末班车时刻表衔接研究[J]. 铁道学报, 2016(7): 46.
ZHANG Lingxiang, WU Qiang, CHEN Yingxue. Last train time-table cohesion in Shanghai rail transit with temporal and spatial accessibility service[J]. Journal of the China Railway Society, 2016(7): 46.

(收稿日期: 2021-12-10)