

# 关于地铁再生制动能量回馈装置运行情况分析研究

王海军 徐秀峰

青岛地铁集团有限公司运营分公司

**摘要:** 文章主要对再生制动能量回馈装置背景、原理、应用, 经济性等方面进行介绍, 结合地铁实际再生制动能量回馈装置运行情况, 分析再生制动能量回馈装置节能效果及经济性。

**关键词:** 再生制动能量回馈装置; 制动电阻; 经济性

随着技术发展, 列车制动能量的再利用方式也在不断完善, 由原来的机械制动转变为目前的“优先电制动”。随着电制动技术的推广, 在电制动的技术和方向上国内多家设备厂家和科研院校在设备制造和运行图优化上进行了不同尝试, 也都取得了一定的成绩。

## 一、背景

地铁线路由于站间距较短, 列车启动、制动频繁, 列车再生制动产生的反馈能量一般占牵引耗能的30%-40%。再生能量除按一定比例被相邻列车吸收利用外(行车密度、区间距离的不同而有差异), 剩余部分通过电阻消耗或能馈装置再利用。

## 二、再生制动能量回馈装置节能原理及应用

### (一) 再生制动能量回馈装置节能原理

当列车采用再生制动时, 牵引电机运行于发电状态, 将动能转变为电能, 供相邻列车使用。当无相邻车或相邻车不能全部使用这部分能量时, 网压升高大于设定的启动电压值, 车载制动电阻或地面制动电阻将投入使用消耗多余的电能。

当采用再生制动能量回馈装置时能馈装置启动值设置低于电阻消耗启动值, 制定能量优先由再生制动能量回馈装置通过逆变将电能回馈至35kV中压环网, 做到能量再吸收利用。

### (二) 设备发展情况

在地铁系统中, 应用广泛的制动类型有电阻耗能型、超级电容储能型、飞轮储能型、逆变回馈型四种。电阻耗能型的原理是将列车制动产生的电能通过发热电阻消耗掉, 存在能源浪费; 超级电容型的原理是将列车产生的电能储存在电容中, 可将储存的能量释放, 但大容量电容器组频繁处于充放电状态而导致其使用寿命较短。飞轮储能型与电容储能型一样, 储能元件是飞轮电机, 但飞轮电机工作寿命较短。逆变回馈型再生制动能量回馈装置将制动能量逆变后反馈回交流中压环网达到节约能源的目的, 但技术复杂, 设备投资较大。逆变回馈型再生制动能量吸收装置在国外的应用和研究较多。

### (三) 设备运行情况

再生制动能量回馈装置在2013年挂网试行阶段, 设备运行情况相对较好, 在2016年大面推广过程中, 由于产品设计和制造不成熟, 在实际应用过程中出现了短路烧损的情况。2018年左右随着诸多大型企业加入, 再生制动能量回馈装置的运行步入了相对稳定的阶段。

## 三、地铁再生制动能量回馈装置节能运行情况及必要性分析

### (一) 再生制动能量回馈装置运行情况

再生制动能量回馈装置的启动电压直接决定了能馈装置投入早晚的问题, 能馈装置投入早, 能馈节能率提高可能造成邻车吸收不足。启动电压设置较高, 能馈装置投入晚, 邻车吸收增加但存在机械制动投入增加的可能。当行车间隔发生改变时, 能馈装置节能效果也会发生改变。

定义  $\eta_1$  为全线牵引变电所逆变回馈能量占牵引能量的比例,  $\eta_2$  为全线牵引变电所逆变回馈能量占所有列车再生制动总量的比例。

### (二) 再生制动装置/车载制动电阻必要性分析

根据地铁设计规范要求, 直流1500V系统持续最高电压为

1800V, 相关1500V断路器、1500V电缆及电客车牵引系统技术参数均以此为基础设计。广州地铁6号线高峰2分31秒行车间隔, 正常运营期间地面电阻基本不投入运行, 列车制动能量被其他列车完全吸收。

在早发车、晚收车及线上列车密度不高的情况下, 地面电阻存在吸收的情况。列车进行紧急制动时, 地面制动电阻存在吸收的情况。当全线退出地面制动电阻装置, 接触网网压最高达到约1960V, 长期运行会影响供电系统设备运行安全。

综上: 非正常运行工况下, 需要能馈装置或车载制动电阻要投入工作, 以保证网压稳定在允许范围之内, 保证牵引供电设备运行安全, 建议保留能馈装置或制动电阻。

## 四、经济性分析

### (一) 节能效果评估

地铁供电再生逆变回馈装置节能效果受启动电压、牵引变电所数量、发车间隔、运营时间等因素影响, 定义能馈装置日回馈能量W。

$$W = \sum_{i=1}^J \left( \sum_{j=1}^{M_1} P_{ij} - \sum_{k=1}^{M_2} P_{Mik} \right) t_i$$

式中, J为全日发车间隔数量;  $M_1$ 为牵引变电所数量;  $P_{ij}$ 为第i种发车间隔, 第j个牵引变电所每小时反馈平均的有功功率;  $P_{Mik}$ 为第i种发车间隔, 第k个主所每小时的平均逆功率;  $t_i$ 为第i种发车间隔的运营时长。W值可算、可测。

$$\text{未安装回馈装置牵引能耗: } W_{ref} = \sum_{i=0}^J \left( \sum_{j=1}^{M_2} P_{Mij} \right) t_i$$

$$\text{安装回馈装置后牵引能耗: } W_{inv} = \sum_{i=0}^J \left( \sum_{j=1}^{M_2} P_{Mij}'' \right) t_i$$

再生制动能量回馈装置的系统节能率

$$\eta = (W_{ref} - W_{inv} / W_{ref}) * 100\% \quad \text{可算、可测}$$

### (二) 经济性分析

单线路按照隔一个牵混所设置一套的原则再生能馈装置, 全部取消列车车载电阻, 考虑期间维护使用成本, 共计增加设备采购、使用费用约1300万元。

按单线路现阶段日均节电8000度, 增加的设备采购费约6年回收成本; 保留车载电阻增加再生能馈装置约10年回收成本。参照目前节电水平, 共可节约电费约5000万元。

## 五、结论

1. 根据节能数据测算, 在行车密度较小情况下能够实现节能, 在5至10年能够回收设备投资, 在设备30寿命内预估会节省一定数额的电费。从节能方面选用地再生制动能量回馈装置, 可以实现列车减载、制动能量被充分回收利用。

2. 随着行车密度的加大, 能馈装置或制动电阻吸收的电能会降低, 当到达一定密度时, 列车制动能量能被其他列车充分吸收。但需保留能馈装置或车载电阻, 以保证非正常运行工况下网压稳定在允许范围之内, 确保牵引供电设备运行安全。

## 参考文献

[1] 魏荣耀, 再生制动能量回馈装置在郑州地铁的试验及应用[J]. 郑州市轨道交通有限公司, 2016.  
 [2] 陈勇, 基于逆变回馈的地铁再生制动能量吸收研究[J]. 四川: 西南交通大学, 2011.  
 [3] 刘炜, 城市轨道交通逆变回馈装置的系统设计及节能效果. 四川: 西南交通大学, 2018.