

Research on Application of Regenerative Energy Absorption Device in Rail Transit

Lin Pei

Beijing Metro Operation Co., Ltd., Beijing, 100016, China

Abstract

The train running law of subway train is generally parking, traction, idling, regenerative braking, air braking. When the train is regeneratively braking, the electric motor is converted into a generator to feed back energy to the grid. When the train density is high, most of the regenerative energy can be absorbed by other vehicles. When the train cannot absorb the regenerative braking energy, the traditional method is to use the on-board resistance to consume it. This method is relatively simple, but it has great disadvantages. At present, the main practice is to set up a regenerative braking energy absorption device in the traction station, which can be used by the resistance cabinet or inverter to give back to other voltage grade loads, this method can effectively solve the disadvantages of vehicle resistance, and at the same time, improve the utilization rate of regenerated energy. Because the pure resistance dissipation regenerative energy feed device is the same as the vehicle resistance, the application of inverter feedback regenerative energy device is discussed in this paper. This paper introduces the principle and category of inverter feedback regenerative energy device, and analyzes the application effect of different feedback regenerative energy devices from the point of view of energy saving and economy through the real operation data of existing lines.

Keywords

subway train; regenerative braking; regenerative energy; inverter feedback

再生能量吸收装置在轨道交通中的应用研究

裴琳

北京市地铁运营有限公司, 中国·北京 100016

摘要

地铁列车运行规律一般为停车、牵引、惰行、再生制动、空气制动。当列车进行再生制动时,电动机转换为发电机,向电网回馈能量,列车密度较大时再生能量大部分可以被其他车辆吸收。当列车无法吸收再生制动能量时,传统做法是利用车载电阻消耗掉,这种做法比较简单,但是有很大弊端。目前主流的做法是在牵引站设置再生制动能量吸收装置,通过电阻柜或者逆变器回馈给其他电压等级负荷使用,这种方法可以有效解决车载电阻的弊端,同时提升再生能量利用率。由于纯电阻消耗型再生能量装置与车载电阻本质无异,因此论文重点讨论逆变回馈型再生能量装置的应用。论文介绍了逆变回馈型再生能量装置的原理及类别,通过既有线路的运营真实数据,从节能和经济的角度分析不同回馈类型的再生能量装置的应用效果。

关键词

地铁列车; 再生制动; 再生能量; 逆变回馈

1 引言

随着轨道交通事业的发展壮大,科学技术也在不断迭代发展,同时社会各界对节能减排的要求也不断提高,传统电阻消耗型再生能量装置已不能满足新时代地铁发展需要。这就要求地铁不断的创新发展,列车在再生制动模式下所产生的能量很可观,如果能得到充分地利用将会带来很大的经济效益。随着电子技术的飞速发展,逆变回馈型再生能量装置的技术

已逐渐成熟,在新建线路和既有线路的后期工程中均有应用,通过对运营数据的分析,发现逆变回馈型再生能量装置带来的经济效益是非常大的,对建设节约型地铁有重要意义。

2 概述

地铁列车的制动方式以电制动(再生制动)为主,空气制动(闸瓦制动)为辅。列车在运行到一定速度时一般先进行再生制动,减到一定速度时再进行空气制动。当列车进行再生制动时,由于运行方式的转变,电动机转变成发电机,将多余的能量反馈给牵引网^[1]。一般在非高峰时刻,列车的

【作者简介】裴琳(1986-),男,从事长沙地铁轨道交通供电方向研究。

再生制动能量只有很少的一部分被其他车辆吸收, 此时如果不加以限制将会造成网压的升高, 网压升高影响了牵引站的供电质量, 不利于地铁的安全运行。地铁列车运行模式如图 1 所示。

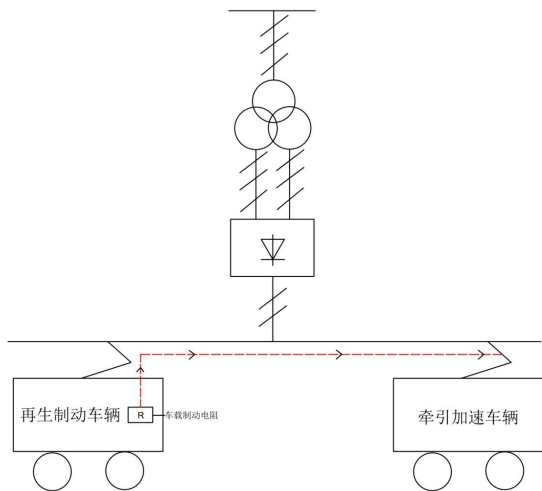


图 1 地铁列车运行模式

当列车在车站停站, 乘客进行上下车作业时, 负载平稳, 网压接近于空载状态的电压, 当列车出站, 并开始加速启动时, 牵引网压处于下降区间, 列车从最高速开始降低加速度时网压处于回升阶段, 这两个时间段网压始终低于停止状态电压。当列车处于惰行状态时, 电动机转变为发电机状态, 网压快速升高, 如果不加以限制, 将严重影响电压质量^[2]。此时, 如果设置了再生能量吸收装置, 那么当网压达到整定值时, 再生能量吸收装置立刻投入使用, 将多余的再生能量回收消耗或者再利用, 同时达到降低网压的目的。

3 再生能量吸收装置

传动列车制动能量除被其他车辆吸收利用一部分外, 大部分都被车载电阻消耗掉, 利用率很低。目前主流的做法是在牵引站设再生能量吸收装置, 电阻柜设置在单独的房间内, 通过集中设置再生能装置来吸收剩余能量, 可选择通过电阻消耗掉或者逆变回馈给其他电压等级负荷使用^[3]。

3.1 安装位置

再生能量吸收装置设置在牵引站直流正负母线之间, 正极断路器与总闸分闸开关同排摆放并绝缘安装, 其他柜体单独摆放。另外, 电阻柜一般设置在单独房间内, 并配有通风设备。集中设置的好处就是降低列车自重, 避免列车制动时车载电阻工作时引起隧道温度升高, 减少维护工作量, 降低

车辆成本^[4]。

3.2 再生能量吸收利用方案

目前, 北京地铁所辖 16 条线路主要有两种类型再生能量吸收装置: 电阻消耗型和逆变回馈型, 其中逆变回馈型又分为中压逆变回馈和低压逆变回馈。将制动能量转换为交流电后向地铁其他负荷供电, 通过中压系统向其他设备供电即为中压逆变回馈型, 向本站 400V 系统供电, 由其他低压负荷吸收使用即为低压逆变回馈型。

3.2.1 电阻消耗型

再生制动电阻消耗型装置工作原理如图 2 所示。

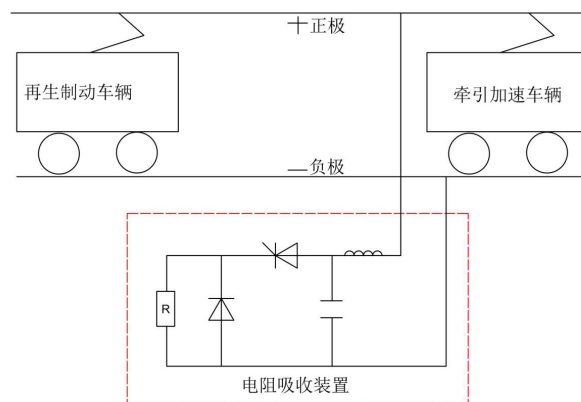


图 2 电阻消耗型装置工作原理图

当处于再生制动模式下的列车回馈的能量不能被其他车辆完全吸收时, 电阻柜通过斩波器的控制, 立刻投入工作, 通过调整斩波器的导通比, 从而达到调整电网电压的目的, 此时电阻柜将多余的能量转换为热能消耗掉^[5]。

3.2.2 逆变回馈型

逆变回馈型再生能装置有低压回馈和中压回馈两种方式, 如图 3、图 4 所示。

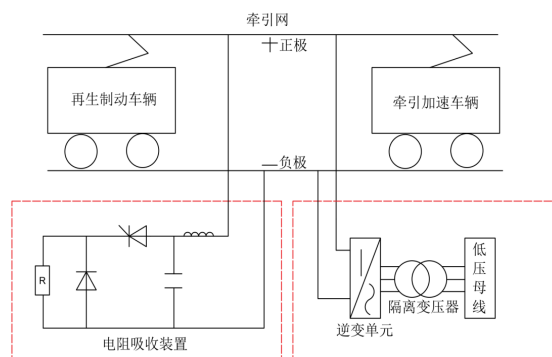


图 3 逆变回馈型（低压）

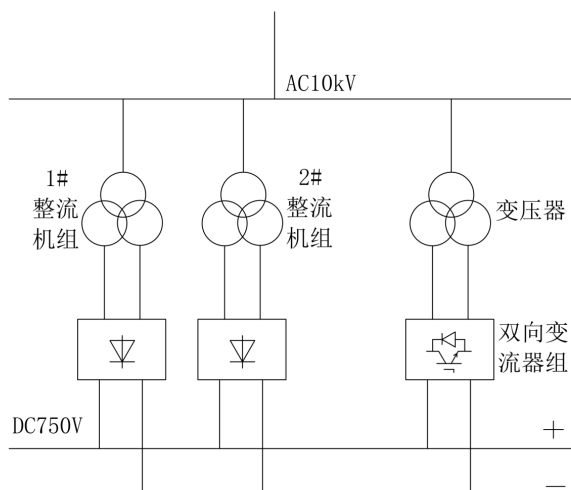


图4 逆变回馈型（中压）

逆变回馈型装置主要由三部分组成，开关及滤波部分、逆变吸收部分、电阻吸收部分，由于10kV系统吸收能力更强，所以中压逆变型装置不设电阻部分。当列车再生制动导致网压升高达到动作值时，逆变器开始工作，吸收牵引网的电能，将其转变为交流电反馈至中压或低压交流母线，逆变电能超过容量限制时，通过斩波器控制使电阻柜开始工作，进入电阻消耗模式。

3.3 再生制动装置的应用

北京市地铁运营有限公司各线路再生能配置情况如表1所示，其中1号线、2号线、13号线未集中配置再生制动吸收装置。

表1 各线路再生制动配置情况

线路	配置类型	线路	配置类型
5号线	中压逆变回馈型	10号线二期	低压逆变回馈（两站是中压逆变）
6号线一期	纯电阻消耗型	15号线一期西段	纯电阻消耗型和中压逆变回馈型
6号线二期	低压逆变回馈型	15号线一期中段、东段	纯电阻消耗型
6号线西延	中压逆变回馈型	S1线	低压逆变回馈型
7号线一期	低压逆变回馈型	八通线南延（两站）	中压逆变回馈型
7号线东延	中压逆变回馈型	昌平线一期	纯电阻消耗型
8号线一期二期	纯电阻消耗型	昌平线二期	低压逆变回馈型
8号线三期	中压逆变回馈型	房山线	纯电阻消耗型
8号线四期（两站）	超级电容型	机场线	纯电阻消耗型
9号线	低压逆变回馈型	亦庄线	纯电阻消耗型
10号线一期	中压逆变回馈型		

4 逆变回馈型装置在线路中的效果

北京地铁9号线和10号线均采用逆变型回馈装置，论文选取9号线郭公庄站和10号线十里河站、宋家庄站作为参考站，其中郭公庄站和宋家庄站为低压逆变回馈型，十里河站为中压逆变回馈型。通过采集2020年1月1日至1月5日三站日总牵引电量和日回馈电量来分析逆变型再生能装置的应用效果。郭公庄站、宋家庄站、十里河站日回馈电量占比分别如表2、表3、表4所示。

表2 郭公庄站日回馈电量占比

逆变类型	日期	总牵引电量 / (kW·h)	回馈电量 / (kW·h)	回馈电量占比 / %
低压逆变回馈（400V系统）	1月1日	6920	928	13.4
	1月2日	10920	797	7.2
	1月3日	10420	825	7.9
	1月4日	6700	955	14.2
	1月5日	9190	885	9.6

表3 宋家庄站日回馈电量占比

逆变类型	日期	总牵引电量 / (kW·h)	回馈电量 / (kW·h)	回馈电量占比 / %
低压逆变回馈（400V系统）	1月1日	10043	910	9.0
	1月2日	8791	870	9.8
	1月3日	8182	763	9.3
	1月4日	10100	829	8.2
	1月5日	10340	842	8.1

表4 十里河站日回馈电量占比

逆变类型	日期	总牵引电量 / (kW·h)	回馈电量 / (kW·h)	回馈电量占比 / %
中压逆变回馈（10kV系统）	1月1日	24960	6012	24.0
	1月2日	18120	5110	28.1
	1月3日	18420	5170	28.0
	1月4日	22466	5250	23.3
	1月5日	21080	5180	24.5

从表2看出，不同线路受列车运行工况、牵引站设置、列车满载率、上线列车数量等诸多因素影响，再生能回馈比率略有不同，平均回馈比率在10%左右。

从表3看出，相同线路不通类型的回馈装置回馈比率相差很大，中压逆变回馈型回馈比率是低压逆变回馈型回馈比率的3倍左右。

以表4进行估算，取中压逆变回馈日回馈电量平均值5344 kW·h，取低压逆变回馈日回馈电量平均值842 kW·h，电价按0.8元/kW·h计算，设10号线全线各站运行工况一致，其中中压逆变型回馈装置共有14套，低压逆变

型回馈装置共有 14 套,中压逆变型回馈装置每天可节约电费 59852.8 元,全年节约 2184.6 万元,低压逆变型回馈装置每天可节约电费 9430.4 元,全年节约 344.2 万元,合计节约 2528.8 万元。

通过以上分析可知,逆变回馈型再生能装置具有广阔的应用前景,尤其是中压逆变回馈型再生能装置,在不考虑设备成本的情况下,经济效益远超低压逆变回馈型再生能装置。

5 结语

逆变回馈型再生能装置技术已逐渐成熟,新建线路或改造线路根据自身发展要求完全可以采用逆变回馈型再生能装置,建议优先选用回馈至中压网络的装置,它的节能效果要远好于低压逆变回馈型再生能装置。随着电力电子技术的发展,装置的稳定性和设备性价比会越来越高,越早采用就能越早的受益^[6]。

纯电阻消耗型再生能装置因为不具有节能效果,并且运营故障率较高,会逐渐被历史所淘汰。目前,还有另一个发展分支储能型再生能装置,主要分为超级电容储能和飞轮储能两种,两种技术在国际上已经很成熟。中国已有多家公司

着手研究,尚未大范围应用,不过超级电容储能型再生能装置已经在北京地铁 8 号线德茂和瀛海两站挂网运行,目前运行平稳,飞轮储能还没有应用实例,相信很快会有应用案例。从节能减排的角度来看,逆变回馈型再生能装置和储能型再生能装置的本身出发点是一致的,只不过是两个方向,未来哪个具有成本优势、运行更稳定将会成为发展的主流。

参考文献

- [1] 黄德胜,张巍.地下铁道供电[M].北京:中国电力出版社,2009.
- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB50157-2013 地铁设计规范[S].2013.
- [3] 王小峰.城市轨道交通供电系统的设计方法[J].电气化铁道,2010(04):64-65.
- [4] 郑瞳炽,张明锐.城市轨道交通牵引供电系统[M].北京:中国铁道出版社,2005.
- [5] 陈勇,刘承志.回馈的地铁再生制动能量吸收的研究[J].电气化铁道,2011(03):36-39.
- [6] 王畴,城市轨道交通再生制动能源利用分析[J].城市轨道交通研究,2018(05):48-52.