

文章编号:1006-2106(2014)09-0121-04

# 轨道交通牵引系统再生能量利用方案研究<sup>\*</sup>

李力鹏<sup>1</sup> 盛家川<sup>2\*\*</sup>

(1. 中铁电气化勘测设计研究院有限公司, 天津 300250; 2. 天津财经大学, 天津 300222)

**摘要:**研究目的:城市轨道交通普遍采用 VVVF 动车组列车,在列车制动时,将再生大量能量,如果能够对这部分能量加以有效利用,则对于整个轨道交通的节能降耗将意义重大。目前工程上有几种再生电能利用方案,但不同方案的节能效果相差较大,部分方案甚至浪费能量。因此,有必要将理论计算和工程实际测量相结合,对现有再生电能利用方案的节能效果进行综合分析。

**研究结论:**本文通过构建轨道交通牵引供电系统模型,并将计算结果与工程实际测量结果进行比较分析,结果表明:(1)当牵引变电所不设置再生制动装置时,车辆间的再生能量相互利用率很高;(2)传统的将再生制动电阻置于牵引变电所不但不会节省能量,相反会浪费能量;(3)当再生电能利用装置的容量达到一定值时,再增加容量,对于节能效果影响已经很小;(4)该研究结果可应用于轨道交通牵引供电系统的设计中。

**关键词:**再生制动;能量吸收;逆变回馈

**中图分类号:**U260.35 **文献标识码:**A

## Research on the Utilization of Regenerative Energy of Rail Transit Traction System

LI Li-peng<sup>1</sup>, SHENG Jia-chuan<sup>2</sup>

(1. China Railway Electrification Survey Design & Research Institute Co. Ltd, Tianjin 300250, China; 2. Tianjin University of Finance and Economics, Tianjin 300222, China)

**Abstract: Research purposes:** Widely used in urban rail transit, the VVVF multiple unit trains will generate a mass of energy when they are braking. If this part of energy can be used effectively, it will be of great significance for the energy-saving and cost-reducing of the whole rail transit. At present, there are several kinds of regenerative energy utilization proposals. But difference of saving effect of different schemes is very large, and part of proposal may lead to a waste of energy. Therefore, it is necessary to combine theoretical calculation with practical measurement and make comprehensive analysis on the energy saving effect of current regenerative energy utilization proposals.

**Research conclusions:** This paper constructs the model of rail transit traction power supply system and studies the calculation result and measurement result. The experiments show that: (1) The regenerative energy utilization rate is very high between the vehicles when no regenerative energy absorption devices are installed in traction substations. (2) Traditional proposal of putting regenerative braking resistor in traction substation may not save energy, on the contrary, it will waste energy. (3) When the capacity of electricity utilization device reaches a certain value, the additional capacity will make very little effects on energy saving effect. (4) The research results can be used in the design of rail transit traction power supply system.

**Key words:** regenerative braking; energy absorption; inverting

目前轨道交通普遍采用的 VVVF 动车组列车,在 列车起动时,由牵引网吸收电能,在列车制动时会产生

<sup>\*</sup> 收稿日期:2014-05-29

基金项目:天津市科技发展战略研究计划项目(12ZLZLZF01700)

<sup>\*\*</sup> 作者简介:李力鹏,1979 年生,男,高级工程师,现任中铁电气化勘测设计研究院有限公司城轨项目总部总工程师;盛家川,1982 年出生,女,讲师。

制动能量。制动能量相对较大,一般占到总吸收电能的 30% ~ 50%。而轨道交通的负荷中,根据线路条件不同,牵引负荷的用电量占到总用电量的 40% ~ 70%。因此,如果能够对制动能量加以有效利用,则对于减少轨道交通的用电量,节省运营费用以及整个轨道交通的节能降耗均意义重大。

## 1 再生能量吸收技术发展现状

### 1.1 概述

列车制动一般为电制动(再生制动、电阻制动)和空气制动两级制动,当列车制动时,首先采用再生制动方式,将车辆的动能转化为电能,向牵引网输出,并抬升制动车辆所在位置的牵引网的电压,当列车再生的能量能够被附近的其他列车利用时,电压则不会继续抬升,否则,再生车辆的电压将继续升高,当电压抬升到一定程度,仍不能满足制动要求时,将由再生制动转入电阻制动,若电阻制动仍不能满足要求,则加入空气制动。

为了有效利用制动能量,目前有电阻耗能、电容储能和逆变回馈 3 种方式。其主要工作原理是:当处于再生制动工况的列车产生的制动能量不能完全被其他车辆和本车的用电设备吸收时,牵引网电压将很快上升,网压上升到一定程度后,牵引变电所中设置的再生能量吸收装置投入工作,吸收掉多余的再生电流,使车辆再生电流持续稳定。

### 1.2 各种再生制动方式简述

#### 1.2.1 电阻耗能方式

电阻耗能方式为 IGBT 斩波器和吸收电阻相配合的恒压吸收方式,在该方式下,装置根据再生制动时直流母线电压的变化状态调节斩波器的导通比,从而改变吸收功率,将直流电压控制在某一设定值的范围内,并将制动能量消耗在吸收电阻上。该装置主接线示意如图 1 所示。

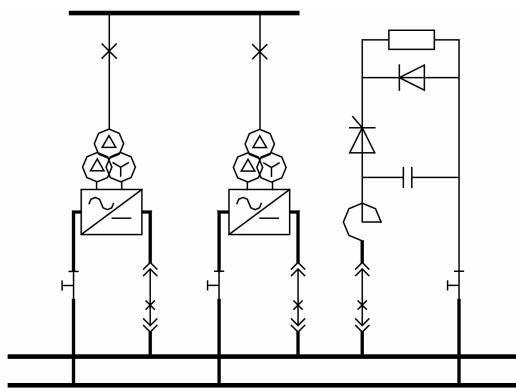


图 1 电阻耗能型设备主接线

该方式的优点:控制简单和直观,国内有比较成熟

产品制造,价格较低。

该方式的缺点:将再生制动能量消耗在吸收电阻上发热消耗,对再生能量不能有效利用,不利于节能。

#### 1.2.2 电容储能方式

电容储能方式为 IGBT 逆变器将列车的再生制动能量吸收到大容量电容器组中,当供电区间内有列车起动、加速需要取流时,该装置将所储存的电能释放出去并进行再利用。该类吸收装置主接线示意如图 2 所示。

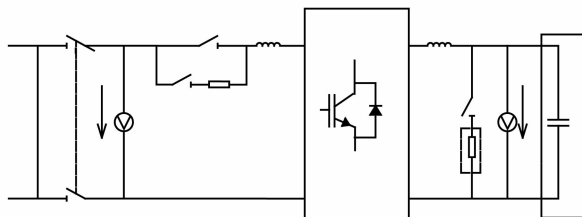


图 2 电容储能装置接线示意

该方式的优点:有效利用了列车制动时再生能量,节能效益好;再生能量在直流系统内转换,对电网系统影响较小。

该方式的缺点:价格较高,国内产品仍处于试验制造阶段。

#### 1.2.3 逆变回馈方式

逆变回馈方式采用电力电子器件构成大功率三相逆变器,该逆变器的直流侧与牵引变电所中的整流器直流母线相联,其交流进线接到交流电网上;当再生制动使直流电压超过规定值时,逆变器启动并将再生直流电能逆变成工频交流电回馈至交流电网。该装置主接线示意如图 3 所示。

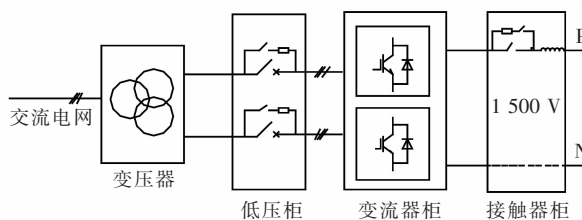


图 3 逆变回馈方式原理图

逆变回馈方式包括两种:逆变至 AC 0.4 kV 网络和逆变至中压网络。

逆变至 AC 0.4 kV 网络的再生能量吸收装置受容量限制须与电阻结合才能满足目前地铁再生能量吸收的需求,因此通常采用逆变 + 电阻的型式。而逆变至中压的再生能量吸收装置由于将能量逆变至中压网络,设备容量较大,因此无需再增加电阻设备。

逆变回馈方式的优点:将再生能量直接回馈到中压环网或车站 AC 0.4 kV 电网,不需要配置储能元件。

逆变回馈方式的缺点:大规模工程应用经验尚有不足;存在逆变能量向地区电网反送电的情况。

2 不同吸收方案对能耗的影响

2.1 建模

为从理论上进行定量的分析,需要建立整个牵引供电系统的网络模型如图4所示,并纳入车辆负荷。

图中, $R_f$ 为接触网等效阻抗; $R_s$ 为牵引变电所等效内阻; $V_0$ 为变电所整流机组空载电压; $R_e$ 为接地网电阻。

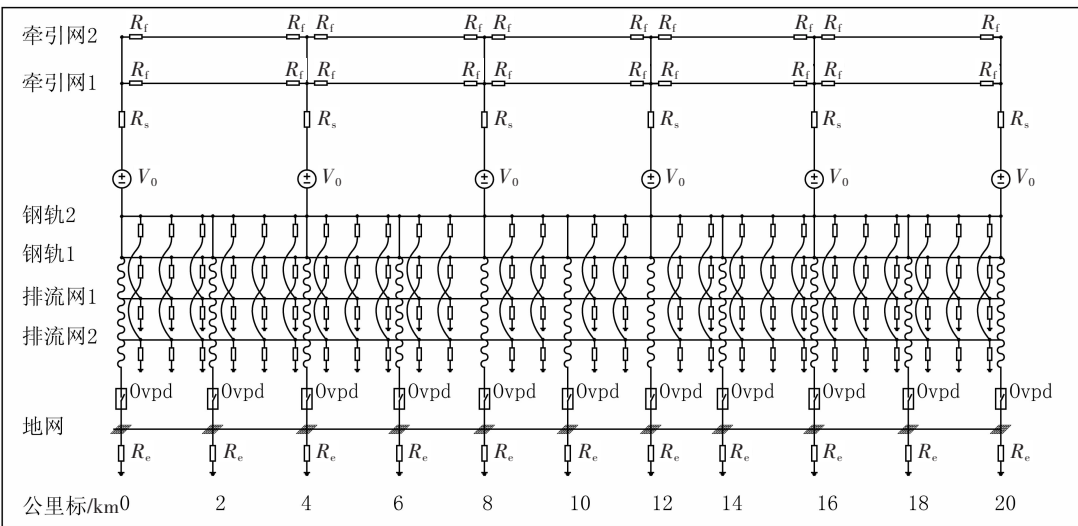


图4 轨道交通牵引供电系统模型

2.2 模拟计算

以某工程为例,线路长度约40.9 km,车辆采用6A车型、4动2拖编组,牵引网供电电压为DC 1 500 V。对该线路进行不同列车运行密度、不同再生吸收方式下的模拟,模拟结果如表1及图5所示。

为简化计算,在模拟中将电阻耗能方式、逆变至0.4 kV以及逆变至中压系统均等效为逆变器+电阻,当吸收能量大于逆变器的容量时,按电阻消耗考虑。

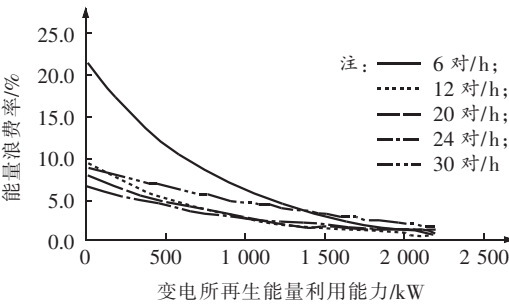


图5 不同再生利用能力下的能量浪费率

表1 单车运行能耗计算结果

项目	上行	下行
列车运行能耗/(kWh)	625.7	610.3
再生/(kWh)	671	
停站时分/s	1 850	
运行时分/s	2 834.3	2 855
总运行能耗/(kWh)	1 738.6	
再生比例/%	38.6	

由表1可以看出,再生能量占总牵引能量的38.6%,其比例较大。

从图5可以看出,当变电所再生能量利用能力为0时(对应电阻吸收方式),再生能量浪费最大,当列车运行密度为6对/h时,牵引电能浪费率达到21.8%。随着变电所再生能量利用能力增大,部分再生能量得到利用。当吸收利用能力达到2 000 kW时,浪费率

降低至2%左右。

3 实际测量结果

通过对几个工程的车辆的测量取数,得到列车在实际运行中的再生能量比例以及再生能量的利用率。

基本条件:车辆为6A车型、4动2拖编组,牵引网供电电压为DC 1 500 V,不设置再生制动能量吸收装置,车辆本身设置制动电阻。测量的结果如表2所示。

实测列车样本分别运行了约41.5万公里和7万公里,已经运行了相当长的一段周期,因此,其中的再生能量的比例以及再生能量的利用率应具有一定的代表意义。

表 2 车辆实际再生能量及利用

项目	线路 1		线路 2	
	车辆 1	车辆 2	车辆 3	车辆 4
总行驶里程/( $10^4$ km)	41.5	41.5	7.1	7.0
吸收能量/( $10^4$ kWh)	159.4	159.3	62.1	61.5
反馈能量/( $10^4$ kWh)	86.1	86.1	23.3	23.1
制动电阻耗能/( $10^4$ kWh)	3.9	3.9	3.0	2.9
再生能量比例/%	54	54	37.5	37.5
再生能量利用率/%	95.4	95.4	87.3	87.3
制动电阻消耗 占总能耗比例/%	2.5	2.5	4.8	4.8

## 4 模拟结果与实测结果对比分析

### 4.1 再生能量的大小

由表 2 可以看出,实际列车运行时,再生能量在总牵引能量中占比分别为 54% 和 37.5%,其比例较大,这一点与模拟的结果相符。

### 4.2 不设再生能量吸收装置时,再生能量的利用

由表 2 制动电阻消耗能量比例来看,当变电所不设置再生制动装置时,再生能量的消耗率(能量的浪费率)在 2.5% ~ 4.8% 之间,其比值不是很大。这说明在变电所不设再生制动装置的情况下,车辆间的相互吸收能够使大部分再生能量得到利用。以某工程年牵引用电量 1 亿度为例,不能被吸收利用的电能为 250 万度 ~ 480 万度。

### 4.3 变电所设置电阻吸收装置时

从模拟的结果来看,当变电所设置电阻吸收装置时,由于电阻属于耗能装置,再生电能不能被有效利用,而是以发热的形式消耗。其电能的浪费率最高达到 21.8%。与不设再生能量吸收装置时的再生能量浪费率相对比,说明在变电所设置电阻吸收装置时,原本可以由其他车辆吸收的再生能量被电阻以热的形式浪费了。

### 4.4 设置再生利用装置时再生能量的利用率

将模拟结果与实测结果中的再生能量浪费率相结合,当牵引供电系统设置再生利用装置(电容储能或逆变回馈)时,再生能量除被变电所吸收装置吸收外,剩余的能量将继续抬升网压,以便于其他车辆的利用。当再生能量吸收装置容量达到 2 000 kW 时,再生能量的浪费率将很低。当容量更大时,除了增加工程成本外,对再生能量利用的影响已经很小。

### 4.5 制动电阻的设置

若系统仍从减少机械磨耗角度设置制动电阻,则制动电阻宜设置于车辆,原因是,设置于车辆的制动电阻在制动过程中,是除机械制动以外的最后电制动方式,其起动电压较高,使用频率更低,更加有利于节能。

## 5 结论

本文结合目前国内采用的几种再生能量吸收方式,通过建立轨道交通牵引供电系统网络模型,并将模拟计算结果与实际测量结果相对比,得出以下结论:

- (1) 再生能量在总牵引能量的比重较大;
- (2) 当变电所不设再生能量吸收装置时,通过车辆间的相互吸收,再生能量的利用率很高;
- (3) 若变电所设置了电阻吸收装置,将浪费大量的再生电能;
- (4) 根据模拟结果,变电所再生能量利用装置的容量达到 2 000 kW 时,再增加容量,对于节能效果的影响已经很小;
- (5) 若系统从减少机械磨耗的角度设置制动电阻,则以设置于车辆为宜。

## 参考文献:

- [1] 王利军,李伟东,张峻岭,等. 高速动车组再生制动控制系统研究与仿真[J]. 铁道工程学报,2012(6):78-82.  
Wang Lijun, Li Weidong, Zhang Junling, etc. Research and Simulation of Regenerating Braking Control System of High-speed EMU[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2012(6):78-82.
- [2] 冯艳艳,孙才勤. 城市轨道交通混合逆变装置的应用[J]. 城市轨道交通研究,2011(1):110-112.  
Feng Yanyan, Sun Caiqin. Application of Hybrid Inverter Equipment in Urban Rail Transit[J]. Urban Mass Transit, 2011(1):110-112.
- [3] 陈勇,罗锐鑫. 城市轨道交通再生制动能量吸收方式的研究[J]. 城市轨道交通研究,2012(8):157-159.  
Chen Yong, Luo Ruixin. Research on Regenerative Braking Energy Absorption in Urban Rail Transit[J]. Urban Mass Transit, 2012(8):157-159.
- [4] 余龙,张钢. 双向变流器在城市轨道交通中的应用浅析[J]. 电气化铁道,2012(6):42-48.  
Yu Long, Zhang Gang. The Analysis of the Application of Double Directional Converter in Urban Rail Transit[J]. Electric Railway, 2012(6):42-48.
- [5] 王彦峥,苏鹏程. 城市轨道交通再生电能的吸收与利用分析[J]. 城市轨道交通研究,2007(6):42-45.  
Wang Yanzheng, Su Pengcheng. Absorption and Usage of Regenerative Energy in Urban Mass Transit[J]. Urban Mass Transit, 2007(6):42-45.
- [6] 连鹏飞. 深圳地铁 2 号线工程再生制动能量吸收装置设置方案研究[J]. 铁道工程学报,2007(6):85-89.  
Lian Pengfei. Research on the Setting Proposal of Regenerative Braking Energy Absorbing Equipment for Shenzhen Metro Line 2[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2007(6):85-89.