

[轨道交通]

# 现代轨道交通再生能馈技术研究及应用

文/昆明地铁运营有限公司 王 豫

以现代轨道交通供电系统电客列车制动能耗为研究对象，讨论了再生制动电能的产生和再次利用，对目前再生制动能量共三类6种使用方案进行了选型分析，最终确定独立支路型回馈方案的最优选择，并通过Matlab/Simulink软件进行了仿真，并根据实践总结了再生能馈装置在现代轨道交通中的使用经验。

随着大部分城市线网的形成和运营线路增多，现代轨道交通的管理核心也越来越重视运营成本的控制。现代轨道交通依赖电能为各专业设备和系统提供动力，研究如何高效地利用电能并进行升级，成为当前热点。地铁车辆运行过程中站间距离短，列车起动、制动频繁，产生的制动能量非常可观，当前这部分能量多采用制动电阻的方式转化为热能进行释放。本文根据西南某城市地铁的实际情况，在传统地铁电力牵引系统中增加再生能馈装置对这部分能量进行了逆变回馈利用。对实际工程应用效果进行数据分析，总结了再生能馈装置在现代轨道交通中的使用经验。

## 列车牵引及制动

### 1. 列车牵引

现代轨道交通列车牵引通过整流机组实现，由两台采用不同位移角度的整流变压器和配套整流机并列运行，将来自系统的35 kV交流电压降为交流590 V，再通过三相桥式全波整流器输出24脉波750 V直流电至直流母排，最后通过直流馈线断路器、触轨隔离开关送电至接触轨提供列车电能。

### 2. 列车制动

目前轨道交通普遍采用的VVVF动车组列车，其制动一般为电制动（再生制动、电阻制动）和空气制动两级制动，运行中以再生制动和电阻制动为主，空气制动为辅。采用交流牵引电动机的地铁列车通过发出信号控制变流器，工作模式来变换电动机工作状态。当列车在制动时，发出信号降低变流器输出电压，交流电动机定子频率也随之降低，交流牵引电动机定子电压频率小于电动机的转子旋转频率，牵引电动机工作状态被改变，由电动机模式改变为发电机模式为列车提供制动力，同时列车动能转换为电能并将这部分电能回馈至直流牵引系统，使网压升高，这部分电能就是再生制动能量。

列车在不同牵引方式下的能量消耗分布如图1所示，分为加速能量、惰性行进能量和制动能量，其中制动能量占比最多，约占牵引能量的30%甚至更多。从能量再利用的角度看，列车再生制动能量的收益和节能效果是相当可观的。

## 再生能馈方案利用对比

目前现代轨道交通牵引变电所均采用整流变

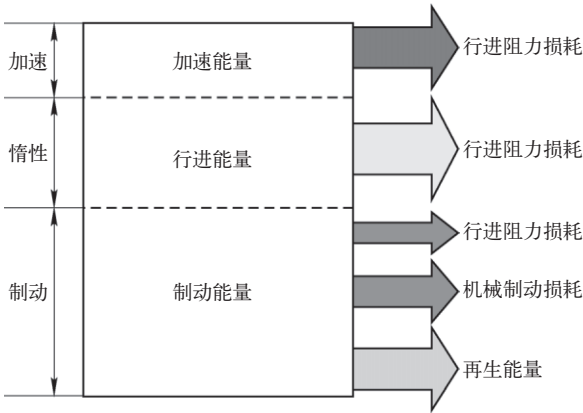


图1 列车在不同运行方式下能量消耗

压器配合二极管整流的设计模式，再生制动能量主要有三类利用方式：第一类是消耗吸收型；第二类是储能吸收型；第三类是逆变回馈型。各类能量吸收回馈方式的优缺点如表1所示。

表1 各类能量吸收回馈装置优缺点对比

| 指标因素 | 消耗吸收型 | 储能吸收型 |      |      | 逆变回馈型 |      |
|------|-------|-------|------|------|-------|------|
|      |       | 电容储能  | 电池储能 | 飞轮储能 | 非独立支路 | 独立支路 |
| 节能效果 | 无     | 较好    | 较好   | 较好   | 中等    | 中等   |
| 兼容性  | 良好    | 良好    | 良好   | 良好   | 较差    | 良好   |
| 环控压力 | 较大    | 较小    | 无    | 无    | 无     | 无    |
| 设备成本 | 低     | 高     | 高    | 低    | 低     | 高    |
| 维护成本 | 低     | 高     | 高    | 低    | 低     | 低    |
| 成熟度  | 高     | 低     | 高    | 低    | 低     | 中    |
| 寿命/年 | 30    | 10    | 10   | 20   | 30    | 30   |
| 国产化  | 有     | 有     | 有    | 无    | 有     | 有    |
| 工程经验 | 国内    | 国内    | 国内   | 国外   | 国外    | 国内   |

消耗吸收型通过在列车或车站设置制动电阻，通过控制IGBT斩波器的导通比，把再生制动能量转换为热能后排出向大气进行消耗。目前大部分国内外轨道交通均采用消耗吸收型处理制动能量，没有节能效果。

储能吸收型是将列车产生的再生制动能量通过电池组、大电容器组或飞轮电动机这三种储能形式的一种储存起来，当线路上列车电动机变换工作状态需要取流时，将储存的电能再次释放出来。这种方式具有储能和稳压两种功能，能量自存自用，不对电网产生谐波影响。参考国外储能吸收型工程的再生能量利用率，是各种方案中最高的，但目前在国内没有实际工程应用，缺乏对应产品。

逆变回馈型技术主要采用晶闸管、IGBT等电力电子器件构成大功率三相逆变器，将列车产生再生制动能量通过逆变装置逆变为三相交流电能，再通过整流变压器或专用变压器回馈至电力

网络，供地铁中的其他系统负荷使用。逆变回馈型方案能量利用率适中，前期投资与维护费用适中，成熟度较高，且有国内厂家供货。主要有和牵引整流变压器共用通道的非独立支路型和单独设置逆变回路与变压器的独立支路型两种设计。非独立支路型无须额外增加变压器与回馈通道，但与牵引供电系统的兼容性较差，容易产生相互之间的影响。独立支路型方案虽增加了前期投资，但有效解决了与牵引供电系统的兼容性的问题，控制方式简单可靠，具备国内轨道交通优先选择使用价值。

再生能馈装置设计及控制

1. 设计研究

独立支路型再生能量回馈系统交流侧通过设置高压开关柜直接接入牵引变电所35 kV母线，直流侧通过设备馈线柜和配套隔离开关接入直流母排。能量回馈通道与牵引整流通道并列工作，互不影响。

独立支路型再生能量回馈系统在列车电动机处于电动机工作模式运行时，牵引整流机组工作向直流母排提供电能，当列车电动机处于大电动机工作模式运行时，列车的动能转化为电能，回馈到直流电网，其中一部分被线上同供电分区列车吸收，剩余部分使牵引变电所直流母排电压升高。当达到设定值时，能馈设备起动工作，将这部分再生能量回馈至35 kV系统中，当能量回馈完毕，再生能量回馈装置转入待机状态等待执行下一次回馈任务。其原理如图2所示。

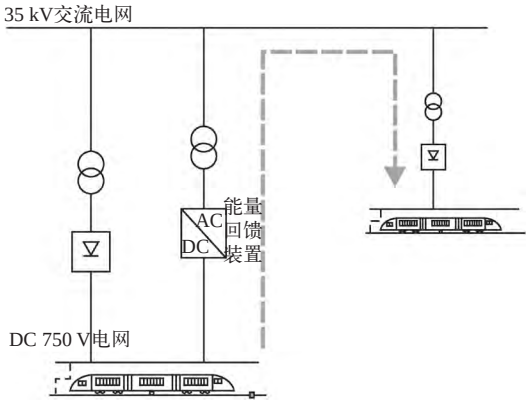


图2 独立支路型逆变回馈再生制动装置原理图

独立支路型再生能量回馈系统与牵引整流系统相互隔离，三台变压器分列运行，各自设置独立的继电保护，同时在电压突变系统故障时断

路器相互配合隔离故障,具有良好的兼容性。设置35 kV高压开关柜直接接入牵引变电所35 kV母

线, 直流侧通过设备DC750 V开关柜和配套隔离开关接入直流母排, 如图3所示。

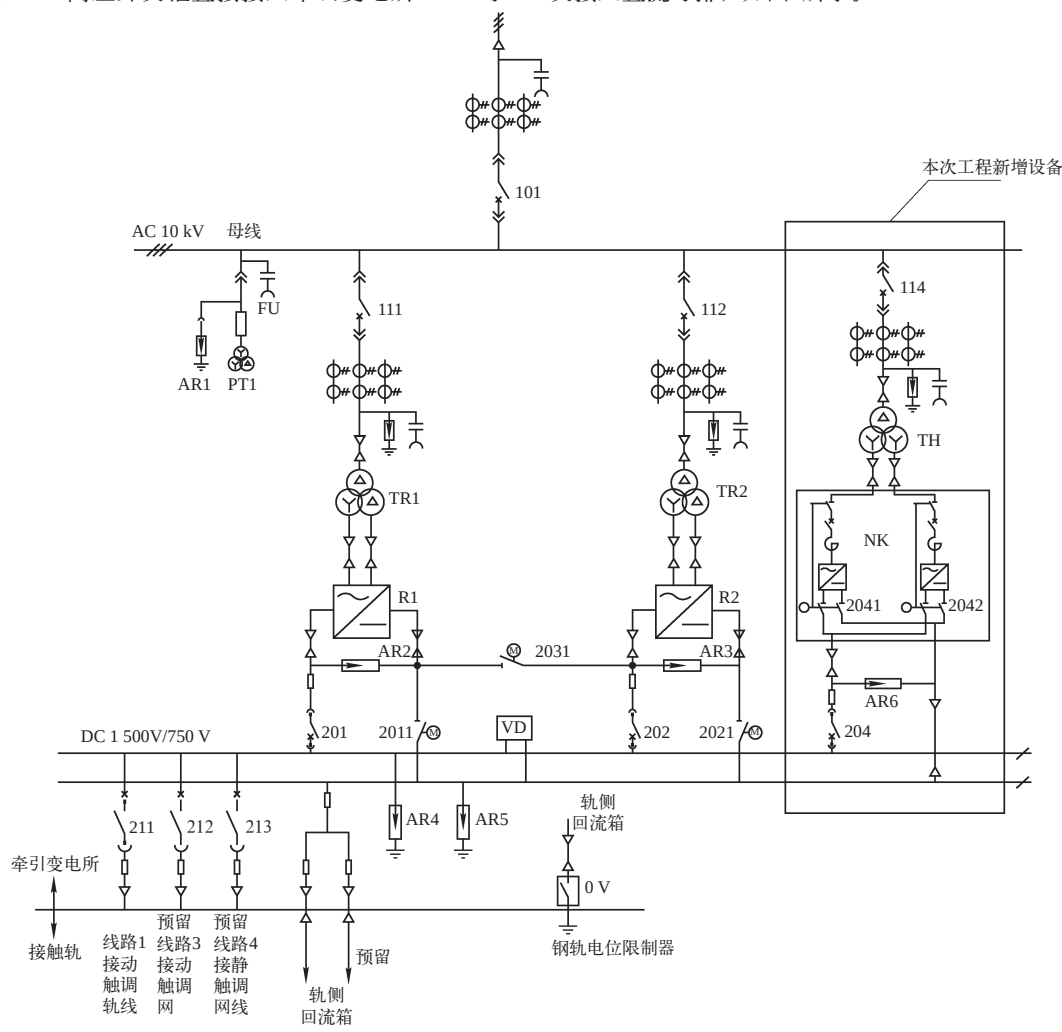


图3 独立支路型逆变回馈再生制动装置接线图

## 2. 控制系统

作为决定回馈效果的重要部分, 选择使用电压外环和电流内环的双闭环控制策略来对变流器进行控制。双闭环控制策略算法简单, 兼容性强, 可靠性好, 在国内外均存在大量成熟应用。

电压外环、电流内环的双闭环控制策略如图4所示。直流电压被电压外环检测后得到 $U_{dc}$ , 将 $U_{dc}$

与设定电压 $U_{dc}^*$ 进行比较,通过电压调节器PI输出 $i_d^*$ (电流内环的有功电流给定值),将 $i_d^*$ 、 $i_q^*$ 作为电流内环的电流参考值与变流器输出电流值 $i_a$ 、 $i_b$ 和 $i_c$ 经坐标变换后的 $dq$ 分量 $i_d$ 、 $i_q$ 进行比较,比较后电流内环PI调节器发出信号再经过 $1/\alpha\beta/dq$ 逆变换输出给SVPWM进行调制发出逆变器控制的开关脉冲。

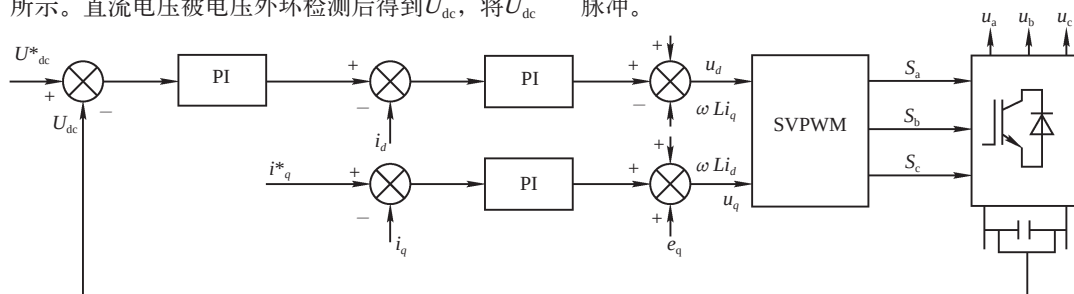


图4 双闭环控制策略框图

选择好控制策略后在Matlab/Simulink中搭建仿真模型,模型包含两台并联逆变器,同时接入35 kV电网。参数设定为 $U_{dc}=750\text{ V}$ ,电网线电 $U_s=35\text{ kV}$ ,升压变压器电压比 $N_1:N_2=35\ 000/380$ ,开关频率 $f_s=18\text{ kHz}$ ,并网电感 $L=5\text{ mH}$ 。仿真时间设置为0.5 s,取0.2~0.3 s内的并网逆变器输出的AB间线电压波形如图5所示。系统控制策略有效且稳定,线电压幅值基本上等于750 V直流母线电压。

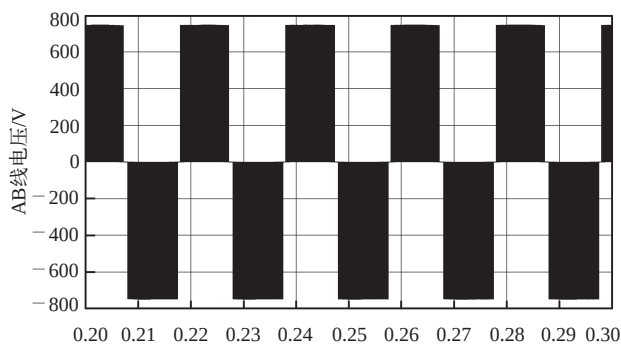


图5 AB线电压波形图

从图6直流母线电压的仿真波形图可以看出双闭环策略控制有效,直流母线电压的控制速度和进度均良好。

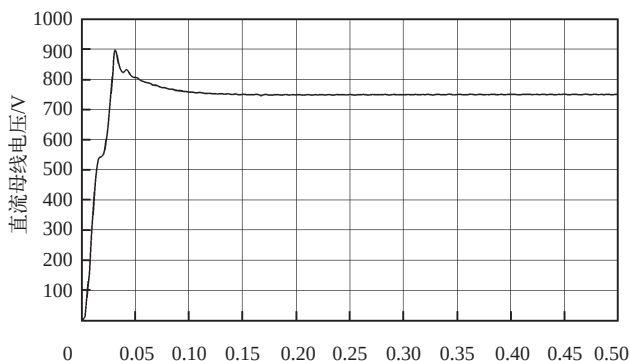


图6 直流母线电压仿真图

## 工程效果

为验证独立支路型再生能馈使用效果,在西南某地铁线路完成试运营数据后,对其进行分析。该地铁线路全线共13座牵引混合变电所,采用35 kV中压网路,直流750 V直流牵引供电,牵引变电所均设置独立支路型能量回馈装置,与所内两台牵引整流设备并列运行。13座牵引混合变电所能馈装置均正常投运后,在无重大节假日

情况(典型客流与运行图)下选择一个月的数据,对牵引电能、回馈电能的电能数据抄表统计后计算日均回馈率平均值为11.5%,对能馈装置35 kV侧电能表正向与反向有功电能数据进行统计计算35 kV侧回馈效率平均值为96%,如表2所示。

表2 日均回馈率与35 kV回馈效率

| 站点   | 日均回馈率(%)<br>(回馈/牵引) | 35 kV回馈效率(%)<br>(反向/正向) |
|------|---------------------|-------------------------|
| 站点1  | 13.4                | 96                      |
| 站点2  | 18.1                | 97                      |
| 站点3  | 11.3                | 96                      |
| 站点4  | 11.0                | 96                      |
| 站点5  | 4.4                 | 95                      |
| 站点6  | 10.0                | 96                      |
| 站点7  | 15.7                | 97                      |
| 站点8  | 10.4                | 96                      |
| 站点9  | 6.6                 | 95                      |
| 站点10 | 6.9                 | 95                      |
| 站点11 | 14.7                | 97                      |
| 站点12 | 20.3                | 97                      |
| 站点13 | 5.5                 | 95                      |
| 平均值  | 11.5                | 96                      |

在能馈装置运行过程中平均每月发生0.3次跳闸事件,均为直流750 V母线电压过高达到整定值动作,设备未发生故障或损坏,且能馈装置均能按设置要求跳开对应断路器,将能馈装置与系统隔离,保障牵引供电正常运行,不会对列车运行造成影响。

由此可见,双闭环策略的独立支路型能量回馈装置在实际使用中可以有效地将列车再生能量回馈至供电系统中二次利用,达到现代轨道交通绿色出行、节能减排的目的。

## 结束语

本文介绍了现代轨道交通列车制动时再生能量的产生及利用的可行性,分析了多种利用方案之间的优缺点,提供了利用列车制动再生能量的方法。通过仿真分析,验证了双闭环控制策略的有效性与稳定性,证明了独立型支路再生能馈装置的工程实践价值。

在工程实践之后,选取典型数据,通过分析和对比验证了独立支路型再生能量回馈装置的使用效果,满足了再生能量再次利用的目的。为地铁线路再生能馈装置的普及,设备维护提供了实践依据和参考价值。EA

(收稿日期:2020.05.02)

(编辑:朱金凤)