

城市轨道交通供电系统中压能馈、双向变流与飞轮储能装置的应用分析

李松柏

杭州市地铁集团有限责任公司 浙江 杭州 310000

摘要:城市轨道交通供电系统车辆再生制动产生的电能利用问题引起广泛关注与重视,为了降低隧道和车站内温度并对能量进行回收利用以达到节能的目的,但目前几种再生电能利用技术均存在一定的局限性,笔者对各种再生电能利用装置进行技术经济分析对比后,认为在城市轨道交通供电系统中采用中压能馈装置具有明显优势。

关键词:城市轨道交通;再生电能利用;中压能馈;双向变流;飞轮储能

引言

目前城市轨道交通牵引供电系统主要采用基于24脉波整流器的直流供电方案,该设备的优点是结构简单、运行稳定可靠,主要缺点是再生制动能量浪费等。

为解决上述问题,目前国内外城市轨道交通行业正在研究和增加新的设备,如中压能馈、双向变流、飞轮储能等。本文通过对轨道交通供电系统以及以上三种设备的技术经济分析比较,提出了具有一定优势的解决方案。

1 城市轨道交通牵引供电能耗的现状及其问题

1.1 城市轨道交通牵引供电系统的构成

城市轨道交通供电系统主要为城轨列车和车站设备提供电力保障,它由外部电源、主变电所、中压网络、牵引变电所、降压变电所以及直流牵引网等构成。其中,集中式供电指的是城市轨道交通有自己独立的供电系统而不受城市其他负荷的影响。

集中式供电的核心是主变电所,它从外部电源引入110kV交流电,经主变压器降压变为35kV后到达中压网络;中压网络则由沿线路铺设的电缆组成,它是连接主变电所与各牵引变电所和各降压变电所的纽带,可将主变电所的电能传输给各牵引变电所和各降压变电所;牵引变电所与直流牵引网连接,可将电能降压变流后馈入直流牵引网中,实现对列车的供电。降压变电所将电能降压后,为车站与线路区间各种机电设备、照明负荷和通信信号提供低压电能,构成了辅助设备用电系统。

1.2 传统牵引供电系统的主要问题

城市轨道交通站距短,车辆频繁起停,车辆制动时,会产生大量的能量,约占牵引能量的35%~55%。这些再生制动能量一部分被同区间内的其他牵引列车吸收利用,剩余部分则会引起直流牵引网网压的抬升。如果牵引网网压超过限值1800V(对应DC1500V制式),供电

系统的安全运行便会受到威胁。传统的制动电能消耗是通过车载大功率制动电阻来实现,由此带来的问题:

一是大量制动能量被浪费;

二是制动电阻产生的热能使得隧道和车站温度上升,额外增加隧道和站内通风及温度调节设备,这些设备的运行也增加了运行电能消耗;

三是大功率的车载电阻使得车辆惯性负载增加,车辆运行电能需求增大;

2 城市轨道交通牵引能耗解决思路及其技术发展

针对上述问题,解决的方向主要集中在对牵引电能如何进行有效管理,有方法及时对列车制动能量进行处置,使得整个系统时刻保持能量平衡。

牵引耗能的主要环节包括为列车提供的牵引动能、列车传动链损耗、克服运行阻力消耗、车载辅助负荷损耗、回馈电能。其中回馈电能的一部分被相邻列车吸收,还有一部分一般是利用车载或地面电阻消耗,以确保牵引网电压水平。典型的城轨供电系统能流图如下图所示。

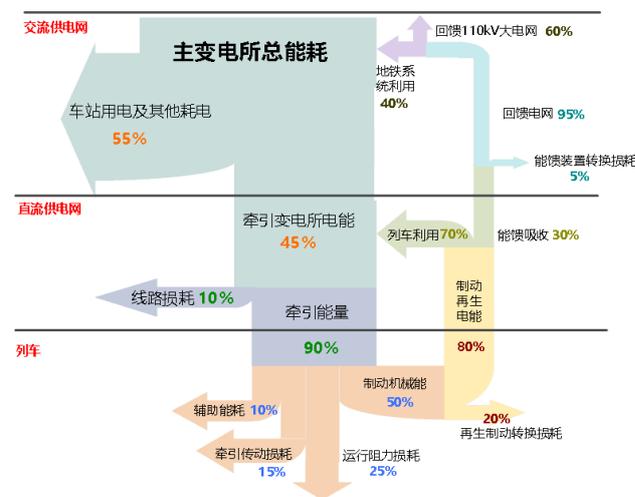


图2-1 典型城轨供电系统能流图

随着绿色、低碳、节能的概念逐步深入人心，在追求城轨低成本运营过程中，针对城轨列车制动能量回收的做法相继产生。按照阶段不同，产生了不同的技术路线。

为了减少制动能量在列车制动电阻上的耗散，一般可在牵引变电所的直流母线上设置再生电能利用装置，所采用的吸收方案主要包括中压能馈型、双向变流、飞轮储能型三种方式。

2.1 中压能馈型

将列车再生制动时产生的电能通过并网逆变器回馈给电网。其工作原理是，再生制动能量使直流牵引网电压超过某一预设值时，控制系统判断列车处于再生制动工况，并网逆变器开始工作，将再生制动能量由直流电逆变成工频交流电回馈给电网。

牵引供电系统由传统二十四脉波整流机组+中压能馈装置构成，系统方案如图2-2所示。中压能馈装置将列车

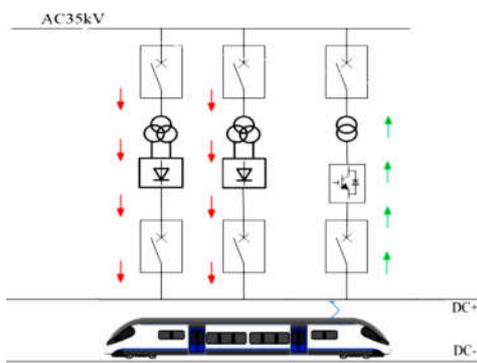


图2-2 牵引供电系统中压能馈方案

制动能量回馈至中压环网环网，这一方案可以完全吸收制动能量，是目前城轨供电系统的主流方案。

中压能馈装置由35kV开关柜、变压器、能馈变流器、DC1500V开关柜构成。

其中，能馈变流器主要由电力电子功率模块、控制单元、滤波器等组成。^[1]

2.2 双向变流型

双向变流装置与传统城轨牵引整流设备不同，其采用PWM整流技术，可实现四象限运行，可完全吸收列车制动能量，并且由于整流电压采用电压外环控制，输出电压比较稳定，特性比较硬，系统供电方案如图2-3所示。

相较于传统二十四脉波整流机组，双向变流装置设备成本比较高；过载能力弱，为满足城轨牵引供电系统负载要求，最大功率基本等于额定功率，即：按满足3倍设计负荷来设计。

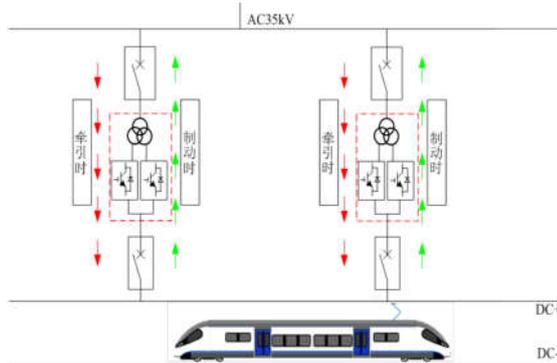


图2-3 牵引双向变流（全控整流）供电方案

随着电力电子技术的发展，基于IGBT的双向变流装置已经被提出和研究、应用。双向变流装置不仅可以使得能量双向流动，还可通过检测牵引网网压的大小，控制双向变流装置能量传输的大小和方向，进而实现对牵引网网压的调节。同时双向变流装置具备功率因数任意可调的能力，可进行无功补偿。

双向变流系统实为四象限PWM变流器，其输出电压可控，与整流机组相比，它可以根据列车的运行工况工作在整流状态，也可以工作在逆变状态，没有关断状态。^[2]

2.3 飞轮储能型

该产品对变电所直流空载电压、母线电压的跟踪判断，确定是否有列车在再生制动且再生能量不能完全被本车辅助设备和相邻车辆吸收，当判断变电所附近列车有再生能量需要吸收时，飞轮加速转动，储存能量；当判断变电所附近有列车启动牵引用电时，飞轮转速降低，作为发电设备向接触网反馈电能。该产品除具有电能吸收功能外还具有稳压功能，通过设置运行状态，可在接触网电压较高时吸收电能、在电压较低时释放电能，稳定电压。该类吸收装置原理示意如图2-4所示。

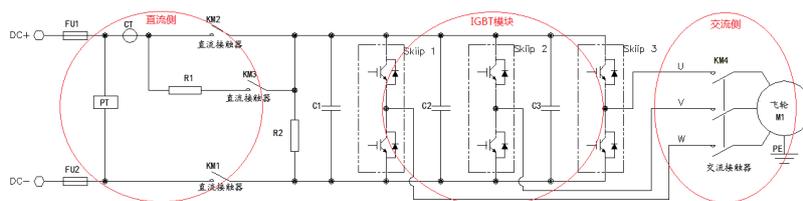


图2-4 飞轮储能装置原理示意图

现阶段飞轮储能装置成本较高,后续可能会随着产品的应用,飞轮设备批量化的价格价格有望大幅下调,市场竞争力也将随着产品的推广应用和技术发展而逐渐提升。

3 综合比选分析

结合上述分析,针对整流机组+中压能馈、整流机组+双向变流、整流机组+飞轮储能进行对比,主要从技术性和经济性两个角度进行对比。

3.1 技术性

3.1.1 能量回馈功能

结合上述分析,整流机组+中压能馈与整流机组+双向变流回馈能量相当。中压能馈装置与双向变流均通过

变流装置直接将再生制动能量回馈至AC35kV侧,飞轮储能装置通过将列车制动能量通过飞轮进行储能,在车辆启动时,再将其放出,其较中压能馈和双向变流多一道存储转换工序,其效率稍微低一点。

3.1.2 稳压功能

结合上述分析,中压能馈装置在车辆制动时能对牵引网压进行调整,双向变流装置和飞轮储能装置能够对牵引网压进行双向调整,具有更好的稳定网压功能。

3.2 经济性

对中压能馈装置、双向变流装置和飞轮储能装置的不同组合方案进行经济对比,如表3-1所示:

表3-1 三种方案下经济分析

方案		2套整流机组	2套整流机组+1套中压能馈装置(2M)	2套双向变流装置(3M)+1套整流机组	2套整流机组+1套飞轮储能装置(3M)
设备投资	双向变流装置(250万/套)	0	0	500万	0
	中压能馈装置(130万/套)	0	130万	0	0
	飞轮储能装置(600万/套)	0	0	0	600万
	整流器(20万/套)	40万	40万	20万	40万
	牵引变压器(50万/台)	100万	100万	50万	100万
	35kV开关柜(25万/套)	0	25万	25万	0
	直流1500V开关柜(25万/套)	0	25万	25万	25万
设备投资总价		140万	320万	620万	765万
土建面积		100m ²	140m ²	140m ²	140m ²

由上表可知采用2套整流机组+飞轮储能装置的造价最高,为765万/所,2套双向变流装置+1套整流机组次之,为620万/所,2套整流机组+中压能馈装置最低,为320万/所。

结束语

鉴于中压能馈装置、双向变流装置和飞轮储能装置对于列车再生制动能量回馈基本相当,对于牵引阶段牵引网压稳定,双向变流装置和飞轮储能装置均具有一定的牵引稳压作用,在采用传统整流机组时,其网压也均在1500V以上,因此对于牵引网压影响不大。

结合上述技术和经济性分析,城市轨道交通供电系统采用2套整流机组+1套中压能馈装置是目前比较经济合理的应用。

参考文献

- [1]冯剑冰.再生制动能量利用方式的探讨[J].城市轨道交通研究.2007(5):46-48,52.
- [2]张志学,何多昌,张铁军,等.城市轨道交通牵引供电系统采用PWM回馈电能方案研究[J].铁路技术创新.2011(5):22-25.