

厦门地铁 2 号线再生能馈装置稳压试验分析

林家通

(厦门轨道交通集团有限公司, 361010, 厦门//工程师)

摘要 以厦门地铁 2 号线为研究对象,模拟不同制动模式、不同初速度下的列车制动场景,验证再生能馈装置对接触网网压稳定的效果。试验结果表明,再生能馈装置可与车辆制动配合以有效稳定接触网电压,使电能质量达到标准要求。

关键词 地铁;再生能馈装置;接触网电压

中图分类号 U270.35⁺⁹

DOI10.16037/j.1007-869x.2022.04.012

Analysis of Voltage Stabilization Test of Xiamen Metro Line 2 Regenerative Braking Energy Feedback Device

LIN Jiatong

Abstract Taking Xiamen Metro Line 2 as the research object, the simulation of train braking scenarios under different braking modes and different initial speeds is performed to verify the stabilizing effect of the regenerative braking energy feedback device on overhead contact system (OCS) voltage. The test results show that the device can effectively stabilize the OCS voltage in cooperation with vehicle braking, and the power quality meets the standard requirements.

Key words metro; regenerative braking energy feedback device; overhead contact system (OCS) voltage

Author's address Xiamen Rail Transit Group Co., Ltd., 361010, Xiamen, China

地铁牵引供电系统中广泛采用整流机组。然而,由于整流器的单导特性^[1-2],列车再生制动电能无法正常回馈,造成接触网电压抬升。地铁再生能馈装置若要有效回收再生制动电能^[3-5],则需在车辆制动时能有效稳定接触网网压,保证行车安全。为验证再生能馈装置的逆变回馈功能,验证列车在不同制动模式、制动速度及电制动功率下与再生能馈装置的配合关系,本文以采用国内先进再生能馈技术的厦门地铁 2 号线(以下简为“2 号线”)作为研究对象,基于线路实际情况,通过试验来分析再生能馈装置回馈过程对 35 kV 电网的影响。详细描

述了再生能馈装置稳压试验方案设计,重点验证、分析车辆不同制动工况下再生能馈与车辆配合度及接触网电压稳定效果。

1 研究背景

2 号线为地下线路,长 41.6 km,共设 32 座车站。其牵引采用 DC 1500 V 架空接触网供电,走行轨回流方式。全线共设 18 座牵引变电所,其中正线有 16 个牵引混合变电所及东孚车辆段设有再生能馈装置。设有再生能馈装置的直流牵引供电系统构成如图 1 所示。

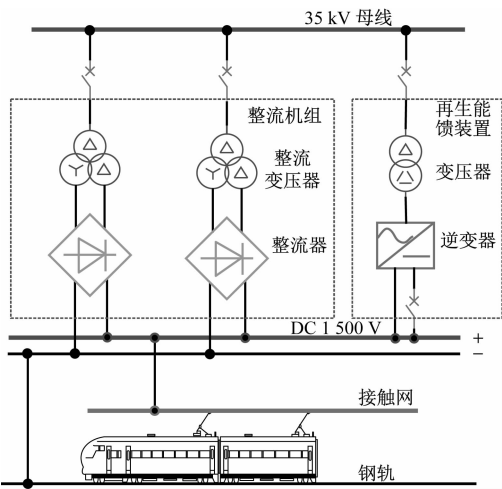


图 1 有再生能馈装置的直流牵引供电系统构成

Fig. 1 Composition of DC traction power supply system with regenerative braking energy feedback device

2 号线采用再生能馈设备的主要参数见表 1。

2 再生能馈装置稳压试验

2.1 试验方法

在 2 号线东孚车辆段牵引变电所中开启再生能馈装置,并设置回馈启动电压阈值为 1 730 V、稳定电压为 1 720 V。令一辆列车在 AW0(空载)模式下,分别以 30 km/h、45 km/h、55 km/h 及 80 km/h

表 1 再生能馈装置的主要参数

Tab.1 Main parameters of the regenerative braking energy feedback device	
参数	取值
交流额定电压/ kV	35(1-20% ~ 1 + 15%)
设备容量/ MW	2.5
电压畸变率/ %	0 ~ <5(低压侧) 0 ~ <3(高压侧)
直流电压范围/ V	1 000 ~ 2 000
直流电压纹波/ %	0 ≤ 1
功率因数	≥ 0. 99
防护等级	IP30
交流额定频率/ Hz	50/60, ± 5% 自适应
装置效率/ %	≥ 97. 5
电流畸变率/ %	< 5
直流稳压精度/ %	< 1
响应时间/ ms	≤ 300
噪音/ dB	≤ 75
散热方式	强迫风冷

的速度行驶,再分别施加常用制动和紧急制动至停车,测量相关数据,验证能馈回馈效果及谐波情况。

试验采用主要仪器如表 2 所示。示波器接入再生能馈装置的直流隔离开关柜,测量该处的直流牵引网电压和直流侧电流(3 根电缆并联,测量其中 1 根电缆),同时测量接入再生能馈装置的双向变流器 A 相输出电压(变压器低压侧)和 A 相变压器低压侧输出电流(2 根电缆并联,测量 1 根电缆),并记录波形数据。采用电能分析仪测量 35 kV 侧电流和 35 kV PT(电压互感器)二次侧电压,评估再生能吸收装置的回馈电能质量情况。通过 TIMS (列车综合管理系统)获取车辆的实时速度、车辆处牵引网压、车辆直流电流、车载过压保护电阻投入及退出状态和时刻、车载气制动投入及退出状态和时刻、车辆制动距离等数据。

表 2 试验采用的测试仪器

Tab.2 Equipment adopted in the test				
仪器名称	品牌	型号	数量/台	备注
高带宽示波器	Tektronix	DP 04 034B	1	
电能分析仪	Fluke	Fluke435	1	
高压探头	PINTECK	DP-50	2	
直流电流探头	HIOKI	CT9693-90	1	× 10 衰减
交流电流探头	Fluke	II000S	1	

2.2 试验结果

列车结构限速一般为 80 km/h,在 80 km/h 制动初始速度、常用制动工况下,因再生制动馈能功率大,超过了单台再生能馈装置的容量,故列车将同步启动空气制动,此工况最为典型。因此,为不赘述,本文仅取列车初始速度为 80 km/h、常用制动为典型工况对波形进行分析。其波形与电能质量分析见图 2。

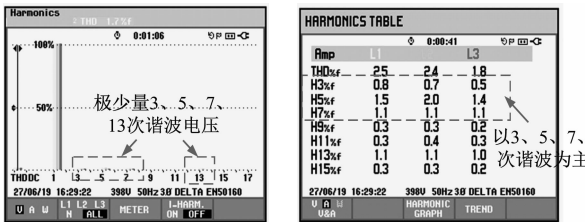
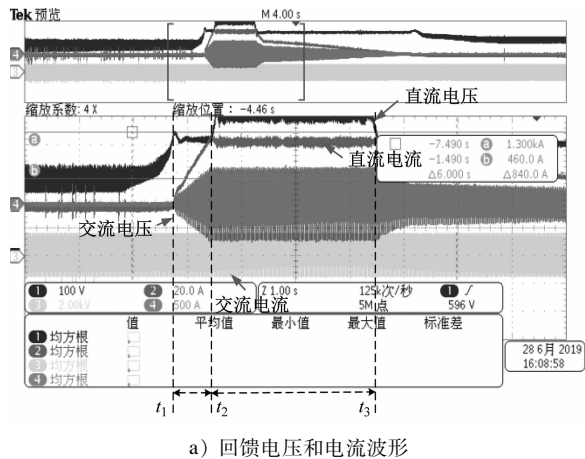


图 2 典型工况的波形与电能质量采集实景图

Fig.2 Waveform and power quality of typical working condition

图 2 a) 为列车开始制动时,再生能馈装置交直流两侧处示波器采集的电压电流波形。在 t_1 之前,列车启动再生制动,牵引网直流电压在制动过程中升高;在 t_1 时,再生馈能装置启动;在 t_1 — t_2 时间段,再生能馈装置的输出功率跟随制动功率迅速增大,回馈直流电流也迅速增大,再生能馈装置处的牵引网直流电压稳定在 1 720 V 左右;在 t_2 时,再生能馈装置输出功率达到最大容量,在 t_2 — t_3 段再生能馈装置保持最大功率输出,直流电流与交流电流保持稳定;受再生能馈装置容量限制,在 t_2 时,牵引网直流电压继续抬升,车辆启动空气制动,补充制动力,牵引网直流电压维持在 1 800 V 左右;至 t_3 时,列车运行速度降低,再生制动功率下降至低于

再生能馈最大容量,牵引网直流电压下降到 1 700 V 左右,回馈电流下降,完成了制动与馈能的过程。分析 TIMS 数据可知,车辆具有再生制动功率自动限容功能,不仅能限制再生的最大输出功率,还能自动启动空气制动来补充制动力。整个制动过程中,列车处牵引网的最高直流电压控制在 1 830 V 左右,未超过车辆过压保护动作电压(1 950 V),未触发车载过压保护功能。

回馈电能质量如图 2 b)及图 2 c)所示。35 kV

侧交流母线处电压基波几乎达到 100%,仅有极小量的 3 次、5 次、7 次及 13 次谐波电压,故具在较好的电能质量。在交流 PCC 处,电流畸变率小于 2.5%,以 3 次、5 次、7 次低频谐波为主,无偶次共模谐波,满足相关规范标准的要求。

2.3 试验数据分析

整理汇总再生能馈装置处测量数据和 TIMS 数据,得到不同工况下的试验数据,如表 3 所示。

表 3 各工况下的试验数据

Tab.3 Test data under various working conditions

试验 工况	制动 模式	实际制 动初始 速度/ (km/h)	再生能馈装置处测量数据										TIMS 数据					
			直流电 压/V	直流电 流/A	直流侧 功率/ kW	交流电 压/V	交流电 流/A	35 kV 电压 畸变率/%			35 kV 电流 畸变率/%			牵引网 直流电 压/V	牵引网 直流电 流/V	过压保 护是否 动作	空气制 动是否 动作	车辆制 动距离/ m
								A 相	B 相	C 相	A 相	B 相	C 相					
工况一	常用制动	27.8	1 696	543.0	920.9	1 044	321.8	1.6	1.8	1.3	6.1	5.7	5.9	1 726	673	无	无	26.0
工况二	常用制动	45.6	1 695	1 344.0	2 278.1	1 080	762.8	1.9	2.0	1.7	1.7	1.7	1.3	1 746	1 408	无	无	63.3
工况三	常用制动	54.8	1 722	1 180.2	2 032.3	1 072	755.6	1.7	1.8	1.1	2.4	2.1	2.2	1 766	1 681	无	是	98.9
工况四	常用制动	83.8	1 795	1 341.6	2 408.2	1 076	879.0	1.7	1.7	1.7	1.4	2.3	1.5	1 828	1 758	无	是	238.6
工况五	快速制动	30.0	1 697	690.9	1 172.4	1 044	402.0	1.5	1.7	1.2	4.3	4.5	4.1	1 732	807	无	是	21.9
工况六	快速制动	46.0	1 699	1 271.1	2 159.6	1 059	714.4	1.6	1.6	1.2	2.1	2.2	1.9	1 722	1 339	无	是	49.9
工况七	快速制动	56.8	1 791	1 347.3	2 413.0	1 075	878.4	2.0	1.9	1.8	2.0	2.3	1.8	1 821	1 463	无	是	76.1
工况八	快速制动	83.8	1 795	1 341.6	2 408.2	1 076	879.0	1.7	1.7	1.7	1.4	2.3	1.5	1 828	1 740	无	是	185.1

在工况一和工况二下,根据 TIMS 采集的电压电流波形图,列车制动最大再生功率不超过装置的额定容量 2.5 MW,再生能馈装置能完全吸收车辆的再生电能,将牵引网直流电压稳定在 1 740 V 左右,不触发车辆过压保护与空气制动。在工况三和工况四下,车辆主动调整空气制动,使车辆处的接触网电压低于 1 890 V(车辆过压保护阈值),保持再生能馈工作功率约为 2.4 MW。

对比工况一与工况五,当列车在约 30 km/h 的初始制动速度下,相对于常用制动模式,快速制动模式下的列车回馈电流增大约 150 A,能馈功率(即直流侧功率)也增大约 250 kW,制动距离减小 5 m。而在约 45 km/h、55 km/h、80 km/h 的制动初始速度下进行快速制动,回馈电流与功率并未明显变大。这是由于列车气制动的气缸压力会根据列车制动力需求自动补充,最大再生能馈功率保持在 2.4 MW 左右,未超过额定容量。在常用制动模式下,只有车辆运行速度降至接近 0 km/h 或制动力不足时,才启动空气制动,以保持电压不超安全值,且再生能馈装置工作功率不超过其容量。在快速制动模式下,空气制动会与电制动同时全程投入,

以缩短车辆的制动距离及制动时间。

不论是常用制动模式还是快速制动模式,不同工况的网压均未超过允许值,再生能馈功率未超过能馈装置的容量范围,列车过压保护未动作。这表明,列车再生制动与再生能馈装置可以有效配合,从而实现制动能量回馈并稳定接触网电压。

由表 3 还可以看出:在电能回馈时,35 kV 侧交流电压畸变率小于 2%。而在制动初始速度约为 45 km/h、55 km/h、80 km/h 时,馈电的交流电流畸变率小于 2.3%。但在制动初始速度为 30 km/h 时,回馈的交流电流畸变率最大为 A 相,测试值达 6.7%。这是由于回馈功率及电流较小,对交流环网整体电能质量影响较小。

在测量过程中,再生能馈装置测量数据与列车 TIMS 数据并未非同步数据,故数据可能与理想情况存有一定的偏差,但不影响试验结论。

3 结语

针对列车再生制动回馈电能导致接触网电压抬升的现象,本文以厦门地铁 2 号线为研究对象,对其再生能馈装置进行稳压试验,得到如下结论:

1) 再生能馈装置可与车辆的空气制动系统协同配合完成车辆制动,能在实现列车再生制动能量回馈的情况下有效稳定接触网电压。

2) 当回馈电能超过再生能馈装置容量(2.5 MW)时,再生能馈装置会自动限容输出;在制动过程中,车辆处牵引网直流电压不超过 1890 V,车载过压保护不动作。

3) 在再生能馈装置以额定功率输出时,在 35 kV 侧测得回馈电流的总谐波含量畸变率 $\leq 3\%$,35 kV 电压的总谐波含量畸变率 $\leq 2\%$,满足且优于相关国家标准。

参考文献

- [1] 李良威,李群湛,刘炜. 24 脉波整流器外特性仿真及其在城市轨道交通中的应用[J]. 城市轨道交通研究,2007(10):52.
LI Liangwei, LI Qunzhan, LIU Wei. Simulation and application of external characteristic curve of 24-pulse rectifier in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2007(10):52.
- [2] 杨素文,董斌,高劲. 等效 24 相整流在广州地铁的应用[J]. 机

(上接第 31 页)

- DENG Yongquan. Study on dynamic interaction of tram train-embedded rail track [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014.
- [4] 胥燕军. 现代有轨电车埋入式轨道结构参数优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2016.
XU Yanjun. Research on the Parameter Optimization of the Embedded Track Structure of the Modern Tram [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.
- [5] 李骏鹏. 混合路权下有轨电车嵌入式轨道对沥青路面影响分析[J]. 交通节能与环保,2019(1):123.
LI Junpeng. Analysis of influence of embedded track of railcar on asphalt pavement under mixed road right[J]. Energy Conservation & Environmental Protection in Transportation, 2019(1):123.
- [6] 苏乾坤,栗行,谢露,等. 重载汽车荷载下平交道口的钢轨损伤分析[J]. 铁道科学与工程学报,2017(1):19.
SU Qiankun, LI Xing, XIE Lu, et al. The rail failure analysis under the heavy-duty vehicle load on level crossing[J]. Journal of Railway Science and Engineering, 2017(1):19.
- [7] 崔晓剑. 轨道平交道口沥青路面开裂成因分析与处理措施[J]. 建设监理,2018(1):73.
CUI Xiaojian. Analysis of the causes of cracking of asphalt pavement of rail level-crossing and treatment measures[J]. Project Management, 2018(1):73.
- [8] 袁力均. 道路平交道口沥青路面车辙的成因及防治措施[J].

车电传动,2002(2):43.

- YANG Suwen, DONG Bin, GAO Jing. Application of equivalent 24-phase rectifier in Guangzhou Metro[J]. Electric Drive for Locomotives, 2002(2):43.
- [3] 王宇,杨浩,方太勋,等. 地铁再生电能回馈系统试验研究[J]. 电力电子技术,2016(6):86.
WANG Yu, YANG Hao, FANG Taixun, et al. Experimental research on renewable energy feedback system for subway[J]. Power Electronics, 2016(6):86.
- [4] 魏穗琪,王永顺,杨鲁月. 城市轨道交通再生制动能量利用研究[J]. 现代电子技术,2020(1):131.
WEI Congqi, WANG Yongshun, YANG Luyue. Research of regenerative braking energy utilization in urban rail transit[J]. Modern Electronics Technique, 2020(1):131.
- [5] 卫巍,韩志伟,张钢. 再生能馈装置在北京地铁工程中的应用及节能效果分析[J]. 都市轨道交通,2016(4):107.
WEI Wei, HAN Zhiwei, ZHANG Gang. Application of energy feedback traction power supply device and analysis on energy-conservation effect for Beijing Subway [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2016(4):107.

(收稿日期:2020-03-24)

科技视界,2015(21):274.

- YUAN Lijun. Causes and prevention measures of rutting on asphalt pavement at road level crossing[J]. Science & Technology Vision, 2015(21):274.
- [9] 孟铎. 现代有轨电车轨道扣件罩设计方案优化[J]. 城市轨道交通研究,2019(增刊1):67.
MENG Duo. Design optimization of the bearing capacity for tram fastener cover[J]. Urban Mass Transit, 2019(S1):67.
- [10] 徐永光. 现代有轨电车轨道用道口扣件罩的研发[J]. 隧道与轨道交通,2019(3):23.
XU Yongguang. Research and development of rail fastener cover at grade crossing of modern tram[J]. Tunnel and Rail Transit, 2019(3):23.
- [11] 张丽娟. 基于蠕变试验的沥青混合料本构关系及车辙预估方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2009.
ZHANG Lijuan. Research on constitutive relation and rutting prediction method of asphalt mixture based on creep test [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2009.
- [12] 周勇军,梁玉照,贺拴海. 公路桥梁汽车荷载标准值对比分析[J]. 建筑科学与工程学报,2010(3):102.
ZHOU Yongjun, LIANG Yuzhao, HE Shuanhai. Comparative analysis of characteristic value of vehicle load for highway bridges [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2010(3):102.

(收稿日期:2021-07-07)