

双向变流装置运行性能测试分析

何俊文¹ 王开康¹ 何 斌¹ 刘 炜² 张 戩² 曾佳欣²

(1. 中铁第四勘察设计院集团有限公司, 430063, 武汉;

2. 西南交通大学电气工程学院, 610031, 成都//第一作者, 高级工程师)

摘要 目的: 当前, 在我国建设节约型城市轨道交通的背景下, 需对城市轨道交通供电系统中车辆再生制动产生的电能利用问题进行研究。方法: 以徐州地铁某含双向变流装置的实际线路为例, 分析了整流机组与双向变流装置协同工作方案(整流+双向变流方案)的外特性, 即恒压外特性和下垂外特性; 对完全采用双向变流装置的方案(全双向变流方案)进行了运行性能实测分析; 对含双向变流装置的车辆段进行了无功补偿分析。结果及结论: 在恒压外特性下, 随着启动电压从 1 550 V 升至 1 650 V, 相同条件下双向变流装置的整流输出功率有所增加, 整流机组输出功率有所减小; 当双向变流装置分别与 12 脉波及 24 脉波整流机组协同运行时, 其整流输出功率依次减少; 双向变流装置能代替整流机组独立运行, 实现整流和逆变功能; 当双向变流装置补偿的无功功率依次增大为 0.50 Mvar、1.00 Mvar 时, 监测主所 110 kV 侧的容性无功功率均值依次减少了 0.49 Mvar、1.00 Mvar, 验证了双向变流装置无功补偿功能的有效性。

关键词 地铁; 双向变流装置; 运行性能测试

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2023.09.019

Analysis of Bidirectional Converter Device Running Performance Testing

HE Junwen, WANG Kaikang, HE Bin, LIU Wei, ZHANG Jian, ZENG Jiabin

Abstract **Objective:** In the context of constructing energy-efficient urban rail transit systems in China, it is necessary to study the utilization of electrical energy generated by regenerative braking in urban rail transit power supply system. **Method:** Taking an actual line in Xuzhou Metro equipped with BC (bidirectional converter) devices as example, the external characteristics including constant voltage and droop for rectifier unit and BC device synergistic working scheme (rectifier + BC scheme) are analyzed. The running performance measurement analysis on the scheme that completely adopts BC devices (all BC scheme) is carried out. The reactive power compensation in depot equipped with BC devices is also analyzed. **Result & Conclusion:** Under external characteristics of constant voltage,

as the starting voltage increases from 1 550 V to 1 650 V, the rectification output power of the BC device increases while the rectifier unit output power decreases under the same conditions. The rectification output power decreases progressively when the BC device collaborates with 12-pulse and 24-pulse rectifier units. The BC device can replace the rectifier unit and operate independently, performing rectification and inversion functionality. When the reactive power compensated by BC device increases to 0.5 MVar and 1.00 MVar respectively, the average capacitive reactive power on main substation 110 kV side decreases sequentially by 0.49 MVar and 1.00 MVar, verifying the effectiveness of the BC device reactive power compensation function.

Key words metro; bidirectional converter device; running performance testing

First-author's address China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd., 430063, Wuhan, China

当前, 在我国建设节约型城市轨道交通的背景下, 城市轨道交通供电系统中车辆再生制动产生的电能利用问题已引起了专家学者的广泛关注。目前, 我国地铁牵引降压混合变电所(以下简称“牵混所”)采用 24 脉波整流机组及再生制动能量装置, 对列车制动产生的能量进行有效利用。双向变流装置从原理上能替代能量单向传递的二极管整流机组, 其是基于 PWM(脉冲宽度调制)技术, 能够实现整流和逆变双向变流功能, 具有能量双向流动、直流特性可控、功率因数可调、谐波含量小等优良特性。

文献[1]通过地铁双向变流装置的实测数据, 验证了该装置的稳定性、良好的整流效果及节能的有效性。文献[2]研究了整流机组与双向变流装置混合供电的控制策略, 并对某地铁工程双向变流装置挂网测试, 分析了双向变流装置具备替代二极管整流机组+能馈装置的能力, 验证了其具有稳定直

流网压、提高供电质量及降低越区供电等优点。文献[3]建立了考虑下垂输出外特性的双向变流装置计算模型,并以某地铁工程为例,研究双向变流装置下垂率和空载电压对峰值功率、牵引网网压和钢轨电位的影响。以上文献对地铁双向变流装置的功能性验证较多,而针对不同条件下双向变流装置和整流机组配合的负载功率分配规律实测研究及全线双向变流装置的试验验证研究较少。

双向变流在城市轨道交通中的应用一般有两种方案,即整流机组与双向变流装置协同工作的方案(以下简称“整流+双向变流方案”)和完全采用双向变流装置的方案(以下简称“全双向变流方案”)。本文以徐州地铁某含双向变流装置的实际线路为例,研究该线路中某牵混所的双向变流装置与整流机组协同工作时的系统综合输出外特性,分析双向变流装置启动电压及整流机组工况对负载功率分配的影响。通过现场实测对比整流+双向变流方案与全双向变流方案的负载情况,分析含双

向变流装置车辆段的无功补偿效果。本文研究可为地铁双向变流装置系统设计提供依据。

1 案例车站工程概况

测试线路长度为24.2 km,供电系统设置主变电所2座,牵混所11座,降压所10座,跟随所3座,车站20座。采用直流1 500 V 架空接触网授流,钢轨回流。列车类型为6B(6节编组B型车,4动2拖)。

该线路牵混所及车辆段均安装双向变流装置,其简化的供电系统示意图如图1所示。牵混所中整流机组 Tr1、Tr2 和 BCD(双向变流装置)均连接在 I 段母线上。双向变流装置启动电压范围设置为1 550~1 650 V,安装容量为2 MW。对牵混所和车辆段的负荷过程进行测试,包括双向变流装置交流侧进线电流、I 段 35 kV 母线电压,以及直流侧接触网电压、直流侧整流机组及双向变流装置电流。牵混所及车辆段电量参数监测点位置示意图如图2所示。

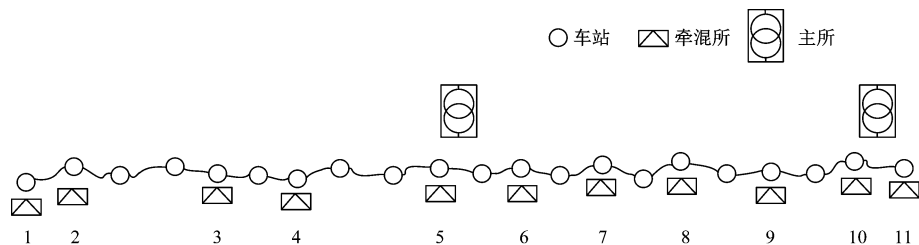


图1 供电系统示意图

Fig. 1 Diagram of power supply system

本次测试共包含4种工作模式:①整流机组与双向变流装置(恒压外特性)协同工作;②整流机组与双向变流装置(下垂外特性)协同工作;③整流机组独立工作,双向变流装置仅参与逆变;④双向变流装置(下垂外特性)独立工作。

2 整流+双向变流方案外特性分析与实测

2.1 外特性分析

双向变流装置与整流机组配合运行时,一方面需要与整流机组配合提供牵引能量,另一方面需要回馈列车制动能量,其负载功率分配情况受到启动电压和整流机组工况的影响^[4]。整流机组具有自然下垂特性。双向变流装置相当于一个可控电压源,其恒压特性及下垂特性如图3所示。

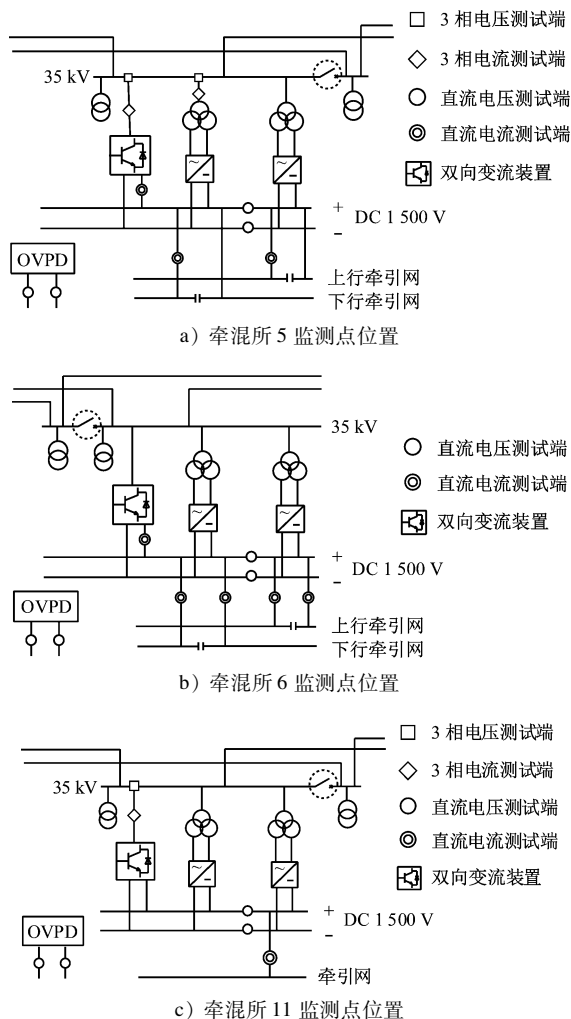
对于恒压特性而言,当电流在 I_{dmin} — I_{dmax} 范围内时,双向变流装置保持牵引恒压特性运行,在其

容量范围之内将直流牵引网压稳定在设定目标值 U_{d0} 范围内,以抑制接触网压下降;随着牵引功率的增加,当电流达到设定值 I_{dmax} 并继续增大时,双向变流器保持最大恒定功率进行工作。

对于下垂特性而言,当电流在 I_{dmin} — I_{dmax} 范围内时,随着装置输出电流的增加,直流网压以下垂率 k 逐渐减小,由于牵引功率的增加,当电流达到设定值 I_{dmax} 并继续增大时,双向变流器以最大恒定功率进行工作。

以恒压特性作为双向变流装置外特性,整流机组与双向变流装置协同配合时,其混合供电系统有3种工作模式,分别为: $U_{dr} > U_{d0}$ (U_{dr} 为整流机组空载电压; U_{d0} 为双向变流装置空载电压); $U_{dr} = U_{d0}$; $U_{dr} < U_{d0}$,如图4所示。由图4可以获得混合供电系统的综合输出外特性,如图5所示。

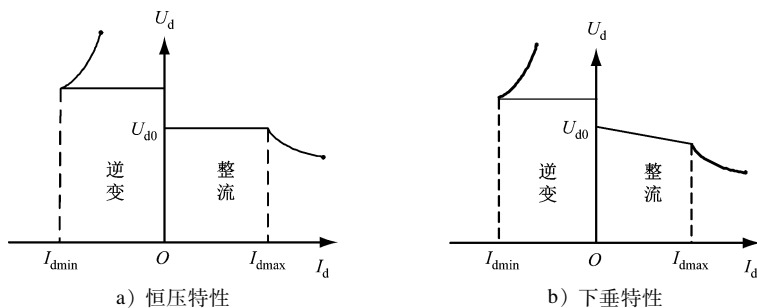
对于 $U_{dr} > U_{d0}$ 模式:当电流小于 I_1 时,直流网



注:OVPD 为钢轨电位限制装置。

图 2 牵混所电量参数监测点位置示意图

Fig. 2 Position diagram of THS (traction voltage reduction hybrid substation) electrical parameter monitoring points



注: U_d 为直流电压; I_d 为直流电流; I_{dmin} 为双向变流装置逆变最小电流; I_{dmax} 为双向变流装置整流恒压特性最大电流。

图 3 双向变流装置外特性

Fig. 3 Output external characteristics of BC device

2.2 恒压外特性下负载功率分配情况实测分析

2.2.1 启动电压影响

以 2020 年 11 月 10 日徐州某地铁工程牵混所 5

压高于 U_{d0} , 此时整流机组单独工作, 为列车提供牵引功率; 当电流达到设定值 I_1 并继续增大时, 双向变流装置投入工作, 保持牵引恒压特性运行, 补充列车所需牵引电能, 有效实现双向变流器 + 整流机组协同工作的目的, 并将直流网压维持在 U_{d0} 范围内^[5]; 当电流增大至 $I_1 + I_{dmax}$ 并继续增大时, 双向变流装置进入最大恒定功率运行区间, 直流网压逐渐下降。

对于 $U_{dr} = U_{d0}$ 模式: 由于双向变流装置的稳压功能, 当电流小于 I_{dmax} 时, 直流网压一直维持在 U_{d0} 范围内, 此时双向变流装置单独工作; 当电流达到设定值 I_{dmax} 并继续增大时, 双向变流装置进入最大恒定功率运行区间, 直流网压逐渐下降, 整流机组投入工作, 补充列车所需牵引电能。

对于 $U_{dr} < U_{d0}$ 模式: 当电流小于 I_2 时, 由于直流网压始终高于整流机组的空载电压, 整流机组不投入工作, 双向变流装置单独工作; 在电流达到设定值 I_{dmax} 前, 双向变流装置保持牵引恒压特性运行, 将直流网压维持在 U_{d0} 范围内; 当电流在 $I_{dmax} - I_2$ 范围内时, 双向变流器保持最大恒定功率运行, 直流网压逐渐下降; 当电流达到设定值 I_2 并继续增大时, 整流机组投入工作, 补充列车所需牵引电能, 直流网压在 U_{dr} 基础上进一步下降。

当双向变流装置外特性为下垂特性时, 其混合供电系统的综合输出外特性如图 5 d) 所示。其中:

$k = \frac{k_1 k_2}{k_1 + k_2}$, k_1 为整流机组的下垂率, k_2 为双向变流装置的下垂率。

为例, 分析该所双向变流装置启动电压对输出情况的影响, 其直流侧输出电流曲线如图 6 所示。其中: 工况 1—工况 3 分别表示牵混所 5 中 24 脉波整流机

组与恒压 1 550 V、1 600 V、1 650 V 双向变流装置协同工作的情况;整流工况下,输出电流为正。牵混所 5 直流负荷过程统计如表 1 所示。其中: P_{RAVG}

为整流机组有功功率的平均值; P_{BAVG} 为双向变流装置整流工况有功功率的平均值。

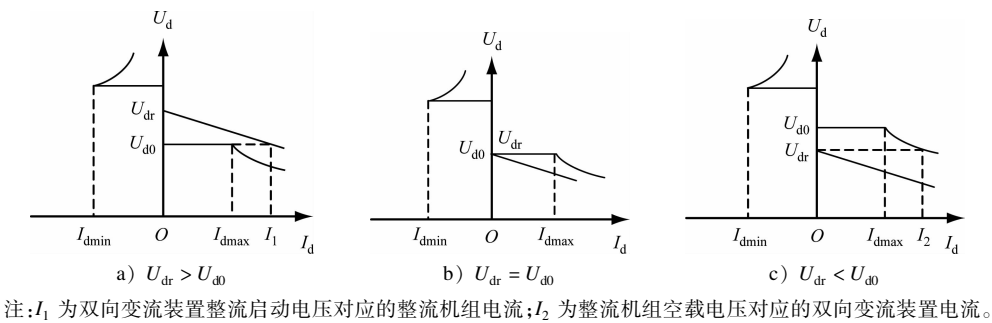


图 4 混合供电系统的 3 种工作模式
Fig. 4 Three working modes of hybrid power supply system

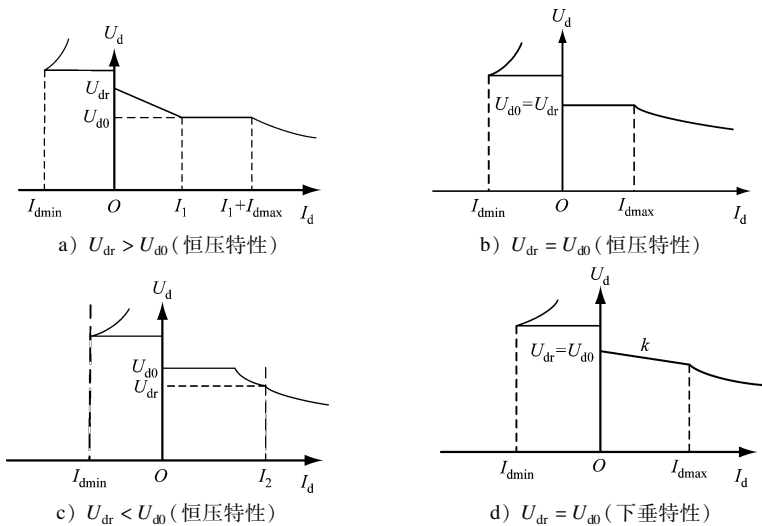


图 5 混合供电系统的综合输出外特性
Fig. 5 Comprehensive output external characteristics of hybrid power supply system

表 1 工况 1—工况 3 的牵混所 5 直流负荷过程统计
Tab.1 DC load process statistics of THS 5 under working conditions 1 to 3

工况	时间段	$P_{\text{RAVG}}/\text{kW}$	$P_{\text{BAVG}}/\text{kW}$
1	07:27—07:33	302	103
2	07:44—07:50	261	162
3	07:57—08:03	105	1 048

由表 1 可知,当牵混所 5 中的双向变流装置保持牵引恒压特性运行时,随着启动电压从 1 550 V 提高至 1 650 V,总体上整流机组输出功率的平均值逐渐减小,而双向变流装置整流输出功率的平均值逐渐增大,且其工作时间逐渐增加。这说明双向变流装置启动电压越高,负载功率分配越多。根据前文提到的供电系统的工作模式(见图 4 a)),当 U_{d0}

增加时,设定值 I_1 相应减小,随着牵引负荷电流增大,双向变流装置提早投入工作,其输出功率相较于原来有所增加。

2.2.2 整流机组工况影响

双向变流装置分别与 12 脉波整流机组、24 脉波整流机组并联运行时,由于 12 脉波整流机组的等效阻抗大于 24 脉波整流机组,在相同负载情况下,第 1 种工作模式(双向变流装置与 12 脉波整流机组并联运行)的整流机组输出功率小于第 2 种工作模式(双向变流装置与 24 脉波整流机组并联运行),则第 1 种工作模式下的双向变流装置整流输出功率大于第 2 种工作模式。

以 2020 年 11 月 10 日牵混所 5 及牵混所 6 的双向变流装置与整流机组配合运行为例,分析牵混所 6 整流机组工况影响,其直流负荷统计柱状图如

图 7 所示。其中:工况 4 表示整流机组与双向变流装置(恒压 1 550 V)协同工作情况;工况 5 表示整流机组与双向变流装置(恒压 1 600 V)协同工作情况。

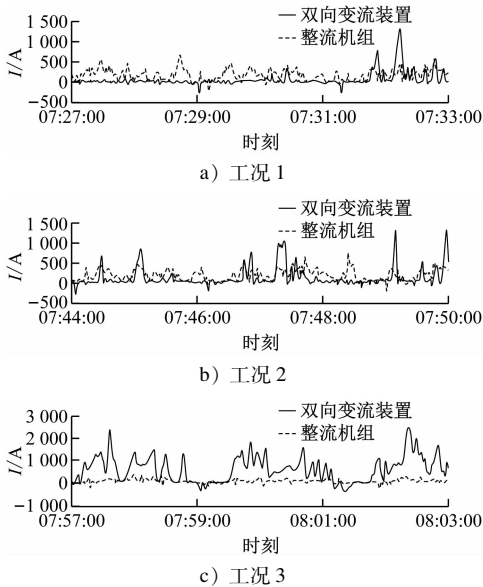


图 6 工况 1—工况 3 的牵混所 5 直流侧输出电流曲线
Fig. 6 DC side output current curve of THS 5 under working conditions 1 to 3

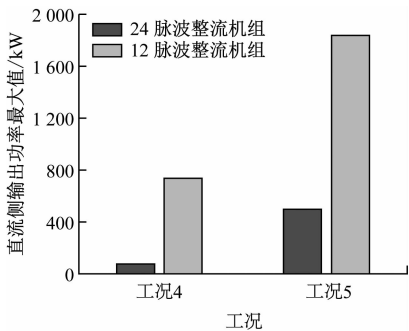


图 7 工况 4—工况 5 的牵混所 6 直流负荷统计
Fig. 7 DC load statistics of THS 6 under working conditions 4 and 5

由图 7 可知,12 脉波整流机组、24 脉波整流机组分别与双向变流装置并联运行时,在相同负载情况下,第 1 种工作模式牵混所 6 中的双向变流装置的整流输出功率峰值大于与第 2 种工作模式。测试结果表明,12 脉波整流机组的等效阻抗大于 24 脉波整流机组的等效阻抗。

2.3 下垂外特性下输出功率情况实测分析

以 2020 年 11 月 10 日徐州某地铁工程牵混所 5 为例,分析该所双向变流装置(下垂外特性)与不同

工况整流机组协同工作时的负载功率分配规律,其直流侧负荷统计结果如表 2 所示。其中:工况 6 表示 24 脉波整流机组与双向变流装置(下垂 1 650 ~ 1 550 V)协同工作情况;工况 7 表示 12 脉波整流机组与双向变流装置(下垂 1 650 ~ 1 550 V)协同工作情况; P_{RMAX} 为整流机组有功功率最大值; P_{BMAX} 为双向变流装置整流工况有功功率最大值。

表 2 工况 6—工况 7 的牵混所 5 直流侧负荷过程统计
Tab. 2 DC side load process statistics of THS 5 under working conditions 6 and 7

工况	时间段	$P_{\text{RAVG}}/\text{kW}$	$P_{\text{RMAX}}/\text{kW}$	$P_{\text{BAVG}}/\text{kW}$	$P_{\text{BMAX}}/\text{kW}$
6	08:16—08:30	272	134	584	1 977
7	08:31—09:00	56	72	664	3 100

由表 2 可知,牵混所 5 的双向变流装置以牵引下垂特性(1 650 ~ 1 550 V)运行时,工况 6 的双向变流装置整流输出功率峰值小于工况 7,这同样也表明 12 脉波整流机组的等效阻抗大于 24 脉波整流机组的等效阻抗。

以工况 6 为例,当双向变流装置(下垂外特性)与 24 脉波整流机组协同工作并处于整流工况时,随着直流网压从 1 650 V 逐渐下降至 1 550 V,整流机组及双向变流装置的输出电流逐渐增加,取该时段部分数据进行拟合,所得曲线如图 8 所示。由图 8 可知:实际情况下的整流机组下垂外特性并非线性,其自然下垂率随电流的变化而发生变化;由于装置控制策略原因,本次试验的双向变流装置并没有工作在恒功率区,其输出电流随着网压的降低而逐渐增加。

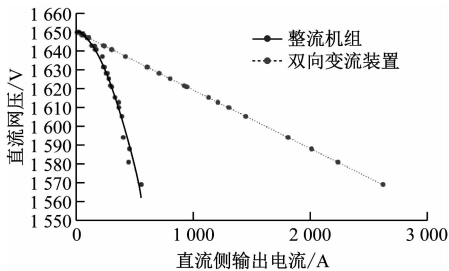


图 8 整流机组自然下垂外特性拟合曲线
Fig. 8 Fitting curve of the natural droop external characteristics of rectifier unit

3 全双向变流方案运行性能实测分析

以 2020 年 11 月 11 日徐州某地铁工程为例,牵

混所 5 及牵混所 6 的直流侧输出电流曲线如图 9 所示。其中:工况 8 表示整流 + 双向变流方案方案,即 24 脉波整流机组独立工作的情况(此时双向变流装置仅参与逆变);工况 9 表示全双向变流方案,即全线各牵混所整流机组退出后,双向变流装置以下垂外特性(1 650 ~ 1 550 V)独立运行的情况;整流工况下,输出直流为正。工况 8 及工况 9 的牵混所 5 及牵混所 6 直流负荷过程统计如表 3 所示。其中: I_{RAVG5} 、 I_{RAVG6} 分别表示牵混所 5 及牵混所 6 的整流机组整流的输出电流平均值; I_{BAVG5} 、 I_{BAVG6} 分别表示牵混所 5 及牵混所 6 的双向变流装置整流的输出电流平均值。

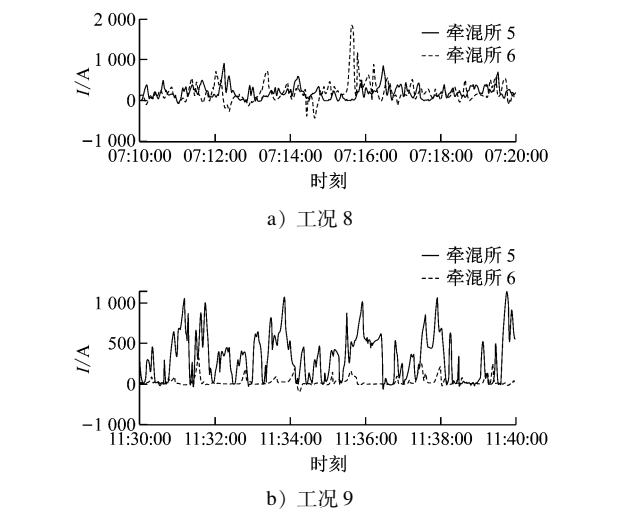


图9 工况8—工况9的牵混所5及牵混所6直流侧输出电流曲线

Fig.9 DC side output current curves of THS 5 and THS 6 under working conditions 8 and 9

表3 工况8及工况9的牵混所5及牵混所6直流负荷过程统计

Tab.3 DC load process statistics of THS 5 and THS 6 under working conditions 8 and 9				
工况	I_{RAVG5}/A	I_{BAVG5}/A	I_{RAVG6}/A	I_{BAVG6}/A
8	194	—	194	—
9	—	331	—	29

由表3可知:当整流机组独立工作时,牵混所5及牵混所6的整流机组的输出电流平均值相近,为列车牵引提供所需电流;当全线双向变流装置独立运行时,牵混所5的双向变流装置整流输出功率平均值有所增加,牵混所6的双向变流装置整流输出功率平均值有所减少。这说明在本次试验中,双向变流装置可以替代整流机组独立运行,在列车牵引

及制动时实现整流、逆变的功能,且系统牵引功率分布有所改变。

4 含双向变流装置的车辆段无功补偿分析

功率因数问题一直是困扰轨道交通供电系统的重要问题,功率因数较低会导致电力部门的高额罚款。为了提高功率因数,需对无功补偿效果进行分析。本节主要分析双向变流装置工作时的无功补偿效果。以含双向变流装置的车辆段为例,对其进行无功补偿分析。用双向变流装置进行无功补偿,切除 SVG(静止无功发生器)后,不同无功补偿控制操作下,主所 110 kV 侧的无功功率均值(补偿前,主所容性无功功率均值为 -3.87 Mvar)如表 4 所示。

表4 不同无功补偿控制操作下的主所无功功率均值
Tab.4 Main substation reactive power average value under different reactive power compensation control operations

时间段	双向变流装置无功补偿功率(感性)/Mvar	主所 110 kV 侧的无功功率均值(容性)/Mvar
15:44:24—15:45:35	0.5	-3.38
15:45:43—15:46:30	1.0	-2.87

当双向变流装置无功功率补偿值依次增大为 0.50 Mvar、1.00 Mvar 时,主所 110 kV 侧的容性无功功率依次减少了 0.49 Mvar、1.00 Mvar(与主所连接的其他牵混所负荷波动有关),理论计算的线路无功损耗依次为 16.216 kvar、16.337 kvar,可忽略不计。因此,双向变流装置能有效对地铁供电系统进行无功补偿。

5 结论

1) 通过对徐州某地铁工程含双向变流装置的牵混所 5 及牵混所 6 进行测试分析可知,双向变流装置的负载功率分配受到其启动电压及整流机组工况的影响。在恒压外特性下,当启动电压升高时,相同条件下双向变流装置的整流输出功率有所增加,此结果与混合系统综合输出外特性分析结果一致;双向变流装置分别与 12 脉波及 24 脉波整流机组协同运行时,其在第 1 种工作模式下的整流输出功率峰值大于第 2 种工作模式。

2) 对比整流 + 双向变流方案与全双向变流方

(下转第 121 页)

为精确地定位到第1个缺陷模拟点;随着时间的增加,列车位置信息的累积误差有所增大,导致里程信息产生了40 m左右的偏离;对于锚段定位校正和RFID定位校正,列车定位误差的修正效果并不理想,均存在20 m左右的误差;空间综合定位系统的列车定位误差获得了大幅度的修正,列车定位误差减小至5 m以内,能够较好地定位到后续缺陷点,进一步验证了所提空间综合定位系统的定位精度。

4 结语

针对目前接触网巡检系统定位误差大、定位精度不高等问题,本文引入误差比较机制,提出一种空间综合定位方法。经过上线测试及相关验证表明,所提系统的定位精度达到了5 m,具有定位精度高、拓展性好等优点。所提系统的定位精度受限于定位技术,随着定位算法的改进及定位技术的发展,该综合定位方法的精度也会进一步有所提高。

参考文献

- [1] 陈华展. 基于非线性滤波的列车组合定位信息融合算法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2017.
CHEN Huazhan. Research on nonlinear filter-based information fusion algorithm for integrated train positioning[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2017.

Beijing Jiaotong University, 2017.

- [2] 张明洋. 基于GPS/INS及关键应答器的列车组合定位研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2017.
ZHANG Mingyang. Research on integrate train positioning based on GPS/INS and balise[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2017.
- [3] 张亮. 基于EKF的GPS/ODO列车定位方法研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2016.
ZHANG Liang. Research on EKF based GPS/ODO integrated train positioning method[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2016.
- [4] ZELLER P, SIEBLER B, LEHNER A, et al. Relative train localization for cooperative maneuvers using GNSS pseudoranges and geometric track information[C]//2015 International Conference on Localization and GNSS (ICL-GNSS). Gothenburg: IEEE, 2015: 1.
- [5] 郭瑞, 陈唐龙. 基于图像处理的接触网支柱杆号识别[J]. 湖南工程学院学报(自然科学版), 2019, 29(1): 18.
GUO Rui, CHEN Tanglong. Recognition of catenary strut pole numbers based on image processing[J]. Journal of Hunan Institute of Engineering (Natural Science Edition), 2019, 29(1): 18.
- [6] 关金发. 受电弓与刚性接触网动力相互作用研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2016.
GUAN Jinfa. Study on dynamic interaction between pantograph and overhead conductor rail[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2016.

(收稿日期:2021-03-31)

(上接第115页)

案发现,当整流机组与双向变流装置(仅逆变)协同工作时,牵混所5及牵混所6中整流机组的输出电流平均值均为194 A;当整流机组退出后,牵混所5及牵混所6的双向变流装置整流机组的输出电流平均值分别为331 A、29 A。结果表明,双向变流装置能完全代替整流机组独立运行,实现整流和逆变的功能。

3) 对含双向变流装置的车辆段进行无功补偿分析发现,当双向变流装置补偿的无功功率依次增大为0.50 Mvar、1.00 Mvar时,监测主所110 kV侧的容性无功功率均值依次减少了0.49 Mvar、1.00 Mvar,验证了双向变流装置无功补偿功能的有效性。

参考文献

- [1] 陈琪, 孙才勤, 严长辉. 长沙地铁1号线双向变流型再生电能吸收装置[J]. 电气化铁道, 2017, 28(3): 21.
CHEN Qi, SUN Caiqin, YAN Changhui. Bidirectional converter type regenerated energy absorption device for Line 1 of Changsha Metro[J]. Electric Railway, 2017, 28(3): 21.

- [2] 徐金平, 杜贵府, 朱纪法, 等. 城市轨道交通双向变流式牵引供电系统的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 179.
XU Jinping, DU Guifu, ZHU Jifa, et al. Application of bidirectional converter traction power supply system in urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(1): 179.
- [3] 张骥, 刘炜, 周瑞兵, 等. 基于双向变流装置的城市轨道交通牵引供电系统潮流计算[J]. 中国铁道科学, 2020, 41(1): 92.
ZHANG Jian, LIU Wei, ZHOU Ruibing, et al. Power flow of traction power supply system for urban rail transit based on bidirectional converter device[J]. China Railway Science, 2020, 41(1): 92.
- [4] 叶宏, 郑旺, 李俊强. 城市轨道交通双向变流型混合供电系统控制策略研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 191.
YE Hong, ZHENG Wang, LI Junqiang. Control strategy of bidirectional converter hybrid power supply system for urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(1): 191.
- [5] 俞益, 李辉, 郑旺. 城市轨道交通混合供电系统工作模式研究[J]. 城市轨道交通研究, 2020, 23(1): 183.
YU Yi, LI Hui, ZHENG Wang. Working mode of hybrid power supply system for urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2020, 23(1): 183.

(收稿日期:2021-04-16)