

城市轨道交通混合供电系统工作模式研究

俞 益¹ 李 辉² 郑 旺²

(1. 宁波轨道交通集团有限公司, 315100, 宁波; 2. 江苏晨大电气股份有限公司, 221116, 徐州//第一作者, 高级工程师)

摘 要 城市轨道交通混合供电系统为双向变流器机组和二极管整流机组并联工作的供电系统。二极管整流机组输出电压不可控, 无法根据现场工况变化进行调整; 双向变流器采用全控型器件, 可通过参数调整实现多种输出特性。在混合供电系统中, 双向变流器需根据不同的控制目标及二极管整流机组输出特性等因素对自身输出特性进行调整。针对混合供电系统中双向变流器输出特性设计方法进行研究, 实车测试结果表明, 混合供电系统能满足各种供电模式的实际应用需求, 也能实现双向变流器与整流机组之间的协同工作。

关键词 城市轨道交通; 供电系统; 混合供电; 双向变流器

中图分类号 U231.8

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.01.044

Working Mode of Hybrid Power Supply System for Urban Rail Transit

YU Yi, LI Hui, ZHENG Wang

Abstract Urban rail transit hybrid power supply system is a parallel-working power supply system, which consists of bidirectional converter unit and diode rectifier unit. The output voltage of the diode rectifier unit is uncontrollable and nonadjustable to the changes of field working conditions, while the bidirectional converter can realize various output characteristics through parameter adjustment by adopting the fully controlled apparatus. In hybrid power supply system, the bidirectional converter needs to adjust its output characteristics according to different control objectives and output characteristics of the diode rectifier unit. The design method of bidirectional converter output is studied according to the characteristics of hybrid power supply system, and the test result of actual vehicles shows that the system can meet the application demands under all kinds of power supplying modes, and achieve the coordination between bidirectional converter and rectifier unit at the same time.

Key words urban rail transit; power system; hybrid power supply; bidirectional converter

Fust-author's address Ningbo Rail Transit Group Co., Ltd., 315100, Ningbo, China

0 引言

当前城市轨道交通供电系统的主流供电设备为二极管整流机组, 该设备的优点是结构简单、运行稳定可靠, 主要缺点是直流网压波动大、制动能量无法回馈。

为解决上述问题, 国内有城市轨道交通业主单位联合设计院及设备生产厂家开展了双向变流器在城市轨道交通供电系统应用的研究。双向变流器是一种由全控型器件组成的大功率变流设备, 不仅具备能量回馈的功能, 还具备牵引供电的功能, 即: 在列车制动时, 能将直流电能逆变为交流电能回馈至交流电网; 在牵引供电时, 能将交流电能转换为直流电能供列车牵引取流。为稳定直流网压、降低网损, 双向变流器应具有和二极管整流器相同的容量和过载能力。

为验证双向变流器的正线运行能力和可靠性, 宁波地铁于 2018 年开展了双向变流器正线挂网应用研究。用于试验的供电系统是由 1 套双向变流机组和原有的 2 套二极管机组组成的混合供电系统。

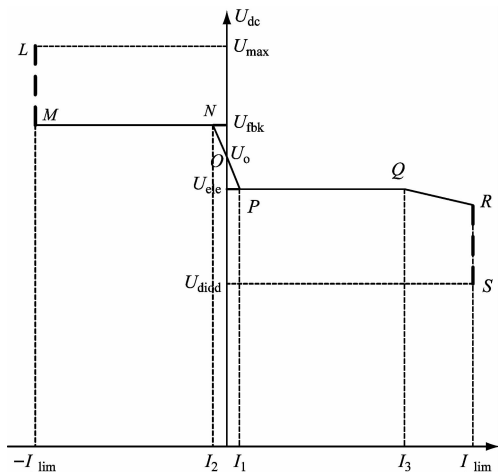
本文介绍了混合供电系统中双向变流器的输出特性和不同供电模式的供电特性, 并进行了实车测试验证。

1 混合供电系统的供电特性

混合供电系统双向变流器特性如图 1 所示。

1) *NOP* 段特性。在电流 $I_2—I_1$ 的范围内, 设定双向变流器以较小的功率输出, 保持双向变流器输出电压跟随接触网电压, 这种情况下, 当有突变负载需大功率输出时可避免接触网的电压突变; 另外, 在该区间内以小功率宽电压跟随直流网压不仅可以实现制动能量邻车优先吸收, 还可以避免双向变流器与整流机组或其他双向变流器之间出现功率环流。

2) *MN* 段特性。当回馈电流大于 I_2 时, 双向变



注: ONML 段——回馈特性; OPQRS 段——供电特性; U_o ——负载为零时的直流电压给定值, 一般略高于接触网空载电压值; U_{\max} ——直流过电压保护值, 一般略低于接触网过电压保护值; I_{\lim} ——设备峰值功率 6 MW 时的电流限幅值; U_{fb} ——设备大功率回馈时稳定直流电压的目标值, 根据双向变流器工作模式需求设定; U_{e} ——设备提供大功率牵引电流时牵引稳压目标值, 根据双向变流器工作模式及整流机组特性设定; U_d ——直流电压; U_{di} ——整流机组最低电压; I_1 ——进入牵引稳压特性的启动电流值; I_2 ——进入回馈稳压特性的启动电流值; I_3 ——进入电压环下垂特性的启动电流值; I_{dc} ——直流电流

图 1 混合供电系统双向变流器特性图

流器进入大功率回馈稳压特性运行, 在双向变流器的容量范围之内, 能最大程度地将制动能量回馈至交流电网, 将直流网压维持在目标设定值 U_{fb} 范围内, 以抑制接触网压上升。

3) PQ 段特性。当电流在 I_1 — I_3 的范围内时, 双向变流器进入牵引稳压特性运行, 在双向变流器的容量范围之内将直流牵引网压稳定在设定目标值 U_{e} 范围内, 以抑制接触网压下降。

4) QR 段特性。随着双向变流器牵引功率的增加, 当电流大于 I_3 的设定值时, 双向变流器进入目标电压下垂特性区间, 在保持双向变流器限幅功率输出的同时, 由整流机组继续补充提供牵引电能, 能有效实现双向变流器 + 整流机组协同工作的目的。

2 混合供电系统的工作模式

在混合供电系统中, 通过调整双向变流器特性参数, 实现以下几种工作模式:

1) 双向变流器稳压模式。在该模式下, 列车的牵引及回馈电能全部由双向变流器提供, 整流机组仅处于热备用状态。

2) 整流机组优先供电模式。在该模式下, 制动能量由双向变流器逆变回馈至交流电网, 列车牵引时由二极管整流机组优先供电; 随着牵引功率的增加, 直流电压下降至双向变流器稳压启动阈值时双向变流器输出大功率牵引电能, 维持网压不再继续下降。

3) 双向变流器优先供电模式。在该模式下, 制动能量由双向变流器逆变回馈至交流电网, 列车牵引时由双向变流器优先稳压供电; 当牵引功率增加至限幅功率时, 双向变流器在保持限幅功率输出的同时进入电压下垂模式, 不足的能量由整流机组提供。

为验证混合供电系统各种工作模式的特性, 在宁波地铁 2 号线宁波大学站进行了双向变流器挂网试验。混合供电系统连接图如图 2 所示。

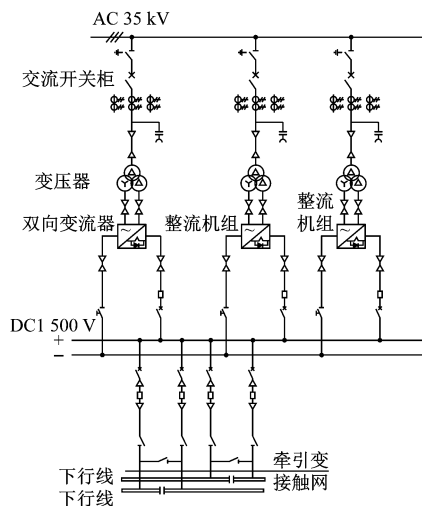


图 2 混合供电系统连接图

如图 2 所示, 双向变流器在直流侧与整流机组并联至牵引变电所内的母线, 双向变流器与整流机组组成混合供电系统。为方便数据采集, 在夜间调集 2 列电客车, 在混合供电系统供电区间进行往返运行。

双向变流器基本参数: 交流电压为 2×900 V; 直流电压为 1 350 ~ 1 950 V 可调; 峰值整流/逆变功率为 6 000 kW。

电客车基本参数: 列车编组为 4M2T (4 动 2 拖); AW0 (空载) 列车质量为 201.2 t; 列车牵引功率为 4 336 kW。

整流机组牵引网压特性如图 3 所示。

3 双向变流器稳压供电模式特性验证

在双向变流器稳压供电模式下, 双向变流器在

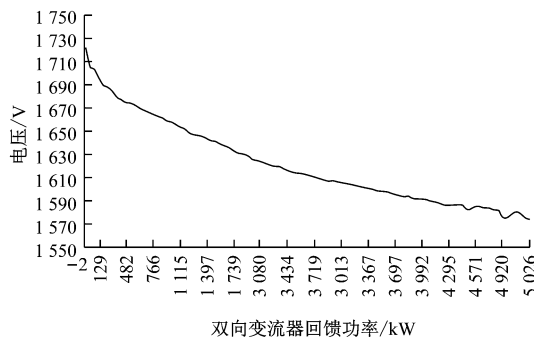


图3 整流机组牵引网压特性图

逆变回馈及牵引稳压时均保持同一个稳压目标值，即 $U_{fbk} = U_{ele} = U_o$ ，本次设定 $U_o = 1\,700\text{ V}$ 。双向变流器稳压供电模式特性如图4所示。

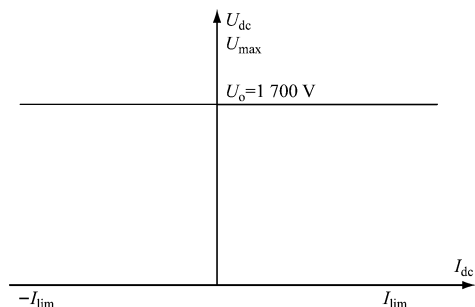


图4 双向变流器稳压供电模式特性图

双向变流器在其峰值功率(6 MW)范围内可保持直流网压稳定。为验证该特性的控制效果，在线路停运时，单列 AW0 电客车在混合供电区间内 100% 级位加速至 70 km/h，实测结果如图5所示（每秒钟采集5组数据）。

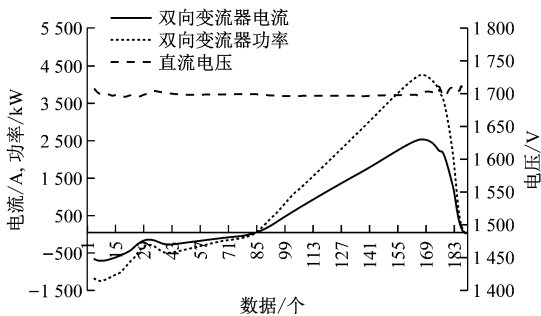


图5 双向变流器稳压供电模式特性实测图

由图5可见，最大负载功率为4 248 kW，电压波动范围为1 697 ~ 1 703 V，实现了双向变流器牵引稳压供电的目标。设定 $U_o = 1\,700\text{ V}$ ，略高于整流机组空载电压，因此本次整流机组并未参与牵引供电，达到了双向变流器牵引稳压供电且整流机组热备用的预期目标。

4 整流机组优先供电模式特性验证

在整流机组优先供电模式下，设定： $U_{fbk} = 1\,710\text{ V}$ ， $U_{ele} = 1\,630\text{ V}$ ， $U_o = 1\,690\text{ V}$ 。整流机组优先供电特性图如图6所示。

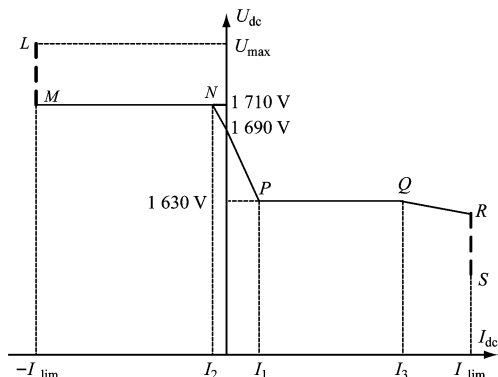


图6 整流机组优先供电模式特性图

为验证该特性的控制效果，在线路停运时，2 列 AW0 电客车在混合供电区间内 100% 级位加速至 70 km/h，实测结果如图7所示（每秒钟采集5组数据）。

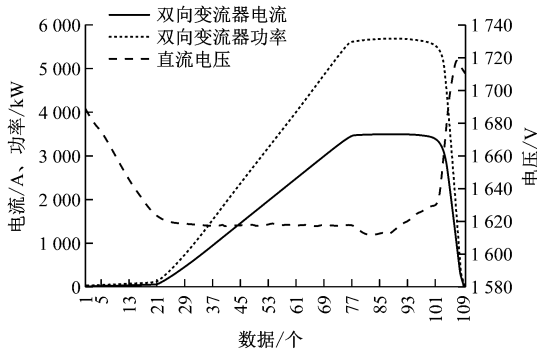


图7 整流机组优先供电模式特性实测图

由图7可见：列车起动初期由整流机组提供牵引电能，由于其自然下垂特性，随着负载功率的增加直流电压下降较快；当直流电压降至1 630 V时，双向变流器开始与整流机组协同提供牵引电能，将接触网压维持在1 630 V不再下降，直至达到功率限幅。

在整流机组优先供电模式下，接触网最低电压为1 622 V，双向变流器最大输出功率为5 660 kW。其实测特性与设计特性基本一致，且双向变流器与整流机组之间的协同工作也实现了无缝对接。

5 双向变流器优先供电模式特性验证

在双向变流器优先供电模式下，设定： $U_{fbk} =$

1 710, $U_{\text{ele}} = 1\ 670\text{ V}$, $U_0 = 1\ 690\text{ V}$ 。双向变流器优先供电模式供电特性如图 8 所示。

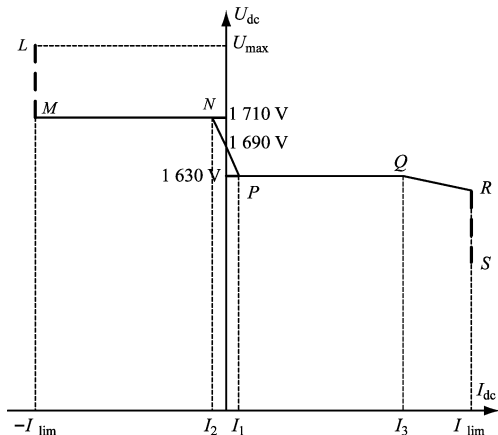


图 8 双向变流器优先供电模式供电特性图

为验证该特性的控制效果,在线路停运时,2 列 AW0 电客车在混合供电区间内 100% 级位加速至 70 km/h,实测结果如图 9 所示(每秒钟采集 5 组数据)。

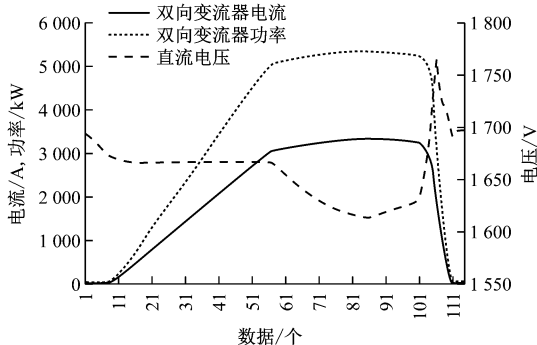


图 9 双向变流器优先供电模式特性实测图

由图 9 可见:列车起动后双向变流器随即开始功率输出,将解网压维持在 1 670 V 左右;当负载功率增加至 5 000 kW 左右时,双向变流器进入电压环下垂特性,并保持限幅功率功率输出;随着接触网电压的下降,整流机组开始按照其自身的特性进行功率输出,双向变流器协同整流机组完成 2 列电

客车的牵引供电工作。

在双向变流器优先供电模式下,接触网最低电压为 1 610 V,双向变流器最大输出功率为 5 324 kW。其实测特性与设计特性基本一致,且双向变流器与整流机组之间的协同工作也实现了无缝对接。

6 结语

在双向变流器加整流机组的混合供电系统中,通过调整双向变流器的特性参数并经过实车测试表明,混合供电系统特性可满足双向变流器稳压模式、整流机组优先供电模式、双向变流器优先供电模式的实际应用需求,且双向变流器与整流机组之间的协同工作也均实现了无缝对接。

1) 双向变流器稳压模式可完全实现接触网的稳压功能。接触网电压稳定可以实现列车就近取流、减少线路损耗、优化回流路径。但双向变流器稳压模式的实现需建立在全线设置双向变流器的基础上,目前双向变流器的全线应用的项目已在安装实施阶段,但尚未有全线运行的相关数据。

2) 整流机组优先供电模式除完成制动能量回馈,还可在双向变流器功率范围内有效维持直流网压下降,减小接触网电压波动范围,实现了整流机组及双向变流器之间的协同工作,增加了线网的供电容量。

3) 双向变流器优先供电模式同样具备整流机组优先供电的优点,但是当进行单站挂网应用时,由于单站的双向变流器将接触网电压稳定在一个较高的电压值,因此将会产生大功率长距离传输,会造成不必要的线路损耗。

参考文献

- [1] 丁树奎. 能馈式牵引供电原理及其在城市轨道交通中的应用[M]. 北京:北京交通大学出版社,2014.

(收稿日期:2019-09-10)

青岛制造的世界首条氢能源有轨电车投入商业运营

近日,由中车四方股份公司研制的氢能源有轨电车在佛山上线载客运营,标志着世界首条氢能源有轨电车正式投入商业运营。我国现代有轨电车驶入“氢时代”。中车四方股份公司新能源高级主任设计师李艳昆介绍说,与常规列车不同,氢能源有轨电车搭载氢燃料电池,拥有超强的续航能力。加满一次氢气只需要 15 min 左右,就可以持续行驶约 100 km。李艳昆说:“不用再建设接触网,供电的这些变电所也全部取消了,建设成本大幅下降,后期的运营也比较便捷。采用氢能源,一是高效,二个是氢氧发生化学反应,产物只有水和热量,零排放。”

(摘自 2020 年 1 月 2 日中央广播电视总台中国之声《新闻和报纸摘要》,记者 王伟报道)