

城市轨道交通再生储能与智能微电网的融合应用探索

姜宝建

(北京城市轨道交通咨询有限公司, 100071, 北京//工程师)

摘要 开发可再生能源、构建可持续的能源系统是能源发展的必然趋势,融入互联网+的智能微电网应运而生。目前城市轨道交通车辆采用再生制动+电阻能耗制动+摩擦制动的制动策略,不但导致隧道温度的上升,还会带来能量浪费、环境污染等问题。为此,构建了城市轨道交通再生储能与智能微电网的拓扑结构。城市轨道交通再生储能与智能微电网的融合及协调运行,可有效规避上述问题,达到节能减排的目的。

关键词 城市轨道交通;再生储能;智能微电网;节能减排

中图分类号 U260.359

DOI:10.16037/j.1007-869x.2022.03.043

Exploration on Integrated Application of Urban Rail Transit Renewable Energy Storage and Smart Microgrid

JIANG Baojian

Abstract It is an inevitable trend of energy development to explore renewable energy and to build sustainable energy system. The smart microgrid integrated with Internet+ emerges as the time advances. At present, the braking strategy of regenerative braking+resistance energy consumption braking+friction braking is adopted in urban rail transit vehicles, which not only leads to the rise of tunnel temperature, but also brings about problems such as energy waste, environmental pollution. Therefore, the topological structure of urban rail transit renewable energy storage and smart microgrid is constructed. The integration and coordinated operation of urban rail transit regenerative energy storage and smart microgrid can effectively avoid the above problems and achieve the purpose of energy conservation and emission reduction.

Key words urban rail transit; renewable energy storage; smart microgrid; energy conservation and emission reduction

Author's address Beijing Metro Consultancy Co., Ltd., 100071, Beijing, China

城市轨道交通线路的站间距较短,列车在运行过程中启动、加速、制动及停车频繁。目前,轨道交通列车的制动模式大多优先采用电制动(再生

制动+电阻制动),并辅以空气制动(盘形制动/轮对踏面制动)作为补充。列车在制动时,在同一供电区域内的牵引列车将吸收部分再生制动能量,无法被临近列车吸收的能量将供电网的网压抬升至一定程度时,再生制动能量将通过制动电阻转化成热量,分散至隧道空气中。大量的电阻制动热能会在隧道内累积,隧道内温度不断攀升,需要在隧道内设置通风散热设备,导致大批能量的浪费。此外,大多数制动电阻安装在车体上,除了增加列车牵引能耗和布置空间外,还需考虑大功率散热和复杂的热保护,列车空气制动的闸片、闸瓦磨耗也会造成隧道内的大气环境污染。因此,列车电阻制动大大增加了城市轨道交通线路的运营成本和环控系统管理的压力,城市轨道交通再生制动的有效吸收与利用成为了节能减排的热点。

1 城市轨道交通再生制动能量的吸收与利用

1.1 再生制动能量的估算

根据相关统计,城市轨道交通再生制动会把大部分的列车动能转化为电能,其反馈能量一般为列车牵引动能的80%,约占从供电网获取牵引能耗的40%。目前,国内城市轨道交通线路的列车以4动2拖的6节编组、B型车为主,其车辆定员总质量 M 的计算式为:

$$M = am_1 + bm_2 + (a+b)cm_3 \quad (1)$$

式中:

m_1 ——拖车质量;

a ——拖车数量;

m_2 ——动车质量;

b ——动车数量;

c ——车辆(定员)平均载客量;

m_3 ——乘客平均体重。

式(1)中, m_1 取32 t, m_2 取34 t, m_3 取0.06 t/人, a 取2, b 取4, c 取250人/车,可得 M 为290 t。

在理想情况的电制动下,列车从最高速度降至电制动-空气制动转换点的速度,列车的再生制动能量的计算式为:

$$E = \eta M (v_1^2 - v_2^2) / 2 \quad (2)$$

式中:

E ——列车的再生制动能量;

η ——能量转换效率;

v_1 ——列车的最高运行速度;

v_2 ——列车在电制动-空气制动转换点的速度;

式(2)中, M 取 290 t, η 取 80%, v_1 取 80 km/h, v_2 取 5 km/h,经计算可得 E 为 15.8 kWh。

因此,将列车的再生制动能量吸收存储下来并进行有效利用,是一笔很可观的经济收入。目前,列车的再生制动能量吸收与利用的主流技术分为逆变能馈型与再生储能型两类。

1.2 逆变能馈型

逆变能馈型是指将直流牵引供电网无法吸收的列车再生制动电能通过牵引变电站的逆变升压/降压系统回馈至 AC 35 kV 的压变电站或 AC 400 V 的低压供电站中。目前,逆变能馈型系统在国内部分城市轨道交通线路已有挂网应用,其典型拓扑图如图 1 所示。

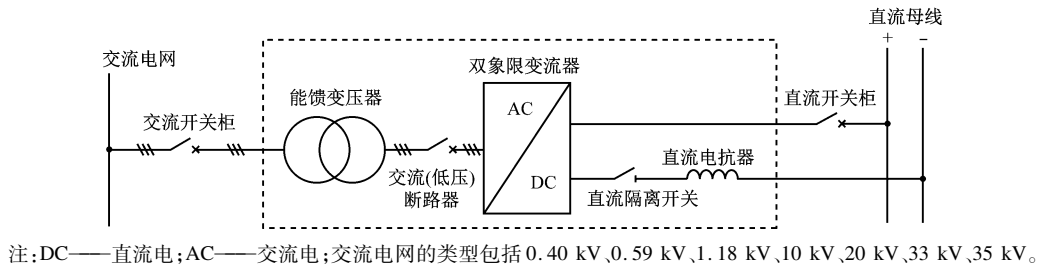


图 1 逆变能馈型系统典型拓扑图^[2]

Fig. 1 Typical topological diagram of inverter energy feed system^[2]

逆变能馈系统的应用特点有:①节能环保,可减少制动电阻容量,但交流网无法吸收的电能还需制动电阻来消耗;②技术应用成熟,但城市轨道交通列车的制动能量很大,而逆变电力电子器件容量有限,该系统在可靠性上仍存在一定问题;③城市轨道交通列车的制动能量具有脉冲性和不固定性等特点,现有的电力电子器件逆变方式依然伴随这波形畸变和谐波污染,该问题尚待解决;④逆变回馈至交流供电网还需与供电公司就反向回馈电能计费问题进行协商。

1.3 再生储能型

再生储能型是指采用储能设备将直流牵引供电网无法吸收的再生制动能量存储下来,在牵引供电网电压较低时再释放电能。再生储能型具有稳定供电电压的作用,能较大限度地利用再生能量。再生储能型系统的典型拓扑图如图 2 所示。

目前根据存储设备的原理不同,再生储能型主要分为飞轮储能、超级电容储能、电池储能等类型。

1) 飞轮储能。飞轮储能是将转子(飞轮)加速至极高速度的方式,使能量以旋转动能的形式储存于飞轮储能系统中。飞轮储能最大的优点是,飞轮可以在极短时间内释放出存在其中的能量,因此具有极高的功率密度,其储能效率在 95% 左右。然

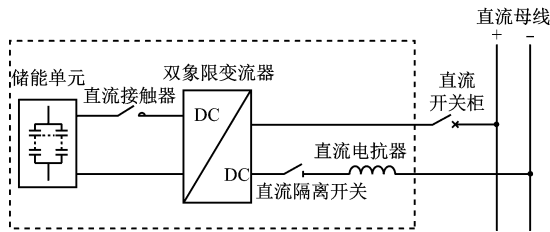


图 2 再生储能型系统的典型拓扑图^[2]

Fig. 2 Typical topological diagram of regenerative energy storage system^[2]

而,由于受材料和技术的限制,飞轮储能设备每小时的自放电率为其储能总量的 20%,导致飞轮储能的效率降低。目前,在国内外的城市轨道交通行业中,采用该技术的应用案例较多,如北京地铁房山线广阳城站、美国洛杉矶地铁红线等。

2) 超级电容储能。超级电容是靠极化电解液来储存电能的一种新型储能装置。由于采用了特殊的工艺,超级电容的等效电阻低、容量大、内阻小,储能效率通常在 85% ~ 98% 之间,且因其具有快充快放的特点,已经被成功应用到城市轨道交通车辆上,尤其是在有轨电车上的应用较广。有轨电车在站点用超级电容短暂充电后,可运行 2 km 左右的距离。

3) 电池蓄能。电池蓄能是一种低成本的通用储能技术,有成熟的技术方案。与其他蓄电池相比,锂电池储能具有能量密度大、自放电小、无记忆效应、工作温度范围广,以及可快速充/放电、使用寿命长、环境污染小和不受地形等自然条件限制等

优点。随着电动汽车的不断普及,锂电池储能设备技术得到了快速发展,锂电池的价格成本大幅下降,在储能领域应用更具经济性。

不同储能技术的成熟度与成本差异较大,其应用对比如表 1 所示。

表 1 不同储能技术的应用对比

Tab.1 Application comparison of different energy storage technologies

储能技术	装载容量/MW	响应时间/ms	循环寿命/次	循环效率/%	优点	缺点
逆变回馈	1.0 ~ 5.0	100	设备使用期内无限次	80	技术成熟、环保	有谐波、供电网容量限制
飞轮储能	0.5 ~ 1.5	10	≥2 000	85 ~ 90	功率密度较大	成本高,噪声大,自放电率高
超级电容储能	0.1 ~ 1.0	1	≥5 000	95	响应快、功率比高	成本高、储能量低
锂电池储能	0.1 ~ 500.0	1	1 000 ~ 10 000	90	自放电率低、能量密度大、制造商众多、动力电池梯次利用	安全问题待改进

由表 1 可知,锂电池储能的装载容量大、响应时间短、寿命时间长、循环效率高,同时还具有自放电率低(每月的自放电率低于 5%,未来可能达 1%)、能量密度大(以日本松下 21 700 圆柱形单体为例,能量密度可达 340 Wh/kg)、产品制造商众多(符合《锂离子电池行业规范条件》的企业名单已有 40 余家)等优点。但是,锂电池存在过充、过放、热失控等问题,导致安全性差,可通过优化电池组、冷却系统的设计、对组装工艺进行改进,也可采用先进的电池管理系统来保证设备的安全性。此外,锂电池储能技术可采用电动汽车退役下来的动力电池,使之得以梯次利用。根据北极星能源网报道,2020 年新能源汽车退役动力电池预计约 25 GWh(约 20 万 t),锂电池储能不但可以使退役动力电池物尽其用、变废为宝,还推动了社会价值、环保价值、经济效益的联动,而且将极大削减锂电池储能的前期投入费用。目前,国内已有多家公司在此方面有所应用,因此,锂电池储能技术可作为城市轨道交通再生储能技术的首选。

2 城市轨道交通再生储能与智能微电网的融合应用

2.1 智能微电网

智能微电网是指由分布式电源、储能装置、能量转换装置、相关负荷和监控、保护装置等组成的小型发电系统。微电网配备了能量管理系统,通过互联网技术进行数据采集,并连接到能量管理系统中,可解决电压控制、潮流控制、保护控制等一系

列问题。此外,智能微电网将原本分散的分布式电源进行相互协调,确保配电网的可靠性和安全性,为可再生能源系统的接入提供便利,从而实现用户需求侧管理和现有能源、资源的最大化利用。

在智能微电网中有各种类型的负荷,需要根据负荷的具体类型采取不同的能源供应策略,并应满足用户对电能质量和供电安全等方面的要求。智能微电网是一个能够实现自我控制、保护和管理的自治系统,可实现能源的就地转换和消纳,减少由于长距离输电引起的损耗。智能微电网能够很好地协调大电网与分布式电源间的技术矛盾,并具备一定的能量管理功能。智能微电网以分布式电源与用户就地应用为主要控制目标,既可以与外部电网并网运行,也可以“孤岛”运行。

2.2 城市轨道交通再生储能与智能微电网的融合

在正常运营时段,城市轨道交通列车不断地再生制动,并将能量存储到储能设备中。由于存储空间固定,在供电设备不出现电压波动时,再生储能设备的能量不会被利用。当能量达到存储上限时,解决多余的再生制动能力的方案有两个:一是增大储能设备容量;二是配备地面制动电阻,将多余的再生制动能量通过制动电阻热能消耗掉。这两种方案都会引起资源的浪费,因此,如何将再生储能设备中的再生能源进行再次利用至关重要。

可将城市轨道交通再生储能设备作为一个分布式电源,将其接入智能微电网,由智能微电网进行调度运行控制,使之作为用户端储能设备,对外进行供电。同时,城市轨道交通沿线的建筑可进行

光伏集成改造,如设置光电瓦屋顶、光电幕墙和光电采光顶等,使之成为光伏一体化建筑,以微型光伏电站的形式接入微电网中;车辆段可根据具体的场地、地形情况,建设小型风力发电站和电动汽车直流快充站等,并接入智能微电网中。上述多个分布式电源与能耗系统通过智能微电网直流线路互联后,可在各自独立运行的基础上,加强各系统的电气连接,从而实现能量的交换。智能微电网的聚合运行及通过能量管理系统制定合理的控制策略,可实现对再生能源的消纳,确保微电网的安全性、稳定性和可靠性,达到高效协同、经济运行的目的。

如图 3 所示,城市轨道交通再生储能与智能微电网融合后,可满足再生制动能源存储与利用的要求:

1) 锂电池储能设备通过双向 DC-DC 变换器将在线运营车辆的再生制动能量存储下来。当直流牵引供电网出现电压波动时,可用于进行稳压控制;在牵引供电设备故障时,还可通过双向变流器

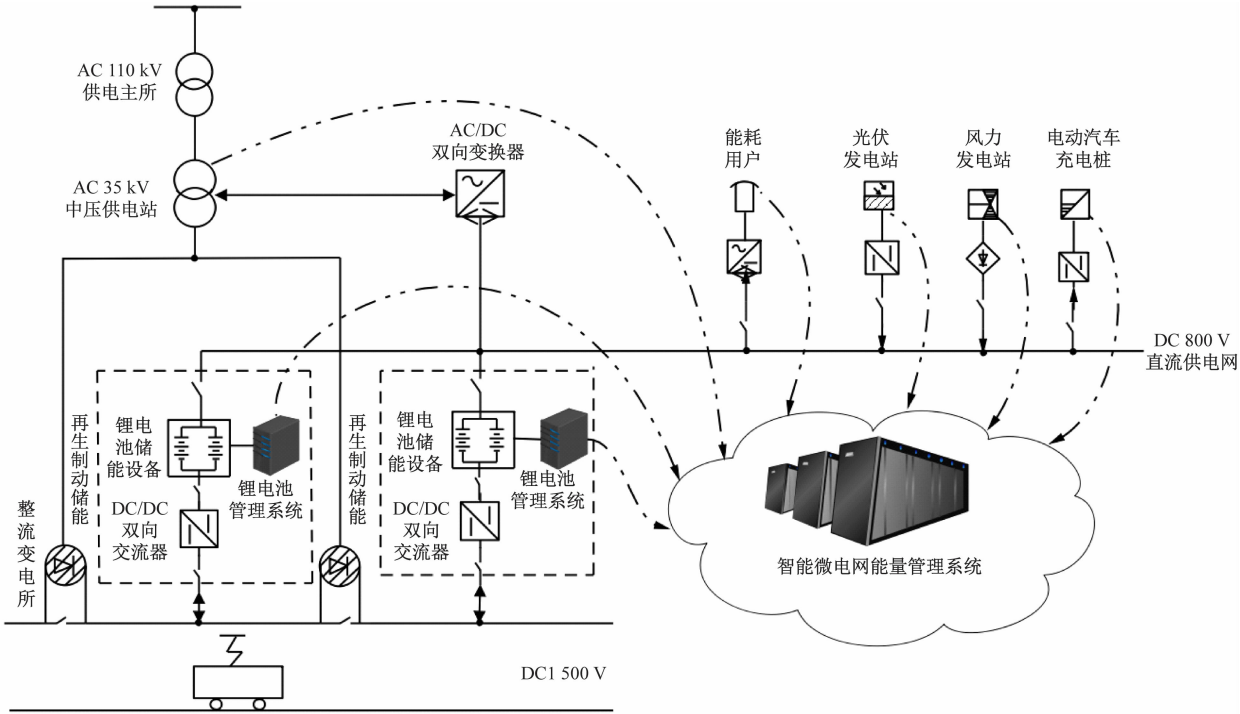
接管供电运营。

2) 当中压变电站甚至供电主所发生故障时,智能微电网进行电能调度,锂电池储能设备通过 DC-AC 逆变设备进行辅助供电,用以完成短时的供电接管,避免供电故障范围的进一步扩大。

3) 锂电池储能设备将建筑光伏发电、风力发电及其他分布式发电设备的电能通过智能微电网存储下来,完成再生能源的吸收。

4) 锂电池储能设备通过智能微电网进行电能调度,可将电能与电动汽车直流充电桩相连,赚取电动汽车充电费用;也可经逆变设备供电给局域耗电用户,赚取供电费用。

5) 将智能微电网接入城市供电网,在城市轨道交通线路结束当日运营后,锂电池储能设备可参与削峰填谷(即在夜间电力低谷时从电网充电、在日间电力高峰时对用户放电),获取峰谷供电差价的收益。此外,还可维持城市供电网的供电平衡,减少供电压力,增加供电网的容量裕度。



注:DC——直流电;AC——交流电。

图 3 城市轨道交通再生储能与智能微电网的网络拓扑

Fig. 3 Network topology of renewable energy storage and smart microgrid in urban rail transit

3 结语

本文提出将城市轨道交通的再生储能设备接入智能微电网,建议可在城市轨道交通范围内推广运用。城市轨道交通的再生储能与智能微电网的

融合及协调运行,一来可有效吸收、利用城市轨道交通列车的再生制动能量,二来可促进城市轨道交通内各分布式电源完善其功能,建立局域能源的合理利用模式,以达到节能减排的目的,并创造出一定的经济价值。

参考文献

- [1] 徐长勤, 宋德银, 董传海. 城市轨道交通再生制动能量储存利用[J]. 现代城市轨道交通, 2005(6):18.
XU Changqin, SONG Deyin, DONG Chuanhai. Regenerative braking energy storage and utilization in urban rail transit[J]. Modern Urban Rail Transit, 2005(6):18.
- [2] 国家市场监督管理总局, 中国国家标准化管理委员会. 城市轨道交通列车再生制动能量地面利用系统: GB/T 36287—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018:9
State Administration for Market Regulation, Standardization Administration of the People's Republic of China. Urban rail transit—Ground system for vehicle braking regenerative energy utilization: GB/T 36287—2018 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2018:9.
- [3] 曾先光, 徐志荣, 奚华峰. DC 1 500 V 供电的城市轨道交通车辆超级电容储能技术分析[J]. 城市轨道交通研究, 2013(10):87.
ZENG Xianguang, XU Zhirong, XI Huafeng. Analysis of super-

capacitor energy storage technology used in DC 1 500 V urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2013(10):87.

- [4] 成吉安. 城市轨道交通双向变流器牵引供电技术的应用[J]. 城市轨道交通研究, 2019(12):110.
CHENG Ji'an. Application of traction power supply technology with bidirectional converter for urban rail transit[J]. Urban Mass Transit, 2019(12):110.
- [5] 姜海洋, 谭忠富, 胡庆辉, 等. 用户侧虚拟电厂对发电产业节能减排影响分析[J]. 中国电力, 2010(6):37.
JIANG Haiyang, TAN Zhongfu, HU Qinghui et al. Action analysis of nominal power plants on energy saving and emission controlling of power industry[J]. Electric Power, 2010(6):37.
- [6] 李欣然, 黄际元, 陈远扬, 等. 大规模储能电源参与电网调频研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2016(7):145.
LI Xinran, HUANG Jiyuan, CHEN Yuanyang, et al. Review on large-scale involvement of energy storage in power grid fast frequency regulation[J]. Power System Protection and Control, 2016(7):145.

(收稿日期:2020-02-28)

(上接第 198 页)

4 结语

综合考虑中小型规模城市轨道交通线网的业务需求、建设成本、运营成本及云平台技术等因素的基础上,提出了基于云计算技术的三层架构 AFC 系统设计方案,构建了“云”+“端”的扁平化 AFC 系统。该架构在大幅提升系统资源利用效率的同时,很好地平衡了交易速度和交易安全。本文介绍的三层构架 AFC 系统设计方案可为国内中小规模城市轨道交通线网的 AFC 系统建设提供参考。

参考文献

- [1] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2020 年度统计和分析报告[R/OL]. (2021-04-09) [2021-10-14] <https://www.camet.org.cn/tjxx/7647>.
China Association of Metros. 2020 annual statistics and analytical report of urban rail transit[R/OL]. (2021-04-09) [2021-10-14]

<https://www.camet.org.cn/tjxx/7647>.

- [2] 中国城市轨道交通协会. 智慧城市轨道交通信息技术架构及网络安全规范:T/CAMET 11001.1—2019[S]. 北京: 中国铁道出版社有限公司, 2019.
China Association of Metros. Smart urban rail transit-specification for information technical architecture and cybersecurity:T/CAMET 11001.1—2019 [S]. Beijing: China Railway Publishing House Co., Ltd., 2019.
- [3] 邱华瑞, 张宁, 徐文, 等. 城轨交通自动售检票系统架构体系研究[J]. 都市快轨交通, 2014(2):4.
QIU Huarui, ZHANG Ning, XU Wen, et al. Research of architecture on rail transit's AFC system[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2014(2):4.
- [4] 周晓. 上海轨道交通清分系统架构中应用云计算技术的探讨[J]. 地下工程与隧道, 2012(2):53.
ZHOU Xiao. Application of cloud computing technology in Shanghai Rail Transit fare clearing system framework[J]. Underground Engineering and Tunnels, 2012(2):53.

(收稿日期:2021-10-05)

敬请关注《城市轨道交通研究》微信视频号

《城市轨道交通研究》微信视频号聚焦轨道交通行业内的热点问题、焦点问题, 以及新技术、新成果, 邀请相关专业领域内的专家学者及高级管理人员以视频方式解读和评述, 是您及时获知行业资讯、深度了解轨道交通各专业领域的最佳平台。您还可以通过该平台查阅往期论文、查询稿件进度、开具论文录用通知书。敬请关注。

