



重载电气化铁路再生制动能量利用装置研制

康德建¹, 谢宝珍¹, 冯文杰¹, 胡亮¹, 赵桐湜¹, 林贞礼², 罗锐³

(1. 国能新朔铁路有限责任公司 供电分公司, 内蒙古 鄂尔多斯 017000;

2. 成都运达科技股份有限公司, 四川 成都 610093;

3. 成都思特电气科技有限公司, 四川 成都 610097)

摘要: 为解决重载电气化铁路牵引供电系统负序、无功和谐波等电能质量问题, 同时充分利用再生制动能量, 文章研制了RPC容量 2×5 MVA、储能容量5 MW/350 kWh的再生制动能量利用装置。该装置采用多单元直接并联的主电路结构, 简化了变压器绕组, 降低了变压器成本, 提高了装置的可用性。针对RPC控制, 文章提出了“虚拟三相”的控制算法, 在 dq 轴上实现负序和无功控制, 电能质量控制目标更明确, 控制性能更佳。最后, 在互馈试验平台上验证了系统的主要功能, 获得良好的关键指标。

关键词: 重载铁路; 牵引供电; 电能质量; 再生制动能量; 虚拟三相

中图分类号: U223

文献标志码: A

文章编号: 1000-128X(2025)02-0151-07

0 引言

电气化铁路负荷为大功率单相负荷, 为降低负序对电力系统的不良影响, 电气化区段各牵引变电所供电臂轮换接入三相电力系统的不同相别^[1]。实际上相邻不同相别的牵引网间的负荷很难平衡, 最恶劣的情况是一段牵引网列车牵引, 另一段牵引网列车制动, 再生制动能量得不到充分利用^[2], 负荷不均衡也使得变压器的容量利用率降低。

早在上世纪90年代, 为了抑制闪变、提高电网电压, 日本东北新干线采用RPC装置(railway static power conditioner)补偿负序和无功^[3-7]。2010年, 由西南交通大学牵头, 在成都铁路局眉山牵引变电所利用RPC补偿负序, 实现了同相供电^[8], 2015年, 株洲变流技术国家工程研究中心开发出RPC实现功率融通, 在某牵引变电所挂网成功^[9]。

电网对电气化铁路牵引供电系统的再生制动能量采用无偿“反送”或者“反送正计”的原则收费, 不利于

再生制动能量价值充分利用。在牵引供电系统配置储能装置吸收制动能量, 不仅可以节约电费, 还可以利用储存的能量, 降低牵引变压器的峰值功率和过载倍数。储能介质通过DC/DC变换器与RPC装置的直流侧母线连接, 实现负序、无功、谐波补偿与再生制动储能吸收的融合^[4-6]。这种组合可以很好地解决由牵引供电系统电能的负序、无功等引起的电能质量不达标、再生能量利用不充分、牵引变压器利用率不高等一系列问题。

国能集团新朔铁路有限责任公司以重载电气化铁路运营为主, 其辖区内302 km长的大准铁路线建于上世纪90年代, 随着运量的逐年增长, 部分线路牵引供电系统负荷已达到或超过了原设计指标, 供电能力提升困难。为挖掘牵引供电系统潜力, 国能集团联合成都运达科技股份有限公司开发了运用V/V牵引变压器接入重载电气化铁路再生制动能量利用装置, 由RPC和储能系统构成, 其中, RPC装置容量为 2×5 MVA, 储能系统容量为5 MW/350 kWh, 储能介质选用了放电倍率大、安全性高、寿命长的钛酸锂电池。

本文将分3个部分对其进行详细介绍: ①主电路拓

通信作者: 胡亮, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事牵引供电技术管理工作; E-mail: 75715474@qq.com

引用格式: 康德建, 谢宝珍, 冯文杰, 等. 重载电气化铁路再生制动能量利用装置研制[J]. 机车电传动, 2025(2): 151-157. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.017.

Citation: KANG Dejian, XIE Baozhen, FENG Wenjie, et al. Development of a regenerative braking energy utilization device for heavy-haul electrified railways[J]. Electric drive for locomotives, 2025(2): 151-157. DOI:10.13890/j.issn.1000-128X.2025.02.017.

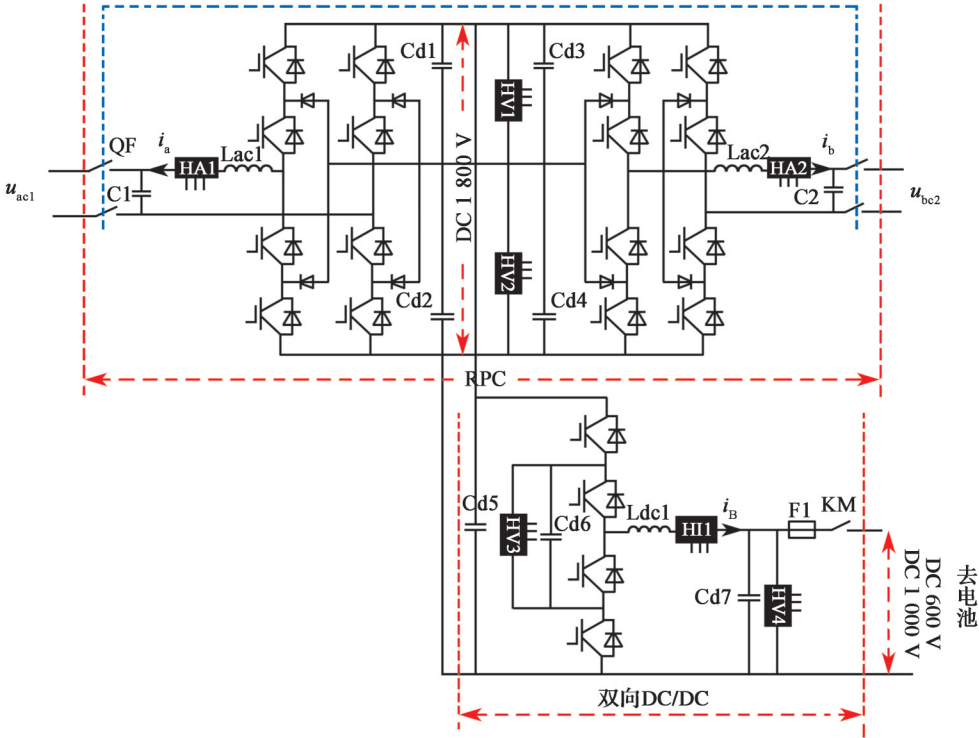


图2 一体化变流器结构
Fig. 2 Structure diagram of integrated converter

其基本思想如下： $\alpha(\beta)$ 相牵引臂负载电流 $i_a(i_\beta)$ 与其电压 $u_a(u_\beta)$ 锁相得到的同步正弦信号相乘，再经低通滤波器滤波得到该相基波有功电流分量幅度的1/2；同样， $\alpha(\beta)$ 相牵引臂负载电流 $i_a(i_\beta)$ 与其电压 $u_a(u_\beta)$ 锁相得到的电压同步余弦信号相乘，再经低通滤波得到该相基波无功电流分量幅度的1/2。有功电流幅度与同步正弦信号相乘得到实时基波有功电流，无功电流幅度与同步余弦信号相乘得到实时基波无功电流。负载电流与实时基波有功和基波无功电流之差即为负载谐波电流分量。由此可以得到RPC的有功补偿、无功补偿和谐波补偿的电流指令，并由PI调节器控制主电路产生与补偿指令相同的补偿电流。

上述基于单相的检测和控制方法，从牵引臂补偿来看，物理概念比较清晰，功能实现也不复杂，但110 kV或220 kV高压供电网侧更关注负序电流、无功电流和谐波电流对三相电网的影响，单相补偿控制对三相电网的质量影响不大。此外，单相控制的有功和无功补偿电流指令为交流信号，采用PI调节器难以实现零静差。为解决上述问题，本文提出基于“虚拟三相”的RPC控制方法。

α 相和 β 相电压相量图如图3所示，把 α 相和 β 相连接构成一个三角形， u_a 、 $u_{a\beta}$ 、 u_β 可认为是三相线电压。匹配变压器与牵引变压器均为V/V结构，图1中RPC交流侧电压 u_{ac1} 、 u_{bc2} 、 u_{ab} 与图3有相同的相量关系，即同为三相线电压，把 i_a 、 i_b 、 $-(i_a+i_b)$ 作为三相相电流，这样就构成了一个虚拟的三相系统，RPC补偿电流控制就可采用类似于三相逆变器的控制方法实现。

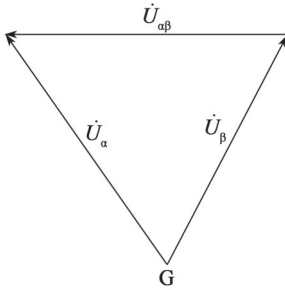


图3 α 相电压和 β 相电压相量图
Fig. 3 Phasor diagram of α -phase voltage and β -phase voltage

2.1.1 补偿电流指令提取

RPC进行补偿时，根据牵引负荷的电压和电流信号提取要补偿的电流指令。首先利用旋转坐标变换将静止坐标系下的三相电流转换到旋转 dq 坐标下，静止坐标系的基波电流变换为直流量，再经过低通滤波得到要补偿的谐波电流、正序无功电流及负序电流。

旋转变换的角度生成原理如图4所示。虚拟三相电压 u_a 、 $u_{a\beta}$ 、 u_β 经过正负序分离得到其正序分量 u_{a+} 、 $u_{a\beta+}$ 、 $u_{\beta+}$ ，再通过三相锁相环可得到正序电压的同步旋转角度 ωt 。

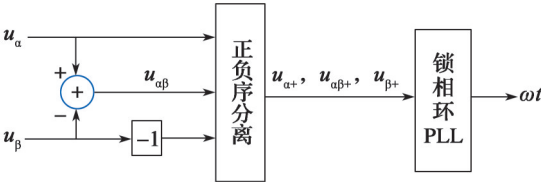


图4 同步角度的生成
Fig. 4 Principle of synchronization angle generation

由于相电压滞后线电压 $\pi/6$ ，因此正序相电压同步旋转角度为 $\omega t - \pi/6$ ，负序相电压的同步角度为 $-\omega t - \pi/6$ 。根据正负序相电压的同步旋转角度，按图 5 可提取要补偿的电流指令。

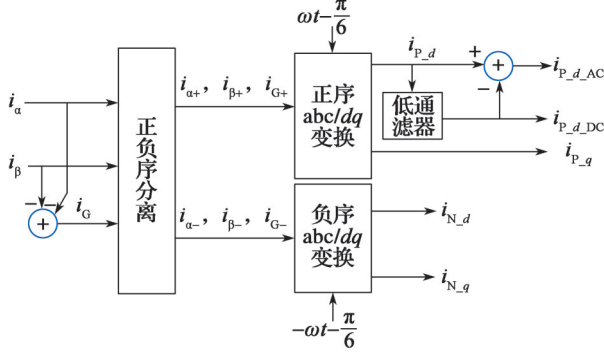


图 5 补偿指令提取

Fig. 5 Extraction of compensation commands

图 5 中的 α 相电流 i_a 、 β 相电流 i_b 和合成的第 3 相电流 i_G ，分别经正负序分离后得到正序分量 i_{a+} 、 i_{b+} 、 i_{G+} 和负序分量 i_{a-} 、 i_{b-} 、 i_{G-} 。正序分量 i_{a+} 、 i_{b+} 、 i_{G+} 经过正序旋转坐标变换得到正序 d 轴分量 i_{p_d} 和正序 q 轴分量 i_{p_q} ，正序 d 轴分量 i_{p_d} 再经过低通滤波器得到正序 d 轴直流分量 $i_{p_d,DC}$ ，正序 d 轴分量 i_{p_d} 与正序 d 轴直流分量 $i_{p_d,DC}$ 相减得到正序 d 轴的交流分量 $i_{p_d,AC}$ 。类似正序旋转变换，负序分量 i_{a-} 、 i_{b-} 、 i_{G-} 经过负序旋转坐标变换得到负序 d 轴分量 i_{N_d} 和负序 q 轴分量 i_{N_q} 。上述变换中， $i_{p_d,DC}$ 表示的是负载中正序基波的有功分量，是负载电流中唯一需要保留的分量，其他分量 $i_{p_d,AC}$ 、 i_{p_q} 、 i_{N_d} 和 i_{N_q} 均会对电网造成不良影响，可以将它们作为 RPC 的补偿电流指令进行补偿。

该电流补偿指令信号提取过程与单相控制方法相比有如下优势：①锁相环采用三相正序电压作为输入，相较于单相电压锁相环，不需要截止频率低的低通滤波器，响应更快；②补偿电流指令中基波电流为直流，只有负载谐波成分表现为交流量，因此采用 PI 调节器可以实现无静差控制，便于控制器的优化设计。

2.1.2 补偿电流控制

RPC 补偿电流控制框图如图 6 所示，采用直流电压外环和输出电流内环控制，电流内环又分成正序电流控制与负序电流控制两部分。

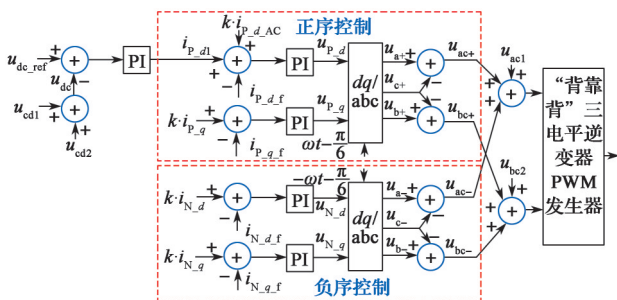


图 6 补偿电流控制

Fig. 6 Control strategy for compensating current

电压环反馈信号为 PRC 直流侧电压，即图 2 中直流支撑电容电压 u_{cd1} 、 u_{cd2} 之和。电压环控制将直流电压稳定在 DC 1 800 V，输出 $i_{p_d,ref}$ 作为正序 d 轴电流指令的一部分，控制流入直流侧的功率，保持直流电压稳定。

电流环控制过程如下：正序控制中的 d 轴电流给定由补偿电流指令 $i_{p_d,AC}$ 乘以系数 k 得到，系数 $k = 27.5 \text{ kV}/1 \text{ kV}$ ，表示匹配变压器的变比； q 轴电流给定由补偿电流指令 i_{p_q} 乘以系数 k 得到。正序 d 轴和 q 轴电流经 PI 调节器分别输出 d 轴和 q 轴控制电压 u_{p_d} 、 u_{p_q} ，再通过旋转逆变换得到正序控制电压 u_{a+} 、 u_{b+} 、 u_{c+} 。负序控制与正序控制类似，可得到负序控制电压 u_{a-} 、 u_{b-} 、 u_{c-} 。电流环控制中的电流反馈信号 $i_{p_d,f}$ 、 $i_{p_q,f}$ 、 $i_{N_d,f}$ 、 $i_{N_q,f}$ 则由 RPC 的交流输出电流 i_a 、 i_b 经过类似图 5 的原理变换提取。

“虚拟三相”与实际三相逆变器控制的差别在于调制电压的生成。常用三相逆变器正序控制输出的电压是相电压，对三相逆变器而言，与电网前馈相电压相加生成逆变器的调制相电压后，通过三角波比较生成 PWM 驱动信号。两个“背靠背”单相逆变器没有三相对应的相电压，只有两个对应的线电压，因此，由正、负序控制输出的相电压相减得到正序控制线电压 u_{ac+} 、 u_{bc+} 和负序控制线电压 u_{ac-} 、 u_{bc-} ，最后与电网前馈电压相加得到两个单相逆变器的调制电压。

当补偿量超过 RPC 容量时，如何优化补偿量组合很有必要，采用“虚拟三相”控制方法，可以方便根据控制目标，优化各补偿量的比重。因篇幅限制，在此不作深入讨论。

2.2 双向 DC/DC 电流控制

储能系统有充电和放电两种功能：①牵引网有列车制动能量回馈时，储能系统充电，吸收再生制动能量并将能量存储到介质中；②列车牵引且牵引功率超过功率 P_1 一定值时，将储存的能量释放出来用于牵引，降低牵引变压器的峰值功率。

DC/DC 变换器的高压侧与 RPC 直流母线相连，高压侧电压稳定在 DC 1 800 V。DC/DC 作为电流源控制充电和放电即可控制储能电池从牵引网吸收能量或向牵引网释放能量。

图 7 为 DC/DC 充/放电功能的简化控制框图。 α 相电压、电流与 β 相电压、电流分别相乘再相加后，经低

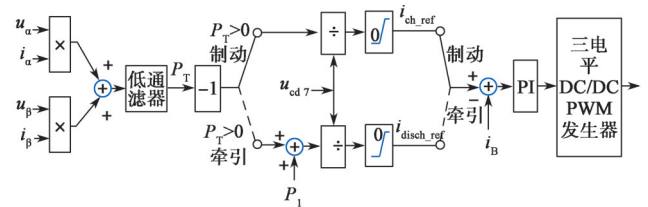


图 7 DC/DC 充/放电功能控制框图

Fig. 7 Control block diagram of DC/DC charge/discharge functions

通滤波器得到两牵引臂的总牵引功率 P_T 。当 $P_T > 0$ 时, 列车为牵引工况; 当 $P_T < 0$ 时, 列车为制动工况; $P_T = 0$ 时, 无列车运行或列车为惰行工况。列车制动时, $-P_T/u_{cd7}$ (u_{cd7} 为电池电压) 值大于0, 以该值作为DC/DC的充电电流指令 i_{ch_ref} , 储能电池从牵引网吸收能量, 电流指令限幅从0到最大充电电流; 列车牵引时, $(P_1 - P_T)/u_{cd7}$ (P_1 为牵引指定功率) 值小于0, 以该值作为DC/DC的放电电流指令 i_{disch_ref} , 储能电池向牵引网释放能量, 电流指令限幅从最大放电电流到0。电流给定指令值与电池电流 i_B 相减后的差通过电流PI调节器对充电和放电进行控制。

3 试验测试和结果总结

3.1 试验平台

RPC装置和双向DC/DC变换器集成的一体化变流柜实物如图8所示。



图8 一体化变流器柜

Fig. 8 Integrated converter cabinet

除匹配变压器和水冷系统冷却塔外, 再生制动能量利用装置安装在如图9所示的3个集装箱内。其中, 1#~5#钛酸锂电池及其冷却系统安装在1个8 000 mm × 2 438 mm × 2 627 mm的集装箱内, 1#~5#一体化变流器柜、主控制柜、变流器冷却机组安装在2个9 000 mm × 2 438 mm × 2 627 mm的集装箱内。



图9 装有一体化变流器和电池的集装箱

Fig. 9 Container with an integrated converter and battery

为了对系统主要功能进行验证, 搭建互馈试验平台, 原理如图10所示。试验平台由10 kV供电, 配有两台10 kV/1 000 V的匹配变压器, 变压器低压侧分别接了两台再生制动能量利用装置单元, 一台作为无功和负序发生源, 另一台作为补偿装置对发生源产生的无功和负序电流进行补偿。对储能系统进行试验时, 再生制动能量利用装置单元内的RPC为一个直流恒压源, DC/DC对储能电池进行充电和放电。

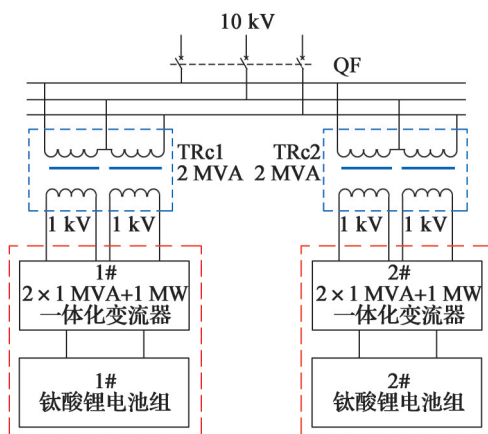


图10 互馈试验平台结构

Fig. 10 Structure diagram of the reciprocal power-fed test platform

3.2 补偿性能测试

一体化变流器的RPC可实现负序、无功和谐波补偿功能。因谐波发生测试较困难, 本文仅对负序和无功补偿功能进行验证。

RPC交流侧额定电压为AC 1 000 V, 额定电流为1 000 A。图11和图12分别为1 000 A电流下负序补偿和500 A电流下无功补偿时的电网电压和补偿电流波形。

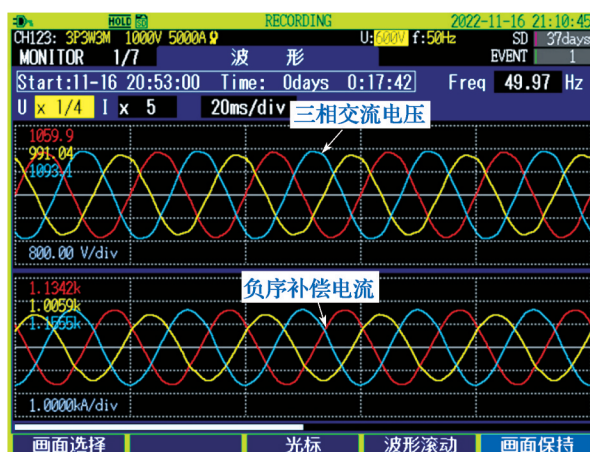


图11 1 000 A负序补偿时电压和电流波形

Fig. 11 Voltage and current waveforms during 1 000 A negative sequence compensation

由于PRC补偿输出的是负序电流, 图11中的电流相序(黄、蓝、红)与电压相序(黄、红、蓝)相反。

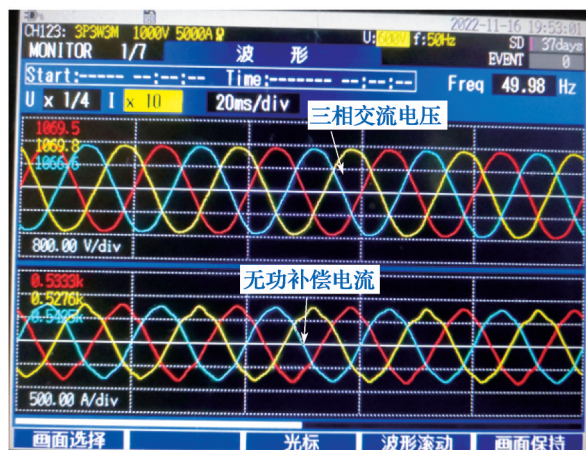


图 12 500 A 无功补偿时电压和电流波形

Fig. 12 Voltage and current waveforms during 500 A reactive power compensation

图 12 中 PRC 补偿输出的是正序无功电流, 因此补偿电流相序与电压相序相同, 但相位超前电压 $\pi/2$ 。

3.3 DC/DC 充放电测试

储能电池的电压范围为 DC 600~1 000 V, 最大充放电电流为 800 A。图 13 为双向 DC/DC 变换器给电池充放电试验时的电压和电流波形。先以 400 A 电流为充电电流向电池充电, 随后减到 0 A; 再以 800 A 电流充电, 电流再降到 0 A; 最后以 800 A 为放电电流, 随后电流降到 0 A。可以看到, 充电时电池电压增高, 放电时电池电压降低。

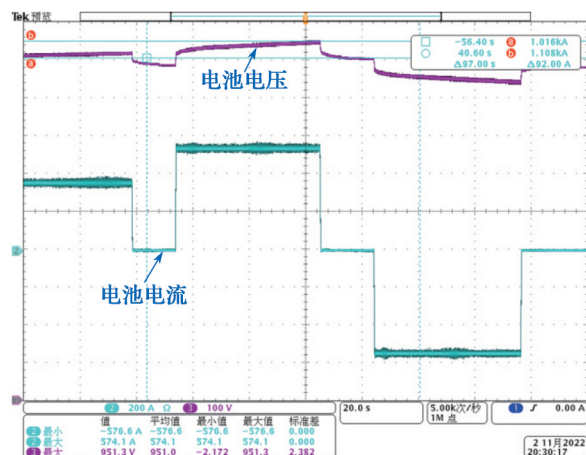


图 13 双向 DC/DC 充放电时电池电压和电流波形

Fig. 13 Battery voltage and current waveforms during bidirectional DC/DC charge/discharge

此外, 还对 RPC 进行无功和负序额定补偿时的电流 THD 值、效率和装置噪声进行了测试, 测得电流 THD 值为 2.33%, 效率大于 98.5%, 装置噪声为 71.2 dB。

4 结论

本文针对重载电气化铁路再生制动能量利用装置的主电路拓扑结构和控制方法进行了介绍, 提出了有别于现有装置的结构和控制方法, 并对装置主要功能

进行了测试, 得到以下结论:

①一体化变流器内 PRC 电路参数设计和基于虚拟三相的控制方法可实现负序和无功补偿功能。

②一体化变流器内 DC/DC 电路参数设计和电流控制法能有效对电池实现充放电控制。

③电流 THD 值、效率和噪声等关键指标达到较高水平。

再生制动能量利用及储能装置已完成第三方型式试验, 于 2023 年 12 月在国能集团大准线凉城变电所挂网运行, 全面的功能测试和应用效果将在工程现场进行, 调试过程和现场运行情况将在随后的续文中予以介绍。

参考文献:

- [1] 李群湛, 贺建闽. 牵引供电系统分析[M]. 成都: 西南交通大学出版社, 2007.
LI Qunzhan, HE Jianmin. Analysis of traction power supply system[M]. Chengdu: Southwest Jiaotong University Press, 2007.
- [2] 李群湛, 王辉, 解绍锋. 电气化铁路双边供电技术应用研究[J]. 电气化铁道, 2021, 32(6): 1-4.
LI Qunzhan, WANG Hui, XIE Shaofeng. Discussion on application of bilateral power supply technology on electrified railway[J]. Electric railway, 2021, 32(6): 1-4.
- [3] UZUKA T, IKEDO S, UEDA K. A static voltage fluctuation compensator for AC electric railway[C]//IEEE. IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. Aachen: IEEE, 2004: 1869-1873.
- [4] UZUKA T, IKEDO S, UEDA K, et al. Voltage fluctuation compensator for Shinkansen[J]. IEEE transactions on power and energy, 2005, 125(9): 885-892.
- [5] TAMAI S. Novel power electronics application in traction power supply system in Japan[C]//IEEE. 16th International Power Electronics and Motion Control Conference and Exposition. Antalya: IEEE, 2014: 701-706.
- [6] HORITA Y, MORISHIMA N, KAI M, et al. Single phase STATCOM for feeding system of Tokaido Shinkansen[C]//IEEE. The 2010 International Power Electronics Conference. Sapporo: IEEE, 2010, 2165-2170.
- [7] 张建兴, 陈天锦, 曹智慧, 等. 世界首套电气化铁路同相供电装置应用研究[C]//第二届全国电能质量学术会议暨电能质量行业发展论坛论文集. 长沙: 中国电源学会电能质量专业委员会, 2011: 76-81.
ZHANG Jianxing, CHEN Tianjin, CAO Zhihui, et al. Research on the application of the world's first electrified railway in-phase power supply device[C]//Proceedings of the second national academic conference on power quality and the power quality industry development forum. Changsha: Power Quality Professional Committee of the China Power Supply Society, 2011: 76-81.
- [8] 龚芬, 周方圆, 邱文俊, 等. 功率融通型电能质量综合治理

- 装置的开发与应用[J]. 大功率变流技术, 2015(4): 61-64.
- GONG Fen, ZHOU Fangyuan, QIU Wenjun, et al. Development and application of power quality comprehensive control equipment with active power transfer[J]. High power converter technology, 2015(4): 61-64.
- [9] 王卫安, 桂卫华. 两相牵引供电系统电能质量有源综合治理技术研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(9): 31-38.
- WANG Weian, GUI Weihua. Comprehensive active power quality compensation technology for two phase traction power supply system[J]. Journal of the China railway society, 2013, 35(9): 31-38.
- [10] 宋平岗, 林家通, 李云丰, 等. 基于模块化多电平换流器的牵引供电负序治理[J]. 电源学报, 2015, 13(6): 18-27.
- SONG Pinggang, LIN Jiatong, LI Yunfeng, et al. Negative sequence governance for traction power supply based on modular multilevel converter[J]. Journal of power supply, 2015, 13(6): 18-27.
- [11] 邓文丽, 戴朝华, 韩春白雪, 等. 计及再生制动能量回收和电能质量改善的铁路背靠背混合储能系统及其控制方法[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(10): 2914-2923.
- DENG Wenli, DAI Zhaochua, HAN Chun baixue, et al. Back-to-back hybrid energy storage system of electric railway and its control method considering regenerative braking energy recovery and power quality improvement[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(10): 2914-2923.
- [12] 胡海涛, 陈俊宇, 葛银波, 等. 高速铁路再生制动能量储存与利用技术研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(1): 246-256.
- HU Haitao, CHEN Junyu, GE Yinbo, et al. Research on regenerative braking energy storage and utilization technology for high-speed railways[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 246-256.
- [13] 吕顺凯, 张志文. 高速铁路再生制动能量存储利用方案研究[J]. 电气化铁道, 2023, 34(5): 1-8.
- LYU Shunkai, ZHANG Zhiwen. Study on schemes for storage and utilization of regenerative braking energy of high-speed railway[J]. Electric railway, 2023, 34(5): 1-8.
- [14] GHASSEMI A, MAGHSOUD I, FARSHAD S, et al. Power quality improvement in Y/ Δ electric traction system using a railway power conditioner[C]//IEEE. 2013 12th International Conference on Environment and Electrical Engineering. Wroclaw: IEEE, 2013: 489-494.
- [15] ZARE M, VARJANI A Y, DEHGHAN S M, et al. Power quality compensation and power flow control in AC railway traction power systems[C]//IEEE. 2019 10th International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference. Shiraz: IEEE, 2019: 426-432.

Development of a regenerative braking energy utilization device for heavy-haul electrified railways

KANG Dejian¹, XIE Baozhen¹, FENG Wenjie¹, HU Liang¹, ZHAO Tongxi¹, LIN Zhenli², LUO Rui³

(1. Power Supply Branch of CHN ENERGY Xinshuo Railway Co., Ltd., Erdos, Inner Mongolia 017000, China;

2. Chengdu Yunda Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610093, China;

3. Chengdu Site Electric Technology Co., Ltd., Chengdu, Sichuan 610097, China)

Abstract: To solve power quality deficiencies in the traction power supply system of heavy-duty electrified railways, such as negative sequences, reactive power, and harmonics, and to make full use of regenerative braking energy, a regenerative braking energy utilization device was developed in this study, with a railroad power conditioner (RPC) capacity of 2×5 MVA and an energy storage capacity of 5 MW/350 kWh. The device features a main circuit structure with multi-unit direct parallel connections, which simplifies the transformer winding configuration and reduces the cost of the transformer, leading to an improvement in device availability. For the control of RPC, a "virtual three-phase" control algorithm was proposed to implement negative sequence and reactive power control within the dq axis framework. This algorithm sets clear power quality control goals, ensuring better control performance. Finally, the main functions of the proposed system were verified against key indicators obtained using a reciprocal power-fed test platform, demonstrating high performance.

Keywords: heavy-haul railway; traction power supply; power quality; regenerative braking energy; virtual three-phase