

# 一种模块化地铁再生制动能量回馈系统及环流抑制策略

连建阳<sup>1</sup>, 刘洪德<sup>1</sup>, 张 焯<sup>2</sup>, 张全秀<sup>2</sup>, 谢晔源<sup>1</sup>

(1. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211102;

2. 石家庄轨道交通有限责任公司, 河北 石家庄 050000)

**摘要:**针对地铁再生制动能量回馈系统的需求,文中采用了一种带快速熔断器的模块化串并联能馈拓扑。该拓扑降低了设备的成本,提高了设备的可靠性。针对模块并联环流问题,定量分析了调制波和载波对环流的影响,采用每个逆变器单元独立电流内控制策略和载波同步技术来抑制并联模块的环流。试验结果表明,文中所设计的基于多模块串并联的地铁列车再生制动能量回馈装置可以实现交直流侧直接并联,且并联逆变器的电流偏差小于1%,串联逆变器的直流电压偏差小于1%。

**关键词:**中压能馈;载波移相;环流;串联均压;再生制动能量回馈

中图分类号:U231.8

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2018)02-0121-06

## 0 引言

地铁车辆各站间运行时间一般为2~5 min,处于频繁启动和制动状态,高速时采用再生制动方式,只在低速时采用机械制动。地铁再生制动产生的反馈能量一般为牵引能量的30%,甚至更多。因此近年来再生制动能量的利用越来越引起人们的重视。处理车辆再生制动产生的电能办法主要有车辆自身消耗与反送电网2种,前者将电能提供给车上辅助用电设备,剩余的电能经过损耗电阻消耗,而后者则将剩余的电能直接送回电网<sup>[1-5]</sup>。

国内大部分地铁线路的直流侧电压为1500 V,需要的能量回馈变流器功率在1000~4000 kW。文献[4,6]采用逆变器模块并联方案,选用3300 V的绝缘栅双极型晶体管(insulated gate bipolar transistor, IGBT),简单描述了控制方法,没有对并联模块环流产生的原因及环流抑制的策略进行详细分析。3300 V的IGBT开关损耗较大,导致能量回馈系统的整体效率较低。

文献[7,10-18]对逆变器输出电压和线路阻抗进行分析,认为环流主要由并联逆变器输出电压差异性造成;不均流除了受各并联逆变器输出电压影响,还取决于各并联逆变器输出阻抗的参数差异性。该文献主要是基于等效模型进行,重点分析低频环流的影响,对IGBT开关过程的高频环流的影响分析较少。

文献[8-9]针对并联带来的环流问题,建立了环流数学模型,分析了高频环流和零序环流产生原因,并提出了一种重复控制策略来抑制环流。

文中采用模块化串联技术解决1500 V的直流供电系统1700 V IGBT器件耐压不足问题,降低了设备的成本;采用模块化并联技术,解决了IGBT电流不足问题;串联模块间采用载波移相调制策略,有效减小了滤波器体积<sup>[9]</sup>。在文献[7-8]环流分析的基础上,文中重点分析了单个开关周期内并联模块IGBT开通不同步导致高频环流的原因,并采用一种简单的并联模块调制波信号同步技术,解决了模块直接并联高频环流问题。通过每个并联模块电流独立控制策略,可自适应各并联模块的阻抗不一致,保证各并联模块的输出电流基本一致,解决了并联模块低频环流的问题。最后通过实验验证了该控制策略。

## 1 模块化地铁再生制动能量回馈系统主电路及环流分析

### 1.1 地铁再生制动能量回馈原理

地铁机车供电系统如图1所示,当地铁机车进入制动工况,机车的动能转换为电能,向直流电网输入电能,引起直流电压升高。当中压能馈装置检测到直流电压高于设定值时,中压能馈装置启动,将电能反送到交流电网,实现地铁再生制动能量的回馈利用。当检测到交流电流小于设定值,中压能馈装置停止。

### 1.2 模块化地铁再生制动能量回馈拓扑

模块化地铁再生制动能量回馈系统(中压能馈装置)如图2所示,由变压器和双向变流器组成。变流器由2组三相单元(P1,P2)串联组成,每组三相单元由 $n$ 个三相单元并联组成(具体并联数由系统容量决定)。每个单元交流侧串有电感 $L_i$ 和快速

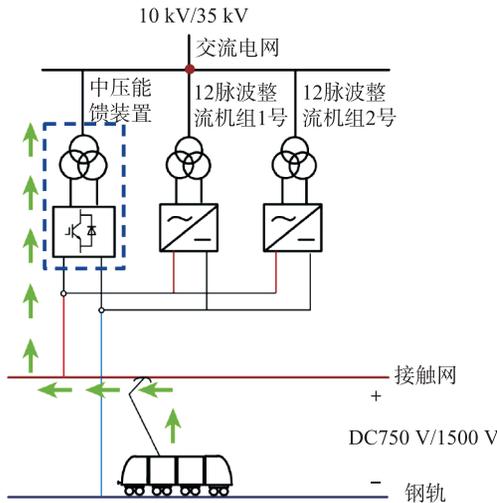


图1 地铁机车供电系统

Fig.1 Subway power supply system diagram

熔断器  $F_i$ 。  $n$  个并联单元共用一个直流母线, 交流侧共用一个滤波电容  $C$ 。

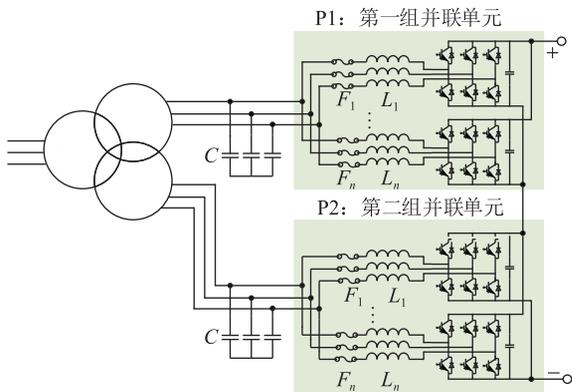


图2 中压能馈系统主电路

Fig.2 Medium pressure feed system main circuit

本拓扑采用模块化并联技术, 解决了地铁能馈大功率应用场合单个 IGBT 器件电流不足问题。当其中一个三相单元出现非 IGBT 故障时, 可以闭锁该单元, 其他单元正常运行。当三相单元出现 IGBT 故障, 无法通过闭锁 IGBT 切断故障电流时, 快速熔断器会动作, 切断故障电流。基于上述策略, 实现了模块级的冗余, 提高了系统的可靠性。

本拓扑采用模块化串联技术解决 1500 V 直流供电系统 1700 V IGBT 器件耐压不足问题, 降低了设备成本。采用先并联后串联方案, 可简化模块均压控制策略, 降低系统复杂度, 提高系统可靠性。

## 2 系统控制策略

### 2.1 并联模块低频环流分析

文献[6]将逆变器等效为电压源, 对并联模块低频环流进行了系统的分析, 多逆变器并联的数学

模型如图3所示。

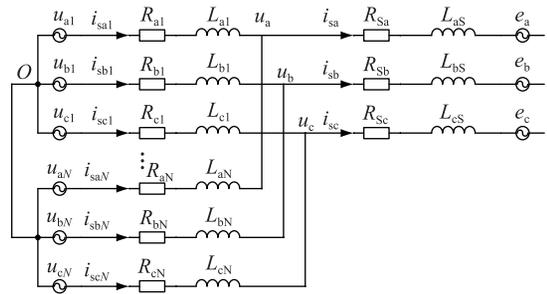


图3 多逆变器并联的数学模型

Fig.3 Mathematic model of multiple parallel inverters

逆变器输出电流和电压关系满足:

$$i_{skn} = \frac{u_{kn} - u_k}{R_{zn} + j\omega L_{zn} + R_{ln} + j\omega L_{ln}} \quad (1)$$

式中:  $i_{skn}$  为第  $n$  个并联逆变器的  $k$  相相电流;  $u_{kn}$  为第  $n$  个并联逆变器的  $k$  相输出端电压;  $u_k$  为并联逆变器输出公共端  $k$  点端电压, 其中  $k=a, b, c$ ;  $R_{ln} + j\omega L_{ln}$  为第  $n$  个逆变器输出端至公共端的输出线路的杂散阻抗参数;  $R_{zn} + j\omega L_{zn}$  为第  $n$  个逆变器串联的均流电抗器阻抗参数;  $\omega$  为逆变器输出电流的角频率。低频环流主要由并联逆变器输出电压和阻抗的差异性引起的。

文献[6]采用的均流电抗较小, 忽略了该阻抗不一致所引起的环流。文中所用的电抗较大, 主要是滤波和均流 2 个功能, 阻抗差异的不均流不能忽略。文中后续的控制策略将详细介绍该低频环流的抑制措施。

### 2.2 并联逆变器高频环流分析

并联逆变器的同相 IGBT 开通不同步是导致高频环流的主要原因<sup>[7]</sup>。

文中以 2 个逆变器为例, 详细分析高频环流的产生原因。图 4 为 2 个逆变器的等效原理图。当 S11 和 S22 同时导通, 2 个逆变器就形成了一个环流回路如图 4 红色回路所示, 其关系满足:

$$(L_{a1} + L_{a2}) \frac{di_a}{dt} = u_{dc} \quad (2)$$

式中:  $L_{a1}$  和  $L_{a2}$  分别为 2 个逆变器的滤波电感;  $i_a$  为 A 相环流;  $u_{dc}$  为直流侧电压。

同相 IGBT 开通不同步的原因主要有 2 个: 一是 2 个逆变器调制波的幅值或者相位不同; 二是载波不同步。

以图 4 的 A 相为例, 假设第一个逆变器 A 相的调制波为  $u_{ar1}$ , 第二个逆变器 A 相的调制波为  $u_{ar2}$ , 载波峰值为  $U_c$ , 采用双极正弦脉冲宽度调制 (sinusoidal pulse width modulation, SPWM) 调制方式。其

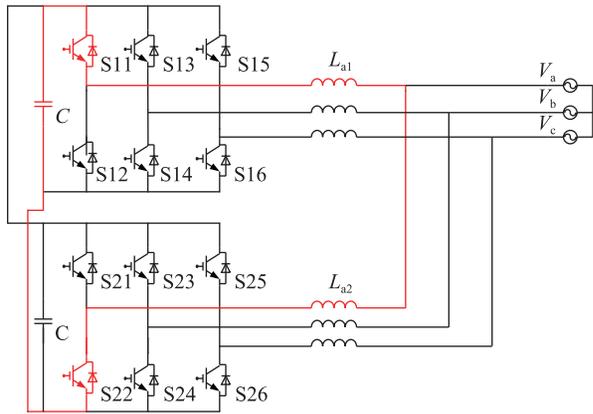


图4 两逆变器并联高频环流通路

Fig.4 Inverter parallel high frequency circulation path

中  $u_{ar1}$  和  $u_{ar2}$  满足下式:

$$u_{ar1} = U_{a1} \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$u_{ar2} = U_{a2} \sin(\omega t + \delta) \quad (4)$$

$$T_1 = \frac{u_{ar1}}{U_r} T = \frac{U_{a1} \sin(\omega t)}{U_r} T \quad (5)$$

$$T_2 = \frac{u_{ar2}}{U_r} T = \frac{U_{a2} \sin(\omega t + \delta)}{U_r} T \quad (6)$$

式中:  $T$  为 IGBT 的开关周期;  $T_1$  为 S11 的开通时间;  $T_2$  为 S21 的开通时间。

假设载波的相位和幅值相同, S11 和 S22 同时闭合的时间  $\Delta T$  满足下式:

$$\Delta T = T_1 - T_2 = \frac{T}{U_r} [U_{a1} \sin(\omega t) - U_{a2} \sin(\omega t + \delta)] \quad (7)$$

上述分析逆变器调制波差异导致的同相 IGBT 开通的时间差, 下面将分析载波相位不同步导致的同相 IGBT 开通时间差。以 A 相为例, 其脉冲宽度调制 (pulse width modulation, PWM) 信号产生原理如图 5 所示。

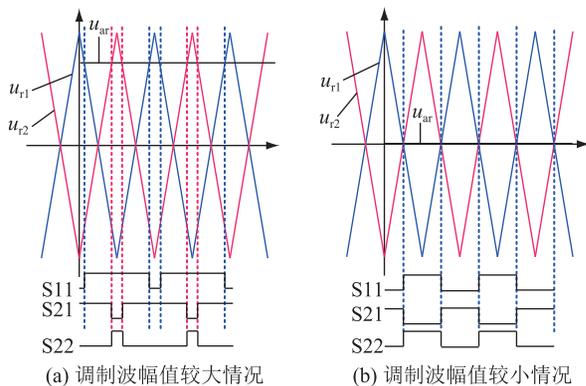


图5 逆变器 PWM 脉冲信号生成

Fig.5 PWM pulse generation block of inverter

载波的频率远大于调制波, 因此在 2 个载波周

期内, 可假设调制波的幅值不变。当载波的相位偏差  $180^\circ$ , 调制波的幅值为 0 的时候, S11 和 S22 同时开通的时间最长, 为  $0.5T$ 。当调制波的幅值达到最大值时, S11 和 S22 同时开通的时间最短, 为  $(1-M)T$ 。  $M$  为最大调制比, 一般为  $0.85 \sim 0.95$ 。

### 2.3 中压能馈系统控制策略及其环流抑制性能分析

中压能馈系统采用 2 组并联单元独立控制策略, 除了 SPWM 调制波的移相角度不同之外, 2 组并联单元控制策略完全相同, 以第一组并联单元 P1 为例, 其控制策略如图 6 所示。图中  $U_{dc1}$  为第一组并联单元 P1 的直流电压测量值;  $U_{dcset2}$  为直流电压控制指令;  $i_{ai}, i_{bi}, i_{ci}$  为每个独立三相单元的电流测量值 ( $i = 1, \dots, n$ )。  $n$  个并联模组采用独立电流内环进行控制, 独立电流内环可以保证并联模组间的均流。为了提高直流侧电压利用率, 采用了三次谐波注入的调制方式。

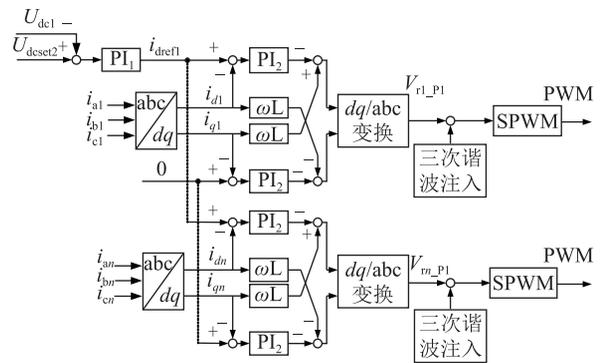


图6 控制策略框图

Fig.6 A block diagram of the control strategy

以 2 个逆变器并联为例, 忽略高频成分, 先假设 2 个逆变器的输出电流相同为  $i_a$ , 逆变器输出电压和电流满足下式:

$$u_{a1} = u_a + i_a Z_1 \quad (8)$$

$$u_{a2} = u_a + i_a Z_2 \quad (9)$$

式中:  $u_{a1}$  为第 1 个并联逆变器的 A 相相电压;  $u_{a2}$  为第 2 个并联逆变器的 B 相相电压;  $u_a$  为网侧 A 相相电压;  $Z_1$  为第 1 个并联逆变器的 A 相总阻抗;  $Z_2$  为第 2 个并联逆变器的 A 相总阻抗。为了便于分析, 令:

$$i_a Z_1 = k_1 u_a \quad (10)$$

$$Z_2 = k_2 Z_1 \quad (11)$$

根据 SPWM 调制原理, 把式 (8—11) 带入式 (7), 可得:

$$\Delta T = k_1 |1 - k_2| MT \quad (12)$$

假设系统的开关频率为 3 kHz, 滤波电感  $L_a$  为 0.2 mH, 电感值偏差  $k_2$  为 1.1 (一般电感的要求), 额

定电流 600 A, 交流电压 480 V, 直流电压 800 V, 线路的阻抗远小于滤波电感, 忽略不计。同时假设载波信号同步, 把相关参数带入式(2)和式(12)计算可得:  $M$  为 0.92,  $k_1$  为 0.096,  $T$  为 333.3  $\mu\text{s}$ ,  $\Delta T$  为 2.94  $\mu\text{s}$ ,  $\Delta i_a$  为 5.88 A。

通过上述计算可以发现在系统阻抗参数偏差 10%, 载波同步情况下, 采用电流内环独立控制策略, 并联逆变器的环流可以控制在 1% 以内。

#### 2.4 SPWM 载波同步及载波移相调制策略

文中所述的模块化地铁再生制动能量回馈系统采用总分的控制系统架构, 其架构如图 7 所示。总控制器完成图 6 所述的电压外环控制策略, 模块控制器  $PkSMCi$  ( $k=1, 2; i=1, 2, \dots, n$ ) 完成电流内环逻辑, 并产生 PWM 信号控制 IGBT。模块控制器  $PkSMCi$  和主控器通过一对光纤进行通信, 采用标准的 60044-8 通信协议。

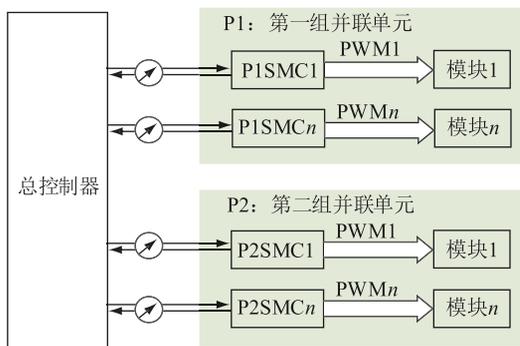


图 7 控制系统架构

Fig.7 Control system architecture

该控制系统架构保证了各逆变器电气上的相互独立, 有效地隔离了逆变器之间的电磁干扰。各模块控制器相互独立必然导致了各逆变器载波信号的不同步。

为了实现各逆变器载波信号的同步, 主控制器和模块控制器 100  $\mu\text{s}$  通信一次, 在每一帧里面定义一个 16 位的同步字。每隔 100  $\mu\text{s}$ , 对载波信号进行一次同步。一只标称值 10 MHz、误差  $\pm 20$  ppm、温度范围  $-20 \sim +70$   $^{\circ}\text{C}$  的晶振, 在 100  $\mu\text{s}$  内的累积最大偏差为  $\Delta T$  为 2 ns。以 2.3 节的系统参数为例, 假设系统参数和调制波均相同, 代入式(2)计算可得:  $\Delta i_a$  为 4 mA。

采用载波移相调制策略, 总电流输出的开关纹波频谱分布在并联模块开关纹波 2 倍的频带内, 等效开关频率得到 2 倍提高<sup>[7]</sup>。在满足谐波含量要求的条件下, 滤波电感的尺寸和电感上的基波压降明显减小。2 组并联单元之间的载波信号延时  $T/2$  ( $T$  为载波周期)。2 组并联单元通过变压器进行隔

离, 不会存在环流问题。

### 3 试验

在完成 2 MW 两模块并联地铁再生制动能量回馈样机研制后, 进行了再生制动能量回馈系统的功能测试。能馈系统设计参数和试验条件见表 1。

表 1 能馈系统设计参数和试验条件

Tab. 1 System parameters and test conditions

名称	参数
系统电压	35 kV
变压器变比	35 kV/0.48 kV
变压器漏抗	6%
单逆变器额定功率	500 kW
单逆变器额定电流	600 A
单逆变器滤波电感	0.5 mH
单逆变器滤波直流电容	5 mF

图 8 为模拟列车制动时能馈装置投入过程网侧电流波形图, 列车制动时能馈装置可以迅速解锁向交流电网回馈能量。图 9 为模拟列车启动时能馈装置退出过程网侧电流波形图, 列车制动时能馈装置可以迅速闭锁进入待机状态。

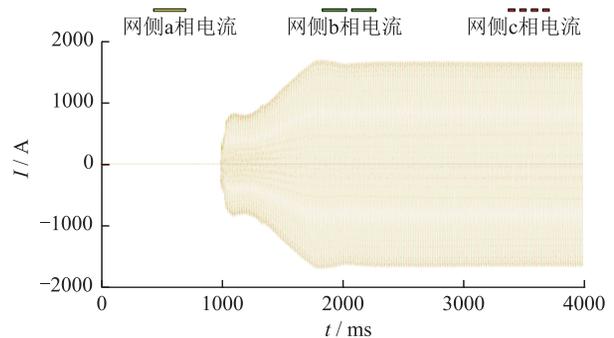


图 8 能馈装置投入过程网侧电流波形

Fig.8 The network side current when the energy feedback device inputs

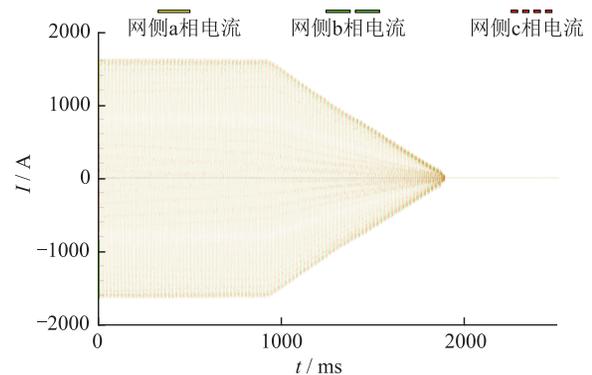


图 9 能馈装置退出过程网侧电流波形

Fig.9 The network side current when the energy feedback device exits

图 10 为能馈装置满功率回馈时其中 2 个并联逆变器的 A 相的并网电流波形。两模块电流偏差小于 1%, 环流抑制效果好。

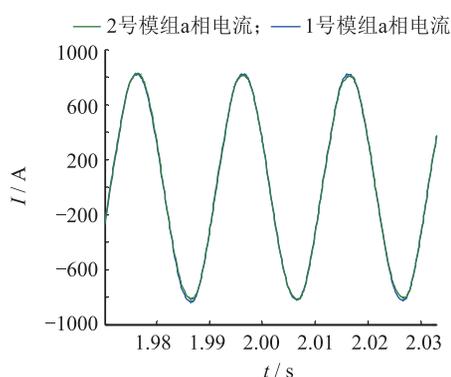


图 10 2 个并联逆变器的 A 相电流波形

Fig.10 Phase A current waveform of two parallel inverters

图 11 为能馈装置满功率回馈时其中 2 组串联单元的直流电压波形。直流电压偏差小于 1%, 均压效果好。

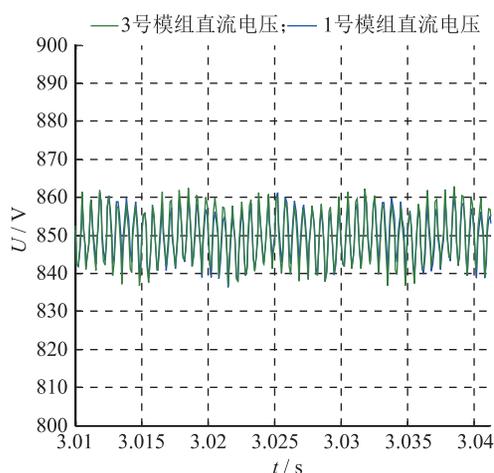


图 11 2 组串联单元的直流电压波形

Fig.11 DC voltage waveform of 2 series units

## 4 结语

针对 1500 V 的地铁直流供电系统,文中采用了一种带快速熔断器的模块化串并联能馈拓扑,采用低耐压 IGBT,降低了设备的成本。该拓扑可实现模块冗余功能,因而更为可靠。针对该拓扑,文中详细分析了并联逆变器环流大小的影响因素,并做了定量的计算说明。文中采用每个逆变器独立电流内环和一组并联逆变器共用一个直流电压外环的控制策略,并采用载波移相调制策略。试验结果表明,文中所设计的基于多模块串并联的地铁列车再生制动能量回馈装置可以实现交直流侧直接并联,且直流电压偏差和交流电流偏差均小于 1%,证明

了上述分析的正确性。

## 参考文献:

- [1] 黄志高,刘洪德,连建阳,等. 地铁能量回馈系统充电回路的优化方案[J]. 电力工程技术,2017,36(1):95-97.  
HUANG Zhigao, LIU Hongde, LIAN Jianyang, et al. Optimized method of charging loop for the subway energy feedback system [J]. Electric Power Engineering Technology, 2017, 36(1):95-97.
- [2] 张勇. 深化能效合作共创绿色发展[J]. 电力需求侧管理, 2017,19(1):1-2.  
ZHANG Yong. Deepen energy efficiency cooperation and create green development[J]. Power Demand Side Management, 2017, 19(1):1-2.
- [3] 施焯,吴在军,阚沁怡. 基于改进卡尔曼滤波器的 LCL 逆变器电流控制[J]. 江苏电机工程,2016,35(1):28-36.  
SHI Ye, WU Zaijun, KAN Qinyi. A current controller for LCL inverter based on improved Kalman filter[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(1):28-36.
- [4] 庞艳凤,袁月赛. 地铁再生能量利用方案比较[J]. 机车电传动,2014(1):77-79.  
PANG Yanfeng, YUAN Yuesai. Comparison of regenerating energy utilization schemes in urban rail system[J]. Electric Drive for Locomotives, 2014(1):77-79.
- [5] 陈德胜. 城轨新型能馈式牵引供电集成技术研究及实现[D]. 北京:北京交通大学,2014.  
CHEN Desheng. Research and realization of integration technology for the new energy feedback traction power supply in the urban rail transit [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2014.
- [6] 牛化鹏,张海龙,桑福环,等. 地铁列车模块化再生制动能量回馈变流器的研制[J]. 城市轨道交通,2015(6):87-89.  
NIU Huapeng, ZHANG Hailong, SANG Fuhuan, et al. Design of metro regenerative braking energy feedback converter based on vehicle modularization[J]. Urban Mass Transit, 2015(6):87-89.
- [7] 张建文,王鹏,王哈,等. 多逆变器并联的均流控制策略[J]. 电工技术学报,2015,30(18):61-68.  
ZHANG Jianwen, WANG Peng, WANG Han, et al. Average-current control strategy of multiple parallel inverters [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18):61-68.
- [8] 杨恩星,仇志凌,陈国柱,等. 并联双 PWM 变流器在低速永磁直驱风力发电系统中的应用[J]. 电力系统自动化, 2009,33(10):95-98.  
YANG Enxing, QIU Zhiling, CHEN Guozhu, et al. Application of parallel dual PWM converter to the low-speed permanent magnet direct-driven wind turbine [J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(10):95-98.
- [9] 李建林,高志刚,胡书举,等. 并联背靠背 PWM 变流器在直驱型风力发电系统的应用[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(5):59-62.  
LI Jianlin, GAO Zhigang, HU Shuju, et al. Application of parallel back-to-back PWM converter on the direct-drive wind power system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008,

- 32(5): 59-62.
- [10] 余蜜, 康勇, 张宇, 等. 基于环流阻抗的逆变器并联控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(18): 42-46.  
YU Mi, KANG Yong, ZHANG Yu, et al. Research on a novel current-sharing scheme based on circulating impedance of multi-inverter parallel system[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(18): 42-46.
- [11] 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, 50(6): 86-87, 90.  
WANG Yu, YANG hao, FANG Taixun, et al. Experimental research on renewable energy feedback system for subway [J]. Power Electronics, 2016, 50(6): 86-87, 90.
- [12] MILLER S K T, BEECHNER T, SUN JIAN. A comprehensive study of harmonic cancellation effects in interleaved three-phase VSCs [C] // Power Electronic Specialists Conference, Orlando, USA, 2007.
- [13] ZHANG D, WANG F, BURDOS R, et al. Interleaving impact on harmonic current in DC and AC passive components of paralleled three-phase voltage-source converters [C] // Applied Power Electronics Conference and Exposition, Austin, USA, 2008.
- [14] YE Zhihong, D BOROEYEVICH, FRED C LEE. Modeling and control of zero-sequence currents in parallel multi-phase converters [C] // IEEE Power Electronics Specialists Conference, Galway, 2000, 2: 680-685.
- [15] YE Zhihong, D BOROEYEVICH, FRED C LEE. Paralleling non-isolated multi-phase PWM converters [C] // IEEE Industry Applications Conference, Rome, 2000, 4: 2433-2439.
- [16] 于玮, 徐德鸿. 基于虚拟阻抗的不间断电源并联系统均流控制[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(24): 32-39.  
YU Wei, XU Dehong. Control scheme of parallel UPS system based on output virtual resistance [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(24): 32-39.
- [17] 于玮, 徐德鸿, 周朝阳. 并联UPS系统均流控制[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(21): 63-67.  
YU Wei, XU Dehong, ZHOU Chaoyang. Control strategy of paralleled UPS system [J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(21): 63-67.
- [18] 张庆海, 罗安, 陈燕东, 等. 并联逆变器输出阻抗分析及电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2014, 29(6): 98-105.  
ZHANG Qinghai, LUO An, CHEN Yandong, et al. Analysis of output impedance for parallel inverters and voltage control strategy [J]. Transactions of the China Electrotechnical Society, 2014, 29(6): 98-105.

作者简介:



连建阳

连建阳(1987—),男,硕士,工程师,从事柔性直流输电及大功率电力电子应用技术工作(E-mail:lianjianyang@163.com);

刘洪德(1986—),男,硕士,工程师,从事柔性直流输电及大功率电力电子应用技术工作(E-mail:liuhd@nrec.com);

张焯(1989—),女,本科,助理工程师,从事轨道交通机电设备相关工作。

## A Modular Metro Braking Energy Feedback System and Circulation Suppression Strategy

LIAN Jianyang<sup>1</sup>, LIU Hongde<sup>1</sup>, ZHANG Ye<sup>2</sup>, ZHANG Quanxiu<sup>2</sup>, XIE Yeyuan<sup>1</sup>

(1. NR Electric Co., Ltd., Nanjing 211102, China;

2. Shijiazhuang Urban Rail Transit Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China )

**Abstract:** In the light of the demand for regenerative braking energy feedback system for subway and subway, a modular series-parallel energy-fed topology with fast fuses is adopted. This topology reduces the cost of the device, solves the problem of insufficient IGBT current, and improves the reliability of the device. In this paper, the influence of the modulated wave signal and the carrier signal on the circulation are quantitatively analyzed. The internal current control strategy and the carrier synchronization technique are used to suppress the circulation of the parallel module. The test results show that the direct parallel connection of AC and DC side can be realized through the regenerative braking energy feedback device based on multi module series parallel connection and the current deviation of the parallel inverter is less than 1%, the DC voltage deviation of the series inverter is less than 1%.

**Key words:** medium voltage energy feedback; carrier phase shifting; circulation current; series equalization; braking energy feedback

(编辑 钱悦)