DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20201065

## 适应机车功率波动特性的高压铁路功率 调节器控制策略

江友华<sup>1</sup>,杨金婉<sup>1</sup>,赵乐<sup>2</sup>,任阳<sup>1</sup>,杨兴武<sup>1</sup>,曹以龙<sup>1</sup> (1. 上海电力大学电子与信息工程学院,上海 200090; 2. 国网上海市电力公司电力科学研究院,上海 200437)

摘 要:为了降低降压变压器的安装空间及磁饱和等因素给铁路功率调节器(railway static power conditioner, RPC) 工程应用及治理效果带来的不利影响,模块化多电平换流器的铁路功率调节器(railway static power conditioner of modular multilevel converter, MMC-RPC)成为研究热点。但现有的 MMC-RPC 控制策略没有考虑电力机车实际负荷功率及电流波动特性对 MMC 各子模块电容电压影响,使其电容电压波动较大。为此,根据电力机车功率及负荷运行特性,采用混合 PWM 调制策略,既能满足开关损耗低的要求,又能适应电力机车动态运行特性下 MMC-RPC 各子模块电容均压波动范围。最后,通过仿真和实验结果验证了 MMC-RPC 输出性能相对传统二电平 RPC 的优越性,采用的混合 PWM 调制策略能够使得 MMC-RPC 适应电力机车实际负荷功率及电流波动特性,各子模块电容均压波动幅值均有效控制在±5%范围内。

关键词:铁路功率调节器;降压变压器;模块化多电平换流器;机车功率波动特性;混合 PWM 调制;电容均压

## Control Strategy for High Voltage Railway Static Power Conditioner Adapting to Power Fluctuation Characteristics of Electric Locomotive

JIANG Youhua<sup>1</sup>, YANG Jinwan<sup>1</sup>, ZHAO Le<sup>2</sup>, REN Yang<sup>1</sup>, YANG Xingwu<sup>1</sup>, CAO Yilong<sup>1</sup>

(1. College of Electronics and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China;

2. Electric Power Research Institute of State Grid Shanghai Municipal Electric Power Company, Shanghai 200437, China)

**Abstract**: In order to reduce the adverse effects of installation space and magnetic saturation of the step-down transformer on the engineering application and governance effects of railway static power conditioner (RPC), the railway static power conditioner of modular multilevel converter (MMC-RPC) has become a research hotspot. However, the existing MMC-RPC control strategies do not consider the influence of the actual load power and current fluctuation characteristics of electric locomotives on the capacitance voltage of each sub-module of MMC, so that the capacitor voltage fluctuates greatly. Therefore, according to the power and load characteristics of electric locomotives, a hybrid PWM modulation strategy is adopted, which can not only meet the requirements of low switching loss, but also adapt to the fluctuation range of the capacitor voltage equalization of each sub-module of MMC-RPC under the dynamic operating characteristics of electric locomotives. Finally, the simulation and experimental results verify the superiority of the MMC-RPC output performance over the traditional two-level RPC. By adopting the hybrid PWM modulation strategy, the MMC-RPC can adapt to the actual load power and current fluctuation characteristics of electric locomotives, and the fluctuation amplitude of the capacitor voltage equalization of each sub-module of within the range of  $\pm 5\%$ .

**Key words:** railway static power conditioner; step-down transformer; modular multilevel converter; power fluctuation characteristics of electric locomotive; hybrid PWM modulation; capacitor voltage equalization

0 引言

目前,我国已成为世界上高速铁路运营最快、

里程最长国家,重载和高速已成为现在铁路发展方向,动力装置功率也逐渐攀升,其对上层供电系统电能质量影响日益明显<sup>[1-2]</sup>,尤其是负序问题<sup>[3]</sup>。日本学者提出的铁路功率调节器(railway static power conditioner, RPC)能有效克服静止无功补偿器(static var compensator, SVC)、静止无功发生器(static var

基金资助项目: 上海市科技创新行动计划(19DZ1205402; 21ZR1424800)。 Project supported by Shanghai Science and Technology Innovation Action Plan (19DZ1205402, 21ZR1424800).

generator, SVG)等治理装置对负序和谐波补偿效果 不佳的缺点,成为当前铁路牵引变电能质量治理方 面的研究热点。比如文献[4]对其拓扑结构、控制方 法进行了分析与研究,用于解决大功率 RPC 拓扑并 联及控制问题; 文献[5-8]主要围绕 RPC 控制策略及 调制方法进行研究; 文献[9-10]主要是针对 RPC 容 量配置优化方法进行分析。

由于受到电力电子器件耐压值影响,上述文献 研究的 RPC 对象或模型均是针对传统二电平 RPC 拓扑,输出电压基本在1000V等级以下。然而电 力机车供电臂为 27.5 kV, 使得传统二电平 RPC 拓 扑与机车供电臂之间需要降压变压器进行电压匹 配。降压变压器的存在不仅使得传统二电平 RPC 装 置占地面积大,给现场工程施工及空间要求带来挑 战。更为突出问题是传统 RPC 由于参考信号中含有 直流分量、采样传感器零点偏移、驱动信号不一致 及开关器件特性差异等原因,会导致 RPC 输出电压 中含有一定的直流及谐波分量,而直流及谐波注入 降压变压器绕组中,影响变压器励磁电流磁导率, 使其铁心工作在饱和状态, 励磁电流变成尖顶波, 导致电流波形失真[11],降压变压器次级电流将不能 有效复原初级电流波形,致使 RPC 补偿电流达不到 预期的电能质量治理效果。

近年来,随着换流技术的发展,模块化多电平换流器(modular multilevel converter, MMC)被提出,并被运用于 RPC 拓扑,形成了 MMC-RPC 拓扑,此拓扑能够克服传统 RPC 由于降压变压器对补偿效果的影响,但现有的 MMC-RPC 控制策略均没有考虑电力机车实际负荷功率及电流波动特性对相关 MMC 各子模块电容电压影响<sup>[12-14]</sup>,使得 MMC-RPC 相关研究不够全面、工程实际应用没有得到实验 验证。

为此,本文根据电力机车功率及负荷运行特性,采用混合 PWM 调制策略,既能满足大功率装置要求开关损耗低的要求,又能适应电力机车动态运行特性下 MMC-RPC 各子模块电容均压波动范围。最后,通过仿真和实验验证了本拓扑结构输出性能的优越性及调制策略的可行性和有效性。

## 1 传统二电平铁路功率调节器补偿原理及 降压变压器影响分析

传统 RPC 主电路结构如图 1 所示,其中两变流 器为单相四桥臂结构<sup>[7]</sup>。由图 1 可知,110 kV 的供



电网(电压为 U<sub>k</sub>、电流为 i<sub>k</sub>, k=A、B、C)经 V/V 牵 引变落点为 27.5 kV 的供电牵引网,其电压为 u<sub>α</sub>、u<sub>β</sub>, 电流为 i<sub>α</sub>、 i<sub>β</sub>, RPC 装置经过降压变压器连接于牵 引变压器的两桥臂,相应的电流 i<sub>α1</sub>、i<sub>β1</sub> 变为 i<sub>α2</sub>、i<sub>β2</sub>, RPC 两变流器通过中间直流母线电容进行连接,从 而可以实现两个桥臂之间能量的转换。通过这样拓 扑结构,两供电桥臂能量可以实现双向流动,通过 转移有功、无功甚至谐波方式可以调节左右两侧合 成电流大小,从而实现了电网一次侧负序和谐波治理。

由图1拓扑可知,由于受到电力电子器件耐压 值影响,传统 RPC 装置需要经过降压变压器 T<sub>1</sub>、 T<sub>2</sub>连接于牵引变压器的两桥臂,且在 RPC 原理分 析时,认为降压变压器 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>是理想变压器,不受 变压器非线性影响。但在实际工程测试与实验时, 降压变压器 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>并不是理想变压器,当它空载时 会受到空载与励磁电流影响,从而影响 V/V 牵引变 供电畸变,进而影响牵引变电流波形<sup>[15]</sup>;当 RPC 运行时,RPC 由于参考信号中含有直流分量、采样 传感器零点偏移、驱动信号不一致及开关器件特性 差异等原因,会导致 RPC 输出电压中含有一定直流 及谐波分量,导致输出电压及电流失真,降压变压 器次级电流将不能有效复原初级电流波形。

# 2 电力机车动态运行状态下的 MMC-RPC 拓扑结构及调制方法

#### 2.1 拓扑结构

由于传统二电平 RPC 拓扑与机车供电臂之间 需要降压变压器进行电压匹配,降压变压器的存在 会影响 RPC 补偿效果,达不到预期电能质量治理目 的,致使无变压器链接匹配的 MMC-RPC 拓扑被提出,其拓扑结构如图 2 所示<sup>[12]</sup>。

对比图 1 与图 2 可知, 四桥臂 MMC-RPC 拓扑 结构与传统二电平 RPC 不同的是,其采取两个 H 桥结构,模块化多电平换流器背靠背与各供电臂相 连,省去了降压变压器。为了对图 2 每个桥臂进行 区分,设图 2 拓扑结构从左至右 4 个桥臂分别称为 *j*(*j*=1,2,3,4)桥臂。设上桥臂电压为 *u*<sub>j</sub>P, 下桥臂 电压为 *u*<sub>j</sub>N; *i*<sub>j</sub>P、*i*<sub>N</sub>分别为上、下桥臂电流;*u*<sub>s</sub>、*i*<sub>s</sub> 为MMC-RPC交流侧电压、电流;*R*<sub>s</sub>、*L*<sub>s</sub>为MMC-RPC 与牵引网机车供电臂之间等效电阻与电感;*R*<sub>0</sub>、*L*<sub>0</sub> 为单相 MMC-RPC 桥臂上的等效电阻与电感;*U*<sub>d</sub>、 *i*<sub>d</sub>为 MMC-RPC 直流侧电压、电流;桥臂两端的机 车负载电流分别是 *i*<sub>a</sub>L、*i*<sub>BL</sub>。

#### 2.2 MMC-RPC 子模块拓扑

由图 2 可知, MMC-RPC 采用模块化设计,通 过调整功率单元数量可实现 MMC-RPC 系统的电压 和功率等级的灵活配置,便于系统扩容。作为基本 组成单元的子模块,一种典型的拓扑结构如图 3 所 示,两个全控型开关管 S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub>构成半桥结构,并与 一个直流电容并联。在实际工程中,通常会增加一 个高速旁路开关 K,其作用是保证子模块发生故障 时将其快速、可靠地旁路。由于旁路开关只有在故 障状态时发挥作用,通常在 MMC 的原理及建模过 程中并不体现。

图 3 中: ucn 为电容电压; usm 为子模块的端电 压; iam 为桥臂电流; 正方向的选择如图所示。不难 发现,通过控制全控性器件 S1、S2的开关状态,便 可以控制桥臂电流的方向及子模块的端电压。S1、 S2开关状态的不同组合方式产生了子模块不同的工 作状态,如图 4 所示,分别是投入状态、切出状态、 闭锁状态,通过这 3 个状态及桥臂电流的方向就可 实现子模块电容进行充电、放电和维持等,从而实 现电容电压的稳定。

## 2.3 牵引机车负荷功率及电流特性对 RPC 控制要求

电气化铁路列车在运行中通常有起动、稳速前进、减速、制动等几个典型工况<sup>[16-17]</sup>。图 5(a)为某时间段牵引站供电的甲线有功负荷和无功负荷曲线。有功负荷随列车运行情况剧烈波动,并包含列车在制动过程中向系统回馈的功率和启动过程中的较大牵引功率。此外,由于高铁列车的增速,站与站之间的时间在缩短,使得列车经常处于供电段的"驶入-制动-启动"过程,根据对其负荷电流进行





Fig.2 Topology of four-bridge arm MMC-RPC



Fig.3 Sub module topology



## 图 4 子模块工作状态





图 5 电气化铁路列车运行状态及其功率、负荷变化曲线 Fig.5 Operation state and power load curve of electrified railway train

测量,结果如图 5(b)显示,220 kV 侧 C 相空载电流 在 80 A 左右,而带列车负荷的 A、B 相电流通常为 150~200 A,不平衡程度较大,且每相电流波动也 较大。

由图 5 可知,列车运行过程中(尤其是列车过渡态)的负荷功率变化较大,将引起 MMC-RPC 的交流电压 us,交流侧电流 is 波动,从而引起 MMC-RPC 直流母线电压、电流变化,进而引起 MMC-RPC 子 模块电容电压变化。因此,针对电力机车运行特征 及其对 MMC-RPC 系统影响, MMC-RPC 子模块调 制方法将是系统稳定运行关键。

## 2.4 MMC-RPC 子模块调制方法

为使MMC-RPC能够实现牵引变电能质量有效 治理,并保证其系统稳定,需要根据电力机车运行 特性合理均衡 MMC-RPC 子模块电容电压。然而目 前有关 MMC-RPC 调制方法主要集中在系统控制、 环流抑制等方面,对于 MMC-RPC 拓扑内部子模块 之间的电容均压调制并没有分析,而多电平子模块 电容均压的调制方法又极大的影响着 MMC-RPC 控 制稳定性及其补偿电流的有效性,这就使得 MMC-RPC 控制方法必须有机融合子模块之间电容 均压调制,否则其系统稳定性及电能质量治理有效 性将受到影响<sup>[17]</sup>,也就是说 MMC-RPC 调制方法需 要根据电气化铁路牵引变机车运行特性实时调节子 模块投入、切除个数来使 MMC-RPC 输出交流电压 逼近调制波。当 MMC-RPC 正常运行时,每个子模 块状态均在"投入"、"切出"之间来回变动,与此同 时,每个子模块的电容都在充电、放电、悬浮 3 种 状态下不停切换,因此电容电压在不停的波动<sup>[18-19]</sup>。 因此,选择合理的 MMC-RPC 拓扑内部子模块之间 的电容均压调制法将决定 MMC-RPC 控制稳定性及 其补偿电能质量有效性。

目前有关 MMC-RPC 的调制方法有阶梯波调 制、空间矢量调制,载波相移等,其中最近电平调 制法是阶梯波调制法的一种,应用于 MMC-RPC 上 具有开关次数少、开关损耗低等优势。然而最近电 平调制法在计算桥臂内投入的子模块数不为整数 时,会选取最接近的整数来代替,这样实际输出电 压与调制波之间存在±ucn/2 以内的误差,一旦电平 数比较低时,这个误差相对于桥臂电压越大,会使 得直流侧电容电压波动比较明显。同样的,当 MMC-RPC 采用载波相移调制,实现起来比较简单, 电容电压波动也比较小,但其开关开关损耗比较高, 对于 MMC-RPC 这种容量相对比较大的装置,其散 热及开关损耗也是必须考虑。为此,本文根据 MMC-RPC 的运行特性,同时兼顾阶梯波调制与载 波相移方法的优点,在一个开关周期内,在阶梯波 的基础上叠加 PWM 波去更好的逼近调制波,即桥 臂中有一个模块工作于 PWM 模式下,其他模块工 作于投入或切出状态下。定义 floor(x)为对 x 取整函 数,则桥臂内投入的子模块数为

$$\begin{cases} N_{px} = f_{loor}(n_{px}^{*}) = f_{loor}(\frac{N}{2} - \frac{u_{x}}{u_{cn}}) \\ N_{nx} = f_{loor}(n_{nx}^{*}) = f_{loor}(\frac{N}{2} + \frac{u_{x}^{*}}{u_{cn}}) \end{cases} \quad (x = a, b, c) \quad (1) \end{cases}$$

其中: N 表示桥臂子模块数目; N<sub>px</sub>、N<sub>nx</sub>分别为上、 下桥臂投入的子模块数; u<sup>\*</sup><sub>x</sub>为某一相调制波, 即交 流输出电压给定; n<sup>\*</sup><sub>px</sub>为上桥臂投入子模块数的理论 值; n<sup>\*</sup><sub>nx</sub>为下桥臂投入的子模块数的理论值。另外上、 下桥臂中各有一个子模块工作在 PWM 模式, 其占 空比可以表达为

$$\begin{cases} d_{px} = n_{px}^* - N_{px} = n_{px}^* - f_{loor}(n_{px}^*) \\ d_{nx} = n_{nx}^* - N_{nx} = n_{nx}^* - f_{loor}(n_{nx}^*) \end{cases} \quad (x = a, b, c) \quad (2)$$

其中: dpx 为上桥臂工作于 PWM 模式下的子模块占

空比; *d*<sub>nx</sub>为下桥臂工作于 PWM 模式下的子模块占 空比<sup>[20]</sup>。以4电平 MMC 为例(*N*=3),假设其直流母 线电压额定值为100 V,根据式(1)、式(2)可以计算 桥臂导通子模块数及 PWM 子模块的占空比,再结 合电力机车牵引变供电电压波动及子模块电容电压 大小原则进行排序均压,来决定哪个子模块投入、 哪个模块切出,哪个子模块运行于 PWM 模式,从 而确定桥臂内各子模块工作状态,所得结果如表1、 表2 所示。

从表 1、表 2 不难发现,上桥臂投入的子模块 数等于下桥臂切出的子模块数,上桥臂切出的子模 块数等于下桥臂投入的子模块数,而且上、下桥臂 工作于 PWM 模式的子模块(下面简称为"PWM 子 模块")占空比之和恒等于 1,对于这两个"特殊" 的子模块,不同的 PWM 调制方式会产生不同的脉 冲序列,图 6 反映了载波相同和载波互补两种情况 下,在一个开关周期内,上、下桥臂 PWM 子模块 的工作状态。

由图 6 可知, 在混合 PWM 中, 若 *i*am>0,则 根据排序结果, 触发投入电容电压较低的 *N*in(*N*in=*N*-1)个子模块,第*N*in+1 个子模块为占空比 为*d*<sub>x</sub>的 PWM 状态,剩余子模块切出;若*i*am<0, 则触发投入电容电压较高的 *N*in 个子模块,第*N*in+1 个子模块为占空比为*d*<sub>x</sub>的 PWM 状态,其余子模块 切出。假设下桥臂 PWM 子模块的占空比为*a*,则 上桥臂 PWM 子模块的占空比为 1-*a*。

由此可知,本文方法与最近电平调制法相比, 其显著特点是在桥臂内有一个模块工作于 PWM 模 式,且各子模块状态选择不仅同自身电压有关,还 同连接的牵引网供电电压有关。这样就可以避免最 近电平调制法在计算桥臂内投入的子模块数不为整 数时,需要选取最接近的整数来代替,其相应的电 压误差可以通过工作于 PWM 模式模块的占空比大 小来调节。此外,由于采用了 PWM 模式,其调节 子模块电容电压的响应速度也得到提高,能够有效 应对牵引网功率波动的运行特性,从而维持子模块 电容电压的稳定度,其相应的调制策略及框图如图 7 所示,图 7 中 $u_{nx}^{*}$ 为上桥臂的调制波; $u_{nx}^{*}$ 为下桥 臂的调制波;  $u_{a}^{*}$ 为 a 相调制波;  $U_{SMp}$ 、 $U_{SMn}$ 分别是 a 相上、下桥臂子模块电容电压采样值; ipa、ina 分 别是 a 相上、下桥臂电流。由图 7 可知,本调制方 法由投入子模块数计算、均压排序和 PWM 调制 3

表1 上桥臂 dpx、Npx

Table 1	Upper bridge arm $d_{px}$ , $N_{px}$	

$u_x^*/V$	-120	-80	-40	0	40	80	120
投入数 Npx	2	2	1	1	1	0	0
切出数(2N <sub>px</sub> )	0	0	1	1	1	2	2
占空比 d <sub>px</sub>	0.7	0.3	0.9	0.5	0.1	0.7	0.3

表2 下桥臂 d<sub>nx</sub>、N<sub>nx</sub>

Table 2 Lower bridge arm  $d_{nx}$ ,  $N_{nx}$ 

$u_x^*/V$	-120	-80	-40	0	40	80	120
投入数 Nnx	0	0	1	1	1	2	2
切出数(2-N <sub>nx</sub> )	2	2	1	1	1	0	0
占空比 d <sub>nx</sub>	0.3	0.7	0.1	0.5	0.9	0.3	0.7



Fig.6 Comparison of complementary carrier and same carrier

部分组成,即在一个开关周期内,在常规阶梯波均 压排序基础上叠加 PWM 波去更好的逼近调制波, 即桥臂中有一个模块工作于 PWM 模式下,其他模 块工作于投入或切出状态。

# 3 电力机车动态运行状态下的 MMC-RPC 仿真验证

为验证 MMC-RPC 子模块均压调制法的可行 性,利用 MATLAB/Simulink 进行 MMC 调制算法 仿真。仿真参数为:直流母线电压  $U_{DC}=100$  V,每 个桥臂子模块数 N=3,桥臂电感 L=2 mH,子模块 电容 C=1.2 mF,负载为阻感性  $Z_{load}$ ,包括 250 Ω 的 电阻和 2 mH 的电感。



hybrid modulation

图 8 分别根据机车运行特性,反映了机车重载、 轻载情况下,调制度 m=0.9 和 m=0.6 时 MMC-RPC 交流侧输出电压、电流波形。从图 8 可以看出交流 输出电压为四电平,包含高频开关信号噪声。由于 滤波电感(Lac)的作用,交流补偿电流为一条较为光 滑正弦波,对交流电流作傅里叶分析(FFT),调制度 为 0.9 时交流电流的 THD 为 3.22%,调制度为 0.6 时交流电流 THD 为 4.36%。由图 8(a)、(b)补偿电流 可知, MMC-RPC 拓扑不管机车处于重载、轻载等 各种工况,由于其省去了降压变压器,补偿电流通 过滤波电感后直接进入牵引网,交流电流的补偿电 流呈现正弦波,不会像传统二电平 RPC 由于降压变 压器的影响而产生畸变,因而能够更好的补偿和治 理牵引变的电能质量。

图 9 是未采取合理的子模块电容电压均压控制 策略时各子模块电容电压,由图 9 可以看出,此时 电容电压处于振荡状态,波动范围比较大,不仅会 造成 MMC-RPC 直流母线电压 Ua发生大幅波动, 系统失控,也会使得交流输出补偿电流波动,从而 无法实现牵引变电能质量的治理。

为了使得系统运行稳定,实现牵引变电能质量 的治理,本文根据牵引机车运行特性,采用了合理 的排序均压策略,在上桥臂电容电压偏高时,投入 1个子模块,切出 2个子模块,另外 1个子模块运 行于 PWM 模式,在上桥臂电容电压偏低时,4个





out reasonable voltage equalization control strategy

模块均投入,下桥臂运行状态相似,所以不管电力 机车处于重载还是轻载,各子模块的电容电压"交 替"领先,但各子模块电容电压均保持相对均衡,在 (100±5)V内波动,满足系统稳定性等相关要求。本 文均压控制策略下子模块的电容电压波形见图10。

#### 4 样机实验

为验证传统二电平 RPC 连接的降压变压器相 关参数及性能会影响牵引变电能质量补偿性能,同 时也为了验证 MMC-RPC 拓扑及其功率运行特性调 制策略的可行性,本文分别在山西某单位进行了传 统二电平 RPC 实验以及 MMC-RPC 样机实验。

#### 4.1 传统 RPC 实验

传统二电平 RPC 实验样机测试电路示意图及 测试参数分别如图 11 及表 3 所示。传统二电平 RPC





表3	RPC	控制	系统测	试参	*数
1. 5	ICI C	1.1.16.1	ハールル	1442	· 93

Table 3 Test parameters of RPC control system

序号	名称	数量	备注
1	380 V/220 V 单相降压 变压器	2 台	连接成 V/v 牵引变压器
2	220 V/220 V 单相隔离 变压器	2 台	将 RPC 接入牵引母线并实现电 气隔离
3	电阻 25 Ω	18 组	模拟 A、B 臂机车有功负载
4	桥式整流电路 15Ω	1套	模拟机车非线性
5	8.7 mH 22.2 A 电抗器	4 台	串联使用,模拟机车感性负载
6	50 A 铁路功率调节器	1套	RPC
7	磁阀式可控电抗器 (MCR)	1台	模拟机车加减速 (220 V,电流 5~77 A)

进行有功、无功及谐波的综合补偿实验,其中负载 分别采用电阻投切、磁阀式电抗器 MCR,用于模拟 电力机车加速、减速及机车负荷变化,二极管整流 电路主要用于模拟机车谐波。电力机车 α 相投入 3 组电阻和电感负荷,β 相空载时,RPC 进行有功、 无功及谐波综合补偿,其牵引变相电流、不平衡度、 功率因数和谐波含量测试如图 12 所示。由图 12 可 以看出:由于降压变压器励磁影响,降压变压器副 边电流相对于原边补偿电流产生畸变,使得传统 RPC 补偿性能受到影响。

从上述实验可以看出, 传统 RPC 在有功转移、 无功补偿、谐波治理等均能实现治理。但由于传统 RPC 存在降压变压器, 变压器由于过励磁会引起电 流畸变, 在 RPC 进行电力机车谐波补偿时, 更加加 剧了降压变压器电流畸变。为此, 需要采用新的拓 扑结构克服传统 RPC 存在的固有缺点。

#### 4.2 MMC-RPC 实验

为了验证 MMC-RPC 拓扑及子模块电容均压控 制策略可行性,还设计了一台 MMC-RPC 样机,其



图 11 传统 RPC 控制系统示意图

Fig.11 Schematic diagram of traditional RPC control system





控制系统示意图同图 11 类似,只需把 MMC-RPC 拓扑替代图 11 中的降压变压器及 RPC 即可。 MMC-RPC 样机由两个独立的相单元构成,每个相 单元由一个控制器单独进行控制,两个相单元之间 通过高速 SPI 进行时序同步。样机相应参数为:桥 臂子模块数 N=3,直流电压 U<sub>DC</sub>=60 V,桥臂电感 L=2 mH,子模块电容 C=1.2 mF。控制器选用 TI 公 司的 DSP28335,时钟周期为 150 MHz。设置采样 频率为 12.8 kHz,为避免子模块开关管 S<sub>1</sub>、S<sub>2</sub> 同时 导通,设置死区时间为 2.6 μs,实验样机见图 13。



图 13 MMC-RPC 实验样机 Fig.13 MMC-RPC experimental prototype

为验证 MMC-RPC 电容电压均衡策略的可行性,在 MMC-RPC 样机上进行了实验,带阻感性负荷 Z<sub>load</sub>,包括 20 Ω 的电阻和 1 mH 的电感,采用基于排序均压的直接调制法,调制度设置为 0.95 和 0.5,用于模拟牵引机车不同功率及负荷特性。

图 14 分别显示了调制度为 0.95 及 0.5 时交流 侧输出电压、电流波形。由于每个桥臂包含 3 个子 模块,故交流输出电压呈现四电平,交流电流为一 条较为光滑的正弦波。从图中可以发现,交流输出 电压每个电平处不是呈现水平的"阶梯"状,而是呈 "斜坡"状,这是因为 MMC-RPC 在实际运行中,投 入的子模块电容处于充电或放电状态,导致构成桥 臂电压的基本电压在不断变化,即使两个时刻投入 子模块数相同,其输出电压也是有些差异的。

此时子模块电容电压波形如图 15 所示。电容 电压在额定电压 ucn (20 V)上下波动,波动范围与额 定电压比值为 9%,电容电压处于±1.8 V 相对均衡 状态,验证了基于排序法的电容电压均衡策略可行性。

图 16 是结合机车负荷特性,采用子模块电容 电压均压前后的对比实验,从图 16 可以看出,本方 案启动前的各子模块电容电压波动范围是启动后各 子模块电容电压波动范围的两倍,可见本方案能够 在电力机车功率及负荷波动特性情况下,更加有效 的控制各子模块电容电压。

图 17 为 MMC-RPC 的 β 相并网补偿电流,由 于公共连接点(PCC)同时连接机车负荷和电网, MMC-RPC 输出电流为机车负荷电流与并网电流之 和,从图中可以看出 MMC-RPC 输出电流、并网电 流、负荷电流正弦度较高,且相位相同。

图 18 为 MMC-RPC 三相牵引变供电电流及利 用电能质量分析仪得到的 MMC-RPC 三相牵引变供 电电流频谱,其并网电流 THD 为 2.9%,比图 12 中传统 RPC 的电流 THD 小很多。



Fig.14 MMC-RPC AC side output voltage and current



Fig.15 Capacitor voltage waveform of submodule



图 16 本方案启动前后各子模块电容电压波动范围

Fig.16 Capacitor voltage fluctuation range of each sub module before and after the scheme is started

### 5 结论

本文针对电力机车功率及负荷运行特性,对 MMC-RPC 子模块电容均压策略进行了研究,并通 过实验验证了传统二电平 RPC 降压变压器影响特 征,以及 MMC-RPC 混合 PWM 调制法的适用性, 其结论如下:





Fig.17 Traction network current, MMC current and locomotive load current



Fig.18 Current and spectrum of MMC-RPC traction

#### transformer

1) 传统二电平 RPC 拓扑中的降压变压器会影 响铁路功率调节器补偿性能,需要采用更加合理的 MMC-RPC 拓扑。

2)由于电气化铁路牵引供电随着电气化铁路 机车加速、减速等运行状态,以及机车开行列数的 变化,使得牵引供电网电压不是恒定的,MMC-RPC 调制方法需要根据电气化铁路牵引变机车运行特性 实时调节子模块投入、切除个数及调制方式,从而 保证子模块电容电压均压及系统的稳定运行。

### 参考文献 References

 张建辉,许莹莹. 交流电网电压负序分量影响铁路功率调节器运行 特性的机理研究[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2398-2406.
 ZHANG Jianhui, XU Yingying. Research on influence mechanism of negative-sequence voltage of power system on the operating characteristics of railway power conditioner[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(7): 2398-2406.

- [2] 马 茜,郭 昕,罗 培,等. 一种基于超级电容储能系统的新型 铁路功率调节器[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1208-1218.
   MA Qian, GUO Xin, LUO Pei, et al. A novel railway power conditioner based on super capacitor energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1208-1218.
- [3] 王 辉,李群湛,解绍锋,等.采用YNd-SVG的电气化铁路负序 补偿模型及控制策略[J]. 高电压技术,2021,47(5):1740-1752.
   WANG Hui, LI Qunzhan, XIE Shaofeng, et al. Negative sequence compensation model and control strategy of electrified railway with YNd tansformer and SVG[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(5): 1740-1752.
- [4] 吴传平. 电气化铁路供电系统电能质量综合补偿技术研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2012.

WU Chuanping. Research on comprehensive compensation technology for power quality of electrified railway power supply system[D]. Changsha, China: Hunan University, 2012.

- [5] 马伏军,罗 安,吴传平,等. V/V 牵引供电系统中铁路功率调节 器的控制方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(13): 63-70.
   MA Fujun, LUO An, WU Chuanping, et al. Control methods of railway static power regulator for V/V electrified traction railway[J].
   Proceedings of the CSEE, 2011, 31(13): 63-70.
- [6] HU S J, LI Y, GAO X, et al. A power factor-oriented railway power flow controller for power quality improvement in electrical railway power system single-phase back-to-back converter for active power balancing, reactive power system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, 64(2): 1167-1177.
- [7] MA F J, ZHU Z, MIN J, et al. Model analysis and sliding mode current controller for multilevel railway power conditioner under the V/v traction system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(2): 1243-1253.
- [8] ROUDSARI H M, JALILIAN A, JAMALI S, et al. Flexible fractional compensating mode for railway static power conditioner in a V/v traction power supply system[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2018, 65(10): 7963-7974.
- [9] 罗 培,陈跃辉,罗隆福,等. 铁路电能质量控制系统容量优化设计[J]. 电工技术学报, 2016, 31(8): 181-188.
   LUO Pei, CHEN Yuehui, LUO Longfu, et al. Railway power quality manage system capacity optimization design[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 181-188.
- [10] 张 鑫, 江全元. 基于 V/v 接线变压器的铁路功率调节容量配置和 能量优化补偿策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(1): 102-108. ZHANG Xin, JIANG Quanyuan. Capacity configuration of V/v transformer based railway power conditioner and optimal energy compensation strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2014, 34(1): 102-108.
- [11] 周远翔, 刘心曲, 王明渊, 等. 换流变压器损耗现场测试影响因素 及仿真[J]. 高电压技术, 2016, 42(6): 1608-1616. ZHOU Yuanxiang, LIU Xinqu, WANG Mingyuan, et al. Influence factor and simulation of the loss of the converter transformer on-site testing[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(6): 1608-1616.
- [12] 宋平岗,林家通,李云丰,等. 基于模块化多电平的铁路功率调节 器直接功率控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(9): 2511-2518. SONG Pinggang, LIN Jiatong, LI Yunfeng, et al. Direct power control strategy of railway static power conditioner based on modular multilevel converter[J]. Power System Technology, 2015, 39(9): 2511-2518.
- [13] HE L Q, ZHANG K, XIONG J, et al. A repetitive control scheme for

harmonic suppression of circulating current in modular multilevel converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(1): 471-481.

[14] 荆 龙,唐 芬,王之赫,等.基于模块化多电平换流器的牵引供
 电系统电能质量治理方法[J].电力系统自动化,2015,39(11):
 173-179.

JING Long, TANG Fen, WANG Zhihe, et al. A power compensating method for traction power supply system based on MMC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(11): 173-179.

 [15] 陈光辉. 电压波形对变压器激磁电流的影响[J]. 吉林电力技术, 1982(2): 49-52.
 CHEN Guanghui. Influence of voltage waveform on exciting current

of transformer[J]. Jilin Electric Power, 1982 (2): 49-52.

- [16] 徐千鸣,马伏军,何志兴,等.双星型多电平铁路功率调节器及其 控制方法[J]. 中国电机工程学报,2016,36(13):3609-3619.
  XU Qianming, MA Fujun, HE Zhixing, et al. Double star multi-level railway power conditioner and its control method[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3609-3619.
- [17] 张 芳,黄维持,李传栋.适用于多种子模块拓扑的 MMC 通用化 快速仿真模型[J].电力自动化设备,2019,39(5):129-136,143.
  ZHANG Fang, HUANG Weichi, LI Chuandong. General fast simulation model applicable to multiple sub-module topologies of MMC[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 129-136, 143.
- [18] 常立国, 苟锐锋, 杨晓平, 等. 适用于 MMC-HVDC 的优化均压策 略[J]. 高电压技术, 2020, 46(5): 1719-1728. CHANG Liguo, GOU Rifeng, YANG Xiaoping, et al. Optimized voltage balancing strategy for MMC-HVDC[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(5): 1719-1728.
- [19] 张建坡. 基于电压源换流器型直流输电拓扑结构和调制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1732-1738.

ZHANG Jianpo. HVDC transmission topology and modulation strategy based on voltage source converter[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1732-1738.

[20] 王晓鹏. 模块组合多电平变换器的脉冲调制方案对比[J]. 电工技 术学报, 2011, 26(5): 28-33.

WANG Xiaopeng. Comparison of pulse modulation schemes for modular multilevel converters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2011, 26(5): 28-33.



江友华

1974—, 男, 博士, 教授, 硕导 主要从事谐波、电能质量及电力系统自动化的研 究工作 E-mail: jyhua0306@sina.com

JIANG Youhua Ph.D., Professor



**杨金婉**(通信作者) 1996—, 女, 硕士生 主要从事电能质量、能源管理及电力系统自动化 的研究工作 E-mail: jinwan9604@163.com

YANG Jinwan Corresponding author

收稿日期 2020-07-27 修回日期 2021-05-20 编辑 陈 蔓