

# 非接触供电城市轨道交通车辆多路 DC/DC 变换器 跨车并联控制策略

周振邦, 王 跃, 张志学, 刘华东, 彭 赟, 吴 奕  
(中车株洲电力机车研究所有限公司, 湖南 株洲 412001)

**摘 要:** 为了解决非接触供电城市轨道交通车辆车载供电系统因各 DC/DC 变换电路输出端阻抗的差异引起的功率误差、车厢间无法统一控制以及恒流充电控制过程中各 DC/DC 变换电路不均流的问题, 文章提出了一种下垂控制方法, 其通过修正下垂系数来保障各个车厢、各个 DC/DC 变换电路的功率分配精度, 使多车无通信稳压成为可能, 且具备较好的抗扰动能力; 通过引入修正微调量, 对参考电压进行改善, 解决了功率不平衡问题; 最后提出了一种平均电流分配法, 保障了各 DC/DC 变换器电路均流。仿真与试验结果验证了所提策略的有效性。

**关键词:** 无线电能传输; DC/DC 变换器; 下垂控制; 均流

中图分类号: TP273<sup>+</sup>.1

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2021)03-0046-07

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2021.03.200

## A Control Strategy of Multichannel DC/DC Converters with Cross-vehicle Parallel Connection for Urban Rail Vehicles with Wireless Power Transfer

ZHOU Zhenbang, WANG Yue, ZHANG Zhixue, LIU Huadong, PENG Yun, WU Yi  
(CRRC Zhuzhou Institute Co., Ltd., Zhuzhou, Hunan 412001, China)

**Abstract:** A new droop control method is proposed in this paper to solve three problems, the problem of power error caused by the difference of output impedance of DC / DC circuits in the on-board power supply system of non-contact power supply urban rail vehicles, the problem that there is no unified control between carriages, and the problem that each DC/DC circuit does not share the current in the constant current charging control process, respectively. The proposed method guarantees the power distribution accuracy of each vehicle and each DC/DC conversion circuit by modifying the droop coefficient, making it possible for multi-vehicle communication and voltage stabilization, and has better anti-disturbance capability. The reference voltage is improved by introducing a modified fine adjustment to solve the problem of power imbalance. Finally an average current distribution method is proposed to ensure the current sharing of each DC/DC, and is verified by simulation and experiment.

**Keywords:** wireless power transfer(WPT); DC/DC converter; droop control; current sharing

## 0 引言

轨道交通非接触供电无线电能传输 (wireless power transfer, WPT) 技术能够解除传统弓网供电方式

受电弓与接触网之间的耦合关系, 使列车在运行过程中不存在高速受流及摩擦、振动、电弧等问题, 进一步提升了功率传输效率, 具有很好的发展前景<sup>[1-3]</sup>。

在非接触供电车辆上, 拾取线圈利用电磁感应原理首先从地面线圈中“获取”电能, 然后再经整流电路、DC/DC 电路并联在车载直流母线上, 为整车供电, 其供电过程类似于分布式电源为负载提供电能。

收稿日期: 2020-10-18

作者简介: 周振邦 (1993—), 男, 硕士, 主要从事变流器控制研发设计工作。

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFB1201002)

在给储能设备的恒流和恒压充电以及车辆运行过程中的恒压控制环节中，WPT 技术存在以下问题：

(1) 在恒流控制过程中，DC/DC 控制器根据电池管理系统 (battery management system, BMS) 传递的指令 (参考电流) 进行输出恒流控制，但由于各 DC/DC 支路上的输入阻抗不尽相同，故难以保证均流。

(2) 恒压控制过程包括给电池的恒流充电阶段以及车辆运行过程中的维持直流母线电压恒定 (给负载供电) 阶段，由于各个 Boost 电路输出端的阻抗有所差异，导致负荷功率分配精度较差、电压偏差较大<sup>[4]</sup>。

(3) 由于车辆之间 (每节车厢各 6 路 DC/DC 变换电路) 没有相互的高频通信线路，无法采用中央处理器对整列车进行统一的中央控制，需要在无须高频通信的情况下满足各车厢 DC/DC 变换器之间的负荷功率共享；对增减车厢，车上的直流母线满足“即插即用”的分布式接入的需求。

对于 DC/DC 变换器的均流，主要有电压控制与电流控制两种方式。电压控制由于实现简单、输出特性优良，得到了广泛的应用。分析各种 DC/DC 变换器的传递函数可知，Buck、半桥及全桥结构的电路由于其传递函数的零点都位于左半平面，能够很好地适用于电压控制；而 Boost 和 CUK 等结构的电路，其传递函数存在右半平面的零点，如果采用电压控制，则容易受到负载的影响 (尤其是在负载功率较大的情况下)，难以保证控制精度。文献 [5] 在电压、电流双环控制的基础上加入均流校正环，实现了对并联 Boost 电路输入电流的均流控制，取得了较好的动态响应效果；但是由于三环控制结构复杂，使得其输出特性变软，一定程度上影响了控制性能。

对于 DC/DC 变换器输出功率的均衡控制，文献 [6-7] 采用  $U-P$  下垂控制方式，实现了不依赖通信却能达到 DC/DC 变换器之间的功率均分效果，但是控制器中引入的虚拟阻抗会使得母线电压下降，并且输出线路上的阻抗也会影响功率分配的精度。文献 [8] 采用  $I-U$  下垂控制方式实现了功率的精确分配，但是同样会拉低直流母线电压。文献 [9] 采用基于传统下垂控制的电流矫正方式，解决了直流母线电压跌落问题，但是过于复杂的控制系统使得输出特性变软，功率均分的精确性不太理想。

综上所述，对于非接触供电车辆上分布式并联输出的 DC/DC 供电系统存在的 DC/DC 变换器输入均流、功率均分、母线电压稳定及无通信控制等问题，虽然已有多种控制解决方案，但是不能达到同时解决

的效果。为此，本文提出一种多路 DC/DC 跨车并联控制策略，其在车辆静止、电池恒流充电的阶段，采用一种均流控制模式来实现恒流充电时各个 DC/DC 变换器上的电流均衡；在恒压充电以及车辆运行过程中，通过动态修正电压下垂系数以应对功率波动同时实现全车的功率共享，并考虑 DC/DC 变换器输出线路上的阻抗，对各个支路的反馈电压进行下垂调节，从而实现各支路的电流均衡，达到功率精准分配的目标。

## 1 非接触供电车辆等效电路模型

非接触供电车辆含多个 DC/DC 单元，每个 DC/DC 单元含多路 Boost 电路，车上拾取线圈后多个整流器及其后端的 DC/DC 变流器共同为直流母线上的负载供电，其简化的电压源型等效电路如图 1 所示。图中，对于第  $k$  个车厢中第  $j$  个 DC/DC 变流器， $U_{\text{DC-DC}j}$  表示其输出端电压， $i_{\text{DC-DC}j}$  表示其输出电流， $R_{kvj}$  表示其引入下垂控制所等效的虚拟电阻， $R_{\text{line}j}$  表示其 DC/DC 输出线路上的等效阻抗。

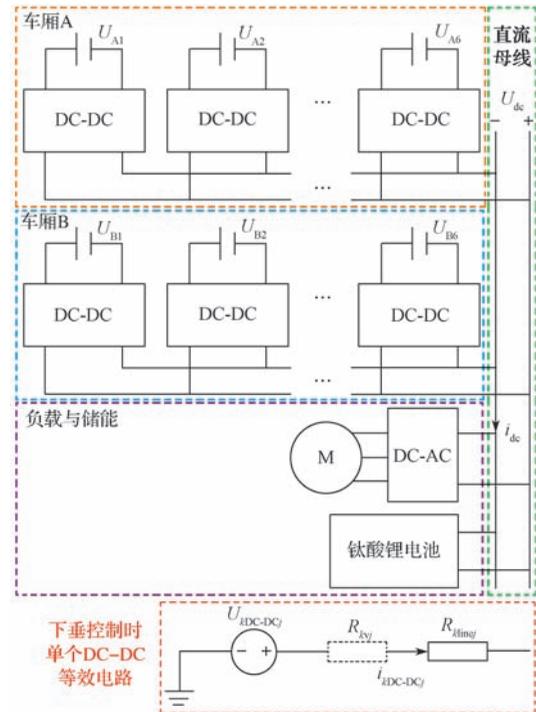


图 1 非接触供电车辆简化电路

Fig. 1 Simplified circuit of the vehicle with WPT

虚拟电阻 (下垂系数) 通常取决于直流母线电压所允许的最大扰动范围  $[u_{\text{dcmin}}, u_{\text{dcmax}}]$  以及最大的输出电流<sup>[10]</sup>，其定义如下：

$$R_{kvj} = \frac{u_{\text{dcmax}} - u_{\text{dcmin}}}{i_{\text{dcmax}}} \quad (1)$$

式中： $u_{\text{dcmax}}$ ——最大直流母线电压； $u_{\text{dcmin}}$ ——最小直

流母线电压； $i_{dcmax}$ ——最大输出电流。

由图 1 可知，采用虚拟阻抗下垂控制方式，虽然通过调节虚拟电阻能够达到电流（功率）均分的效果，但是也增加了 DC/DC 线路上的输出阻抗<sup>[11]</sup>；并且，由于车载线路较短，该虚拟电阻远大于输出线路上的实际阻抗，使得各个支路的输出功率接近一致。各个变流器与交流母线连接点处的电压  $u_{kdcj}$  计算如下：

$$u_{kdcj} = u_{kDC-DCj} - (R_{kvj} + R_{klinej}) \times i_{kDC-DCj} \quad (2)$$

由式 (2) 可知，采用该下垂控制策略线路会产生一定的压降，造成输出功率不精准。此外，在非接触供电车辆的运行过程中，各个 DC/DC 的输入电压  $U_{DC-DCj}$  会随着拾取线圈与地面线圈之间关系的变化而变化，由此造成的电压偏差会更加明显，甚至会出现环流现象<sup>[11]</sup>；同时由于车辆间没有通信线路，虚拟电阻的统一选取会带来一定的控制误差，尤其是在母线电流发生波动时，致使母线电压扰动，直接降低整个系统的动态性能。

## 2 恒压控制下的改进型下垂控制

DC/DC 变换器工作在恒压控制模式下，由于各个支路输出阻抗的差异会存在一定的功率分配不理想与压差。下垂控制模仿电机的输出曲线，使输出功率均衡，能够合理地分配各个并网变流器的输出功率；但同样也存在降低输出电压的问题，故对下垂控制进行改进，使控制器在稳压环节既能控制功率分配又能减小母线电压的跌落。

### 2.1 下垂系数动态修正方法

在 DC/DC 变换器中，虚拟阻抗下垂控制是通过类似于发电机的下垂曲线方式来实现通过降低变换器自身降低外特性以自动适应输出功率/负荷的动态变换，无须通信协调便能满足多个变换器之间的协调控制。

采用小信号的分析方法在复频域中绘制如图 2 所示采用虚拟阻抗的下垂控制框图。图中， $R_v(s)$  表示下垂控制中的虚拟阻抗； $G_u(s)$  和  $G_i(s)$  分别表示电压控制环与电流控制环的传递函数； $\Delta i_{dc}$ 、 $\Delta u_{dc}$ 、 $\Delta u_{NL}$ 、 $\Delta i_{dc\_ref}$  分别表示母线电流、母线电压、单个 DC/DC

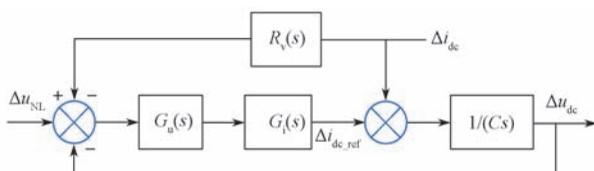


图 2 采用虚拟阻抗下垂控制框图

Fig. 2 Block diagram of virtual impedance droop control

电路空载电压以及电流环输出参考电流的扰动量； $C$  为单个 DC/DC 电路输出侧电容。

需要说明的是，电压控制环的响应速度通常远小于电流控制环的，故在此将电压环等效为一个一阶迟滞环节<sup>[12]</sup>。电压环与电流环的传递函数具体如下：

$$\left. \begin{aligned} G_i(s) &= k_p + \frac{k_i}{s} \\ G_u(s) &= \frac{1}{1 + \tau s} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中： $k_p$ ——比例系数； $k_i$ ——积分系数； $\tau$ ——时间常数。

结合图 2 中各参数间的关系，可以得到母线电压  $\Delta u_{dc}$  的传递函数：

$$\Delta u_{dc} = \frac{G_u(s)G_i(s)}{Cs + G_u(s)G_i(s)} \Delta u_{NL} - \frac{1 + R_v(s)G_u(s)G_i(s)}{Cs + G_u(s)G_i(s)} \Delta i_{dc} \quad (4)$$

根据式 (4) 可知，单个 DC/DC 电路空载电压扰动与电感电流扰动都会造成母线电压的扰动。由于空载电压扰动与控制参数（PI 参数）和电路参数有关，而电感电流扰动很大程度取决于下垂控制中的补偿阻抗  $R_v(s)$ ，故为减小母线电流对母线电压的干扰，需合理设计补偿阻抗。

要消除电流扰动对输出电压的影响，不妨令  $1 + R_v(s)G_u(s)G_i(s) = 0$ ，由此可以计算出补偿的虚拟阻抗：

$$R_v(s) = -\frac{\tau s^2 + s}{k_p s + k_i} \quad (5)$$

考虑到高次方 ( $s^2$ ) 影响较小，通常将其忽略，得到改进型的虚拟阻抗下垂控制方式，见式 (6)，由此生成电压电流双环控制的参考电压：

$$u_{dc\_ref} = V_{ref} - \left( k_d - \frac{s}{k_p s + k_i} \right) i_{dc} \quad (6)$$

式中： $k_d$ ——改进型下垂控制的下垂系数； $V_{ref}$ ——设定的控制器参考电压。

由式 (6) 可知，这种改进型下垂控制相当于在原有下垂控制的基础上并行加入一个高通滤波器，在多个车厢中的 DC/DC 供电箱并联运行时， $k_d$  可使各车厢间每个 DC/DC 电路的功率自动分配；同时叠加的“高通滤波器”可有效地应对扰动的功率，动态地修正下垂系数，进而提升车上供电系统的抗扰动能力。为了方便说明，在此将这种改进型虚拟阻抗下垂控制方式称为“下垂控制系数动态修正环节”。由此实现在无须高频通信的情况下各车厢的 DC/DC 电路间的负荷功率共享；对增减车厢，车上的直流母线能满足

“即插即用”的分布式接入需求，同时能够很好地应对电池与车上其他负载带来的功率波动。

### 2.2 考虑输出线路阻抗的功率均衡方法

在非接触供电车辆每辆车的 DC/DC 供电箱中，并联在每个直流母线上的单个 DC/DC 电路与直流母线的连接线路以及各个电路与负载之间的线路上都不可避免地会存在阻抗，如图 1 所示，为便于分析，将每个支路的单个 DC/DC 电路进行量化<sup>[13]</sup>。考虑每个 DC/DC 电路控制器中的下垂系数并忽略直流母线上的阻抗影响，则负载电压如下：

$$u_{dc} = u_{kDC-DCj} - (R_{kvj} + R_{klinej}) i_{kDC-DCj} \tag{7}$$

同时，负载电压亦可表示为

$$u_{dc} = R_{load} \left( \sum_{j=0}^N i_{A DC-DCj} + \sum_{j=0}^N i_{B DC-DCj} \right) \tag{8}$$

式中： $R_{load}$ ——车辆上的等效负载电阻； $i_{A DC-DCj}$ ——A 车厢第  $j$  个 DC/DC 电路输出电流； $i_{B DC-DCj}$ ——B 车厢第  $j$  个 DC/DC 电路输出电流。

将式 (8) 代入式 (7)，可得：

$$\mathbf{V}_m = \mathbf{R}_m \mathbf{I}_m \tag{9}$$

式 (9) 中， $\mathbf{V}_m$ 、 $\mathbf{R}_m$ 、 $\mathbf{I}_m$  分别表示各个 DC/DC 支路输出电压的矩阵、阻抗矩阵以及各个 DC/DC 输出电流矩阵，具体如式 (10)~ 式 (12) 所示。

$$\mathbf{V}_m = \begin{bmatrix} u_{ADC-DC1} \\ \vdots \\ u_{BDC-DCN} \end{bmatrix} \tag{10}$$

$$\mathbf{I}_m = \begin{bmatrix} i_{ADC-DC1} \\ \vdots \\ i_{BDC-DCN} \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\mathbf{R}_m = \begin{bmatrix} (R_{kv1} + R_{kline1} + R_{load}) & & & R_{load} \\ R_{load} & & (R_{kv2} + R_{kline2} + R_{load}) & \\ \vdots & & \vdots & \vdots \\ R_{load} & & & R_{load} \\ \dots & & & R_{load} \\ \dots & & & R_{load} \\ \dots & & & (R_{kvN} + R_{klineN} + R_{load}) \end{bmatrix} \tag{12}$$

式中： $u_{ADC-DCN}$ ——A 车厢第  $N$  个 DC-DC 电路输出电压； $u_{BDC-DCN}$ ——B 车厢第  $N$  个 DC-DC 电路输出电压； $i_{ADC-DCN}$ ——A 车厢第  $N$  个 DC-DC 电路输出电流； $i_{BDC-DCN}$ ——B 车厢第  $N$  个 DC-DC 电路输出电流。

在车辆运行过程中， $R_{load}$  是变化的，其值可由

实时测量的负载电压、电流进行计算得到， $R_{load} = u_{dc} / i_{dc}$ 。不妨先用任意两 DC/DC 支路并联至直流母线进行计算，由式 (9) 联立式 (7) 和式 (8)，可得：

$$\left. \begin{aligned} i_{kDC-DCn} &= \frac{\frac{u_{kDC-DC(n+1)}}{R_{load}} - \frac{u_{kDC-DCn} \times A}{R_{load}^2}}{1 - \frac{B \times A}{R_{load}^2}} \\ i_{kDC-DC(n+1)} &= \frac{\frac{u_{kDC-DCn}}{R_{load}} - \frac{u_{kDC-DC(n+1)} \times B}{R_{load}^2}}{1 - \frac{B \times A}{R_{load}^2}} \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

$$A = (R_{kv(n+1)} + R_{kline(n+1)} + R_{load})$$

$$B = (R_{kvn} + R_{kline(n)} + R_{load})$$

通过式 (13) 可知，合理调节各个 DC/DC 控制器的下垂系数  $R_{kvj}$ ，可使得电流保持均衡。将式 (13) 代入式 (7) 中，即可生成考虑输出线路阻抗下垂特性的 DC/DC 电路理论输出值，将其作为电压、电流双闭环控制器的输入。为了方便说明，在此将这种考虑输出线路阻抗的功率均衡方式称为“改进型下垂控制反馈电压调节环节”。

### 2.3 恒压控制模式下整体下垂控制器设计

车辆运行在恒压控制模式下，兼顾功率均衡与下垂系数动态调整的控制方法，可得到在恒压控制模式下改进型下垂控制整体控制方式，见图 3。

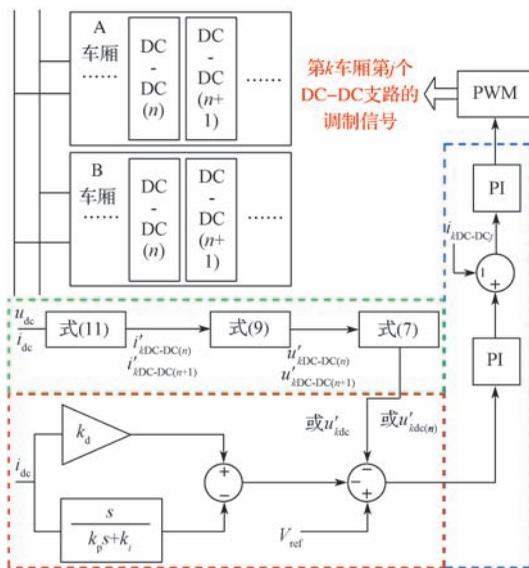


图 3 恒压控制下的整体控制框图  
Fig. 3 Overall block diagram of constant voltage control

图 3 中， $DC-DC_{(n)}$  与  $DC-DC_{(n+1)}$  表示同一节车厢两个相邻的 DC/DC 支路。绿色虚线框区域为下垂控制反馈电压调节环节，带上标“”的量表示由下垂

控制反馈量调整计算得出；红色虚线框区域为下垂控制系数动态修正环节。2个环节分别产生修正的下垂压降以及调整后的输出电压反馈量，由此既能实现无须高频通信的各车厢间 DC/DC 变换器支路的功率共享，有效应对负载扰动，又能兼顾各个 DC/DC 变换器支路的均流并保障实际期望的网压输出。需要指出的是，为了减小直流母线电压纹波，每节车厢 DC/DC 支路的三角载波之间采取依次  $(\frac{360}{N})^\circ$  的相移。

### 3 恒流控制下的改进型均流方式

车载 DC/DC 变换器主要以恒流方式给车载动力电池充电<sup>[14]</sup>。在恒流充电过程中，DC/DC 变换器的控制器接收动力电池 BMS 传来的电流指令，并以此作为参考电流  $I_{dc-ref}$  进行恒流充电控制。由于地面的供电线圈与车上的拾取线圈并不能保证每时刻都能精确对准，因此拾取线圈连接的 DC/DC 变换器支路所能输出的功率（电流）也不尽相同，若简单地将 BMS 传来的电流指令按支路均分后再进行 PI 控制，以此“强行”均流，在极端情况下可能会造成环流或出现某些支路过流的现象。为此，本文提出了一种根据各 DC/DC 变换器支路的输出电流平均值进行功率动态分配的方法，其根据各 DC/DC 变换器支路实际输出电流进行动态调节，实现按照出力程度进行均流。该方法控制原理如图 4 所示，各支路电流与所有支路电流平均值之差乘以一个比例系数后叠加到均流环的输出端，由此生成各个支路的调制波。

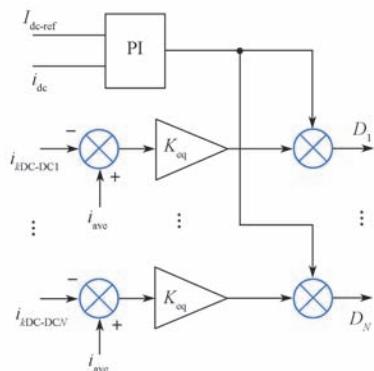


图 4 改进型均流控制框图

Fig. 4 Block diagram of the improved current sharing control

图 4 中， $i_{ave}$  为一节车厢中各 DC/DC 变换器支路的平均电流， $K_{eq}$  为各 DC/DC 变换器支路调整信号的调整比例系数， $D_1 \sim D_N$  为传给各 DC/DC 变换器支路 PWM 单元的调制输入信号。

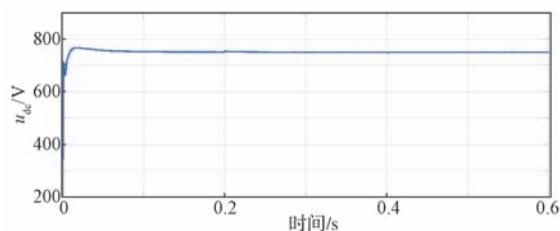
## 4 实验与仿真验证

为验证本文所提出的控制方式的有效性以及优势之处，对车辆运行在恒压、恒流模式情况分别进行仿真分析。

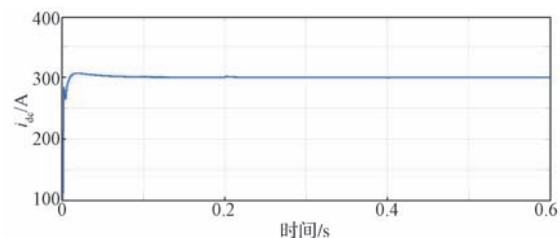
### 4.1 恒压控制模式

非接触供电车辆工作在恒压模式下，为了验证本文所提出的改进型下垂控制方式对负荷功率分配能力的影响，以及无高频通信情况下两节车厢的 DC/DC 变换器是否满足即插即用的功能要求，假设两节车厢上各有 6 条 DC/DC 变换器支路，在仿真环境中假定一种极端的情况，即在 0.2 s 时刻前，车辆第一节车厢的第一条 DC/DC 变换器支路前端的拾取线圈不在地面供电线圈供电范围内（输入电压为 0）；0.2 s 时刻后，恢复其供电功能；在 0.4 s 时刻后，车辆第二节车厢的第六条 DC/DC 变换器支路前端的拾取线圈离开地面发射线圈，第六条 DC/DC 变换器支路失电。

图 5 和图 6 分别示出采用本文所提下垂控制方式下两节车厢的输出电压、电流与 2 个 DC/DC 变换器支路的输出电流。

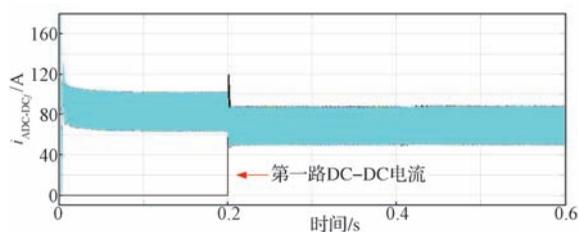


(a) 直流母线电压

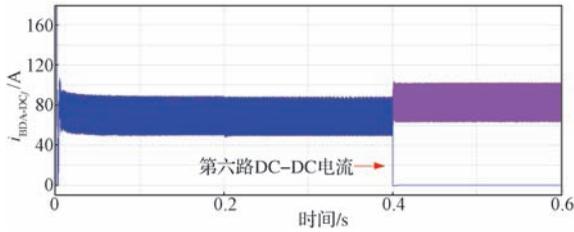


(b) 直流母线电流

图 5 恒压模式下两节车厢的直流母线电压、电流  
Fig. 5 Voltage and current of DC bus for two cars in the constant voltage control mode



(a) 车厢 1 的 DC/DC 支路输出电流



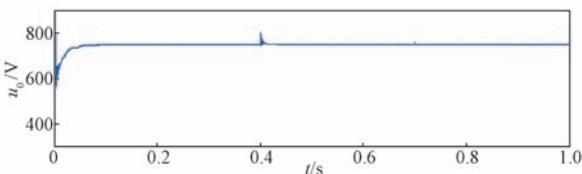
(b) 车厢 2 的 DC/DC 支路输出电流

图 6 恒压模式下两个车厢各条 DC/DC 支路输出电流波形

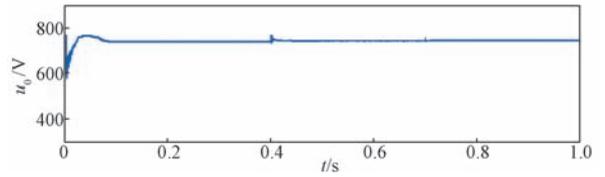
Fig. 6 Output current waveform of each DC/DC branch of two cars in the constant voltage control mode

由图 5 可以看出，在恒压模式下，由于采用了下垂系数修正的方式，在“电源”突增或突减的情况下，于 0.2 s 和 0.4 s 时刻前后都能维持母线电压和电流的稳定，并且只产生很小的波动，体现出较好的“即插即用”的效果。由图 6 可知，在 0.2 s 时刻前，由于第一节车厢第一条 DC/DC 变换器支路的拾取线圈无电能，故因欠压保护而并未工作，但由于恒压控制器具有功率均衡的作用，主动提升了其他 5 个支路的输出电流；同样，当第二个车厢第六条 DC/DC 支路无输入时，该车厢另 5 条 DC/DC 支路电流也相应地提升，并且切换过程中并未出现较大的电流尖峰，由此很好地展现了负荷动态分配的功能与抗扰动的能力。

为了验证存在线路阻抗的情况下采用本文所提策略的 DC/DC 供电系统具有应对负载突增、突减的功率均衡能力与抗扰动能力，以两个并联输出的 DC/DC 电路为仿真对象，两个 DC/DC 电路的输出线路阻抗分别为  $0.2 \Omega$  与  $0.9 \Omega$ ，在 0.4 s 时刻由额定负载突变为 2 倍额定负载，在 0.7 s 时刻突变至 3 倍额定负载，并与传统的双闭环 PI 控制算法对比，其仿真波形如图 7 和图 8 所示。图中， $u_0$  为直流母线电压（对应前文中的  $u_{dc}$ ）， $i_{out}$  为 DC-DC 电路输出电流。由图可以看出，采用改进型下垂控制后，输出并联的 DC/DC 电路输出的母线电压在负载突变时具有更好的暂态特性，能够很快地恢复和稳定状态。对比两个 Boost 电路上的电流，采用改进型下垂控制在短暂的波动后，其能够保持均衡；而采用传统的 PI 控制时，由于未考虑输出线路阻抗的影响而无法使两个 DC/DC 电路均流，由此验证了本文所提出的改进型下垂控制的优越性。



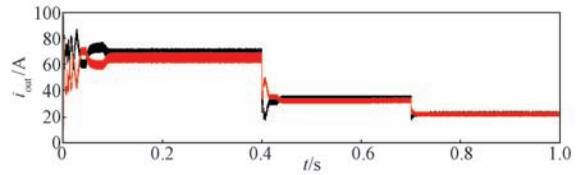
(a) 双闭环 PI 控制



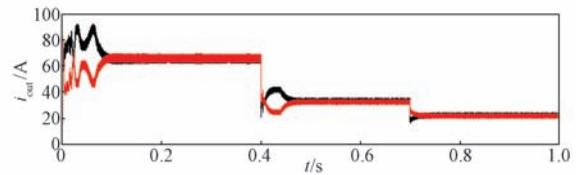
(b) 改进型下垂控制

图 7 两种控制方式下母线电压对比波形

Fig. 7 Waveform comparison of the bus voltages under two control modes



(a) 双闭环 PI 控制



(b) 改进型下垂控制

图 8 两种控制方式下的电流对比波形

Fig. 8 Waveform comparison of the currents under two control modes

### 4.2 恒流控制模式

假设车辆正在给动力电池恒流充电，在仿真环境中模拟一节车厢中的 6 条 DC/DC 支路的前端拾取线圈不全对准地面发射线圈，6 条 DC/DC 支路的输入电压各不相同，同时 6 条 DC/DC 支路的输出端线路阻抗也各不相同的工况。在给电池恒流充电过程中，前 0.2 s 采用传统电流环 PI 控制，0.2 s 之后切换为本文所提出的改进均流控制方式；6 条 DC/DC 支路的输出电流波形如图 9 所示。可以看出，由于输入电压相差迥异，输出线路上的阻抗也不尽相同，在 0.2 s 时刻前，6 路 DC/DC 电路输出并不均流，且启动时还有环流的现象，在 0.2 s 时刻后切换成改进型均流控制方式，6 路电流基本达到了均流的要求，证明了本文所提的改进型均流控制方式的优越性。

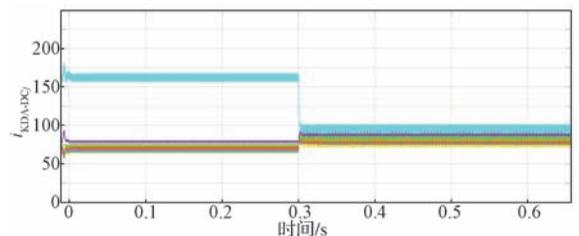


图 9 恒流控制模式下 6 路 DC/DC 支路输出电流波形  
Fig. 9 Output current waveforms of six DC/DC circuits in the constant current control mode

## 5 结语

针对在非接触供电的城市轨道交通车辆系统恒流与恒压控制过程存在的多支路 DC/DC 均流、稳压以及功率分配等问题,本文采用叠加修正系数的下垂控制方法,不仅能精准地分配功率,还能有效应对扰动,使得车辆上的各个 DC/DC 支路对于直流母线的“即插即用”成为可能,很好地适应了非接触供电车辆的运行工况。为有效应对因 DC/DC 输出端线路阻抗不一致而导致的功率误差与不均流的问题,通过在线自动实时测量并计算电压下垂环节的微量,使输出达到均衡。在恒流控制环节,采用一种电流平均值调节的方式使各 DC/DC 支路在车辆运行与静态充电的工况下达到均流的效果。由于本文的下垂控制策略没有考虑动力电池容量及荷电状态 (state of charge, SOC) 的影响,车辆长期运行会对动力电池的寿命有一定的影响,进而增加动力电池的故障率。若能将动力电池的 SOC 融入下垂虚拟阻抗的变化与计算中,使控制系统直接控制 SOC,则能加强对动力电池的管理力度,有利于延长电池的使用寿命,这是我们下一步的研究方向。

### 参考文献:

- [1] BRECHER A, ARTHUR D. Review and evaluation of wireless power transfer ( WPT ) for electric transit applications[J]. Human Factors the Journal of the Human Factors and Ergonomics Society, 2014, 49(5) : 832-841.
- [2] WINTER J, MAYER S, KAIMER S, et al. Inductive power supply for heavy rail vehicles[C]//2013 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC). Nuremberg, Germany: IEEE, 2013: 1-9.
- [3] 麦瑞坤,李勇,何正友,等.无线电能传输技术及其在轨道交通中研究进展 [J].西南交通大学学报,2016,51(3): 446-461.  
MAI R Q, LI Y, HE Z Y, et al. Wireless Power Transfer Technology and Its Research Progress in Rail Transportation[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2016, 51(3): 446-461.
- [4] VANDOORN T L, MEERSMAN B, DEGROOTE L, et al. A control strategy for islanded microgrids with DC-link voltage control[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2011, 26(2): 703-713.
- [5] LIN C S, CHEN C L. Single-wire current-share paralleling of current-mode-controlled DC power supplies[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(4): 780-786.
- [6] XIA Y H, WEI W, PENG Y G, et al. Decentralized coordination control for parallel bidirectional power converters in a grid-connected DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 9(6): 6850-6861.
- [7] JIN C, WANG P, XIAO J, et al. Implementation of hierarchical control in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 4032-4042.
- [8] 杨捷,金新民,吴学智,等.一种适用于直流微电网的改进型电流负荷分配控制策略 [J].中国电机工程学报,2016,36(1): 59-67.  
YANG J, JIN X M, WU X Z, et al. An improved current load distribution control strategy for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 59-67.
- [9] 李祥山,杨晓东,张有兵,等.含母线电压补偿和负荷功率动态分配的直流微电网协调控制 [J].电力自动化设备,2020,40(1): 198-204.  
LI X S, YANG X D, ZHANG Y B, et al. Coordinated control of DC microgrid considering bus voltage compensation and load power dynamic sharing[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 198-204.
- [10] 支娜,张辉,肖曦.提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究 [J].电工技术学报,2016,31(3): 31-39.  
ZHI N, ZHANG H, XIAO X. Research on the improved droop control strategy for improving the dynamic characteristics of DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 31-39.
- [11] 游江,孟繁荣,张敬南.基于回路成形的并联 DC/DC 变换器均流控制器设计 [J].中国电机工程学报,2019,39(2): 585-593, 655.  
YOU J, MENG F R, ZHANG J N. Loop-shaping based current sharing controller design for parallel DC/DC converters[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(2): 585-593, 655.
- [12] 杜雄,卢昊,周维维.平均电流控制三相直流感测并联型有源电力滤波器 [J].中国电机工程学报,2009,29(33):47-53.  
DU X, LU X, ZHOU L W. Average current control of three-phase DC link parallel active power filter[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(33): 47-53.
- [13] 张宸宇,梅军,郑建勇,等.一种适用于低压微电网的改进型下垂控制器 [J].电力自动化设备,2015,35(4): 53-59.  
ZHANG C Y, MEI J, ZHENG J Y, et al. Improved droop controller for low-voltage microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 53-59.
- [14] 杨帆,乔艳龙,甘德刚,等.不同充电模式对锂离子电池极化特性影响 [J].电工技术学报,2017,32(12): 171-178.  
YANG F, QIAO Y L, GAN D G, et al. Lithium-ion battery polarization characteristics at different charging modes[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(12): 171-178.