



**湖南大学 -  
基于可变结构网侧变流器的多流制机车直流电压匹  
配和纹波抑制方法**

## 用户与研究成果简介：

湖南大学许加柱老师的科研团队针对多流制机车牵引传动系统直流环节电压与多制式牵引网电压不匹配的问题，提出了一种基于可变结构网侧变流器的直流电压匹配和纹波抑制方法。该方法基于设备复用思想，将网侧变流器在直流供电制式中复用作多重化升降压斩波器，在不增加设备体积和重量的前提下，实现了多流制机车运行全过程中直流环节电压的稳定控制。该研究利用上海远宽的 StarSim 电力电子小步长实时仿真器进行实验，实验结果验证了所提方法和控制算法的有效性，并将研究成果发表于 SCI 1 区《IEEE Transactions on Power Electronics》：

J. Xiang, J. Xu, H. Wang, C. Li, G. Cui and Y. Peng, "Reconfigurable Line-side Converter for DC Voltage Matching and Ripple Suppression in Multisystem Locomotives," in IEEE Transactions on Power Electronics. DOI: 10.1109/TPEL.2020.3026682

## 课题研究的背景

### 多流制机车直流电压匹配问题的研究背景与意义

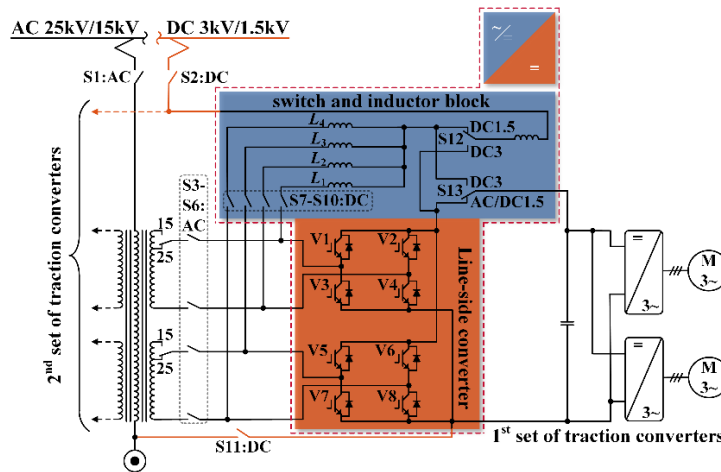
多流制电力机车牵引传动系统能够运行于多种牵引供电制式，实现电力机车跨国、跨区域和跨制式运行，从而节省换乘时间和建设成本。多流制机车的网侧变流器用于实现不同牵引网电压与直流环节电压的匹配。对于多流制电力机车，直流环节电压的设计值大小受牵引电网电压、系统效率和牵引性能要求等多个约束条件的限制，以交流 25kV/50Hz 牵引传动系统为例，其中间直流环节额定电压一般在 1.8-3.6kV 间的某一定值。而在直流牵引供电制式条件下，牵引网额定电压为直流 3.0kV 或 1.5kV，且实际多流制电力机车的并网点一般位于牵引网线路末端，末端电压在较大范围内波动。当多流制电力机车从无电区并入直流牵引供电系统时，车载直流环节电压与牵引网直流电压的不匹配会造成较大冲击电流，严重影响并网的可靠性。另外，为了降低绝缘等级，多流制电力机车牵引传动系统中的牵引电机在 3.0kV 直流牵引供电制式下采用三角形接线；而为了降低损耗，在 1.5kV 直流牵引供电制式下采用星形接法，使得牵引电机的接线更为复杂。针对上述问题，急需一种能实现直流牵引电压与牵引逆变器直流侧电压自适应匹配的方法，且尽可能不增加额外设备，以满足多流制电力机车牵引传动系统集成化和轻量化的发展需求。

## 研究重要内容和创新点

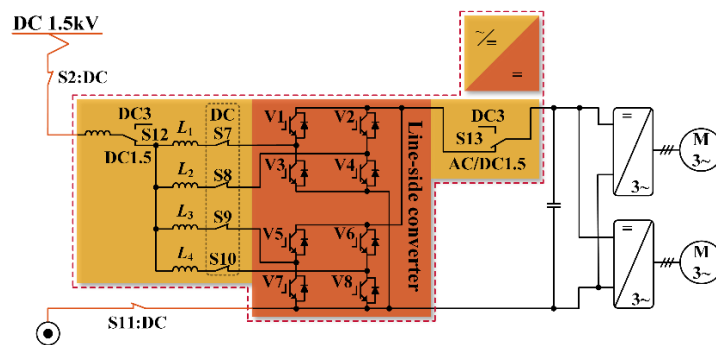
### 可变结构的网侧变流器拓扑

当多流制电力机车从交流牵引供电制式切换至直流牵引供电制式再并网时，直流牵引网电压额定值为 3.0 kV 或 1.5 kV，而牵引传动系统直流环节额定电压位于 1.8-3.6 kV 之间，两者电压存在严重的不匹配问题，若不采用有效的控制策略，必然引起并网冲击电流。

本研究基于设备复用的思想，将牵引传动系统的四象限变流器用作直流并网的前端升降压斩波器，以实现直流环节电压与直流牵引网电压的匹配。考虑到四象限变流器的工作频率在 450-500 Hz 之间，单个变流器工作会造成较大的电流纹波，因此，基于交错并联消除纹波技术，提出基于四重化交错并联斩波器的直流并网电压匹配技术。图 1(a)给出了本技术方案的系统拓扑结构。网侧变流器的变结构设计，使其在直流牵引网电压低于直流环节电压时，用作四重化交错并联升压斩波器，如图 1(b)所示；当直流牵引网电压高于直流环节电压时，用作四重化交错并联降压斩波器，如图 1(c)所示。



(a)



(b)

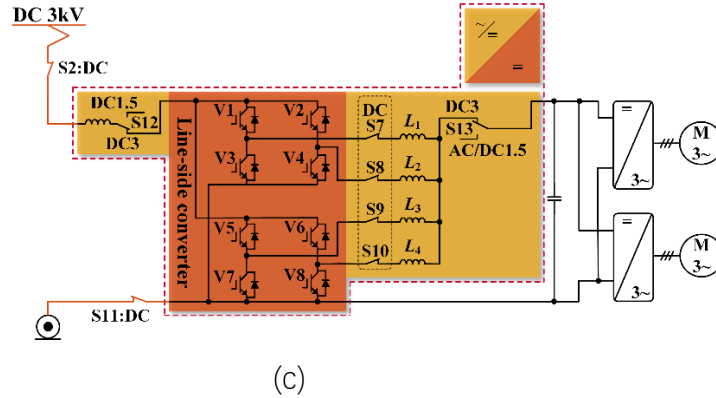


图 1 基于可变结构网侧变流器的直流并网电压匹配技术方案：(a)系统整体结构；(b)1.5 kV 供电制式下的变结构；(c)3.0kV 供电制式下的变结构

### 系统小信号建模与控制器设计

在直流牵引供电制式中，可变结构的网侧变流器复用作为前级斩波器。通过建立系统的小信号模型获得变流器的频率响应从而设计系统控制器。

当多流制机车运行于直流 1.5kV 供电制式，可变结构的网侧变流器运行于四重化交错并联升压斩波器模式，其小信号等效电路模型如图 2 所示。

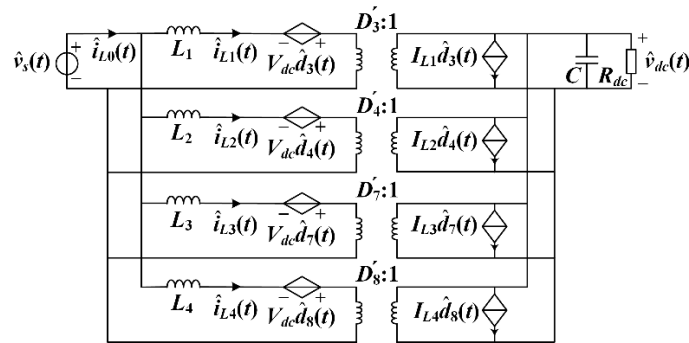


图 2 四重化交错并联升压斩波器的小信号等效电路模型

得到从占空比到单相电感电流的传递函数，以及从总电感电流到输出直流电压的传递函数分别为：

$$G_{idboost}(s) = \left. \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_s=0} = \frac{V_{dc}(Cs+2/R_{dc})}{LCs^2 + (L/R_{dc})s + 4D'^2} \quad (1)$$

$$G_{viboost}(s) = \left. \frac{\hat{v}_{dc}(s)}{\hat{i}_{L0}(s)} \right|_{\hat{v}_s=0} = \frac{D' - Ls / (4D'R_{dc})}{Cs+2/R_{dc}} \quad (2)$$

其中  $i_L$ 、 $D_i$ 、 $V_s$  和  $V_{dc}$  分别为电感电流、占空比、网侧电压和直流侧输出电压的稳态值， $D'_i = 1 - D_i$ ；

$\hat{i}_{L_i}(t)$ 、 $\hat{d}_i(t)$ 、 $\hat{v}_s(t)$  和  $\hat{v}_{dc}(t)$  分别表示相应的扰动量。

当多流制机车运行于直流 3.0kV 供电制式，可变结构的网侧变流器运行于四重化交错并联降压斩波器模式，其小信号等效电路模型如图 3 所示。

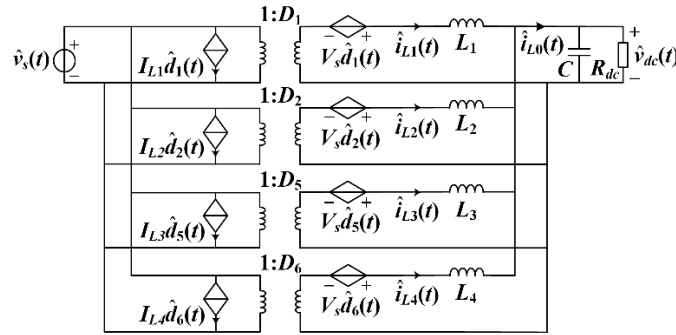


图 3 四重化交错并联降压斩波器的小信号等效电路模型

得到从占空比到单相电感电流的传递函数，以及从总电感电流到输出直流电压的传递函数分别为：

$$G_{idbuck}(s) = \left. \frac{\hat{i}_L(s)}{\hat{d}(s)} \right|_{\hat{v}_s=0} = \frac{V_{dc}(Cs+1/R_{dc})/D}{LCs^2 + (L/R_{dc})s + 4} \quad (3)$$

$$G_{vibuck}(s) = \left. \frac{\hat{v}_{dc}(s)}{\hat{i}_{L0}(s)} \right|_{\hat{v}_s=0} = \frac{1}{(Cs+1/R_{dc})}. \quad (4)$$

其中  $I_{L_i}$ 、 $D_i$ 、 $V_s$  和  $V_{dc}$  分别为电感电流、占空比、网侧电压和直流侧输出电压的稳态值， $D'_i = 1 - D_i$ ； $\hat{i}_{L_i}(t)$ 、 $\hat{d}_i(t)$ 、 $\hat{v}_s(t)$  和  $\hat{v}_{dc}(t)$  分别表示相应的扰动量。

在升压模式和降压模式，网侧变流器均采用双环控制，其中各相电感电流单独控制以消除由于电路参数不平衡带来的影响。四重化交错并联升降压斩波器的控制策略如图 4 所示。可根据控制系统的稳定性要求和响应速度要求设计相应的控制参数。

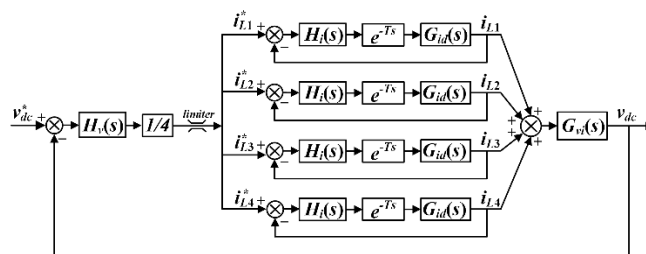


图 4 四重化交错并联升降压斩波器的控制框图

## 结构切换控制策略

在供电制式的切换过程中，网侧变流器的结构变换通过改变图 1 中的开关状态来实现。图 5 所

示为结构切换的控制流程图，展示了通过机车运行状态来确定各个开关的状态。其中  $G_1-G_4$  为传感器检测到的制式切换过程中的位置信号。 $V_{prev}$  和  $V_{next}$  分别代表当前和即将进入的牵引供电制式，从而决定当前和即将切换的结构。通过执行该切换控制策略，可以得到各开关状态的多种组合。每种组合下各个开关的状态列于表 1。

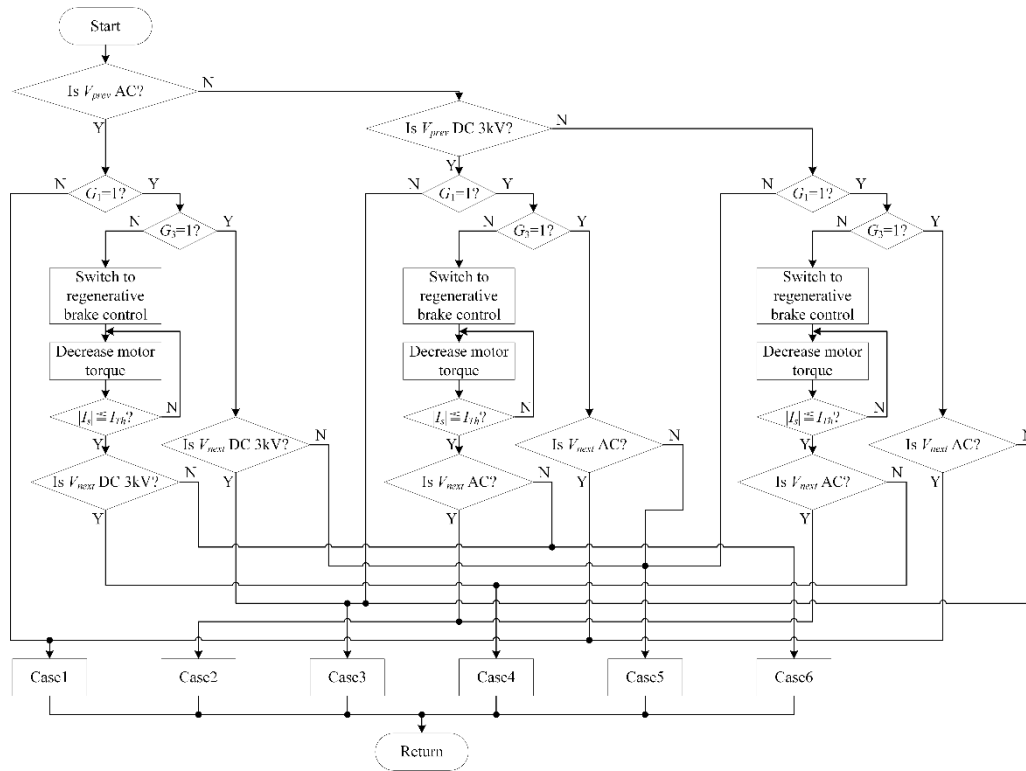


图 5 结构切换控制流程图

表 1 各开关指令组合下的开关状态

| Case | S1  | S2  | S3-S6 | S7-S10 | S11 | S12 DC 1.5 | S12 DC 3 | S13 DC 3 | S13 AC/DC 1.5 |
|------|-----|-----|-------|--------|-----|------------|----------|----------|---------------|
| 1    | on  | off | on    | off    | off | off        | off      | off      | on            |
| 2    | off | off | on    | off    | off | off        | off      | off      | on            |
| 3    | off | on  | off   | on     | on  | off        | on       | on       | off           |
| 4    | off | off | off   | on     | on  | off        | on       | on       | off           |
| 5    | off | on  | off   | on     | on  | on         | off      | off      | on            |
| 6    | off | off | off   | on     | on  | on         | off      | off      | on            |

## 基于实时仿真器的算法验证

### 基于小步长实时仿真对所提方法的验证

远宽能源 (www.modeling-tech.com) 提供的 StarSim 实时仿真器，基于电力电子器件的细节模型，利用最新的 FPGA 技术，可以实现 1 微秒步长、任意拓扑、任意工况的电力电子系统实时仿真，被广泛应用于牵引供电系统故障诊断、控制策略验证、可再生能源并网、电机驱动等的

实时仿真中。湖南大学的科研团队就采用了 StarSim 电力电子实时仿真器来进行所提出的基于可变结构网侧变流器的直流电压匹配和纹波抑制方法的验证。

图 6 为采用上海远宽能源 StarSim 仿真器搭建的测试平台。其中可变结构网侧变流器主电路部分利用 StarSim FPGA Solver 按 1 微秒的步长实时仿真；变结构和电压匹配控制算法运行在 RCP 控制器上；实时仿真器和快速原型控制器通过真实的物理 IO 互连。

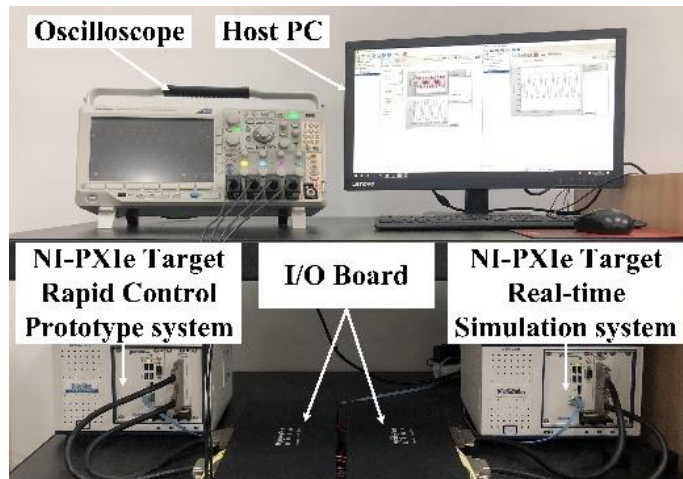


图 6 基于 StarSim 的仿真测试平台

图 7 为升压模式时网侧电压波动和负载变化情况下输入电压  $v_s$ ，输入电流  $i_s$ ，直流环节电压  $v_{dc}$  和输出电流  $i_o$  的实验波形。图 8 为降压模式时网侧电压波动和负载变化情况下输入电压  $v_s$ ，输入电流  $i_s$ ，直流环节电压  $v_{dc}$  和输出电流  $i_o$  的实验波形。从波形可见四重化升压斩波器和四重化降压斩波器在牵引网压波动和负载变化时均能输出稳定的直流环节电压，且具有良好的动态响应和抗干扰能力。

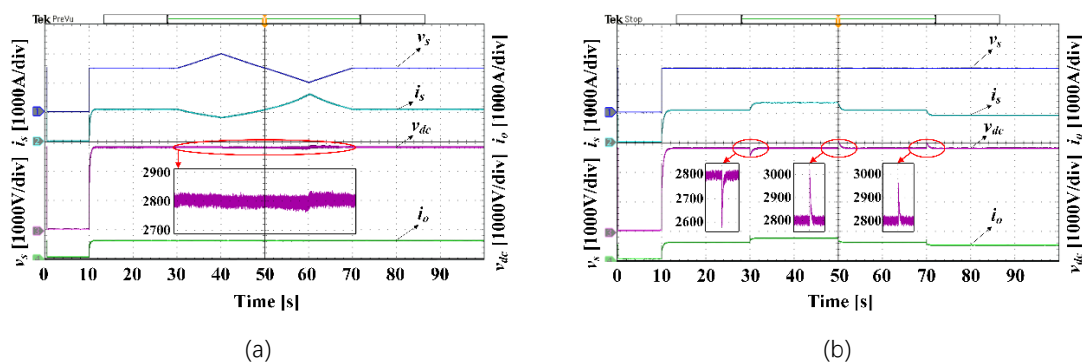


图 7 升压模式的实验波形：(a)网侧电压波动工况；(b)负载变化工况



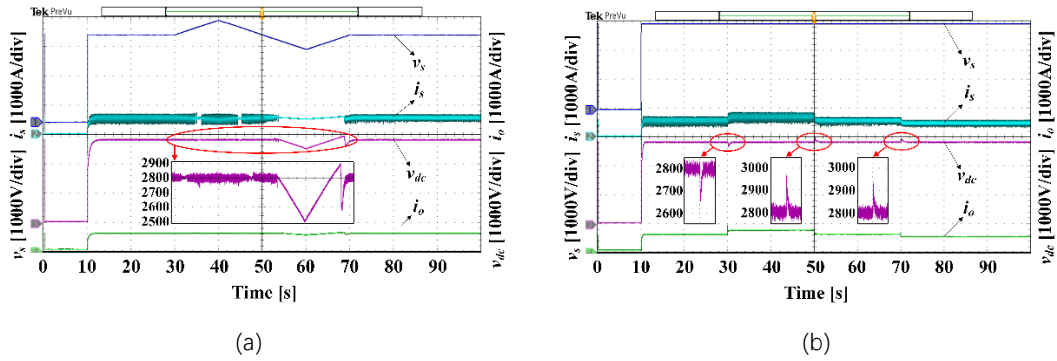


图 8 降压模式的实验波形: (a)网侧电压波动工况; (b)负载变化工况

图 9 所示为供电制式从交流, 切换到直流 1.5kV, 再切换到直流 3.0kV 过程中的输入电压  $v_s$ , 输入电流  $i_s$ , 直流环节电压  $v_{dc}$  和输出电流  $i_o$  的实验波形。从实验结果可以看出, 网侧变流器可以根据供电制式进行结构切换, 并且在不同供电制式下维持直流环节电压在稳定范围内。

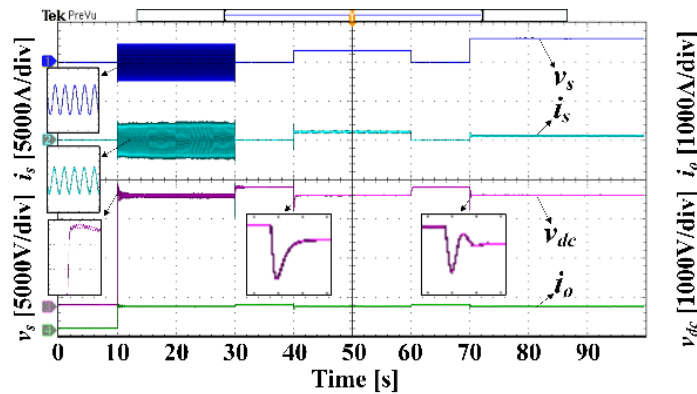


图 9 供电制式切换过程的实验波形

通过上海远宽的 StarSim 半实物电力电子实时仿真平台, 验证了所提方法能够在不同供电制式和切换过程实现直流环节电压的匹配和稳定控制。