



北方工业大学-

基于鲁棒残差生成器的多 DC-DC 下垂动态补偿控制策略

用户与研究成果简介：

双向 DC-DC 变换器是连接储能系统和直流母线的桥梁，通常采用双闭环控制维持直流母线电压恒定和系统的功率平衡。在孤岛直流微网中，为便于实现系统的扩容和功率共享，通常在双闭环控制的基础上引入下垂控制。然而，传统直流下垂控制无法快速消除负荷投切和分布式电源等引起的母线电压波动。

北方工业大学电气与控制工程学院胡长斌副教授所在团队针对直流母线电压波动和多变换器并联出现的环流问题，提出了基于鲁棒残差生成器的多 DC-DC 下垂动态补偿控制策略（包括基于鲁棒残差生成器的电压动态补偿结构和扰动分配策略），并基于扰动分配系数获取电压偏移量，从而实现多变换器并联系统中母线电压的动态补偿。

本文研究人员利用了上海远宽能源公司的 StarSim 电力电子实时仿真器来进行硬件在环实时仿真实验；通过硬件在环仿真的实验波形验证了所提方法的有效性，成果总结发表于《中国电机工程学报》：

胡长斌，王海鹏，周京华等，基于鲁棒残差生成器的多 DC-DC 下垂动态补偿控制策略[J].中国电机工程学报. 网络首发，2020 年 4 月。

课题研究背景

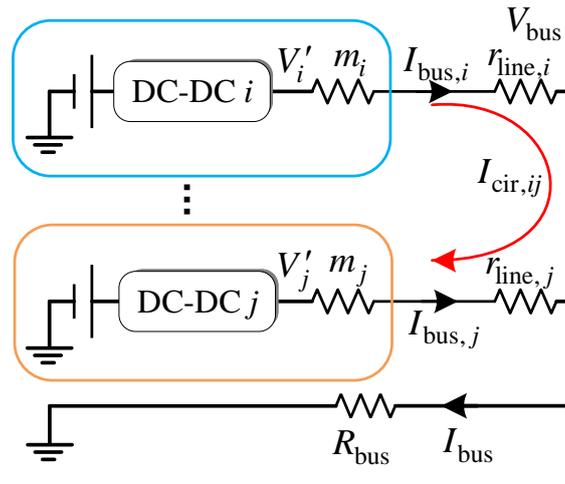
直流母线电压波动及环流问题

在孤岛直流微电网中，通过对变换器的控制实现母线电压的稳定。直流母线电压波动的主要原因有：

- (1) 负荷/分布式电源投切等引起的电压过冲、跌落；
- (2) 分布式电源输出功率波动；
- (3) 交流侧三相不平衡使直流母线出现二倍工频的波动；
- (4) 交流侧谐波使直流母线电压出现的波动。

.....

本文各 DC-DC 变换器采用直流 V-I 下垂控制实现功率共享，多变换器并联的等效结构如下图所示。



由图推导可得各变换器的环流表达式：

$$\begin{cases} I_{cir,1} = \frac{(V'_1 - V'_2)}{R_1 + R_2} + \frac{(V'_1 - V'_3)}{R_1 + R_3} + \dots + \frac{(V'_1 - V'_j)}{R_1 + R_j} \\ I_{cir,2} = \frac{(V'_2 - V'_1)}{R_2 + R_1} + \frac{(V'_2 - V'_3)}{R_2 + R_3} + \dots + \frac{(V'_2 - V'_j)}{R_2 + R_j} \\ \vdots \\ I_{cir,j} = \frac{(V'_j - V'_1)}{R_j + R_1} + \frac{(V'_j - V'_2)}{R_j + R_2} + \dots + \frac{(V'_j - V'_{j-1})}{R_j + R_{j-1}} \end{cases}$$

由式可知，对于直流系统，环流产生的本质原因是各变换器等效输出电压不等，若能够减小扰动电流对输出电压的影响，即可减少环流的影响。

研究重要内容和创新点

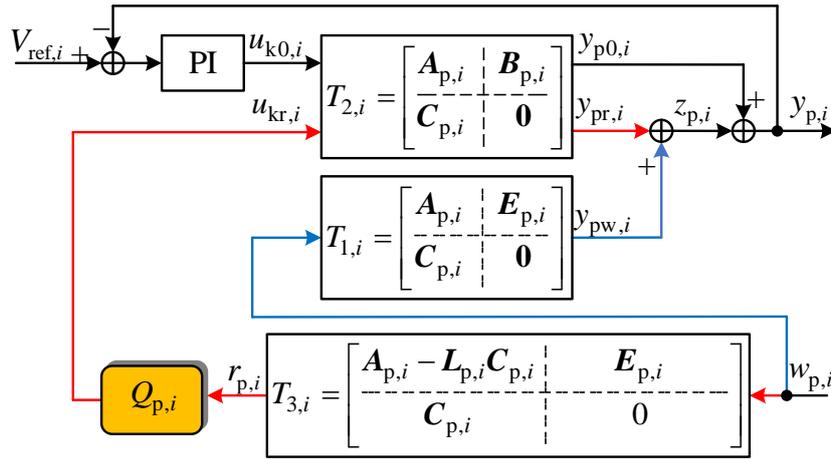
基于鲁棒残差生成器的多 DC-DC 下垂动态补偿控制

基于鲁棒残差生成器的控制结构

定理 1：给出被控对象 $G(s)$ 的控制环和一个由现有控制器 $K(s)$ 提供的控制信号 u_0 ，该控制环内部稳定，则所有内部稳定的控制器可以被参数化为：

$$u(s) = u_0 + Q(s)r$$

经过一系列推导可得基于鲁棒残差生成器的控制结构。



电压环补偿控制器的求解

当 $w_{p,i}$ 出现时，若 $y_{pr,i}$ 与 $y_{pw,i}$ 之和立刻为 0，则 $w_{p,i}$ 被抑制，这是一个典型的模型匹配问题，即寻找一个合适的控制器 $Q_{p,i}$ ，使得 $z_{p,i}$ 趋近于 0。理想情况下， $Q_{p,i}$ 的表达式为：

$$Q_{p,i} = \frac{-Z_{LC,i}s^2 - Z_{RC,i}s - Z_{LC,i}l_{1,i}s - Z_{RC,i}l_{1,i} - L_{t,i}l_{2,i} - 1}{(\eta s + 1)^2}$$

对于非最小相位系统，可应用线性矩阵不等式进行求解。

电流环补偿控制器的求解

当 $w_{p,i}$ 出现时， $Q_{p,i}$ 迅速输出一个补偿信号 $u_{kr,i}$ ，该补偿信号通过增大电感电流 $i_{L,i}$ 抵消扰动 $w_{p,i}$ 的影响，从而保持变换器输出电压恒定。当闭环系统采用单环控制时，引入 $Q_{p,i}$ 即可实现扰动抑制。然而在双闭环控制下，电感电流 $i_{L,i}$ 同时作为反馈量存在， $i_{L,i}$ 的变化使得电流环输入 $e_{i,i}$ 发生变化，即原控制器的输出发生变化。因此需设计电流环补偿控制器 $H_{p,i}$ 抵消 $Q_{p,i}$ 带来的二次扰动，经过分析可得：

$$H_{p,i} = \frac{1}{L_{t,i}s + R_{t,i}}$$

扰动分配策略

两个补偿控制器通过控制快速改变电感电流从而提升 DC-DC 变换器的动态响应速度，并不影响扰动电流的稳态值，即 $Q_{p,i}$ 和 $H_{p,i}$ 的引入不影响直流下垂特性，因此该结构可直接应用于采用下垂控制的并联系统。并将扰动分为内部扰动和外部扰动。内部扰动由各变换器本地负载投切产生，由该本地负载所在的变换器对其实现电压补偿。外部扰动由公共负载投切、分布式

电源波动等操作产生，由各个变换器协调实现电压的动态补偿。当多个变换器并联运行时，可利用最小公倍数的方法计算出稳态时各变换器输出电流的稳态关系，由此可以得到各台变换器的扰动表达式：

$$w_{p,i} = \frac{f_i}{\sum_{n=1}^i f_n} I_{\text{bus}} + I_{\text{loc},i}$$

通过扰动分配系数可直接获取电压偏移量的表达式：

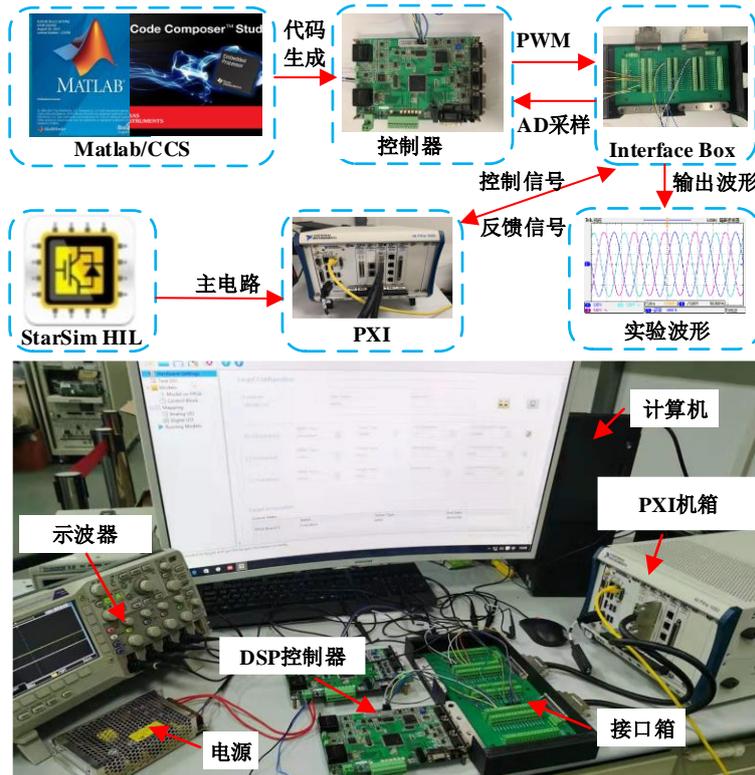
$$\Delta_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^i f_i} I_{\text{bus}} R_i$$

基于实时仿真器的算法验证

基于实时仿真验证的多 DC-DC 下垂动态补偿控制方法验证

为了验证提出的基于鲁棒残差生成器的多 DC-DC 下垂动态补偿控制，北方工业大学的研究团队基于硬件在环仿真实验来验证他们的分析结论；硬件在环仿真实验的方法利用实时仿真器来模拟实物行为，它可以同真实控制器构成一个非常接近真实的闭环系统，同时相对实物系统，硬件在环系统可以很容易地进行各种危险的极限工况和失稳工况的实验验证；硬件在环仿真是进行并网整流器稳定性分析验证理想实验方式。

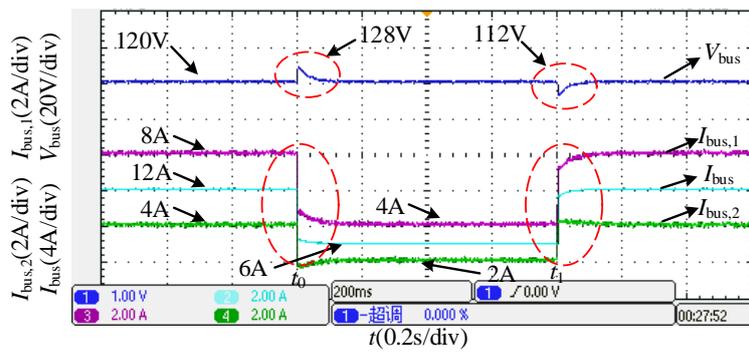
远宽能源（www.modeling-tech.com）提供的电力电子实时仿真器，基于电力电子器件的细节模型，利用最新的 FPGA 技术，可以实现 1 微秒步长、任意拓扑、任意工况的电力电子系统实时仿真，被广泛应用于电力电子与电机驱动系统的控制策略验证、故障工况测试等用途中。北方工业大学的研究团队采用上海远宽的 StarSim 电力电子实时仿真器来进行硬件在环实时仿真验证，其中直流微电网拓扑是利用 StarSim FPGA Solver 在 FPGA 上实时仿真，仿真器和 DSP 控制器通过真实物理 IO 相连，详见下图：



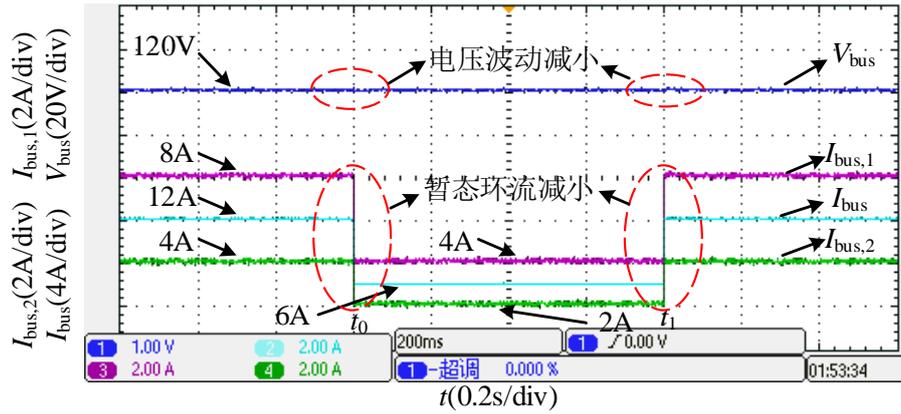
所提控制方法的实时仿真实验波形

公共负载投切实验对比

实时仿真实验波形:



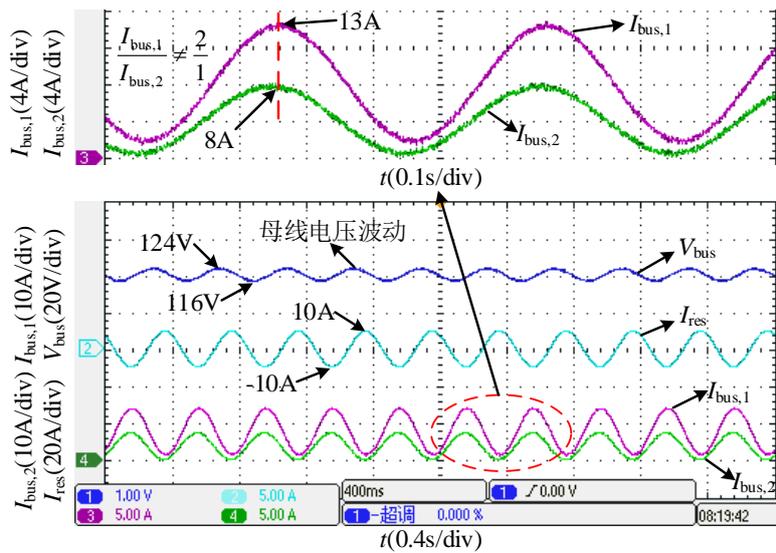
(a) 传统下垂控制



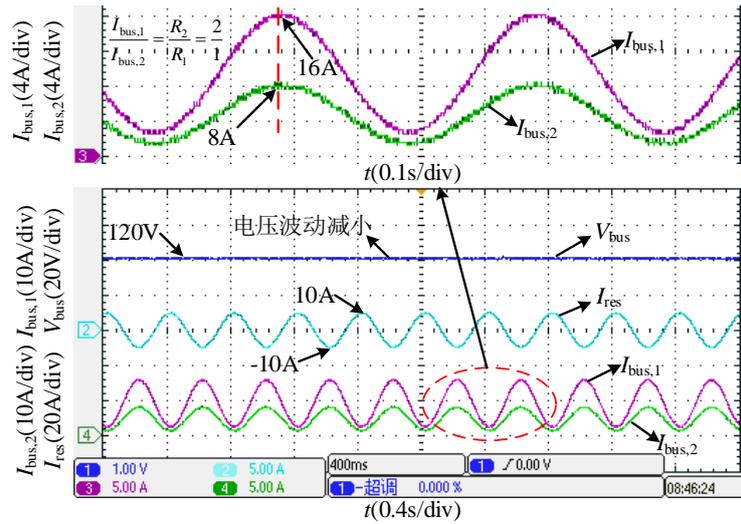
(b) 所提控制

通过对比可知，当公共负荷投切时，采用所提控制策略下的 V_{bus} 和 I_{bus} 能够更快地到达稳态。此外，所提控制策略也可有效减少公共负荷投切引起的环流。

分布式电源输出功率波动实验对比



(a) 传统下垂控制



(b) 所提控制

对比可知，在公共母线功率波动的情况下，传统直流下垂控制下的公共母线电压出现了 $\pm 4V$ 的电压波动；而提出的控制策略能够有效地抑制分布式电源波动引起的母线电压波动。此外，相比于传统下垂控制，所提控制策略能够在公共母线功率波动的情况下保证 $I_{bus,1}$ 和 $I_{bus,2}$ 在任意时刻按比例分配。

总结

所提方法可以有效的抑制由本地负荷投切等产生的内部扰动和由公共负荷投切、分布式发电输出功率波动等产生的外部扰动，减小由交流侧负荷三相不平衡导致的母线电压二倍工频波动，实现母线电压的动态补偿，同时减小了各变换器间的暂态环流。

更多详细的理论分析结果和实验波形，还请参考北方工业大学的研究团队文献。