



大连海事大学-

基于线路阻抗补偿的直流微源并联均流控制策略

用户与研究成果简介：

大连海事大学刘彦呈教授的科研团队提出了一种基于线路阻抗补偿的直流微源并联均流控制策略，该方法利用改进频率注入法的反馈机制使各变流器总等效下垂系数相等且为最小线路阻抗值，进而将主动频率下垂法切换至传统下垂控制。该方法在保证负荷功率分配精度的同时，避免了传统下垂控制造成的母线电压二次跌落问题；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，通过实验结果验证了所提策略能够有效完成母线电压稳定和负荷功率精确分配的控制目标，并把成果总结发表于《电网技术》：

张勤进，庄绪州，刘彦呈，郭昊昊，王川. 基于线路阻抗补偿的直流微源并联均流控制策略[J]. 电网技术. 已录用。

课题研究背景

直流微电网变换器并联均流控制研究意义与现状

与传统交流微电网相比，直流微电网能量变换过程少、效率高，无需考虑频率及无功问题，同时便于多种分布式能源的接入，近年来在诸多领域受到广泛关注。直流微电网内各电源多采用电力电子变流器接入公共母线，如何实现各变流器之间的协调及均流控制，并保障母线电压的稳定，是直流微电网研究的关键问题。

目前，直流微电网内变流器间负荷功率分配研究最广泛的就是下垂控制，通过在各变流器控制环节中引入虚拟阻抗，改善由线路阻抗差异造成的电流分配不均现象。该方法无需通信，易于实现“即插即用”，但下垂系数过大会造成严重的母线电压跌落，而下垂系数过小又很难实现功率的精确分配。

除下垂控制外，应用于变流器间均流的方法还有主从、分布式、虚拟电压控制等。早期研究中，相关文献及工程通常采用主从控制，但其对主模块要求较高，一旦故障，整个系统都会瘫痪，同时对通信距离也有较大的限制。小信号注入方法应用于直流微电网，利用注入交流产生的无功调节各变流器输出直流电压，从而在反馈作用下实现精确的功率分配。然而该方法未考虑负载中感性或容性成分对注入信号及母线电压的影响，同时注入信号也会严重影响系统电能质量。

传统下垂控制及其局限性

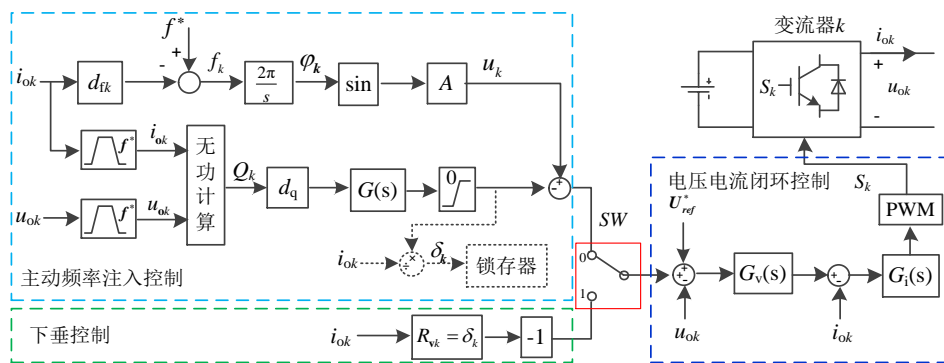
在传统下垂控制中，往往假定变流器的距离跨度较小，忽略线路阻抗 R_{line} 的影响，此时只需各变流器虚拟阻抗 R_0 按其额定功率成反比关系即可满足分配要求。但许多实际系统中，线路阻抗并不能忽略，只有线路阻抗的比值与下垂系数的比值相等时，才不会影响电流分配的精度，

然而线路阻抗往往具有不确定性且未知。

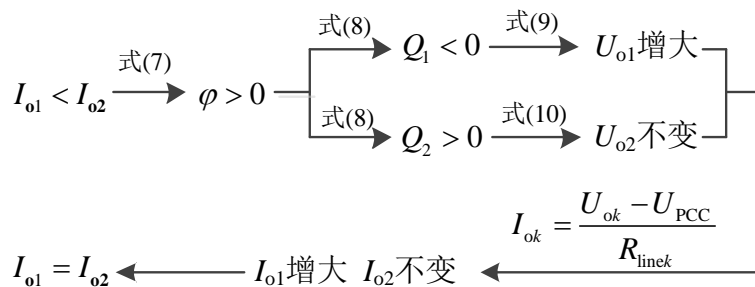
研究重要内容和创新点

基于自适应线路阻抗补偿的直流微源并联均流控制策略

下垂控制的本质是通过控制虚拟阻抗，使其抵消未知线路阻抗造成的功率分配偏差。若虚拟阻抗中包含能够抵消线路阻抗的信息，即可实现负荷功率的精确分配。在此基础上，本文结合主动频率注入法，提出一种基于自适应线路阻抗补偿的直流微源并联均流控制策略，其总体结构如图所示：



图中控制器由主动频率注入、下垂、切换开关和电压电流内环等部分构成。当切换开关 $SW=0$ 时，下垂控制不起作用，各变流器工作于主动频率注入控制下；反之，当 $SW=1$ 时，各变流器工作于下垂控制。该方法结合主动频率注入法和传统下垂控制的优点，能够在保证负荷功率分配精度的同时，有效改善母线电压跌落及纹波问题。图中闭环控制环节采用传统的 PI 双环控制， $G_v(s)$ 和 $G_i(s)$ 分别表示变流器的电压和电流内环传递函数，用于实现变流器输出电压的无差控制。下图详细给出了两台等比例变流器并联均流的反馈过程。



基于线路阻抗补偿的自主切换控制

主动频率注入控制能够有效解决线路阻抗差异造成的负荷功率精确分配问题，同时一定程度上改善母线电压跌落现象。然而不难发现注入法本身也存在严重的缺陷，一是会带来电能质量问

题,变流器输出电压及电流纹波很可能会超出允许的范围;二是若负载中存在感性或容性成分,注入交流信号产生的无功功率将不仅仅只有无功环流,还会包含负载所消耗的无功功率,这部分无功势必会使母线电压产生较大的偏差。

注入法的反馈机制使各变流器总等效下垂系数均等于最小线路阻抗值,因此当系统稳定时,各变流器的 δ_k 将是恒定且可测的。由此结合主动频率注入法和传统下垂控制,提出一种基于线路阻抗补偿的切换控制策略,利用短时信号注入的方法获取各变流器线路阻抗补偿值,并利用补偿值刷新下垂系数,进而切换至传统下垂控制算法。

SW 为切换开关, R_{vk} 表示变流器 k 的虚拟阻抗。当并联系统初次启动或电源状态发生变化时, $SW=0$, 此时各变流器工作在频率注入状态,在反馈机制的作用下,系统将逐步趋于稳定,并实现负荷功率的精确分配,各变流器的无功-电压补偿值 δ_k 将维持恒定;由于稳定后 δ_k 的变化率很小,因此可利用锁存器锁存稳定后的 δ_k ,并刷新 R_{vk} ;在设定时间后切换 $SW=1$,此时变流器的控制策略将由频率注入法切换至传统下垂控制,且各变流器总等效下垂系数满足公式(16)。在特定负载条件下,注入法稳定时间可以预估,因此这里可根据需要设定切换时间。此外各变流器 SW 的切换过程无需严格同步,仅需保证切换前 R_{vk} 的值已刷新。

该方法无需通信,在自主满足功率精确分配要求的同时,避免了电能质量问题的产生,同时不会造成母线电压的二次跌落。除实现无缝切换外,该方法也可离线完成,通过配备一定负载电阻,在初始化或调试过程中获得虚拟阻抗补偿值,实际运行时直接运行在传统下垂模式。

其它的控制及稳定性分析表达式详细推导详见大连海事大学科研团队发表的文章。

基于实时仿真器的算法验证

基于任意拓扑小步长实时仿真的直流微源并联均流控制策略验证

研究在实验验证阶段,模拟了三组并联的 boost 变流器、蓄电池组、线路阻抗、直流母线、负载等组成的直流微电网,考虑不同线路阻抗条件下变流器的并联均流特性和切换控制的效果,并验证了所提控制策略的可行性和有效性。通常,直流微电网拓扑和应用场景复杂迥异,并且微电网一旦建成其结构就难以改变,微电网的协调控制及多源并联控制实验在实物系统上实现过于耗费人力物力;纯软件仿真又有无法接入真实控制器的缺点,较难反应出真实控制器中的延迟和有限精度。实时仿真器可以同真实控制器连接,又便于模拟多种微电网结构,是微电网控制算法验证的理想测试设备。

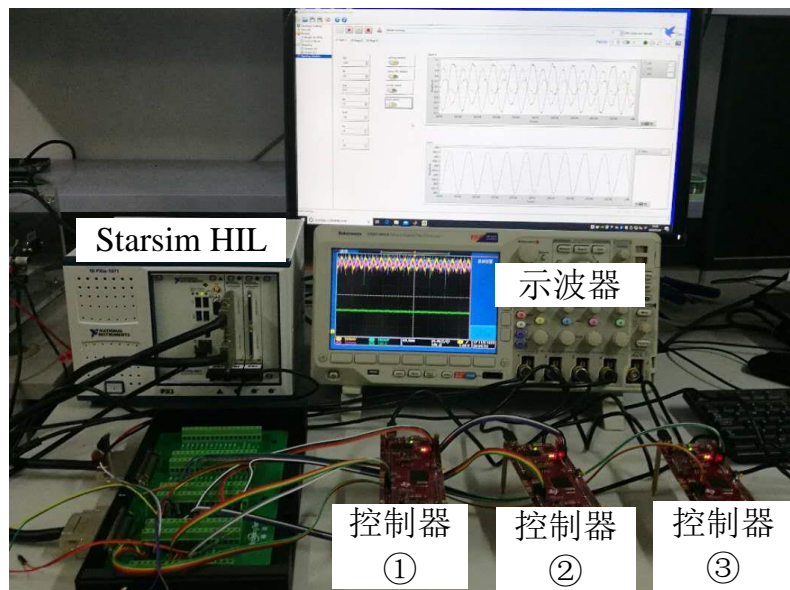
任意拓扑小步长实时仿真对于微电网系统验证的重要性

电力电子系统通常含有高速动作的开关元件，其实时仿真有一定挑战，通常有两种方法来实现电力电子系统的实时仿真，一种是基于 PWM 占空比测量的平均值大步长方法，一种是基于细节模型的小步长实时仿真。

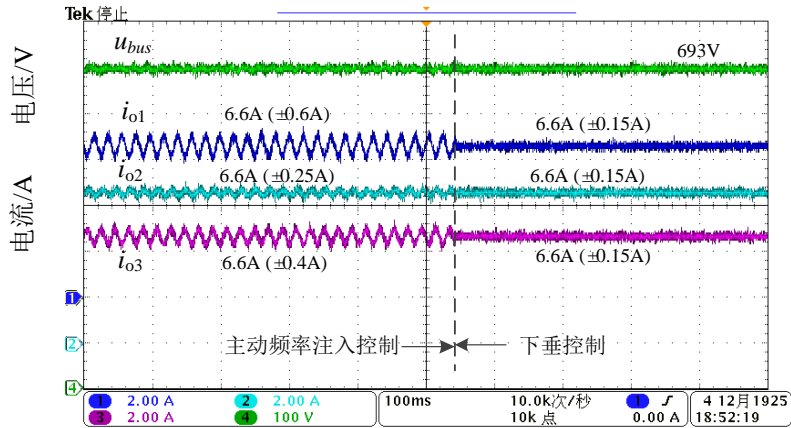
直流微电网包含光伏发电、风力发电、氢燃料电池、储能设备、驱动电机及日常交直流负载，设备的多样性和拓扑的复杂性对实时仿真性能要求较高。同时随着宽禁带功率器件在微电网的应用，基于 PWM 占空比的平均值大步长方法不适用。

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；大连海事大学的科研团队就采用了 StarSim 电力电子实时仿真器对所提出的基于线路阻抗补偿的直流微源并联均流控制策略进行实验验证。

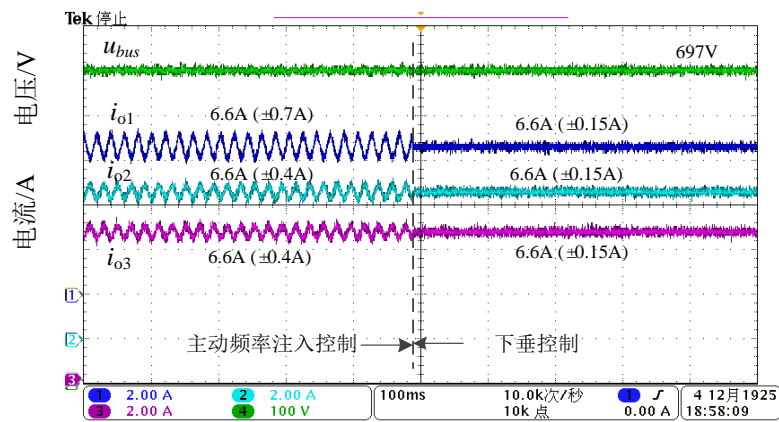
下图是 HIL 测试平台示意图，电力电子系统是利用 StarSim FPGA Solver 按 1 微秒的步长实时仿真；控制算法运行在 DSP 控制器上，StarSim HIL 实时仿真器和 DSP 控制器通过真实的物理 IO 互连。



下图为在小步长实时仿真实验平台上三台变流器并联均流的电压和电流实验波形。



(a) 线路阻抗设定值①



(b) 线路阻抗设定值②

三台变流器并联切换控制实验

由图(a)和(b)可以看出，所提基于线路阻抗补偿的自主均流控制策略在结合主动频率注入和下垂控制优点的基础上，一方面避免了电能质量问题，同时其切换过程平滑稳定，另一方面有效解决了因线路阻抗差异造成的功率精确分配问题和母线电压的二次跌落问题。