

船舶直流微电网并联电池储能系统分布式统一控制器设计

用户与研究成果简介：

大连海事大学新能源船舶综合电力与智能控制科研团队，针对船舶直流微电网并联电池储能系统 (Battery Storage System, BSS) 荷电状态(State-of-Charge, SoC) 失衡、负荷电流分配不合理、直流母线电压失稳等问题，设计了一种新型分布式统一控制器。该控制器跳出了下垂控制范式，能够在统一控制器中同时实现 SoC 动态均衡、负荷电流按容分配、平均母线电压精确恢复等控制目标，而无需设计多个基于 PI 调节的二次控制器，有效降低了系统阶数及提高系统稳定性，为该领域的发展提供了一种新思路。在此基础上，各 BSS 利用改进的动态扩散算法(Dynamic Diffusion Algorithm, DDA)在本地变换器实时估算平均状态变量，并通过相邻通信网络完成与相邻节点的信息交互。所提 DDA 能够令各 BSS 在单个时间尺度上连续响应相邻节点的数据流，允许数据集在相邻通信网络中更彻底地扩散，巧妙规避了复杂的迭代计算过程，从源头上解决通信拥塞问题。此外，基于特征值分析法、混合势理论和矩阵理论，分别研究了系统的小信号稳定性、大信号稳定性和全局稳态性能，并给出了指导系统参数设计的小信号稳定域和要求系统遵循的大信号稳定域。最后，搭建了船舶直流微电网 Matlab/Simulink 仿真模型和 StraSim HIL 实验平台，仿真与实验案例研究结果表明所设计的分布式统一控制器能够同时实现上述多个控制目标，并具有比先进方法更快的 SoC 收敛速度和更稳定的控制效果。该研究利用硬件在环实验（基于上海远宽 StarSim 系列软硬件的半实物仿真）验证了所设计控制器的有效性和优越性，并将相应成果总结发表于 SCI 顶级期刊 *IEEE Transactions on Power Systems*。检索信息如下：Yuji Zeng, Qinjin Zhang, Yancheng Liu, Haohao Guo, Fengkui Zhang, and Shi You. Distributed unified controller design for parallel battery storage system in DC shipboard microgrid[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(1): 546-563.

船舶直流微电网并联电池储能系统分布式统一控制研究意义与现状

近年来，“碳达峰、碳中和”目标的提出催生新一轮船舶动力技术变革，推动航运业向绿色低碳方向转型，这为新能源船舶电力系统的发展带来了新机遇。然而，太阳能、风能、氢能等可再生能源的接入容易对船舶电网运行造成冲击，故需要构建以可再生能源为主导的船舶新型电力系统，以保障可再生能源的高效消纳。在已有的船舶新型电力系统中，船舶直流微电网因无需考虑谐波抑制、无功补偿、频率同步等问题，具有能量转换效率高、设备运行灵活性强、故障保护性能好等优点，已逐渐成为新能源船舶电力系统的重点研究方向。

由于光伏、风机等可再生能源发电装置的输出功率具有间歇性与波动性，通常需要引入并联 BSS 来平抑系统功率波动，以维持船舶直流微电网的功率平衡与直流母线电压稳定。对于并联 BSS 来说，首要控制目标是各并联 BSS 的 SoC 动态均衡。在实际工程应用中，因电池的制造工艺、老化程度、额定容量等存在差异，势必导致各并联 BSS 的初始 SoC 不一致，工程中常用的做法是在所有 BSS 运行前将其初始 SoC 调节为一致，简称 SoC 预均衡过程。然而，即便是初始 SoC 相等，各 BSS 的线路阻抗也势必存在差异，这会导致各 BSS 的 SoC 在船舶直流微电网运行过程中逐渐发散，尤其是可再生能源发电系统和推进负载功率变化时，SoC 的发散程度会更加明显。若并联 BSS 的 SoC 不均衡，容易产生以下两点危害：1) 当控制系统未设置 SoC 上下限时，SoC 不均衡将导致部分电池过充/过放，从而加速其性能退化，缩短服役寿命，严重时引发火灾和爆炸事故；2) 当控制系统已设置 SoC 上下限时，SoC 不均衡会导致部分 BSS 提前退出运行，这会加重剩余 BSS 的带载压力，容易诱发系统失稳，威胁船舶航行过程中的安全性。

在理想情况下，各并联 BSS 实现 SoC 动态均衡后，负荷电流也能够实现精确分配。然而，各并联 BSS 到直流母线之间的线路阻抗不可能完全一致，而即便是很小的线路阻抗差异也可能导致较大的负荷电流分配偏差，从而在 BSS 之间产生极高的循环电流，这会进一步加快电池的老化速度。因此，需要设法抑制负荷电流分配不合理及直流母线电压偏移对船舶直流微电网的影响。不幸的是，已有的并联 BSS 负荷电流分配方法常基于下垂控制框架进行设计，而下垂系数和线路阻抗会导致直流母线电压产生偏差，这使得系统稳定性面临极大的挑战。

为了计算平均状态变量，工程上的常用做法是通过一个集中通信网络完成这些信息的收集和传输。然而，增设集中通信网络会带来以下问题：1) 大大增加初始投资成本，船东将面临更高额的通信网络投资和维护费用；2) 容易产生单点故障问题，即单个节点信息异常会导致通信网络崩溃；3) 难以抵御网络攻击，通信数据的隐私保护成为难题。考虑到集中通信网络的弊端，利用分布式通信网络解决分布式平均估计问题的相关工作在近年来得到广泛研究与应用。在相关研究工作中，常利用平均一致性算法在本地迭代估算全局平均状态变量，并通过相邻通信网络与相邻节点完成信息交互。然而，平均一致性算法的实现依赖于两个时间尺度：1) 收集相邻节点的平均状态变量；2) 迭代计算相邻节点平均状态变量，并完成本地节点平均状态变量的估计。糟糕的是，当数据集持续流入时，上述两个时间尺度削弱了平均一致性算法递归估计和实时调节的能力，从而减缓了数据集在通信网络中的扩散速度，这可能会因通信数据拥塞而导致均值收敛振荡问题，甚至诱发控制系统失稳或崩溃。

针对上述问题，本文设计了一种船舶直流微电网并联 BSS 分布式统一控制器，能够同时实现 SoC 动态均衡、负荷电流按容分配和平均母线电压精确恢复，释放了系统的通信压力，解决了通信数据拥塞问题，并具有比先进方法更快的 SoC 收敛速度和更稳定的控制效果。

含多光伏和多储能的船舶直流微电网架构

本文考虑一艘光储混合动力双体客船,其中船舶直流微电网主要由光伏发电系统、多组 BSS、岸电系统、推进负载、日用负载、交/直流变换器及三段母线(700V 直流主母线、24V 直流子母线和 220V 交流子母线)组成,如图 1 所示。

在所设计的船舶直流微电网中, BSS 的主要功能为: 1) 平抑光伏发电系统和推进负载带来的暂态功率波动, 维持系统功率平衡和母线电压稳定; 2) 在白天或光照充足时段, 作为辅助动力源为船舶推进负载提供部分动力; 3) 在夜间或阴雨天时段, 作为主动力源为整船电气设备提供电能。

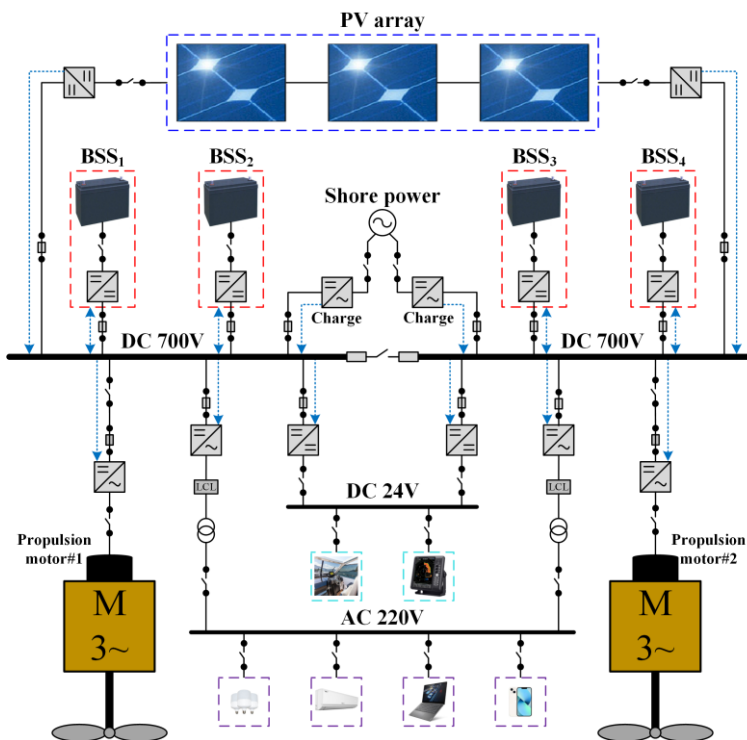


图 1 船舶直流微电网结构

基于动态扩散算法的分布式统一控制器设计

本文的控制目标是实现 SoC 动态均衡、负荷电流按容分配和平均母线电压精确恢复。为了实现上述三个控制目标,设计了一种基于 DDA 的分布式统一控制器。各 BSS 的控制结构如图 2 所示。在物理层,选用非隔离半桥双向 Buck/Boost 变换器作为电池与直流母线之间的连接模块,电池与该 DC/DC 变换器共同组成一个 BSS;在控制层,电压-电流双闭环控制器用于维持变换器输出电压和电感电流的稳定,而所构造的分布式统一控制器具备 SoC 均衡、电流分配和电压调节功能;在网络层,各 BSS 利用 DDA 迭代估算全局平均 SoC 和平均虚拟状态变量,并通过分布式通信网络与相邻 BSS 进行信息交互。

所设计的分布式统一控制器能够同步实现 SoC 动态均衡、负荷电流按容分配和平均母线电压精确恢复

的控制目标，维持系统稳定运行。此外，改进 DDA 的设计能够有效减轻系统通信负担，解决通信数据拥塞问题，增强了系统的可靠性和可扩展性。

详细的控制器设计过程和理论分析详见大连海事大学新能源船舶综合电力与智能控制科研团队发表的文章。

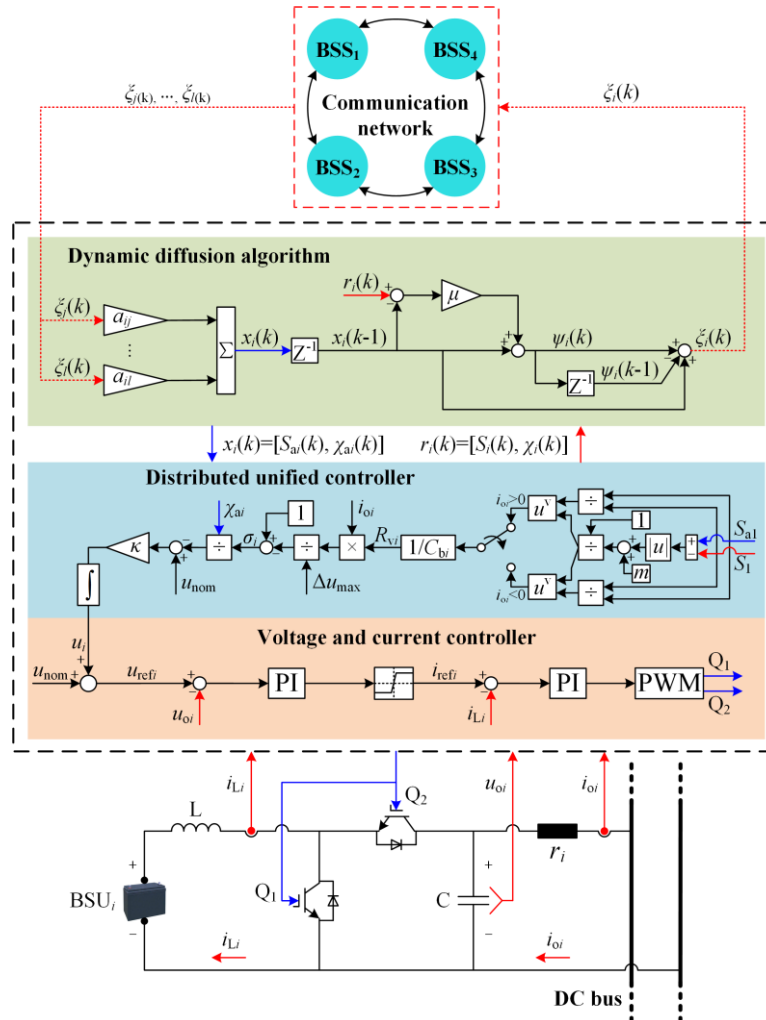


图 2 各电池储能单元的控制结构

基于任意拓扑小步长实时仿真的并联电池储能系统分布式统一控制器验证

研究在实验验证阶段，模拟了推进负载功率突变、光伏输出功率突变、相邻 BSS 通信故障、某个 BSS 退出运行等情况，验证了所设计分布式统一控制器的有效性和优越性。由于实物系统功率等级高，其造价昂贵和危险系数较大，船舶直流微电网运行优化控制实验很难在实物系统上实现。然而，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。相比之下，实时仿真器可以同真实控制器连接，又不会有高压大功率实验危险的问题，是船舶直流微电网运行优化控制验证的理想测试设备。

任意拓扑小步长实时仿真对于并联电池储能系统分布式统一控制器验证的重要性

电力电子系统通常含有高速动作的开关元件，其实时仿真具有一定挑战，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。

对于并联 BSS 的分布式统一控制器来说，它需要检测到瞬时电路反应，而不是经过大步长平均的信号，因此基于 PWM 占空比的平均值大步长方法不适用于此研究。同时实时仿真器要能够仿真各种船舶直流微电网运行工况，或者说任意的拓扑组合。因此，一些只能仿真正常工况的实时仿真器也不适用。

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，被广泛应用于直流微电网控制策略验证、可再生能源并网、电机驱动等的实时仿真中。因此，大连海事大学新能源船舶综合电力与智能控制科研团队采用了 StarSim 电力电子实时仿真器来进行所提出的船舶直流微电网并联 BSS 分布式统一控制器的试验验证。

图 3 是 HIL+DSP 测试平台示意图，其包括实时仿真系统 HIL 和 TMS320F28379D-DSP，其中电力电子系统是利用 StarSim FPGA Solver 按 1 微秒的步长实时仿真；控制算法模型部署在 DSP 控制器上，实时仿真器和 DSP 控制器通过真实的物理 I/O 互连。

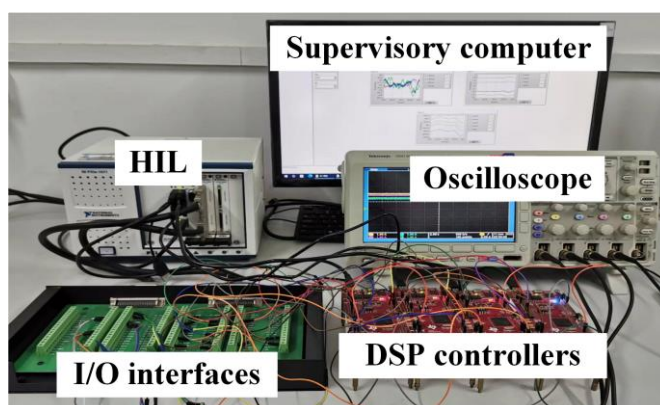


图 3 基于 StarSim 的实验平台

图 4 和图 5 为在小步长实时仿真实验平台上船舶直流微电网不同运行工况下的并联 BSS 的 SoC、变换器输出电流和平均直流母线电压的实验波形。

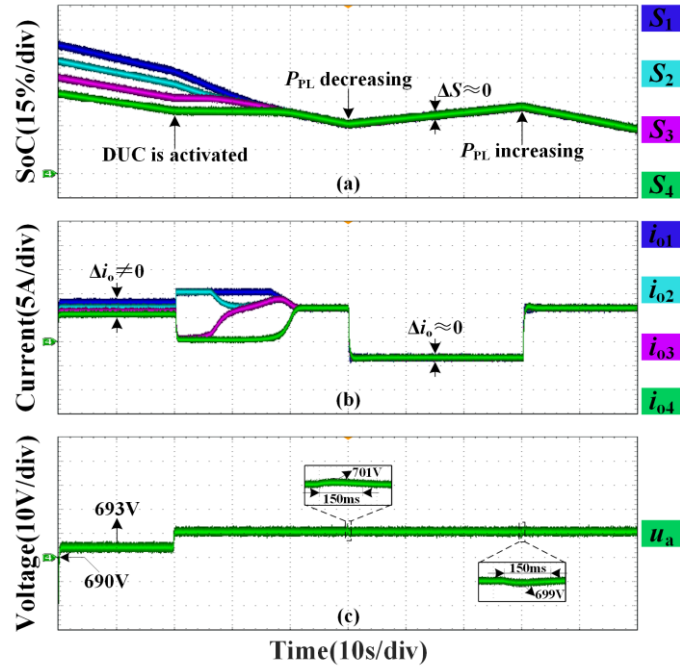


图 4 实验案例 I. (a) BSS 的 SoC; (b) 变换器输出电流; (c) 平均直流母线电压.

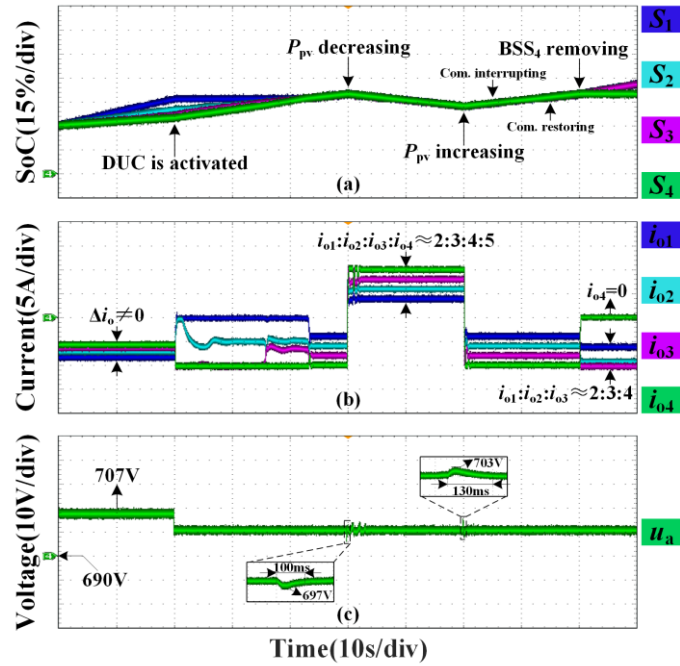


图 5 实验案例 II. (a) BSS 的 SoC; (b) 变换器输出电流; (c) 平均直流母线电压.

由上面两个实验案例的波形图可以看出，在推进负载功率突变、光伏输出功率突变、相邻 BSS 通信故障、某个 BSS 退出运行等工况下，所提并联 BSS 的分布式统一控制器能够同步实现 SoC 动态均衡、负荷电流按容分配和平均母线电压精确恢复。