



合肥工业大学- 针对不对称微电网逆变器的二层积分控制策略

用户与研究成果简介：

合肥工业大学杨向真老师的科研团队，针对三相不对称微电网逆变器并联运行时，负序无功功率分配不均和公共耦合点(PCC)不对称度较高的问题，提出了逆变器二层积分控制方法。该方法在传统负序无功-电导(Q-G)下垂控制方法的基础上，增加二次积分控制层，通过搜集附近的分布式单元(DG)负序无功功率信息和本地不对称度信息，进一步的提高负序无功功率分配精度，同时一定程度上抑制 PCC 不对称度。

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，通过实验结果验证了所提出的微电网逆变器二次积分控制层算法的正确性，并把成果总结发表于 SCI 3 区《CSEE Journal of Power and Energy Systems》：

X. Yang, H. Zhao, M. Duan, Y. Du, H. Wang and J. Zhang, "A new distributed cooperative secondary voltage control in an unbalanced microgrid," in CSEE Journal of Power and Energy Systems, doi: 10.17775/CSEEJPES.2020.01990.

课题研究背景

三相不平衡微电网逆变器并联负序无功均分与不对称度抑制的研究意义与现状

如今，电力系统正面临着巨大的变化，越来越多的分布式发电单元 (DG) 和储能设备被安装到公用电网当中。作为应对 DG 高渗透率的有效方法之一，微电网 (MG) 被提出来以作为一台友好的调度发电机或负荷来适当地控制 DG 集群，并为客户提供可靠的电源和理想的电能质量。在微电网中，由于许多单个负载连接在两相或者单相与中性点之间，因此电压不平衡现象非常普遍。在此不平衡的微电网中，某些敏感负载可能会因此受到危害，无法安全稳定运行。为了解决这个问题，国际电工委员会规定，电力系统中的电压不平衡系数应限制为 2%。因此，需要一种合适的策略来维持不平衡微电网的电能质量。

此外，微电网逆变器的功率按容量比例均分也是必须要解决的问题，除了传统的三相对称情况下有功-频率(P-f)、无功-电压(Q-V)下垂控制算法外，不对称负荷下还必须解决负序无功功率均分的问题。如何按照逆变器容量均分负序功率，同时尽可能减少联络线和控制复杂度，是必须要解决的问题。

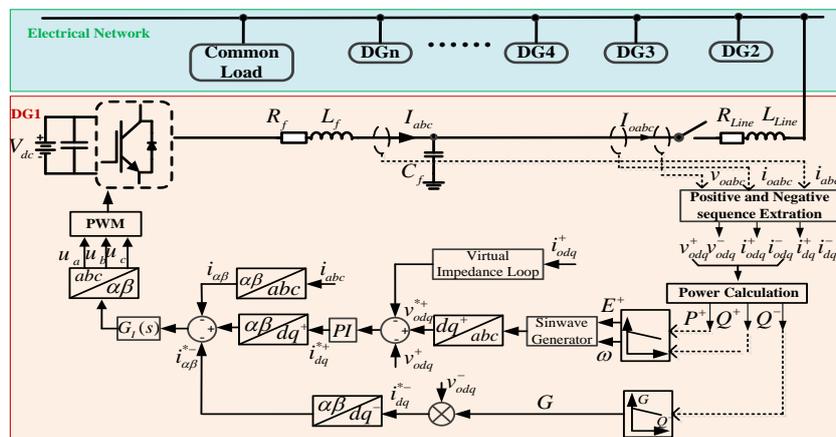
现有的文献对功率均分的控制只要集中在三相平衡时有功无功的均分，对负序无功功率均分涉及较少。因此，合理的分配负序无功功率，同时一定程度上抑制微电网不对称度，是一个不可忽视而且非常值得研究的问题。

研究重要内容和创新点

传统负序无功-电导下垂控制算法原理

传统负序无功-电导(Q--G)下垂控制策略是一种经典的不平衡微电网逆变器并联负序无功分配控制策略,其通过虚拟分配线路电导,以调整线路阻抗使其满足分配负序无功功率的比例关系。然而, Q--G 下垂控制策略难以平衡负序无功功率分配精度和不对称度抑制的协调问题,往往会造成负序无功分配较好但是不对称度难以达到满意标准,或者虽然不对称度较低但是负序无功功率分配效果较差。但是其控制较为简单,无需联络线,动态响应速度快等优点仍然使其具有较高的应用价值。

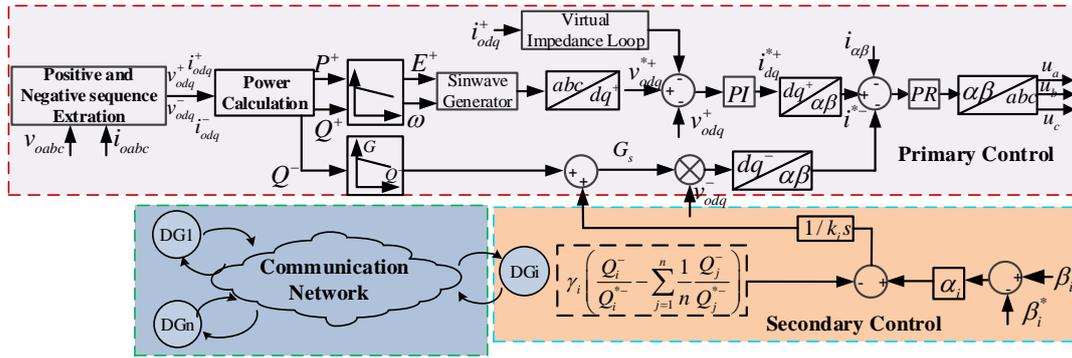
下图所示即为常规微电网逆变器并联时正序控制算法和 Q--G 下垂控制算法控制原理图:



整个控制策略基于两相静止坐标系,首先提取输出电压电流的正序分量和负序分量,计算其对应的有功和无功功率。其正序部分控制算法由正序 P-f、Q-V 下垂控制环、虚拟阻抗环、电流内环组成。负序部分由 Q--G 下垂控制组成,其输出作为负序电流参考值与正序电流参考值叠加作为总的输出电流控制参考值。

分布式协作二次不平衡电压控制策略

针对传统 Q--G 下垂控制策略中对负序无功功率分配精度和不对称度抑制的协调问题,合肥工业大学科研团队提出在 Q--G 下垂控制的基础上,增加二次积分控制层,提出了分布式协作二次不平衡电压(SUVC)控制策略,其控制原理如下图。



每个 DG 通过搜集附近 DG 的负序无功功率信息和本地不对称度信息，通过权重系数(α 和 β)的调节来合理协调无功分配精度和不对称度抑制问题。当微电网不平衡程度较高时，可以增大不对称度权重系数 α 以进一步抑制不对称度，当负序无功分配不均时，可以通过增大 β 来提高负序无功分配精度。通常，相较于负序无功分配，不对称度的抑制应该是优先解决的问题，故本科研团队进一步将 α 设计成自适应参数，以优先保证整个微电网的不对称度保持在较低水平。

基于实时仿真器的算法验证

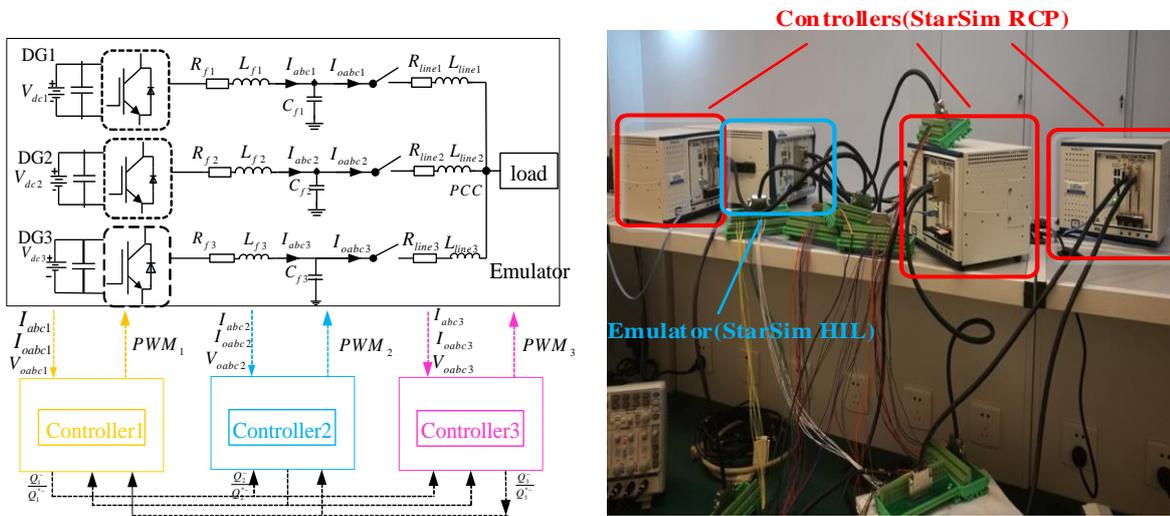
基于 StarSim 硬件在环仿真的不对称微电网逆变器控制策略验证

微电网控制的实验受限于硬件平台的复杂性和造价，一般难以使用实物进行实验。实时仿真器可以同真实控制器连接，不存在实际系统高昂的造价和复杂性，又不会有故障实验危险的问题，故通常以仿真或者硬件在环仿真的形式进行微电网相关控制算法的验证。

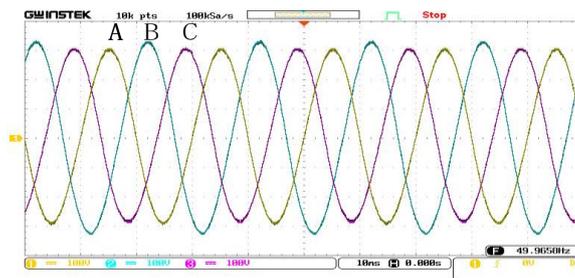
远宽能源 (www.modeling-tech.com) 提供的 StarSim 实时仿真器，基于电力电子器件的细节模型，利用最新的 FPGA 技术，可以实现 1 微秒步长、任意拓扑、任意工况的电力电子系统实时仿真，被广泛应用于微电网的各项实时仿真中；合肥工业大学的科研团队就采用了 StarSim 电力电子实时仿真器来进行所提出的基于二次层控制的不平衡微电网逆变器并联负序无功功率均分和不对称度抑制方法的试验验证。

下图是 HIL+RCP 测试平台示意图，其包括实时仿真系统 HIL 和快速原型控制器 RCP，以验证所提出的控制策略的有效性。在下图中，在 Matlab / Simulink 中搭建了具有三个并联 DG，配电线路和不对称负载的不平衡微电网的主电路，并通过实时仿真软件 StarSim HIL 将微电网模型下载到基于 NI-PX1e-7868R FPGA 开发板。然后，微电网模型以 1us 的时间步长在 StarSim 实时模拟器上运行，并且相应的电压和电流信号从模拟器的 AO 端口输出。三个 DG 的控制策略以 dll (动态链接库) 文件的形式建立在 Simulink 内，并通过软件 StarSim RCP 下载到三个用作原型 DG 控制器的 NI 实时系统。每种控制策略都以 100us 的时间步长在 NI 实时系统的 CPU 上运行，并使用 NI 实时系统的 FPGA IO 板生成 PWM 控制信号。三个原型控制器从模拟器中采

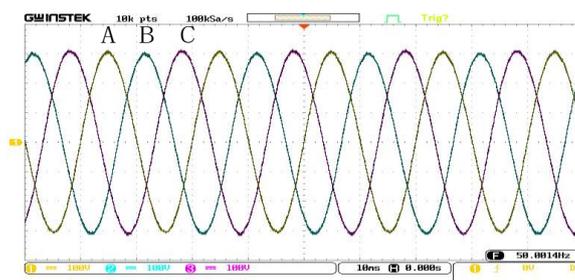
样 DG 相应电压和电流信号，并相互交换信息以完成所提出的控制策略。实验平台的照片下图所示。



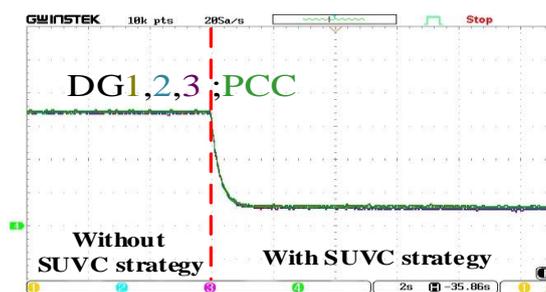
下图为在小步长实时仿真实验平台上所提 SUVC 控制策略作用前 PCC 电压、不对称度和负序无功分配精度的实验波形，其它实验波形详见合肥工业大学科研团队发表的文章。



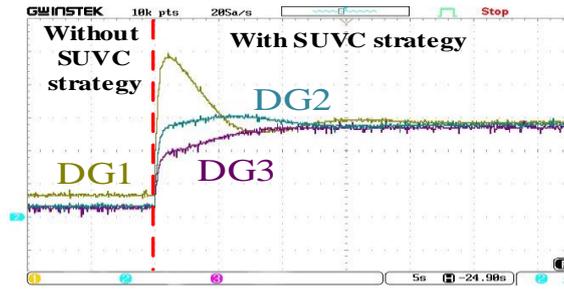
(a) 无 SUVC 控制策略时 PCC 电压波形



(b) SUVC 控制策略作用时 PCC 电压波形



(c) SUVC 控制策略作用前/后不对称度变化



(d) SUVC 控制作用前/后负序无功分配精度变化

由图(a)、(b)和(c)可以看出，在所提 SUVC 控制策略作用前，PCC 点和各 DG 端口电压不对称度均较高，在 SUVC 控制策略作用后，不对称度较快速降低到 2%以下，符合国际电工委员会对电力系统中的电压不平衡系数的规定。从(d)中可以看出，在 SUVC 控制算法作用后，负序无功功率标幺值快速收敛至同一值，表明负序无功功率按照额定容量较好的均分。以上实验完整的验证了所提控制策略的有效性。