



合肥工业大学-

孤岛微电网电压不平衡补偿协调控制算法

用户与研究成果简介：

合肥工业大学能源研究所科研团队提出了一种孤岛微电网电压不平衡补偿协调控制算法，该方法基于分层控制思想，从孤岛微电网电压不平衡协调控制角度出发，考虑补偿过程中可能出现的环流问题，基于粒子群算法提出一种多目标优化不平衡电压补偿算法，在保证微网逆变器端口电压不平衡度在可控范围的同时兼顾 PCC 电压不平衡补偿；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补偿方法的正确性，并把成果总结发表于《电力系统自动化》：

赖纪东,谢天月,苏建徽,刘嘉亮,周晨光,徐洁洁.基于粒子群优化算法的孤岛微电网电压不平衡补偿协调控制[J].电力系统自动化. 已录用。

课题研究背景

孤岛微电网电压不平衡补偿协调控制研究意义与现状

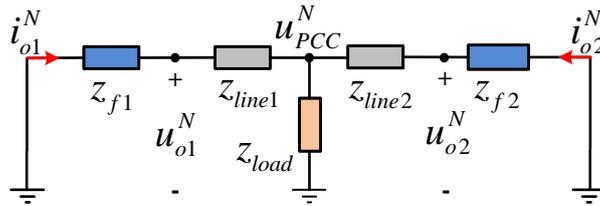
微电网孤岛运行模式下，由于缺乏大电网的支撑，网内母线及各节点电压完全由网内众微网逆变器协同工作提供支撑，因而微网逆变器控制性能决定了供电电压质量的优劣。在低压微电网系统中，由于大量单相负荷的存在，使得网内负荷实则表征为不平衡特点，若不加以控制极易出现电压不平衡，影响供电质量，严重时甚至会引起系统失稳。孤岛运行模式下微电网电压不平衡补偿，是一个事关网内供电电压质量及系统稳定性的关键问题。

现有研究在逆变器端口电压不平衡控制、PCC 电压不平衡控制以及端口与 PCC 电压不平衡协调控制等方面提出了较多解决方案。从微电网系统角度出发，各微网逆变器端口及 PCC 上均挂有负载，要保证系统供电质量需保持各节点电压不平衡度均在允许范围，同时不平衡电压补偿过程中也需考虑相互间影响。

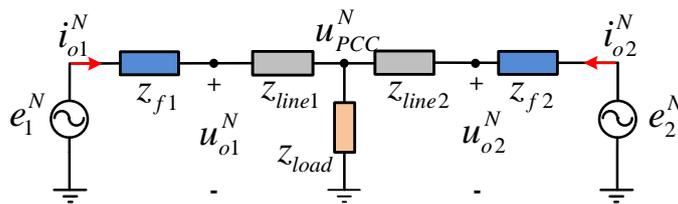
研究重要内容和创新点

微电网不平衡电压补偿原理

为进行不平衡电压补偿，首先分析不平衡电压产生的原因。以两台逆变器带不平衡负载为例，阐述不平衡电压产生机理。根据对称分量法及线性叠加原理，三相电路可分解为正、负、零序 3 个电路的叠加。由于三相三线制系统中无零序通路，电压不平衡主要由负序分量造成，简化的两台逆变器并联未进行负序电压补偿的负序等值电路如图所示：



当逆变器不进行负序电压补偿时，逆变器的负序内电势为零。不平衡负载引起的负序电流经过滤波阻抗和线路阻抗产生负序压降，从而导致逆变器端口和 PCC 点出现电压不平衡现象，影响微网电能质量。考虑到逆变器等效为受控电压源，因为可以往逆变器内部注入内电势来缓解逆变器端口和 PCC 点电压的不平衡状况。带负序内电势补偿电路如图所示：



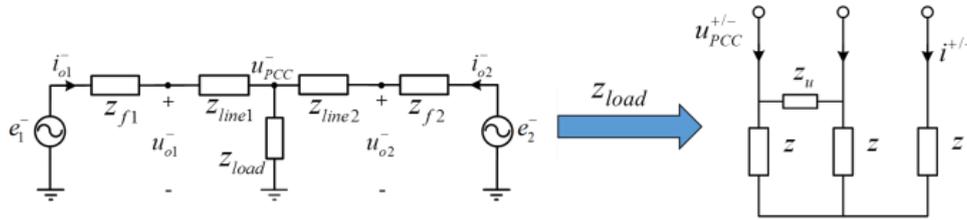
当进行逆变器端口不平衡电压全补偿控制时，设置端口电压的不平衡度为 0。此时逆变器叠加的负序内电势与滤波阻抗产生的负序压降大小相等，相位相反时，逆变器端口的负序电压为零，三相输出实现平衡。此时 PCC 点的负序电压减小，数值上等于线路阻抗上的负序压降。虽然在进行端口电压补偿的同时 PCC 点电压得到一定程度上的补偿，但是仍无法满足电能质量要求。

当进行 PCC 点不平衡电压全补偿时，PCC 点的电压不平衡度参考值设置为 0。此时逆变器叠加的负序内电势与滤波阻抗和线路阻抗产生的总负序压降大小相等，相位相反时，PCC 点的负序电压为零，PCC 点的三相电压实现平衡。此时逆变器端口的负序电压等于线路阻抗上的负序压降。在补偿过程中，端口的负序电压首先减小然后增加，表现为从欠补偿变为全补偿，再从全补偿到过补偿的过程。最终，端口的负序电压数值上等于线路阻抗产生的负序压降。此时端口电压的电能质量不满足要求。

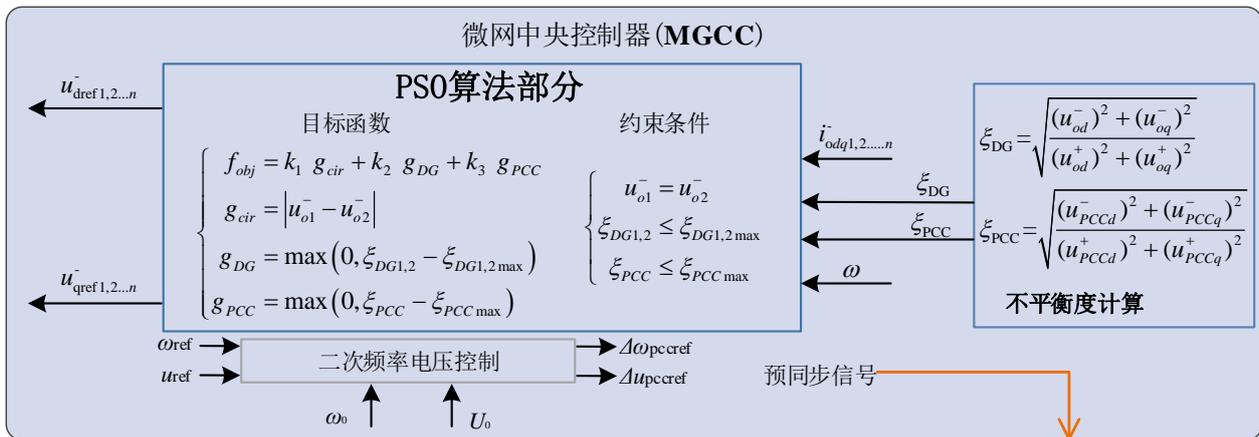
基于粒子群算法的不平衡电压协调补偿控制

根据前面分析可知，传统的控制方式无法同时对多个节点电压进行控制。考虑到端口电压与 PCC 点电压在数值上存在一一对应的关系，因此可以通过控制逆变器端口电压实现对 PCC 点电压的间接控制。由于逆变器的端口电压可控，由电压电流关系可知，当逆变器的输出电流已知时，可以得到 PCC 点的负序电压。由于该方程组存在耦合关系，无法直接进行求解，因此论文采用相间不平衡负载对该问题进行化简。相间不平衡负载的电流表达式如图所示，因为 PCC 点的负序电压由负序电流、线路阻抗以及滤波阻抗决定而线路阻抗等参数一般较小，所以 PCC 点的负序电压一般较小，可以认为其正序电压远大于负序电压。因此 PCC 点的负序电流可以

改写成下面的形式，该式子表明 PCC 点的负序电流只受正序电压和相间负载的影响。即逆变器进行不平衡电压补偿前后，负序电流基本不变。因此通过此方法，建立了逆变器端口电压和 PCC 点电压的可解的数学关系式。



不平衡电压协调补偿的目的是实现逆变器端口和 PCC 点负序电压的协调补偿。为保证各节点电压达到电能质量标准，端口和 PCC 点的电压不平衡度应小于各节点允许的最大值；为避免叠加的负序内电势会加大逆变器间的有功环流和无功环流，逆变器输出的负序电压应该尽量大小相等、相位相同。



粒子群补偿控制算法的具体结果详细推导详见合肥工业大学能源研究所科研团队发表的文章。

基于实时仿真器的算法验证

基于实时仿真的微网电压不平衡粒子群补偿算法验证

研究在实验验证阶段，两台逆变器并联后接不平衡负载，所用主电路参数和控制参数与仿真相同。基于半实物仿真平台，分别实验了两台逆变器容量相等和不相等 (1:2) 情况下不平衡度控制，并验证了所提补偿算法的可行性和有效性。一般来说，含有多台逆变器的微电网实验平台的搭建耗资巨大，且由于系统的复杂性，难以进行一些相关试验来检验控制系统与被控对象之间的相互影响；纯软件仿真难以反应出真实控制器中的延迟和有限精度，同时仿真多台逆变器时需要对于计算机的性能要求较高，从而无法对大规模的系统进行仿真。实时仿真器可以同真实控制器连接，又不会有故障实验危险的问题，并且仿真多台逆变器所需性能比基于 CPU 的

软件仿真要小，是微网电压不平衡补偿算法验证的理想测试设备。

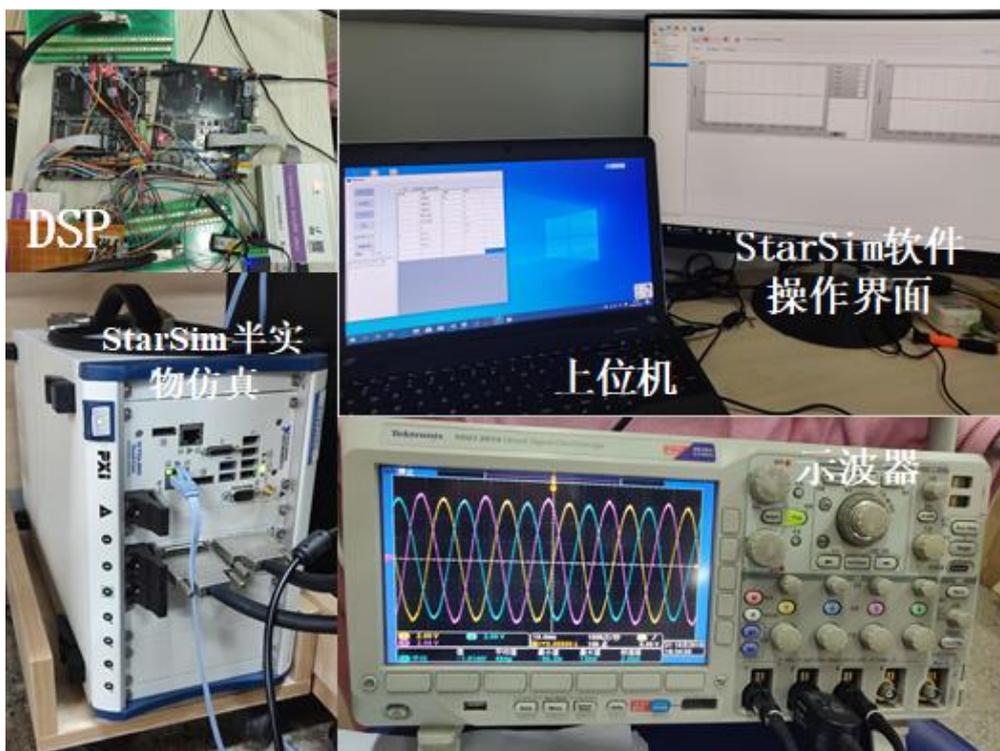
任意拓扑小步长实时仿真对于微网电压不平衡补偿算法验证的重要性

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。

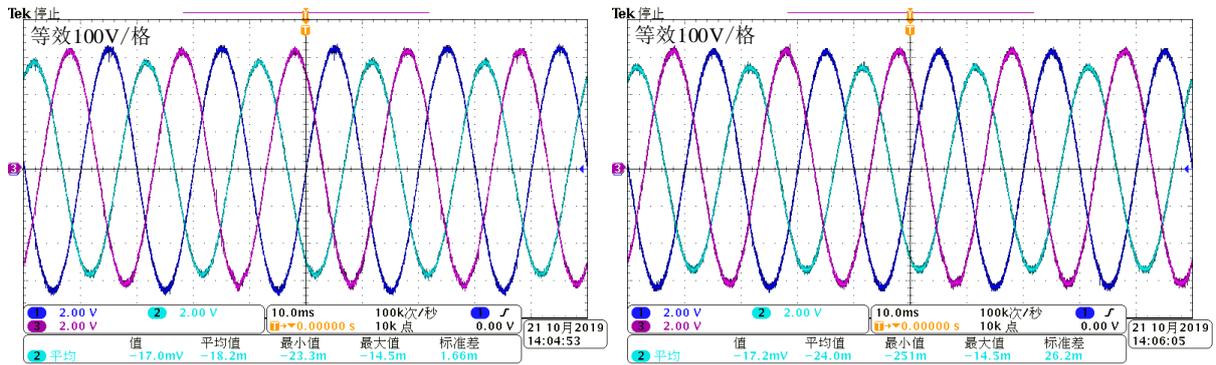
对于微网电压不平衡补偿控制来说，它需要检测到瞬时电路反应，而不是经过大步长平均的信号，因此基于 PWM 占空比的平均值大步长方法不适用于此研究。同时实时仿真器要能够仿真多台逆变器，要求具有一定的性能，并能够仿真各种故障工况。

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；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孤岛微电网电压不平衡补偿协调控制算法的试验验证。

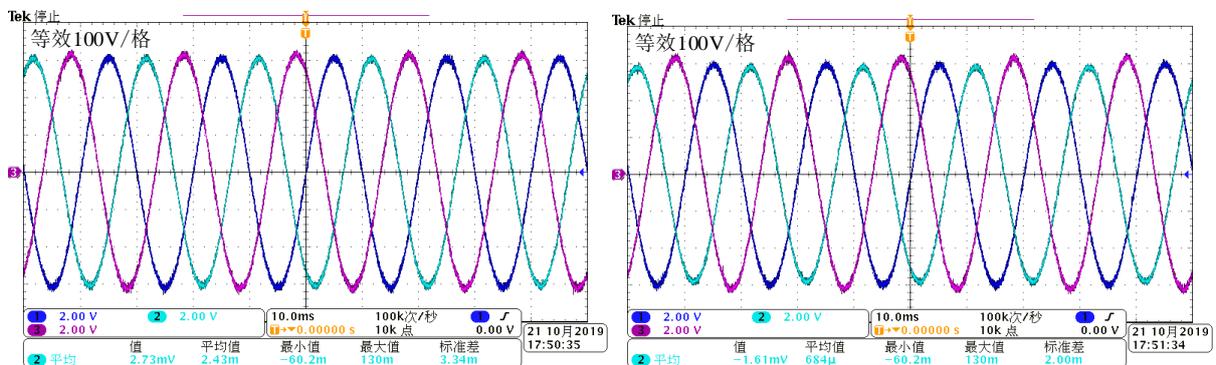
下图是 HIL+DSP 测试平台示意图，其包括实时仿真系统 HIL 和 DSP28335 控制板，其中电力电子系统是利用 StarSim FPGA Solver 按 1 微秒的步长实时仿真；控制算法模型运行在 DSP28335 控制板上，实时仿真器和 DSP28335 控制板通过真实的物理 IO 互连。



下图为当两台逆变器容量为 1:2 时，补偿前后的端口电压和 PCC 点电压波形的实验波形。



(a) 补偿前端口与 PCC 点电压



(b) 补偿后端口与 PCC 点电压

由图(a)和(b)表明通过粒子群算法可以很好地实现逆变器端口和 PCC 点电压不平衡的补偿，端口不平衡度和 PCC 点不平衡度均补偿到 2%以内，实现了协调补偿。