

Distributed cooperative grid synchronization strategy for multiple parallel grid-supporting inverters in AC microgrid

用户与研究成果简介：

郑州大学李忠文老师所在的科研团队针对含多并联运行电网支撑型逆变器的微电网孤岛/并网模式平滑切换问题，提出了一种分布式协调并网同步控制策略。所提出的控制策略采用分布式控制器进行分布式微源间的信息交换，并且避免了非线性锁相环的使用，仅需要将同步信号传递给主导节点对应的分布式电源，更加灵活有效。研究利用上海远宽的 StarSim 实时仿真器进行实验，通过实验结果验证了所提策略的有效性，并把成果总结发表于《International Journal of Electrical Power & Energy Systems》：

Zhongwen Li, Jiashun Zhang, Zhiping Cheng, Jikai Si, Yi Wang, Xinchuang Wang, Distributed cooperative grid synchronization strategy for multiple parallel grid-supporting inverters in AC microgrid, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, Volume 155, Part B, 2024,

<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2023.109624>.

研究意义和现状

近年来，在电网技术和实现低碳排放的发展过程中，微电网受到了学者们的广泛研究。微电网既可以并入大电网，以并网模式运行，实现微电网和大电网间的能量互相流动；也可以断开与大电网的联系，以孤岛模式独立运行，实现微电网内部的能量循环平衡。逆变器作为将分布式电源(Distributed Generation, DG)与电网连接的接口装置，采用先进的电力电子技术进行电能转换，在微电网中起着必不可少的作用。为了可靠地利用 DG 并确保关键负荷的不间断运行，微电网需要能够在孤岛模式和并网模式之间进行无缝转换，因此研究微电网并网同步问题具有重要的意义。

在以往的并网同步研究中，大多数学者对单台逆变器的并网同步控制策略进行了研究，然而，微电网系统包含多个并联运行的 DG，每个 DG 通过逆变器连接到母线上。对于含多个并联运行 DG 微电网系统的并网同步研究通常采用中央控制器获取系统的全局信息，采用锁相环单元来检测相角，这会增加系统的通信负担，降低系统的控制性能。

综上所述，虽然国内外学者在微电网系统并网同步控制策略上取得了进展，但是依然存在一些不足，例如采用集中式控制导致通信负担繁重，受非线性的 PLL 影响导致动态性能不佳。目前，微电网孤岛模式/并

网模式无缝切换制约着微电网的进一步发展，对于微电网系统的并网同步问题需要进一步深入探究并解决。

论文主要研究内容

李忠文老师团队围绕微电网并网问题，针对现有方法的不足，提出了分布式协调并网同步控制策略。首先建立多并联运行电网支撑型逆变器系统的模型和控制目标，然后对所提出的控制方法进行理论分析，包括底层控制，分布式二次控制和并网控制。最后，通过 MATLAB/Simulink 仿真及 StarSim 硬件在环半实物实验验证所提策略的有效性。

分布式协调并网同步控制策略理论分析

郑州大学李忠文导师团队针对微电网孤岛/并网模式平滑切换问题，提出了分布式协调并网同步控制策略，所提控制策略包括底层控制，分布式二次控制和并网控制。所提出的分布式协同并网同步控制策略旨在控制对等控制模式下含多台并联运行电网支撑型逆变器的微电网，所考虑的控制对象更贴合实际；与集中式并网同步控制方法不同，本文提出的并网同步控制策略采用分布式控制器在相邻分布式电源之间交换有限的信息，只需将同步信息传递给主导节点对应的分布式电源，更加灵活有效；与基于锁相环的并网同步控制方法不同，本文提出的并网同步控制策略可以实现无非线性锁相环单元的无缝切换，操作简单，易于实现，能够提高系统的控制性能。

建立多并联运行电网支撑型逆变器系统的模型如图 1 所示，并网同步的控制目标为电压同步，相角和频率同步。

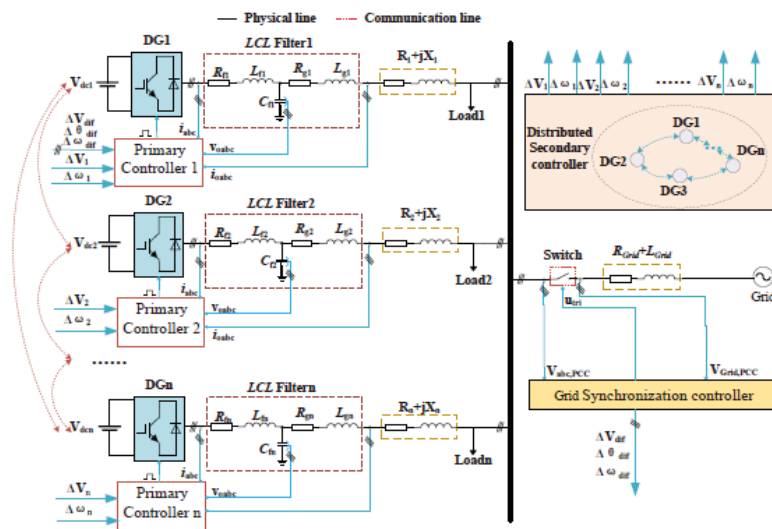


图 1 多并联运行电网支撑型逆变器结构

本文底层控制采用基于下垂控制的功率环控制和基于滑模控制的电压和电流环控制，使系统具有良好的鲁棒性和快速追踪性能。具体的实现过程详见郑州大学李忠文导师团队发表的文章。

本文在分布式二次控制中，基于分布式一致算法，通过增加辅助控制器，产生额外电压和频率补偿项，补偿由底层控制引起的偏差。能够实现各分布式电源发掘的平均母线电压恢复和无功功率按比例分配；实现各分布式电源频率恢复和有功功率按比例分配；实现各分布式电源间的频率和所发掘平均母线电压同步。

频率和有功功率辅助控制器设计为

$$u_{\omega_i} = c_{\omega_i} \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij} (\omega_j - \omega_i) + b_i (\omega_{ref} - \omega_i) \right] \quad (1)$$

$$u_{p_i} = c_{p_i} \sum_{j \in N_i} a_{ij} (m_{pj} P_j - m_{pi} P_i) \quad (2)$$

电压和无功功率辅助控制器设计为

$$V_{avei} = V_i + c_{ave} \int \sum_{j \in N_i} a_{ij} (V_{avej} - V_{avei}) dt \quad (3)$$

$$u_{V_i} = c_{vi} \left[\sum_{j \in N_i} a_{ij} (V_{avej} - V_{avei}) + b_i (V_{ref} - V_{avei}) \right] \quad (4)$$

$$u_{Q_i} = c_{Q_i} \sum_{j \in N_i} a_{ij} (n_{Qj} Q_j - n_{Q_i} Q_i) \quad (5)$$

本文在并网同步控制策略中，通过 PI 控制器调节电压偏差、频率偏差和相位角偏差，实现 DG 与电网的同步，分别为：

$$\Delta V_{dif} = V_{dif} \cdot \left(k_{pv, syn} + \frac{k_{iv, syn}}{s} \right) \quad (6)$$

$$\Delta \theta_{dif} = \theta_{dif} \cdot \left(k_{p\theta, syn} + \frac{k_{i\theta, syn}}{s} \right) \quad (7)$$

$$\Delta \omega_{dif} = \omega_{dif} \cdot \left(k_{p\omega, syn} + \frac{k_{i\omega, syn}}{s} \right) \quad (8)$$

此外，设计了触发信号，触发信号为 1 时，说明达到并网条件，并网开关闭合，系统从孤岛模式转变为并网模式。

$$u_{tri} = \begin{cases} 1 & V_{dif} \leq \varepsilon_v, \theta_{dif} \leq \varepsilon_\theta, \omega_{dif} \leq \varepsilon_f \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (9)$$

$$\begin{cases} \varepsilon_f = |f_{grid} - f_{pcc}| \leq 0.1\text{Hz} \\ \varepsilon_v = |V_{grid} - V_{pcc}| \leq 0.03\text{pu} \\ \varepsilon_\theta = |\theta_{grid} - \theta_{pcc}| \leq 20^\circ \end{cases} \quad (10)$$

具体的控制方法过程详见郑州大学李忠文老师团队发表的文章。

仿真与实验验证

李忠文老师团队通过 MATLAB/Simulink 对含有四台并联运行的 DG 的微电网系统进行仿真验证。首先进行了分布式二次控制收敛性验证，在此场景中，仿真微电网系统工作在孤岛模式下。在 $t=3s$ 之前，控制策略只采用底层控制器，分布式二次控制器未启用；在 $t>3s$ 后，所提出的分布式二次控制器被启用，仿真结果如 1 所示。

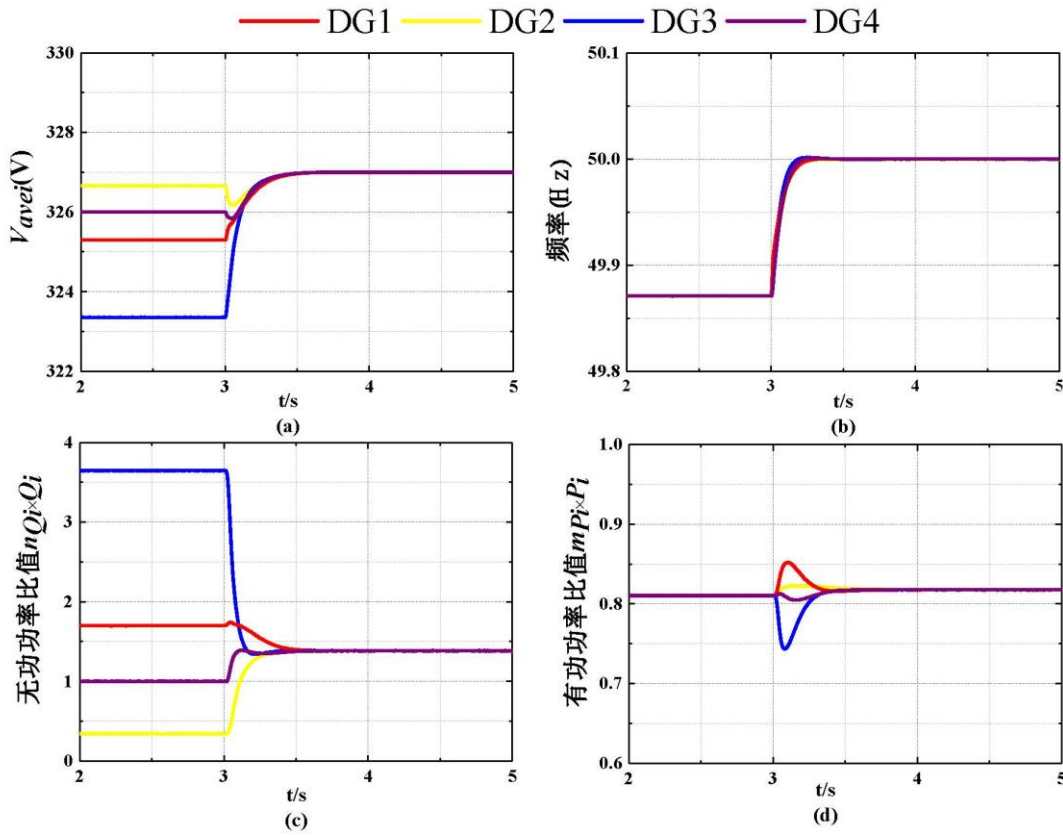


图 2 分布式二次控制的收敛性仿真结果：(a)各 DG 所发掘的平均电压；(b)各 DG 的频率；(c)各 DG 的无功功率比值 $n_{Q_i} \times Q_i$ ；(d)各 DG 的有功功率比值 $m_{P_i} \times P_i$

由仿真结果可以看出所设计的分布式二次控制能够有效地实现平均电压和频率恢复。

此外，进行了分布式协调并网同步控制策略有效性验证。此场景下， $t=3s$ 之前，微电网系统运行在孤岛模式，采用所提出的分布式二次控制。在 $t=3s$ 时，主导节点对应的 DG(DG1)从并网同步控制器接收到并网信号，然后每个 DG 开始调整其电压，相角和频率，以满足并网条件。仿真结果如图 3-图 5 所示。由仿真结果可看出所设计的分布式协调并网同步策略的有效性。

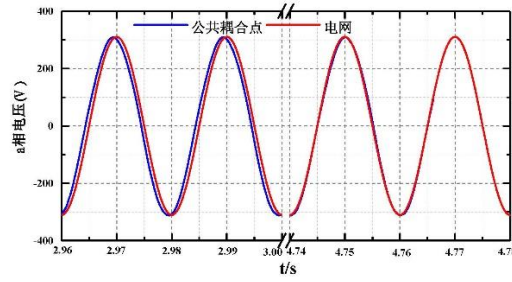


图3 同步过程中公共耦合点和电网的 a 相电压波形

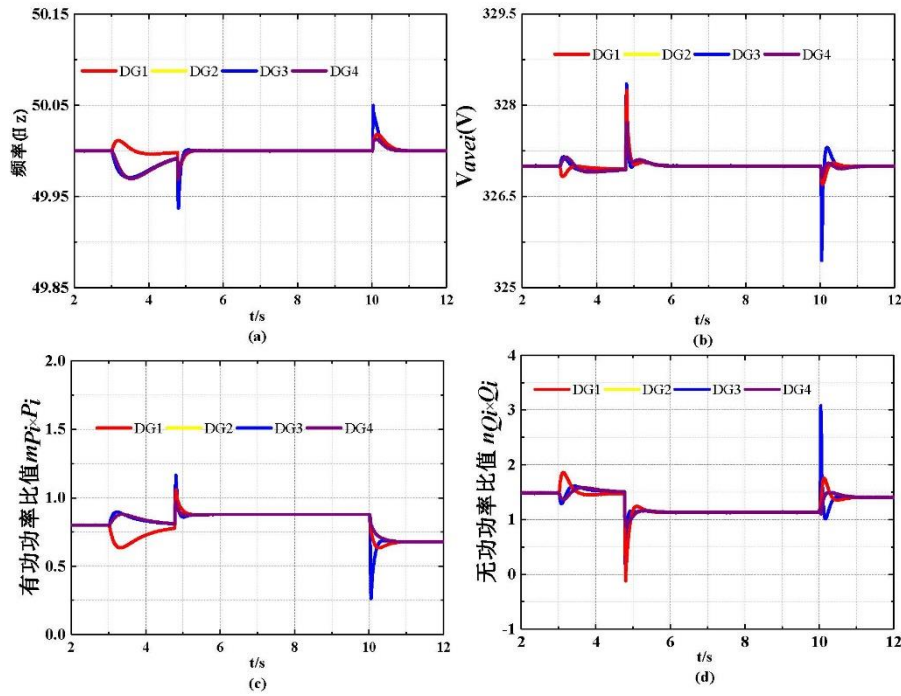


图4 在分布式协调并网同步控制策略下微电网系统的动态性能：(a)各 DG 的频率；(b)各 DG 所发掘的平均电压；(c)各 DG 的有功功率比值 $m_{P_i} \times P_i$ ；(d)各 DG 的无功功率比 $n_{Q_i} \times Q_i$

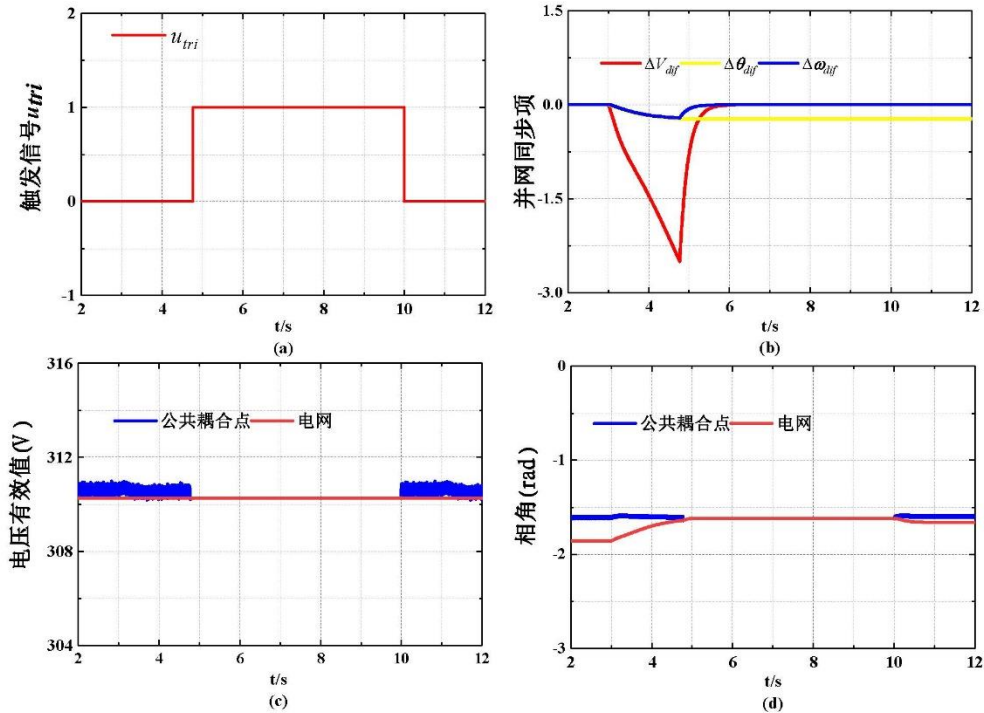


图 5 在分布式协调并网同步控制策略下微电网的并网同步动态过程：(a)触发信号；(b)电压，频率和相角并网同步项；(c)公共耦合点和电网的电压有效值；(d)公共耦合点和电网的相角

由于 MATLAB/Simulink 离线仿真无法接入真实控制器，较难反应出真实控制器中的延迟和有限精度，实时仿真器则可以同真实控制器连接，又不会有故障的问题，是控制方法验证的理想测试设备。

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；郑州大学 | 李忠文老师的科研团队就采用了 StarSim 实时仿真器来对所设计的控制方法进行实验验证。

实验采用的设备 HIL 和 RCP，主电路系统通过 HIL6020 构建，控制电路由 RCP1070 构建，如图 6 所示。

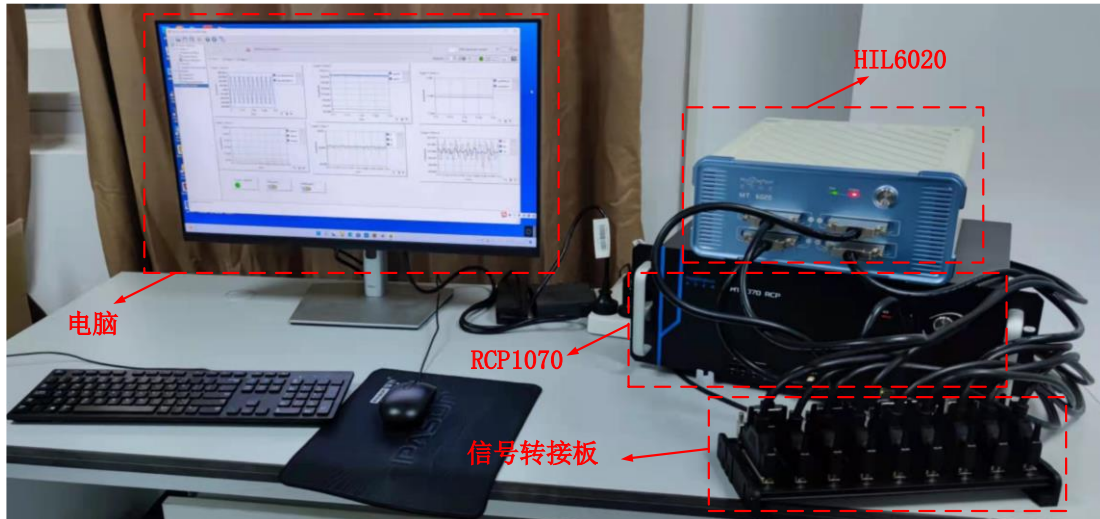


图 6 实验平台示意图

进行分布式协调并网同步控制策略有效性验证，实验结果波形图如图 7 所示。

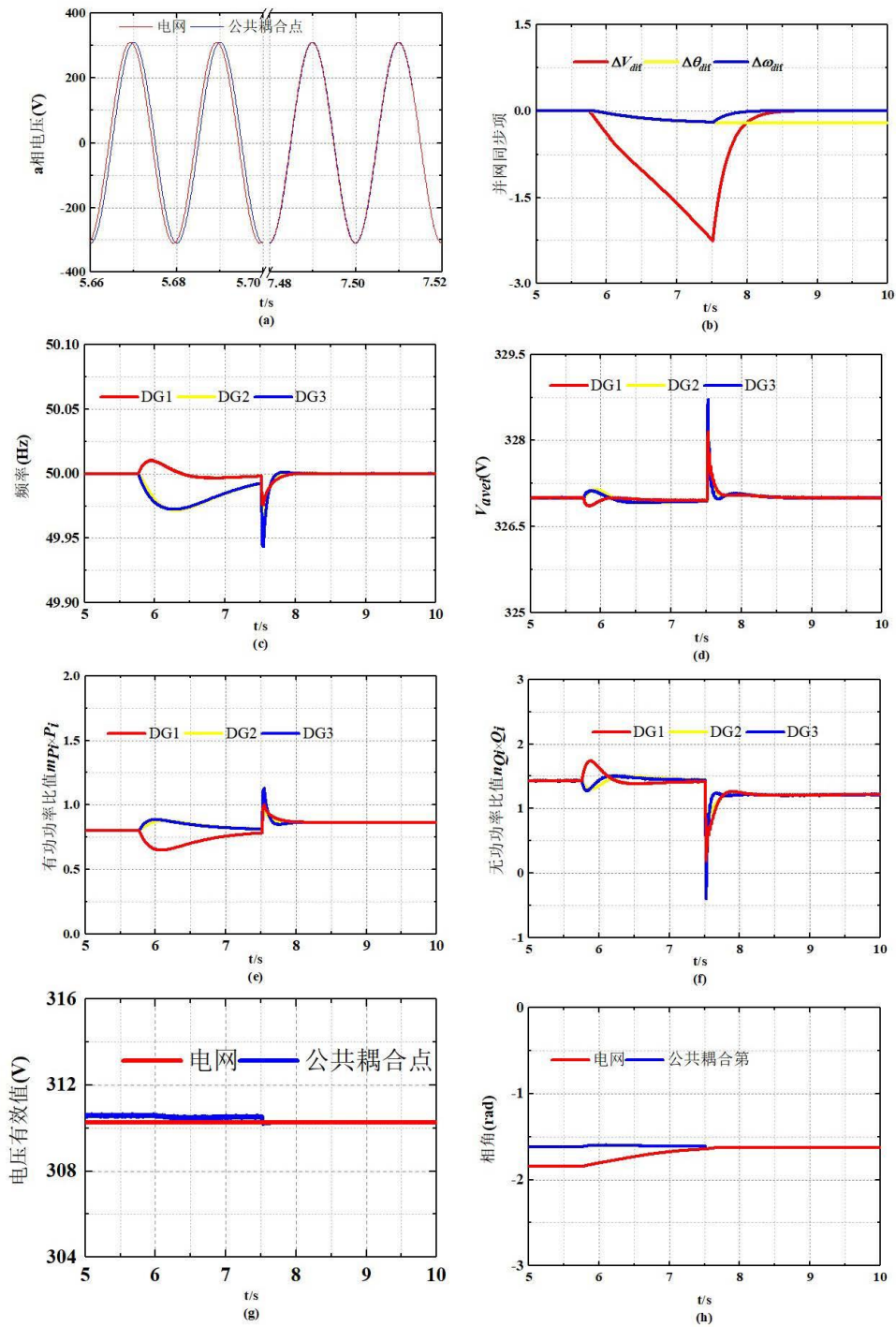


图 7 并网同步动态过程的实验结果：(a)公共耦合点和电网的 a 相电压波形；(b)电压、频率和相角并网同步项；(c)各 DG 的频率；(d)各 DG 所发掘的平均电压；(e)各 DG 的无功功率比 $n_{Q_i} \times Q_i$ ；(f)各 DG 的有功功率比值 $m_{P_i} \times P_i$ ；(g)公共耦合点和电网的电压有效值；(h)公共耦合点和电网的相角

实验结果与仿真结果一致，表明所设计的分布式协调并网同步控制策略能够有效地实现孤岛/并网模式的无缝切换，并确保有功功率和无功功率按比例分配。