

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.201398

适用于含多并联逆变器微电网联络线功率控制策略

许鹏¹, 黄鑫², 汪可友¹, 徐晋¹, 李国杰¹

(1. 电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海 200240;

2. 国网上海市电力公司浦东供电公司, 上海 200122)

摘要: 基于下垂机制的含多并联逆变器微电网联络线功率控制策略的控制层级较多, 层级间时间尺度相差较大, 导致其暂态响应较差, 应对本地负荷波动或下垂系数调整等扰动的能力不强。针对以上问题, 提出了一种新型的含多并联逆变器微电网联络线功率分层控制策略。一层分散控制采用电压滤波跟踪误差的方法对系统公共耦合点(Point of Common Connection, PCC)电压进行快速精确的控制。二层系统级集中控制通过直接调节 PCC 电压幅值和相位, 实现微电网与主网之间或互联微电网间特定的功率交换, 而其内部各逆变器则按照功率分配系数精确分配有功和无功功率。离线仿真和实时硬件在环实验验证了所提控制策略的有效性和优越性。

关键词: 微电网; 联络线功率控制; 分层控制; 并联逆变器

Tie-line power control strategy for a microgrid with multi-parallel connected inverters

XU Peng¹, HUANG Xin², WANG Keyou¹, XU Jin¹, LI Guojie¹

(1. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion, Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China; 2. State Grid Shanghai Pudong Power Supply Company, Shanghai 200122, China)

Abstract: The droop mechanism based tie-line power control strategy for a microgrid with multi-parallel connected inverters has many control levels and the time scales between the levels are quite different. This leads to poor transient response and weak ability to deal with disturbance such as local load fluctuation or droop coefficient adjustment. To solve these problems, a new type of hierarchical control strategy for the tie-line power of microgrid with multi-parallel connected inverters is proposed. The decentralized control of the first level adopts the method of voltage filtering tracking error to control the voltage at the Point of Common Connection (PCC) of the system rapidly and accurately. The centralized control of the second level realizes specific power exchange between the microgrid and the main grid or between interconnected microgrids by directly adjusting the voltage amplitude and phase at the PCC. The internal inverters accurately distribute the active and reactive power according to the power distribution coefficient. The effectiveness and superiority of the proposed control strategy are verified by offline simulation and real-time hardware-in-loop experiments.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877133) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. SQ2019YFE012784).

Key words: microgrid; tie-line power control; hierarchical control; parallel inverter

0 引言

随着全球能源短缺和环境污染问题的凸显, 具有污染少、可靠性高、能源利用率高、安装灵活等多种优点的分布式发电和微电网技术的相关研究受

到国际能源界越来越多的关注^[1-5]。微电网是一种集成了分布式电源、负荷、储能装置、变流器及监控保护装置的发配电系统, 通过运行控制和能量管理等技术实现并网或孤岛运行^[6-10]。随着逆变器及其控制技术的发展, 不同的可再生能源和储能装置可以集成到微电网中, 而多并联运行的逆变器常被用来提高微电网系统的容量^[11-12]。微电网中常规的光伏、风电等分布式电源的输出具有间歇性和随机

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877133); 国家电网公司科技项目资助(SQ2019YFE012784)

性等特点^[13], 所以对微电网和大电网之间以及互联微电网之间联络线上功率进行有效控制, 抑制联络线功率波动以减小微电网对大电网的影响显得尤为重要^[14-15]。

传统的微电网联络线功率调节是在不同时间尺度的微电网分层协调控制结构中, 由最顶层的控制实现。文献[16-17]提出了经典的基于下垂机制的微电网三层控制结构, 一层下垂控制实现多逆变器分散组网, 二层补偿控制修正 PCC 处电压和频率的偏差; 在此基础上, 三层控制基于微电网内部各分布式电源(Distributed Generation, DG)发电的功率预测和负荷预测, 根据经济调度指令确定各台 DG 的运行功率基点值及其在微电网的一、二层控制中所承担的功率波动比例^[18], 并调节二层补偿控制中 PCC 电压幅值和频率的参考值, 进而调整向各个 DG 组网单元所发送的电压和频率的补偿量, 从而实现微电网联络线功率控制。然而, 由于控制层级较多, 层级间时间尺度相差较大, 且下垂控制本质是一种稳态关系下推导出的一种有差控制方法, 其暂态响应较差, 应对系统扰动的能力不强, 外部干扰易导致微电网系统无法满足其内部电压和频率的供电可靠性^[19]。这些局限性难以满足微电网长期稳定高效的运行需求。文献[20]提出了一种基于同步电压源的微电网分层控制策略, 在其上层控制中详细分析了微电网能量管理系统通过改变各逆变器在基点功率下的运行频率和电压幅值实现联络线功率调节的完整过程。然而, 其本质上仍为在一层下垂机制和二层电压频率补偿环节的控制结构基础上的应用。近年来, 虚拟振子控制作为一种新型的多逆变器同步和功率均分的非线性时域控制策略受到越来越多的关注^[21-24], 其相较于下垂控制在相同的稳态特性下具有更优良的动态响应效果^[25-26]。文献[27]提出了一种基于虚拟振子控制的三层控制策略, 其首先通过理论分析揭示了虚拟振子控制非线性动态特性中固有存在的类下垂响应, 其次通过二层补偿控制修正电压和频率至设定值, 在此基础上三层控制通过调节电压和频率修正至设定值的补偿量实现联络线功率控制。然而, 其本质仍为基于一层类下垂机制和二层电压频率补偿环节的分层控制策略。

本文提出了一种新型的省去二层补偿控制的微电网联络线功率分层控制策略, 一层分散控制采用文献[28-29]提出的基于滤波跟踪误差的多逆变器组网控制方法, 基于其对 PCC 处电压幅值和频率精确快速的控制性能, 在二层控制中将含多并联逆变

器的微电网看作可控电压源, 通过直接调节 PCC 处电压幅值和相位对微电网联络线上功率进行精确控制; 而内部各逆变器则按照功率分配系数精确分配有功和无功功率。通过离线仿真和实时硬件在环实验验证所提控制策略的有效性和优越性。

1 微电网联络线功率分层控制结构

本文所提微电网联络线功率分层控制结构如图 1 所示, 其中一层为设备级分散控制, 二层为系统级集中控制。在微电网内部, 不同容量的 DG 经由逆变器和线路阻抗并联于公共交流母线, 并在各自分散控制器的作用下共同维持 PCC 电压稳定。基于一层分散控制对 PCC 电压幅值和频率精确快速调节的特点, 当微电网处于并网运行模式时, 多台并联 DG 组网单元及其本地负荷可视为一个整体, 对外表现出受控电压源的特性, 二层集中控制直接调整 PCC 电压的幅值和相位, 即通过通信网络将更新后的 PCC 电压幅值和相位的参考值发送至各台逆变器的本地控制器, 进而实现微电网与主网之间特定的功率交换, 实现对微电网联络线功率精确控制和灵活调节的目的。

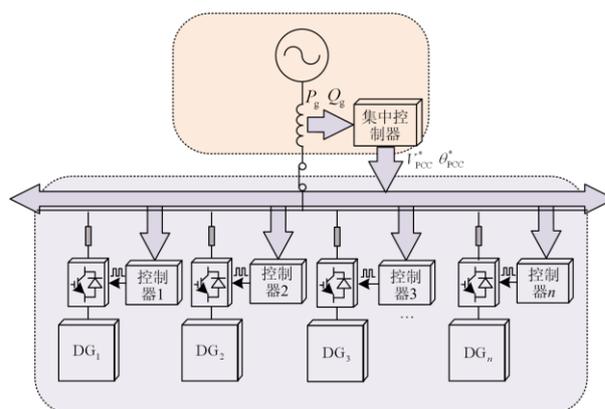


图 1 微电网联络线功率分层控制结构

Fig. 1 Hierarchical control structure of microgrid tie-line power

传统的微电网联络线功率控制多是在一层下垂机制和二层电压频率补偿控制的基础上, 由第三层的联络线功率控制调整二层补偿控制中 PCC 电压幅值和频率的参考值, 进而调整二层控制向各个组网单元所发送的电压幅值和频率补偿量, 来实现微电网与主网间联络线功率的调节。所提策略打破了这种自上而下垂直型的控制结构, 省去了时间尺度较长的二层补偿修正环节, 减少了控制层级, 暂态响应良好。在一层分散控制对 PCC 处电压快速调节基础上, 二层集中控制仅需改变 PCC 处电压幅值和相位即可对微电网联络线功率进行精确控制与灵活

调节, 控制方法简单有效, 可靠性强。在应对本地负荷波动和功率分配系数在线调整等工况下具有较强的鲁棒性。所提策略为含多并联逆变器微电网并网运行模式下功率交换及互联微电网间功率交换提供了一种新型有效的控制方法。

2 微电网联络线功率分层控制策略设计

2.1 一层分散控制

一层控制采用文献[28-29]中所提的基于滤波跟踪误差的分散组网控制策略, 其从系统动态重构模型出发, 采用滤波跟踪误差的方法设计控制率, 并构建李雅普诺夫函数通过理论分析证明所提分散组网控制策略的稳定性, 最后通过离线仿真和硬件在环实验证明所提控制策略的可行性与有效性。

基于三相同步 dq 坐标系的 PCC 电压参考信号为 $v_{od}^* = V_0$ 、 $v_{oq}^* = 0$, 其中 V_0 为 PCC 额定电压幅值。PCC 电压动态跟踪误差定义为

$$\begin{bmatrix} e_{vd} \\ e_{vq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{od}^* - v_{od} \\ v_{oq}^* - v_{oq} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中, v_{od} 和 v_{oq} 为 PCC 实际电压。滤波跟踪误差定义为

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = q \begin{bmatrix} e_{vd} \\ e_{vq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \dot{e}_{vd} \\ \dot{e}_{vq} \end{bmatrix} \quad (2)$$

基于滤波跟踪误差的第 k 台逆变器的控制率为

$$\begin{cases} u_{kd} = -q \frac{i_{kd}}{C_f} - m_k (\alpha + k_s) E_d - \\ m_k \int_0^t (\alpha k_s + 1/\rho) E_d(\tau) d\tau \\ u_{kq} = -q \frac{i_{kq}}{C_f} - m_k (\alpha + k_s) E_q - \\ m_k \int_0^t (\alpha k_s + 1/\rho) E_q(\tau) d\tau \end{cases} \quad (3)$$

式中: q 、 α 、 k_s 和 ρ 均为大于零的常数; i_{kd} 和 i_{kq} 为逆变器输出电流; C_f 为逆变器滤波电容容值之和, 即 $C_f = \sum_{k=1}^n C_{fk}$; m_k 为每台逆变器功率分配系数, 且 $\sum_{k=1}^n m_k = 1$ 。

基于三相 dq 同步坐标系下的第 k 台逆变器出口电压表达式为

$$\begin{bmatrix} v_{ikd} \\ v_{ikq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_k C_f u_{kd} + R_k i_{kd} + v_{kd} - L_k \omega i_{kq} \\ L_k C_f u_{kq} + R_k i_{kq} + v_{kq} + L_k \omega i_{kd} \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中: L_k 和 R_k 分别为滤波电感和等效滤波电阻; v_{kd} 和 v_{kq} 为逆变器滤波电容端电压; ω 为逆变器额定角

频率。

在含多并联逆变器微电网内部, 各台 DG 单元采集本地电压电流信息并通过上述的分散控制策略进行自治控制, 保证公共交流母线电压精确跟踪输入参考电压, 从而 n 台并联逆变器组网运行共同维持 PCC 电压和频率稳定。而每台 DG 单元则按照所设定的功率分配系数 m_k 精确分配有功和无功功率。

2.2 二层集中控制

基于一层分散组网控制对 PCC 处电压快速精准调节的特点, 含多并联逆变器的微电网及其本地负荷对外表现出“受控电压源”的特性。二层联络线功率控制仅需改变此“受控电压源”即 PCC 处的电压幅值和相位, 即调节 PCC 处与主网之间电压幅值差和相位差来实现微电网联络线功率精确调节。

图 2 为微电网与主网通过联络线互联的等效电路图, 其中 PCC 处电压表示为 $V \angle \delta$, 主网电压表示为 $E \angle 0$, 联络线的等效阻抗为 $Z \angle \theta$, 联络线的等效电阻为 R , 等效电感为 L , 则联络线上电流为

$$\bar{I}_g = \frac{V \angle \delta - E \angle 0}{Z \angle \theta} = \frac{V \cos(\delta - \theta) - E \cos \theta}{Z} + j \frac{V \sin(\delta - \theta) + E \sin \theta}{Z} \quad (5)$$

联络线上所传输的视在功率为

$$S_g = EI_g^* = \frac{EV \cos(\theta - \delta) - E^2 \cos \theta}{Z} + j \frac{EV \sin(\theta - \delta) - E^2 \sin \theta}{Z} \quad (6)$$

则联络线有功和无功功率分别为

$$\begin{cases} P_g = \frac{EV \cos(\theta - \delta) - E^2 \cos \theta}{Z} \\ Q_g = \frac{EV \sin(\theta - \delta) - E^2 \sin \theta}{Z} \end{cases} \quad (7)$$

由于微电网联络线等效电阻很小, 可将联络线近似看作纯感性的, 即 $\theta = 90^\circ$, $Z = \omega L$, 又因为微电网 PCC 处与主网之间电压相位差很小, 即满足 $\sin \delta \approx \delta$, $\cos \delta \approx 1$, 基于此, 式(7)可表示为

$$\begin{cases} P_g = \frac{EV \cdot \delta}{\omega L} \\ Q_g = \frac{E(V - E)}{\omega L} \end{cases} \quad (8)$$

由式(8)可知, 在主网电压 E 保持恒定时, 联络线有功功率 P_g 正比于 PCC 处与主网电压相位差 δ , 联络线无功功率 Q_g 正比于 PCC 处电压幅值 V 。因此可通过调整微电网 PCC 处电压幅值和相位分别

实现对微电网和主网之间联络线有功和无功功率的调节。

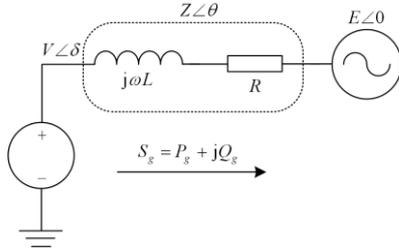


图 2 微电网与主网通过联络线互联的等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of the interconnection between the microgrid and main grid through the tie-line

集中控制器对微电网联络线所传输有功功率 P_g 和无功功率 Q_g 进行监测, 根据调度信息设定微电网向主网外送的有功功率参考值 P_g^* 和无功功率参考值 Q_g^* , 经过 PI 调节之后分别得到微电网 PCC 处电压相位增量 $\Delta\delta$ 和幅值增量 ΔV , 其表达式为

$$\Delta\delta = K_{p_P}(P_g^* - P_g) + K_{i_P} \int (P_g^* - P_g) dt \quad (9)$$

$$\Delta V = K_{p_Q}(Q_g^* - Q_g) + K_{i_Q} \int (Q_g^* - Q_g) dt \quad (10)$$

式中, K_{p_P} 、 K_{i_P} 和 K_{p_Q} 、 K_{i_Q} 分别为微电网联络线有功和无功功率 PI 调节参数, 则同步旋转坐标系下 PCC 处的参考电压和参考相位为

$$\delta^* = \int_0^t \omega_0 d\tau + \delta_0 + \Delta\delta \quad (11)$$

$$V^* = V_0 + \Delta V \quad (12)$$

式中: ω_0 为同步旋转坐标系的额定角频率; δ_0 为同步旋转坐标系的初始相位; V_0 为 PCC 处的标准额定电压; δ^* 和 V^* 作为一层分散控制中 PCC 处电压幅值和相位的参考值传输到各 DG 单元的控制中, 每台逆变器根据本地所采集信息和二层集中控制器所传送的参考值信息, 通过相应控制策略共同调节 PCC 处电压幅值和相位至设定值, 进而实现对联络线功率的闭环追踪控制。而对含多并联组网逆变器的微电网系统内部来说, 各个发电单元按照功率分配系数 m_k 精确分配本地负荷消纳以及外送至主网的有功和无功功率, 达到了微电网内部功率的优化配置。最终, 本文所提微电网联络线功率控制策略整体控制框图如图 3 所示。

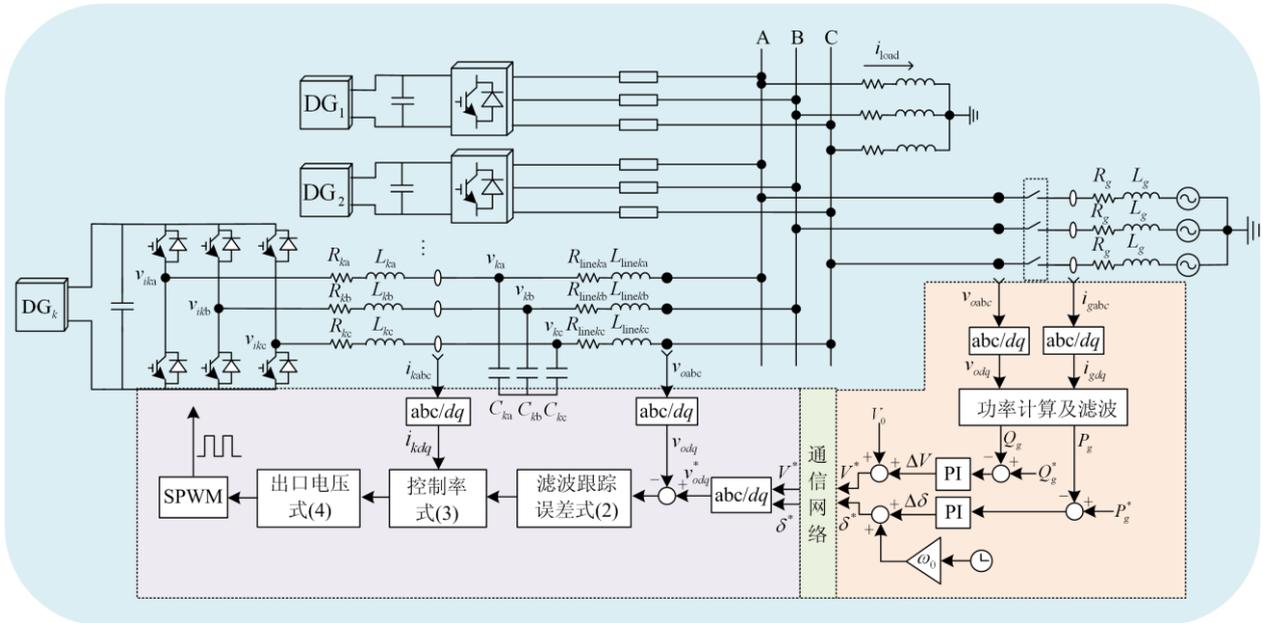


图 3 所提微电网联络线功率分层控制策略整体控制框图

Fig. 3 Overall control block diagram of the proposed hierarchical control strategy for microgrid tie-line power

3 离线仿真实验验证

为了验证本文所提出的含多并联逆变器微电网联络线功率控制策略的有效性, 基于 Matlab/

Simulink 平台搭建了含 2 台逆变器的微电网系统模型, 系统拓扑与图 3 一致。为进一步展现所提控制策略的优越性, 在相同的微电网系统中引入了基于下垂机制的分层控制策略进行对比, 离线仿真实验

的具体参数如表 1 所示。

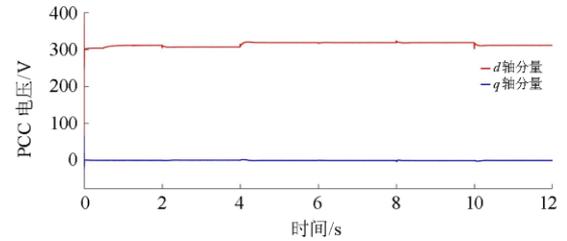
表 1 离线仿真实验相关参数

Table 1 Related parameters of offline simulation experiment

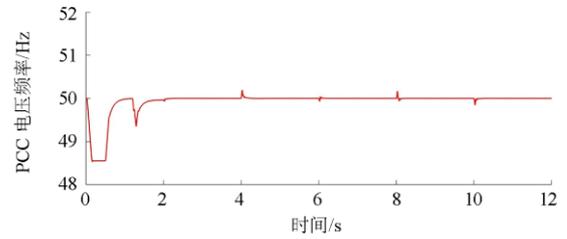
微电网系统参数	数值
直流电压 V_{dc}/V	800
PCC 相电压幅值 V_{PCC}/V	220
额定频率 f/Hz	50
PWM 波频率 f_c/kHz	30
滤波电感 L_f/mH	1.8(DG ₁) 2.0(DG ₂)
滤波电容 $C_f/\mu F$	10(DG ₁) 8(DG ₂)
线路电阻 R_{line}/Ω	0.02(DG ₁) 0.01(DG ₂)
线路电感 $L_{line}/\mu H$	100(DG ₁) 200(DG ₂)
所提分层控制策略参数	数值
(q, α)	$(6 \times 10^4, 1.8 \times 10^4)$
(k_s, ρ)	$(9 \times 10^3, 1.6667 \times 10^{-7})$
有功功率控制器参数 (K_{pp}, K_{ip})	$(2 \times 10^{-7}, 2 \times 10^{-5})$
无功功率控制器参数 (K_{pq}, K_{iq})	$(1.5 \times 10^{-4}, 1 \times 10^{-2})$
功率分配系数 m_k	0.5(DG ₁) 0.5(DG ₂)
基于下垂机制分层控制策略参数	数值
P - f 下垂系数	2×10^{-4}
Q - V 下垂系数	3×10^{-3}
电压补偿控制器参数 (K_{pv}, K_{iv})	(0.2, 7.2)
频率补偿控制器参数 (K_{pf}, K_{if})	(0.2, 10)
有功功率控制器参数 (K_{pp}, K_{ip})	$(1.95 \times 10^{-4}, 8.75 \times 10^{-4})$
无功功率控制器参数 (K_{pq}, K_{iq})	$(5.5 \times 10^{-3}, 0.1)$

3.1 场景 1

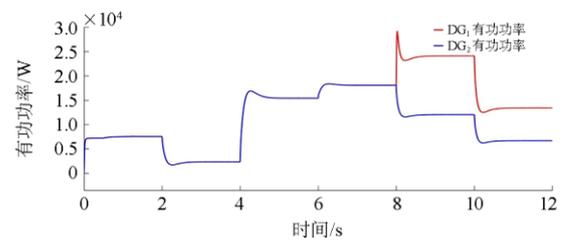
该场景验证了含多并联逆变器微电网由离网切换为并网运行模式后，系统响应集中控制器所下达的联络线功率指令情况以及功率双向调节性能。初始时刻，系统带载启动，本地负荷为 15 kW 和 5 kvar。1.2 s 时，启动预同步控制。2 s 时，系统进行离并网切换，联络线功率指令由 0 调整为 -10 kW 和 -3 kvar。4 s 时，联络线功率指令调整为 15 kW 和 6 kvar。对比仿真实验结果如图 4 和图 5 所示。



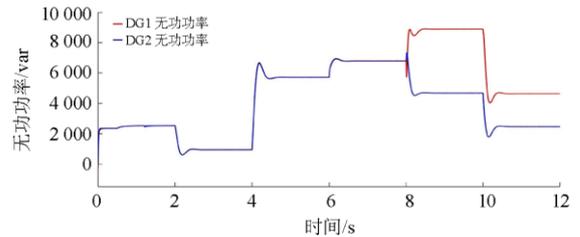
(b) 微电网 PCC 电压幅值



(c) 微电网 PCC 电压频率



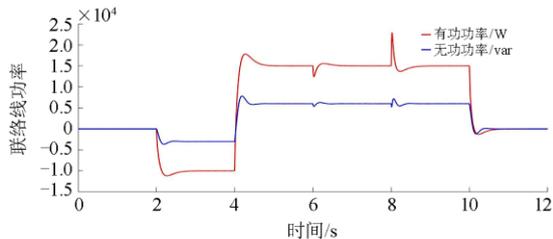
(d) 各台 DG 有功功率



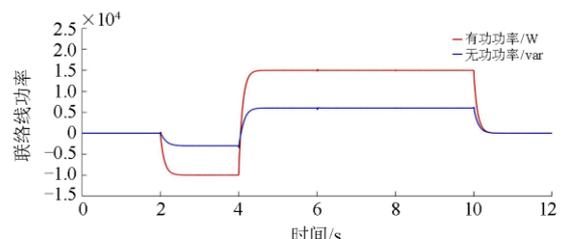
(e) 各台 DG 无功功率

图 4 基于下垂机制的微电网联络线功率分层控制策略离线仿真结果

Fig. 4 Offline simulation results of hierarchical control strategy for microgrid tie-line power based on droop mechanism



(a) 微电网联络线功率



(a) 微电网联络线功率

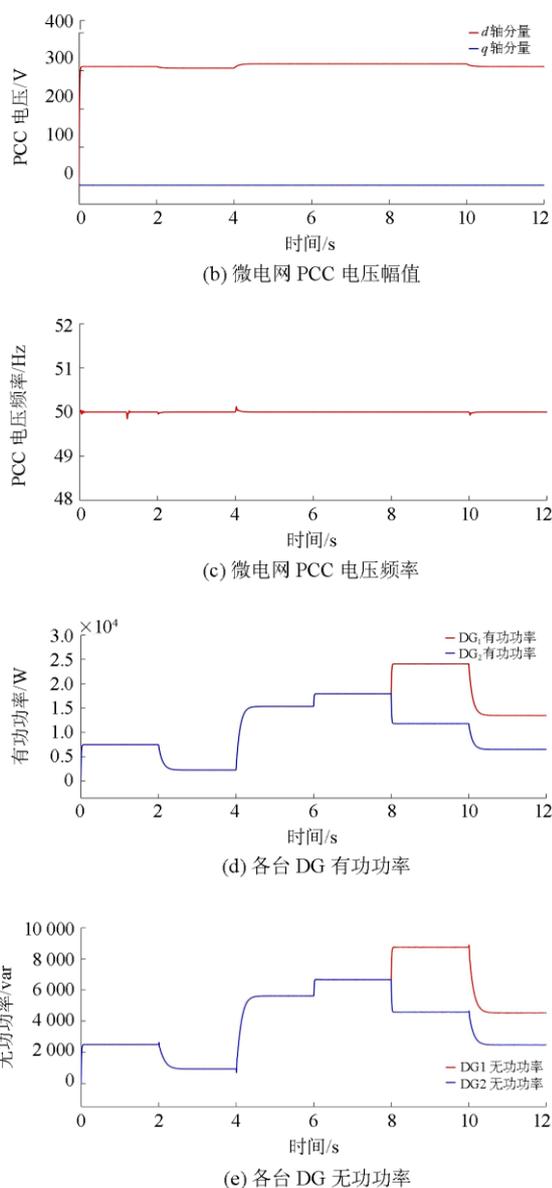


图5 所提微电网联络线功率分层控制策略离线仿真结果
Fig. 5 Offline simulation results of the proposed hierarchical control strategy for microgrid tie-line power

如图 4(b)和图 4(c)所示, 基于下垂机制的分层控制在 0.5 s 时使能电压和频率补偿, 将 PCC 电压和频率稳定在额定值。如图 5(b)和图 4(c)所示, 在所提分层控制策略下, 系统带载启动后 PCC 电压和频率迅速稳定在额定值, 无需更长时间尺度的补偿。如图 5(a)所示, 2 s 时刻, 所提控制策略下, 微电网联络线功率迅速响应功率指令的调整, 经短暂的暂态过程即可稳定在 -10 kW 和 -3 kvar , 此时系统从主网吸收有功和无功功率。4 s 时, 联络线功率响应指令的变化迅速稳定于 15 kW 和 6 kvar , 无超调与

振荡, 此时系统向主网输出有功和无功功率。该场景验证了在所提分层控制策略下, 系统可灵活调节微电网通过联络线外送或吸收的功率, 且动态响应优良。

3.2 场景 2

该场景测试了在微电网并网运行向主网传输特定功率时, 本地负荷波动对系统稳定性的影响。在场景 1 的基础上, 即微电网向主网传输有功功率 15 kW 和无功功率 6 kvar 期间, 6 s 时刻, 微电网本地负荷由 15 kW 和 5 kvar 突变至 20 kW 和 7 kvar 。

如图 4(a)所示, 基于下垂机制的分层控制策略, 微电网联络线有功和无功功率在面对负荷突变时均有一定幅度的波动, 如图 4(b)和图 4(c)所示, 该波动是由 PCC 电压幅值和频率的振荡引起的。如图 5(a)所示, 所提控制策略下, 在本地负荷突变时, 微电网联络线有功和无功功率在经历极微小的波动后立即恢复原状, 如图 5(b)和图 5(c)所示, PCC 电压幅值和频率波形平稳, 几乎未受影响, 微电网内部供电可靠性得到保障。该场景验证了相比于基于下垂机制的微电网分层控制策略, 所提控制策略下, 系统应对本地负荷波动的鲁棒性更强。

3.3 场景 3

该场景验证了微电网并网运行向主网传输特定功率时, 功率分配系数调整对系统稳定性的影响以及各 DG 的功率调节性能。在场景 3 之前, 基于下垂机制的分层控制策略和所提控制策略下, 两台 DG 功率分配比例为 1:1。在 8 s 时, 功率分配比例突变为 2:1, 即 DG_1 的 $P-f$ 下垂系数更新为 1×10^{-4} , $Q-V$ 下垂系数更新为 1.5×10^{-3} , DG_2 的下垂系数不变; 所提策略功率分配系数更新为 $m_1 = 0.67$, $m_2 = 0.33$ 。10 s 时, 联络线功率指令调零, 11.5 s 时, 系统进行并离网切换。

如图 4(a)、图 4(b)和图 4(c)所示, 基于下垂机制的微电网分层控制策略, 下垂系数更新时, PCC 处电压幅值和频率的波动导致微电网联络线有功和无功功率均产生了大幅度振荡。而所提控制策略下, 如图 5(a)、图 5(d)和图 5(e)所示, 两台 DG 仍按照功率分配系数精确分配有功和无功功率, 分配比例由 1:1 变为 2:1, 而对联络线所传输的有功和无功功率不产生影响; 如图 5(b)和图 5(c)所示, PCC 电压幅值和频率在此期间维持稳定, 保证微电网内部供电的可靠性。该场景验证了在所提控制策略下, 系统应对功率分配系数调整具有较强的鲁棒性, 且可在线灵活调节各个 DG 功率分配的比例。

4 硬件在环仿真实验验证

为进一步验证所提微电网联络线功率分层控制策略的有效性和实用性，基于 NI-PXI+DSP 的实时硬件在环仿真平台进行了相应实验验证。在电磁暂态仿真软件 Starsim HIL 中搭建含两台逆变器的微电网拓扑模型，运行于 NI-PXI 机箱的 FPGA 板卡中，所提分层控制算法运行于外置 DSP 微控制器 TMS320F28335 中。DSP 微控制器通过 IO 接口板采集 FPGA 板卡外送的模拟信号，内部经过计算将调制产生的 PWM 波信号送回，形成实时硬件在环仿真闭环系统。实时硬件在环仿真实验平台如图 6 所示。

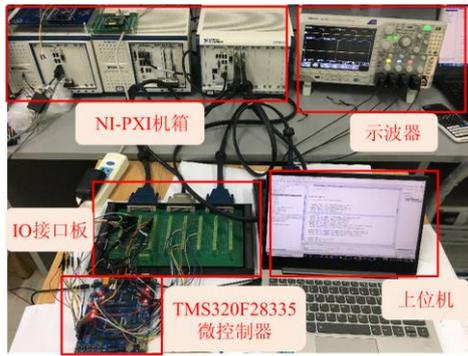


图 6 NI-PXI+DSP 实时硬件在环仿真实验平台
Fig. 6 NI-PXI+DSP real-time hardware-in-loop simulation experiment platform

硬件在环仿真实验针对所提微电网联络线功率分层控制策略设置了 3 个算例。算例 1 验证系统应对联络线功率指令调整的暂态响应；算例 2 验证本地负荷波动对联络线功率传输稳定性的影响；算例 3 验证在线调整功率分配系数对系统稳定性的影响。硬件在环仿真实验主要参数如表 2 所示，其余参数与离线仿真实验一致。

表 2 实时硬件在环实验相关参数

Table 2 Related parameters of real-time hardware-in-loop experiment

硬件在环实验参数	数值
(q, α)	$(5 \times 10^3, 3 \times 10^3)$
(k_s, ρ)	$(5 \times 10^3, 6.667 \times 10^{-8})$
有功功率控制器参数 (K_{pp}, K_{ip})	$(1 \times 10^{-12}, 1 \times 10^{-10})$
无功功率控制器参数 (K_{r0}, K_{i0})	$(1 \times 10^{-10}, 1 \times 10^{-8})$

4.1 算例 1

在离并网切换之前需要对微电网系统进行预同步控制。图 7 为预同步前后 PCC 电压与网侧电压波形图。在保证 PCC 电压与网侧电压幅值、频率和相

位均相同之后，系统进行离并网切换。初始时刻，联络线功率指令为零，某时刻联络线功率指令调整为 15 kW 和 6 kvar，网侧电压电流响应情况如图 8 所示。如图 8(a)和图 8(b)所示，在功率指令调整之后，联络线电流在 2 个周波以内即可快速达到稳定状态，而网侧电压未受任何影响。为验证微电网联络线功率双向传输性能，某时刻联络线功率指令由零调整为-15 kW 和-6 kvar。网侧电压电流响应情况如图 9 所示，联络线电流经历短暂暂态过程迅速达到稳定状态，网侧电压未受任何影响，由电压电流相位关系可知，此时微电网从主网吸收有功和无功功率。

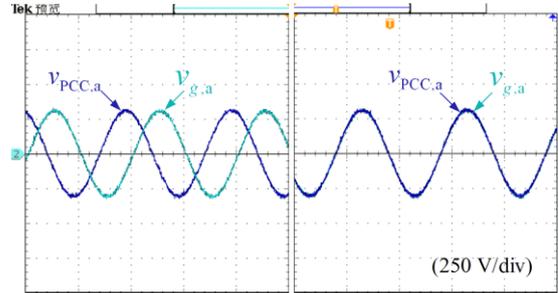
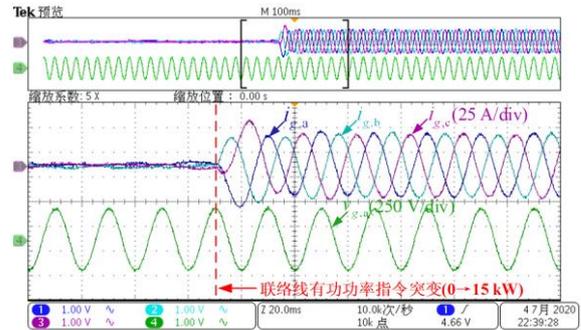
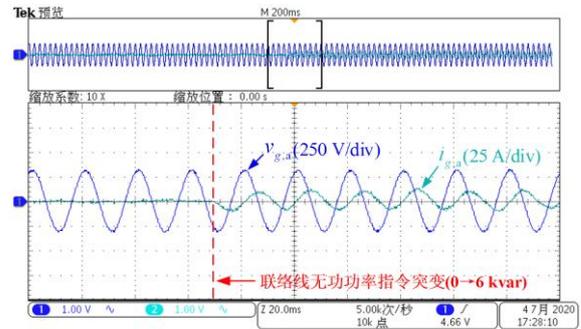


图 7 预同步前后 PCC 电压与网侧电压波形
Fig. 7 PCC voltage and grid-side voltage waveforms before and after pre-synchronization



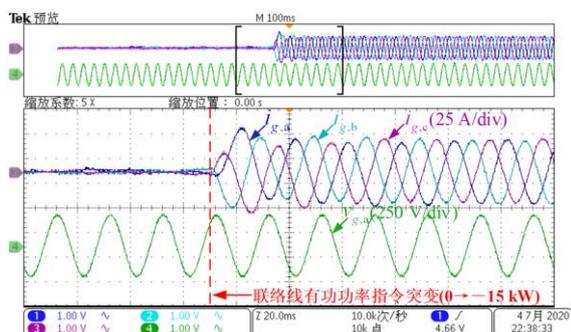
(a) 联络线电流与网侧 A 相电压



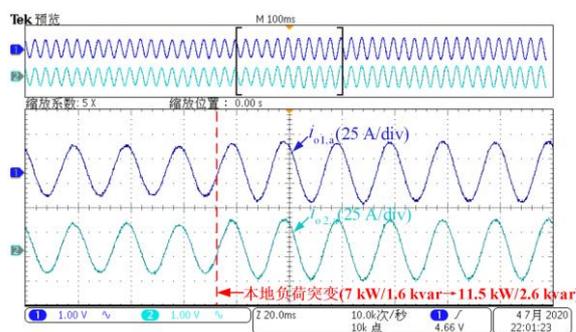
(b) 联络线 A 相电流与网侧 A 相电压

图 8 联络线功率指令正向调整网侧电压电流波形

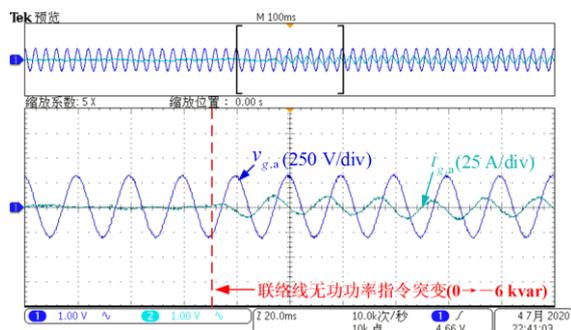
Fig. 8 Grid-side voltage and current waveforms when the tie-line power command is adjusted positively



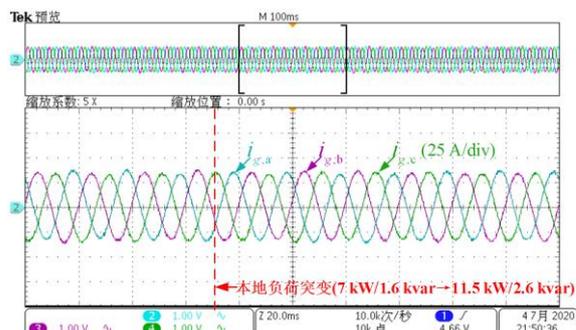
(a) 联络线电流与网侧 A 相电压



(b) 各台逆变器 A 相电流



(b) 联络线 A 相电流与网侧 A 相电压



(c) 联络线电流

图 9 联络线功率指令负向调整网侧电压电流波形

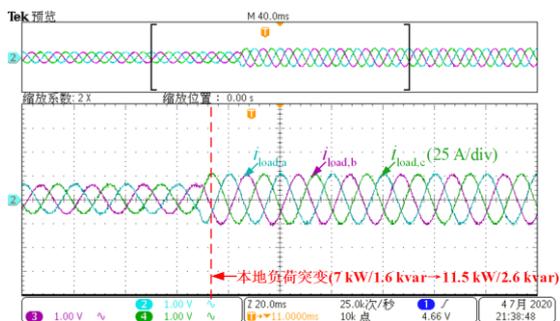
Fig. 9 Grid-side voltage and current waveforms when the tie-line power command is adjusted negatively

图 10 本地负荷波动实验结果

Fig. 10 Experiment results when the local load fluctuates

4.2 算例 2

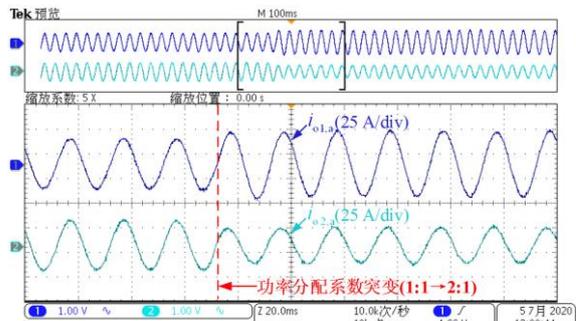
本算例验证所提控制策略下, 微电网系统在稳态时应对本地负荷波动的鲁棒性。初始时刻, 微电网本地负荷为 7 kW 和 1.6 kvar, 联络线传输有功功率 15 kW 和无功功率 6 kvar。如图 10(a)和图 10(b)所示, 某时刻本地负荷突变为 11.5 kW 和 2.6 kvar, 本地负荷电流相应增大, 两台逆变器输出电流在均分的同时分别增大, 补偿负荷波动产生的功率缺额。如图 10(c)所示, 联络线电流在此过程中保持不变, 未受影响, 即本地负荷的波动不影响系统向主网传输功率。



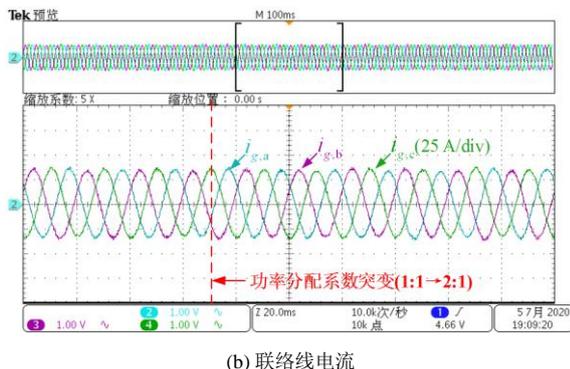
(a) 本地负荷电流

4.3 算例 3

本算例验证所提控制策略下, 微电网系统在稳态时应对功率分配系数调整的鲁棒性以及各台逆变器输出功率分配特性。初始时刻, 微电网本地负荷为 7 kW 和 1.6 kvar, 联络线传输有功功率 15 kW 和无功功率 6 kvar, 两台逆变器按照所设定的功率分配比例均分本地负荷消纳及外送至主网的功率。某时刻, 功率分配系数由 1:1 调整为 2:1, 即所提策略功率分配系数更新为 $m_1 = 0.67$ 和 $m_2 = 0.33$ 。如图 11(a)所示, 两台逆变器输出电流迅速响应功率分配系数的变化, 由 1:1 均分变为以 2:1 比例分配。如图 11(b)所示, 在此过程中联络线电流不变, 即微电网向主网传输的功率未受任何影响。



(a) 各台逆变器 A 相电流



(b) 联络线电流

图 11 功率分配系数在线调整实验结果

Fig. 11 Experiment results when power distribution coefficient is adjusted online

5 结论

本文提出了一种适用于含多并联逆变器微电网在并网运行模式下的联络线功率控制策略。在精确控制和灵活调节微电网联络线功率的同时，保证微电网内部各逆变器按照功率分配系数精确分配输出功率。相较于传统的基于下垂机制的微电网三层控制策略，所提控制策略通过直接调节 PCC 处电压幅值和相位控制微电网联络线功率，控制方法简单有效，可靠性强。省去了二层补偿环节，减少了控制层级，暂态响应优良。在面对本地负荷波动和功率分配比例在线调整时具有较强的鲁棒性。为含多并联逆变器微电网并网运行模式下功率交换及互联微电网间功率交换提供了一种新型有效的控制方法。所提分层控制策略层级之间的通信延迟对控制性能的影响仍然有待后续进一步研究。

参考文献

- [1] 王成山, 王守相. 分布式发电供能系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(20): 1-4, 31.
WANG Chengshan, WANG Shouxiang. Study on some key problems related to distributed generation systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(20): 1-4, 31.
- [2] 鲁宗相, 王彩霞, 闵勇, 等. 微电网研究综述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(19): 100-107.
LU Zongxiang, WANG Caixia, MIN Yong, et al. Overview on microgrid research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(19): 100-107.
- [3] BIDRAM A, DAVOUDI A. Hierarchical structure of microgrids control system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(4): 1963-1976.
- [4] 宋春宁, 付栋, 李欣. 双向全桥 DC/DC 变换器在直流微电网中的应用[J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 128-132.
- [5] 李静雅, 易庚, 胡汉梅, 等. 基于改进鸡群算法的微电网协同优化运行研究[J]. 高压电器, 2019, 55(7): 203-210.
- [6] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.
- [7] 刘文, 杨慧霞, 祝斌. 微电网关键技术研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(14): 152-155.
- [8] 刘练, 李林, 丁明, 等. 面向园区的光储型微电网设计与应用[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 171-179.
- [9] 杨昆, 周晓健, 夏能弘, 等. 考虑微电网接入下的配电网优化规划[J]. 电测与仪表, 2019, 56(2): 52-58.
- [10] 郑伟, 胡长斌, 丁丽, 等. 基于多智能体系统微电网分布式控制研究[J]. 高压电器, 2019, 55(3): 177-184.
- [11] ROCABERT J, LUNA A, BLAABJERG F, et al. Control of power converters in AC microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(11): 4734-4749.
- [12] HAIDER S, LI G, WANG K. A dual control strategy for power sharing improvement in islanded mode of AC microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2018, 3(2): 111-118. DOI: 10.1186/s41601-018-0084-2.
- [13] 肖朝霞, 贾双, 朱建国, 等. 风光储微电网并网联络线功率控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(15): 169-179.

- containing wind, photovoltaic and battery[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(15): 169-179.
- [14] 吕天光, 艾芊, 韩学山, 等. 基于模糊理论的并网型含光伏微电网功率控制[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2404-2409.
LÜ Tianguang, AI Qian, HAN Xueshan, et al. Fuzzy theory based grid-connected power control of microgrid containing photovoltaic system[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2404-2409.
- [15] 李咸善, 董鑫, 程杉, 等. 微电网群频率调整的分层协调控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(21): 1-14.
LI Xianshan, DONG Xin, CHENG Shan, et al. Hierarchical coordinated control strategy for frequency adjustment of microgrid groups[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(21): 1-14.
- [16] GUERRERO J M, CHANDORKAR M, LEE T, et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids—part I: decentralized and hierarchical control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1254-1262.
- [17] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—a general approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(1): 158-172.
- [18] 鲍薇, 胡学浩, 李光辉, 等. 提高负荷功率均分和电能质量的微电网分层控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(34): 106-114, 18.
BAO Wei, HU Xuehao, LI Guanghui, et al. Hierarchical control of microgrid to improve power sharing and power quality[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 106-114, 18.
- [19] 王二永, 王帅. 基于自适应虚拟电阻的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 144-149.
WANG Eryong, WANG Shuai. Low voltage microgrid droop control strategy based on adaptive virtual resistance[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 144-149.
- [20] 鲍薇, 胡学浩, 李光辉, 等. 基于同步电压源的微电网分层控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(23): 20-26.
BAO Wei, HU Xuehao, LI Guanghui, et al. Synchronous voltage source based design of hierarchical control strategy for microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(23): 20-26.
- [21] JOHNSON B B, DHOPLÉ S V, HAMADEH A O, et al. Synchronization of nonlinear oscillators in an LTI electrical power network[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2014, 61(3): 834-844.
- [22] JOHNSON B B, DHOPLÉ S V, HAMADEH A O, et al. Synchronization of parallel single-phase inverters with virtual oscillator control[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(11): 6124-6138.
- [23] JOHNSON B B, SINHA M, AINSWORTH N G, et al. Synthesizing virtual oscillators to control islanded inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(8): 6002-6015.
- [24] SINHA M, DÖRFLER F, JOHNSON B B, et al. Uncovering droop control laws embedded within the nonlinear dynamics of Van der Pol oscillators[J]. IEEE Transactions on Control of Network Systems, 2017, 4(2): 347-358.
- [25] SHI Z, LI J, NURDIN H I, et al. Comparison of virtual oscillator and droop controlled islanded three-phase microgrids[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2019, 34(4): 1769-1780.
- [26] JOHNSON B, RODRIGUEZ M, SINHA M, et al. Comparison of virtual oscillator and droop control[C] // 2017 IEEE 18th Workshop on Control and Modeling for Power Electronics (COMPEL), July 9-12, 2017, Stanford, CA, USA: 1-6.
- [27] AWAL M A, YU H, TU H, et al. Hierarchical control for virtual oscillator based grid-connected and islanded microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(1): 988-1001.
- [28] WANG K, HUANG X, FAN B, et al. Decentralized power sharing control for parallel-connected inverters in islanded single-phase micro-grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(6): 6721-6730.
- [29] HUANG X, WANG K, LI G, et al. Lyapunov-based control strategy for precise power sharing and voltage regulation of multi-inverter islanded micro-grids[C] // 2017 19th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'17 ECCE Europe), September 11-14, 2017, Warsaw, Poland: 1-10.

收稿日期: 2020-11-11; 修回日期: 2021-04-30

作者简介:

许鹏(1995—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微电网多并联逆变器控制; E-mail: striderxu@sjtu.edu.cn

黄鑫(1990—), 男, 博士, 工程师, 研究方向为电力系统与电力电子控制技术; E-mail: 864579395@qq.com

汪可友(1979—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力能源系统建模与计算、电力电子化系统电磁暂态实时仿真。E-mail: wangkeyou@sjtu.edu.cn

(编辑 许威)