DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.3.56 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

基于交流小信号注入的不准确馈线阻抗孤岛微网频率恢复控制策略

胡雪凯[1](中国电源学会会员)，孟 良[1]，殷一林[2](中国电源学会学生会员)，
李 磊[2](中国电源学会学生会员)，王海旭[2](中国电源学会学生会员)，
雷万钧[2](中国电源学会会员)
(1.国家电网河北电力科学研究院，石家庄 050000；2.西安交通大学电气工程学院，西安 710049)

摘要：随着国家“双碳”战略的提出，由分布式电源组成的微电网成为解决能源危机和环境污染问题的有效途径。为了提升微电网系统电能质量，分布式电源通常会加入频率恢复控制补偿负荷变化带来的频率偏差。为减少系统对高速通信的依赖，计算负荷端频率时需获知准确的馈线阻抗信息，这在实际工程中往往难以保证，从而导致分布式电源间功率分配差异并最终恶化系统频率稳定。为此，分析不准确馈线阻抗导致系统失稳的机理，指出负荷端频率计算值误差是分布式电源间功率发散的根本原因；在此基础上提出1种基于交流小信号注入的频率恢复控制策略，该方法在每个分布式电源输出电压中注入1个附加的交流小信号，在交流小信号频率与负荷端频率计算值间构建下垂关系，利用小信号有功功率补偿不准确馈线阻抗引起的负荷端频率计算值偏差，实现补偿频率偏差的同时维持系统功率均分；为说明该控制策略的适用范围，建立系统差分小信号模型讨论了相关参数设计方法，最后通过半实物实验验证了该方法的有效性。

关键词：孤岛微网；频率恢复；二次控制；功率均分；交流小信号注入

Frequency Restoration Control Strategy for Islanded Microgrid with Inaccurate Feeder Impedance Based on Small-AC-signal Injection

HU Xuekai[1], *Member*, *CPSS*, MENG Liang[1], YIN Yilin[2], *Student Member*, *CPSS*, LI Lei[2], *Student Member*, *CPSS*, WANG Haixu[2], *Student Member*, *CPSS*, LEI Wanjun[2], *Member*, *CPSS*
(1. Electric Power Research Institute, State Grid Hebei Electric Power Co., Ltd., Shijiazhuang 050000, China; 2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: With the "Dual-carbon" strategy proposed in China, the microgrid composed of distributed generations has become an effective way to solve the energy crisis and environmental pollution problems. To improve the power quality of a microgrid system, frequency restoration control is usually added to distributed generations to compensate for the frequency deviation caused by changes in load. It is necessary to obtain the information about accurate feeder impedance when calculating the load terminal frequency, so as to reduce the reliance of the system on high-speed communication. However, this is often difficult to be guaranteed in practical engineering, thus leading to the difference of power distribution among distributed generations and eventually deteriorating the frequency stability of the system. To solve these problems, the mechanism of an unstable system caused by the inaccurate feeder impedance is analyzed, and it is pointed out that the calculation error of load terminal frequency is the basic cause of power distribution difference among distributed generations. On this basis, a frequency restoration control strategy based on small-AC-signal injection is proposed. By adding an additional small-AC-signal to the output voltage from each distributed generation, a droop

收稿日期：2024-11-21；**修回日期**：2024-12-29；**录用日期**：2025-01-10；**网络首发日期**：2025-01-22
基金项目：国家电网有限公司科技项目(kj2023-017)
This work is supported by State Grid Corporation of China under the grant kj2023-017

relationship between the injected small-AC-signal frequency and the calculated value of load terminal frequency is established, and the active power of the small signal is used to compensate for the calculated deviation of load terminal frequency caused by the inaccurate feeder impedance, so as to realize the compensation for frequency deviation while maintaining the power sharing of the system. To illustrate the application scope of this control strategy, the differential-mode small-signal model of a typical microgrid system is established, and the design method for related parameters is discussed. Finally, the effectiveness of the proposed method was verified by a hardware-in-the-loop experiment.

Keywords: Islanded microgrid; frequency restoration; secondary control; power sharing; small-AC-signal injection

近年来，由于能源危机和环境污染的日益严重，可再生能源发电受到了学者们的广泛关注[1]。由于可再生能源的分布式特性，微电网正逐渐成为可再生能源就地消纳的有效手段[2]。在多数场景下，微电网中的可再生能源通过逆变器等电力电子装备连接到公共节点 PCC(point of common coupling)，由于高比例可再生能源、高比例电力电子设备的新型电力系统中同步机电源比例下降，使得系统频率更容易面临失稳的风险，从而影响 PCC 点关键负荷供电，因此研究微电网中并联逆变器的协调控制对提升新型电力系统频率稳定性具有重要意义[3]。随着对微电网研究的深入以及微电网功能的复杂化，分层控制逐渐成为微电网控制的主要方式，通过在不同的控制层级下实现不同的控制目标来赋予其较高的灵活性和智能性[4]。通常将微电网控制架构按照其功能和控制带宽的不同划分为一次控制、二次控制和三次控制 3 个层次[5-6]，本文重点在于频率二次控制 SFC(secondary frequency control)，因此主要讨论一次控制和二次控制。

在一次控制中，有功功率-频率(P-ω)下垂控制因其灵活、可靠的功率分配特性在无通信分布式电源 DG(distributed generation)并联应用场景下获得了高度认可[7]。由于下垂特性的存在，当负荷变化时必然会导致频率出现偏差，如果取较大的下垂系数，可能导致频率超限；而如果取较小的下垂系数，则可能损失功率分配精度，这是传统下垂控制面临的一个主要问题[8]。实际应用中倾向于将下垂系数设计得大一些，这时就需要通过适当的二次控制将系统频率恢复到额定值[9]。根据通信架构的不同，可以将二次控制分为集中式、分布式和分散式 3 种方案[10]。

在集中式二次控制策略下，微电网中央控制器 MGCC(microgrid central controller)从 PCC 点处采集信息并通过比例积分 PI(proportional integral)调节器生成频率恢复补偿信号，通过通信线下发到每台分布式电源的本地控制器[11]。集中式二次控制可以通过较低的控制复杂度实现精确的频率恢复，但 MGCC 对于一对多通信架构的过分依赖降低了系统的可靠性；此外，随着系统中分布式电源数目的增加，MGCC 和通信架构的制造和维护成本剧增，不利于微电网的可持续发展[12]。为提高系统可靠性，研究人员提出了 1 种仅需要分布式电源间的通信线而不依赖 MGCC 的分布式二次控制策略。基于平均(averaging)算法和一致性(consensus)算法的二次控制是 2 种最典型的分布式二次控制结构[13-14]。平均算法中每台分布式电源检测自身输出频率发送给其他分布式电源的控制器，然后各台分布式电源在本地控制器中计算频率的平均值用于频率恢复控制，该方法虽替代了 MGCC，但仍然需要大量高带宽通信；一致性算法是多代理系统(multi-agent system)理论中的一种，仅需在邻近分布式电源间通信便可以实现频率恢复，但为保证系统可靠性仍需花费成本设置一定数量的冗余通信线路。然而，上述所有分布式控制策略仍然依赖于通信线，没有从本质上改变复杂通信架构的设计给系统带来的低可靠性和高成本代价。

基于微电网的分布式特性，最理想的二次控制方法是完全不依赖 MGCC 和任何通信手段的分散式控制结构[15]。根据获取负荷端频率信息的方式不同可以将分散式二次控制策略分为 2 种。考虑频率全局量的特征，一种方法是用分布式电源自身输出频率代替负荷端频率进行频率恢复控制。文献[16]通过比例 P(proportional)调节器实现分散式频率恢

复控制；类似地，比例调节器也可以用 1 个低通滤波器代替，低通滤波器在低频段与比例调节器有着相似的特性，同时还可以抑制频率偏移[17]；为了实现频率无静差恢复，文献[18]使用 PI 调节器代替了 P 调节器，该方法控制结构简单，能够将稳态频率恢复至额定值；但由于没有获得准确的负荷端频率信息，因此频率恢复动态过程中容易导致频率超限，进而影响敏感负荷运行[19]。为此，另一种方法通过测量馈线阻抗从而计算得到负荷端频率用于频率恢复控制。文献[20]通过扩展卡尔曼滤波器对馈线阻抗进行测量并进行频率恢复控制；为提高馈线阻抗测量的精确度，文献[21]在扩展卡尔曼滤波器的基础上加入了 PCC 电压采样，但该方法引入了通信，与分散式控制的初衷相违背；同时，由于测量方法存在一定误差，且受微电网运行过程中线路发热、电磁干扰、线路老化等因素的影响，工程上难以实时获得馈线阻抗准确信息进而导致负荷端频率计算出现误差[22]，影响分布式电源间的功率分配和频率恢复效果，使得该方法难以在实际工程中应用。

基于此，本文通过建立微电网典型双机并联系统的小信号模型，分析了不准确馈线阻抗在频率恢复过程中对分布式电源间功率分配不均的影响机理；在此基础上提出了 1 种基于交流小信号注入的微电网频率恢复控制策略，用于补偿不准确馈线阻抗信息所带来的负荷端频率计算误差；最后，给出了该控制策略参数设计准则并进行了实验验证。

1 微网系统架构

由多台分布式电源组成的交流微网示意如图 1 所示。每台分布式电源由直流母线、三相逆变器和输出 LC 滤波器构成，并通过阻感性馈线汇入 PCC 点为负荷供电。R_i 和 L_i 分别为第 i 台分布式电源汇入 PCC 点馈线的等效电阻和等效电感。由于采用分散式控制结构，每台分布式电源的本地控制器采样自身输出电感电流 $i_{L_{\mathrm{abc}i}}$、输出电容电压 $v_{C_{\mathrm{abc}i}}$ 和输出电流 $i_{\mathrm{O_{abc}}i}$ 用于闭环控制。$L_{\mathrm{f}i}$ 和 $C_{\mathrm{f}i}$ 分别为第 i 台分布式电源的输出滤波电感和输出滤波电容。

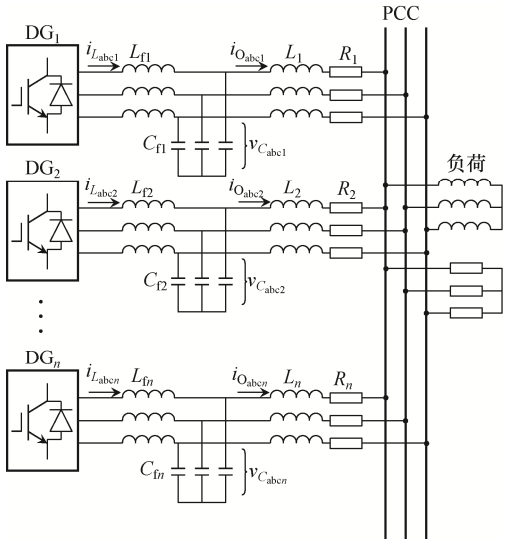


图 1 孤岛微网示意

Fig. 1 Schematic of islanded microgrid

分布式电源控制包括频率恢复控制、一次控制和电压电流内环控制 3 部分，频率恢复控制的基本原理可表示为

$$\omega^{*}=\omega_0-m(P-P_0)+\delta\omega=\omega_0-m(P-P_0)+\left(k_{\mathrm{p}}+\frac{k_{\mathrm{i}}}{s}\right)\left(\omega_{\mathrm{PCC0}}-\frac{\omega_{\mathrm{c}\omega}}{s+\omega_{\mathrm{c}\omega}}\omega_{\mathrm{PCCEst}}\right) \tag{1}$$

$$\begin{cases}P=\dfrac{1.5\omega_{cp}}{s+\omega_{cp}}(v_{C\alpha}i_{\mathrm{O}\alpha}+v_{C\beta}i_{\mathrm{O}\beta})\\ Q=\dfrac{1.5\omega_{cp}}{s+\omega_{cp}}(v_{C\beta}i_{\mathrm{O}\alpha}-v_{C\alpha}i_{\mathrm{O}\beta})\end{cases} \tag{2}$$

式中：ω^{*}为一次控制生成的逆变器输出角频率参考值；ω_0为一次控制额定角频率；m 为有功功率-频率下垂系数；P 和 Q 分别为逆变器输出有功功率和无功功率；P_0为一次控制额定有功功率；δ 为馈线两端相角差；$\delta\omega$ 为一次控制角频率补偿值，用来补偿负荷端角频率与额定值间的偏差；k_{p} 和 k_{i} 分别为频率恢复控制 PI 调节器的比例系数和积分系数；ω_{PCC0}为负荷端额定角频率；$\omega_{\mathrm{c}\omega}$ 和 ω_{cp}为低通滤波器频率滤波和功率滤波截止角频率，用来滤除计算负荷端角频率和输出功率过程中产生的干扰；$v_{C\alpha}$ 和 $v_{C\beta}$分别为 $\alpha\beta$ 坐标系下输出电容电压 α 轴分量和 β 轴分量；$i_{\mathrm{O}\alpha}$ 和 $i_{\mathrm{O}\beta}$ 分别为 $\alpha\beta$ 坐标系下输出电流 α 轴分量和 β 轴分量；ω_{PCCEst} 为本地控制器对负荷端

角频率的计算值，其计算过程可表示为

$$\begin{bmatrix} v_{\mathrm{PCCEst}\alpha} \\ v_{\mathrm{PCCEst}\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{C\alpha} \\ v_{C\beta} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_{\mathrm{mea}} & -\omega_0 L_{\mathrm{mea}} \\ \omega_0 L_{\mathrm{mea}} & R_{\mathrm{mea}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{\mathrm{O}\alpha} \\ i_{\mathrm{O}\beta} \end{bmatrix} \tag{3}$$

$$V_{\mathrm{PCCEst}} = \sqrt{v_{\mathrm{PCCEst}\alpha}^2 + v_{\mathrm{PCCEst}\beta}^2} \tag{4}$$

$$P = \frac{3V_C V_{\mathrm{PCCEst}}}{X} \sin\delta = \frac{3V_C V_{\mathrm{PCCEst}}}{X} \sin\frac{\omega^* - \omega_{\mathrm{PCCEst}}}{s} \tag{5}$$

式中：$v_{\mathrm{PCCEst}\alpha}$ 和 $v_{\mathrm{PCCEst}\beta}$ 分别为 $\alpha\beta$ 坐标系下负荷端电压计算值 α 轴分量和 β 轴分量；R_{mea} 和 L_{mea} 分别为馈线等效电阻和等效电感测量值；V_{PCCEst} 为负荷端相电压计算有效值；V_C 为输出电容相电压有效值；X 为馈线等效感抗。

通过式(3)~式(5)可以由测量得到的馈线阻抗信息和逆变器端口输出状态量计算负荷端频率，无需额外附加传感器和通信线；而负荷端频率计算值是否准确由馈线阻抗测量误差决定。

2　基于交流小信号注入的频率恢复控制策略

2.1　不准确馈线阻抗影响功率分配机理分析

联立式(1)~式(5)并使用泰勒展开进行化简，可以得到负荷端角频率真实值 ω_{PCC} 与考虑测量误差后本地控制器对负荷端角频率的计算值 ω_{PCCEst} 之间的关系为

$$\omega_{\mathrm{PCCEst}} \approx \omega_{\mathrm{PCC}} - \frac{e_L(e_R RP + e_L XQ)}{V_{\mathrm{PCC}}^2} \tag{6}$$

式中：R 为馈线等效电阻的真实值；e_R 和 e_L 分别为馈线等效电阻和等效电感的测量误差系数；V_{PCC} 为负荷侧电压有效值。

为了便于分析，假设 2 台分布式电源具有完全相同的系统参数，则考虑测量误差后每台分布式电源对馈线阻抗的测量结果可以表示为

$$\begin{cases} R_{\mathrm{mea1}} = (1+e_{R1})R \\ L_{\mathrm{mea1}} = (1+e_{L1})L \end{cases} \tag{7}$$

$$\begin{cases} R_{\mathrm{mea2}} = (1+e_{R2})R \\ L_{\mathrm{mea2}} = (1+e_{L2})L \end{cases} \tag{8}$$

式中，L 为等效电感的真实值。

结合式(6)~式(8)可以得到 2 台分布式电源对负荷端频率计算差值为

$$\Delta\omega_{\mathrm{e}} = \omega_{\mathrm{PCCEst1}} - \omega_{\mathrm{PCCEst2}} \approx \frac{e_{L2}(e_{R2}RP_2 + e_{L2}XQ_2) - e_{L1}(e_{R1}RP_1 + e_{L1}XQ_1)}{V_{\mathrm{PCC}}^2} \neq 0 \tag{9}$$

由于测量误差的存在，2 台分布式电源对负荷端频率计算差值必然不为 0。因此 $\Delta\omega_{\mathrm{e}}$ 可以看作是系统始终存在的 1 个非零扰动。图 2 为考虑小信号注入的 2 台分布式电源差分小信号模型，根据该模型可以写出 2 台分布式电源负荷端频率计算差值与输出有功功率间的传递函数表达式为

$$G(s) = \frac{\Delta\hat{P}}{\Delta\hat{\omega}_{\mathrm{e}}} = \frac{As^2 + Bs + C}{s^4 + Ds^3 + Es^2 + Fs} \tag{10}$$

$$\begin{cases} A = -\dfrac{3V_C V_{\mathrm{PCC}} k_{\mathrm{p}} \omega_{\mathrm{c}\omega}}{X} \\ B = -\dfrac{3V_C V_{\mathrm{PCC}} \omega_{\mathrm{c}\omega}(k_{\mathrm{p}}\omega_{cp} + k_{\mathrm{i}})}{X} \\ C = -\dfrac{3V_C V_{\mathrm{PCC}} \omega_{\mathrm{c}\omega}\omega_{cp} k_{\mathrm{i}}}{X} \\ D = \omega_{\mathrm{c}\omega} + \omega_{cp} \\ E = \omega_{\mathrm{c}\omega}\omega_{cp} + \dfrac{3V_C V_{\mathrm{PCC}} \omega_{cp} m}{X} \\ F = \dfrac{3V_C V_{\mathrm{PCC}} \omega_{cp} \omega_{\mathrm{c}\omega} m}{X} \end{cases} \tag{11}$$

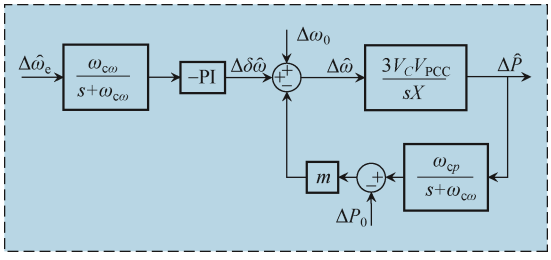


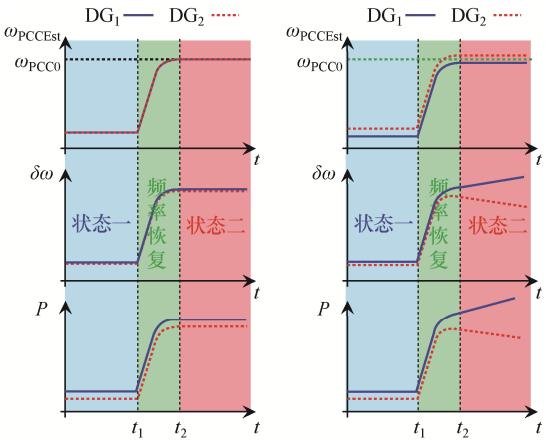
图 2　两台分布式电源差分小信号模型

Fig. 2 Differential-mode small-signal model of two DGs

观察式(10)可以发现响应结果具有积分特性，表明其会将非零扰动 $\Delta\omega_{\mathrm{e}}$ 不断积分扩大。

图 3(a)和(b)分别给出了馈线阻抗测量准确和测量不准确时，2 台分布式电源频率恢复过程的时域波形示意图。当馈线阻抗信息测量准确时，2 台分

布式电源可以准确计算负荷端频率，当 $t=t_1$ 时启动频率恢复控制，2 台分布式电源控制器对负荷端频率和额定值间的误差进行积分生成频率恢复补偿量给一次控制环，增大其输出功率直至负荷端频率恢复至额定值，如图 3(a)所示。



(a) 馈线阻抗准确　　(b) 馈线阻抗不准确

图 3　两台分布式电源频率恢复过程示意

Fig. 3 Schematic of frequency restoration process of two DGs

当馈线阻抗信息测量不准确时，如图 3(b)，根据式(9)可知 2 台分布式电源计算的负荷端频率间存在 1 个不为 0 的误差 $\Delta\omega_e$。假设分布式电源 1 测量的阻抗信息准确，且分布式电源 2 测量的阻抗信息偏大，则 $\Delta\omega_e=\omega_{PCCEst1}-\omega_{PCCEst2}>0$。$t=t_1$ 时启动频率恢复控制后，当负荷端频率恢复至额定值时，由于测量误差的存在会认为分布式电源 2 负荷端频率小于额定值，因此将继续积分误差直至其认为频率恢复；但此时负荷端频率已经大于额定值，分布式电源 1 便会减小输出有功功率以降低负荷端频率，导致分布式电源 2 继续增大积分，如式(10)所展示的结果，2 台分布式电源功率分配差距越来越大直至系统失稳，负荷端频率便会在额定值上下波动。

2.2　基于小信号注入的频率恢复控制策略整体架构

经过 2.1 节的分析可以发现，不准确馈线阻抗导致系统功率分配不均的根本原因是 2 台分布式电源对负荷端频率计算值不同，为了解决该问题，本文提出 1 种基于交流小信号注入的频率恢复控制策略，其整体架构如图 4 所示。其中，一次控制架构与传统控制策略一次控制架构相同，为了补偿不准确馈线阻抗带来的负荷端频率计算值误差，在基波的基础上向系统中额外注入某一频率和幅值的交流小信号，其频率和幅值设计准则将在 3.1 节中介绍，与传统控制策略不同的是频率恢复控制计算得到的负荷端频率通过注入小信号的有功功率进行补偿，即

$$\omega_{Avg}=k_1\omega_{PCCEst}+k_2P_{ss} \tag{12}$$

式中：ω_{Avg} 为补偿后负荷端频率计算值；P_{ss} 为注入交流小信号有功功率；k_1 和 k_2 为权重系数。

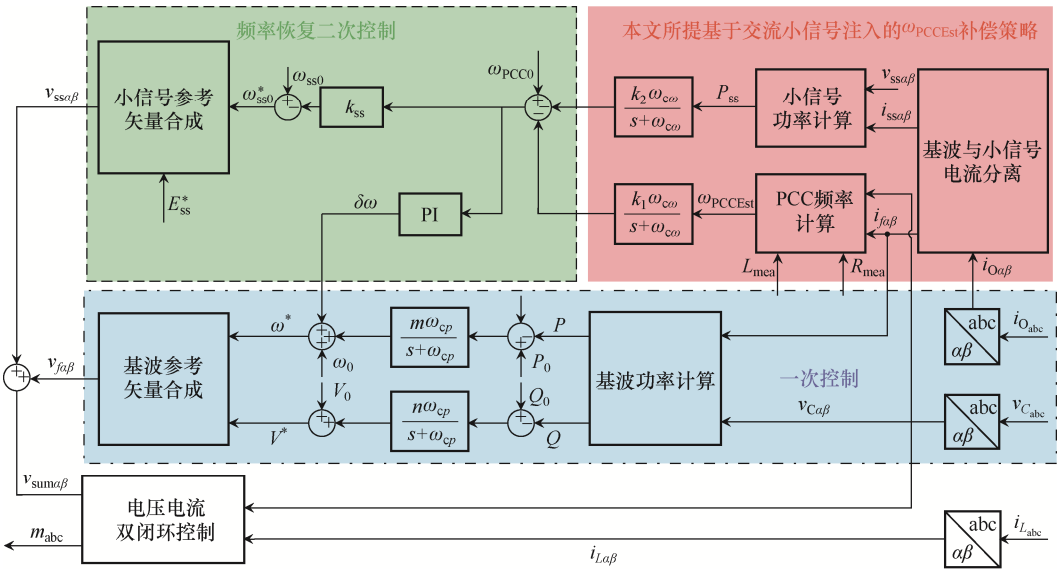


图 4　基于交流小信号注入的分布式电源频率恢复控制框图

Fig. 4 Block diagram of frequency restoration control of DGs based on small-AC-signal injection

与式(1)相似，经过补偿后的负荷端频率计算结果用于 PI 调节器积分生成频率恢复补偿量，即

$$\delta\omega=\left(k_{\mathrm{p}}+\frac{k_{\mathrm{i}}}{s}\right)\left(\omega_{\mathrm{PCC0}}-\frac{\omega_{\mathrm{c}\omega}}{s+\omega_{\mathrm{c}\omega}}\omega_{\mathrm{Avg}}\right)\tag{13}$$

为使补偿后稳态时各分布式电源具有相同负荷端频率计算值，在其与注入的交流小信号频率间构建新的下垂关系，即

$$\omega_{\mathrm{ss}}^{*}=\omega_{\mathrm{ss0}}-k_{\mathrm{ss}}\omega_{\mathrm{Avg}}\tag{14}$$

式中：ω_{ss}^{*} 为注入交流小信号的角频率参考值；ω_{ss0} 为注入交流小信号的额定角频率；k_{ss} 为注入交流小信号下垂系数。

通过基于广义二阶积分器将基波分量和交流小信号分量分离后即可分别计算二者功率

$$\begin{cases}P=\dfrac{1.5\omega_{cp}}{s+\omega_{cp}}(v_{C\alpha}i_{f\alpha}+v_{C\beta}i_{f\beta})\\[2ex] Q=\dfrac{1.5\omega_{cp}}{s+\omega_{cp}}(v_{C\beta}i_{f\alpha}-v_{C\alpha}i_{f\beta})\\[2ex] P_{\mathrm{ss}}=1.5(v_{\mathrm{ss}\alpha}i_{\mathrm{ss}\alpha}+v_{\mathrm{ss}\beta}i_{\mathrm{ss}\beta})\end{cases}\tag{15}$$

式中：$i_{f\alpha}$ 和 $i_{f\beta}$ 分别为 $\alpha\beta$ 坐标系下输出电流基波分量的 α 轴分量和 β 轴分量；$i_{\mathrm{ss}\alpha}$ 和 $i_{\mathrm{ss}\beta}$ 分别为 $\alpha\beta$ 坐标系下输出电流交流小信号分量的 α 轴分量和 β 轴分量；$v_{\mathrm{ss}\alpha}$ 和 $v_{\mathrm{ss}\beta}$ 分别为 $\alpha\beta$ 坐标系下交流小信号输出电压的 α 轴分量和 β 轴分量，其可分别表示为

$$\begin{cases}v_{\mathrm{ss}\alpha}=E_{\mathrm{ss}}^{*}\cos\left(\int\omega_{\mathrm{ss}}^{*}\mathrm{d}t\right)\\ v_{\mathrm{ss}\beta}=E_{\mathrm{ss}}^{*}\sin\left(\int\omega_{\mathrm{ss}}^{*}\mathrm{d}t\right)\end{cases}\tag{16}$$

式中，E_{ss}^{*} 为注入交流小信号的额定电压幅值。

2.3 控制原理

为了方便理解 2.2 节中提出的基于交流小信号注入的频率恢复控制策略原理，以 2 台分布式电源并联组成的典型微网系统为例进行说明，如图 5。假设分布式电源 1 测量的阻抗信息准确，且分布式电源 2 测量的阻抗信息偏大，导致分布式电源 1 对负荷端频率计算结果大于分布式电源 2；此时根据式(14)，新构建的下垂关系会使分布式电源 2 输出的交流小信号频率增大，进而使分布式电源 2 输出的小信号有功功率增大；根据式(12)，补偿后分布式电源 2 对负荷端频率计算结果增大。由于进入稳态后 2 台分布式电源交流小信号频率趋于一致，可保证负荷端频率计算结果相同。

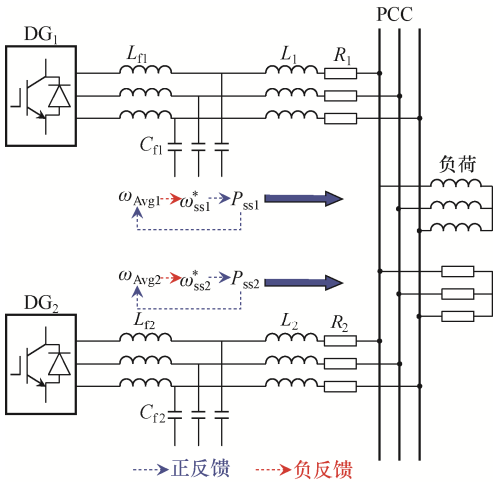


图 5　基于交流小信号注入的频率恢复控制策略原理

Fig. 5 Schematic of frequency restoration control strategy based on small-AC-signal injection

3　关键参数设计

3.1 交流小信号频率、幅值及权重系数 k_1 和 k_2 设计

为了补偿不准确馈线阻抗引起的分布式电源对负荷端频率计算偏差，需要向微网系统中注入交流小信号，这相当于给系统引入特定次谐波，因此需要谨慎选择交流小信号频率和幅值以兼顾微网电能质量要求。

交流小信号频率的选取主要考虑以下 4 点：①交流小信号频率应尽量区别于基波频率，以便于 4.1 节中介绍的信号提取方法将二者准确分离；②交流小信号频率应远离输出 LC 滤波器截止频率防止被滤除，同时应考虑电压电流双闭环带宽对小信号的跟踪能力；③尽可能避免选择系统中已经存在的背景谐波频次，如二极管整流器、电弧炉等谐波源频次；④尽量选择系统电能质量标准中对畸变率要求宽裕的频次[23]。

对于交流小信号幅值选取，幅值越高越容易将交流小信号从基波中分离出来，但会影响系统原本

稳态工作点并恶化电压畸变率。考虑 IEEE 标准中建议系统电压总谐波失真不高于 8%，单次谐波电压畸变率不高于 5%[23]，选取基波电压幅值 1%~2%作为交流小信号电压幅值。

同时，根据式(12)可以发现，由于交流小信号有功功率补偿的引入，频率恢复后负荷端频率会与额定频率间存在偏差，k_2/k_1 越大则偏差越大，根据国家标准规定的微网系统供电频率偏差限制[24]，可以得到 $k_2/k_1 \leqslant 1\%$。

3.2 小信号下垂系数 k_{ss} 设计

图 6 为考虑小信号注入的 2 台分布式电源差分小信号模型，根据该模型可以写出 2 台分布式电源负荷端频率计算差值与输出有功功率间的传递函数表达式为

$$G(s)=\frac{\Delta\hat{P}}{\Delta\hat{\omega}_{\mathrm{e}}}=\frac{A's^3+B's^2+C's}{s^5+D's^4+E's^3+F's^2+G's+H'} \tag{17}$$

$$\begin{cases}A'=-\dfrac{3V_C V_{\mathrm{PCC}}k_{\mathrm{p}}k_1\omega_{\mathrm{c}\omega}}{X}\\ B'=-\dfrac{3V_C V_{\mathrm{PCC}}\omega_{\mathrm{c}\omega}k_1(k_{\mathrm{p}}\omega_{cp}+k_{\mathrm{i}})}{X}\\ C'=-\dfrac{3V_C V_{\mathrm{PCC}}\omega_{\mathrm{c}\omega}\omega_{cp}k_1k_{\mathrm{i}}}{X}\\ D'=\omega_{\mathrm{c}\omega}+\omega_{cp}\\ E'=\omega_{\mathrm{c}\omega}\omega_{cp}+\dfrac{E_{\mathrm{ss}}^{*2}k_{\mathrm{p}}k_{\mathrm{ss}}k_2\omega_{\mathrm{c}\omega}}{X_{\mathrm{ss}}}+\dfrac{3V_C V_{\mathrm{PCC}}\omega_{cp}m}{X}\\ F'=\dfrac{3V_C V_{\mathrm{PCC}}\omega_{cp}\omega_{\mathrm{c}\omega}m}{X}+\dfrac{E_{\mathrm{ss}}^{*2}k_{\mathrm{ss}}k_2\omega_{\mathrm{c}\omega}(k_{\mathrm{p}}\omega_{cp}+k_{\mathrm{i}})}{X_{\mathrm{ss}}}\\ G'=\dfrac{E_{\mathrm{ss}}^{*2}k_{\mathrm{ss}}k_2\omega_{\mathrm{c}\omega}\omega_{cp}(k_{\mathrm{i}}X+3V_C V_{\mathrm{PCC}}mk_{\mathrm{p}})}{XX_{\mathrm{ss}}}\\ H'=\dfrac{3V_C V_{\mathrm{PCC}}mE_{\mathrm{ss}}^{*2}k_{\mathrm{i}}k_{\mathrm{ss}}k_2\omega_{\mathrm{c}\omega}\omega_{cp}}{XX_{\mathrm{ss}}}\end{cases} \tag{18}$$

将表 1 所示的分布式电源 1 和 2 馈线阻抗参数代入式(17)并绘制其根轨迹如图 7 所示。可以看到当 k_{ss} 增大时，主导共轭极点沿着虚轴增大的方向向左半平面移动；对于有功功率时域响应结果而言，k_{ss} 增大会增加有功功率响应速度，但同时也会增强有功功率振荡过程，因此需要折中考虑这 2 方面的因素。

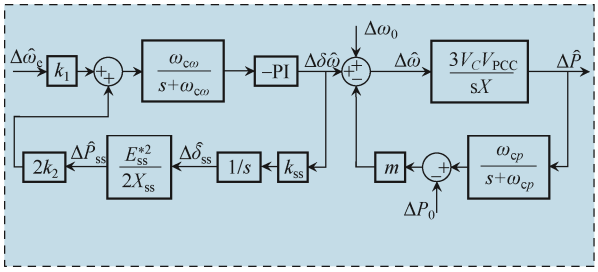


图 6 考虑交流小信号注入的 2 台分布式电源差分小信号模型

Fig. 6 Differential-mode small-signal model of two DGs based on small-AC-signal injection

表 1 系统参数

Tab. 1 System parameters

名称	参数	值
DG_1 馈线阻抗	R_1+L_1	0.030 Ω+0.025 mH
DG_2 馈线阻抗	R_2+L_2	0.030 Ω+0.025 mH
DG_3 馈线阻抗	R_3+L_3	0.020 Ω+0.015 mH
DG_4 馈线阻抗	R_4+L_4	0.020 Ω+0.015 mH
DG_1 馈线阻抗测量值	$R_{1\mathrm{mea}}+L_{1\mathrm{mea}}$	0.030 Ω+0.025 mH
DG_2 馈线阻抗测量值	$R_{2\mathrm{mea}}+L_{2\mathrm{mea}}$	0.028 Ω+0.023 mH
DG_3 馈线阻抗测量值	$R_{3\mathrm{mea}}+L_{3\mathrm{mea}}$	0.020 Ω+0.015 mH
DG_4 馈线阻抗测量值	$R_{4\mathrm{mea}}+L_{4\mathrm{mea}}$	0.022 Ω+0.018 mH
P-ω 下垂系数/(rad/s/W)	m	1.5×10^{-5}
Q-*E* 下垂系数/(V/var)	n	5×10^{-6}
负荷端额定电压/V	U_{PCC0}	220
权重系数 1	k_1	0.968
权重系数 2	k_2	10
直流侧电压/V	V_{dc}	750
开关频率/kHz	f_{s}	20
滤波电感/mH	L_{f}	3
滤波电容/μF	C_{f}	30
功率滤波截止频率/(rad·s^{-1})	ω_{cp}	31
频率滤波截止频率/(rad·s^{-1})	$\omega_{\mathrm{c}\omega}$	15
小信号额定幅值/V	E_{ss}^{*}	1
小信号额定角频率/(rad·s^{-1})	ω_{ss0}	2π×200
小信号下垂系数	k_{ss}	5×10^{-6}
频率恢复比例系数	k_{p}	200 000
频率恢复积分系数	k_{i}	2 000 000

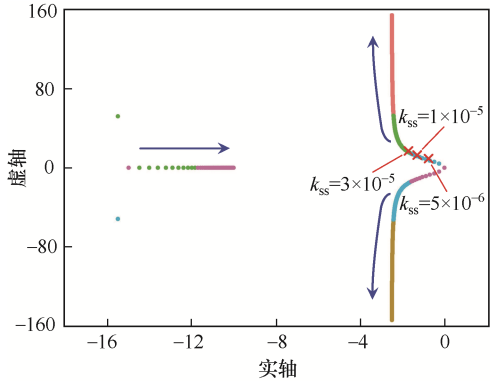


图 7　考虑交流小信号注入的差分小信号模型根轨迹

Fig. 7 Root locus of differential-mode small-signal model based on small-AC-signal injection

4　实验验证

为验证本文提出方法的合理性，在远宽 MT6060 半实物仿真平台上搭建 1 个含有 4 台分布式电源的简易微网模型，其系统参数见表 1，其中分布式电源 1 和 3 馈线阻抗测量结果为真实值，而分布式电源 2 和 4 馈线阻抗测量结果人为引入一定误差，实验平台结构如图 8 所示。

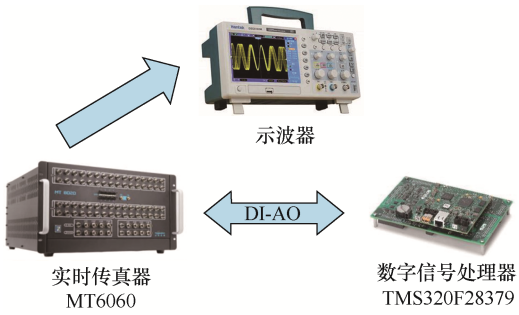
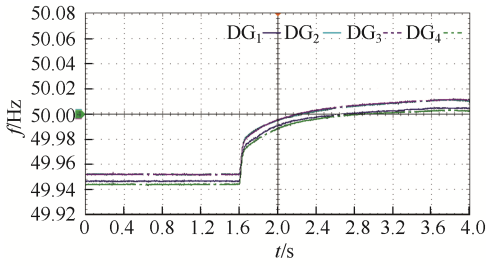


图 8　实验平台结构示意

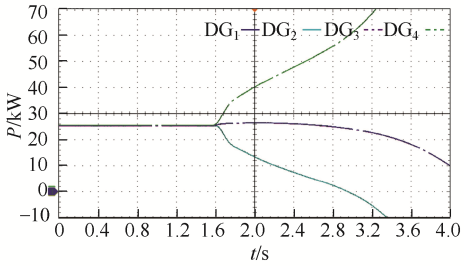
Fig. 8 Schematic of structure of experimental platform

4.1　传统频率恢复方法与本文提出的基于交流小信号注入的频率恢复方法控制效果对比

初始状态时，4 台分布式电源仅采用一次控制进入稳态；而后分别在 t = 1.6 s 和 t = 0.8 s 时刻启动 2 种频率恢复控制，传统频率恢复控制实验结果如图 9 所示，本文提出的基于交流小信号注入的频率恢复控制实验结果如图 10 所示。由图 9 可以看到，当馈线阻抗测量值不准确时，采用传统频率恢复控制会导致 4 台分布式电源对负荷端频率计算值不同，如图 9(a)；进而因式(1)的积分特性使其



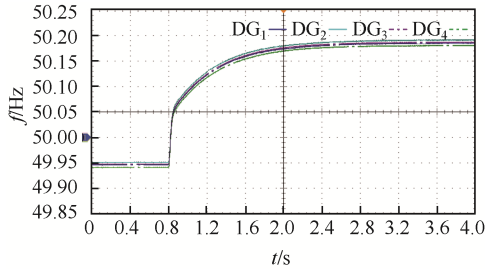
(a) 4台分布式电源对负荷端频率计算值



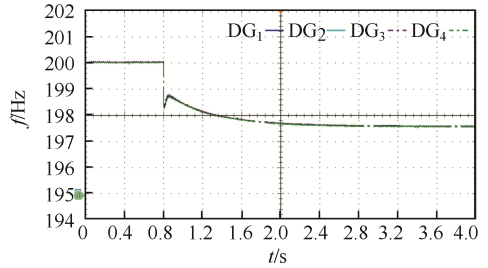
(b) 4台分布式电源输出有功功率

图 9　不准确馈线阻抗下采用传统频率恢复控制 4 台分布式电源实验波形

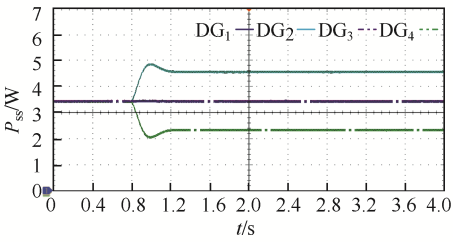
Fig. 9 Experimental waveforms of four DGs with inaccurate feeder impedance under traditional frequency restoration control



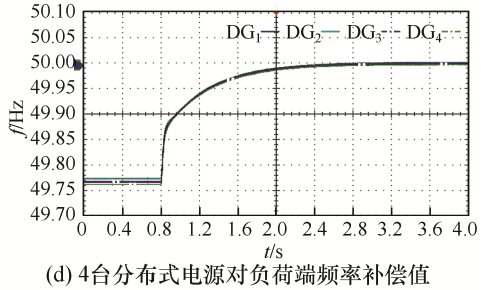
(a) 4台分布式电源对负荷端频率计算值



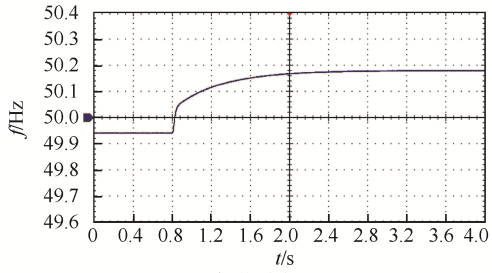
(b) 4台分布式电源输出小信号频率



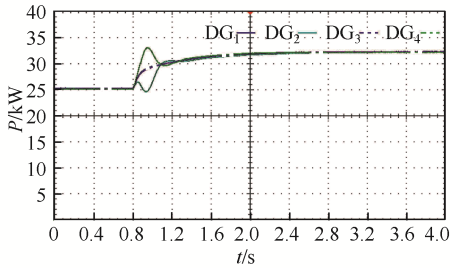
(c) 4台分布式电源输出小信号有功功率



(d) 4台分布式电源对负荷端频率补偿值



(e) 负荷端频率



(f) 4台分布式电源输出有功功率

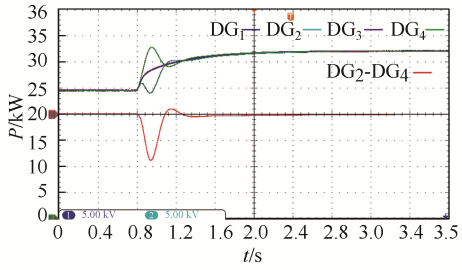
图 10 不准确馈线阻抗下采用基于交流小信号注入的频率恢复控制 4 台分布式电源实验波形

Fig. 10 Experimental waveforms of four DGs with inaccurate feeder impedance under frequency restoration control based on small-AC-signal injection

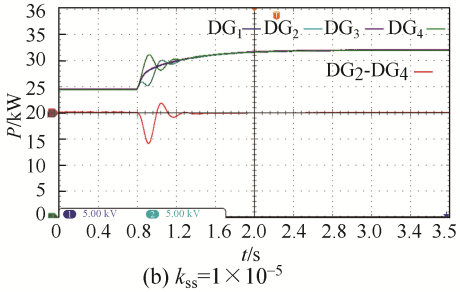
输出有功功率不均分，如图 9(b)，这与 2.1 节中分析结果一致。由图 10 可以看出，当采用本文提出的基于交流小信号注入的频率恢复控制时，4 台分布式电源对负荷端频率计算值的差异可以被注入的交流小信号有功功率补偿，如图 10(a)和(c)；根据式(14)构建的交流小信号频率与补偿后分布式电源对负荷端频率计算值间的下垂关系，进入稳态后交流小信号频率趋于一致，如图 10(b)，便可以保证补偿后每台分布式电源对负荷端频率计算值相同，如图 10(d)，进而保证每台分布式电源输出有功功率相同，如图 10(e)，这与 2.3 节中介绍的控制原理一致。同时由于补偿权重系数的引入，稳态时负荷端频率虽无法恢复到额定值，但仍满足标准限制，证明了 3.1 节中对权重系数 k_1 和 k_2 的设计方法是合理的。

4.2 交流小信号下垂系数 k_{ss} 设计方法验证

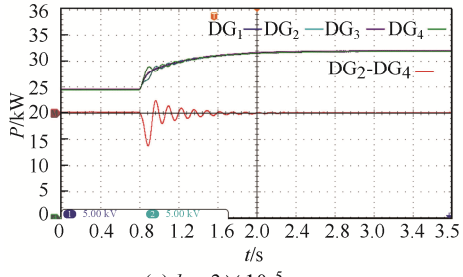
根据图 7 的分析结果，分别取交流小信号下垂系数 k_{ss} 为 5×10^{-6}、1×10^{-5} 和 3×10^{-5} 进行实验，在 $t=0.8$ s 时刻启动本文提出的频率恢复控制，4 台分布式电源输出有功功率响应结果如图 11 所示。观察图 7 可以发现，当 $k_{ss}=1\times10^{-5}$ 时主导特征根实部约为 $k_{ss}=5\times10^{-6}$ 时的 2 倍，对应图 11(a)中有功功率响应时间约为图 11(b)的 2 倍；而当 $k_{ss}=3\times10^{-5}$ 时主导特征根虚部约为 $k_{ss}=5\times10^{-6}$ 时的 2 倍，对应图 11(a)中有功功率振荡频率约为图11(b)的 1/2，总体来说 k_{ss} 增大会加快有功功率响应速度并加剧振荡过程，与 3.2 节中分析结果一致。



(a) $k_{ss}=5\times10^{-6}$



(b) $k_{ss}=1\times10^{-5}$



(c) $k_{ss}=3\times10^{-5}$

图 11 采用不同交流小信号下垂系数 k_{ss} 时 4 台分布式电源实验波形

Fig. 11 Experimental waveforms of four DGs with different values of small-AC-signal droop coefficient k_{ss}

5　结论

本文为提升微电网电能质量提出了 1 种基于交流小信号注入的孤岛微电网频率恢复控制策略，用于解决不准确馈线阻抗带来的分布式电源输出功率不均等引起系统频率失稳的问题。通过在原有控制方法的基础上引入 1 对权重系数，利用注入交流小信号有功功率补偿各分布式电源因不准确馈线阻抗导致的负荷端频率计算误差，并在交流小信号频率与负荷端频率计算值间构建下垂关系，因此在不依赖通信线的情况下，本文所提方法可以实现面对不准确线路阻抗时均分负荷功率从而保证系统稳定。另外，本文通过建立 2 台分布式电源组成典型微网的差分小信号模型分析了不准确馈线阻抗导致分布式电源功率分配差异的机理，并以此为基础给出了所提控制策略中各参数的设计准则。最后，通过半实物实验验证使用本文所提方法后，系统功率从发散不稳定提升到稳定均分误差 1%以内，表明该方法具有显著效果。

参考文献：

[1] 熊亮雳，游力，韩刚，等. 基于统一电压-电流下垂的构网型变流器不平衡与谐波控制[J/OL]. 电源学报, 1-17. (2024-10-21)[2024-11-20]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20241018.1421.009.
Xiong Liangli, You Li, Han Gang, et al. Unbalanced and harmonic control for grid-forming converters based on unified voltage-current droop [J/OL]. Journal of Power Supply, 1-17. (2024-10-21)[2024-11-20]. https://link.cnki.net/urlid/12.1420.TM.20241018.1421.009. (in Chinese)

[2] 卢军, 杨沛豪, 何凯琳. 新能源储能微电网惯量支撑性能研究[J]. 电源学报, 2024, 22(4): 182-191.
Lu Jun, Yang Peihao, He Kailin. Research on inertia support performance of new energy storage microgrid [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(4): 182-191. (in Chinese)

[3] Tian Yanjun, Xu Xiaoqi, Wang Yi, et al. Full-state feedback power decoupling control for grid forming converter with improved stability and inertia response [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2025, 40(2): 2930-2942.

[4] 徐国华. 基于分层控制的光伏与储能联合智能微电网协调优化策略研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(7): 111-120.
Xu Guohua. Research on coordination and optimization strategy of photovoltaic and energy storage joint intelligent microgrid based on layered control [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(7): 111-120. (in Chinese)

[5] She Buxin, Li Fangxing, Cui Hantao, et al. Fusion of microgrid control with model-free reinforcement learning: Review and vision [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(4): 3232-3245.

[6] Hu Jiefeng, Shan Yinghao, Cheng Kawai, et al. Overview of power converter control in microgrids: Challenges, advances, and future trends [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(8): 9907-9922.

[7] 李戎, 李建文, 李永刚, 等. 结合特征根及模态分析法的逆变器多机并网系统谐波扰动响应分析[J]. 电工技术学报, 2024, 39(14): 4519-4534.
Li Rong, Li Jianwen, Li Yonggang, et al. Analysis of harmonic disturbance response of multi-inverter grid-connected system combining characteristic root and modal analysis method [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(14): 4519-4534. (in Chinese)

[8] 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. (in Chinese)

[9] Liu Baojin, Wu Teng, Liu Zeng, et al. A small-AC-signal injection-based decentralized secondary frequency control for droop-controlled islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(11): 11634-11651.

[10] Khayat Y, Shafiee Q, Heydari R, et al. On the secondary control architectures of AC microgrids: An overview [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2020, 35(6): 6482-6500.

[11] Yang Xiangzhen, Du Yan, Su Jianhui, et al. An optimal secondary voltage control strategy for an islanded multibus microgrid [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1236-1246.

[12] Sahoo A K, Mahmud K, Crittenden M, et al. Communication-less primary and secondary control in inverter-interfaced AC microgrid: An overview [J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2021, 9(5): 5164-5182.

[13] Heydari R, Dragicevic T, Blaabjerg F. High-bandwidth secondary voltage and frequency control of VSC-based AC microgrid [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(11): 11320-11331.

[14] Simpson-Porco J W, Shafiee Q, Dörfler F, et al. Secondary frequency and voltage control of islanded microgrids via distributed averaging [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(11): 7025-7038.

[15] Wang Jiazhi, Liu Zeng, Feng Kaiwen, et al. An adaptive droop and feedforward control based transient power sharing and decoupling method for grid-forming inverters in islanded microgrid [J/OL]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1-11. (2024-10-04)[2024-11-20]. https://ieeexplore.ieee.org/document/10705805.

[16] Hua Ming, Hu Haibing, Xing Yan, et al. Multilayer control for inverters in parallel operation without intercommunications [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(8): 3651-3663.

[17] Xin Huanhai, Zhang Leiqi, Wang Zhen, et al. Control of island AC microgrids using a fully distributed approach [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(2): 943-945.

[18] Shi Hongtao, Zhuo Fang, Yi Hao, et al. A novel real-time voltage and frequency compensation strategy for photovoltaic-based microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2015, 62(6): 3545-3556.

[19] 高丙团, 胡正阳, 王伟胜, 等. 新能源场站快速有功控制及频率支撑技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(11): 4335-4353.
Gao Bingtuan, Hu Zhengyang, Wang Weisheng, et al. Review on fast active power control and frequency support technologies of renewable energy stations [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(11): 4335-4353. (in Chinese)

[20] Wang Lijun, Gu Herong, Ou Haihan, et al. A voltage stability control based on impedance estimation for the independent microgrid [C]// 2018 IEEE International Power Electronics and Application Conference and Exposition (PEAC). Shenzhen, China, 2018: 1-5.

[21] Liu Baojin, Liu Zeng, Liu Jinjun. A noninvasive feeder impedance estimation method for parallel inverters in microgrid based on load harmonic current [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2021, 36(7): 7354-7359.

[22] Shi Yidong, Liu Zeng, Wang Jiazhi, et al. A small-AC signal injection based decentralized secondary voltage control for parallel inverters with accurate reactive power sharing in islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(11): 14573-14589.

[23] IEEE recommended practices and requirements for harmonic control in electric power systems: IEEE 519-2014: 2014 [S/OL]. (2014-06-11)[2024-12-20]. https://ieeexplore.ieee.org/document/6826459.

[24] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 电能质量电力系统频率偏差: GB/T 15945—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power quality - Frequency deviation for power system: GB/T 15945—2008 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2008. (in Chinese)



胡雪凯

作者简介：

胡雪凯(1987—)，男，中国电源学会会员，硕士，高级工程师。研究方向：电力系统及其自动化。E-mail：719872361@qq.com。

孟良(1985—)，男，硕士，高级工程师。研究方向：电力电子与电力传动。E-mail：15133128069@139.com。

殷一林(1999—)，男，中国电源学会学生会员，博士研究生。研究方向：微电网多构网变流器协调控制。E-mail：yyl19990513@stu.xjtu.edu.cn。

李磊(2000—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：电能质量与谐波控制。E-mail：ll0219@stu.xjtu.edu.cn。

王海旭(2000—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：并网变流器阻抗测量。E-mail：whx01010@stu.xjtu.edu.cn。

雷万钧(1978—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，副教授。研究方向：基于电力电子装备的主动式交直流配电网控制技术。E-mail：leiwanjun@xjtu.edu.cn。

(责任编辑：郭凯凯)