DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.4.70 **中图分类号**：TM464 **文献标志码**：A

基于分层协同控制的逆变器并联系统电压幅值补偿策略

孙纪伟[1](中国电源学会学生会员)，刘 淇[2](中国电源学会学生会员)，
张 犁[2](中国电源学会会员)，张 勇[3](中国电源学会会员)，
卢 盈[3](中国电源学会会员)，邢 岩[1](中国电源学会会员)
(1.南京航空航天大学自动化学院，南京 211106；2.河海大学电气与动力工程学院，南京 211100；
3.爱士惟科技股份有限公司，上海 200000)

摘要：受下垂方程及等效阻抗影响，采用传统下垂控制作为逆变器并联策略将导致输出电压幅值出现稳态误差，无法适用于对电压精度要求较高的应用场景，故针对该问题提出了一种基于分层协同控制的逆变器并联系统电压幅值补偿策略。采用鲁棒下垂控制替代传统阻性下垂作为一次控制，将幅值误差限制在5%内，保证系统在应对不同工况时均具备一定的电压调节能力。在定量分析一次控制误差的基础上，借助低带宽通信进行电压二次调节，将电压幅值微调至基准值附近，提高补偿精度。实验结果验证了所提方案的可行性与有效性。

关键词：逆变器并联系统；下垂控制；电压偏差；分层协同控制

Voltage Amplitude Compensation Strategy for System of Parallel-operated Inverters Based on Hierarchical Cooperative Control

SUN Jiwei[1], *Student Member*, *CPSS*, LIU Qi[2], *Student Member*, *CPSS*, ZHANG Li[2], *Member*, *CPSS*,
ZHANG Yong[3], *Member*, *CPSS*, LU Ying[3], *Member*, *CPSS*, XING Yan[1], *Member*, *CPSS*
(1. College of Automation Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 211106, China;
2. School of Electrical and Power Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. AISWEI Technology Co., Ltd., Shanghai 200000, China)

Abstract: Due to the effects of the droop equation and equivalent impedance, the adoption of traditional droop control as a strategy for parallel-operated inverters will cause steady-state errors in the output voltage amplitude, which is not applicable to scenarios requiring high precision in voltage regulation. To solve this problem, a voltage amplitude compensation strategy based on hierarchical cooperative control for a system of parallel-operated inverters is proposed. The robust droop control is employed as the primary control instead of the traditional resistive droop method, which effectively constrains the amplitude error within a 5% margin and thus ensures the system's capability to regulate voltage under different operation conditions. On the basis of analyzing the primary control error, the secondary voltage control is carried out utilizing a low-bandwidth communication system, and the voltage amplitude is tuned to the reference value to improve the compensation accuracy. Experimental results verified the feasibility and effectiveness of the proposed scheme.

Keywords: System of parallel-operated inverters; droop control; voltage deviation; hierarchical cooperative control

收稿日期：2024-08-02；**修回日期**：2024-08-15；**录用日期**：2024-08-23；**网络首发日期**：2024-09-06

随着碳达峰、碳中和目标的提出，以风能、太阳能为代表的新能源发电将逐渐成为电源主体[1]。

为应对此类分布式电源发电灵活的特性，并提高其利用率，通常将分布式电源、储能和负荷作为微电网运行[2]。逆变器作为源网间的关键接口，其控制性能直接影响系统的可靠性与电能质量[3]。

当微电网处于孤岛模式时，常采用模拟同步发电机外特性的功率下垂控制策略，虽然功率下垂控制具有不依赖通信互联线、可靠性高以及能够即插即用等诸多优点，但仍存在不足之处，如难以实现功率精确均分和环流抑制，输出电压频率及幅值存在稳态误差等[4-7]。然而，受下垂方程及等效阻抗影响，逆变器带重载时电压偏差将超出额定值的5%，无法满足实际应用需求[8-10]，引起了国内外学者的广泛关注。

目前，针对该问题的改进策略主要可分为 2 类：第一类是对下垂控制环路进行改进[11-13]。文献[11]提出了一种端口电压反馈积分与变下垂系数结合方法，部分补偿了幅值误差；文献[12]提出了一种鲁棒下垂控制策略，将公共连接点 PCC(point of common coupling)处的电压有效值反馈至下垂环路，减小了电压偏差；文献[13]改进了鲁棒下垂控制环路，利用比例积分 PI(proportional integral)控制器替代原电压有效值反馈环路中的比例 P(proportional)控制器，进一步降低了误差。此类方案对通信系统的依赖程度较低、可靠性较高，但由于仅采集本地信息，补偿精度也相对较低，且存在环路复杂、参数整定困难等问题。第二类是基于通信系统等进行电压二次调节[14-15]。文献[14]设计了一种基于事件触发机制的集中控制器，并对电压幅值进行二次调节；文献[15]通过引入误差函数，将电压二次控制问题转化为分布式非奇异终端滑模控制的一致性问题，幅值误差能够在有限时间内收敛且系统鲁棒性较强。第二类方案能够获得较高的补偿精度，但由于采用集中控制器或者依赖通信，可靠性相对较低，且存在实现原理及结构复杂等问题。

结合上述 2 类改进策略的特点，本文基于分层协同控制理念，提出一种简单易行且调节精度较高的单相逆变器并联系统电压幅值补偿策略。相对传统分层协同控制结构[16-17]，本文所提增强型结构采用鲁棒下垂替代传统下垂作为一次控制，将幅值误差限制在额定电压的 5%以内。在此基础上，利用低带宽通信进行电压二次控制，将幅值微调至基准值附近，从而提高电压补偿精度。增强型结构的控制参数易于整定，能够适应热插拔等复杂工况，且以具备自主竞争逻辑的主从控制方案替代集中控制，降低单点故障的风险，提升系统可靠性。实验结果验证所提方案具有较高的电压补偿精度。

1　多逆变器并联系统

多逆变器并联系统结构如图 1 所示。系统中的每个模块主要由直流侧、逆变桥、LC 滤波电路及控制系统组成。图中：L_f 和 C_f 分别为滤波电感和滤波电容；Z_{linei} 为模块 i 与交流母线间的线路阻抗；Z_{load} 为负载阻抗；i_L 为电感电流；i_o 为输出电流；v_C 为滤波电容电压；v_o 为模块输出端电压；P 和 Q 分别为有功和无功功率计算值；E^*和 ω^*分别为电压和频率参考基准；E 和 ω 分别为经下垂调节后的电压和频率基准；Z_v 为虚拟阻抗。

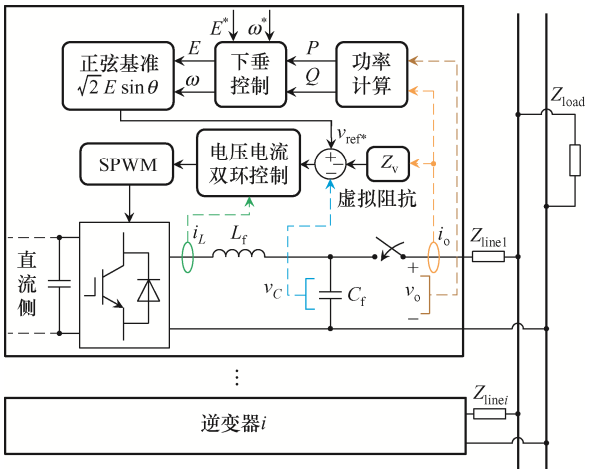


图 1　多逆变器并联系统结构

Fig. 1 Structure of system of parallel-operated inverters

采用下垂控制时，控制系统一般由功率外环和电压电流双环构成，其中功率外环负责进行功率控制，并生成电压幅值给定；电压电流双环控制则能够使系统的输出具备良好的动静态性能。

2 阻性下垂控制

2.1 基本原理

由戴维南定理可知，逆变器闭环系统可以等效为电压源与阻抗的串联形式，则对于一个逆变器双机并联系统，可以简化为图 2 所示的等效电路。图 2 中：V 为交流母线电压；$E_1\angle\delta_1$ 和 $E_2\angle\delta_2$ 分别为 2 个模块的空载输出电压幅值和相位；$Z_1\angle\varphi_1$ 和 $Z_2\angle\varphi_2$ 分别为两模块等效输出阻抗与线路阻抗之和。

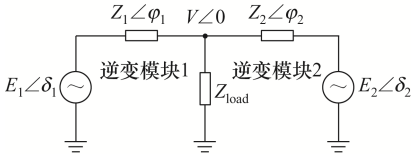


图 2 逆变器双机并联系统等效电路

Fig. 2 Equivalent circuit of two-inverter parallel system

根据电路原理，可得每个模块向交流母线输出的有功及无功功率 P_i、$Q_i(i=1,2)$ 分别为

$$\begin{cases} P_i=\dfrac{E_iV}{Z_i}\cos(\varphi_i-\delta_i)-\dfrac{V^2}{Z_i}\cos\varphi_i \\ Q_i=\dfrac{E_iV}{Z_i}\sin(\varphi_i-\delta_i)-\dfrac{V^2}{Z_i}\sin\varphi_i \end{cases} \tag{1}$$

在低压微电网中，线路阻抗一般呈阻性，此时若逆变器的输出阻抗也呈现阻性，则有 $\varphi_i\approx0$，$Z_i\approx R_i$。另外，由于相位角 δ_i 很小，有 $\sin\delta_i\approx\delta_i$，$\cos\delta_i\approx1$ 成立。式(1)可化简为

$$\begin{cases} P_i=\dfrac{E_iV-V^2}{R_i} \\ Q_i=-\dfrac{E_iV\delta_i}{R_i} \end{cases} \tag{2}$$

由式(2)可知，有功功率 P_i 与 E_i 成正比，无功功率 Q_i 则与 $-\delta_i$ 呈正比例关系。由此可推导出阻性下垂方程为

$$\begin{cases} \omega_i=\omega^*+m_iQ_i \\ E_i=E^*-n_iP_i \end{cases} \tag{3}$$

式中，m_i 和 n_i 分别为电压频率和电压幅值的下垂系数。

实际中，受闭环控制策略、滤波参数等影响，逆变器的输出阻抗通常无法维持纯阻性，因此，为实现上述阻性下垂控制，可通过输出电流瞬时值反馈的方式构建虚拟电阻加以改善，实现方式为

$$v_{\text{ref}}^*=v_{\text{droop}}^*-i_{\text{o}}R_{\text{v}} \tag{4}$$

式中：v_{ref}^* 为电压环基准；v_{droop}^* 为下垂控制生成的电压参考信号；R_{v} 为虚拟电阻。

2.2 电压偏差

由式(3)可得幅值-有功(E-P)下垂曲线，如图 3 所示。由图 3 可见，随着有功功率增加，输出电压将逐渐偏离参考基准 E^*，偏离程度与其幅值下垂系数 n_i 成正比，则该部分误差 ΔE_{droop} 为 n_iP_i。

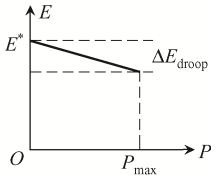


图 3 幅值-有功下垂曲线

Fig. 3 Droop curve for amplitude and active power

另外，由于输出阻抗、虚拟电阻及线路阻抗均等效串联在逆变器输出端，当电流流经相应线路时便会产生压降，从而额外引入电压偏差。该偏差大小与输出电流有效值 I_{o} 及等效阻抗 R_i 成正比，实际误差 ΔE_{R} 为 $I_{\text{o}}R_i$。

综合以上两部分，阻性下垂控制的电压稳态误差 ΔE 为

$$\Delta E=\Delta E_{\text{droop}}+\Delta E_{\text{R}}=n_iP_i+I_{\text{o}}R_i \tag{5}$$

3 分层协同控制

3.1 典型结构

近年来，分层协同控制的概念被广泛应用于逆变器并联系统，其主要思想是将系统的各项动、静态性能需求分散到不同层级进行控制，不同层级之间有着相对独立却又相互关联的控制目标。

分层协同控制中，一般将包括功率环、电压电流双环在内的单模块控制系统作为一次控制，保证并联系统的稳定运行。针对一次控制产生的电压频率和幅值稳态误差，通常利用通信进行二次控制，

保证系统具备良好的稳态性能。分层协同控制的典型结构如图 4 所示。

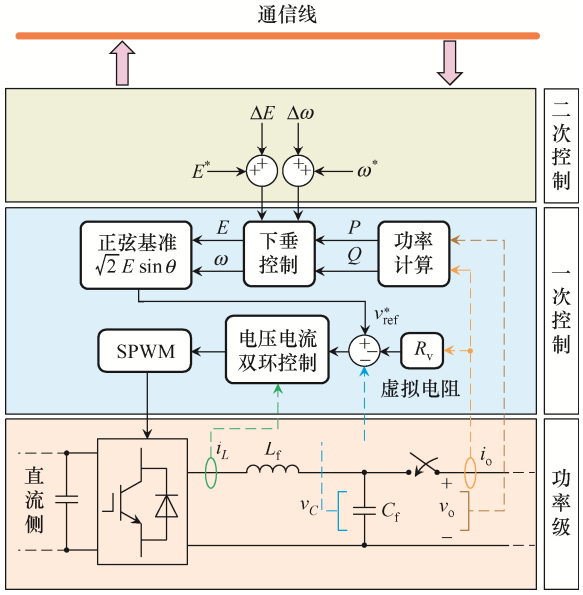


图 4　分层协同控制典型结构

Fig. 4 Typical structure of hierarchical cooperative control

典型结构中，一般以传统下垂策略作为一次控制。此时，一次控制产生的电压偏差如式(5)所示。当幅值下垂系数 n_i 及系统有功功率 P_i 较大时，一次控制误差将超出参考基准的±5%。若该部分误差完全由二次控制补偿，则通信稳定性将对系统电压幅值精度有着较大影响。受通信带宽限制，若在通信间隙或热插拔过渡阶段发生负载突变，由于电压二次控制无法及时动作，电压幅值则仍会短时间内超出允许的误差范围。

3.2　一次控制

针对上述典型结构中存在的问题，本文提出了一种增强型结构，采用鲁棒下垂策略替代传统下垂策略作为一次控制，以降低一次控制产生的电压偏差。常规鲁棒下垂控制需采样 PCC 处电压，在实际应用中通常难以实现。由于本文引入了虚拟电阻策略，大幅减小了线路阻抗在等效阻抗中的占比，故本文可采用逆变器输出端电压有效值 V_{oi} 近似代替 PCC 电压进行控制，相应的控制框图如图 5 所示。图中，K_e 为反馈增益，m_i 为频率下垂系数。

鲁棒下垂控制的基本原理是将输出电压有效值引入幅值–有功(*E*-*P*)环路作为反馈，同时增加积分环节以补偿偏差。理想情况下，系统进入稳态后电压幅值基本不变，图 5 中 *E*-*P* 环路积分环节的输入量近似为 0，则有

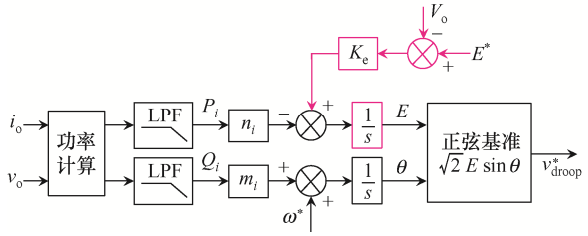


图 5　鲁棒下垂控制框图

Fig. 5 Block diagram of robust droop control

$$n_i P_i = K_e(E^* - V_{oi}) \tag{6}$$

由式(6)可进一步推导出电压幅值误差 ΔE_i 及有功功率误差 ΔP_i，分别为

$$\Delta E_i = E^* - V_{oi} = \frac{n_i P_i}{K_e} \tag{7}$$

$$\Delta P_i = \frac{K_e \Delta V_{oi}}{n_i} \tag{8}$$

对比式(7)与式(5)可知，在同等条件下，采用鲁棒下垂控制能够完全补偿等效阻抗产生的压降 ΔE_R，并将下垂方程引起的偏差 ΔE_{droop} 缩小至其 K_e 倍。然而，随着反馈增益 K_e 的增大，电压稳态误差不断降低时，有功功率的均分效果也会逐渐变差。假设一次控制允许的电压稳态误差不超过参考基准的 5%，允许的最大有功功率误差为 ΔP_{max}，额定有功功率为 P_N，则 K_e 的取值范围限制为

$$\frac{n_i P_N}{0.05E^*} \leqslant K_e \leqslant \frac{n_i \Delta P_{max}}{\Delta V_{oi}} \tag{9}$$

3.3　二次控制

针对一次控制有差调节的特性，本文借助控制器局域网 CAN(controller area network)通信，以动态补偿幅值参考基准的方式对输出电压进行二次控制，相应的控制框图如图 6 所示。其中，ΔE_{CAN} 为 CAN 通信传输的补偿量。

为保证并机瞬间的暂态性能，避免增大环流，需使并联系统中各模块的电压幅值基准近似同步变化且大小一致，采用主从法协调二次控制，具体实现过程如下。

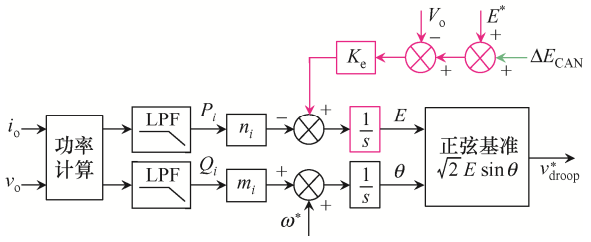


图 6 电压二次控制作用框图

Fig. 6 Block diagram of voltage secondary control effect

(1)各模块通过 CAN 通信自主竞争出唯一一台主机，其余模块均为从机。主从竞争机制流程如图 7 所示。

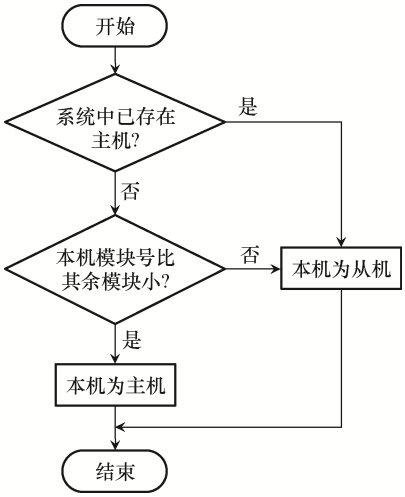


图 7 主从竞争机制流程

Fig. 7 Flow chart of master-slave competition mechanism

(2)主机根据式(7)计算出幅值补偿量，同时调节自身基准，并将该值发送给各从机。为避免高频信号干扰并降低通信成本，数据发送周期设置为 100 ms。

(3)从机在接收到数据后迅速改变自身幅值基准，实现电压二次调节。

对二次控制的稳态误差分析如下。假设主机与从机输出的有功功率分别为 P_{M} 与 P_{S}，主机与从机的输出端电压分别为 V_{oM} 与 V_{oS}。根据分层协同控制原理，稳态下对于主、从机分别有

$$\begin{cases} n_i P_{\mathrm{M}} = K_{\mathrm{e}}\left(E^* + \dfrac{n_i P_{\mathrm{M}}}{K_{\mathrm{e}}} - V_{\mathrm{oM}}\right) \\ n_i P_{\mathrm{S}} = K_{\mathrm{e}}\left(E^* + \dfrac{n_i P_{\mathrm{M}}}{K_{\mathrm{e}}} - V_{\mathrm{oS}}\right) \end{cases} \tag{10}$$

对于额定容量相同的并联逆变器，一般设置相同的幅值下垂系数 n_i 与反馈增益 K_{e}。化简式(10)，可得

$$\begin{cases} V_{\mathrm{oM}} = E^* \\ V_{\mathrm{oS}} = E^* - \dfrac{n_i(P_{\mathrm{S}} - P_{\mathrm{M}})}{K_{\mathrm{e}}} \end{cases} \tag{11}$$

由此可知，稳态时主机输出电压 V_{oM} 等于幅值参考基准 E^*；从机输出电压偏离参考基准的大小则取决于主、从机分担的有功功率差值。根据式(2)，不同模块间有功功率的差异与幅值参考信号 E_i 及等效阻抗 R_i 有关。

由于二次控制的响应速度远低于一次控制，因此在根据一次控制框图推导幅值参考信号 E_i 的表达式时，可将二次控制引入的幅值补偿量视作常数 C[18]，则有

$$E_i = \frac{1}{s}\left[K_{\mathrm{e}}(E^* + C - V) - n_i P_i\right] \tag{12}$$

将式(2)代入式(12)，整理后可得

$$sE_i + \frac{n_i V}{R_i}E_i + \left[K_{\mathrm{e}}(V - E^* - C) - \frac{n_i V^2}{R_i}\right] = 0 \tag{13}$$

通过求解式(13)的时域表达式并分离其稳态分量，可得

$$E_{i(\mathrm{steady})} = V + \frac{K_{\mathrm{e}} R_i (E^* + C - V)}{n_i V} \tag{14}$$

可见，幅值参考信号 E_i 的稳态值也与等效阻抗 R_i 有关。实际系统中，等效阻抗 R_i 受逆变器闭环控制差异、离散化、参数漂移及线路阻抗等因素影响，难以做到一致，即便是本文引入虚拟电阻策略以改善功率均分效果，也仍存在一定误差。因此，从机的输出电压仍会在微小范围内偏离参考基准。

3.4 性能分析

本文所提分层协同控制增强型结构与典型结构在不同工况下的电压调节性能对比示意如图8 所示，其中 U_{N} 为额定输出电压。具体分析如下。

1)工况 1：通信间隙负载突变。

图 8 中，t_1~t_2 阶段为突加负载工况。t_1 时刻负载由空载突加至满载，此时由于处于通信间隙，二

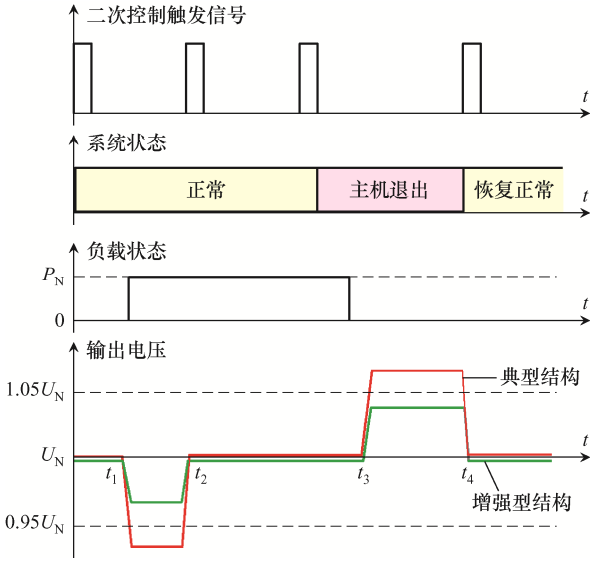


图 8　不同工况下的电压调节性能示意

Fig. 8 Schematic of voltage regulation performance under different working conditions

次控制尚未生效，电压偏差大小主要取决于一次控制。增强型结构因采用了鲁棒下垂策略，在下一个二次控制信号到来前(即 t_2 时刻)，幅值误差能够被限制在 5%内，性能明显优于采用传统下垂的典型结构。

2)工况 2：热插拔过渡阶段负载突变。

图 8 中，t_3~t_4 阶段并联系统中的主机因故退出运行，在此区间内二次控制失效。此时若负载由满载突卸至空载，受满载状态下的电压补偿量影响，输出电压将偏离参考基准。由于一次控制作用，增强型结构在热插拔过渡阶段仍能将电压偏差限制在 5%内，控制性能相比典型结构具有明显的优越性。另外，由于本文采用具备自主竞争逻辑的主从控制，系统中的剩余模块在原主机退出后仍能通过 CAN 通信自主竞争出新主机，则 t_4 时刻二次控制将恢复正常，电压幅值能够被重新稳定在参考基准附近，一定程度上提高了可靠性。

综合上述分析，本文所提分层协同控制增强型结构能够应对复杂多变的系统工况，在负载突变时能更好地降低电压偏差，具有更优的电压稳定性和可靠性。

4　实验验证

为验证本文所提电压幅值补偿策略的有效性，搭建了图 9 所示的实验平台。其中：逆变模块采用两级式结构，其前级升压部分采用推挽电路，并基于集成脉冲宽度调制 PWM(pulse width modulation)控制器 SG3525 实现电路控制；后级逆变部分采用全桥逆变电路，主控芯片为 TI 公司的 TMS320 F280025。系统直流输入电压为 13 V，直流母线电压为 400 V，额定交流输出电压为 230 V/50 Hz，单机额定功率为 1 kW，逆变级开关频率为 19.2 kHz。

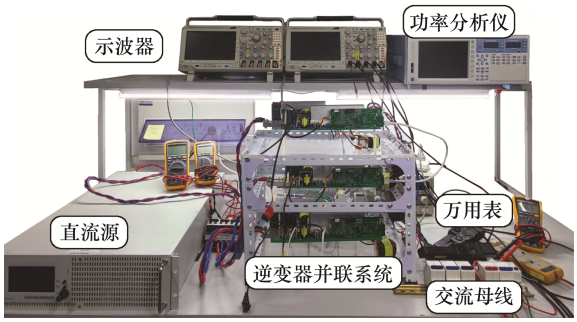


图 9　实验平台

Fig. 9 Experimental platform

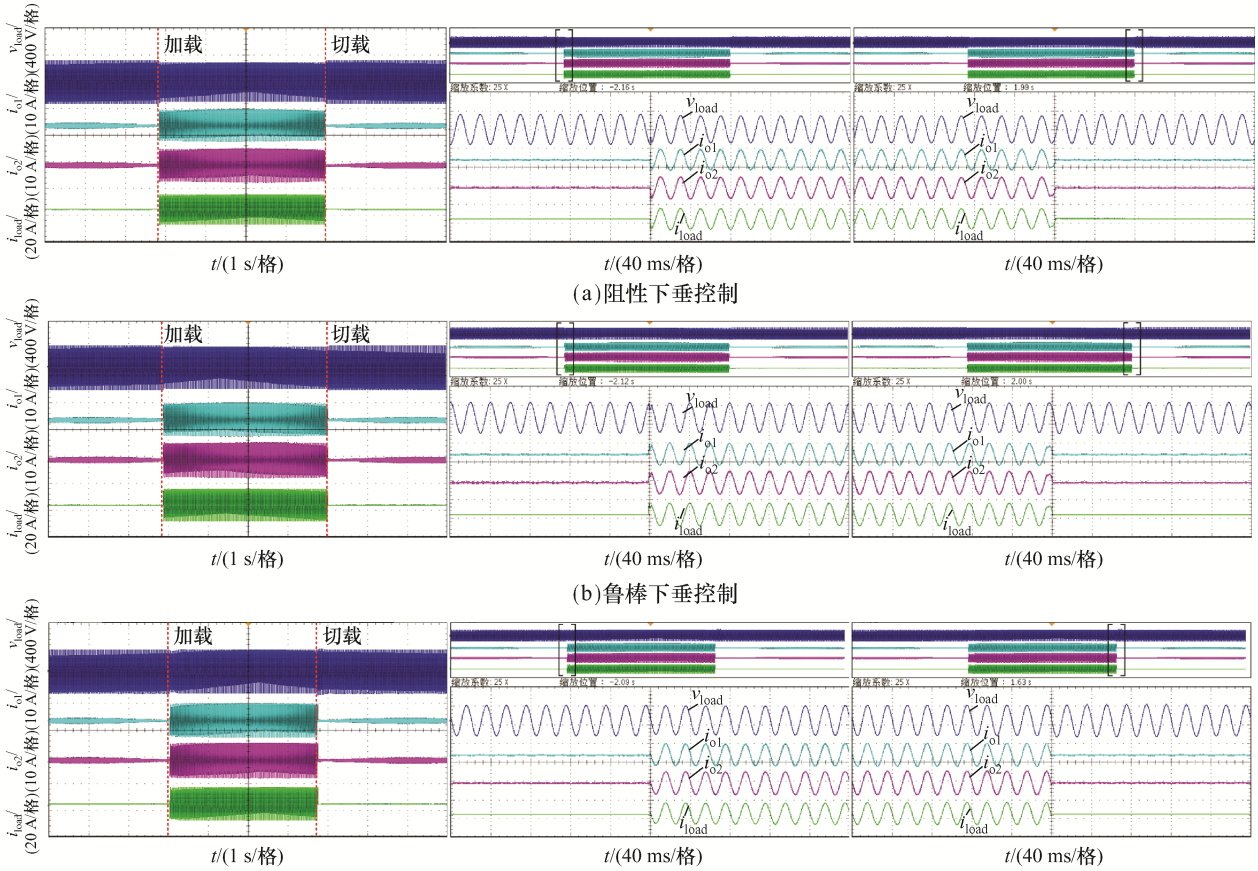
并联控制策略采用本文提出的分层协同控制增强型结构，电压环采用比例谐振 PR(proportional resonant)控制器，电流环采用比例控制器，调制方式为单极性正弦脉宽调制 SPWM(sinusoidal PWM)。相关控制参数见表 1。

表 1　系统控制参数

Tab. 1 Control parameters of system

参数	数值
电压环比例系数 k_{vp}	0.04
电压环谐振系数 k_{vr}	120.0
电流环比例系数 k_{ip}	16.0
虚拟电阻 R_v/Ω	2.50
幅值下垂系数 n_i	0.100 0
频率下垂系数 m_i	0.002 2
反馈增益 K_e	10.0
幅值参考基准 E^*	230.0

图 10 依次给出了传统阻性下垂控制、鲁棒下垂控制及分层协同控制的动态实验波形，实验工况为双机并联突加、突卸2 kW阻性负载(额定负载)，图中 v_{load}、i_{o1}、i_{o2} 和 i_{load} 分别表示负载电压、逆变模块 1 输出电流、逆变模块 2 输出电流和负载电流。由图可见，3 种控制策略在负载突变瞬间的动态特



(a)阻性下垂控制

(b)鲁棒下垂控制

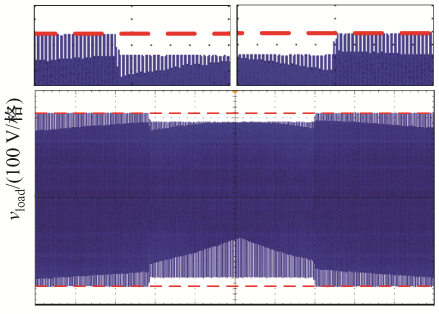
(c)分层协同控制

图 10 双机并联突加、突卸负载动态波形

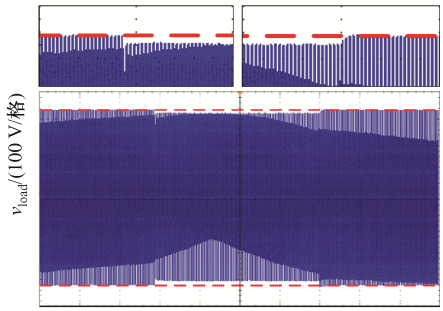
Fig. 10 Dynamic waveforms of two-machine parallel system under step changes in load

性类似，负载电压无严重畸变；带载时均流效果相对较好，实测数据显示均流度小于 3%，符合行业标准要求。

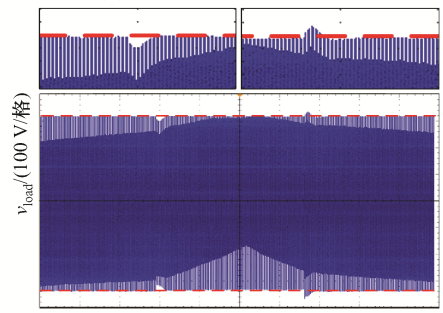
为便于对比不同控制策略下的电压偏差，图11给出了上述实验条件下的负载电压放大波形，图中虚线为水平基准。可见，本文提出的分层协同控制策略在加、切载前后电压稳态值几乎一致且能保持稳定，误差明显小于前 2 种方案。



(a) 阻性下垂控制及局部放大



(b) 鲁棒下垂控制及局部放大



(c) 分层协同控制及局部放大

图 11 负载电压放大波形

Fig. 11 Magnified waveforms of load voltage

图 12 给出了上述 3 种控制策略在不同负载下(空载至额定负载范围内)的电压稳态误差实测数据。可见，本文所提方案在额定负载范围内均能将电压误差限制在0.5%内，电压调节精度高，明显优于其他 2 种策略。实验结果进一步验证了所提方案的有效性。

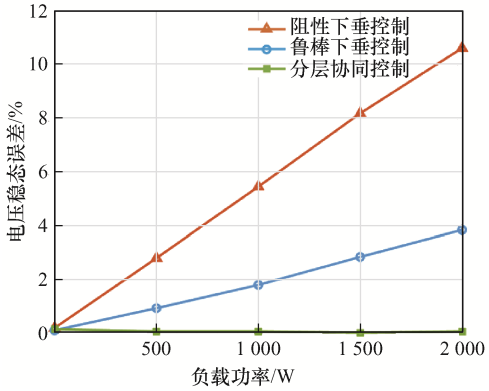


图 12　不同策略下的输出电压稳态误差对比

Fig. 12 Comparison of steady-state error of output voltage under different strategies

5　结语

本文提出了一种基于分层协同控制的单相逆变器并联系统电压幅值补偿策略。区别于分层协同控制典型结构，本文所提增强型结构采用鲁棒下垂控制作为一次控制，保证系统在热插拔等复杂工况下均能将由下垂方程及等效阻抗引起的输出电压稳态误差限制在 5%以内；二次控制则利用低带宽通信对幅值参考量进行补偿，将电压调节至参考基准值附近，提高了电压精度。实验结果表明，增强型结构的电压幅值误差远低于阻性下垂控制和鲁棒下垂控制结构，具有较高的调节精度和稳定性。

参考文献：

[1] 文劲宇, 周博, 魏利岫. 中国未来电力系统储电网初探[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(7): 1-10.
Wen Jinyu, Zhou Bo, Wei Lishen. Preliminary study on an energy storage grid for future power system in China [J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(7): 1-10. (in Chinese)

[2] 潘健, 陈凤娇, 张琦, 等. 基于抑制环流的自适应下垂控制改进策略[J]. 电源学报, 2023, 21(5): 101-109.
Pan Jian, Chen Fengjiao, Zhang Qi, et al. Improved strategy for adaptive droop control based on suppressing circulating current [J]. Journal of Power Supply, 2023, 21(5): 101-109. (in Chinese)

[3] 吴中东, 丁石川, 郭小璇, 等. 一种并联逆变器自适应下垂控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(7): 84-94.
Wu Zhongdong, Ding Shichuan, Guo Xiaoxuan, et al. An adaptive droop control method for parallel inverters [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(7): 84-94. (in Chinese)

[4] Ling Yonghui, Li Yanjun, Yang Zhenquan, et al. A dispatchable droop control method for distributed generators in islanded AC microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(9): 8356-8366.

[5] Bera S, Mandal D K, Chowdhuri S. Improved droop control strategy for single phase micro-grid inverters in standalone mode [C]//2019 International Conference on Computing, Power and Communication Technologies (GUCON). New Delhi, India, 2019: 811-816.

[6] Aquib M, Vijay A S, Doolla S, et al. Power sharing enhancement strategy for parallel-connected voltage-source inverters with common DC and AC buses [C]//2022 IEEE International Conference on Power Electronics, Smart Grid, and Renewable Energy (PESGRE). Trivandrum, India, 2022: 1-6.

[7] 刘勇, 贺生国, 盘宏斌, 等. 一种多 DG 并联系统分布式控制策略[J]. 电源学报, 2019, 17(6): 98-107.
Liu Yong, He Shengguo, Pan Hongbin, et al. Distributed control strategy for multi-DG parallel system [J]. Journal of Power Supply, 2019, 17(6): 98-107. (in Chinese)

[8] Cao Wenyuan, Han Minxiao, Zhang Xiahui, et al. An integrated synchronization and control strategy for parallel-operated inverters based on *V-I* droop characteristics [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2022, 37(5): 5373-5384.

[9] Poonahela I, Krama A, Bayhan S, et al. Hierarchical model-predictive droop control for voltage and frequency restoration in AC microgrids [J]. IEEE Open Journal of

the Industrial Electronics Society, 2023, 4: 85-97.

[10] Liang Xiaodong, Andalib-Bin-Karim C, Li Weixing, et al. Adaptive virtual impedance-based reactive power sharing in virtual synchronous generator controlled microgrids [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2021, 57(1): 46-60.

[11] 谢沁园, 王瑞田, 林克文, 等. 基于端口电压积分与变下垂系数的逆变器并联下垂控制策略[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1596-1607.
Xie Qinyuan, Wang Ruitian, Lin Kewen, et al. Droop control strategy of parallel inverters based on port voltage integration and variable droop coefficient [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1596-1607. (in Chinese)

[12] Zhong Qingchang. Robust droop controller for accurate proportional load sharing among inverters operated in parallel [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1281-1290.

[13] 张继红, 宋广宇, 熊伟, 等. 基于虚拟复阻抗的增强型鲁棒电压下垂控制方法及环流抑制策略[J]. 太阳能学报, 2021, 42(12): 401-409.
Zhang Jihong, Song Guangyu, Xiong Wei, et al. Enhanced robust voltage droop control method and circulating current suppression strategy based on virtual complex impedance [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2021, 42(12): 401-409. (in Chinese)

[14] Qian Tong, Liu Yang, Zhang Wenhao, et al. Event-triggered updating method in centralized and distributed secondary controls for islanded microgrid restoration [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(2): 1387-1395.

[15] Shen Xueqiang, Wang Haiqing, Zhang Dezhen, et al. Distributed finite-time secondary voltage restoration of droop-controlled islanded microgrids [J]. IEEE Access, 2020, 8: 118183-118191.

[16] Romero M E, Seron M M. Ultimate boundedness of voltage droop control with distributed secondary control loops [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(4): 4107-4115.

[17] Zhang Jiancheng, Sun Bo, Zhao Daduan. A novel event-triggered secondary control strategy for distributed generalized droop control in microgrid considering time delay [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2023, 38(5): 5963-5978.

[18] 王逸超, 罗安, 金国彬. 微网逆变器的改进鲁棒下垂多环控制[J]. 电工技术学报, 2015, 30(22): 116-123.
Wang Yichao, Luo An, Jin Guobin. Improved robust droop multiple loop control for parallel inverters in microgrid [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(22): 116-123. (in Chinese)



孙纪伟

作者简介：

孙纪伟(1999—)，男，中国电源学会学生会员，硕士研究生。研究方向：逆变器并联控制技术。E-mail：sunjiwei@nuaa.edu.cn。

刘淇(1996—)，男，中国电源学会学生会员，博士研究生。研究方向：并网变换器控制技术。E-mail：lqhhu@hhu.edu.cn。

张犁(1985—)，男，中国电源学会会员，通信作者，博士，教授，博士生导师。研究方向：新能源并网技术。E-mail：zhanglinuaa@hhu.edu.cn。

张勇(1974—)，男，中国电源学会会员，博士，高级工程师。研究方向：光伏逆变器。E-mail：yong.zhang@aiswei-tech.com。

卢盈(1984—)，男，中国电源学会会员，硕士，工程师。研究方向：光伏逆变器。E-mail：elvis.lu@aiswei-tech.com。

邢岩(1964—)，女，中国电源学会会员，博士，教授，博士生导师。研究方向：功率电子变换技术。E-mail：xingyan@nuaa.edu.cn。

(责任编辑：陈国珍)