DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2026.4.251 中图分类号：TM762 文献标志码：A

考虑分布式电源出力不确定的逆变器功率分配

么钟然，孙丽颖
(辽宁工业大学电气工程学院，锦州 121001)

摘要：微电网在孤岛时采用下垂控制，逆变器按分布式电源容量比例分配负荷功率，防止分布式电源过载、轻载及功率环流的产生。然而，逆变器的功率分配效果不仅与线路阻抗有关，还受分布式电源实际容量变化的影响。针对此问题，提出1种考虑分布式电源出力随机变化的改进下垂控制策略。该策略采用双层控制：外层控制在额定状态下消除线路阻抗的影响，当运行条件改变时，根据两级式逆变器直流母线电压变化，得到分布式电源的容量变化比例，形成非额定状态下的功率和电压参考值；内层采用改进下垂控制，通过调整下垂控制系数使逆变器工作在电压参考值下。最后调节逆变器出力，保证功率平衡。通过仿真，验证了该策略的正确性和可行性。

关键词：微电网；随机性；功率分配；下垂控制

Power Sharing of Inverters Considering Uncertain Output from Distributed Generation

YAO Zhongran, SUN Liying
(College of Electrical Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou 121001, China)

Abstract: The islanded microgrid adopts droop control to make inverters share load power according to the capacity proportion of distributed generation (DG), so as to prevent the DG from overload, light load, or generating power circulation. However, the power sharing effect of inverters is related to both the line impedance and the changes in the actual capacity of DG. To solve this problem, an improved droop control strategy considering the randomly changing output from DG is proposed. This strategy adopts two-layer control, in which the outer-layer control eliminates the influence of line impedance in a rated working state. Under changes in the operation condition, the proportion of changed capacity of DG is obtained according to the changes in the voltage of DC bus in a two-stage inverter, and the reference values of power and voltage in a non-rated working state are formulated. In the inner-layer, an improved droop control is adopted to adjust the coefficient of droop control to make the inverters work under the reference value of voltage. Finally, the output from inverters is adjusted to ensure power balance. Simulation results verify the correctness and feasibility of the proposed strategy.

Keywords: Microgrid; randomness; power sharing; droop control

随着传统化石燃料的减少和环境污染问题的加剧，可再生能源成为未来的发展趋势。可再生能源以分布式电源 DG(distributed generation)的形式接入电网中形成微电网。与传统电力系统不同，微电网中多种形式的分布式电源可以并联运行，使微电网具有较高的灵活性，同时分布式电源本身的不确定性，也使微电网稳定运行的难度增加。

因为下垂控制在功率分配方面的优势，孤岛运行时多根据微电网的阻抗特性选择感性或阻性下

收稿日期：2023-04-26；**修回日期：**2023-07-19，2023-09-04；
录用日期：2023-12-13；**网络首发日期：**2024-04-20
基金项目：国家自然科学基金资助项目(62273170)；辽宁省教育厅重点攻关资助项目(JZL201915401)
This work is supported by National Natural Science Foundation of China under the grant 62273170; Key Project of Educational Department of Liaoning Province under the grant JZL201915401

垂控制[1-2]。同时由于线路阻抗差异的影响和电压为局部量的特点[3-4]，与电压有关的功率无法按比例精确分配，导致负荷功率的分配偏差和功率环流问题，已有众多学者对此进行了相关研究。文献[5-6]采用虚拟阻抗的方法使逆变器等效阻抗相等，但虚拟阻抗的值不易整定；文献[7-8]将多智能体一致性算法与功率分配结合，把虚拟阻抗值和功率偏差作为控制对象，可以实现功率的精确分配，但通信复杂，系统复杂性提高；文献[9]通过中央管理器将虚拟阻抗值发送给各个逆变器，但在稳定性上不如分散控制效果好；文献[10]对有功功率和无功功率的输出特性进行分析，认为积分环节是造成功率无法精确分配的原因，在无功下垂控制中引入积分环节，但在暂态变化时积分环节会受到影响，进而影响功率分配效果；文献[11]采用自适应虚拟阻抗的方法，可以在一定程度上提高功率分配精度；文献[12]采用方法的谐波注入可以实现功率均分，但会影响电能质量；文献[13]研究了对谐波的功率分配问题；文献[14-15]针对微电网中分布式电源的类型和物理结构不同，研究了含有异构微源的瞬时功率分配问题；文献[16]在下垂控制中引入有功功率扰动来消除线路阻抗的影响，实现有功和无功功率的均分控制。

上述方法均未考虑分布式电源的实际出力变化，仅考虑稳态时的功率分配。在微电网中，分布式电源出力能力受环境因素影响可能发生波动。尤其在阻性微电网中，影响有功功率的逆变器端口电压为局部量，不能全局协调控制，将导致分布式电源运行条件发生变化时，逆变器的功率分配问题更加突出。

本文提出改进的双层下垂控制策略，外层控制在额定工作状态下，消除线路阻抗差异的影响，当分布式电源的实际容量改变时，通过逆变器直流母线电压变化，得到此时的电压参考值，将其传递给内层控制；内层控制通过模糊控制和迭代反馈，自适应地改变下垂控制系数，使逆变器工作在电压参考值下，实现了逆变器按 DG 实际容量比例输出功率。

1 并联逆变器输出功率特性

在微电网中逆变器相互并联，其等效电路如图 1 所示。图中：U_1、U_2分别为逆变器 1、2 的输出电压幅值；Φ_1、Φ_2 为逆变器输出电压与公共连接点电压的相角差；X_1、R_1 和 X_2、R_2 分别为逆变器 1、2 与公共连接点间线路的等效电抗、电阻；X、R 分别为负载的等效电抗、电阻；E 为公共连接点电压幅值。

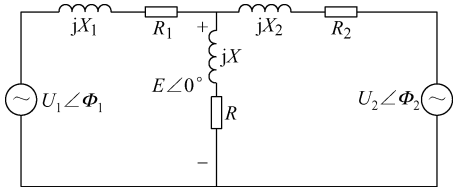


图 1 两逆变器并联等效电路

Fig. 1 Equivalent circuit of two inverters in parallel

在低压阻性条件下($R \gg X$、$\cos\Phi \approx 1$、$\sin\Phi \approx \Phi$)，逆变器的下垂控制表达式为

$$f_i = f^* + k_q Q_i \tag{1}$$

$$U_i = U^* - k_p P_i \tag{2}$$

式中：f_i和 U_i分别为逆变器 i 输出的频率和电压有效值；f^*和U^*分别为给定的逆变器输出频率和电压参考值；k_q和 k_p分别为逆变器的无功和有功下垂控制系数；Q_i和 P_i分别为逆变器 i 输出的有功和无功功率；i=1, 2, …, n。

根据线路的电压损耗，逆变器的端口电压可以表示为

$$U_i = E + \frac{R_i}{E} P_i \tag{3}$$

将逆变器端口电压方程与下垂控制曲线结合起来，可以完整地反映逆变器输出功率与电压的关系，如图 2 所示。

由图 2 可见，在传统下垂控制中，不同线路阻抗的逆变器，电压曲线与下垂控制曲线的交点不同，实际情况下线路阻抗不易精确测量，R_i应视为未知常数，所以较难直接调节下垂控制系数使逆变器输出功率相同。即由于线路的阻抗特性不同，采

用传统下垂控制的逆变器输出功率之间存在偏差。

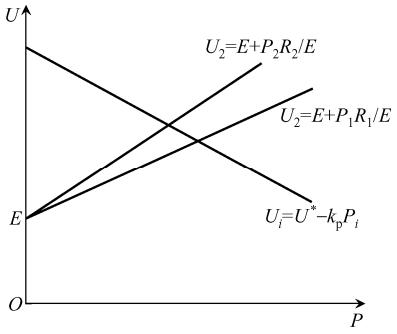


图 2　逆变器输出特性曲线

Fig. 2 Output characteristic curves of inverters

为了合理分配负荷功率，各逆变器应该按 DG 的容量输出功率，各逆变器输出功率 P_i 与 DG 容量 S_i 的比值相同，即

$$\frac{P_1}{S_1}=\frac{P_2}{S_2}=\cdots=\frac{P_i}{S_i} \tag{4}$$

若逆变器的功率分配不合理将产生功率环流，以 2 台逆变器为例，其表达式为

$$P_c=P_1-kP_2=E\left(\frac{U_1-E}{R_1}-k\frac{U_2-E}{R_2}\right) \tag{5}$$

式中：P_c 为环流功率；k 为 DG 的容量之比，$k=S_1:S_2$。

当两逆变器的输出功率之比与两 DG 容量之比相等时，环流功率为 0，负荷功率可以被精确分配。从图 2 中可以看出，逆变器的负荷功率分配与线路阻抗有关，当两逆变器采用相同的下垂控制系数时，不同线路阻抗将对应不同的输出特性，导致输出功率不同。即当 DG 的容量相同时，不同线路阻抗的逆变器不能满足式(4)中输出功率与 DG 容量比值相等的关系，导致功率分配出现偏差。

在微电网中，因为 DG 的随机性，当外界环境改变时，DG 的出力能力改变，即 DG 的实际容量变化，此时应该根据 DG 的实际容量，调整逆变器的输出功率。然而传统下垂控制中逆变器的输出功率 P_i，虽然受到 DG 容量限制，但不能反映 DG 的容量变化。在微电网中，逆变器从 DG 处可以获得的最大功率为 DG 在最大功率点跟踪控制下的最大功率，因此定义这个功率为 DG 的实际容量。当最大功率点发生变化时，DG 实际容量改变，导致式(5)中的 k 发生变化，由于逆变器输出功率不能跟随 DG 的实际容量变化，故造成不同逆变器间 P_i 与 S_i 的比值不相等，影响逆变器的负荷功率分配。

综上，影响逆变器分配负荷功率的因素有 2 个：一是逆变器与公共连接点间的线路阻抗不相同，造成逆变器输出功率偏差；二是 DG 的实际容量发生变化，导致逆变器的出力比例改变。

2　改进下垂控制

为实现负荷功率的精确分配，逆变器的输出功率应具备如下效果。

(1)在 DG 的额定工作状态下消除线路阻抗差异的影响，使逆变器按 DG 额定容量比例输出功率，即

$$\frac{P_{i0}}{S_{i0}}=\frac{P_{j0}}{S_{j0}}=a \tag{6}$$

式中：P_{i0}、P_{j0} 分别为额定工作状态下逆变器 i、j 的输出功率；S_{i0}、S_{j0} 分别为分布式电源 i、j 的额定容量；a 为逆变器输出功率与 DG 实际容量之比，在额定状态下 $a=a_N$，a_N 为常数。

(2)当微电网中部分 DG 实际容量发生随机变化时，如 $S_i=bS_{i0}$、$S_j=S_{j0}$，其中 b 为随机常数，逆变器能够按 DG 实际的容量比例输出功率，保证各逆变器输出功率与 DG 实际容量之比相等。

(3)因为 DG 总容量变化，维持原有出力比例将导致各逆变器输出总功率改变，所以需要调节逆变器出力与 DG 实际容量的比值，保证输出总功率平衡，此时 $a\neq a_N$。

因此，设计双层控制：外层控制的目的是得到逆变器输出电压参考值，在额定状态下，消除线路阻抗的影响，当 DG 实际容量变化时，需要消除阻抗的影响并追踪 DG 实际容量变化；内层控制根据电压参考值改变下垂控制系数，使逆变器端口电压等于电压参考值。最后，改变逆变器输出功率与 DG 实际容量的比值，使逆变器输出总功率不变。

2.1　外层控制

在额定工作状态下，DG 实际容量不变，选定

某个逆变器的输出功率为功率基准值 P_{N}，消除线路阻抗差异的影响使各逆变器的输出功率相等，根据逆变器输出功率方程可得

$$\frac{P_{0i\mathrm{ref}}}{P_i}=\frac{P_{\mathrm{N}}}{P_i}=k_{i\mathrm{M}}=\frac{U_{0i\mathrm{ref}}-E}{U_i-E} \tag{7}$$

$$U_{0i\mathrm{ref}}=k_{i\mathrm{M}}(U_i-E)+E \tag{8}$$

式中：$P_{0i\mathrm{ref}}$、$U_{0i\mathrm{ref}}$分别为逆变器在额定条件下应该输出的功率和电压参考值；$k_{i\mathrm{M}}$为逆变器 i 的线路阻抗影响系数，用于表征线路阻抗差异对逆变器输出功率分配的影响。

考虑 DG 实际容量变化时，电压参考值为

$$U_{i\mathrm{ref}}=k_{i\mathrm{S}}k_{i\mathrm{M}}(U_i-E)+E \tag{9}$$

式中，$k_{i\mathrm{S}}$为 DG 实际容量变化比例。

两级式逆变器的模型如图 3 所示。分布式电源经过 Boost 电路与逆变器连接，图中：C_1为分布式电源侧输入滤波电容；L 为 Boost 电感；T 为 Boost 开关管；C_2为直流母线并联电容；$U_{\mathrm{dc}i}$为直流母线电压；R_{L}为等效负载电阻。

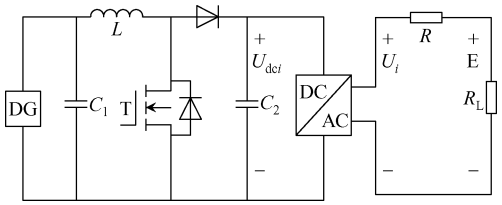


图 3 两级式逆变器电路

Fig. 3 Circuit of two-stage inverter

图 3 中，根据能量关系，在最大功率点跟踪控制下，DG 输出功率由 2 个部分组成，一部分为逆变器输出功率，另一部分储存在直流母线电容中，影响直流母线电压[17-18]，因此可以根据母线电压和逆变器当前输出功率反映 DG 实际容量变化。具体为

$$\int_{t_1}^{t_1+\Delta t}S_i\mathrm{d}t-\int_{t_1}^{t_1+\Delta t}P_i\mathrm{d}t=\frac{1}{2}C_2(U_{\mathrm{dc}i1}^2-U_{\mathrm{dc}i0}^2) \tag{10}$$

$$S_i=C_2U_{\mathrm{dc}i}\frac{\mathrm{d}U_{\mathrm{dc}i}}{\mathrm{d}t}+P_i \tag{11}$$

$$k_{i\mathrm{S}}=\frac{S_i}{S_{i0}} \tag{12}$$

式中：t_1为分布式电源实际容量变化后的起始时刻；Δt 为变化时间间隔；$U_{\mathrm{dc}i0}$、$U_{\mathrm{dc}i1}$分别为变化前、后的直流母线电压，得到逆变器电压参考值后，将其传递给内层控制。

2.2 内层控制

内层控制的目的是使逆变器端口电压稳定在外层控制得到的电压参考值。因为额定工作状态的电压与 DG 实际容量发生随机变化后的电压参考值可能差距较大，直接改变下垂控制系数会导致逆变器的电压偏差和控制精度差等问题。因此先将下垂控制曲线平移，再改变下垂控制系数，如图 4 所示。由图可知，在额定工作状态，逆变器下垂控制曲线与电压曲线交点为 A 点，逆变器输出功率为 P_0；将 U^*改为 $U_1^*=k_{i\mathrm{S}}k_{i\mathrm{M}}U^*$，逆变器的下垂控制曲线将平移，平移后的交点为 B 点。但期望输出功率 $k_{i\mathrm{S}}k_{i\mathrm{M}}P_0$对应电压曲线的 C 点，故还需改变下垂控制系数，使下垂控制曲线与电压曲线交于 C 点。

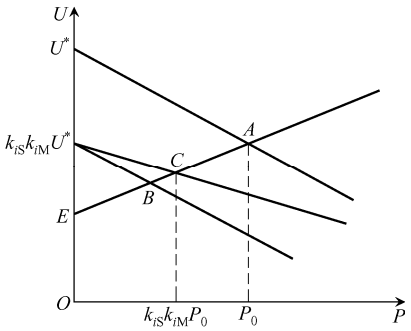


图 4 改进下垂控制原理

Fig. 4 Schematic of improved droop control

因此设计改进下垂控制为

$$U_i=k_{i\mathrm{S}}k_{i\mathrm{M}}U^*-(k_1+k_2)P_i \tag{13}$$

式中：k_1 根据逆变器端口电压与电压参考值进行模糊控制得到，可以使逆变器端口电压快速趋近于参考值；k_2 根据逆变器端口电压值与电压参考值的差进行迭代更新，目的是使逆变器最终工作在电压参考值处。

对于 k_1 的模糊控制，输入误差 e=1−$U_i/U_{i\mathrm{ref}}$，以及误差变化率 e_{ec}，输入变量的模糊子集可表示为 e = {NB, NL, NS, Z, PS, PL, PB}，e_{ec} = {NB, NL, NS, Z, PS, PL, PB}。式中：NB、NL、NS、Z、PS、PL、PB 分别表示负大、负中、负小、零、正小、正中、正大；e 和 e_{ec}的基本论域分别为[−1, 1]和[−10, 10]，量化因子分别为 3 和 0.3。隶属度函数选用三角形

函数。模糊规则见表 1。

表 1　模糊控制规则

Tab. 1 Fuzzy control rule

e	e_{ec}						
	NB	NL	NS	Z	PS	PL	PB
NB	PB	PB	PB	PB	PL	PS	Z
NL	PB	PB	PB	PL	PS	Z	NS
NS	PB	PB	PL	PS	Z	NS	NL
Z	PB	PL	PS	Z	NS	NL	NB
PS	PL	PS	Z	NS	NL	NB	NB
PL	PS	Z	NS	NL	NB	NB	NB
PB	Z	NS	NL	NB	NB	NB	NB

k_2为自适应步长的下垂控制系数，其表达式为

$$k_{2(t+1)}=k_{2(t)}+(U_{i\mathrm{ref}}-U_{i(t)})/\Delta TP_T \tag{14}$$

$$k_{2(0)}=(U_{i\mathrm{ref}}-U_{i(0)})/\Delta TP_T \tag{15}$$

$$\Delta T=-(\mathrm{e}^{-\left|\Delta U_{(t)}\right|}+P_{\mathrm{MAX}}/P_T) \tag{16}$$

式中：$U_{i\mathrm{ref}}$为输出电压参考值；$U_{i(t)}$为 t 时刻输出电压；ΔT 为步长的缩放权重；P_T为固定的步长系数；$\Delta U_{(t)}$为 t 时刻输出电压的误差；P_{MAX}为逆变器输出功率限额。

对于 t 时刻，仅考虑 k_2 对收敛性的影响，忽略其他变量，将 k_2=$k_{2(t)}$代入式(13)中有

$$U_{i(t)}=k_{i\mathrm{S}}k_{i\mathrm{M}}U^*-(k_1+k_{2(t)})P_i \tag{17}$$

$$\Delta U_{(t)}=U_{i\mathrm{ref}}-U_{i(t)}=U_{i\mathrm{ref}}-k_{i\mathrm{S}}k_{i\mathrm{M}}U^*+(k_1+k_{2(t)})P_i \tag{18}$$

对于 t+1 时刻，将式(14)代入式(13)中有

$$\begin{aligned}U_{i(t+1)}&=k_{i\mathrm{S}}k_{i\mathrm{M}}U^*-[k_1+k_{2(t)}+(U_{i\mathrm{ref}}-U_{i(t)})/\\&\quad\Delta TP_T]P_i=k_{i\mathrm{S}}k_{i\mathrm{M}}U^*-(k_1+k_{2(t)})P_i-\\&\quad(U_{i\mathrm{ref}}-U_{i(t)})P_i/\Delta TP_T=U_{i(t)}-\\&\quad(U_{i\mathrm{ref}}-U_{i(t)})P_i/\Delta TP_T\end{aligned} \tag{19}$$

$$\begin{aligned}\Delta U_{(t+1)}&=U_{i\mathrm{ref}}-U_{i(t+1)}=U_{i\mathrm{ref}}-U_{i(t)}+(U_{i\mathrm{ref}}-\\&\quad U_{i(t)})P_i/\Delta TP_T=\Delta U_{(t)}+\Delta U_{(t)}P_i/\Delta TP_T=\\&\quad\Delta U_{(t)}(1+P_i/\Delta TP_T)\end{aligned} \tag{20}$$

$$\left|\Delta U_{(t+1)}\right|=\left|\Delta U_{(t)}\right|\left|1+P_i/\Delta TP_T\right| \tag{21}$$

在下垂控制中功率远大于下垂控制系数，因此 $P_T\gg P_{\mathrm{MAX}}$，保证ΔU 较小时 k_2 不会大幅突变。若逆变器输出功率小于等于 P_{MAX}，则 $P_T/P_i\geqslant P_T/P_{\mathrm{MAX}}$，同时$\Delta T<-P_{\mathrm{MAX}}/P_T$，因此可得

$$\Delta TP_T/P_i<-1 \tag{22}$$

$$0<\left|1+P_i/\Delta TP\right|<1 \tag{23}$$

$$\left|\Delta U_{(t+1)}\right|<\left|\Delta U_{(t)}\right| \tag{24}$$

由式(24)可知，电压最终会收敛在电压参考值。当误差变大时，|ΔT|变小、步长变大；当误差变小时，|ΔT|变大、步长变小，调节收敛速度。内、外层控制的框图如图 5 所示。

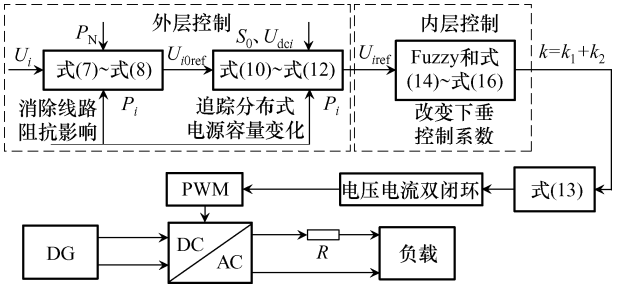


图 5　控制框图

Fig. 5 Control block diagram

2.3 逆变器出力控制

内、外层控制使逆变器出力跟踪 DG 实际容量变化，变化前、后各逆变器输出功率与 DG 实际容量的比值相等，但此时各逆变器输出的功率总和改变，因此需要调节逆变器的出力比例。对于额定容量相同的 DG，有

$$\frac{P_{i0}}{S_{i0}}=\frac{P_{i1}}{S_{i1}}=a_{\mathrm{N}} \tag{25}$$

$$\frac{\sum_{i=1}^{n}P_{i0}}{\sum_{i=1}^{n}P_{i1}}=\frac{\sum_{i=1}^{n}S_{i0}}{\sum_{i=1}^{n}S_{i1}}=\frac{n}{\sum_{i=1}^{n}k_{i\mathrm{S}}}=k_{\mathrm{P}} \tag{26}$$

式中：下标 0 对应额定工作状态；下标 1 对应 DG 波动后的工作状态；n 为 DG 的数量。

由式(26)可知，要维持逆变器输出总功率平衡，经过内、外层控制后，逆变器输出功率应再缩放 k_{P} 倍，此时逆变器的出力比例变为

$$\frac{P_i}{S_i}=k_{\mathrm{P}}\frac{P_{i0}}{S_{i0}}=k_{\mathrm{P}}a_{\mathrm{N}} \tag{27}$$

对于额定容量不等的 DG，$k_{i\mathrm{S}}$ 前应乘以额定容量的权重系数。在 k_1、k_2 的计算中电压参考值变为

$$U_{i\mathrm{ref}} = k_{\mathrm{P}} k_{i\mathrm{S}} k_{i\mathrm{M}} (U_i - E) + E \tag{28}$$

3 仿真实验

本文采用的分布式电源由光伏电池串并联组成，并对其采用扰动观察法进行最大功率点跟踪控制，使其一直工作在最大功率点。对图 1 所示电路，采用 MATLAB 进行仿真验证，设计了 3 种工况，仿真模型电路如图 6 所示。在仿真中，额定电压幅值为 80 V，额定频率为 50 Hz，额定有功功率为 7 250 W，分布式电源额定有功容量为 8 900 W。光伏电池组的额定光照强度为 1 000 W/m^2，采用 LC 滤波器，滤波电感和电容分别为 6 mH 和 1.5 μF。

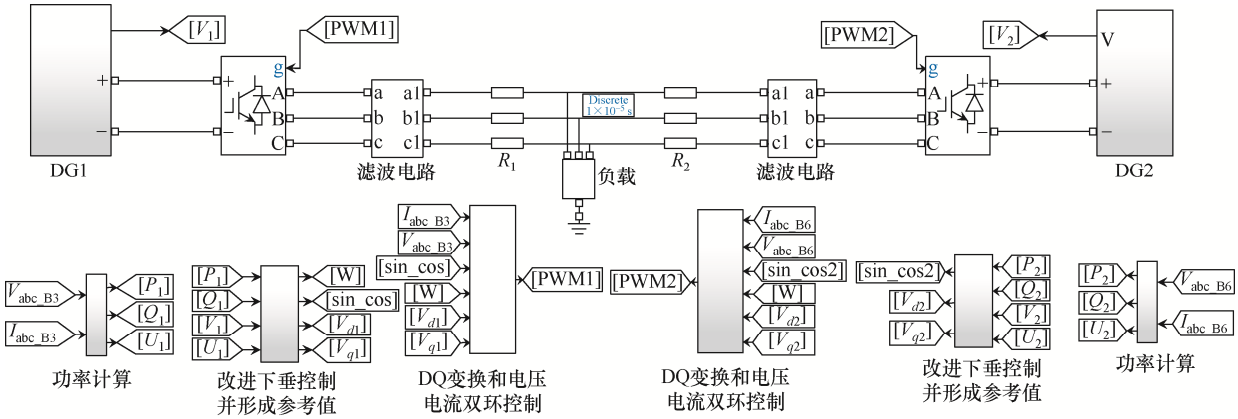


图 6 仿真模型电路

Fig. 6 Circuit of simulation model

工况 1：验证仅考虑线路阻抗差异情况下的改进下垂控制。此时 DG 工作在额定状态下，DG1、DG2 的光照强度均为 1 000 W/m^2，逆变器 1、2 线路电阻分别为 1.0 Ω 和 1.1 Ω。为了增强对比效果，将传统下垂控制与改进下垂控制进行切换。在 4.0 s 前为传统下垂控制，在 4.0 s 时控制方式切换为改进下垂控制。功率分配效果如图 7 所示，传统下垂控制下，两逆变器输出功率之比为 0.9，说明由于线路阻抗的差异，传统下垂控制逆变器输出功率存在偏差。控制方式切换为改进下垂控制后，逆变器根据输出功率与功率基准值，调整下垂控制系数，改变端口电压，进而改变输出功率。两逆变器输出功率之比发生变化，并且经短时间波动后稳定为 1.0，说明改进下垂控制可以消除线路阻抗差异的影响，实现负荷功率的精确分配。

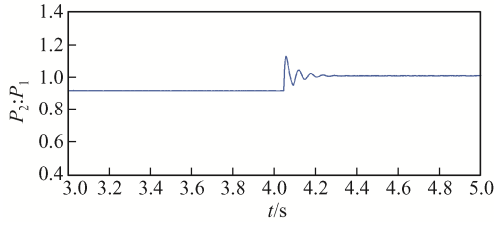


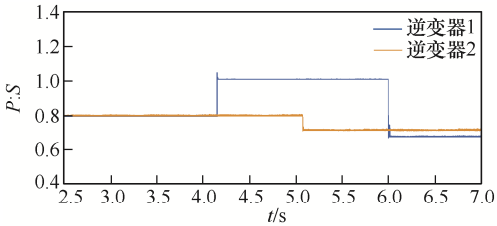
图 7 额定状态下功率分配效果

Fig. 7 Power sharing effect in rated state

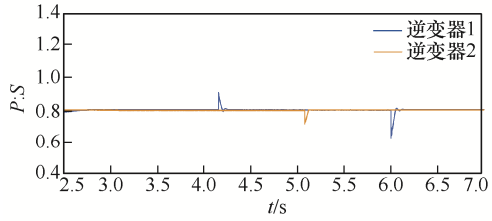
工况 2：验证 DG 实际容量变化对逆变器功率分配的影响，忽略线路阻抗差异，两逆变器的线路阻抗均取 1.0 Ω。DG1 受环境因素影响，光照强度在 4.0 s 时，由 1 000 W/m^2 降到 800 W/m^2；在 6.0 s 时，由 800 W/m^2 上升到 1 150 W/m^2。DG2 的光照强度在 5.0 s 前为 1 000 W/m^2，5.0 s 后为 1 100 W/m^2。

传统下垂控制下，功率分配效果如图 8(a)所示，图中纵坐标 *P*:*S* 表示逆变器输出功率与 DG 实际容量之比。由于传统下垂控制，逆变器输出功率不能反映 DG 实际容量变化。在 4.0 s 时，DG1 的实际容量下降，逆变器输出功率受到 DG 容量限制，*P*:*S* 的值为 1；在 6.0 s 后，DG1 实际容量大于额定容量，逆变器 1 输出功率与额定情况下相同，*P*:*S* 小于 4.0 s 前。同理，DG2 在 5.0 s 后 *P*:*S* 的结果降低。改进下垂控制在未加入第 2.3 节逆变器出力控制时如图 8(b)所示，改进下垂控制根据 DG 的实际容量，调整逆变器的下垂控制系数和端口电压，逆变器输出功率跟随 DG 变化，所以 *P*:*S*

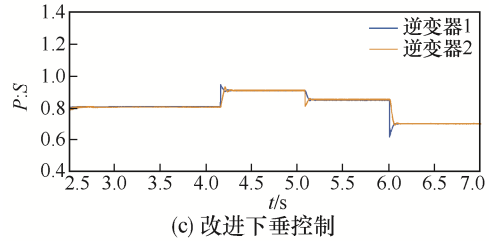
的结果恒定；在加入逆变器出力控制后，控制效果如图 8(c)所示，各逆变器在保持功率分配比例相同的同时，根据当前输出总功率调整出力比例，维持逆变器输出总功率恒定。在 4.0~5.0 s，因为 DG1 的实际容量降低，逆变器输出功率与 DG 实际容量的比值提高，*P*:*S* 变大；5.0~6.0 s，虽然 DG2 实际容量升高，但总的实际容量比额定情况下小，所以 *P*:*S* 的结果仍大于 4.0 s 前；在 6.0 s 后，因为 DG1 的实际容量升高，所以 *P*:*S* 的结果降低。在这个过程中，逆变器输出总功率恒定，如图 8(d)所示。



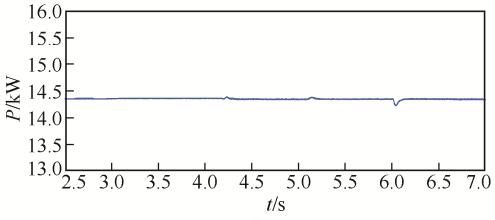
(a) 传统下垂控制



(b) 未加入功率控制的改进下垂控制



(c) 改进下垂控制

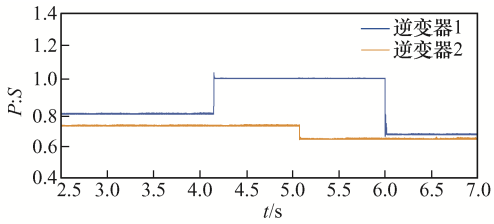


(d) 逆变器输出总功率

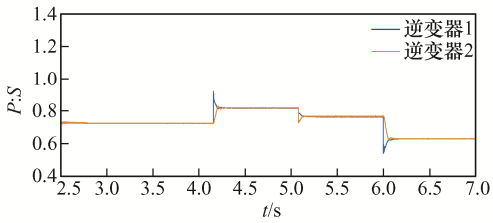
图 8　逆变器功率分配

Fig. 8 Power sharing of inverters

工况 3：验证在同时考虑 DG 实际容量变化和逆变器线路阻抗差异时，改进下垂控制的控制效果。此时光照条件与工况 2 相同，线路阻抗与工况 1 相同。传统下垂控制如图 9(a)所示，对比图 9(a)和图 8(a)，由于同时考虑了线路阻抗差异，传统下垂控制的功率分配存在偏差，所以在 4.0 s 前两 DG 的实际容量相等，但 *P*:*S* 的结果不同。改进下垂控制如图 9(b)所示，由于逆变器 2 的线路阻抗变大，从逆变器的输出功率特性可知，线路阻抗增大将导致输出功率降低。因此，与图 8(c)相比，图 9(b)中 *P*:*S* 有所降低，同时由于考虑了线路阻抗差异，故 DG 实际容量发生变化时的波动有小幅增大，但逆变器的功率分配比例始终相等，说明改进下垂控制在同时考虑 DG 实际容量变化和逆变器线路阻抗差异时仍然适用。



(a) 传统下垂控制



(b) 改进下垂控制

图 9　同时考虑线路阻抗和 DG 容量时逆变器功率分配

Fig. 9 Power sharing of inverters considering both the line impedance and DG capacity

4　结语

在阻性微电网中，逆变器的负荷功率分配问题不仅受到线路阻抗差异的影响，还与 DG 的实际容量变化有关。本文针对阻性微电网的负荷功率分配问题，提出了 1 种改进下垂控制策略，该策略通过模糊控制和迭代反馈，自适应地改变下垂控制系数，调节逆变器端口电压，使逆变器输出功率跟踪 DG 实际容量变化。该控制策略具有如下效果：实现额定工作状态下负荷功率的精确分配，消除线路阻抗差异的影响；DG 出力能力发生随机

变化时，仍然能使逆变器按DG的实际容量比例输出功率；DG 实际容量改变时，可以保持逆变器输出总功率恒定。

参考文献：

[1] Wei Baoze, Marzàbal A, Ruiz R, et al. DAVIC: A new distributed adaptive virtual impedance control for parallel-connected voltage source inverters in modular UPS system [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2019, 34(6): 5953-5968.

[2] 刘宝谨, 李春晨, 林佳鹏, 等. 下垂控制逆变器的序阻抗建模分析及验证[J]. 电源学报, 2025, 23(4): 151-162.
Liu Baojin, Li Chunchen, Lin Jiapeng, et al. Sequential impedance modeling and verification for droop-controlled inverters [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(4): 151-162. (in Chinese)

[3] 吕志鹏, 吴鸣, 黄红, 等. 一种具有网络自适应能力的分布式电源改进下垂控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2948-2957.
Lü Zhipeng, Wu Ming, Huang Hong, et al. An improved droop control with network self-adaptability for distributed generation [J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2948-2957. (in Chinese)

[4] 董旭, 徐永海, 马宁, 等. 基于自适应特性的直流微电网双因子下垂控制策略研究[J]. 电源学报, 2024, 22(5): 193-202.
Dong Xu, Xu Yonghai, Ma Ning, et al. Dual-factor droop control strategy for DC microgrid based on adaptive characteristics [J]. Journal of Power Supply, 2024, 22(5): 193-202. (in Chinese)

[5] Pham M D, Lee H H. Effective coordinated virtual impedance control for accurate power sharing in islanded microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(3): 2279-2288.

[6] Baghaee H R，Mirsalim M，Gevork B G，et al. Nonlinear load sharing and voltage compensation of microgrids based on harmonic power flow calculations using radial basis function neural networks[J]. IEEE Systems Journal, 2018，12(3)：2749-2759.

[7] Qian Haiya, Xu Qingshan, Du Pengwei, et al. Distributed control scheme for accurate power sharing and fixed frequency operation in islanded microgrids [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(12): 12229-12238.

[8] 张莹, 孟润泉, 王子昂, 等. 一种基于一致性算法的改进下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 104-111.
Zhang Ying, Meng Runquan, Wang Ziang, et al. An improved droop control strategy based on a consensus algorithm [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 104-111. (in Chinese)

[9] Mahmood H, Michaelson D, Jiang Jin. Accurate reactive power sharing in an islanded microgrid using adaptive virtual impedances [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1605-1617.

[10] 刘海霞, 李岚, 叶吉亮, 等. 改善功率分配及电能质量的微电网分层控制策略[J]. 电测与仪表, 2018, 55(18): 37-43.
Liu Haixia, Li Lan, Ye Jiliang, et al. Hierarchical control strategy to improve power distribution and power quality of islanded micro-grid [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2018, 55(18): 37-43. (in Chinese)

[11] Zhang H, Kim S, Sun Q, et al. Distributed adaptive virtual impedance control for accurate reactive power sharing based on consensus control in microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(4): 1749-1761.

[12] Peyghami S, Davari P, Mokhtari H, et al. Synchronverter-enabled DC power sharing approach for LVDC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(10): 8089-8099.

[13] Zhao Xin，Meng Lexuan，Xie Chuan，et al. A unified voltage harmonic control strategy for coordinated compensation with VCM and CCM converters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2018, 33(8): 7132-7147.

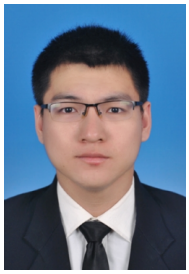
[14] 彭也伦, 黄文, 帅智康. 含异构微源孤岛微电网的瞬时有功功率分配问题研究[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(15): 5167-5178.
Peng Yelun, Huang Wen, Shuai Zhikang. Research on transient load sharing in islanded microgrids with heterogeneous DGs [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(15): 5167-5178. (in Chinese)

[15] Wang Zhenxiong, Yi Hao, Zhuo Fang, et al. Analysis of parameter influence on transient active power circulation among different generation units in microgrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2021, 68(1): 248-257.

[16] 林克文, 肖飞, 揭贵生, 等. 利用有功功率扰动的微网孤岛下垂控制策略[J]. 电气传动, 2020, 50(5): 55-60.
Lin Kewen, Xiao Fei, Jie Guisheng, et al. Droop control strategy in microgrid isolated island mode using active power disturbance [J]. Electric Drive, 2020, 50(5): 55-60. (in Chinese)

[17] 言大伟, 高昱峰, 沈志强. MPPT 对单级式光伏并网逆变器稳定性影响分析[J]. 电力电子技术, 2020, 54(11): 73-76, 124.
Yan Dawei, Gao Yufeng, Shen Zhiqiang. Influence analysis of MPPT on system stability of single-stage photovoltaic grid-connected inverter [J]. Power Electronics, 2020, 54(11): 73-76, 124. (in Chinese)

[18] 高磊, 吕敬, 马骏超, 等. 基于电路等效的并网逆变器失稳分析与稳定控制[J]. 电工技术学报, 2024, 39(8): 2325-2341.
Gao Lei, Lü Jing, Ma Junchao, et al. Instability analysis and stability control of grid-connected inverter based on impedance circuit equivalent [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(8): 2325-2341. (in Chinese)



么钟然

作者简介：

么钟然(1996—　)，男，硕士研究生。研究方向：新能源发电技术及其应用，E-mail：15042736391@163.com。

孙丽颖(1972—　)，女，通信作者，博士，教授。研究方向：新能源发电技术及其应用。E-mail：lgsunliying@163.com。

(责任编辑：耿越)