

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190029

## 微网逆变器无功出力按容量分配的改进控制策略

樊梦蝶, 曾成碧, 苗虹

(四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

**摘要:** 为了解决馈线阻抗不一致导致的微网逆变器无功出力不能均分的问题, 提出了一种基于电流下垂控制的改进控制策略。通过测量和计算公共耦合点(Point of Common Coupling, PCC)处的无功电流按额定容量权重所得值, 作为所有逆变器的基准值, 并由母线信息控制改进的微积分控制器的使能, 精确调节无功电流下垂曲线的电压偏置。该方法能够避免馈线阻抗造成的电压跌落, 使逆变器按容量分配负荷, 对通信依赖程度低, 且消除周期功率延迟, 具有良好的自适应能力和稳定性。仿真和实验也充分证明了所提控制策略的正确性和可行性。

**关键词:** 并联逆变器; 微电网; 电流下垂控制; 馈线阻抗; 容量; 无功出力均分

### Improved control strategy of microgrid inverters with reactive power distributed by capacity

FAN Mengdie, ZENG Chengbi, MIAO Hong

(School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

**Abstract:** In order to solve the problem that the reactive power of microgrid inverters can not be divided equally due to the inconsistency of line impedance, this paper proposes an improved current droop control strategy. To precisely adjust the voltage bias of the reactive current droop curve, in this research, the measured and calculated value of the reactive current at the point of common coupling (PCC) by capacity is used as the reference of all inverters, the bus information is used to control the improved calculus controller. The method can compensate for the voltage drop caused by impedance, which makes the inverter accurately divide load according to capacity, with low communication dependence, no periodic power delay, and good adaptability and stability. Simulation and experiment also fully prove the correctness and feasibility of the proposed control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 2018YFC1505502-03), Science and Technology Department Foundation of Sichuan Province (No. 2018GZ0394), and Science and Technology Bureau Foundation of Chengdu (No. 2017-RK00-00219-ZF).

**Key words:** parallel inverter; microgrid; current droop control; line impedance; capacity; reactive power sharing

## 0 引言

传统能源储量的不断减少和环境污染问题的不断加剧, 使得含有分布式电源(Distribution Generation, DG)的微电网引起了社会的广泛关注<sup>[1-2]</sup>。与传统电力系统相比, 以逆变器为接口的 DG 单元是微电网的核心。多逆变器的并联可以扩大供电系统容量, 实现稳定可靠的冗余供电<sup>[3-5]</sup>, 已是大势所趋。

多逆变器并联控制策略主要有恒压恒频控制、

下垂控制和 PQ 控制等<sup>[6]</sup>, 孤岛运行时一般采用下垂控制, 但传统下垂控制由于馈线阻抗差异、输出电压幅值不等及微电网复杂结构等因素使逆变器输出功率无法均分, 甚至产生严重的环流<sup>[7-10]</sup>, 并且存在周期功率理论延迟和稳定性问题<sup>[11]</sup>。国内外学者为此已提出大量改进策略, 文献[12]引入了虚拟阻抗, 将逆变器的等效输出阻抗设计成阻性, 但导致母线电压的跌落, 电能质量差; 文献[13]利用虚拟负阻抗来抵消系统阻性成分, 使逆变器的输出阻抗呈感性, 线路参数存在误差时易引起系统不稳定; 文献[14-15]根据馈线阻抗或负荷变化对下垂系数进行调整, 减小馈线阻抗引起的均流误差, 但是该方案动态响应较差, 且下垂系数调整环约束条件多,

**基金项目:** 国家重点研发项目资助(2018YFC1505502-03); 四川省科技厅项目资助(2018GZ0394); 成都市科技局项目资助(2017-RK00-00219-ZF)

运算复杂。文献[16]在下垂控制的基础上利用抗 PI 饱和的数字平均电流控制, 但对检测精度要求高; 文献[17]利用谐波发出的有功功率调节基波电压幅值参考值, 但谐波电压的注入导致逆变器输出电压畸变严重, 馈线阻抗为感性时易放大谐波。

可见仅通过本地信息无法达到预期效果, 许多运用通信的新策略应运而生。文献[18]计算各逆变器通信有功功率平均值与本地测量值之差, 利用积分对电压幅值补偿, 但功率分配不够精确, 系统变化时扰动大; 文献[19]利用中央控制器发出同步信号将无功偏差作用于下垂控制, 但会产生频率波动, 导致稳定性问题; 文献[20]通过分层控制实时传送和分享数据, 该策略需要较复杂的通信, 数据量大。文献[21]通过本地和相邻电源的功率信息对虚拟阻抗的模进行调节, 但该方法依赖于完善的微电网模型信息, 一台逆变器出现故障时可靠性低。综上, 仍需一种无功分配精度高、稳定性良好的可行方案。

本文提出的基于电流下垂控制的改进策略, 将无功电流按额定容量权重所得值作为基准, 由母线信息调节控制器, 通过梯形积分和改进微分补偿馈线阻抗、负载变化等造成的电压跌落, 精确均分无功, 对通信依赖度低, 具有良好的自适应性和稳定性。仿真和实验均证明所提出控制策略的正确性。

## 1 微电网与传统下垂控制机理分析

图 1 可见微电网由 DG 单元和负载组成, 每个 DG 单元以逆变器为接口通过馈线连接公共母线, 中央控制器收集母线信息并由低带宽通信与各逆变器完成信息交换。微电网有并网和孤岛两种模式, 并网运行时微网电压由大电压支撑, 只需 DG 表现为电流源行为, 即可通过功率跟踪算法实现功率均分<sup>[22]</sup>。故本文仅针对孤岛模式的无功出力均分问题。

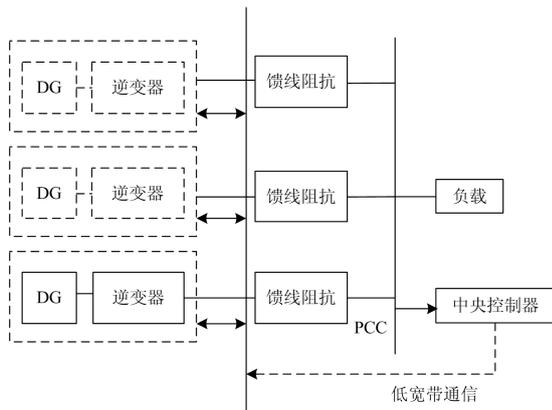


图 1 微电网简化结构图

Fig. 1 Simplified structural diagram of microgrid

微网逆变器简化图如图 2 所示。以两台并联逆变器为例, 令  $Z_n = R_n + jX_n$ , 逆变器向交流母线注入的功率<sup>[23]</sup>可表示为

$$\begin{cases} P_n = \frac{1}{|Z_n|} [(EU_n \cos \delta_n - E^2) \cos \theta_n - EU_n \sin \delta_n \sin \theta_n] \\ Q_n = \frac{1}{|Z_n|} [(EU_n \cos \delta_n - E^2) \sin \theta_n - EU_n \sin \delta_n \cos \theta_n] \end{cases} \quad (1)$$

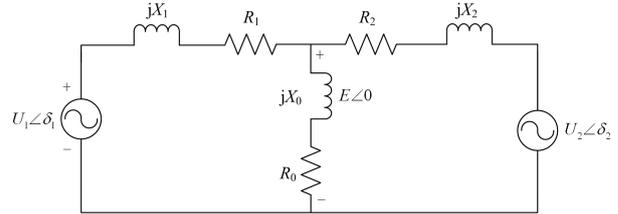


图 2 微网逆变器简化图

Fig. 2 Simplified diagram of parallel microgrid inverters

实际相角偏差  $\delta_n$  较小, 高压微网馈线阻抗主要呈感性, 有近似解耦关系, 式(1)化简为

$$\begin{cases} \Delta \delta_n = \frac{X_n}{U_n E} P_n \\ \Delta U = U_n - E = \frac{X_n}{U_n} Q_n \end{cases} \quad (2)$$

传统下垂控制方程表示为

$$\begin{cases} \omega_n = \omega_n^* - m_n P_n \\ U_n = U_n^* - k_n Q_n \end{cases} \quad (3)$$

式中: 带下标  $n$  的变量为第  $n$  个逆变器对应参数;  $\omega_n^*$ 、 $U_n^*$  和  $\omega_n$ 、 $U_n$  分别为空载和实际目标的电压频率和幅值;  $m_n$ 、 $k_n$  为下垂系数;  $P_n$ 、 $Q_n$  为实际输出的有功功率和无功功率。

传统下垂控制的功率计算通过延时累加和再求平均得到, 需要一个周期的信息, 降低了系统稳定性, 对数字系统尤为不利<sup>[24]</sup>。

由式(2)和式(3)得无功功率为

$$Q_n = -\frac{U_n \Delta U}{X_n + k_n U_n} \quad (4)$$

由式(4)可见无功功率由电压降、目标电压、馈线电感和下垂系数共同作用, 而电压降直接与馈线阻抗有关。相同容量逆变器取相同下垂系数, 当  $X_1 \neq X_2$  时, 无功功率无法均分。

馈线阻抗也导致环流。环流  $I_{OH}$  可以表示为

$$I_{OH} = \frac{1}{2}(I_{o1} - I_{o2}) = \left[ \left( \frac{U_1 \angle \delta_1 - E \angle 0}{X_1} \right) - \left( \frac{U_2 \angle \delta_2 - E \angle 0}{X_2} \right) \right] \quad (5)$$

本文针对以上问题, 提出改进控制策略。

## 2 改进控制策略

### 2.1 电流下垂控制

式(2)可化简为

$$\begin{cases} \Delta\delta_n = \frac{X_n}{E} i_{pn} \\ \Delta U = X_n i_{qn} \end{cases} \quad (6)$$

可由有功电流控制角频率, 无功电流控制电压幅值, 电流下垂方程表示为

$$\begin{cases} \omega_n = \omega_n^* - k_{pn} i_{pn} \\ U_n = U_n^* + k_{qn} i_{qn} \end{cases} \quad (7)$$

在电流不含零序分量的三相系统中可将电流瞬时值 $i_a$ 、 $i_b$ 、 $i_c$ 变换到正交的 $\alpha$ 和 $\beta$ 坐标上。

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

$\alpha$ 、 $\beta$ 平面上的瞬时有功电流 $i_p$ 和瞬时无功电流 $i_q$ 分别为瞬时空间矢量 $i$ 在其法线上的投影。

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\omega t & -\cos\omega t \\ -\cos\omega t & -\sin\omega t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

通过计算瞬时电流得到有功电流和无功电流平均值, 减小周期功率的延迟。

另外, 当逆变器输出电压严重偏离设定值时, 电流下垂控制方法限制输出电流值, 相较传统下垂控制更能保护系统。

### 2.2 电压补偿

由于频率控制环积分环节的存在, 同容量逆变器采用相同下垂系数时有功电流相等。而馈线阻抗、负荷突变、母线电压突变等因素导致电压跌落, 需要进行补偿来避免输出电压参考值不同造成的影响。

由式(6)和式(7)可得

$$\Delta U = k_{q1}(i_{q1} - i_{q1}^*) = k_{q2}(i_{q2} - i_{q2}^*) = \dots = k_{qn}(i_{qn} - i_{qn}^*) \quad (10)$$

逆变器容量与无功下垂系数成正比, 将总输出无功电流和不同容量无功电流按容量比例权重计算所得值 $i_{ref}$ 作为所有逆变器基准。

$$i_{ref} = \frac{i_{qn}^*}{\sum_{i=1}^n i_{qn}^*} \sum_{i=1}^n i_{qn} \quad (11)$$

电压补偿表示为

$$\Delta U = k_i \int (i_{ref} - i_{qn}) dt = k_i \int e(\tau) d\tau \quad (12)$$

积分项的作用是消除逆变器输出电压与额定值的偏移量, 式(12)中采用矩形方式计算积分,  $k_i$

是积分系数; 在非连续系统中有实际误差, 为了提高积分运算精度, 将积分项近似变换采用梯形积分进行计算:

$$k_i \int_0^1 e(\tau) d\tau \approx Te(0) + T \sum_{j=0}^{k-1} \frac{e(j) + e(j+1)}{2} \quad (13)$$

$$\begin{cases} Te(0) & k=0 \\ T \frac{e(k-1) + e(k)}{2} & k \neq 0 \end{cases} \quad (14)$$

### 2.3 改进微分项

DG 输出电压变化会导致输出电流变化。因此当无功电流波动时, 可引入输出电压幅值的微分项负反馈以减小幅值偏差, 从而减小无功电流的振荡。但由于参考值 $i_{ref}$ 易发生变化, 微分作用会引起控制量的大幅度变化。改进微分项采用图3所示, 通过对被控量进行微分取代对偏差量微分, 有利于消除无功电流的振荡, 改善动态性能。

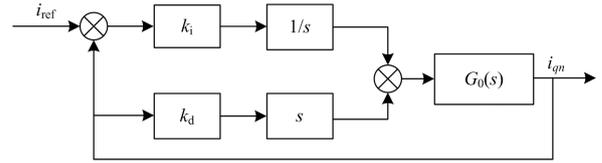


图3 改进的微分控制

Fig. 3 Reactive current distribution in improved control strategy

由图3可得改进微分控制传递函数为

$$\frac{I_{qn}(s)}{I_{ref}(s)} = \frac{G_0(s)}{1 + (k_d s + 1)G_0(s)} \quad (15)$$

式中,  $k_d$ 是微分系数。显然该方法比传统微分控制少了一个零点。可避免因参考值变化引起系统超调量过大、执行动作剧烈问题, 控制性能良好。

### 2.4 系统运行方式

改进的下垂控制总体方程为

$$\begin{cases} \omega_n = \omega_n^* - k_{pn} i_{pn} \\ U_n = U_n^* + k_{qn} i_{qn} + \beta [k_i \int e(\tau) d\tau - k_d \frac{di_{qn}}{dt}] \end{cases} \quad (16)$$

$\beta$ 是一个开关函数, 通过中央控制器对系统动态特征做出正确的判断。初始状态 $\beta=1$ , 检测系统固有馈线阻抗的差异并补偿; 直到中央控制器更新计算后所得无功电流基准值 $i_{ref}$ 与实际值 $i_{qn}$ 相同时, 系统达到稳态,  $\beta=0$ ,  $U_n$ 保持上一次调节后的值, 系统运行普通电流下垂控制; 当检测到系统发生变化, 例如负载突变或某逆变器突然故障,  $\beta=1$ , 运行改进控制策略, 将 $n$ 台逆变器PCC处瞬时无功电流值按容量比例计算值作为所有逆变器的基准, 利用

改进的梯形积分和微分先行法精确补偿和调节电压偏差。控制方法不依赖于某一个逆变器, 允许任一DG单元即插即用。可避免运算量过大, 降低对通信可靠性的依赖性。改进总体框图如图4所示。

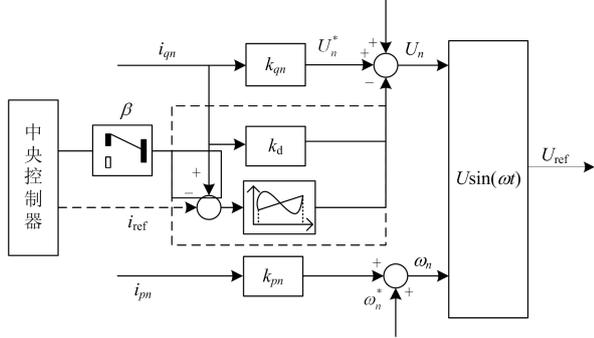


图 4 改进总体框图

Fig. 4 Improved overall block diagram

### 3 改进控制策略分析

#### 3.1 策略分析

如图5所示, 馈线阻抗不同时, 馈线特性曲线和两同容量逆变器无功电流下垂曲线交于 $(i_{q1}, U_1)$ 和 $(i_{q2}, U_2)$ ; 经改进控制策略补偿输出电压的偏移量, 电流下垂曲线分别移至 $U_{n1}^*$ 和 $U_{n2}^*$ , 与馈线特性曲线重新交于点 $(i_{ref}, U_1')$ 和点 $(i_{ref}, U_2')$ , 使无功电流稳定在 $i_{ref}$ , 实现无功均流; 而频率是一个全局变量, 有功出力输出不受馈线阻抗的影响, 最终输出电流相等。

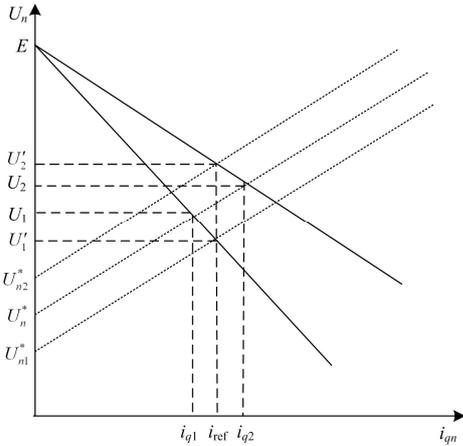


图 5 改进策略下的无功电流分配

Fig. 5 Reactive current distribution in improved control strategy

当逆变器故障、输出功率变化、负荷突变或母线电压突降时, 电流会产生变化, 导致馈线电压偏移, 微网母线电压波动。通过令输出参考电压给定信号跟随输出电流的变化而变化, 可消除馈线压降的影响, 补偿微网母线电压的偏差。

此外, 电流下垂控制不受输出端电压影响, 母线电压偏移量在额定范围内, 对电流的控制即是对功率的控制, 可避免微电网逆变器过载运行<sup>[25]</sup>。

#### 3.2 稳定性条件分析

式(16)的离散形式可表示为

$$U_n^{m+1} = U_n^* + k_{qn} i_{qn}^m + k_i \sum_{j=1}^m (i_{ref}^j - i_{qn}^j) - k_d \Delta i_{qn}^m \quad (17)$$

对于第 $k$ 台和第 $l$ 台逆变器, 有

$$\begin{cases} U_k^{m+1} = U_k^* + k_{qk} i_{qk}^m + k_i \sum_{j=1}^m (i_{ref}^j - i_{qk}^j) - k_d \Delta i_{qk}^m \\ U_l^{m+1} = U_l^* + k_{ql} i_{ql}^m + k_i \sum_{j=1}^m (i_{ref}^j - i_{ql}^j) - k_d \Delta i_{ql}^m \end{cases} \quad (18)$$

易求得第 $m$ 和 $m+1$ 时刻第 $k$ 台和第 $l$ 台逆变器输出电压幅值差 $\Delta U_{kl}^m$ 和 $\Delta U_{kl}^{m+1}$ , 则有

$$\begin{aligned} \Delta U_{kl}^{m+1} - \Delta U_{kl}^m &= k_i (i_{ql}^j - i_{qk}^j) + (k_{qk} - k_{ql}) (i_{ql}^m - i_{qk}^{m-1}) + \\ & k_{qk} (\Delta i_{qkl}^m - \Delta i_{qkl}^{m-1}) - k_d (\Delta i_{qkl}^m - 2\Delta i_{qkl}^{m-1} + \Delta i_{qkl}^{m-2}) \end{aligned} \quad (19)$$

式中,  $\Delta i_{qkl}^m = i_{qk}^m - i_{ql}^m$ 。

根据式(6)的无功电流特性可得

$$\begin{cases} \Delta U_{kl}^{m+1} = X_k i_{qk}^{m+1} - X_l i_{ql}^{m+1} \\ \Delta U_{kl}^m = X_k i_{qk}^m - X_l i_{ql}^m \end{cases} \quad (20)$$

将式(20)相减, 有

$$\Delta U_{kl}^{m+1} - \Delta U_{kl}^m = X_k \Delta i_{qkl}^{m+1} - X_l \Delta i_{qkl}^m + (X_k - X_l) \Delta i_{ql}^{m+1} \quad (21)$$

联立式(19)和式(21)得

$$\begin{aligned} k_{qk} (\Delta i_{qkl}^m - \Delta i_{qkl}^{m-1}) - k_d (\Delta i_{qkl}^m - 2\Delta i_{qkl}^{m-1} + \Delta i_{qkl}^{m-2}) - k_i \Delta i_{qkl}^m - \\ X_k (\Delta i_{qkl}^m - \Delta i_{qkl}^{m-1}) = (X_k - X_l) \Delta i_{ql}^{m+1} - (k_{qk} - k_{ql}) \Delta i_{ql}^m \end{aligned} \quad (22)$$

首先要保证系统稳定, 其次使系统具有较高的动态响应。故假设 $k_d=0$ , 作 $z$ 变换可得

$$\frac{\Delta i_{qkl}}{\Delta i_{ql}} = \frac{(X_k - X_l)z^2 - (k_{qk} - k_{ql})z}{X_k z^2 - (k_{qk} - k_i + X_k)z + k_{qk}} \quad (23)$$

令 $z = \frac{\omega+1}{\omega-1}$ , 式(23)可化简为

$$\begin{aligned} \Delta = X_k z^2 - (k_{qk} - k_i + X_k)z + k_{qk} = \\ k_i \omega^2 + (-2k_{qk} + 2X_k)\omega + 2X_k + 2k_{qk} - k_i = 0 \end{aligned} \quad (24)$$

根据劳斯判据, 所有特征值均在单位圆内时, 系统稳定, 稳定条件为

$$\begin{cases} k_{qk} < X_k \\ 0 < k_i < 2X_k + 2k_{qk} \end{cases} \quad (25)$$

微分能提高系统稳定性, 该条件下系统稳定。

由于逆变器输出端滤波器电感值较大, 且馈线路径较短。 $k_{qk}$ 和 $k_i$ 取较小值便可满足系统稳定性要求。电流下垂控制的保护机制可满足输出电压范围

$U_n \in [U_{\min}, U_{\max}]$ 。根据式(6)和式(20), 得第  $m+1$  时刻离散方程:

$$\Delta r_{qk}^{m+1} < \frac{U_{\max} - U_{\min}}{X_k} \quad (26)$$

根据有界输入-有界输出稳定性定理, 选择合适参数, 即可保证逆变器输出无功电流差值稳定。

## 4 仿真结果

### 4.1 仿真参数

为验证前文的分析, 在 Matlab/Simulink 环境中搭建两台逆变器并联模型进行仿真, 其输出频率为 50 Hz, 载波频率为 6 000 Hz, LC 滤波参数为  $L=0.6$  mH,  $C=1\ 500$   $\mu$ F。系统仿真参数设置如表 1。

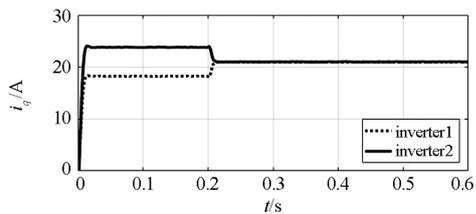
表 1 仿真参数

Table 1 Simulation parameters

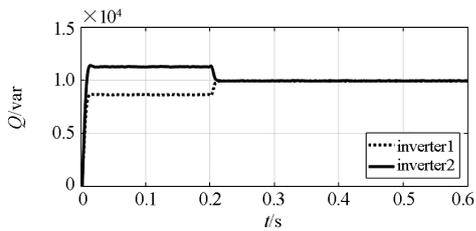
参数	取值及单位
仿真步长	$5 \times 10^{-6}$ s
系统电压	800 V
三相负荷额定线电压	380 V
DG1 馈线阻抗 $Z_1$	$j0.2$ mH
DG2 馈线阻抗 $Z_2$	$j0.45$ mH
公共负荷	50 kW, 20 kvar

### 4.2 同容量逆变器

两同容量逆变器并联, 设置有功电流下垂系数  $k_{p1} = k_{p2} = 3 \times 10^{-3}$ , 无功电流下垂系数  $k_{q1} = k_{q2} = 1 \times 10^{-4}$ , 0.2 s 时将传统下垂控制切换为改进控制策略, 仿真波形如图 6(a)和图 6(b), 由于馈线阻抗不同, 传统下垂控制的无功出力存在一定的偏差。利用改进控制策略, 两逆变器的无功电流值相等, 无功功率均为 10 kvar, 均分效果较好。



(a) 改进策略前后逆变器无功电流



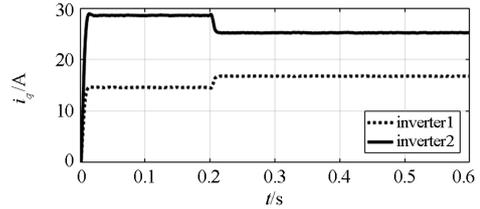
(b) 改进策略前后逆变器无功功率

图 6 同容量逆变器仿真波形

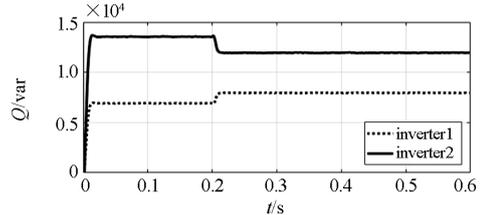
Fig. 6 Simulation waveform of inverters with the same capacity

### 4.3 按比例分配负荷

逆变器容量比为 3:2 时, 选取有功电流下垂系数  $k_{p1} = 3 \times 10^{-3}$ ,  $k_{p2} = 4.5 \times 10^{-3}$ , 无功电流下垂系数  $k_{q1} = 1 \times 10^{-4}$ ,  $k_{q2} = 1.5 \times 10^{-4}$ ; 0.2 s 时将传统下垂控制切换为改进控制策略, 仿真得到无功电流和无功功率如图 7(a)和图 7(b)所示, 传统下垂控制仍存在一定偏差, 而改进控制策略实现无功出力按容量比例高精度分配。



(a) 改进策略前后逆变器无功电流



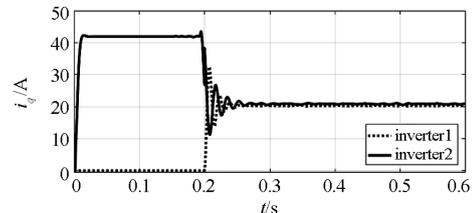
(b) 改进策略前后逆变器无功功率

图 7 不同容量逆变器仿真波形

Fig. 7 Simulation waveform of inverters with different capacity

### 4.4 稳定性与动态性能

图 8 是逆变器突然并联、负载突加和突降的动态过程仿真曲线。在馈线阻抗相等的情况下, 图 8(a)和图 8(b)为 0.2 s 时逆变器突然并联的波形, 传统下垂控制方法出现较大的震荡, 改进的控制方法稳定性良好。图 8(c)—图 8(f)为 0.2 s 时切除 10 kW, 10 kVA 的负载, 0.4 s 时增加 10 kW, 10 kVA 的负载, 图 8(c)和图 8(d)可见负载突变时, 传统下垂控制 PCC 点电压从 311 V 变化为 320 V, 增加 9 V。改进下垂控制  $U_{PCC}$  维持在 311 V 波动小于 1 V, 改进策略相比传统策略较好地实现母线电压的补偿。图 8(e)和图 8(f)可见改进控制策略下同容量逆变器 and 不同容量对负载突变的响应过程相似, 能够保持良好均分度。



(a) 传统下垂控制的稳定性

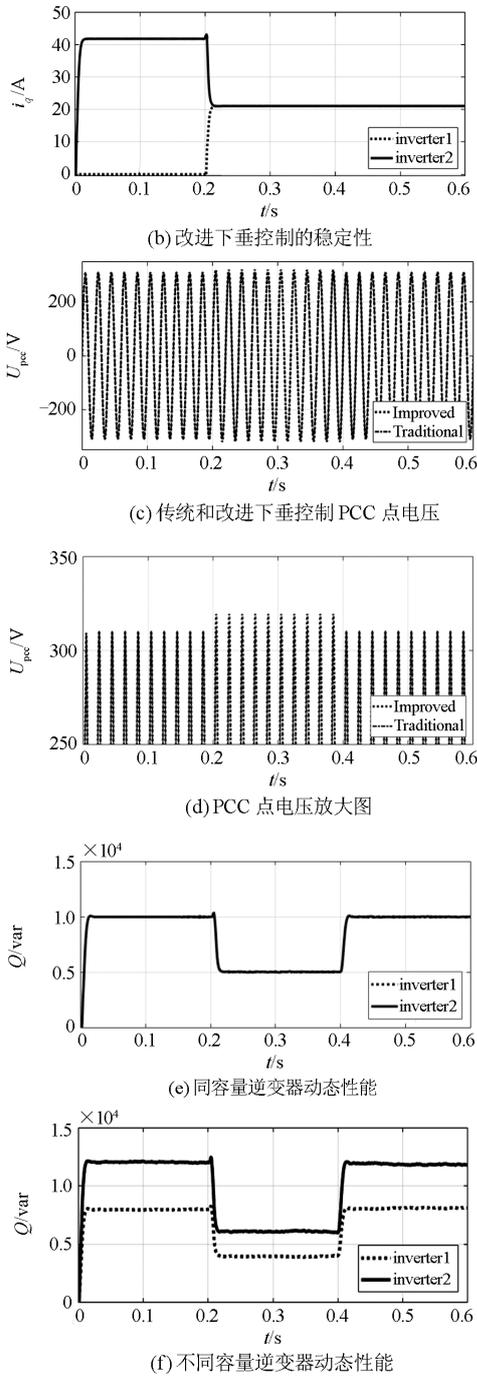


图 8 稳定性与动态性能仿真波形

Fig. 8 Stability and dynamic performance simulation waveform

## 5 实验结果

### 5.1 实验参数

实验采用的仪器是 DSP 的 TMS320F28069 核心板, 逆变器主电路采用全桥拓扑, 载波频率为 12.8 kHz, 采用三菱公司的 IGBT 模块 CM300DY-24NF, 分布式电源电压用可编程电源代替, 由于实验室条件有限, 实验采用低压和小功率器件进行测

试。实验参数如表 2 所示。

表 2 实验参数

Table 2 Experiment parameters

参数	取值及单位
直流侧电压	80 V
采样电路	$R = 100 \Omega, C = 6.8 \text{ nF}$
LCL 滤波参数	$L_1 = L_2 = 1 \text{ mH}, C = 5 \mu\text{F}$
DG1 馈线阻抗 $Z_1$	$1 \Omega + 0.4 \text{ mH}$
DG2 馈线阻抗 $Z_2$	$2 \Omega + 0.8 \text{ mH}$
负载	$20 \Omega + 10 \text{ mH}$

### 5.2 同容量逆变器

两同容量逆变器, 有功电流下垂系数  $k_{p1} = k_{p2} = 1 \times 10^{-3}$ , 无功电流下垂系数  $k_{q1} = k_{q2} = 5 \times 10^2$ , 通道一为逆变器 1 输出的电流  $i_{o1}$ , 通道二为逆变器 2 输出的电流  $i_{o2}$ , 通道 M 为环流  $i_{oH} = (i_{o1} - i_{o2})$ ; 同容量逆变器改进策略前后实验波形如图 9 所示。由于馈线阻抗的影响, 传统下垂控制策略图 9(a) 输出电流存在一定幅值和相位差, 系统存在较大的环流, 无功功率不能完全均分。改进后的策略实验波形如图 9(b), 两逆变器输出具有较好的均流特性并实现无功功率精确分配。

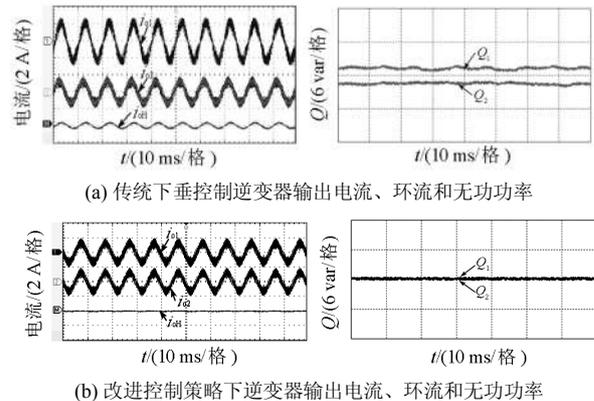
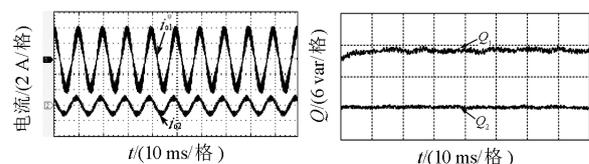


图 9 同容量逆变器改进策略前后实验波形

Fig. 9 Experimental waveform of the same-capacity inverter before and after the improvement strategy

### 5.3 不同容量逆变器

逆变器容量比为 2:1 的实验, 实验结果和同容量类似。传统控制策略下逆变器输出电流和无功功率不能完全均分如图 10(a)。改进后的控制策略如图 10(b), 两逆变器的无功出力近似 2:1 均分。



(a) 传统下垂控制逆变器输出电流和无功功率

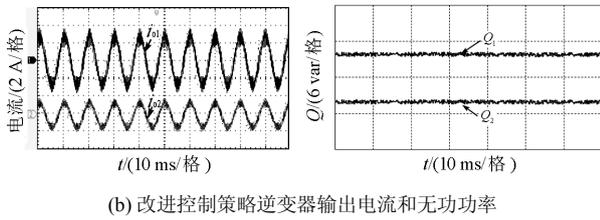


图 10 不同容量逆变器改进策略前后实验波形

Fig. 10 Experimental waveforms of different-capacity inverter before and after improvement strategies

### 5.4 动态性能

在改进的控制策略下，负载突加和突降的逆变器的输出电流和无功功率如图 11 所示。可见该方法具有较快的动态响应速度。

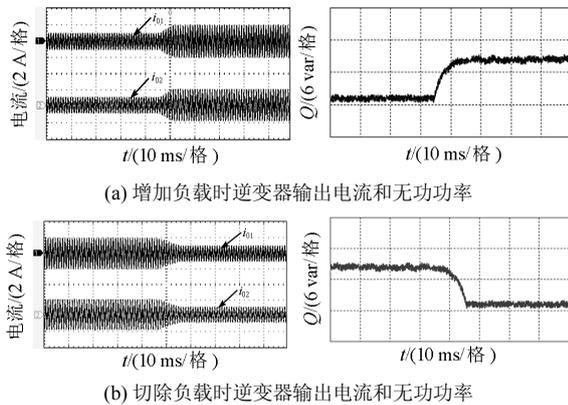


图 11 动态性能实验结果

Fig. 11 Dynamic performance test results

值得注意的是，由于实验平台的逆变器输出端的 LCL 滤波器带宽原因，示波器测得的电压电流波形有较大毛刺难以去除。

## 6 结论

(1) 本文以感性输出阻抗为例，分析了传统下垂控制的原理和存在问题。

(2) 提出了一种基于电流下垂控制的改进策略，通过将 PCC 处的无功电流按容量比例所得值作为基准，反馈到各逆变器无功采样值上作差，通过母线信息控制改进的控制器，精确调节电压偏置；并分析了环流特性和稳定条件。

(3) 仿真和实验证明本方法使并联逆变器按容量比例分配无功，且具有较好的稳定性和动态性能。

### 参考文献

[1] LI Y W, KAO C N. An accurate power control strategy for inverter based distributed generation units operating

in a low voltage microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12): 2977-2988.

[2] 祝振鹏. 新能源微电网发展概要[J]. 供用电, 2017, 34(2): 23-17.

ZHU Zhenpeng. Development summary of new energy micro grid[J]. Distribution & Utilization, 2017, 34(2): 23-17.

[3] ZHANG Baohui, HAO Zhiguo, BO Zhiqian. New development in relay protection for smart grid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 121-127. DOI: 10.1186/s41601-016-0025-x.

[4] 刘宁宁, 曹炜, 赵晋斌. 直流微电网的一种增量式下垂控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 24-30.

LIU Ningning, CAO Wei, ZHAO Jinbin. An incremental drop control method for DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 24-30.

[5] 黄杏, 金新民. 微电网分布式电源变流器下垂特性控制策略[J]. 电工技术学报, 2012, 27(8): 93-100.

HUANG Xing, JIN Xinmin. Control strategy for droop characteristics of distributed power converters for microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(8): 93-100.

[6] WU T F, CHEN Y K, HUANG Y H. 3C strategy for inverters in parallel operation achieving an equal current distribution[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2000, 47(2): 273-281.

[7] VASQUEZ J C. Modeling, analysis, and design of stationary-reference-frame droop-controlled parallel three-phase voltage source inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1271-1280.

[8] 冯恽彬, 汪科, 葛晓慧, 等. 交直流混合微电网系统设计与控制架构分析[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 143-150.

FENG Yibin, WANG Ke, GE Xiaohui, et al. Design and control architecture analysis of AC/DC hybrid microgrid system[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 143-150.

[9] 陈燕东. 阻性逆变器并联环流分析及鲁棒下垂多环控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(18): 18-29.

CHEN Yandong. Parallel circulation analysis of resistive inverter and robust droop multiloop control[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 18-29.

[10] 李昊, 王杰. 基于虚拟同步发电机技术的改进微网下垂控制[J]. 电力科学与技术学报, 2018, 33(2): 11-19.

LI Hao, WANG Jie. Improved microgrid droop control based on virtual synchronous generator technology[J].

- Journal of Electric Power Science and Technology, 2018, 33(2): 11-19.
- [11] CHENG P T, CHEN C A, LEE T L, et al. A cooperative imbalance compensation method for distributed generation interface converters[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2009, 45(2): 805-815.
- [12] ZHU Y, LIU B, WANG F, et al. A virtual resistance based reactive power sharing strategy for networked microgrid[C] // 2015 9th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE-ECCE Asia), June 1-5, 2015, Seoul, South Korea.
- [13] 张平, 石健将, 李荣贵, 等. 低压微网逆变器的“虚拟负阻抗”控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1844-1852.
- ZHANG Ping, SHI Jianjiang, LI Ronggui, et al. “Virtual negative impedance” control strategy for low voltage microgrid inverters[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1844-1852.
- [14] 李婷, 马皓, 刘秦维, 等. 兼顾连线阻抗差异的逆变器无线并联[J]. 电力电子技术, 2013, 47(4): 30-38.
- LI Ting, MA Hao, LIU Qinwei, et al. Inverter wireless parallel connection considering the difference of line impedance[J]. Power Electronics, 2013, 47(4): 30-38.
- [15] 郭通, 李燕青, 仝年, 等. 基于自调节下垂系数的微电网控制策略[J]. 电力科学与技术学报, 2017, 32(2): 77-82.
- GUO Tong, LI Yanqing, TONG Nian, et al. Microgrid control strategy based on self-regulating sag coefficient[J]. Journal of Power Science and Technology, 2017, 32(2): 77-82.
- [16] 岑建军, 庄绪州, 张勤进. 直流微电网抗饱和数字平均电流补偿策略[J]. 供用电, 2018, 35(12): 8-13.
- CEN Jianjun, ZHUANG Xuzhou, ZHANG Qinjin. Anti-saturation digital average current compensation strategy for dc microgrid[J]. Distribution & Utilization, 2018, 35(12): 8-13.
- [17] GUERRERO J M. Output impedance design of parallel-connected UPS inverters with wireless load-sharing control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2005, 52(4): 1126-1135.
- [18] 朱艳萍, 李钦钦, 孙孝峰, 等. 逆变器参数不匹配微电网改进下垂策略[J]. 电机与控制学报, 2016, 20(4): 49-56.
- ZHU Yanping, LI Qinqin, SUN Xiaofeng, et al. Improved drooping strategy for inverter parameter mismatched microgrid[J]. Journal of Electric Machines and Control, 2016, 20(4): 49-56.
- [19] HE Jinwei, LI Yunwei. An enhanced microgrid load demand sharing strategy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(9): 3984-3995.
- [20] SHAFIEE Q, GUERRERO J M, VASQUEZ J C. Distributed secondary control for islanded microgrids-a novel approach[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(2): 1018-1031.
- [21] 郭倩, 林燎源, 武宏彦, 等. 考虑自适应虚拟阻抗的微电网分布式功率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 23-29.
- GUO Qian, LIN Liaoyuan, WU Hongyan, et al. Distributed power control strategy for microgrid with adaptive virtual impedance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(19): 23-29.
- [22] LI Yunwei, VILATHGAMUWA D M, LOH P C. Design, analysis, and real-time testing of a controller for multibus microgrid system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2004, 19(5): 1195-1204.
- [23] 陈丽娟, 王致杰. 基于改进下垂控制的微电网运行控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 16-21.
- CHEN Lijuan, WANG Zhijie. Research on microgrid operation control based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 16-21.
- [24] 麦倩屏, 陈鸣. 用于多微源低压微电网的虚拟阻抗反下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(1): 96-102.
- MAI Qianping, CHEN Ming. Virtual impedance back droop control for multi-microsource low voltage microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(1): 96-102.
- [25] GUERRERO J M, MATAS J, DE VICUNA G D V, et al. wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1461-1470.

收稿日期: 2019-01-08; 修回日期: 2019-05-28

作者简介:

樊梦蝶(1994—), 女, 硕士研究生, 研究方向为微电网控制; E-mail: 517306528@qq.com

曾成碧(1969—), 女, 博士, 教授, 研究方向为清洁能源发电与并网;

苗虹(1971—), 女, 通信作者, 博士, 副教授, 研究方向为分布式发电和微电网。E-mail: 1604681549@qq.com

(编辑 周金梅)