

DOI: 10.7667/PSPC161154

## 基于并联虚拟电阻的多逆变器控制策略

赵巧娥, 张乐乐, 武晓冬, 刘芳

(山西大学电力工程系, 山西 太原 030013)

**摘要:** 功率均分与环流抑制是微电网中逆变器并联控制的关键问题。针对线路阻抗差异造成的系统功率均分精度低下及系统环流等问题, 提出一种基于并联虚拟电阻的多逆变器控制策略。通过对各逆变器的电压跟踪系统进行设计, 利用虚拟支路电流对内环电流参考值进行强制修正, 从而改变各逆变器的等效连接阻抗, 实现系统功率均分精度的提高及环流抑制。最后, 结合逆变器等效输出阻抗的伯德图, 对电压跟踪系统中的相关控制参数进行了选择。在 Matlab/Simulink 中搭建了仿真模型, 验证了新方法的有效性。

**关键词:** 微电网; 线路阻抗; 并联逆变器; 虚拟电阻; 功率均分; 环流抑制

### Control strategy for multi-inverters based on parallel virtual resistance

ZHAO Qiaoe, ZHANG Lele, WU Xiaodong, LIU Fang

(Department of Electric Power Engineering, Shanxi University, Taiyuan 030013, China)

**Abstract:** In micro-grid, power sharing and circulation current suppression are critical problems for the control of parallel inverters. Low precision of power sharing and circulation current are caused by different line impedances. For these issues, a new kind of control strategy for multi-inverters is proposed based on parallel virtual resistance. The voltage tracking system of inverter is designed and the inner loop current reference is modified by the current of virtual branch. Then, the value of inverter's equivalent connection impedance is changed. As a result, the precision of power sharing is improved and circulation current is also suppressed. With bode diagram of inverter's equivalent output impedance, the relevant control parameters of voltage tracking system are well designed. Simulation model is set up in Matlab/Simulink and simulation results show the validity of the proposed control strategy.

**Key words:** micro-grid; line impedance; parallel inverters; virtual resistance; power sharing; circulation current suppression

## 0 引言

分布式电源常通过逆变器接入交流微电网<sup>[1-2]</sup>, 当前, 多台逆变器的协调并联运行已成为国内外学者研究的重点<sup>[3-4]</sup>。为使逆变器并联系统安全高效地运行, 如何实现系统功率准确均分及环流抑制便成为研究的关键问题。下垂控制<sup>[5-6]</sup>作为一种常用的逆变器并联控制方法, 受到业内学者的广泛关注。传统下垂控制<sup>[7]</sup>一般认为当各逆变器的等效连接阻抗(含线路阻抗和逆变器的等效输出阻抗)呈感性时, 有功功率  $P$  与频率  $\omega$ 、无功功率  $Q$  与电压幅值  $U$  具有近似的对应关系, 可实现  $P$ 、 $Q$  间解耦控制。但在实际的低压微电网中, 线路阻抗比可达 7.7<sup>[8]</sup>, 线路

阻性因素的存在使  $P$ 、 $Q$  的解耦控制变得困难, 进而影响功率在各逆变器间的准确均分。针对上述情况, 文献[9-10]利用坐标变换的方法得到虚拟功率, 进而实现虚拟功率的解耦下垂控制。但该方法只能实现功率的形式解耦, 实际的有功和无功功率仍存在实质性耦合, 且为确保系统安全运行, 新坐标系下的系统运行点不能超出原坐标系下的安全运行范围, 因此, 该方法具有一定的局限性。采用串联虚拟阻抗<sup>[11-13]</sup>的方法可实现系统功率解耦, 通过合理设置逆变器电压跟踪系统相关控制参数可方便地改变各逆变器等效连接阻抗的性质, 从而适应系统的下垂特性。但是, 实际中各逆变器支路的线路阻抗一般存在差异, 当采用串联虚拟阻抗方法时, 过小的串联虚拟阻抗不利于减小各逆变器支路间等效连接阻抗的差异, 难以实现系统功率的准确均分和环流抑制, 而过大的串联虚拟阻抗又将使系统的控制

基金项目: 煤矿电气设备与智能控制山西省重点实验室(太原理工大学)开放基金资助项目(MEI-201505)

性能下降, 因此, 该方法中串联虚拟阻抗大小的确定较复杂。

针对线路阻抗差异造成的系统功率均分精度低下及环流等问题, 本文结合逆变器电压跟踪系统的特点, 在电流等值的基础上利用虚拟阻抗比关系等效地引入了并联虚拟电阻, 从而使各逆变器支路间的阻抗差异减小。考虑到负载变化将对虚拟阻抗比造成影响, 本文进一步提出了虚拟电压比例系数自适应的逆变器并联控制策略, 并对相关控制参数进行了选择。最后, 通过软件仿真验证了所提方法的有效性。

## 1 逆变器控制系统

逆变器的控制系统是由功率下垂系统和电压跟踪系统两部分组成, 其中, 功率下垂系统根据下垂特性产生电压跟踪系统外环的电压参考值, 而电压跟踪系统通过调整逆变器的输出电压来实现对输出功率的控制。

### 1.1 功率下垂系统

图1为两台逆变器的并联简化电路, 其中:  $U_i \angle \varphi_i (i=1, 2)$  为逆变器交流侧输出电压;  $I_{oi}$  为第  $i$  台逆变器的输出电流;  $U_z \angle 0$  为公共负载端电压;  $Z_i \angle \theta_i = R_i + jX_i$  为逆变器与负载间的等效连接阻抗;  $Z_{total}$  为公共负载的等效总阻抗。由于在低压线路中电阻占优, 且  $\varphi_i$  非常小, 则  $\theta_i \approx 0^\circ$ ,  $\sin \varphi_i \approx \varphi_i$ , 因此, 各逆变器输出的有功、无功功率可表示为<sup>[14]</sup>

$$P_i = \frac{U_i U_z \cos \varphi_i - U_z^2}{R_i} \quad (1)$$

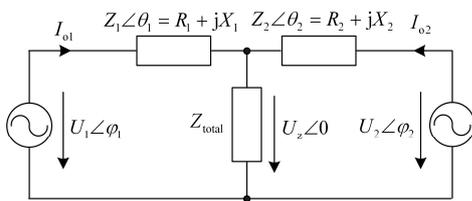


图1 双逆变器并联简化电路

Fig. 1 Simplified circuit of two parallel inverters

$$Q_i = -\frac{U_i U_z \sin \varphi_i}{R_i} \quad (2)$$

针对式(2), 若采用与文献[15]中类似的下垂方法, 可使系统频率在较大范围变化时实现无功功率的准确分配, 但该方法中各逆变器输出电压初相角的获取较为困难, 因此, 本文采用无功—频率下垂方法, 相应的有功、无功功率下垂方程为<sup>[14]</sup>

$$U_{iref} = U_i^* - n_i P_i \quad (3)$$

$$\omega_{iref} = \omega_i^* + m_i Q_i \quad (4)$$

式中:  $\omega_{iref}$ 、 $U_{iref}$  分别为第  $i$  台逆变器电压跟踪系统中外环参考电压的频率和幅值;  $\omega_i^*$ 、 $U_i^*$  分别为逆变器空载时输出电压的频率和幅值;  $n_i$ 、 $m_i$  分别为有功、无功功率的下垂系数。

由式(1)、式(2)可知, 逆变器输出功率与  $U_i$ 、 $R_i$  相关, 当各逆变器的输出电压  $U_i$  相等时,  $P_i$ 、 $Q_i$  便与  $R_i$  相关。在实际中, 各逆变器到公共负载的距离一般不相等, 因此, 其等效连接阻抗  $R_i$  也不同, 这将造成各逆变器的输出功率存在差异, 进而影响系统功率的准确均分。此外, 受各逆变器支路阻抗差异的影响, 并联系统间将存在环流, 环流的存在不仅影响系统效率, 严重时还将威胁系统的运行安全<sup>[16-17]</sup>。本文仅考虑三相对称的情形, 因此, 可采用单相环流来衡量系统的环流特性, 则第  $m$  台逆变器与第  $n$  台逆变器间的环流为<sup>[17]</sup>

$$I_{H(m,n)} = \frac{I_{om} - I_{on}}{2} \quad (5)$$

### 1.2 传统电压跟踪系统

为实现式(3)和式(4)中的下垂控制, 应减小逆变器等效连接阻抗中电感因素的影响, 传统方法一般在各逆变器的电压跟踪系统中引入串联的虚拟电阻  $R_{vir}$ , 图2即为采用该方法时单逆变器支路的等效简化电路, 相关参数说明如表1所示, 其中  $U_o^*$  是由功率下垂环节产生的电压外环参考值,  $U_o$  与  $U_o^*$  存在如下关系:

$$U_o = U_o^* - I_o R_{vir} \quad (6)$$

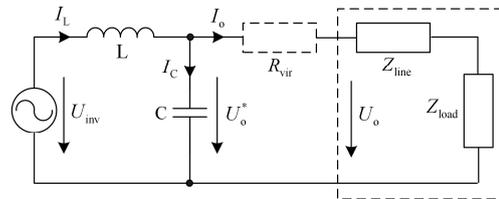


图2 传统方法的等效简化电路

Fig. 2 Simplified equivalent circuit of traditional method

表1 图2中主要参数

Table 1 Main parameters in Fig. 2

符号	说明	符号	说明
L	滤波电感	C	滤波电容
$I_L$	滤波电感电流	$I_C$	滤波电容电流
$U_{inv}$	逆变器端电压	$Z_{load}$	等效负载阻抗
$U_o^*$	虚拟电容电压	$U_o$	实际电容电压
$I_o$	实际负载电流	$Z_{line}$	实际线路阻抗

当采用传统方法时, 过小的串联虚拟电阻  $R_{vir}$  无法减小各支路间等效连接阻抗的差异, 进而影响系统的功率均分精度和环流抑制效果; 若设置过大的串联  $R_{vir}$ , 由式(6)可知, 当负载电流  $I_o$  增大时,

因  $R_{vir}$  的存在, 逆变器输出电压的外特性将变软, 系统的控制性能降低。因此, 该方法在选择  $R_{vir}$  时较复杂。

## 2 改进电压跟踪系统

### 2.1 并联虚拟电阻方法

针对上述问题, 可通过在各逆变器的电压跟踪系统中引入并联虚拟电阻  $R_{vir}$  来解决, 在此之前, 本文先介绍如何在电流等值的约束下引入并联虚拟电阻。当负载突变时, 相较于各逆变器支路中  $U_o$  发生的小范围变化, 负载电流  $I_o$  可以更好地反映各逆变器输出功率的变化情况, 因此, 本文提出的方法是在虚拟电流与实际电流相等, 即电流等值的前提下进行的。图 3 为在电流等值的约束下, 对图 2 虚线框内单逆变器支路的部分电路添加并联虚拟支路的过程, 使实际电路中逆变器的运行状态与对应虚拟电路相同。箭头左侧为实际电路, 箭头右侧为对应虚拟电路, 相关参数说明如表 2 所示。

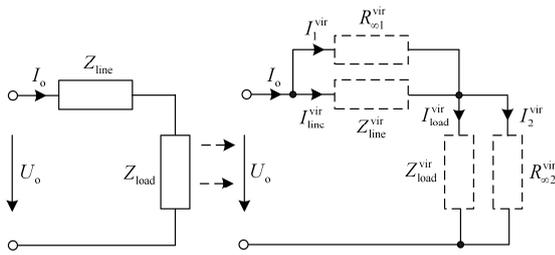


图 3 等效过程

Fig. 3 Equivalence procedure

表 2 图 3 中主要参数

Table 2 Main parameters in Fig. 3

符号	说明	符号	说明
$Z_{line}^{vir}$	虚拟线路阻抗	$I_{line}^{vir}$	流经 $Z_{line}^{vir}$ 的虚拟电流
$R_{\infty 1}^{vir}$ 、 $R_{\infty 2}^{vir}$	无穷大虚拟电阻	$I_1^{vir}$ 、 $I_2^{vir}$	流经 $R_{\infty 1}^{vir}$ 、 $R_{\infty 2}^{vir}$ 的虚拟电流
$Z_{load}^{vir}$	虚拟负载阻抗	$I_{load}^{vir}$	流经 $Z_{load}^{vir}$ 的虚拟电流

为便于理解图 3 中两电路的对应关系, 在虚拟电路中引入无穷大虚拟电阻  $R_{\infty 1}^{vir}$ 、 $R_{\infty 2}^{vir}$ 。在电流等值的约束下, 当实际阻抗  $Z_{line}$ 、 $Z_{load}$  变化时,  $Z_{line}^{vir}$ 、 $Z_{load}^{vir}$  将分别按  $Z_{line}^{vir} = Z_{line}$ 、 $Z_{load}^{vir} = Z_{load}$  的关系进行变化; 同时, 因  $R_{\infty 1}^{vir}$ 、 $R_{\infty 2}^{vir}$  的电阻值为无穷大, 则  $I_1^{vir}$ 、 $I_2^{vir}$  均为零,  $I_o = I_{line}^{vir} = I_{load}^{vir}$ 。图 3 中电路等效的目的是在未引入并联虚拟电阻  $R_{vir}$  环节前, 先建立两电路间相应电压、电流及元件的对应关系, 以便将相关虚拟电压、电流引入实际逆变器的控制之中。图 4 为

基于并联虚拟电阻的逆变器电压跟踪系统控制框图, 其中, 实线为未引入并联虚拟电阻  $R_{vir}$  环节前, 采用相关虚拟电压、电流与实际电压、电流相结合时的系统控制框图, 图中  $G_v(s) = k_{vp} + k_{vi}/s$ ,  $G_i(s) = k_{ip}k_{pwm}$ ,  $U_{oref}$  为  $U_o$  的参考值, 参数说明如表 3 所示。因  $I_o = I_{line}^{vir}$ , 可认为外环偏差信号经  $G_v(s)$  后产生的  $I_{Lref}^*$  为  $I_C + I_{line}^{vir}$  的参考值, 此时  $I_L = I_C + I_o = I_C + I_{line}^{vir}$ ,  $I_{Lref}^* = I_{Lref}$ 。对于不同支路而言, 线路阻抗  $Z_{line}$  可能存在差异, 因此各支路中的  $I_o$  可能不相等, 进而对应  $I_{line}^{vir}$  也不同。

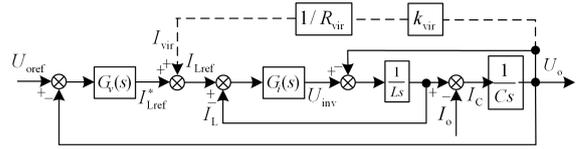


图 4 逆变器控制框图

Fig. 4 Control block of inverter

表 3 图 4 中主要参数

Table 3 Main parameters in Fig. 4

符号	说明	符号	说明
$k_{ip}$	电流比例系数	$k_{vp}$	电压比例系数
$k_{vi}$	电压积分系数	$k_{pwm}$	逆变器等效增益
$k_{vir}$	虚拟电压比例系数	$I_{vir}$	流经 $R_{vir}$ 的虚拟电流
$I_{Lref}^*$	$I_C + I_{line}^{vir}$ 的参考值	$I_{Lref}$	$I_C + I_o$ 的参考值

在图 4 中引入虚线所示的并联虚拟电阻  $R_{vir}$  环节, 其中  $k_{vir}$  为虚拟线路阻抗  $Z_{line}^{vir}$  两端的虚拟电压与实际电容电压  $U_o$  的比值。此时, 相当于在虚拟电路中  $Z_{line}^{vir}$  的两端并联了一个阻抗值为  $R_{vir}$  的虚拟电阻, 或将  $R_{\infty 1}^{vir}$  换成了  $R_{vir}$ 。经过上述变化, 流经  $R_{vir}$  的虚拟电流  $I_{vir}$  将对实际电感电流  $I_L$  的参考值  $I_{Lref}$  进行强制修正, 使  $I_{Lref} = I_{Lref}^* + I_{vir}$ , 此时,  $I_o = I_{line}^{vir} + I_{vir}$ ,  $I_L = I_C + I_o = I_C + I_{line}^{vir} + I_{vir}$ , 相当于间接地改变了逆变器的等效连接阻抗。若在线路阻抗不同的各逆变器支路中均引入相等的  $R_{vir}$ , 经分析易知: 当  $R_{vir}$  足够小时, 根据虚拟并联电路的特点, 可认为各逆变器支路的虚拟并联线路总阻抗接近相等, 其值约为  $R_{vir}$ , 且仍呈阻性, 满足阻性下垂特性; 同时, 各支路中的实际负载电流  $I_o$  将因上述强制修正作用接近相等, 进而使各支路间等效连接阻抗的差异减小。

因为低压线路中电阻占优, 设线路电阻为  $R_{line}$ , 则  $|Z_{line}| \approx R_{line}$ , 对应到虚拟电路中有  $R_{line}^{vir} \approx R_{line}$ , 当加入并联虚拟电阻  $R_{vir}$  后, 总的等效虚拟线路阻抗  $Z_p$  随所加  $R_{vir}$  的变化情况如图 5 所示, 其中  $R_{line}$  分

别为  $0.1 \Omega$ 、 $0.15 \Omega$ 、 $0.3 \Omega$  和  $0.5 \Omega$ ,  $Z_p = R_{\text{line}}^{\text{vir}} // R_{\text{vir}}$ 。可以看到, 当并联虚拟电阻  $R_{\text{vir}}$  取各线路中最小线路电阻的 0.1 倍, 即  $0.01 \Omega$  时, 各支路的  $Z_p$  接近相等, 且均为  $0.01 \Omega$  左右, 因此, 本文中并联虚拟电阻  $R_{\text{vir}}$  的值按各支路中最小线路电阻的 0.1 倍选择。

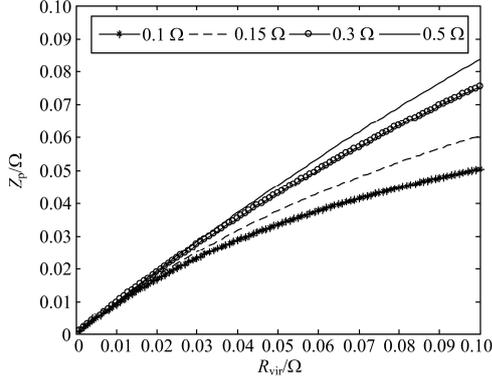


图 5  $R_{\text{vir}}$  与  $Z_p$  间的关系

Fig. 5 Relations between  $R_{\text{vir}}$  and  $Z_p$

## 2.2 $k_{\text{vir}}$ 自适应的电压跟踪系统

为简化控制, 图 4 中的  $k_{\text{vir}}$  可取恒值, 其值可按式(7)进行粗略计算。

$$k_{\text{vir}} = \frac{I_o Z_p}{U_o} = \frac{I_{\text{vir}} R_{\text{vir}}}{U_o} = \frac{Z_p}{Z_p + Z_{\text{load}}^{\text{vir}}} \quad (7)$$

以图 1 中两台容量相等的并联逆变器为例, 若已知公共负载的等效总阻抗为  $Z_{\text{total}}$ , 则理想情况下各逆变器承担的等效负载阻抗均为  $Z_{\text{load}} = 2Z_{\text{total}}$ , 对应到各虚拟支路中有  $Z_{\text{load}}^{\text{vir}} = 2Z_{\text{total}}$ , 由此便可根据式(7)分别计算各支路中的  $k_{\text{vir}}$ 。

但在实际中, 负载可能会随时间发生变化, 则式(7)中的  $k_{\text{vir}}$  将随之改变, 若继续采用上述方法, 则恒定的  $k_{\text{vir}}$  无法匹配此时虚拟电路中的阻抗比关系, 最终造成系统功率均分精度的下降。针对这种情况, 本文进一步提出一种  $k_{\text{vir}}$  自适应的改进方法。

$$k_{\text{vir}} = \frac{I_o Z_p}{U_{\text{oref}}} \quad (8)$$

式(8)即为自适应  $k_{\text{vir}}$  的计算公式, 其中,  $U_{\text{oref}}$  为图 4 中外环的电压参考值, 其值随式(3)和式(4)中的  $P_i$  和  $Q_i$  进行实时调整。当负载发生突变后,  $k_{\text{vir}}$  将随之改变, 且当系统进入稳态后,  $U_{\text{oref}} = U_o$ , 此时,  $k_{\text{vir}} U_o = I_o Z_p = I_{\text{vir}} R_{\text{vir}}$ 。因此, 采用式(8)来确定  $k_{\text{vir}}$  的值可实现系统的实时准确控制。注意, 式(8)中存在复数运算, 但因  $\varphi_i$  较小, 且  $R_{\text{vir}}$  对相角的改变也非常有限, 为简化控制, 本文将  $k_{\text{vir}}$  取标量幅值运算, 仿真结果证明了采用该简化方法的理论可行性。

## 2.3 控制参数选择

由图 4 可得到系统输出电压为

$$U_o(s) = \frac{k_{\text{ip}} k_{\text{PWM}} R_{\text{vir}} (k_{\text{vp}} s + k_{\text{vi}}) U_{\text{oref}}(s)}{\Delta} - \frac{(Ls^2 + k_{\text{ip}} k_{\text{PWM}} s) R_{\text{vir}} I_o(s)}{\Delta} \quad (9)$$

式中

$$\Delta = LCR_{\text{vir}} s^3 + k_{\text{ip}} k_{\text{PWM}} CR_{\text{vir}} s^2 + (k_{\text{ip}} k_{\text{PWM}} k_{\text{vp}} R_{\text{vir}} + R_{\text{vir}} - k_{\text{ip}} k_{\text{PWM}} k_{\text{vi}}) s + k_{\text{ip}} k_{\text{PWM}} k_{\text{vi}} R_{\text{vir}} \quad (10)$$

式(9)可写成

$$U_o(s) = G(s)U_{\text{oref}}(s) - Z(s)I_o(s) \quad (11)$$

式中

$$G(s) = \frac{k_{\text{ip}} k_{\text{PWM}} R_{\text{vir}} (k_{\text{vp}} s + k_{\text{vi}})}{\Delta} \quad (12)$$

$$Z(s) = \frac{LR_{\text{vir}} s^2 + k_{\text{ip}} k_{\text{PWM}} R_{\text{vir}} s}{\Delta} \quad (13)$$

$Z(s)$ 即为逆变器的等效输出阻抗。由式(13)可以看到, 在选定足够小的  $R_{\text{vir}}$  后,  $Z(s)$ 与系统的其他控制参数也相关, 为满足式(3)和式(4)的使用条件,  $Z(s)$ 在工频时应呈阻性, 图 6(a)~图 6(d)分别为  $k_{\text{ip}}$ 、 $k_{\text{vp}}$ 、 $k_{\text{vi}}$  及  $k_{\text{vir}}$  变化时  $Z(s)$  的变化情况。

由图 6(a)可以看出: 当  $k_{\text{ip}} < 0.31$  时, 随着  $k_{\text{ip}}$  的增大,  $Z(s)$ 在工频段趋于阻性, 且  $k_{\text{ip}}$  越大时系统的跟踪速度越快; 当  $k_{\text{ip}} > 0.31$  时, 随着  $k_{\text{ip}}$  的增大,  $Z(s)$ 在工频段将趋于容性。且考虑到过大的  $k_{\text{ip}}$  不利于系统稳定, 因此,  $k_{\text{ip}}$  选为 0.31。

图 6(b)中: 当  $k_{\text{vp}}$  增大时,  $Z(s)$ 在工频附近的阻性频带将变宽, 但过大的  $k_{\text{vp}}$  将使  $Z(s)$ 的高频段趋于感性, 不利于高频谐波的抑制<sup>[18]</sup>, 因此,  $k_{\text{vp}}$  的值不应过大; 此外, 过小的  $k_{\text{vp}}$  将使  $Z(s)$ 的幅值增大, 进而增加系统的电压损耗。因此, 选  $k_{\text{vp}}$  为 1.06。

图 6(c)中,  $k_{\text{vi}}$  越小时,  $Z(s)$ 在工频附近的阻性频带越宽, 但过小的  $k_{\text{vi}}$  将使系统的电压跟踪精度变差, 因此, 选  $k_{\text{vi}}$  为 0.5。

当采用本文所提的改进方法时,  $k_{\text{vir}}$  将随负载的变化而变化, 由图 6(d)可以看到, 当  $k_{\text{vir}}$  在较大范围内变化时,  $Z(s)$ 阻性频带和幅值的变化均较小, 因此,  $k_{\text{vir}}$  自适应方法仍然适用。

当所有控制参数均选定后, 由图 7 可以看到, 在工频附近  $G(s)$ 的幅值和相角误差均近似为零, 满足设计要求<sup>[18]</sup>。

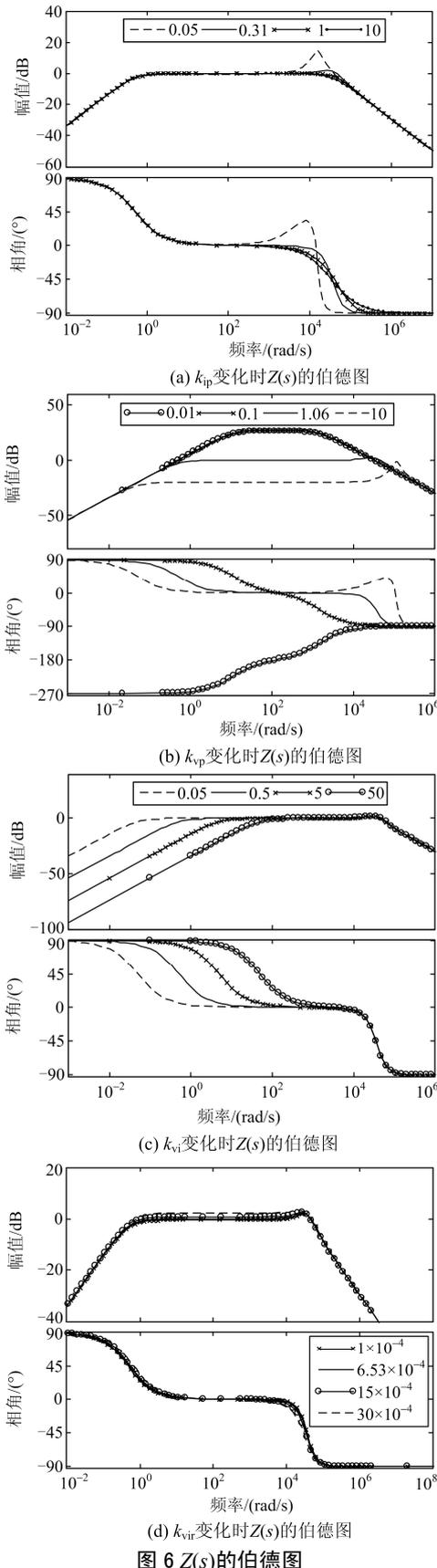


图 6  $Z(s)$ 的伯德图

Fig. 6 Bode diagrams of  $Z(s)$

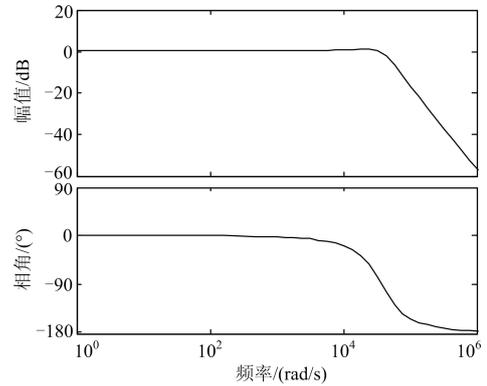


图 7  $G(s)$ 的伯德图

Fig. 7 Bode diagram of  $G(s)$

通过上述对逆变器电压跟踪系统及其控制参数的设计, 不仅可使逆变器输出的有功、无功功率实现解耦下垂控制, 也可实现系统功率的准确均分和系统环流的有效抑制。

### 3 仿真及分析

#### 3.1 两台逆变器并联

本文首先以微电网中两台容量相等的三相逆变器向同一负载供电为例, 比较传统方法与本文所提改进方法的控制性能优劣。在 Matlab/Simulink 中搭建了相关仿真模型, 简化电路结构如图 1 所示。考虑到微电网中一般配有储能装置<sup>[18]</sup>, 因此, 仿真中设置各逆变器的直流母线电压为恒定值 800 V, 有功、无功功率下垂系数分别为  $5 \times 10^{-4}$  和  $2 \times 10^{-5}$ , 滤波电感、滤波电容分别为 3 mH 和 30  $\mu$ F, 其他仿真参数如表 4 所示。各相公共负载  $Z_{total}$  均采用相同的串联阻感负载, 在 0 s 到 1 s 期间  $Z_{total}=6.661+j1.998 \Omega$ , 1 s 时负载突增, 并入  $16.754+j11.178 \Omega$ 。分别采用基于串联虚拟电阻的传统方法和本文所提出的改进方法进行仿真对比, 结果如图 8—图 10 所示, 因三相对称, 所以本文以 A 相为例进行分析。

表 4 仿真模型参数

Table 4 Simulation model parameters

交流 线路 压/V	额定 频率/ Hz	载波 频率/ Hz	并联虚 拟电 阻/ $\Omega$	线路阻抗/ $\Omega$	
				线路 1	线路 2
380	50	9000	0.01	$0.1+j0.013$	$0.15+j0.0195$

图 8 中的曲线 1、2、3 为在负载突变前后, 分别采用本文所提改进方法、加入较小串联虚拟电阻方法和加入较大串联虚拟电阻方法时, 逆变器 1 的 A 相电压有效值的变化情况。可以看到, 曲线 1、2、3 在负载突增后均发生了不同程度的下降。对于曲

线 1 而言, 由于改进方法中没有额外增加使逆变器输出电压下降的环节, 其在 1 s 时发生的电压下降主要是由式(3)中的 P-U 下垂特性造成的; 对于曲线 2、3 而言, 除了由下垂特性造成的电压下降之外, 还有由式(6)带来的电压下降, 曲线 3 在 1 s 时的电压下降幅度远大于曲线 1 的电压下降幅度。当所加串联虚拟电阻越大时, 电压下降也越大, 且所带负载越大时, 电压下降也越严重, 因此, 由于串联虚拟电阻的存在, 逆变器输出电压的外特性变软。

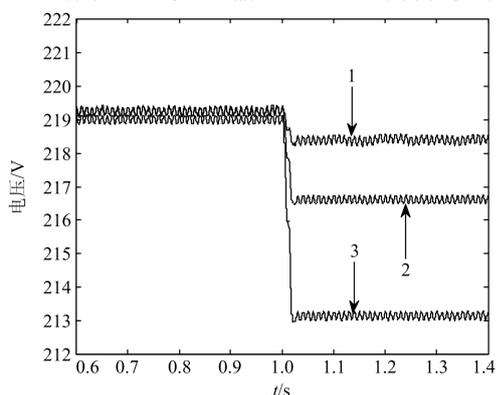
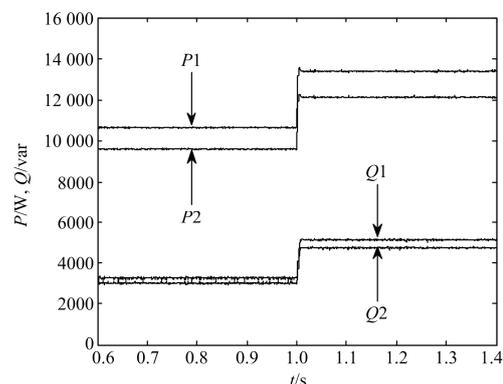


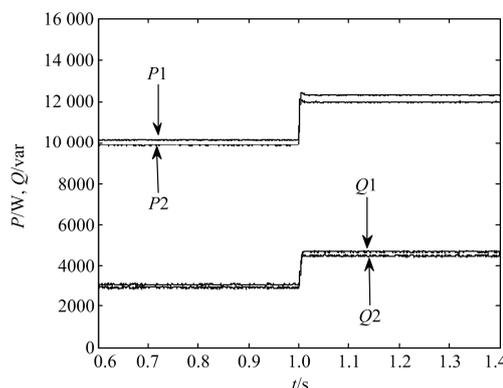
图 8 A 相电压有效值

Fig. 8 The rms voltage of phase A

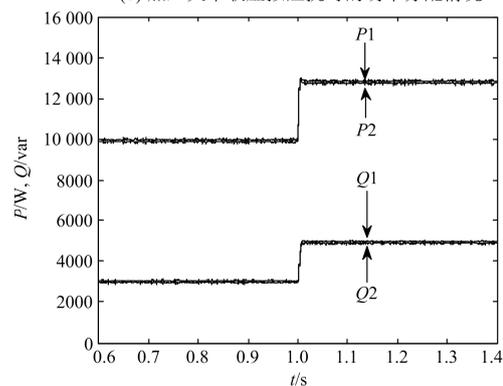
图 9(a)—图 9(c)分别为采用小串联虚拟阻抗、大串联虚拟阻抗和本文所提的改进方法时, 系统功率的分配情况, 其中,  $P_j$ 、 $Q_j$  ( $j=1, 2$ ) 表示逆变器  $j$  输出的有功和无功功率; 图 10(a)—图 10(i)为上述三种情况下各逆变器输出的 A 相电流及相应的系统环流。可以看到: 当加入较小的串联虚拟电阻时, 各逆变器支路的等效连接阻抗差异仍较明显, 因此系统功率的均分精度较低, 系统环流也较大。当加入较大的串联虚拟电阻时, 各支路的等效连接阻抗差异减小, 系统功率的均分精度得到改善, 系统环流得到抑制, 但此时逆变器输出电压的外特性较软。当采用本文所提的改进方法时, 由于虚拟电压比例系数  $k_{vir}$  可实时满足各支路的虚拟阻抗比关系, 因此,  $Z_p$  在负载突增前后均未发生明显变化, 且由于引入的并联虚拟电阻足够小, 使各逆变器支路的等效连接阻抗接近相等, 且仍呈阻性, 在满足功率解耦下垂控制的同时, 也实现了系统功率的准确均分; 同时, 由于各支路中电感电流的参考值被虚拟支路电流  $I_{vir}$  强制修正, 因此各逆变器输出的 A 相电流相差不大, 系统环流得到了有效抑制。表 5 即为上述三种情况下的仿真对比结果, 可以看到, 相较于传统方法, 本文所提出的改进方法在实现系统功率准确均分及环流抑制的同时, 也兼顾了逆变器输出电压的外特性。



(a) 加入小串联虚拟阻抗时的功率分配情况



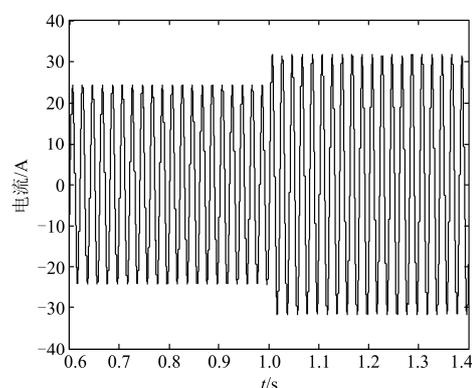
(b) 加入大串联虚拟阻抗时的功率分配情况



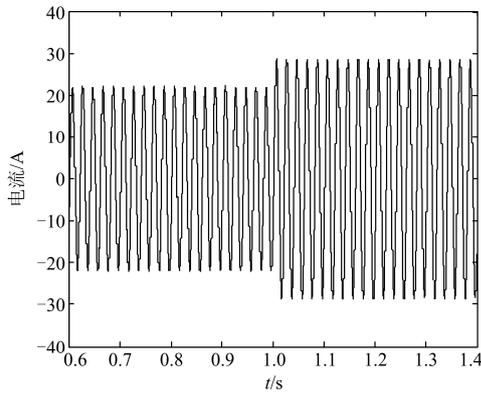
(c) 采用改进方法时的功率分配情况

图 9 采用不同方法时系统功率的分配情况

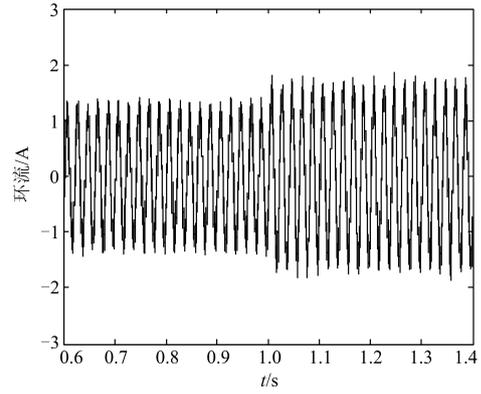
Fig. 9 Power sharing results with different methods



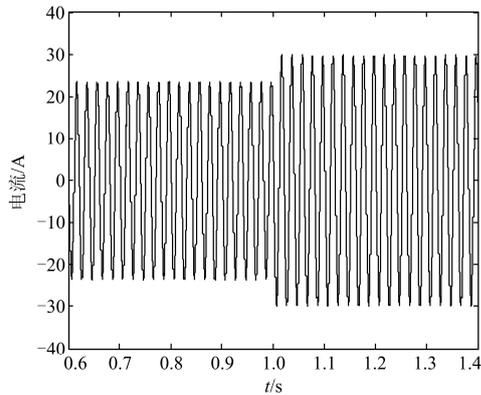
(a) 加入小串联虚拟阻抗时逆变器 1 的 A 相电流



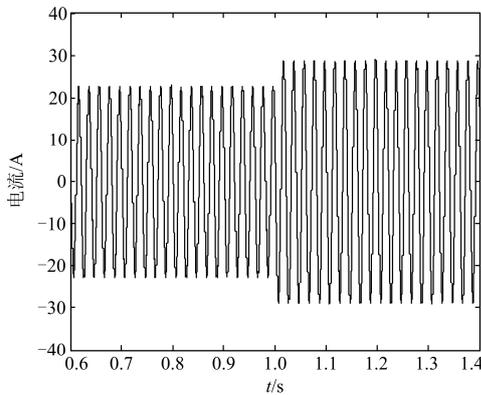
(b) 加入小串联虚拟阻抗时逆变器2的A相电流



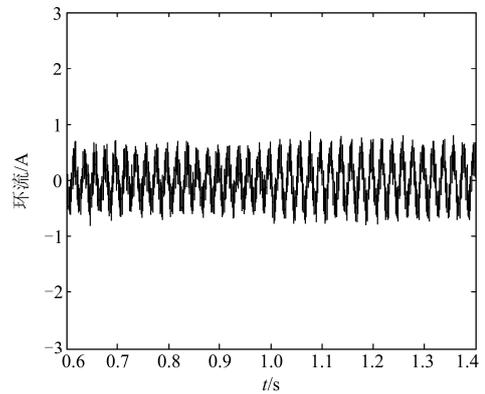
(c) 加入小串联虚拟阻抗时的A相环流



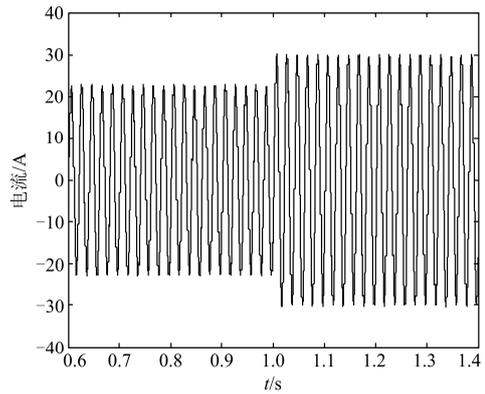
(d) 加入大串联虚拟阻抗时逆变器1的A相电流



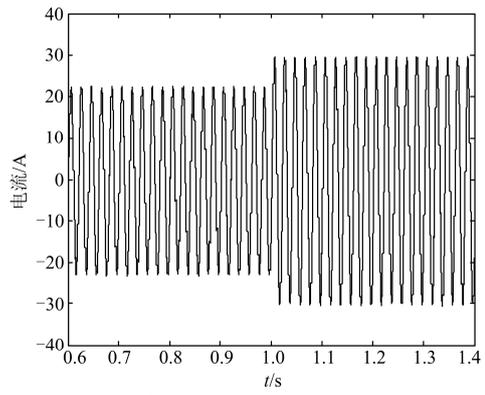
(e) 加入大串联虚拟阻抗时逆变器2的A相电流



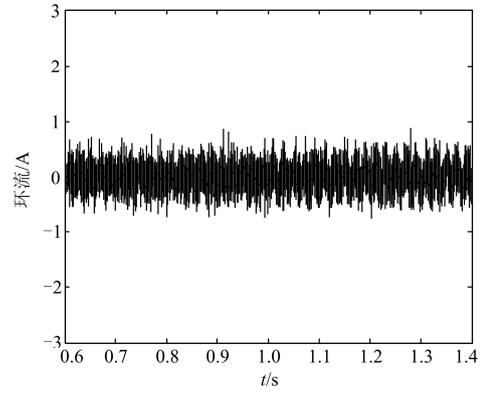
(f) 加入大串联虚拟阻抗时的A相环流



(g) 采用改进方法时逆变器1的A相电流



(h) 采用改进方法时逆变器2的A相电流



(i) 采用改进方法时的A相环流

图 10 两台逆变器并联

Fig. 10 Two parallel inverters

表 5 比较结果

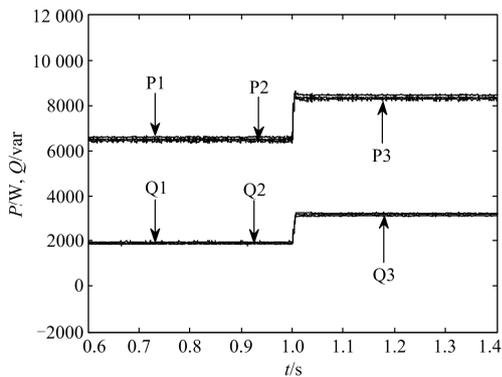
Fig. 5 Comparison results

所用方法	电压外特性	系统功率 均分精度	系统环流 抑制效果
传统方法	小 $R_{vir}$	较好	较差
	大 $R_{vir}$	较差	较好
改进方法	较好	较好	较好

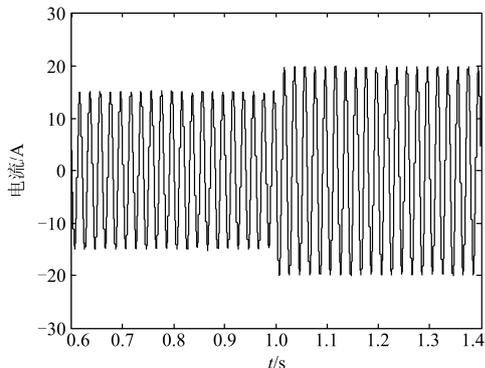
### 3.2 多台逆变器并联

前述分析均是针对由两台逆变器所组成的并联系统而言的, 为研究当多台逆变器并联运行时改进方法的控制性能, 本文在仿真模型中增加了第3台容量相等的并联逆变器, 并令支路3的线路阻抗为  $0.18+j0.0233 \Omega$ , 其他条件不变。采用改进方法时的仿真结果如图11所示。

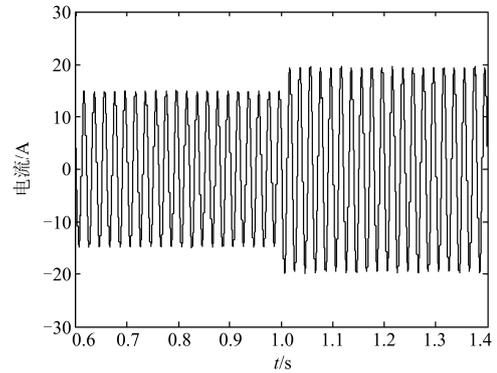
图11(a)为系统有功、无功功率在三台并联逆变器间的分配情况, 图11(b)—图11(e)分别为各逆变器输出的A相电流及其相互之间的环流。可以看到, 当采用改进方法时, 虽然各支路的线路阻抗均不相同, 但因加入了足够小的并联虚拟电阻, 使各支路间的等效连接阻抗差异减小, 在负载突变前后, 系统的有功、无功功率均实现了准确均分, 且各逆变器间的环流也较小。



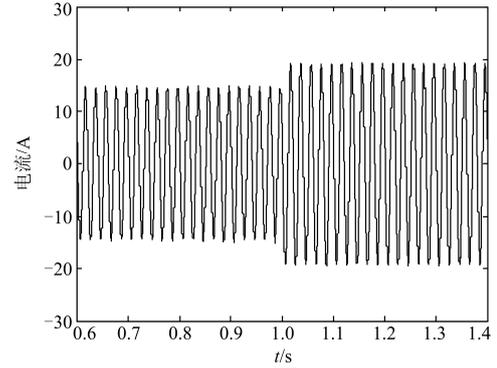
(a) 各逆变器输出的有功、无功功率



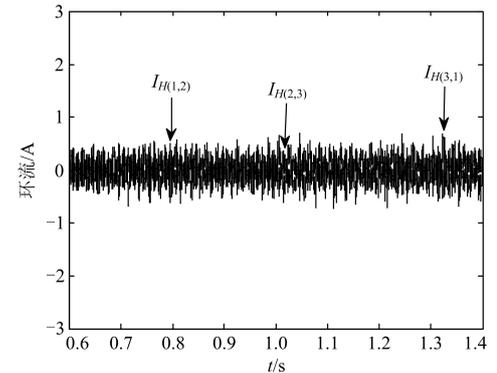
(b) 逆变器1的A相电流



(c) 逆变器2的A相电流



(d) 逆变器3的A相电流



(e) 各逆变器间的环流

图11 三台逆变器并联

Fig. 11 Three parallel inverters

## 4 结论

改进的多逆变器并联控制策略具有如下特点:

1) 本文在电流等值的基础上, 通过对逆变器电流内环的参考值进行强制修正, 将实际电路与虚拟电路联系起来, 等效地引入了并联虚拟电阻支路, 且通过合理选择并联虚拟电阻的值, 使各逆变器支路间的等效连接阻抗差异减小;

2) 通过对各逆变器的电压跟踪系统及其控制参数进行合理设计, 在实现系统有功、无功功率解耦下垂控制的同时, 有效降低了系统功率均分精度

对各逆变器支路间等效连接阻抗差异的敏感度，且使系统环流得到了有效抑制。

### 参考文献

- [1] 陈汝昌, 陈飞, 张帆, 等. 新能源电网中微电源并网控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(12): 55-60.  
CHEN Ruchang, CHEN Fei, ZHANG Fan, et al. Control strategies for grid-connected microsource in new energy power systems[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(12): 55-60.
- [2] 宗伟, 曾林锁, 程祥. 微电网中逆变器外环控制方法综述[J]. 陕西电力, 2015, 43(9): 15-19.  
ZONG Wei, ZENG Linsuo, CHENG Xiang. Overview on micro-grid inverter outer-loop control method[J]. Shaanxi Electric Power, 2015, 43(9): 15-19.
- [3] 刘海涛, 吕志鹏, 苏剑, 等. 具有功率精确分配能力的逆变器电压谐波分频下垂控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 9-14.  
LIU Haitao, LÜ Zhipeng, SU Jian, et al. Inverter's frequency dividing droop controller with accurate load sharing ability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 9-14.
- [4] GUERRERO J M, MATAS J, DE VICUNA L G, et al. Wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1461-1470.
- [5] 闫俊丽, 彭春华, 陈臣. 基于动态虚拟阻抗的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 1-6.  
YAN Junli, PENG Chunhua, CHEN Chen. Droop control strategy based on dynamic virtual impedance in low-voltage microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 1-6.
- [6] MAJUMDER R, CHAUDHURI B, GHOSH A, et al. Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 796-808.
- [7] 薛阳, 时宇飞, 阚东跃, 等. 基于自抗扰的微电网下垂控制[J]. 电网与清洁能源, 2016, 32(11): 25-30.  
XUE Yang, SHI Yufei, KAN Dongyue, et al. Control strategy for microgrid droop control based on ADRC[J]. Power System and Clean Energy, 2016, 32(11): 25-30.
- [8] 吴云亚, 阚加荣, 谢少军. 适用于低压微电网的逆变器控制策略设计[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(6): 39-44.  
WU Yunya, KAN Jiarong, XIE Shaojun. Control strategy design for inverters in low voltage microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(6): 39-44.
- [9] DE BRABANDERE K, BOLSENS B, VAN DEN KEYBUS J, et al. A voltage and frequency droop control method for parallel inverters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2007, 22(4): 1107-1115.
- [10] LI Yan, LI Yunwei. Virtual frequency-voltage frame control of inverter based low voltage microgrid[C] // 2009 IEEE Electrical Power & Energy Conference (EPEC), Montreal, Canada, October 22-23, 2009: 1-6.
- [11] 张庆海, 彭楚武, 陈燕东, 等. 一种微电网多逆变器并联运行控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 126-132.  
ZHANG Qinghai, PENG Chuwu, CHEN Yandong, et al. A control strategy for parallel operation of multi-inverters in microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 126-132.
- [12] GUERRERO J M, MATAS J, DE VICUNA L G, et al. Decentralized control for parallel operation of distributed generation inverters using resistive output impedance[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2007, 54(2): 994-1004.
- [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. A control strategy of 'virtual negative' impedance for inverters in low-voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1844-1852.
- [14] 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.
- [15] MOUSSA H, SHAHIN A, SHARIF F, et al. Optimal angle droop power sharing control for autonomous

- microgrid[C] // 2015 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Montreal, Canada, September 20-24, 2015: 506-511.
- [16] 陈燕东, 罗安, 龙际根, 等. 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, LUO An, LONG Jigen, et al. Circulating current analysis and robust droop multiple loop control method for parallel inverters using resistive output impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(18): 18-29.
- [17] 张建文, 王鹏, 王晗, 等. 多逆变器并联的均流控制策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(18): 61-68.
- ZHANG Jianwen, WANG Peng, WANG Han, et al. Average-current control strategy of multiple parallel inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(18): 61-68.
- [18] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网中分布式电源逆变器的多环反馈控制策略[J]. 电工技术学报, 2009, 24(2): 100-107.
- WANG Chengshan, XIAO Zhaoxia, WANG Shouxiang. Multiple feedback loop control scheme for inverters of the micro source in microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(2): 100-107.
- 
- 收稿日期: 2016-07-27; 修回日期: 2016-11-02
- 作者简介:
- 赵巧娥(1963-), 女, 硕士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为新能源发电及其控制技术、柔性输电技术; E-mail: 13546395832@163.com
- 张乐乐(1989-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 主要研究方向为新能源发电及其控制技术; E-mail: xingqitianna@163.com
- 武晓冬(1978-), 男, 博士研究生, 讲师, 主要研究方向为新能源电能质量分析与控制。
- (编辑 葛艳娜)