

# 基于虚拟阻抗的改进型微电网下垂控制策略

刘树伟<sup>1</sup> 姚秀萍<sup>2</sup> 王海云<sup>1</sup> 张海宁<sup>3</sup> 张宇宁<sup>4</sup>

(1. 新疆大学电气工程学院教育部可再生能源发电与并网控制工程技术研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830049; 2. 国网新疆电力有限公司 新疆 乌鲁木齐 830000; 3. 国网承德供电公司, 河北 承德 067000; 4. 渤海大学, 辽宁 锦州 121001)

**摘要:**通过对传统下垂控制算法的有功、无功分析,引入虚拟电感的电压电流双环控制策略,虚拟电感使逆变器等效输出阻抗成感性,从而通过调节感抗匹配程度提供功率均衡效果;提出一种多逆变器并联运行的改进型下垂控制算法,通过改进型下垂控制参数设置,减弱了阻抗对环流的影响。实验仿真结果表明,改进型多逆变器并联的微电网下垂控制算法提高了多逆变器的并联运行性能,有效地减小了多逆变器并联运行的环流问题,大大提高了多逆变器并联运行的无功均衡效果。

**关键词:**微电网;感性虚拟阻抗;改进下垂控制法

中图分类号:TM71 文献标志码:A 文章编号:1003-6954(2018)03-0006-06

DOI:10.16527/j.cnki.cn51-1315/tm.2018.03.003

## Improved Droop Control Strategy of Micro-grid Based on Virtual Impedance

Liu Shuwei<sup>1</sup>, Yao Xiuping<sup>2</sup>, Wang Haiyun<sup>1</sup>, Zhang Haining<sup>3</sup>, Zhang Yuning<sup>4</sup>

(1. Renewable Energy Generation and Grid Control Engineering Technology Research Center of Ministry of Education, School of Electric Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830049, Xinjiang, China; 2. State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830000, Xinjiang, China; 3. State Grid Chengde Electric Power Supply Company, Chengde 067000, Hebei, China; 4. Bohai University, Jinzhou 121001, Liaoning, China)

**Abstract:** For multi-inverter parallel operation in micro-grid, the output impedance of inverters and the line impedance between the inverters and point of common coupling are always different, which can result in big circulating current and lower precision of power sharing among inverters. Through the analysis of active and reactive power of traditional droop control algorithm, the voltage and current double-loop control strategy is introduced. An improved droop control algorithm is proposed for multi-inverter parallel operation, and the influence of impedance on the circulation is weakened by the droop control parameters setting. The simulation results show that the improved droop control algorithm can improve the performance of multi-inverter parallel operation, effectively reduce the circulating current problem of multi-inverter parallel operation, and also greatly improve the reactive power balance effect of multi-inverter parallel operation.

**Key words:** micro-grid; inductive virtual impedance; improved droop control strategy

## 0 引言

微电网作为分布式发电单元接入电网的一种有效手段,逐渐引起了广泛关注<sup>[1]</sup>。在高渗透率下多

基金项目:自治区重点实验室项目(2016D03021);国家863计划项目(2013AA050604);教育部创新团队项目(IR1285)

微电网配电网管理系统中,微电网主要包括:分布式发电(distributed generation, DG)类型的微型发电设备(例如微型燃气轮机、燃料电池、风机、光伏阵列)、储能设备(例如飞轮、储能电容和电池)和可控(柔性)负荷设备(例如电动汽车)。这些具有可控能力的设备允许连接到上级高压配电网并网运行,当大电网出现故障或其他外部扰动或自然灾害时可以脱离主网

实现孤岛独立运行,从而提高供电质量<sup>[2-4]</sup>。

目前常用的微电网逆变器的控制策略主要有3种:恒功率控制(P/Q)策略、电压/频率控制(V/f)策略、下垂控制(Droop)策略。由于下垂控制无需电源间的通信即可实现对微电网的协调控制<sup>[5-7]</sup>,从而得到广泛运用。在微电网多逆变器并系统,逆变器到公共并网点的长短不一致,传统的下垂控制策略都不同程度地降低了母线电压,系统的传输阻抗不平衡以及功率下垂控制特性也影响功率分配的精度。为了解决并系统逆变器无功分配及环流的问题,文献[8]提出了一种孤岛型微电网中基于虚拟阻抗的电压、频率和无功功率微调的逆变器并联控制策略。文献[9-12]提出了虚拟阻抗的改进下垂控制策略。现有虚拟阻抗法总是加大了母线压降以及系统等效输出阻抗<sup>[13]</sup>,以上虚拟阻抗控制策略虽不同程度地改善系统无功的均分问题,但未同时有效抑制系统环流问题。

为有效抑制环流及改善系统无功的均分问题,下面对传统下垂控制的功率分配进行了分析,引入感性虚拟阻抗的多逆变器的控制策略,由滤波电阻值决定其输出阻抗,进而决定其功率输出。通过考虑线路阻抗对传统下垂控制算法的影响,得到电阻与下垂系数的关系,提出一种改进型下垂控制算法。并通过实验仿真验证了所提方法的有效性。

### 1 传统下垂控制方法分析

以3台逆变器并联为例,图1为使用3个电压源逆变器的3个分布式电源微电网结构图,其中L、C分别是对逆变器的输出起滤波作用的滤波电感和滤波电容;R<sub>1</sub>、R<sub>2</sub>、R<sub>3</sub>分别为3个分布式直流电源的等效逆变器输出电阻和线路电阻之和;X<sub>1</sub>、X<sub>2</sub>、X<sub>3</sub>分别为3个分布式电源的等效逆变器输出电抗和线路电抗之和;K<sub>1</sub>、K<sub>2</sub>、K<sub>3</sub>为逆变器的输出继电器。

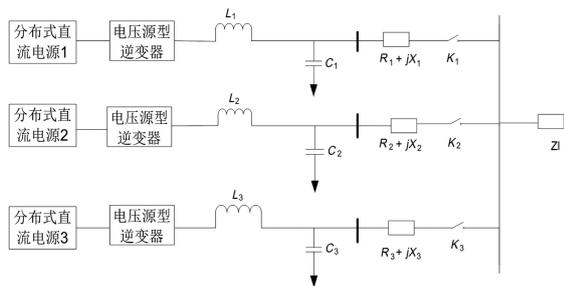


图1 含有3个分布式电源的微电网结构

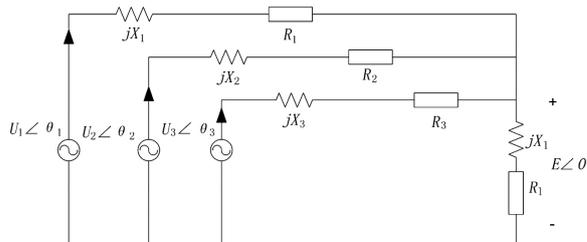


图2 与图1相应的原理

U<sub>1</sub> ∠ θ<sub>1</sub>、U<sub>2</sub> ∠ θ<sub>2</sub>和U<sub>3</sub> ∠ θ<sub>3</sub>分别为3个分布式电源逆变器的空载输出电压;θ<sub>1</sub>、θ<sub>2</sub>、θ<sub>3</sub>为各空载输出电压与母线电压的相角差。由图2可得逆变器*i*(*i* = 1, 2, 3)输出的有功功率和无功功率分别为

$$P_i = \frac{1}{|Z_i|} [(EU_i \cos \theta_i - E^2) \cos \phi_i + EU_i \sin \theta_i \sin \phi_i] \quad (1)$$

$$Q_i = \frac{1}{|Z_i|} [(EU_i \cos \theta_i - E^2) \sin \phi_i - EU_i \sin \theta_i \cos \phi_i] \quad (2)$$

式中:|Z<sub>*i*</sub>|为第*i*个逆变器的阻抗幅值,|Z<sub>*i*</sub>| = √(R<sub>*i*</sub><sup>2</sup> + X<sub>*i*</sub><sup>2</sup>);U<sub>*i*</sub>为第*i*个逆变器的空载输出电压幅值;θ<sub>*i*</sub>为第*i*个逆变器的空载输出电压与母线的相角差;φ<sub>*i*</sub>为阻抗角。

$$\phi_i = \arctan \frac{R_i}{X_i} \quad (3)$$

在高压系统中,传统下垂控制策略应用于系统等效输出阻抗为感性的系统,即满足X<sub>*i*</sub> ≫ R<sub>*i*</sub>,此时可忽略逆变器的输出电阻和线路电阻之和R<sub>*i*</sub>,简化得到

$$P_i = \frac{EU_i \sin \theta_i}{X_i} \quad (4)$$

$$Q_i = \frac{U_i(U_i - E \cos \theta_i)}{X_i} \quad (5)$$

实际中相角θ<sub>*i*</sub>很小,可近似得到sinθ<sub>*i*</sub> = θ<sub>*i*</sub>,cosθ<sub>*i*</sub> ≈ 1,式(4)和式(5)可分别简化为

$$P_i = \frac{EU_i}{X_i} \theta_i \quad (6)$$

$$Q_i \cong \frac{U_i(U_i - E)}{X_i} \quad (7)$$

由此可知,逆变器输出的有功功率主要受逆变器的空载输出电压与母线的相角差影响,逆变器输出的无功功率主要受逆变器的空载输出电压幅值影响。由于实际工程中逆变器的空载输出电压与母线的相角差很难检测到,因此一般由频率代替相角实现控制,可得P/f下垂控制方程表达式<sup>[14]</sup>:

$$\begin{cases} f_i = f_{oi} - m_i(P_i - P_{oi}) \\ U_i = U_{oi} - n_i(Q_i - Q_{oi}) \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $f_i$ 、 $U_i$  分别为逆变器输出频率、电压;  $f_{oi}$ 、 $U_{oi}$  分别为逆变器的额定频率、额定电压;  $m_i$ 、 $n_i$  分别为逆变器的有功/频率( $P/f$ )、无功/电压( $Q/U$ )下垂控制系数;  $P_i$ 、 $Q_i$  分别为逆变器的有功功率和无功功率;  $P_{oi}$ 、 $Q_{oi}$  分别为逆变器的额定有功功率、额定无功功率。

而在实际的低压微电网中,线路阻抗主要呈阻性<sup>[15]</sup>,即满足  $R_i \gg X_i$ ,此时可忽略逆变器的输出感抗和线路感抗之和  $X_i$ ,简化可得:

$$P_i = \frac{U_i(U_i - E \cos \theta_i)}{R_i} \quad (9)$$

$$Q_i = -\frac{EU_i \sin \theta_i}{R_i} \quad (10)$$

实际中相角  $\theta_i$  很小,可近似得到  $\sin \theta_i = \theta_i$ ,  $\cos \theta_i \approx 1$ ,进一步简化为

$$P_i = \frac{U_i(U_i - E)}{R_i} \quad (11)$$

$$Q_i \cong -\frac{EU_i \theta_i}{R_i} \quad (12)$$

由此可知,逆变器输出的有功功率主要受逆变器的空载输出电压幅值影响,逆变器输出的无功功率主要受逆变器的空载输出电压与母线的相角差影响。由于实际工程中逆变器的空载输出电压与母线的相角差很难检测到,因此一般由频率代替相角实现控制,可得到 P/V 下垂控制方程表达式:

$$\begin{cases} f_i = f_{oi} - \mu_i(Q_i - Q_{oi}) \\ U_i = U_{oi} - v_i(P_i - P_{oi}) \end{cases} \quad (13)$$

式中  $\mu$ 、 $v$  为下垂控制系数。

由以上高、低压线路阻抗的特性分析可知,逆变器输出的有功、无功功率偏离额定有功、无功功率时,电压与频率值较额定值也有一定的偏移,因此上述 P/f 与 P/V 下垂控制均为有差调节。

### 1.1 无功功率分配

这里分析传统下垂控制的功率分配是基于阻性线路。

根据式(13),当 3 台逆变器的频率相等( $f_1 = f_2 = f_3$ ),系统达到稳定时,只需使下垂系数与其额定功率成反比,即满足

$$f_{01} = f_{02} = f_{03} \quad (14)$$

$$u_1 Q_{01} = u_2 Q_{02} = u_3 Q_{03} \quad (15)$$

则可使逆变器的无功功率按照额定功率平均分配,即

$$u_1 Q_1 = u_2 Q_2 = u_3 Q_3 \quad (16)$$

当无功功率在实现均分时,则

$$u_1 \frac{EU_1}{R_1} \theta_1 = u_2 \frac{EU_2}{R_2} \theta_2 = u_3 \frac{EU_3}{R_3} \theta_3 \quad (17)$$

若  $\theta_1 = \theta_2 = \theta_3$ ,  $U_1 = U_2 = U_3$ ,则有式(18)成立:

$$\frac{u_1}{R_1} = \frac{u_2}{R_2} = \frac{u_3}{R_3} \quad (18)$$

### 1.2 有功功率分配

由式(13)可知,要保证有功功率的平均分配,应满足

$$U_{01} = U_{02} = U_{03} \quad (19)$$

$$v_1 P_{01} = v_2 P_{02} = v_3 P_{03} \quad (20)$$

而使  $v_1 P_1 = v_2 P_2 = v_3 P_3$  成立的条件是  $U_1 = U_2 = U_3$ 。这时,逆变器之间的电压差为

$$\Delta U = U_{i+1} - U_i = v_{i+1} P_{i+1} - v_i P_i \quad (21)$$

将公式(7)代入式(13)得

$$P_i = \frac{EU_{oi} - E^2}{R_i + v_i E} \quad (22)$$

将式(22)代入公式(21)得

$$\Delta U = \frac{U_{oi} - E}{1 + \frac{R_{i+1}}{EV_{i+1}}} - \frac{U_{oi} - E}{1 + \frac{R_i}{EV_i}} \quad (23)$$

由以上公式可知,当  $\frac{R_1}{v_1} = \frac{R_2}{v_2} = \frac{R_3}{v_3}$ ,逆变器的无功功率将按额定容量平均分配。

综上所述,基于传统下垂控制的逆变器的有功与无功功率均分的条件应满足:

$$\begin{cases} u_1 Q_{01} = u_2 Q_{02} = u_3 Q_{03} \\ v_1 P_{01} = v_2 P_{02} = v_3 P_{03} \\ f_{01} = f_{02} = f_{03} \\ U_{01} = U_{02} = U_{03} \end{cases} \quad (24)$$

$$\begin{cases} U_1 = U_2 = U_3 \\ \theta_1 = \theta_2 = \theta_3 \\ \frac{R_1}{v_1} = \frac{R_2}{v_2} = \frac{R_3}{v_3} \Leftrightarrow \frac{R_1}{u_1} = \frac{R_2}{u_2} = \frac{R_3}{u_3} \end{cases} \quad (25)$$

## 2 逆变器的控制策略及输出阻抗设计

### 2.1 虚拟阻抗法

实现逆变器输出功率均分及抑制系统环流,均是通过虚拟阻抗对分布式发电单元之间的差异调节

控制,在逆变器的输出端引入虚拟阻抗的实质是在电压闭环中加入一个输出阻抗调节模块的负反馈,将虚拟阻抗值与采集的电流乘积引入到电压调节中。虚拟阻抗的引入,不仅可以改变逆变器的功率传输特性,还可以解决线路阻抗引起的功率耦合。引入虚拟阻抗的 3 台逆变器并联运行等效图如图 3 所示。

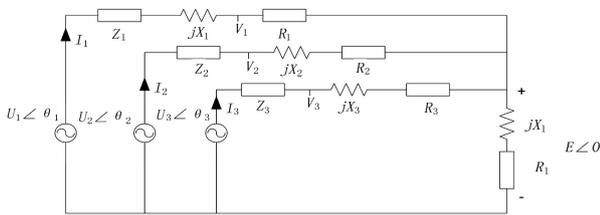


图 3 引入虚拟阻抗的 3 台逆变器并联运行等效图

图 3 中:  $Z_i$  为逆变器虚拟阻抗;  $V_i$  为逆变器输出电压;  $U_i (i = 1, 2, 3)$  为逆变器输出的虚拟电压。其关系如下:

$$V_i = U_i - I_i Z_i \quad (26)$$

通过对逆变器的虚拟阻抗值  $Z_i$  的调节来控制虚拟电压,间接对逆变器的输出电压进行控制,达到对分布式发电单元逆变器输出功率均分及抑制系统环流的目的。

### 2.2 虚拟阻抗的电容电流反馈控制逆变器结构分析

对并联逆变器采用带虚拟电感的电容电流反馈的双闭环控制相结合的方法,外环采用 PI 控制的电容电压控制环,用以提高系统输出功率的精度;内环采用 P 控制的电感电流控制环,用以改善系统的动态性能。带虚拟阻抗的电容电流反馈控制逆变器结构如图 4 所示。

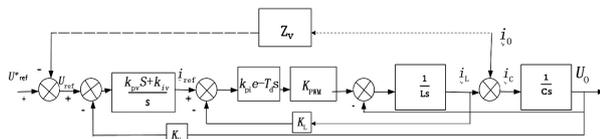


图 4 带虚拟阻抗的电容电流反馈控制逆变器结构

图中:  $U_{ref}^*$  为引入虚拟电感后的电压参考值;  $U_{ref}$  为电压外环参考电压;  $K_{pv}$ 、 $K_{iv}$  分别为 PI 控制器的比例和积分系数;  $i_{ref}^*$  为电流内环参考电流;  $K_{pi}$  为电流环调节器比例系数;  $T_d$  为数字控制延时;  $K_{pwm}$  为逆变器增益;  $L$ 、 $C$  分别为主电路滤波电感、滤波电容;  $K_i$ 、 $K_u$  分别为电感电流、电容电压反馈系数;  $u_0$  为逆变器输出电压;  $i_0$  为线路电流;  $Z_v$  为虚拟阻抗。由图 4 可知,当未加入虚拟电感时:

$$u_{ref} = u_{ref}^* \quad (27)$$

$$u = \frac{(K_{pv} s + K_{iv}) K_{pi} K_{pwm}}{\Delta} u_{ref} - \frac{L s^2}{\Delta} i_0 \quad (28)$$

$$\Delta = L C s^3 + K_U K_{pi} K_{pwm} C s^2 + (1 + K_i K_{pi} K_{pwm} K_{pv}) s + K_U K_{iv} K_{pi} K_{pwm} \quad (29)$$

由于滤波电容  $C$  的值较小可忽略不计,式(29)可近似为

$$\Delta \approx (1 + K_U K_{pi} K_{pwm} K_{pv}) s + K_U K_{iv} K_{pi} K_{pwm} \quad (30)$$

因此,式(28)可以等效为

$$u \approx \frac{(K_{pv} s + K_{iv}) K_{pi} K_{pwm}}{(1 + K_U K_{pi} K_{pwm} K_{pv}) s + K_U K_{iv} K_{pi} K_{pwm}} u_{ref} - \frac{L s^2}{(1 + K_U K_{pi} K_{pwm} K_{pv}) s + K_U K_{iv} K_{pi} K_{pwm}} i_0 \quad (31)$$

由此可得逆变器的输出阻抗为

$$z_{out}^* \approx \frac{L s^2}{(1 + K_U K_{pi} K_{pwm} K_{pv}) s + K_U K_{iv} K_{pi} K_{pwm}} = \frac{L s^2}{s + K_U K_{pi} K_{pwm} (K_{pv} s + K_{iv})}$$

引入虚拟阻抗  $Z_v(s)$ ,可得

$$u_{ref}^* = u_{ref} + z_v(s) i_0 \quad (33)$$

加入虚拟阻抗  $Z_v(s)$  的逆变器等效输出阻抗为

$$z_{out}^*(s) = \frac{(K_{pv} s + K_{iv}) K_{pi} K_{pwm}}{(1 + K_U k_{pi} K_{pwm} K_{pv}) s + K_U K_{iv} K_{pi} K_{pwm}} z_v(s) + z_{out}(s) \quad (34)$$

将式(33)代入式(34),若使  $Z_v(s) = K_U L s$ ,可得  $z_{out}^*(s) = L s$ 。

综上,工频条件下引入虚拟阻抗  $z_v(s) = K_U L s$ ,由于输出电阻可忽略,输出阻抗近似为纯感性,即逆变器的输出阻抗值由滤波电感值确定,因此在对传统下垂控制方法改进时,可利用图 4 控制策略对 3 台并联运行的逆变器进行控制,可不考虑各并联逆变器的输出电阻,仅需考虑滤波电感值。

### 3 传统下垂控制算法的改进

由图 3 可知:  $R_i$  为第  $i$  个逆变器的输电电阻和线路电阻之和;  $X_i$  为第  $i$  个逆变器的输出感抗和线路感抗之和。为了降低  $R_i$  对并联系统的环流影响,对传统下垂控制算法进行改进。

$$\begin{cases} f_i = f_{0i} - k_{pf} P_i - k_{qt} Q_i \\ U_i = U_{0i} - k_{pU} P_i - k_{qU} Q_i \end{cases} \quad (35)$$

式中  $k_{pf}$ 、 $k_{qU}$  为下垂系数。当  $X_i \gg R_i$  时,此时  $R_i$  虽

然相对较小,但是仍然存在,系统能否并联成功,  $X_i$ 、 $R_i$  这两参数至关重要。 $k_{qf}$ 、 $k_{pU}$  可提高功率均分精度,减小系统环流。首先应考虑下垂系数  $k_{pf}$ 、 $k_{qU}$  对功率的影响,再根据有功、无功公式并考虑  $R_i$  确定  $k_{qf}$ 、 $k_{pU}$ ,从而对传统下垂控制算法进行改进。

考虑到  $k_{pf}$ 、 $k_{qU}$  对功率均分的影响,可得:

$$k_{pf} = \frac{\Delta f}{P_{MAX}} \quad (36)$$

$$k_{qU} = \frac{\Delta U}{Q_{MAX}} \quad (37)$$

式中:  $\Delta f$ 、 $\Delta U$  分别为逆变器输出电压最大频率偏差和幅值偏差;  $P_{MAX}$ 、 $Q_{MAX}$  分别为输出最大有功、无功功率值。

根据上述分析,有功功率表达式为

$$P_i = \frac{1}{|Z_i|} [(EU_i \cos \theta_i - E^2) \cos \phi_i + EU_i \sin \theta_i \sin \phi_i] \quad (38)$$

对式(38)的  $U_i$ 、 $\theta_i$  求导可得:

$$\frac{\partial P_i}{\partial U_i} = \frac{1}{|Z_i|} E \cos(\phi_i - \theta_i) \quad (39)$$

$$\frac{\partial P_i}{\partial \theta_i} = \frac{1}{|Z_i|} E \cos(\phi_i - \theta_i) \quad (40)$$

由式(39)、(40)可得  $k_{pf}$ 、 $k_{pU}$  的关系:

$$\frac{k_{pf}}{k_{pU}} = \frac{\partial P_i / \partial U_i}{\partial P_i / \partial \theta_i} = \frac{1}{U_i \tan(\phi_i - \theta_i)} \quad (41)$$

式(41)化简得:

$$k_{pU} = k_{pf} U_i \tan(\phi_i - \theta_i) \approx k_{pf} U_i (\sin \phi_i - \sin \theta_i) \quad (42)$$

由于并联逆变器在运行时空载输出电压与母线电压的相角差  $\theta_i$  很小,阻抗角  $\phi_i$  远大于相角差  $\theta_i$ ,

$\sin \phi_i = \frac{R_i}{|Z_i|}$ , 式(42)可化简为

$$k_{pU} = k_{pf} U_i \frac{R_i}{|Z_i|} \quad (43)$$

无功功率可表达为

$$Q_i = \frac{1}{|Z_i|} [(EU_i \cos \theta_i - E^2) \sin \phi_i - EU_i \sin \theta_i \cos \phi_i] \quad (44)$$

对  $U_i$ 、 $\theta_i$  求导可得:

$$\frac{\partial Q_i}{\partial U_i} = \frac{1}{|Z_i|} E \cos(\phi_i - \theta_i) \quad (45)$$

$$\frac{\partial Q_i}{\partial \theta_i} = \frac{1}{|Z_i|} EU_i \cos(\phi_i - \theta_i) \quad (46)$$

由式(45)、式(46)可得  $k_{qf}$ 、 $k_{qU}$  的关系为

$$\frac{k_{qf}}{k_{qU}} = \frac{\partial Q_i / \partial U_i}{\partial Q_i / \partial \theta_i} = -\frac{\tan(\phi_i - \theta_i)}{U_i} \quad (47)$$

式(47)化简得

$$k_{qf} = -k_{qU} \frac{\tan(\phi_i - \theta_i)}{U_i} \approx -k_{qU} \frac{\sin \phi_i - \sin \theta_i}{U_i} \quad (48)$$

由于阻抗角  $\phi_i$  远大于相角差  $\theta_i$ , 式(48)可化简为

$$k_{qf} \approx -\frac{k_{qU}}{U_i} \frac{R_i}{|Z_i|} \quad (49)$$

综上所述,多逆变器并联的微电网改进型下垂控制算法如下:

$$\begin{cases} f_i = f_{0i} - k_{pf} P_i + \frac{k_{qU}}{U_i} \frac{R_i}{|Z_i|} Q_i \\ U_i = U_{0i} - k_{pf} U_i \frac{R_i}{|Z_i|} P_i - k_{qU} Q_i \end{cases} \quad (50)$$

当  $R_i = 0$  时,即为传统下垂控制算法,若引入感性虚拟阻抗,参考电压  $u_{ref}^*$  则为

$$u_{ref}^* = \sqrt{2} U_i \sin(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (51)$$

## 4 实验仿真验证

为了验证多逆变器并联的微电网改进型下垂控制算法,在 Matlab/Simulink 仿真平台搭建了3台逆变器并联运行仿真模型。微网电压等级为380 V,单台逆变器功率等级为50 kW,负载类型为阻感性负载,3台逆变器线路阻抗均为  $0.1 + j0.03 \Omega$ ,仿真参数如表1所示。

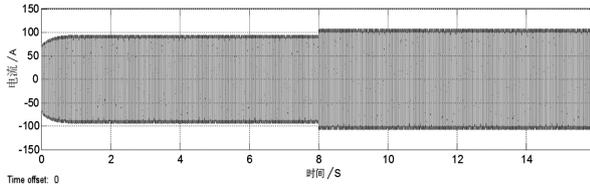
表1 3台逆变器并联运行仿真参数

参数	数值
3台逆变器连线阻抗/ $\Omega$	$0.1 + j0.03$
3台逆变器电感/mH	$2.64 \times 0.05e^{-4}$
3台逆变器滤波电容/ $\mu F$	$1e^{-6}$
3台逆变器负载阻抗/ $\Omega$	$10 + j0.01$

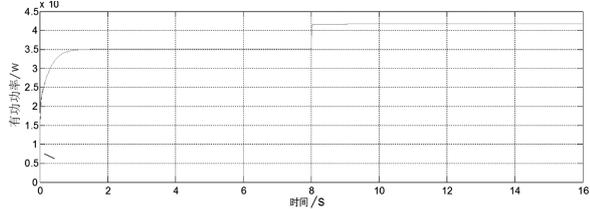
### 4.1 基于虚拟阻抗的仿真

未加入感性虚拟阻抗的下垂控制实验仿真波形如图5所示。加入感性虚拟阻抗的下垂控制实验仿真波形如图6所示。

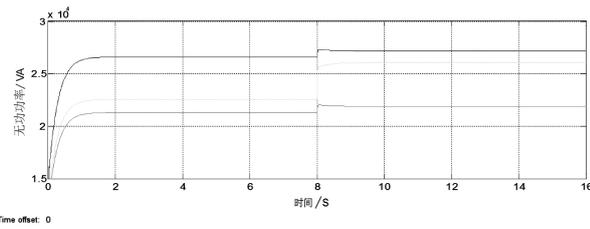
由图5和图6对逆变器并联运行的电压、有功、无功仿真分析可知,引入感性虚拟阻抗之后的逆变器的有功波形图没有明显变化,并联运行的台逆变器的输出电流波形更为均匀,并联逆变器的环流与未加入虚拟阻抗的环流有所减小,逆变器的输出无功均衡效果较未加入虚拟阻抗时也有很大的提高。



(a) 电流

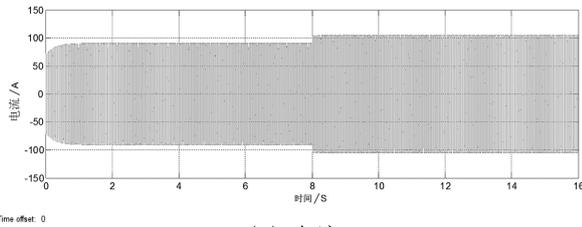


(b) 有功功率

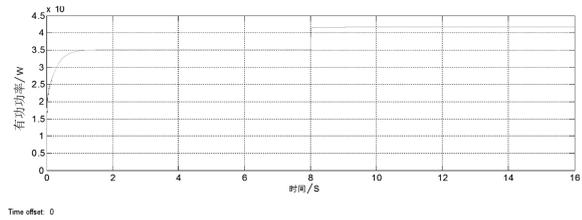


(c) 无功功率

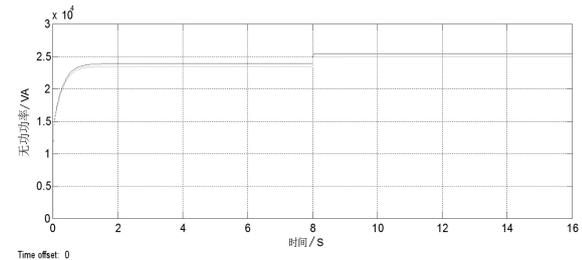
图5 未加入感性虚拟阻抗的仿真结果



(a) 电流



(b) 有功功率

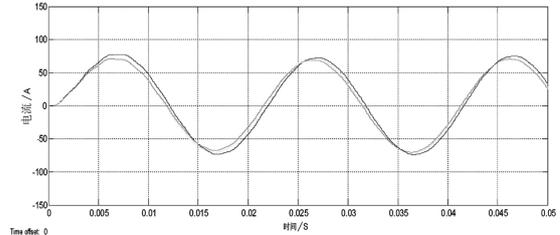


(c) 无功功率

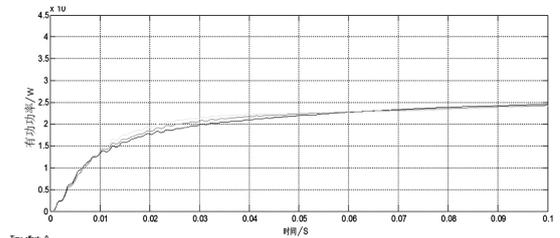
图6 加入感性虚拟阻抗的仿真结果

#### 4.2 基于改进算法的虚拟阻抗仿真

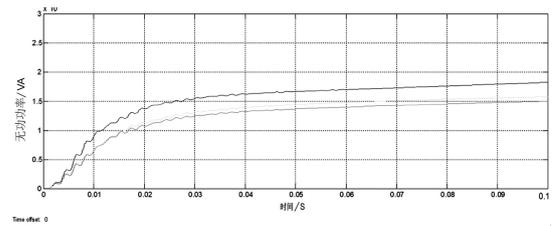
未加入感性虚拟阻抗的改进算法的下垂控制仿真波形如图7所示。



(a) 电流

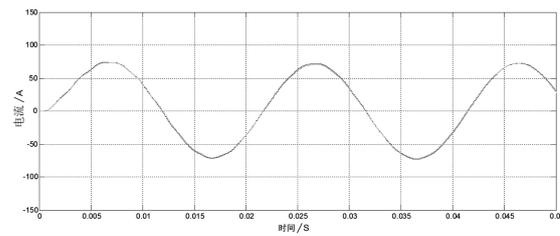


(b) 有功功率

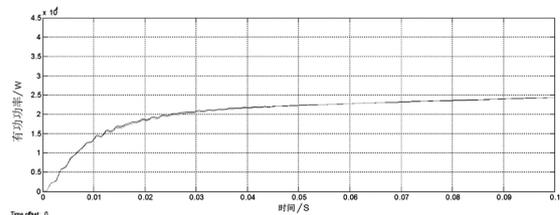


(c) 无功功率

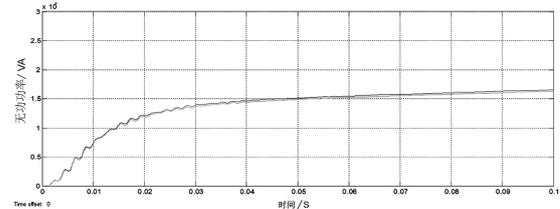
图7 未加入感性虚拟阻抗的改进算法的仿真结果  
加入感性虚拟阻抗的改进算法的下垂控制仿真波形如图8所示。



(a) 电流



(b) 有功功率



(c) 无功功率

图8 加入感性虚拟阻抗的改进算法的仿真结果

(下转第37页)

仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(21): 189-195.

[10] 张谦, 李凤婷, 蒋俊凤. 一种 PMSG 低电压穿越综合控制策略[J]. 电力电容器与无功补偿, 2016, 37(4): 123-129.

[11] 李凤婷, 张谦, 黄蓉等. 机组参与调节的双馈机组低电压穿越综合控制策略[J]. 中国电力, 2016, 49(3): 141-147.

[12] 齐尚敏, 李凤婷, 何世恩等. 具有低电压穿越能力的集群接入风电场故障特性仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(14): 55-62.

[13] 胡书举, 李建林, 许洪华. 永磁直驱风电系统低电压

运行特性的分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(17): 73-77.

[14] 栗然, 高起山, 刘伟. 直驱永磁同步风电机组的三相短路故障特性[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 153-158.

[15] 熊小伏, 张涵轶, 欧阳金鑫. 含 SVC 双馈风电机组暂态输出特性仿真分析[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(19): 89-93.

作者简介:

陈伟伟(1989), 硕士, 研究方向为可再生能源并网技术与电力系统规划设计。

(收稿日期: 2018-01-15)

(上接第 11 页)

对改进算法的下垂控制波形图与未经过改进的下垂控制图形进行比较可知,改进后 3 台逆变器的电流基本保持一致,并联逆变器间基本无环流,输出的有功和无功基本均衡。

## 5 结 语

由于实际微电网的逆变器输出阻抗不同,其到公共并网点的距离长短不一,在实现阻感性或者纯阻性线路的逆变器有功、无功功率的均分时各逆变器的电压幅值和相位不一致,容量与线路阻抗成反比,采用传统下垂控制策略,很难实现逆变器的功率均分。

前面通过对传统下垂控制算法的有功、无功分析,设计了引入虚拟阻抗的电压电流双环控制策略;提出一种改进型多逆变器并联的微电网改进型下垂控制算法。实验仿真结果表明,改进型多逆变器并联的微电网改进型下垂控制算法提高了多逆变器的并联性能,有效减小了多逆变器并联运行环流问题,大大提高了多逆变器并联运行的无功均衡效果。

### 参考文献

[1] 黄宜平, 马晓轩. 微电网技术综述(英文)[J]. 电工技术学报, 2015(S1): 320-328.

[2] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.

[3] 杨新法, 苏剑, 吕志鹏, 等. 微电网技术综述[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(1): 57-70.

[4] 吴玖蓉, 陶顺, 肖湘宁. 某海岛微电网的孤岛协调控制策略研究[J]. 电气应用, 2015, 34(9): 22-27.

[5] 马伟, 王维庆, 王海云. 微电网在孤岛模式运行时的下垂控制策略研究[J]. 电气传动, 2017, 47(1): 18-22.

[6] 徐晓龙. 微电网逆变器运行控制策略的研究[D]. 秦皇岛: 燕山大学, 2016.

[7] 杨琦, 马世英, 李胜, 等. 微型电网运行及控制设计[J]. 电工技术学报, 2011, 39(S1): 1-5.

[8] 李红萍, 杨洪耕, 曾巧燕. 孤岛型微电网中逆变器并联运行控制策略[J]. 电测与仪表, 2016, 53(6): 62-68.

[9] 鲍薇, 胡学浩, 李光辉, 等. 独立型微电网中基于虚拟阻抗的改进下垂控制[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 7-13.

[10] 支娜, 张辉, 肖曦. 提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 31-39.

[11] 闫俊丽, 彭春华, 陈臣. 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.

[12] 郭诚, 顾军, 张武, 等. 孤岛微电网中基于虚拟负阻抗的改进下垂控制[J]. 电气传动, 2016, 46(6): 49-53.

[13] 张平, 石健将, 李荣贵, 等. 低压微电网逆变器的“虚拟负阻抗”控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(12): 1844-1852.

[14] 天兵, 雷金勇, 许爱东, 等. 低压微电网孤岛模式下改进下垂控制策略[J]. 水电能源科学, 34(3): 204-208.

[15] 高春风, 杨仁刚, 王江波, 等. 基于虚拟频率的微电网下垂控制策略设计[J]. 电网技术, 2013, 37(12): 3331-3335.

作者简介:

刘树伟(1988), 硕士研究生, 研究方向为新能源并网与发电。

(收稿日期: 2018-01-15)