

# 基于动态虚拟阻抗的低压微电网下垂控制策略

闫俊丽, 彭春华, 陈 臣

(华东交通大学电气与电子工程学院, 江西 南昌 330013)

**摘要:** 传统的下垂控制策略已无法适用于线路阻感比较大的低压微电网。加入虚拟阻抗能改善线路阻感比, 提高运行稳定性, 但也导致了电压降落过大。其虚拟阻抗值的设定受系统阻抗值实际测量难度及随线路投切的影响, 亦无法确定。因此, 提出了一种基于动态虚拟阻抗的改进控制策略。设计的动态虚拟阻抗随负载电流和电压降落幅值而变化, 虚拟阻抗值在动态虚拟阻抗环的作用下, 不断自适应地调整取值, 解决了虚拟阻抗值无法确定的问题。在满足系统稳定性的同时, 减少了线路电压降落, 抑制了系统环流, 改善了系统的电能质量。仿真和实验结果验证了该控制策略的可行性及有效性。

**关键词:** 低压微电网; 下垂控制; 动态虚拟阻抗; 电压降落

## Droop control strategy based on dynamic virtual impedance in low-voltage microgrid

YAN Junli, PENG Chunhua, CHEN Chen

(School of Electrical and Electronic Engineering, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China)

**Abstract:** The conventional droop control can't adapt to large resistance-inductance ratio of line in low-voltage microgrid. Introducing virtual impedance can improve resistance-inductance ratio of line and increase operation stability, while it may lead to great voltage drop. The value setting of virtual impedance is influenced by difficult practical measurement of system virtual impedance and lines switching, which can't be confirmed either. An improved control strategy based on dynamic virtual impedance is proposed. The designed dynamic virtual impedance is changed with the load current and the drop of voltage amplitude. The value of virtual impedance is adjusted adaptively and constantly under the work of the dynamic virtual impedance loop, so that the problem of virtual impedance value setting can be solved. At the same time, the voltage drop is reduced, circulating current is inhibited and the system power quality is improved effectively, while the system stability performance is satisfied. Simulation and experimental results verify the feasibility and effectiveness of the proposed control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51167005 and No. 51567007).

**Key words:** low voltage microgrid; droop control; dynamic virtual impedance; voltage drop

中图分类号: TM76

文章编号: 1674-3415(2015)21-0001-06

## 0 引言

近年来, 社会经济的迅速发展导致人们对电能的需求日益提升, 微电网以其污染少、效率高、可控性好等优点, 受到越来越多的关注<sup>[1-3]</sup>。在实际运行中, 微电网基于即插即用(plug and play)与对等(peer to peer)的控制思想和设计理念, 不依赖通信,

对每个微电源进行就地控制, 以降低系统控制成本和增加控制的可靠性<sup>[4-5]</sup>。应用这种控制思想, 下垂控制策略在微电网中得到了广泛的应用。

传统下垂控制方法是基于各并联逆变器的系统等效阻抗呈感性的, 对线路的阻感比依赖性较大。然而实际中, 微电网多位于低压配电侧, 线路阻抗呈阻性或阻感性( $R/X \gg 1$ )<sup>[6]</sup>, 逆变器输出的有功功率、无功功率分别与频率、电压存在耦合关系, 传统下垂控制方法不再适用<sup>[7]</sup>。目前, 解决这一问题常用的方法是通过改变线路的阻感比<sup>[8]</sup>, 使之满足传统下垂控制的要求, 即在微电源的逆变器输出端

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51167005, 51567007); 教育部人文社科青年基金项目(14YJCZH135); 江西省科技支撑计划项目(20142BBE50001); 江西省自然科学基金项目(20152ACB20017, 20151BAB216020)

口处串联一个大电感,但这必然会导致系统体积成本和损耗增加,总效率降低。

针对这一问题,文献[9-11]提出改变控制环节的网络参数使逆变器输出阻抗呈感性,使有功功率与无功功率解耦,以适应新的下垂控制策略,这导致了控制策略对网络参数的依赖性较大,而且实际上有功与无功也没有完全解耦。实际微电网的控制中,逆变器的控制处在微电站内部,控制策略对网络参数的依赖以及对外部线路尤其是低压微电网的线路阻抗的忽略,往往会导致系统运行失稳与控制的不利。文献[12-14]引入了虚拟阻抗将逆变器的等效输出阻抗设计成阻性,能较好地适用于下垂控制策略,取得了较好的控制效果,但引入的虚拟阻抗会加大系统的等效阻抗,造成较大的电压降落,不利于供电质量的保证。文献[15]提出了“虚拟负电阻”的概念,增加负电阻以抵消系统阻抗中的阻性成分,降低功率耦合,同时也减少了电压降落,但其虚拟负阻抗的取值对计算要求较高,需要对微电网线路阻抗有较高的估算精度。

针对上述问题,本文将在低压微电网三相逆变器的控制策略中引入动态虚拟阻抗,以降低功率耦合,减小电压降落和环流,实现对低压微电网电能质量灵活而有效的控制。

## 1 下垂控制策略分析

传统下垂控制早期主要使用在高压微电网中, $\phi$ 很小,可近似认为 $\sin\phi=\phi$ , $\cos\phi=1$ 。即 $X\gg R$ , $\theta\approx 90^\circ$ , $Z\approx jX$ 时,对应的功率表达式和下垂控制方程为

$$\begin{cases} P_i = \frac{E_i U}{X_i} \phi_i \\ Q_i = \frac{U}{X_i} (E_i - U) \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \omega_i - \omega_i^* = -K_p (P_i - P_i^*) \\ U_i - U_i^* = -K_q (Q_i - Q_i^*) \end{cases} \quad (2)$$

其中: $K_p$ 、 $K_q$ 分别为有功/频率( $P$ - $f$ )下垂系数和无功/电压( $Q$ - $V$ )下垂系数; $\omega_i^*$ 、 $U_i^*$ 、 $P_i^*$ 、 $Q_i^*$ 分别为参考频率、参考电压、参考有功功率和参考无功功率。

上述控制只能适用于高压微电网中线路阻抗比呈感性的状况,对线路的阻抗忽略不计,其上层控制管理系统给出的指令电压值固定不变,没有考虑线路阻抗及负荷的变动,而实际中微网尤其是低压微电网的线路阻抗是较大的,负荷的接入和退出对电压波动影响较大,继续采用传统的下垂控制策略会导致系统不稳定,控制不精确,电压质量不高等

问题。因此,对传统下垂控制策略进行改进是十分必要的。

为更好地提高低压微电网中分布式电源的利用率,目前对传统下垂控制策略进行改进多集中在通过选取合适的控制参数,减少系统阻性成分,降低系统功率耦合,减小系统阻抗对系统电能质量的不利影响<sup>[15]</sup>。

文献[16]在控制环节中引入了感性虚拟阻抗,改变了线路阻感比 $r=R/X$ ,但线路电阻仍客观存在,为减弱线路阻抗差异对并联均流的影响有一定效果,又提出对下垂控制策略进行改进。

因此,微电网多逆变器并联的改进下垂控制算法可以写为

$$\begin{cases} \omega_i = \omega_i^* - K_{p\omega} P_i + \frac{K_{qu}}{U_i} \frac{r}{|Z_i|} Q_i \\ U_i = U_i^* - K_{pU} U_i \frac{r}{|Z_i|} P_i - K_{qu} Q_i \end{cases} \quad (3)$$

通过调节下垂控制系数 $K_{p\omega}$ 、 $K_{qu}$ 和阻感比 $r$ ,可分别实现对逆变器输出频率和电压幅值的瞬时控制。但由于不同逆变器的线路长度各异,不同电压等级连接线路对应不同的阻感比,线路阻抗在无法准确测量的情况下,存在很大的不确定性,而控制系统中设定的阻感比数值又需与实际匹配,且该控制策略下,线路电压降落的问题仍然存在。

## 2 动态虚拟阻抗控制策略

### 2.1 基本的虚拟阻抗控制策略

目前在微电网中接入虚拟阻抗的方法主要有两大类:一是通过改变逆变器的控制参数,控制调节逆变器的等效输出阻抗,改变微电网的系统阻感性以适应传统的下垂控制策略;二是在微电网逆变器中加入前馈控制环节,参照电压降落调节指令电压,达到模拟实际阻抗的作用。虚拟阻抗的接入,虽然改变了系统的阻感性,但其阻性成分的客观存在仍然会导致系统的功率耦合,忽略阻性成分的影响必然会减弱控制策略的控制效果。

目前对微电网逆变器控制策略的改进多在控制环节中加入虚拟阻抗(包括虚拟电阻和虚拟电感两部分),改善线路阻感性,使 $Pf$ - $QV$ 下垂控制能够适用于阻性线路。

构造的虚拟阻抗表达式为

$$Z_v(s) = -R_v + sL_v \quad (4)$$

式中: $R_v$ 为虚拟电阻; $L_v$ 为虚拟电感。系统总阻抗包括逆变器的输出阻抗和线路的虚拟阻抗。在低压微电网中,有线路阻抗 $Z_{\text{line}}=R_{\text{line}}+sL_{\text{line}}$ 。

此时基于虚拟阻抗的阻感比表达式为

$$r(s) = \frac{R}{X} = \frac{R_{\text{line}} - R_v}{sL_{\text{line}} + sL_v} \quad (5)$$

加入虚拟阻抗后逆变器等效输出阻抗向感性偏移, 系统阻感比减小, 降低了功率耦合, 增加了控制策略的有效性, 但虚拟阻抗会导致压降过大以及谐波放大, 降低了电能质量。

## 2.2 基于虚拟阻抗的双环控制策略

并联逆变器控制采用基于虚拟阻抗的电压电流双闭环控制, 基于虚拟阻抗的下垂控制为电压电流环提供了电压参考值。为了得到较好的电压调节特性, 电压外环采用比例积分(PID)调节器, 产生电感电流参考值, 对电感电流的精度要求不高, 所以电感电流调节环采用比例调节器, 减少系统稳态误差, 提高系统的供电质量和稳定性。

如图 1 所示,  $u_{\text{ref}}^*(s)$  为功率外环交流电压参考值,  $G_i(s)$  为电流内环控制器传递函数,  $G_u(s)$  为电压外环控制器传递函数,  $u_0(s)$  为逆变器输出电压,  $L$ 、 $C$  分别为主电路的滤波电感、滤波电容,  $K_{\text{PWM}}$  为逆变器的基波脉宽调制比例系数,  $Z_v(s)$  为虚拟阻抗,  $i_0(s)$  为负载电流。

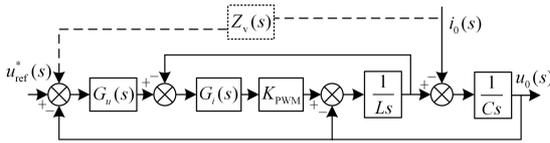


图 1 电压电流双闭环控制框图

Fig. 1 Diagram of voltage and current double closed-loop controller

在图 1 所示的控制策略下, 加入虚拟阻抗后的逆变器的输出电压为

$$u_0(s) = \frac{KG_u(s)}{LCs^2 + KCs + KG_u(s) + 1} u_{\text{ref}}^* - \left( Z_0(s) + \frac{Z_v(s)KG_u(s)}{LCs^2 + KCs + KG_u(s) + 1} \right) i_0(s) \quad (6)$$

$$Z_0(s) = \frac{Ls + K}{LCs^2 + KCs + KG_u(s) + 1} \quad (7)$$

其中:  $K = G_i(s)K_{\text{PWM}}$ ,  $G_i(s) = K_{\text{ip}}$ ,  $G_u(s) = K_{\text{up}} + \frac{K_{\text{ui}}}{s}$ ;  $Z_0(s)$  为逆变器等效输出阻抗, 即

$$U_0(s) = G(s)U_{\text{ref}}^* - [G(s)Z_v(s) + Z_0(s)]i_0(s) = G(s)U_{\text{ref}}^* - Z_{\text{inv}}(s)i_0(s) \quad (8)$$

逆变器电压闭环传递函数为

$$G(s) =$$

$$\frac{sK_{\text{ip}}K_{\text{PWM}}K_{\text{up}} + K_{\text{ui}}K_{\text{ip}}K_{\text{PWM}}}{LCs^3 + K_{\text{ip}}K_{\text{PWM}}Cs^2 + sK_{\text{ip}}K_{\text{PWM}}K_{\text{up}} + K_{\text{ui}}K_{\text{ip}}K_{\text{PWM}} + s} \quad (9)$$

加入虚拟阻抗后, 逆变器等效输出阻抗为

$$Z_{\text{inv}}(s) = \frac{Ls^2 + sK_{\text{ip}}K_{\text{PWM}} + (sK_{\text{ip}}K_{\text{PWM}}K_{\text{up}} + K_{\text{ip}}K_{\text{PWM}}K_{\text{ui}})Z_v(s)}{LCs^3 + K_{\text{ip}}K_{\text{PWM}}Cs^2 + sK_{\text{ip}}K_{\text{PWM}}K_{\text{up}} + K_{\text{ui}}K_{\text{ip}}K_{\text{PWM}} + s} \quad (10)$$

在电压电流双环控制中加入虚拟阻抗, 改变了阻抗比, 增加了对电压、电流环的控制, 但仍然没有减小系统的电压降落, 这对于输出的电能质量产生了不利影响。

## 2.3 基于电压降落的动态虚拟阻抗的设计

为了提高负荷供电质量, 减少电压降落和环流对电能质量的影响。本文提出动态虚拟阻抗的解决方法。

系统总电压降落为

$$\Delta U = [Z_{\text{inv}}(s) + Z_{\text{line}}]i_0(s) = [G(s)Z_v(s) + Z_0(s) + Z_{\text{line}}]i_0(s) \quad (11)$$

为保证供电质量, 减少系统电压降落和环流, 参考式(11), 设动态虚拟阻抗值为

$$Z_v(s) = \frac{\Delta E}{i_0(s)} - (Z_0(s) + Z_{\text{line}}) \quad (12)$$

式中:  $\Delta E$  为系统在微电网负荷侧采样点的电压幅值与逆变器指令电压间的差值;  $i_0(s)$  为负载电流。随着母线电压、电流的实时采集, 虚拟阻抗在动态虚拟阻抗环的作用下, 不断自适应地调整取值。将新的虚拟阻抗值代入到式(11)中, 计算可得电压降落参考值  $\Delta U$ , 由此可得逆变器新的指令电压值为

$$U_{\text{ref}} = U_{\text{ref}1} + \Delta U \quad (13)$$

在独立运行的微电网中, 投入运行时, 先给微电网控制环节的指令电压赋值  $U_{\text{ref}1}$ , 同时采集微电网中负荷侧的母线电压, 引入负载电压反馈, 提高指令电压数值, 形成新的指令电压。

此时, 逆变器的输出电压相对升高, 系统的供电电压将持续维持在正常范围内, 克服了对引入虚拟阻抗之后对电压降落的影响。随着虚拟阻抗数值的变化, 微电网中的系统阻抗比也在发生变化, 本文采用的改进型下垂控制策略, 同时考虑了动态虚拟阻抗对系统阻感比的影响以及指令电压的赋值变化, 相比于传统的下垂控制策略, 在减少电压降落, 保证供电质量的同时, 能够对微电网进行更好地控

制，减小环流。

### 3 仿真及实验验证

本文基于 Matlab/Simulink 仿真平台建立了如

图 2 所示的基于动态虚拟阻抗的微电网逆变器多环控制框图，以验证所提控制策略的有效性。其他参数两逆变器均相同，仿真参数见表 1， $f=50\text{ Hz}$ ， $f_s=10\text{ kW}$ ， $P_{\text{load}}=10\text{ kW}$ ， $Q_{\text{load}}=3\text{ kvar}$ 。

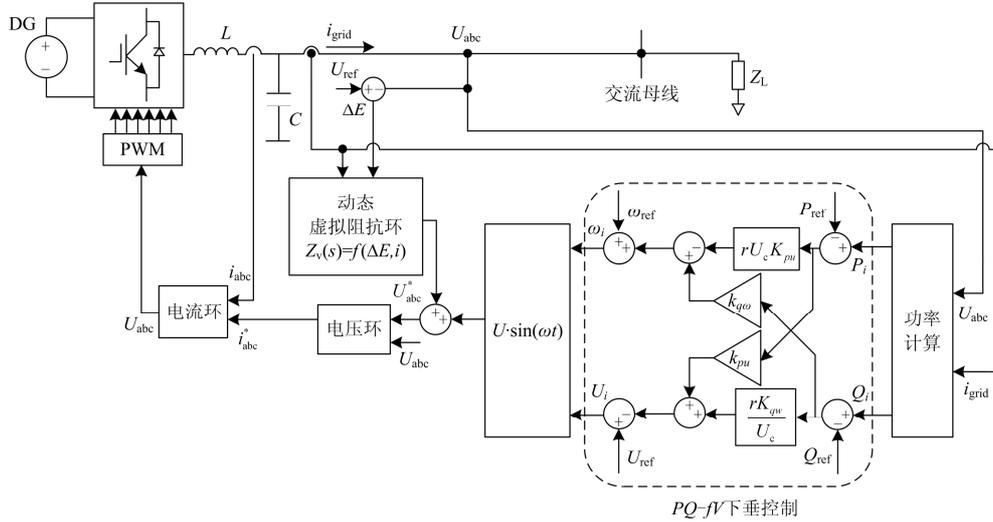


图 2 基于动态虚拟阻抗的微电网逆变器多环控制框图

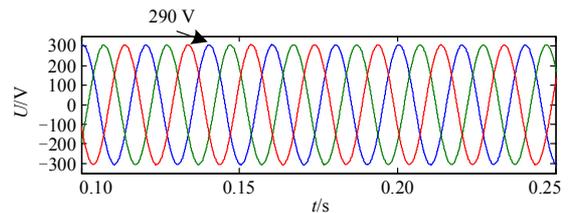
Fig. 2 Diagram of multi-loop control based on dynamic virtual impedance for inverters in microgrid

表 1 系统主要参数

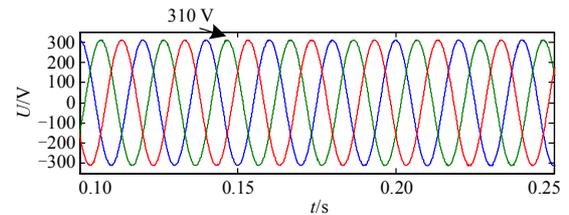
Table 1 Main values of the system

参数	取值	参数	取值
$U_{dc}/V_{rms}$	700	$K_{ip}$	0.0002
$U_0/V_{rms}$	311	$K_{ui}$	0.2281
$Z_{line}/\Omega$	$0.0642+j0.0083$	$K_{up}$	0.1234
$L/mH$	3	$C/\mu F$	10

图 3 为加入动态虚拟阻抗前后并联逆变器输出电压对比图。加入动态虚拟阻抗前，逆变器输出电压幅值约 290 V，而系统给定的额定电压为 311 V，电压降落明显，而加入动态虚拟阻抗后，逆变器输出电压幅值约 310 V，表明动态虚拟阻抗减少了由线路阻抗引起的电压降落，为提高负荷供电电压质量提供了保障。



(a) 加入动态虚拟阻抗前

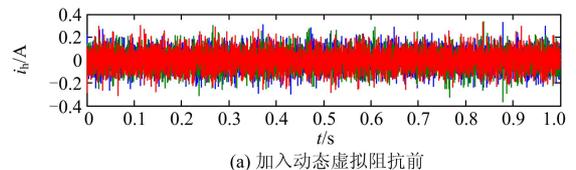


(b) 加入动态虚拟阻抗后

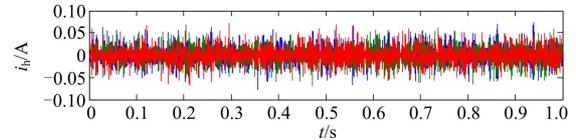
图 3 并联逆变器输出电压对比图

Fig. 3 Comparison of distributed inverter output voltage

图 4 为加入动态虚拟阻抗前后逆变器之间的环流对比图，由图 4(a)和图 4(b)可以看出，加入动态虚拟阻抗前，逆变器之间的环流为 0.3 A 左右，而加入动态虚拟阻抗后的逆变器间的环流为 0.05 A 左右，环流明显得到了更为有效抑制。



(a) 加入动态虚拟阻抗前



(b) 加入动态虚拟阻抗后

图 4 环流对比图

Fig. 4 Comparison of circulation

如图 5 所示，当逆变器输出阻抗呈阻感性时，加入动态虚拟阻抗后的下垂控制策略下，系统频率趋于稳定的速度更快，系统能更快地进入稳态运行。由此可见，加入动态虚拟阻抗之后，下垂控制在频率调节时效果更优。

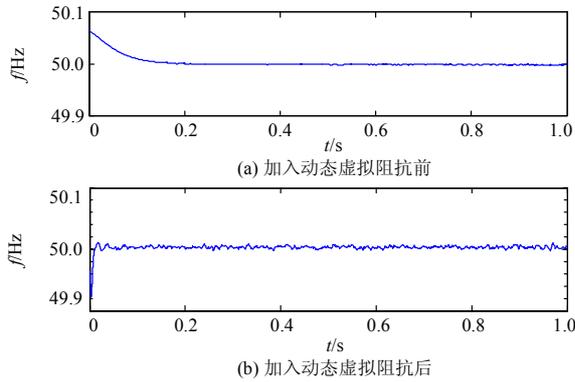


图 5 频率对比图

Fig. 5 Comparison of frequency amplitude

逆变器输出阻抗呈阻感特性时, 加入动态虚拟阻抗前后 2 台逆变器输出有功功率和无功功率对比图如图 6 和图 7 所示。加入动态虚拟阻抗前的有功和无功均分效果不好, 稳定性不佳, 而加入动态虚拟阻抗后的控制策略在 0.01 s 时就已进入稳定控制, 说明加入动态虚拟阻抗后, 控制策略能较好地实现有功功率和无功功率的均分。

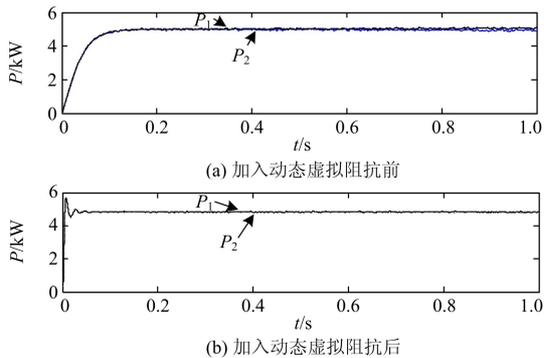


图 6 两台逆变器输出有功功率对比图

Fig. 6 Comparison of two inverters output active power

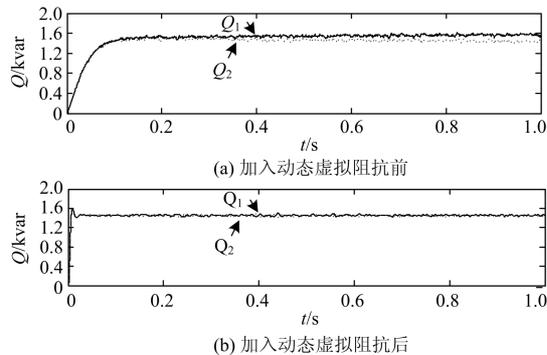


图 7 两台逆变器输出无功功率对比图

Fig. 7 Comparison of two inverters output reactive power

## 4 结论

(1) 采用动态虚拟阻抗可使低压微网中并联逆变器的系统阻抗呈可调节性, 在加强对功率的控制的同时减小了系统电压降落, 较好地解决了功率的合理均分问题, 且环流得到了有效抑制。

(2) 考虑阻感比的改进下垂控制策略, 在加入动态虚拟阻抗之后, 降低了对线路参数的敏感度, 反馈环节使功率控制器具有恒压恒频控制性能, 减小了微网系统控制的复杂度, 缩短了系统运行趋于稳定所耗时间。

(3) 搭建了含并联三相逆变器的微电网系统并进行了实验仿真和对比验证, 系统的稳定性和电能质量得到了进一步提高, 结果表明, 本文所提出的控制策略具有一定的可行性及有效性。

## 参考文献

- [1] 沈沉, 吴翔宇, 王志文, 等. 微电网实践与发展思考[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(5): 1-11.  
SHEN Chen, WU Xiangyu, WANG Zhiwen, et al. Practice and rethinking of micro-grids[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(5): 1-11.
- [2] 顾和荣, 赵巍, 王雷, 等. 微电网逆变器电流下垂控制分析与实验研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 45-48.  
GU Herong, ZHAO Wei, WANG Lei, et al. Analysis and experimental verification of current droop control for microgrid inverters[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 45-48.
- [3] 姚致清, 张茜, 刘喜梅. 基于 PSCAD/EMTDC 的三相光伏并网发电系统仿真研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(17): 76-81.  
YAO Zhiqing, ZHANG Qian, LIU Ximei. Research on simulation of a three-phase grid-connected photovoltaic generation system based on PSCAD/EMTDC[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(17): 76-81.
- [4] 周贤正, 荣飞, 吕志鹏, 等. 低压微电网采用坐标旋转的虚拟功率 V/f 下垂控制策略[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(2): 47-51, 63.  
ZHOU Xianzheng, RONG Fei, LÜ Zhipeng, et al. A coordinate rotational transformation based virtual power V/f droop control method for low voltage micro-grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(2): 47-51, 63.
- [5] 王成山, 高菲, 李鹏, 等. 低压微网控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(25): 2-8.

- WANG Chengshan, GAO Fei, LI Peng, et al. Control strategy research on low voltage microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 2-8.
- [6] ENGLER A. Applicability of droops in low voltage grids[J]. International Journal of Distributed Energy Resources, 2005, 1(1): 1-5.
- [7] 关雅娟, 邬伟扬, 郭小强. 微电网中三相逆变器孤岛运行控制技术[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(33): 52-60.  
GUAN Yajuan, WU Weiyang, GUO Xiaoqiang. Control strategy for three-phase inverters dominated micro-grid in autonomous operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(33): 52-60.
- [8] 彭春华, 王立娜, 李云丰. 低压微电网三相逆变器功率耦合下垂控制策略[J]. 电力自动化设备, 2014, 34(3): 28-33, 46.  
PENG Chunhua, WANG Lina, LI Yunfeng. Strategy of power-coupling droop control for three-phase inverter in low-voltage micro-grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 34(3): 28-33, 46.
- [9] 姚玮, 高明智, 陈敏, 等. 可调阻抗无互联线并联逆变器的控制方法[J]. 电力电子技术, 2007, 41(9): 21-23.  
YAO Wei, GAO Mingzhi, CHEN Min, et al. An improved droop method with the adjustment of output impedance for wireless parallel operation of inverters[J]. Power Electronics, 2007, 41(9): 21-23.
- [10] LI Y W, KAO C N. An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12): 2977-2988.
- [11] 张明锐, 杜志超, 王少波. 微网中下垂控制策略及参数选择研究[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 136-144.  
ZHANG Mingrui, DU Zhichao, WANG Shaobo. Research on droop control strategy and parameters selection of microgrids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 136-144.
- [12] 马添翼, 金新民, 梁建钢. 孤岛模式微电网逆变器的复式虚拟阻抗控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(12): 304-312.  
MA Tianyi, JIN Xinmin, LIANG Jiangang. Multiple virtual impedance control method of micro-grid converter under island mode[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(12): 304-312.
- [13] LI Yan, LI Yunwei. Power management of inverter interfaced autonomous microgrid based on virtual frequency-voltage frame[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(1): 30-40.
- [14] 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.  
BAO Wei, HU Xuehao, LI Guanghui, et al. An improved droop control strategy based on virtual impedance in islanded micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 7-13.
- [15] 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.  
ZHANG Ping, SHI Jianjiang, LI Ronggui, et al. A control strategy of ‘virtual negative’ impedance for inverters in low-voltage micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(12): 1844-1852.
- [16] 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 micro-grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(25): 126-132.

收稿日期: 2015-01-28; 修回日期: 2015-04-16

#### 作者简介:

闫俊丽(1990-), 女, 硕士研究生, 从事微电网电能质量控制、分布式发电控制技术研究;

彭春华(1973-), 男, 博士, 教授, 从事电力系统优化调度、分布式发电控制、微电网运行等研究; E-mail: chinapch@163.com

陈 臣(1988-), 男, 硕士研究生, 从事微电网建模与继电保护研究。

(编辑 周金梅)