

减小逆变器下垂控制中虚拟阻抗所致 电压偏差的方法研究

陆善婷¹, 杨敏红², 程军照³

(1. 上海工程技术大学工程实训中心, 上海 201620; 2. 国网上海市电力公司市南供电公司, 上海 201100;
3. 云南电网有限责任公司电网规划研究中心, 云南昆明 650011)

Reduction of Voltage Deviation Induced by Virtual Impedance in Droop Control of Parallel Inverters

LU Shanting¹, YANG Minhong², CHENG Junzhao³

(1. Engineering Practical Training Center, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;
2. Southern Urban Branch of Shanghai Electric Power Company, SGCC, Shanghai 201100; China;
3. Power Grid Planning and Research Center, Yunnan Power Grid Corporation, Kunming 650011, China)

摘 要: 虚拟阻抗可以灵活改变线路阻抗, 和下垂控制结合可取得较好效果, 在微网中应用广泛。但虚拟阻抗会导致电压偏差, 目前该问题尚无有效的解决方法。针对这一问题, 本文将虚拟阻抗和功率坐标变换结合, 对有功 P 及无功 Q 进行功率坐标变换, 得到广义有功 P_d 和广义无功 Q_d 。根据微网总负荷的功率因数选取虚拟阻抗角, 使虚拟阻抗造成的电压降落的纵分量为零, 从而大幅减小电压偏差。采用 P_d-f 下垂, 舍弃 Q_d-U 下垂, 按照逆变器容量的反比选择下垂系数和虚拟阻抗值的大小。通过上述措施实现了有功 P 和无功 Q 的按比例分担并大幅减小了电压偏差, 仿真证明了本文所提方法的有效性。

关键词: 微网; 下垂控制; 虚拟阻抗; 功率坐标变换; 电压偏差

Abstract: Virtual impedance is widely used in the microgrid since it can change line impedance as required and achieve the favorable effect when combined with the droop control. However, the virtual impedance will bring about the voltage deviation, which cannot be solved by using present methods. Aiming at this problem, this paper combines virtual impedance and power coordinate transformation to implement power coordinate transformation for active power P and reactive power Q , by which general active power P_d and reactive power Q_d is got. Virtual impedance angle is chosen according to power factor of microgrid's total load so as to eliminate the longitudinal component of voltage drop deviation.

基金项目: 上海工程技术大学实践教学建设自助项目 (p201724005)

tion due to virtual impedance, by which voltage deviation is reduced greatly. Droop control P_d-f is adopted and Q_d-U is abandoned while droop coefficients are chosen in inverse proportion to rated capacity of inverters and impedance virtual magnitude is chosen in inverse proportion to rated capacity of inverters. In this way, proportional sharing of active power P and reactive power Q are realized while voltage deviation is reduced. The simulation confirms the effectiveness of the proposed method in this paper.

Keywords: microgrid; droop control; virtual impedance; power coordinate transformation; voltage deviation

0 引 言

下垂控制是微网中常用的控制方法, 它包括适用于感性线路的 $P-f$, $Q-U$ 下垂^[1]和适用于阻性线路的 $P-U$, $Q-f$ 下垂^[2]。在下垂控制的基础上出现了一些改进方法, 其中文献 [3] 利用线路 R/X 信息构建虚拟有功和虚拟无功, 组成新的下垂控制, 文献 [4] 对此也有介绍, 该方法适用于各种线路阻抗特性, 但有时 R/X 信息难以获取; 基于虚拟阻抗的下垂控制能灵活改变线路阻抗, 具有很强的适应性^[5-6]。此外, 还有改善动态性能的自适应下垂控制方法^[7]。

下垂控制会导致频率偏差, 针对该问题有学者提出了 $P-\delta$ 、 $Q-U$ 下垂控制^[8], 可以消除频率偏差。下垂控制的另一个主要问题是会带来电压偏

差, 引入虚拟阻抗会使电压偏差更加突出。为了解决这一问题, 文献 [9] 提出了一种电压恢复机制, 但该方法需要所有 DG 精确地在同一时刻进行电压调整, 对时间同步要求极高。文献 [10] 提出了定期修改下垂系数的控制方法, 可以减小下垂引起的频率和电压偏差, 但无法消除虚拟阻抗引起的电压偏差, 且需要所有 DG 精确地在同一时刻调整下垂系数, 对时间同步系统要求极高。文献 [11] 提出了容性虚拟阻抗的方法, 改善微网电压, 但该文未定量分析容性虚拟阻抗对电压的影响以及如何选择容性虚拟阻抗的大小。文献 [12] 提出了一种控制方法, 可以提高微网电压质量且不需要严格的时间同步, 但该方法需要 DG 和其相邻 DG 之间存在通信。文献 [13] 提出了一种控制方法, 可以提高微网电压质量, 但该文仅适用于等容量 DG 的控制, 无法实现不等容量逆变器的负荷按比例分担。文献 [14] 提出了基于功率坐标变换相结合的方法, 可以大幅减小频率偏差, 但无法消除虚拟阻抗所致的电压偏差。

本文针对虚拟阻抗带来的电压偏差问题, 提出了一种新的控制方法。该方法以下垂控制, 虚拟阻抗以及功率坐标变换相结合的方法为基础, 根据微网总负荷的功率因数, 通过虚拟阻抗合理选择, 消除虚拟阻抗造成的电压偏差纵分量, 从而大幅减小了电压偏差。本文方法不需要通信, 不仅可实现不等容逆变器并联运行时的负荷按比例分担, 而且可大幅减小虚拟阻抗所致的电压偏差, 仿真结果表明了本文所提方法的有效性。

1 虚拟阻抗的原理

并联逆变器可等效为电压源与系统阻抗串联的形式, 如图 1 所示。图中: E 和 φ 分别为电压和功角; Z 和 θ 分别为线路阻抗的模和阻抗角; R 和 X 分别为线路电阻和感抗; U_b 为交流母线电压有效值。

$$P = \frac{E[R(E - U_b \cos\varphi) + U_b X \sin\varphi]}{R^2 + X^2} \quad (1)$$

$$Q = \frac{E[X(E - U_b \cos\varphi) - U_b R \sin\varphi]}{R^2 + X^2} \quad (2)$$

逆变器注入微网的有功及无功如式(1)和式(2)所示。当线路为感性, 由式(1)、(2)可知, P 主要取决于相角差, Q 主要取决于电压幅值差, 此时可使用 P - f 、 Q - U 下垂; 当线路为阻性时, 由式(1)、

(2)可知, P 主要取决于电压幅值差, Q 主要取决于电压相角差, 此时可使用 P - U 、 Q - f 下垂。但微网线路的电阻和电感具有可比性, 有功 P 和无功 Q 之间存在较强的耦合, 下垂控制的性能受到较大影响。

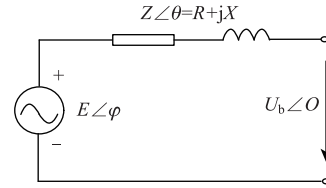


图 1 并联逆变器等效电路图

Fig. 1 Equivalent circuit model for parallel inverter

为了解决上述问题, 有学者提出了虚拟阻抗的方法, 其基本原理如式(3)所示, 电压 \dot{E} 减去逆变器输出电流 \dot{I}_o 在虚拟阻抗 Z_v 上的压降得到逆变器的指令电压 \dot{U}_{ref} , 控制逆变器输出电压跟踪该指令电压。

$$\dot{U}_{ref} = \dot{E} - Z_v \times \dot{I}_o \quad (3)$$

由式(3)可知, 由于虚拟阻抗 Z_v 是人为设置的量, 可以按照要求配置, 从而灵活地改变线路等效阻抗。

2 功率坐标变换控制方法

假设 $Z_v = R_v + jX_v$ 为加入的虚拟阻抗, 则可以得到:

$$P \approx \frac{E[R_v(E - U_b \cos\varphi) + U_b X_v \sin\varphi]}{R_v^2 + X_v^2} \quad (4)$$

$$Q \approx \frac{E[X_v(E - U_b \cos\varphi) - U_b R_v \sin\varphi]}{R_v^2 + X_v^2} \quad (5)$$

利用参考文献 [3] 中的方法, 进行功率坐标变换得到:

$$P_d = P \sin\theta_v - Q \cos\theta_v = \frac{EU_b \sin\varphi}{\sqrt{R_v^2 + X_v^2}} \quad (6)$$

$$Q_d = P \cos\theta_v + Q \sin\theta_v = \frac{E(E - U_b \cos\varphi)}{\sqrt{R_v^2 + X_v^2}} \quad (7)$$

其中 $\sin\theta_v = \frac{X_v}{\sqrt{R_v^2 + X_v^2}}$, $\cos\theta_v = \frac{R_v}{\sqrt{R_v^2 + X_v^2}}$ 。 P_d 和 Q_d

分别定义为广义有功和广义无功, 由公式(6)可知, P_d 主要取决于频率, 则有下垂控制如式(8)所示:

$$f = f^* - m(P_d - P_d^*) \quad (8)$$

P_d^* 为额定广义有功, 可由逆变器的额定功率经坐标变换得到, 为便于讨论, 本文假设 $P_d^* = 0$ 。

下面需要研究如何实现 P 和 Q 的按比例分担。

由(6)、式(7)可得(9)、(10):

$$P = P_d \sin \theta_v + Q_d \cos \theta_v \quad (9)$$

$$Q = Q_d \sin \theta_v - P_d \cos \theta_v \quad (10)$$

根据(9)、(10),任意两个编号为*i*、*j*且额定容量为*S_i*、*S_j*的DG的*P*、*Q*之比如式(11)和(12)所示:

$$\frac{P_i}{P_j} = \frac{P_{di} \sin \theta_v + Q_{di} \cos \theta_v}{P_{dj} \sin \theta_v + Q_{dj} \cos \theta_v} \quad (11)$$

$$\frac{Q_i}{Q_j} = \frac{Q_{di} \sin \theta_v - P_{di} \cos \theta_v}{Q_{dj} \sin \theta_v - P_{dj} \cos \theta_v} \quad (12)$$

仔细观察(11)、(12)式可知,若广义功率满足式(13):

$$\frac{P_{di}}{P_{dj}} = \frac{Q_{di}}{Q_{dj}} = \frac{S_i}{S_j} \quad (13)$$

根据等比定理可得式(14):

$$\frac{P_i}{P_j} = \frac{Q_i}{Q_j} = \frac{S_i}{S_j} \quad (14)$$

通过式(13)和式(14)可知,要实现逆变器*P*和*Q*的按容量比例分担,只需控制逆变器的*P_d*和*Q_d*按逆变器的容量比例分配即可。由文献[14]可知,为实现这一目标,只需按照逆变器额定容量的反比选择广义有功下垂系数*m*和虚拟阻抗*Z_v*=*R_v*+*jX_v*。

3 电压偏差的减小

虚拟阻抗会导致电压偏差,且虚拟阻抗值越大,电压偏差也越大,分析如下:

假设引入的虚拟阻抗为*Z_v*=*R_v*+*jX_v*,逆变器输出电压和电流分别为*U_o*和*I_o*,虚拟阻抗造成的电压偏差如图2所示,电压偏差主要包括纵分量*ΔU*和横分量*δU*,如式(15)和式(16)所示:

$$\Delta U = \frac{PR_v + QX_v}{U_o} \quad (15)$$

$$\delta U = \frac{PX_v - QR_v}{U_o} \quad (16)$$

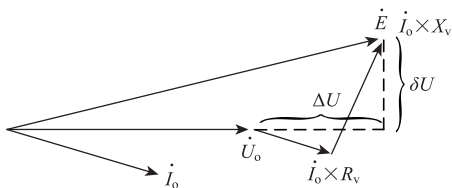


图2 虚拟阻抗导致的电压偏差

Fig. 2 Voltage deviation due to virtual impedance

由图2所示,电压偏差主要取决于纵分量*ΔU*,由式(15)可知,纵分量*ΔU*的大小和虚拟阻抗有

关,由于虚拟阻抗是任取的,如果虚拟阻抗满足式(17),就可使电压偏差的纵分量*ΔU*为零。

$$\frac{X_v}{R_v} = -\frac{P}{Q} = -\frac{\frac{S}{S_\Sigma} P_\Sigma}{\frac{S}{S_\Sigma} Q_\Sigma} = -\frac{P_\Sigma}{Q_\Sigma} = -\cot \delta \quad (17)$$

式中:*S*为该逆变器的额定容量;*S_Σ*为微网中所有DG额定容量之和;*P_Σ*、*Q_Σ*分别为微网总有功及总无功之和;*δ*为微网总负荷的功率因数角,由于微网负荷功率因数并非确定值,给应用带来一定困难。假设按照功率因数角*δ₀*取虚拟阻抗,将*δ₀*代入式(17)得式(18):

$$PR_v + QX_v = (S \cos \delta_0) R_v + (S \sin \delta_0) X_v = 0 \quad (18)$$

由于实际负荷功率因数角是变动的,并非总是保持在*δ₀*,下面对负荷功率因数变化时上述处理方法所造成的误差进行分析,假设负荷功率因数角在*δ₀*的基础上变化了*Δδ*,代入式(15)得式(19):

$$\Delta U = \frac{PR_v + QX_v}{U_o} = \frac{S \cos(\delta_0 + \Delta\delta) R_v + S \sin(\delta_0 + \Delta\delta) X_v}{U_o} \quad (19)$$

结合式(18)对式(19)进行化简得到式(20):

$$\Delta U = \frac{S \sin \Delta\delta (-R_v \sin \delta_0 + X_v \cos \delta_0)}{U_o} \quad (20)$$

由式(20)可知,电压偏差主要取决于功率因数角的波动范围,功率因数角波动越小,电压偏差越小。在实际应用中并不需要实时变动,可以将功率因数分为若干区间,当功率因数处于该区间时,保持*X_v*/*R_v*=-cot*δ₀*不变。本文按照平均功率因数取*δ₀*,如式(21)所示:

$$\delta_0 = \arccos \frac{\lambda_1 + \lambda_2}{2} \quad (21)$$

式中:*λ₂*为区间上限;*λ₁*为区间下限。

综上所述,本文控制方法的流程为

① 确定负荷的平均功率因数变动区间 [*λ₁* *λ₂*],根据式(21)计算得到*δ₀*为每台逆变器引入虚拟阻抗*Z_v*=*R_v*+*jX_v*,且*X_v*/*R_v*=-cot*δ₀*; *Z_v*的模和逆变器的额定容量成反比;

② 用式(8)计算逆变器的频率,积分并乘以2*π*后得到相角,下垂系数*m*按照逆变器额定容量的反比选取。

③ 对于每台逆变器，选择相同的电压值 E ，按照式 (22) 计算逆变器 ABC 三相的指令电压 $u_{\text{ref}(a)}$ 、 $u_{\text{ref}(b)}$ 、 $u_{\text{ref}(c)}$ ：

$$\left. \begin{aligned} u_{\text{ref}(a)} &= \sqrt{2}E\sin(\omega t + \varphi) - R_v i_{(a)} - \frac{\int i_{(a)} dt}{C_v} \\ u_{\text{ref}(b)} &= \sqrt{2}E\sin\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right) - R_v i_{(b)} - \frac{\int i_{(b)} dt}{C_v} \\ u_{\text{ref}(c)} &= \sqrt{2}E\sin\left(\omega t + \varphi - \frac{4\pi}{3}\right) - R_v i_{(c)} - \frac{\int i_{(c)} dt}{C_v} \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

式中： ω 为工频角频率； C_v 为 X_v 对应的虚拟电容； $i_{(a)}$ 、 $i_{(b)}$ 、 $i_{(c)}$ 为逆变器三相输出电流。

④ 控制逆变器跟踪其指令电压 $u_{\text{ref}(a)}$ 、 $u_{\text{ref}(b)}$ 、 $u_{\text{ref}(c)}$ 。

4 仿 真

利用 Matlab 搭建线电压为 380V 的微网仿真模型，该微网含有两个容量比为 1:2 的三相三桥臂逆变器，带两个线性负荷，如图 3 所示，其中线路阻抗： $Z_{L1} = Z_{L2} = 0.1 + j0.1$ 。仿真共分为两大部分：① 本文方法和文献 [14] 中的传统虚拟阻抗方法的对比；② 负荷功率因数波动时本文方法的控制效果。如无特别说明，本文所列阻抗值均为工频值。

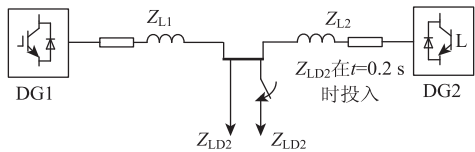


图 3 微网仿真模型

Fig. 3 Microgrid simulation model

4.1 本文方法和传统虚拟阻抗法的对比仿真

该部分仿真的参数设置为： $Z_{LD1} = Z_{LD2} = 18.84 + j9.42$ 。采用本文方法和文献 [14] 中的传统虚拟阻抗方法进行仿真，两种方法的参数设置如表 1 所示。根据两种方法的要求，为了使逆变器按容量比例分担负荷，在本文控制方法和传统虚拟阻抗控制方法中，下垂系数按照逆变器容量反比选择，虚拟阻抗也按照逆变器容量反比选择。

表 1 对比仿真参数设置

Tab. 1 Parameters for comparison simulation

控制方法	DG 编号	下垂系数 m	虚拟阻抗
本文方法	DG1	4×10^{-5}	$1.256 - j2.512$
	DG2	2×10^{-5}	$0.628 - j1.256$
传统虚拟阻抗方法	DG1	4×10^{-5}	$2.512 + j1.256$
	DG2	2×10^{-5}	$1.256 + j0.628$

为了更好的对比，两种方法对应的虚拟阻抗的模值是完全相等的，区别在于本文方法对应的参数设置完全符合公式(17)要求，传统虚拟阻抗方法不符合公式(17)要求。

图 4 是两种方法的负荷分担情况，由此图可以看出：本文方法和传统虚拟阻抗方法都可以基本实现有功 P 和无功 Q 的按比例分担。

表 2 是两种方法输出电压值，其中电压偏差一栏中“/”之前的是本文方法的电压偏差，“/”之后的是传统方法的电压偏差，由此表可知，采用本文方法，虽然引入了较大的虚拟阻抗，但 DG 输出电压幅值偏差很小，并且负荷增加后，电压偏差增加的幅度也很小；而采用传统虚拟阻抗方法，引入同样模值的虚拟电阻，导致了较大的 DG 输出电压偏差，而且 0.2s 负荷增加后，电压偏差也明显增加。

表 2 DG 输出电压的有效值

Tab. 2 RMS value of inverters' output voltage

DG 编号	0.2s 之前			0.2s 之后		
	本文方法	传统方法	电压偏差(本文方法/传统方法)	本文方法	传统方法	电压偏差(本文方法/传统方法)
DG1	219.4	210.0	-0.6/-10	218.6	201.1	-1.4/-18.9
DG2	219.8	210.5	-0.2/-9.5	219.5	201.9	-0.5/-18.1

4.2 功率因数波动时的仿真

该部分仿真针对负荷功率因数波动时本文方法的效果进行，假设微网负荷波动区间为 $[0.7, 0.9]$ ，则根据式(21)计算得到 $\delta_0 = 0.644$ ， $X_v/R_v = -1.333$ ，该部分的其他参数设置如表 3 所示。

DG 控制器保持表 3 所示的参数不变，线性负荷功率因数在 $[0.7, 0.9]$ 之间变动，在负荷功率因数变动过程中，线性负荷 Z_{LD1} 、 Z_{LD2} 的模值均保持为 21.0638Ω 。对上述情况进行仿真，得到不同负荷功率因数下 DG 输出电压值，如表 4 所示。

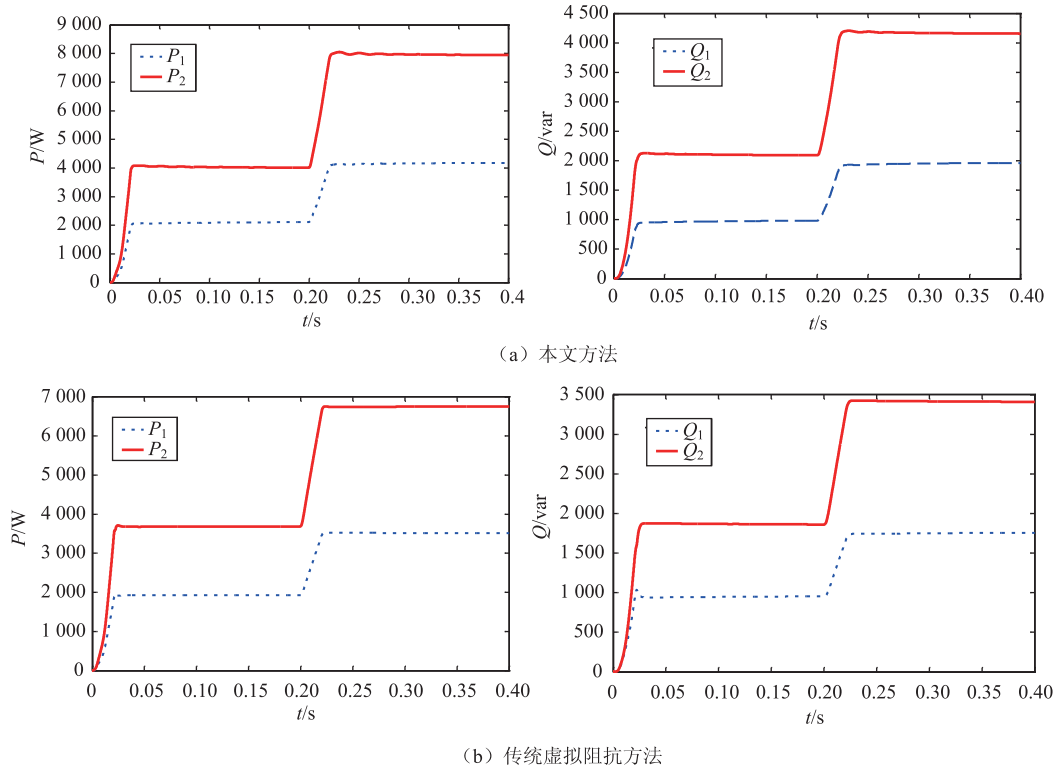


图4 负荷分担情况

Fig. 4 Power sharing result

表3 功率因数波动时仿真参数设置

Tab. 3 Control parameters for simulation in case of power factor variation

DG 编号	下垂系数 m	虚拟阻抗
DG1	4×10^{-5}	$1.256 - j1.6746$
DG2	2×10^{-5}	$0.628 - j0.8371$

表4 微网负荷功率因数变动时 DG 输出电压

Tab. 4 Voltage output of DG in case of power factor variation

功率因数	DG 编号	V	
		0.2s 之前	0.2s 之后
$\cos\delta=0.70$	DG1	220.7	221.3
	DG2	221.2	222.2
$\cos\delta=0.75$	DG1	220.2	220.2
	DG2	220.7	221.2
$\cos\delta=0.80$	DG1	219.6	219.0
	DG2	220.1	220.0
$\cos\delta=0.85$	DG1	219.0	217.8
	DG2	219.5	218.7
$\cos\delta=0.90$	DG1	216.2	216.3
	DG2	217.1	217.2

由表4可知,采用本文方法,负荷功率因数在

一定区间内变动时, DG 输出电压的偏差仍然很小,相比于额定值 220V,电压最大偏差为 1.7%,本文方法仍然具有较好效果。

5 结论

本文对一种减小微网虚拟阻抗控制中电压偏差的方法进行了研究,得出以下结论:

① 虚拟阻抗所致电压偏差包括纵分量和横分量,电压偏差的大小主要由纵分量决定;

② 将下垂控制和功率坐标变化相结合,根据负荷功率因数角 δ 选择虚拟阻抗 $Z_v = R_v + jX_v$,使之满足 $\frac{X_v}{R_v} = -\cot\delta$,则可以消除电压偏差纵分量,从而大幅减小虚拟阻抗导致的电压偏差;

③ 当功率因数在一定区间内波动,而按本文方法选定 $\frac{X_v}{R_v}$ 保持不变时, DG 输出电压的偏差仍然很小,本文方法仍然具有较好效果;

④ 本文方法不需要逆变器之间通信,不仅可实现不等容逆变器并联运行时的负荷按比例分担,而且可大幅减小虚拟阻抗所致的电压偏差,仿真

结果表明了本文所提方法的有效性。

参 考 文 献

- [1] LASSETER R H, ETO J H, SCHENKMAN B, et al. CERTS microgrid laboratory test bed [J]. IEEE transactions on power delivery, 2011, 26(1): 325 - 332.
- [2] 牟晓春, 毕大强, 任先文. 低压微网综合控制策略设计 [J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 91 - 96.
MOU Xiaochun, BI Daqiang, REN Xianwen. Study on control strategies of a low voltage microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 91 - 96.
- [3] KAREL De Brabandere, BRUNO Bolsens, JEROEN Van Den Keybus, et al. A Voltage and frequency droop control method for parallel inverters [J]. IEEE Trans on Power Electronics, 2007, 22(4): 1107 - 1115.
- [4] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid [J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 1 - 7.
- [5] GUERRERO J M, Matas José, LUIS García De Vicuña. Wireless-control strategy for parallel operation of distributed-generation inverters [J]. IEEE Transactions on Industry Electronics, 2006, 53(5): 1461 - 1470.
- [6] 袁敞, 丛诗学, 徐衍会. 应用于微电网的并网逆变器虚拟阻抗控制技术综述 [J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(9): 144 - 154.
YUAN Chang, CONG Shixue, XU Yanhui. Overview on grid-connected inverter virtual impedance technology for microgrid [J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(9): 144 - 154.
- [7] 唐昆明, 王俊杰, 张太勤. 基于自适应下垂控制的微电网控制策略研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(18): 68 - 74.
TANG Kunming, WANG Junjie, ZHANG Taiqin. Research on control strategy for microgrid based on adaptive droop control [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(18): 68 - 74.
- [8] MAJUMDER R, CHAUDHURI B, GHOSH A, et al. Improvement of stability of load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2): 796 - 808.
- [9] 韩华, 刘尧, 孙尧, 等. 一种微电网无功均分的改进控制策略 [J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2639 - 2648.
HAN Hua, LIU Yao, SUN Yao, et al. An improved control strategy for reactive power sharing in micro-grid [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2639 - 2648.
- [10] 郑永伟, 陈民铀, 李闯, 等. 自适应调节下垂系数的微电网控制策略 [J]. 电力系统自动化, 2013, 37(7): 6 - 11.
ZHENG Yongwei, CHEN Minyou, LI Chuang, et al. A microgrid control strategy based on adaptive drooping coefficient adjustment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(7): 6 - 11.
- [11] 吕志鹏, 刘海涛, 苏剑, 等. 可改善微网电压调整的容性等效数阻组阻抗逆变器 [J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(9): 1 - 9.
LV Zhipeng, LIU Haitao, SU Jian, et al. Micro-source inverters with capacitive equivalent output impedance for improving micro-grid voltages [J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(9): 1 - 9.
- [12] ZHANG Huaguang, KIM Sunghyok, SUN Qiuye, 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.
- [13] SUN Xiaofeng, HAO Yancong, WU Qingfeng, et al. A multifunctional and wireless droop control for distributed energy storage units in islanded ac micro-grid applications [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 32(1): 736 - 751.
- [14] 程军照, 王文玺, 陈江波. 采用功率坐标变换的微网并联逆变器控制方法 [J]. 电力系统自动化, 2017, 41(1): 117 - 121.
CHENG Junzhao, WANG Wenxi, CHEN Jiangbo. Control method for parallel inverters in microgrid based on power coordinate transformation [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(1): 117 - 121.

收稿日期: 2018-01-04

作者简介:

陆善婷(1988—), 女, 实验师, 硕士, 主要研究方向为配电网和分布式发电, E-mail: lu0910@yeah.net;

杨敏红(1989—), 女, 工程师, 硕士研究生, 主要研究方向为电气试验研究工作, E-mail: ymhong2012@163.com;

程军照(1982—), 通信作者, 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事分布式发电和微电网相关研究工作, E-mail: chengjunzhao@126.com.

(责任编辑: 林海文)