

利用有功功率扰动的微网孤岛下垂控制策略

林克文,肖飞,揭贵生,范学鑫,谢桢

(海军工程大学 舰船综合电力技术国防科技重点实验室,湖北 武汉 430033)

摘要:对于孤岛模式运行的微网中的并联逆变器,其功率分配主要受逆变器输出阻抗和输出端与公共连接点之间线路阻抗差异的影响。以感性输出阻抗为例,从逆变器并联的功率传输特性出发,分析了线路阻抗差异对并联逆变器无功功率分配的影响。为了提高无功功率的均分精度,提出了一种改进型下垂控制策略,在有功频率下垂中加入无功功率,利用有功扰动反映无功分配偏差,在无功幅值下垂中加入可调下垂系数,通过消除有功扰动调节下垂系数补偿线路阻抗差异实现稳态时无功均分。仿真和实验验证了改进下垂控制策略的正确性和有效性。

关键词:逆变器;孤岛模式;有功功率扰动;功率均分;线路阻抗

中图分类号:TM464 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed19434

Droop Control Strategy in Microgrid Isolated Island Mode Using Active Power Disturbance

LIN Kewen, XIAO Fei, JIE Guisheng, FAN Xuexin, XIE Zhen

(National Key Laboratory of Science and Technology on Vessel Integrated Power System,
Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China)

Abstract: The power distribution of the parallel inverters in the microgrid operation with the island mode, is mainly influenced by the output impedance of the inverter and the difference of the line impedance between the output end and the common connection point. Started from power transmission characteristics of parallel inverters, the influence of line impedance difference on reactive power sharing between inductive inverters was analyzed. In order to improve the reactive power sharing accuracy, an improved droop control strategy was proposed. A term of reactive power was added to the conventional real power-frequency droop control and an adjustable droop coefficient was added to the conventional reactive power-voltage droop control. The transient real power variation caused by reactive power was captured to realize adjustable droop coefficient tuning. With the regulation of droop coefficient, line impedance difference was compensated and accurate reactive power sharing was realized at the steady state. Simulations and experimental results prove the correctness and effectiveness of the improved droop control strategy.

Key words: inverter; isolated island mode; active power disturbance; power sharing; line impedance

随着经济的发展和能源需求的增长,能源发展面临资源和环境的巨大挑战,以风能、太阳能等分布式能源为支撑的微网成为能源转型的方向^[1]。微网孤岛模式运行时,分布式能源接口逆变器并联运行,采用合理的并联控制方法均衡逆变器之间的功率分配是亟待解决的问题^[2]。

下垂控制利用频率和电压下垂调节逆变器输出有功功率和无功功率,由于其只需要逆变器本地信息,不需要互连线,因此得到了广泛研究^[3]。然而由于逆变器输出阻抗以及与公共连接

点之间的线路阻抗存在差异,采用传统下垂控制时功率均分精度很低^[4]。

对于阻抗差异引起的功率不均分问题,国内外学者开展了大量研究。文献[5]提出在线辨识逆变器输出端与公共连接点之间的线路阻抗,根据辨识结果进行补偿实现无功均分,但是这种方法局限于并联连接方式。通过引入虚拟阻抗,将逆变器输出阻抗设计成阻性^[6]、感性^[7]和阻感性^[8],通过配置虚拟阻抗改变逆变器输出阻抗特性,改善了功率均分。但是这种恒定的虚拟阻抗

基金项目:国家重点基础研究发展计划(973计划)(2015CB251004);国家自然科学基金资助项目(51507184)

作者简介:林克文(1989-),男,博士,助理研究员,Email: kewenlin@163.com

方法只能减小线路阻抗差异的影响,不能消除均分误差。文献[9]采用自适应虚拟阻抗,提高了功率均分精度,但也只能控制无功分配偏差在一定范围内。文献[10]通过无功偏差动态设置虚拟阻抗补偿线路阻抗的不匹配,实现无功精确均分,但是需要逆变器单元与中央控制器进行无功信息的传递。文献[11]通过测量逆变器输出电流和公共连接点电压估计线路阻抗,再通过虚拟阻抗补偿线路阻抗差异实现无功均分。文献[12-14]在无功-电压下垂公式中构建了关于公共连接点电压的积分控制来保证无功功率均分。但是实际情况中公共连接点电压可能难以获得。文献[15]提出在频率下垂中加入无功项用来控制无功功率的均分,电压下垂中加入积分控制来保证有功的精确均分。但是需要通过低带宽通信控制、并联逆变器补偿同时进行,当负载变化而补偿信号丢失时,逆变器功率不能均分。

本文以等效输出阻抗为感性为例,在分析并联逆变器功率分配机理的基础上,分析了线路阻抗差异影响功率分配的原因,提出了一种利用有功功率扰动实现无功均分的下垂控制策略。在有功功率下垂方程中加入无功项,在无功幅值下垂中引入加入系数为有功积分项的无功项,通过消除加入无功项前后的有功偏差来调节下垂系数,最终实现有功功率和无功功率的均分。这种下垂控制策略仅需要简单的、低宽带的补偿信号通信,不需要各逆变器之间的信息。仿真和实验证明了所提改进下垂控制策略的有效性。

1 并联系统功率分配分析

1.1 并联系统功率分配机理

图1为2台逆变器并联运行时等效电路图。 $U_1 \angle \varphi_1, U_2 \angle \varphi_2, U_{pcc} \angle 0$ 分别为逆变器1空载输出电压、逆变器2空载输出电压、并联点电压; φ_1, φ_2 为逆变器1,逆变器2的输出电压相位。 $Z_i = R_i + jX_i$ ($i=1, 2$)为逆变器1、逆变器2的输出阻抗和线路阻抗之和; δ_1, δ_2 为输出阻抗的相位。

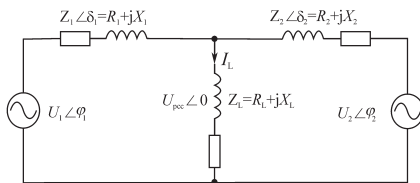


图1 2台逆变器并联运行的等效输出模型

Fig.1 The equivalent output model of two inverters running in parallel

逆变器 i 的输出有功功率 P_i 和无功功率 Q_i 可以写为^[16]

$$\begin{cases} P_i = \frac{U_{pcc} U_i \cos(\varphi_i - \delta_i) - U_{pcc}^2 \cos \delta_i}{Z_i} \\ Q_i = -\frac{U_{pcc} U_i \sin(\varphi_i - \delta_i) + U_{pcc}^2 \sin \delta_i}{Z_i} \end{cases} \quad (1)$$

在低压线路中,线路阻抗一般成阻性。但是逆变器配置的LC或LCL滤波器使得其等效输出阻抗呈感性,同时通过对逆变器闭环控制器参数的合理设计,可使得逆变器的输出阻抗呈感性。因此本文以等效输出阻抗呈感性进行分析,式(1)可以写为

$$\begin{cases} P_i = \frac{U_{pcc} U_i \sin \varphi_i}{X_i} \\ Q_i = \frac{U_{pcc} U_i \cos \varphi_i - U_{pcc}^2}{X_i} \end{cases}$$

在系统并联运行时,单台逆变器的输出电压与并联母线上的电压相位差别很小,所以都近似地认为 $\sin \varphi_i \approx \varphi_i, \cos \varphi_i \approx 1$ 。因此可以表示为

$$\begin{cases} P_i = \frac{U_{pcc} U_i \varphi_i}{Z_i} \\ Q_i = \frac{U_{pcc} U_i - U_{pcc}^2}{Z_i} \end{cases} \quad (2)$$

从式(2)可知,通过调节相位和幅值可以分别控制有功和无功功率。实际中常通过调节输出电压的角频率来实现相位调节^[16]。利用简单的一次函数实现下垂控制,可得下垂控制方程为

$$\begin{cases} \omega_i = \omega^* - m P_i \\ U_i = U^* - n Q_i \end{cases} \quad (3)$$

式中: ω^*, U^* 分别为额定输出频率和额定输出电压; m, n 分别为有功功率/频率(P/ω)下垂系数和无功功率/电压(Q/U)下垂系数。

1.2 无功功率不均分原因

孤岛模式逆变器并联系统如图2所示。逆变器与并联母线之间的线路阻抗分别为 $R_1 + jX_1, R_2 + jX_2$,其中 $R=R_2, X=X_2$,线路阻抗差异为 $\Delta R=R_1-R_2, \Delta X=X_1-X_2$ 。

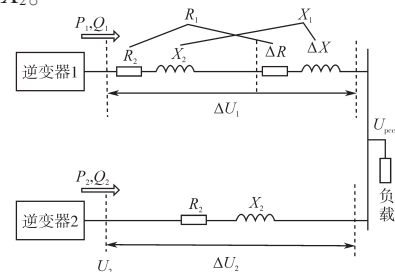


图2 孤岛模式逆变器并联系统

Fig.2 Inverter parallel system in isolated island mode of inverter

逆变器并联母线电压为 U_{pcc} , 逆变器输出端电压可写成下式:

$$\begin{cases} U_1 = U_{pcc} + \frac{R_1 P_1}{U^*} + \frac{X_1 Q_1}{U^*} \\ U_2 = U_{pcc} + \frac{R_2 P_2}{U^*} + \frac{X_2 Q_2}{U^*} \end{cases} \quad (4)$$

而又由传统下垂控制有逆变器输出电压为

$$\begin{cases} U_1 = U^* - nQ_1 \\ U_2 = U^* - nQ_2 \end{cases} \quad (5)$$

式中: P_1, Q_1 和 P_2, Q_2 分别为流过线路阻抗的有功和无功功率^[15]。

因此逆变器采用下垂控制并联时, 系统功率的分配由式(4)的输出电压与线路阻抗特性斜线和式(5)的下垂控制斜线共同决定, 2条直线的交点就是对应的无功功率, 如图3所示。可知2台并联逆变器线路阻抗不相等时, 线路阻抗大的逆变器分配的无功功率小。即有 $\Delta R \geq 0, \Delta X \geq 0$ 时, $Q_1 < Q_2$ 。

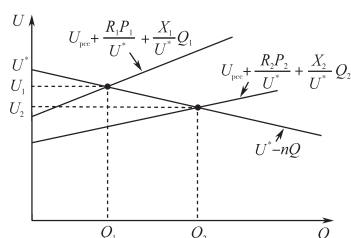


图3 传统下垂控制无功功率分配曲线

Fig.3 Reactive power distribution of traditional droop control

2 有功扰动的功率均分策略

当线路阻抗 $Z_1 > Z_2 (R_1 \geq R_2, X_1 \geq X_2)$ 时, 采用传统下垂控制, 有功功率能够均分, 设均分值为 P_{AVE} , 无功功率不能均分, 有:

$$\begin{cases} P_1 = P_2 = P_{AVE} \\ Q_1 < Q_2 \end{cases}$$

利用有功功率扰动的下垂控制方程如下式所示:

$$\begin{cases} \omega_i = \omega^* - mP_i - kQ_i \\ U_i = U^* - nQ_i - \frac{K_i}{s}(P_{AVE} - P_i)Q_i \end{cases} \quad (6)$$

式中: k 为无功系数; K_i 为积分系数, 当并联逆变器取相同的 m 和 k 时, 由于频率下垂的无差调节, 因此有:

$$mP_1 + kQ_1 = mP_2 + kQ_2 \quad (7)$$

由式(7)可知, 当并联逆变器无功功率不均分时, 会导致有功功率相对传统下垂控制的值发生变

化, 有:

$$\begin{cases} P_2 < P_{AVE} < P_1 \\ Q_1 < Q_2 \end{cases}$$

在无功—电压下垂方程中加入系数为有功积分项的无功项, 如式(6)所示。通过积分器的无差调节使有功功率重新等于 P_{AVE} 。通过对有功功率的积分, 实现对无功—电压下垂方程中下垂系数的调整, 进而实现无功的均分。最终可以实现有功功率和无功功率的均分, 存在下式:

$$\begin{cases} P_1 = P_2 = P_{AVE} \\ Q_1 = Q_2 \end{cases}$$

下垂系数调整量 $\tilde{n}_i$ 为

$$\tilde{n}_i = \frac{K_i}{s}(P_{AVE} - P_i) \quad (8)$$

实现功率均分后, 恢复采用下垂系数调整后的传统下垂控制方程

$$\begin{cases} \omega_i = \omega^* - mP_i \\ U_i = U^* - (n + \tilde{n}_i)Q_i \end{cases} \quad (9)$$

改进下垂控制流程图如图4所示, 补偿信号 G 为一个门信号, 控制实施改进下垂控制。



图4 改进下垂控制流程图

Fig.4 Flow chart of improved droop control

图4中, 当 $G=0$ 时无效, $G=1$ 时有效, 整个控制过程分为以下3个步骤:

1) 补偿信号 G 无效, 采用式(3)的传统下垂控制方程, 控制器对均分的有功功率进行滑动平均;

2) 补偿信号 G 有效, 控制器停止对有功功率求滑动平均, 并采集保持信号 G 有效上一时刻的有功平均值 P_{AVE} , 采用式(6)的下垂控制方程, 实现无功功率的均分, 补偿信号 G 有效时间大于积分时间;

3) 无功功率实现均分后, 补偿信号 G 无效采用式(9)的传统下垂控制方程。

并联的逆变器之间采用通信实现补偿控制的同步, 不同于集中控制和主从控制等并联控制时逆变器之间的互连线, 实现补偿控制同步的通信对带宽和实时性的要求低。改进下垂控制框图如图5所示。

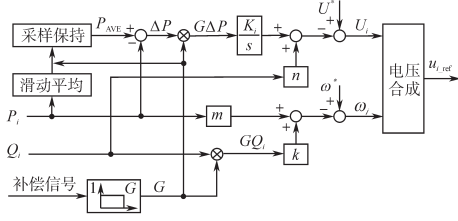


图5 改进下垂控制框图

Fig.5 Block diagram of improved droop control

2台并联的逆变器稳态时有功功率和无功功率均分后有 $P_1=P_2=P$, $Q_1=Q_2=Q$,由式(4)、式(9)得:

$$\begin{cases} \Delta U_1 - \Delta U_2 = (\tilde{n}_2 - \tilde{n}_1)Q \\ \Delta U_1 - \Delta U_2 \approx \frac{\Delta XQ + \Delta RP}{U^*} \end{cases} \quad (10)$$

由式(10)可得:

$$(\tilde{n}_2 - \tilde{n}_1)Q \approx \frac{\Delta XQ + \Delta RP}{U^*}$$

即

$$\Delta \tilde{n} = (\tilde{n}_2 - \tilde{n}_1) \approx \frac{\Delta X + \Delta R(P/Q)}{U^*} \quad (11)$$

式中: $\tilde{n}_2, \tilde{n}_1$ 为下垂参数调整值。

当线路阻抗差异 ΔR 和 ΔX 以及额定输出电压 U^* 固定后,下垂参数调整值之差 $\Delta \tilde{n}$ 仅与负载功率因数正相关。负载功率因数相同时,并联逆变器之间的下垂参数调整值之差近似相等。

令 $U_{p1} = U_{pcc} + \frac{R_1 P_1}{U^*}$, $U_{p2} = U_{pcc} + \frac{R_2 P_2}{U^*}$, $k_1 = \frac{X_1}{U^*}$, $k_2 = \frac{X_2}{U^*}$, 工作点变化,2台逆变器输出电压变化分别为 ΔU_{p1} 和 ΔU_{p2} ,式(4)可以写为

$$\begin{cases} U_1 = U_{p1} + \Delta U_{p1} + k_1 Q_1 \\ U_2 = U_{p2} + \Delta U_{p2} + k_2 Q_2 \end{cases}$$

保持下垂参数不变,本文下垂控制和传统下垂控制在新工作点无功分配之差为

$$\begin{cases} Q_{err}^{new} = \frac{U^* - (U_{p2} + \Delta U_{p2})}{k_2 + n + \tilde{n}_2} - \frac{U^* - (U_{p1} + \Delta U_{p1})}{k_1 + n + \tilde{n}_1} \\ Q_{err}^{old} = \frac{U^* - (U_{p2} + \Delta U_{p2})}{k_2 + n} - \frac{U^* - (U_{p1} + \Delta U_{p1})}{k_1 + n} \end{cases}$$

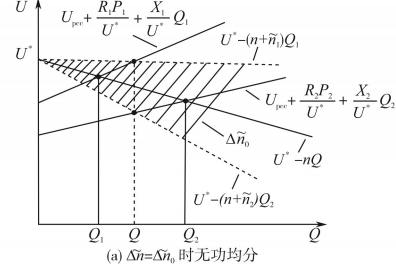
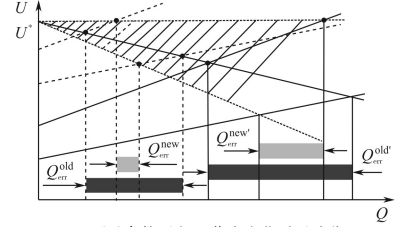
式中: Q_{err}^{old} 为传统下垂控制功率均分误差, Q_{err}^{old} 为改进下垂控制新工作点功率均分误差。

由式(8)、式(11)可得 $\tilde{n}_1 < 0 < \tilde{n}_2$, 所以有:

$$\begin{cases} k_2 + n + \tilde{n}_2 > k_2 + n \\ k_1 + n > k_1 + n + \tilde{n}_1 \end{cases}$$

因此,在一个工作点实现功率均分后,得到下垂参数调整值 $\tilde{n}_1, \tilde{n}_2$,如图6a所示。保持下垂

参数不变,工作点变化时总有 $Q_{err}^{new} < Q_{err}^{old}$,如图6b所示。因此当无功功率实现均分后,即使丢失补偿信号,下垂系数不再调整,无功均分仍然优于传统下垂控制。

(a) $\Delta n = \Delta n_0$ 时无功均分

(b) 下垂参数不变,工作点变化时无功分配

图6 所提出的下垂控制无功分配曲线

Fig.6 Reactive power distribution of droop control proposed

3 仿真验证

采用Matlab/Simulink搭建2台三相逆变器并联模型,系统的仿真参数为:逆变器功率等级5 kW,额定输出电压 $U^*=380$ V,直流母线电压 $U_{dc}=710$ V,滤波电感 $L_f=6$ mH,滤波电容 $C_f=20$ μ F,输出电感 $L_o=3$ mH,逆变器1线路阻抗 $0.6+j2.488 \Omega$,逆变器2线路阻抗 $0.2+j0.829 \Omega$,有功一相位下垂系数 $m=2.5 \times 10^{-4}$ (rad/s·W),无功一幅值下垂系数 $n=1.8 \times 10^{-4}$ (V/var),无功比例系数 $k=1.8 \times 10^{-5}$,有功积分系数 $K_i=1.5 \times 10^{-5}$ 。仿真时间12 s,系统带半载启动,在4 s时加载至满载,8 s时卸载至半载。

为了评估无功均分精度,定义无功分配差度如下式:

$$Q_{err,i} \% = \left| \frac{Q_i - Q_{avg}}{Q_{avg}} \right| \times 100$$

式中: $Q_{err,i}$ 为第i台逆变器无功分配差度; Q_{avg} 为平均功率。

图7为传统下垂控制法仿真波形,有功功率能够精确均分。由于线路阻抗的差异导致输出电压幅值不同,无功功率不能实现精确均分。

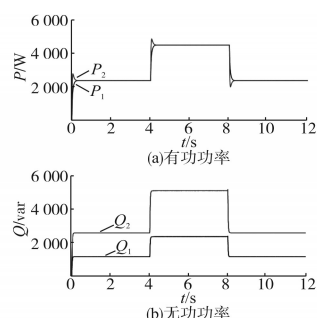


图7 传统下垂控制仿真结果

Fig.7 Simulation results of traditional droop control

图8为有功功率扰动下垂控制仿真波形,虚线表示补偿开始,实线表示补偿结束。图9为功率均分过程。图10为补偿前后电流波形。可看出改进下垂控制在补偿前采用传统下垂控制,有功能够均分,无功不能均分,并系统存在较大环流。当补偿开始后,由于有功-频率下垂方程中加入了无功分量,有功功率发生扰动偏移。由于无功-幅值下垂方程中加入了有功积分,有功和无功逐渐实现均分,并联系统环流基本消除。

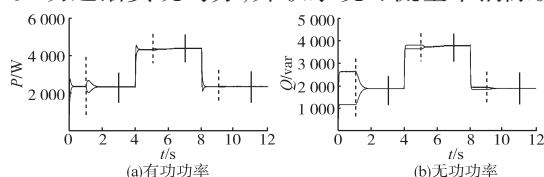


图8 改进下垂控制仿真结果

Fig.8 Simulation results of improved droop control

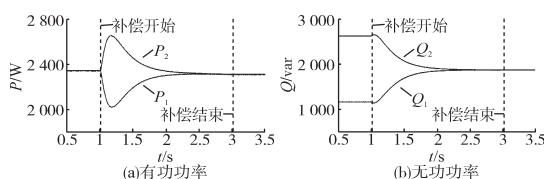


图9 改进下垂控制功率均分过程

Fig.9 The power sharing process of improved droop control

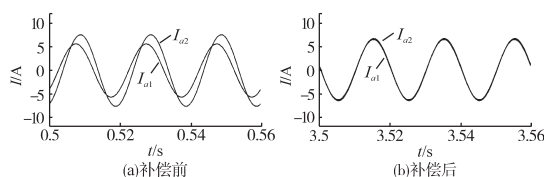


图10 改进下垂控制补偿前后A相电流

Fig.10 The A phase currents before and after improved droop control compensation

图11为改进下垂控制补偿信号失效后负载变化时无功分配与传统下垂控制对比,表1为图11无功分配差度。仿真结果表明,本文提出的下垂控制方法,在实现一次补偿后通信信号失效,负载变化时无功分配差度要明显优于传统下垂控制。

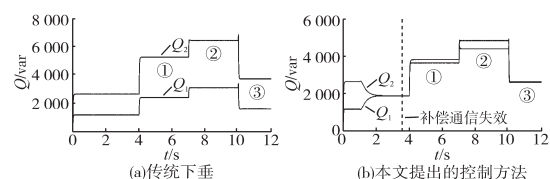


图11 改进下垂控制补偿信号失效后无功分配与传统下垂控制对比

Fig.11 Comparison of reactive power distribution between improved droop control after compensation signal failure and traditional droop control

表1 图11无功分配差度

Tab.1 Reactive power distribution difference in figure 11

工况	无功分配差度	
	传统下垂	本文方法
①10 kW, 7.5 kvar(功率因数0.8)	36.83%	2.29%
②7.5 kW, 10 kvar(功率因数0.6)	34.88%	4.67%
③10 kW, 4.85 kvar(功率因数0.9)	39.47%	0.67%

4 实验验证

搭建了逆变器并联实验平台,其中逆变器采用DSP+FPGA作为控制核心,主回路参数和线路阻抗参数与仿真一致,见第3节。负载满载功率为10 kW, 7.5 kvar。

图12为负载半载下本文所提控制策略实验波形,逆变器首先采用传统下垂控制并联运行,从实验波形可知由于线路阻抗差异,传统下垂控制2台逆变器电流存在较大差异,这是由于无功功率不能均分引起的环流。补偿信号有效后,2台逆变器同时采用有功功率扰动下垂控制,电流环流逐渐变小。补偿结束后,逆变器采用传统下垂控制,此时2台逆变器无功功率-电压幅值下垂系数不再相等,采用补偿后的下垂系数,电流环流基本消除。

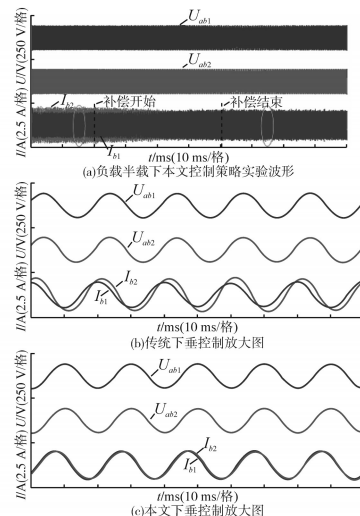


图12 所提控制策略实验波形

Fig.12 Experiment waveforms of the control strategy in this proposed

图13为传统下垂控制实验波形。图14为补偿信号失效后负载变化时本文改进下垂控制实验波形。由图13和图14波形比较可以看出,改进的下垂控制在实现1次功率均分后,即使补偿信号失效,负载变化时功率分配精度也要优于传统下垂控制。

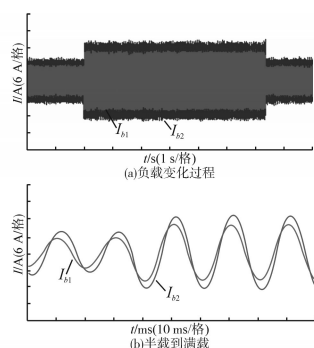


图13 传统下垂控制实验波形

Fig.13 Experiment waveforms of traditional droop control

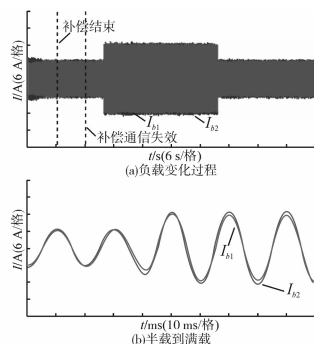


图14 补偿信号失效后负载变化时本文控制策略实验波形

Fig.14 Experimental waveform of control strategy proposed when load changed after compensation signal failure

5 结论

针对采用传统下垂控制的孤岛模式逆变器并联运行时线路阻抗差异带来的功率分配问题,本文讨论分析了感性输出阻抗时无功功率不均分的原因,提出了一种利用有功功率扰动实现无功功率均分的控制策略,通过对比分析、仿真和实验验证,可得到如下结论:

1)提出的有功功率扰动的功率均分控制策略,用有功功率的扰动反映无功功率的差异,通过消除有功功率的扰动,减小了并联系统环流,显著提高了无功功率均分效果。

2)新的下垂控制方法虽然需要补偿信号,使逆变器同时实施有功扰动控制策略,但仅需简单的、低宽带的补偿信号通信,不利用各逆变器之间信息。逆变器在一个工作点实施一次补偿后,即使通信失效,负载变化时,无功分配精度也优

于传统下垂控制。

参考文献

- [1] 周孝信,陈树勇,鲁宗相,等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1893-1904.
- [2] 杨捷,金新民,杨晓亮,等. 交直流混合微网功率控制技术综述[J]. 电网技术, 2017, 41(1): 29-39.
- [3] Mohd A, Ortjohann E, Morton D, et al. Review of Control Techniques for Inverters Parallel Operation[J]. Electric Power Systems Research, 2010, 80(12): 1477-1487.
- [4] 梁海峰,郑灿,高亚静,等. 微网改进下垂控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4901-4910.
- [5] 陈晓祺,贾宏杰,陈硕翼,等. 基于线路阻抗辨识的微电网无功均分改进下垂控制策略[J]. 高电压技术, 2017, 43(4): 1271-1279.
- [6] 林燎源,林钊,刘伟,等. 基于阻性下垂的逆变器无线并联均流控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(8): 43-50.
- [7] 陈杰,刘名凹,陈新,等. 基于下垂控制的逆变器无线并联与环流抑制技术[J]. 电工技术学报, 2018(7): 1450-1460.
- [8] Yao W, Chen M, Matas J, et al. Design and Analysis of the Droop Control Method for Parallel Inverters Considering the Impact of Thecomplex Impedance on the Power Sharing[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 576-588.
- [9] 刘尧,林超,陈滔,等. 基于自适应虚拟阻抗的交流微电网无功功率-电压控制策略[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(5): 16-21.
- [10] Mahmood H, Michaelson D, Jiang J. Accurate Reactive Power Sharing in an Islanded Microgrid Using Adaptive Virtual Impedancees [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2015, 30(3): 1605-1617.
- [11] He J W, Li Y W, Guerrero J M, et al. An Islanding Micro-grid Power Sharing Approach Using Enhanced Virtual Impedance Control Scheme[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(11): 5272-5282.
- [12] Zhong Q C. Robust Droop Controller for Accurate Proportional load Sharing Among Inverters Operated in Parallel[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 60(99): 1.
- [13] 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.
- [14] 程启明, 高杰, 程尹曼, 等. 一种适用于孤岛运行的逆变器控制方法[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 203-209.
- [15] He J W, Li Y W. An Enhanced Micro-grid Load Demand Sharing Strategy [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2012, 27(9): 3984-3995.
- [16] 耿志清, 卓放, 宁改娣, 等. 孤岛微电网中逆变器并联功率与电压均衡控制技术研究[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(12): 41-48.

收稿日期:2018-08-21

修改稿日期:2018-09-11