

基于自适应虚拟阻抗的改进下垂控制器设计

周镇¹, 彭元修¹, 刘斌¹, 李小文², 查海涛³

(1. 南昌航空大学 信息工程学院, 江西 南昌 330063;

2. 国网南昌市昌北供电公司, 江西 南昌 330063;

3. 国网江西省电力有限公司柘林水电厂, 江西 九江 332000)

摘要:微电网在孤岛运行模式下, 系统中各分布式发电单元由于输出线路阻抗差异, 导致输出功率难以进行合理分配, 影响系统的稳定性。为实现孤岛微电网中各分布式电源在输出阻抗不匹配情况下能合理按容分配功率, 分析了并联逆变器功率分配的影响因素, 提出了一种基于自适应虚拟阻抗的改进下垂控制策略, 并通过收敛性分析验证了其可行性。该策略根据功率分配比偏差, 自适应调整虚拟阻抗与电压相角, 从而实现功率按容分配。仿真及实验表明, 所提改进下垂控制策略能实现各分布式电源输出功率的合理分配, 且克服了传统下垂控制中功率分配对母线电压角频率的影响, 提高了系统的稳态性能。

关键词: 孤岛微电网; 自适应虚拟阻抗; 下垂控制; 功率按容分配

中图分类号: TM464 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19457/j.1001-2095.dqed22931

Design of Improved Droop Controller Based on Adaptive Virtual Impedance

ZHOU Zhen¹, PENG Yuanxiu¹, LIU Bin¹, LI Xiaowen², ZHA Haitao³

(1. School of Information Engineering, Nanchang Hangkong University, Nanchang 330063, Jiangxi, China;

2. State Grid Nanchang Changbei Power Supply Company, Nanchang 330063, Jiangxi, China;

3. State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd. Zhelin Hydropower Plant, Jiujiang 332000, Jiangxi, China)

Abstract: In the isolated island operation mode of microgrid, the output power of distributed generation units in the system is difficult to distribute reasonably due to the difference of output line impedance, which affects the stability of the system. In order to realize the reasonable distribution of power according to capacity of distributed generation in isolated island microgrid under the condition of mismatched output impedance, the influencing factors of power distribution of parallel inverter were analyzed, and an improved droop control strategy based on adaptive virtual impedance was proposed, and its feasibility was verified by convergence analysis. According to the deviation of power distribution ratio, the strategy adaptively adjusts virtual impedance and voltage phase angle to realize power distribution according to capacity. Simulation and experiment show that the improved droop control strategy can realize the rational distribution of output power of distributed generation, and overcome the influence of power distribution on bus voltage angular frequency in traditional droop control, and improve the steady-state performance of the system.

Key words: isolated island microgrid; adaptive virtual impedance; droop control; proportional power sharing

近年来, 分布式发电 (distributed generation, DG) 技术被视为解决日益增长的电力需求和实现环境保护的替代解决方案^[1]。微电网能够使各种分布式电源协同互补, 在高效利用各类新型能源同时, 为用户提供高质量的电能^[2]。

微电网孤岛运行时 DG 单元常采用下垂控制,

为电网提供频率和电压支撑并合理分担负荷。然而, 受微电网结构及线路阻抗等因素影响, DG 单元之间的精确功率分配难以实现^[3-4]。为实现微电网系统内功率的合理分配^[5-9], 文献[5]分析了阻性逆变器环流特性, 并提出一种鲁棒下垂多环控制方法, 保证并网模式下输出功率稳定, 但是在孤岛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (61963030); 江西省自然科学基金资助项目 (S2019QNZD2B0113)

作者简介: 周镇 (1996—), 男, 硕士, Email: 1147735042@qq.com

模式下各DG单元只能实现功率均分,无法按容合理分配负荷。文献[6-7]采用虚拟阻抗方法,通过估计各DG单元输出阻抗,从而准确调节各DG单元输出虚拟阻抗以实现DG单元功率按容分配,然而该方法运算较为复杂。文献[8]采用自适应虚拟阻抗方法,根据有功功率分配差值自动调节虚拟阻抗值以平衡输出阻抗,功率分配精度较高,但传统下垂控制由于自身特性,其稳态下各DG单元的参考电压幅值、角频率均与额定值存在一定偏差,将降低微电网输出电能质量。

为改善下垂控制性能,本文提出了一种基于自适应虚拟阻抗的改进下垂控制策略。该控制策略中各DG单元通过低速通信获取系统平均功率分配比,并根据本地功率分配比与其差值,调节输出电压相位以实现无功功率按容分配、调节虚拟阻抗值以实现有功功率按容分配。稳态下各DG单元的输出电压角频率与额定值相等,且电压幅值受线路阻抗影响较小,保障了供电质量。最后的仿真及实验结果均验证了本文所提策略的高效性。

1 传统下垂控制分析

孤岛微电网中并联DG可等效为图1所示简化示意^[9]。其中 E_i 为DG_i的输出电压幅值($i=1,2$); φ_i 为DG_i输出电压相对于交流母线电压 $U_{\text{pec}}\angle 0^\circ$ 的相角; $Z_i\angle\theta_i$ 为线路阻抗; $Z_0\angle\theta_0$ 为公共负载; P, Q 为输出有功和无功功率。

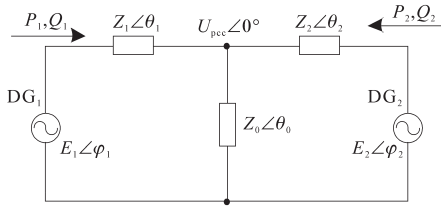


图1 DG并联简化示意

Fig.1 Simplified schematic of DG parallel connection

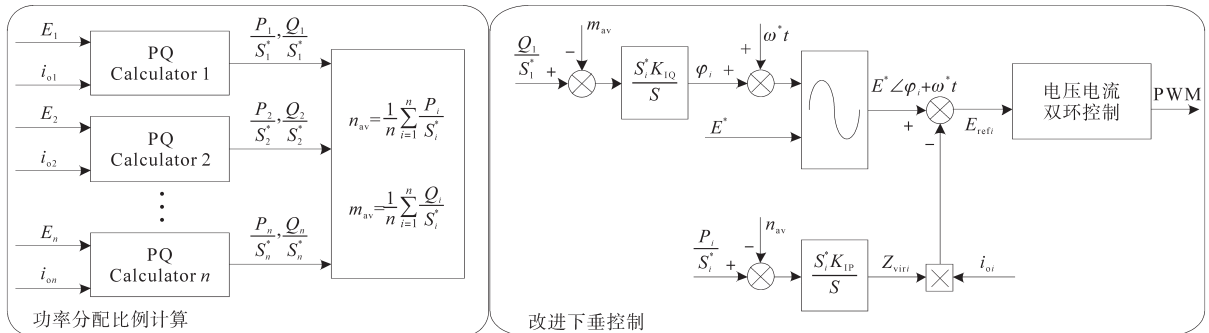


图2 自适应虚拟阻抗下垂方案

Fig.2 Adaptive virtual impedance droop scheme

在低压微电网中DG常采用阻性下垂控制,其表达式为^[10-11]:

$$E_i = E^* + n_i P_i \quad (1)$$

$$\omega_i = \omega^* + m_i Q_i \quad (2)$$

式中: E^*, ω^* 为DG额定电压幅值、角频率; n_i, m_i 为DG_i有功和无功下垂系数; E_i, ω_i 为DG_i参考电压幅值、角频率。

孤岛微电网采用式(1)、式(2)所示阻性下垂控制策略,由于电压角频率是全局变量,所以系统能实现无功功率的准确分配;但输出电压会受不匹配线路阻抗影响,有功功率无法实现准确分配。由式(1)可得有功功率分配误差为

$$n_1 P_1 - n_2 P_2 = E_2 - E_1 \quad (3)$$

式(3)中电压幅值 E_i 表达式为^[12]

$$E_i \approx U_{\text{pec}} + \frac{X_i Q_i + R_i P_i}{E^*} \quad (4)$$

式中: X, R 分别为线路阻抗的电抗与电阻。

由于孤岛微电网线路阻抗主要呈阻性^[13],于是有 $X_i = Z_i \cdot \sin\theta_i \approx 0$; $R_i = Z_i \cdot \cos\theta_i \approx Z_i$ 。

结合式(3)、式(4)可知,在孤岛微电网中,只有当系统中DG_i线路阻抗与下垂系数相匹配,即并联DG单元满足 $n_i P_i - n_j P_j = R_j P_j - R_i P_i$,微电网才能准确按容分配有功功率。

2 自适应虚拟阻抗下垂方案

为实现各DG单元能按照自身额定容量合理分配输出功率,改善系统稳态下的电压质量,本文提出了一种自适应虚拟阻抗下垂方案,其框图如图2所示。

图2中, P_i 和 Q_i 为DG_i输出有功和无功功率; S_i^* 为DG_i额定容量; n_{av} 和 m_{av} 为微电网系统有功和无功功率分配比例; K_{ip} 和 K_{iq} 为对应积分系数; E^* 和 ω^* 分别为DG额定电压幅值和角频率; Z_{viri} 为自适应虚拟阻抗值; i_{oi} 为DG_i输出电流。

在所提策略中,各DG单元根据本地有功分配比 P_i/S_i^* 与系统平均有功分配比 n_{av} 差值调节虚拟阻抗值,使得等效输出阻抗与额定容量相匹配,从而实现有功功率按容分配;另外,各DG单元根据本地无功分配比 Q_i/S_i^* 与系统平均无功分配比 m_{av} 差值调节电压相角,从而实现无功功率按容分配。

n_{av} 和 m_{av} 的计算表达式为

$$\begin{cases} n_{av} = \sum_1^n n_i / n \\ m_{av} = \sum_1^n m_i / m \end{cases} \quad (5)$$

式中: n 为微电网系统中的DG单元总数; n_i, m_i 分别为DG_{*i*}的有功和无功分配比例。

式(5)满足 $\min\{n_1, \dots, n_n\} \leq n_{av} \leq \max\{n_1, \dots, n_n\}$, 其中 $n_i = P_i/S_i^*, m_i = Q_i/S_i^*$ 。采用所提改进下垂控制策略,各DG_{*i*}闭环调整有功分配比例 n_i , 最终达到 $n_i = n_{av}$, 此时 $n_{av} = \sum_1^n P_i / \sum_1^n S_i^*$, 微电网系统实现对有功功率的按容分配。同理可实现对无功功率的按容分配。

3 系统收敛性分析

由图2可得,采用了所提出控制策略的DG单元等效系统模型如图3所示。

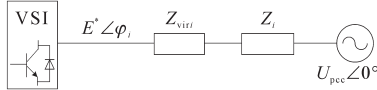


图3 采用了所提出控制策略的DG单元等效模型图

Fig.3 Equivalent model of DG unit with the proposed control strategy

此时,DG_{*i*}输出有功和无功功率分别为

$$P_i = \frac{E^{*2} - E^* U_{pcc}}{Z_{viri} + Z_i} \quad (6)$$

$$Q_i = -\frac{E^* U_{pcc}}{Z_{viri} + Z_i} \varphi_i \quad (7)$$

从式(6)、式(7)可以看出,在DG单元采用所提出改进下垂控制策略后,其输出有功功率 P_i 可通过改变虚拟阻抗值 Z_{viri} 调节,输出无功功率 Q_i 可通过改变电压相角 φ_i 调节。

3.1 比例分配有功

为分析改变虚拟阻抗对系统有功分配的影响,以3台DG单元并联模型为例,对微电网系统进行收敛性分析。结合图2和式(6)可以得到系统中DG_{*i*}单元有功功率分配比例误差 $\Delta n_{1,k}$ 的瞬时表达式为

$$\begin{aligned} \Delta n_{1,k} &= \frac{P_{1,k}}{S_1^*} - \frac{1}{3} \left(\frac{P_{1,k}}{S_1^*} + \frac{P_{2,k}}{S_2^*} + \frac{P_{3,k}}{S_3^*} \right) \\ &= \frac{E^{*2} - E^* U_{pcc}}{3} \left(\frac{2}{S_1^* Z_{1,k-1}} - \frac{1}{S_2^* Z_{2,k-1}} - \frac{1}{S_3^* Z_{3,k-1}} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $P_{i,k}$ 为第 i 台DG单元在第 k 个市电周期的输出有功功率; $Z_{i,k}$ 为第 i 台DG单元在第 k 个市电周期的等效输出阻抗,其中 $Z_{i,k} = Z_i + Z_{viri,k}$; $Z_{viri,k}$ 为第 k 个市电周期DG_{*i*}的虚拟阻抗值。

根据式(8)得到DG_{*i*}单元第 $k+1$ 个市电周期的有功功率分配比例误差为 $\Delta n_{1,k+1}$, 则有:

$$\begin{aligned} \Delta n_{1,k+1} - \Delta n_{1,k} &= \frac{E^{*2} - E^* U_{pcc}}{3} \left(2 \frac{Z_{vir1,k-1} - Z_{vir1,k}}{S_1^* Z_{1,k-1} Z_{1,k}} - \right. \\ &\quad \left. \frac{Z_{vir2,k-1} - Z_{vir2,k}}{S_2^* Z_{2,k-1} Z_{2,k}} - \frac{Z_{vir3,k-1} - Z_{vir3,k}}{S_3^* Z_{3,k-1} Z_{3,k}} \right) \end{aligned} \quad (9)$$

由图2可以得到自适应虚拟阻抗值 $Z_{viri,k}$ 的瞬时表达式为

$$Z_{viri,k} = S_i^* K_{IP} \sum_{j=1}^k \Delta n_{ij} \quad (10)$$

将式(10)代入式(9),进一步得到变量 $\Delta n_{1,k+1}$ 的迭代式:

$$\begin{aligned} \Delta n_{1,k+1} - \Delta n_{1,k} &= \frac{E^{*2} - E^* U_{pcc}}{3} \left(-\frac{2K_{IP}\Delta n_{1,k}}{Z_{1,k-1}Z_{1,k}} + \right. \\ &\quad \left. \frac{K_{IP}\Delta n_{2,k}}{Z_{2,k-1}Z_{2,k}} + \frac{K_{IP}\Delta n_{3,k}}{Z_{3,k-1}Z_{3,k}} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

由式(8)可得 $\Delta n_{1,k} + \Delta n_{2,k} + \Delta n_{3,k} = 0$ 。将该式代入式(11)中替换 $\Delta n_{2,k}, \Delta n_{3,k}$ 项,得到变量 $\Delta n'_{1,k}, \Delta n''_{1,k}$ 迭代式为

$$\Delta n'_{1,k+1} = \left[1 - \frac{E^{*2} - E^* U_{pcc}}{3} \left(\frac{2}{Z_{1,k-1}Z_{1,k}} + \frac{1}{a} \right) K_{IP} \right] \Delta n'_{1,k} \quad (12)$$

$$\Delta n''_{1,k+1} = \left[1 - \frac{E^{*2} - E^* U_{pcc}}{3} \left(\frac{2}{Z_{1,k-1}Z_{1,k}} + \frac{1}{b} \right) K_{IP} \right] \Delta n''_{1,k+1} \quad (13)$$

式(12)、式(13)中, $a = \min\{Z_{2,k-1}Z_{2,k}, Z_{3,k-1}Z_{3,k}\}$, $b = \max\{Z_{2,k-1}Z_{2,k}, Z_{3,k-1}Z_{3,k}\}$ 。由式(11)~式(13)可得关于变量 $\Delta n_{1,k}, \Delta n'_{1,k}, \Delta n''_{1,k}$ 的不等式为

$$\Delta n'_{1,k} \leq \Delta n_{1,k} \leq \Delta n''_{1,k} \quad (14)$$

当下式成立时,变量 $\Delta n'_{1,k}, \Delta n''_{1,k}$ 均趋于零,结合式(14)可得DG_{*i*}单元有功功率分配比例误差 $\Delta n_{1,k}$ 亦趋于零,系统准确实现有功功率按容分配。

$$0 < \frac{E^{*2} - E^* U_{pcc}}{3} \left(\frac{2}{Z_{1,k-1}Z_{1,k}} + \frac{1}{a} \right) K_{IP} < 1 \quad (15)$$

同理分析可得,当下式成立时,系统可准确实现无功功率按容分配。具体推导过程不再赘述。

$$0 < \frac{E^* U_{\text{pcc}}}{3} \left(\frac{2}{Z_{1,k}} + \frac{1}{\min\{Z_{2,k}, Z_{3,k}\}} \right) K_{\text{IP}} < 1 \quad (16)$$

4 仿真验证

按图1所示在Matlab/Simulink仿真平台搭建3台DG并联模型,系统仿真参数为:并联模型中3台DG单元的额定容量分别为12 kV·A, 6 kV·A, 4 kV·A;输电线路参数分别为0.5 Ω, 0.2 Ω, 0.1 Ω;虚拟阻抗最小限幅值为0.1 Ω; K_{IP} 为 3.2×10^{-6} ; K_{IQ} 为 6.2×10^{-7} ; 0.5 s时,负荷功率由 $(10+j8)$ kV·A 减少到 $(6+j4)$ kV·A, 1 s时再恢复到 $(10+j8)$ kV·A。

DG单元中逆变器所采用控制框图如图4所示。图4中:电压环比例谐振控制器参数 $K_v=0.2$, $K_R=128$;电流环比例控制器参数 $K_i=20$;滤波电感 $L=1$ mH;滤波电容 $C=10$ μF; V_c 为电容电压, i_L 为电感电流, V_{AB} 为逆变电路滤波前的平均电压。

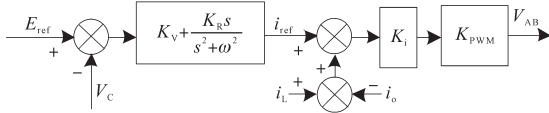


图4 逆变器控制框图

Fig.4 Inverter control block diagram

图5为基于传统下垂控制法的仿真波形,各DG单元能实现无功功率按容分配,但负载变化时无功-频率控制需要较长时间达到新的动态平衡,并联系统的动态性能较差;且由于等效输出阻抗不匹配,各DG单元输出有功功率不能实现按容分配。由式(1)、式(2)可知传统方案实现功率合理分配必然造成幅值与频率的偏差,且负荷越大偏差越大,符合图5c、图5d仿真结果。

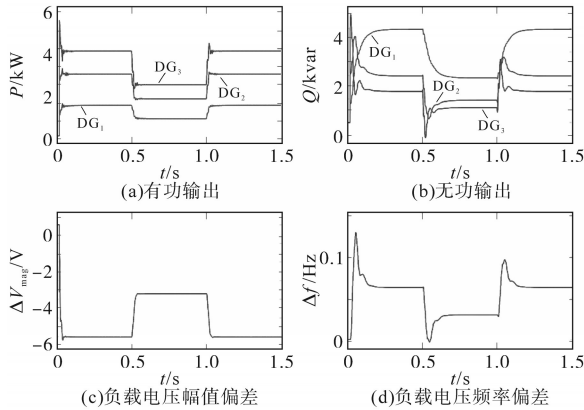


图5 传统下垂控制策略下的功率输出及负载电压

Fig.5 Power output and load voltage of traditional control strategy

图6和图7分别给出了本文所提基于自适应虚拟阻抗改进下垂控制法的仿真波形与各DG单

元等效阻抗的仿真波形,各DG单元自适应调整自身虚拟阻抗以匹配等效输出阻抗,从而实现有功功率按容分配;且在负荷突变的过程中,由于等效输出阻抗已实现匹配,并联系统能瞬时实现功率重新按容分配,同时整个运行过程中功率的波动更小。图6c、图6d为采用改进方案时的幅值、频率波形,由于虚拟负阻抗减小了线路等效阻抗从而使得电压幅值偏差变小,但仍存在一定偏差;而相移分配无功并不影响电压频率,故其频率一直等于额定值。对比图5和图6的负载电压偏差波形图可以看出,本文所提改进下垂控制方法引起的系统母线电压波动较小;同时,系统采用传统下垂控制的交流母线电压THD为1.7%,且该值会随无功功率增大而增大,而采用本文所提改进下垂控制的交流母线电压THD仅为0.8%,保障了输出电能质量。

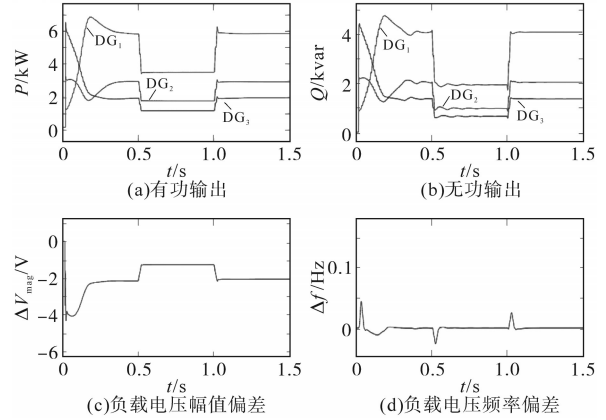


图6 所提控制策略下的功率输出及负载电压

Fig.6 Power output and load voltage of the proposed control strategy

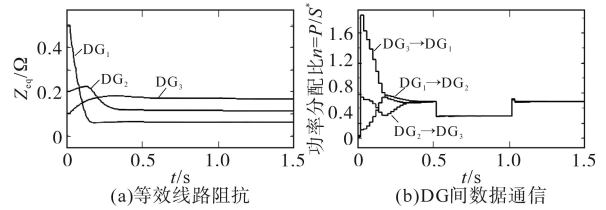


图7 各DG单元等效输出阻抗及数据通信的仿真波形

Fig.7 Simulation waveform of equivalent output impedance and data communication of each DG unit

并联系统采用的是单向通信的环形网络拓扑^[9],该结构通信链路少且不存在单点故障。图7b为系统采用50 Hz数据通信频率仿真运行时3条通信链路中的有功分配比数据。

5 实验验证

为进一步验证本文所提改进下垂控制策略的有效性,在3台容量分别为6 kV·A, 3 kV·A, 2 kV·A

的样机平台上进行相关实验。实验中,分别使用 $0.4\ \Omega$ 、 $0.2\ \Omega$ 、 $0.3\ \Omega$ 的电阻连接 DG 单元和交流母线,以模拟线路阻抗不匹配时微电网系统的工作情况。其实验样机参数如表 1 所示。

表 1 实物参数

Tab.1 Experiment parameters

参 数	数 值
额定容量 S_1^*, S_2^*, S_3^*	$6\ \text{kV} \cdot \text{A} / 3\ \text{kV} \cdot \text{A} / 2\ \text{kV} \cdot \text{A}$
线路阻抗 Z_1, Z_2, Z_3	$0.4\ \Omega / 0.2\ \Omega / 0.3\ \Omega$
控制器	TMS320F28035
开关频率	20 kHz
功率开关	IGW40T120
示波器	YOKOGAWA DLM2024
THD 分析仪	Fluke 43B

图 8 给出了负载功率为 $6\ \text{kW} / 2.4\ \text{kvar}$ 时,并联系统分别采用传统下垂及所提改进下垂控制,动稳态下各 DG 电流及交流母线电压波形。

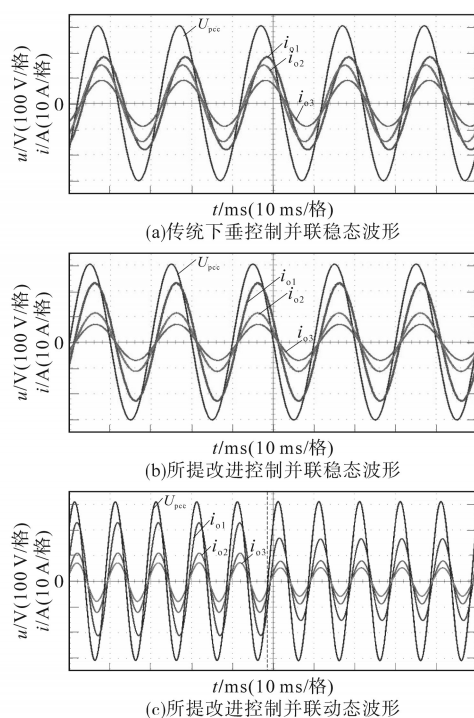


图 8 不同控制策略下的动稳态波形

Fig.8 Dynamic and steady-state waveforms under different control strategies

图 8a 中示波器各量值如下:交流母线电压峰值 $306\ \text{V}$,各 DG 单元输出电流峰值分别为 $18\ \text{A}$ 、 $15\ \text{A}$ 、 $9\ \text{A}$;输出功率分别为 $2.57\ \text{kW} / 1.31\ \text{kvar}$ 、 $2.14\ \text{kW} / 0.66\ \text{kvar}$ 、 $1.28\ \text{kW} / 0.43\ \text{kvar}$;有功功率分配比为 $6:5:3$,无功功率分配比为 $3:2:1$ 。可见,传统下垂控制受不匹配输出阻抗影响,并联系统有功功率不能按比例分配。图 8b 中示波器各量

值如下:交流母线电压峰值 $310\ \text{V}$,各 DG 单元输出电流峰值分别为 $23\ \text{A}$ 、 $11.5\ \text{A}$ 、 $7.5\ \text{A}$;输出功率分别为 $3.28\ \text{kW} / 1.31\ \text{kvar}$ 、 $1.64\ \text{kW} / 0.66\ \text{kvar}$ 、 $1.07\ \text{kW} / 0.43\ \text{kvar}$;有功功率分配比为 $3:2:1$,无功功率分配比为 $3:2:1$ 。图 8c 为系统负荷切换时的实验波形,在 t_s 之前电流波形与图 8b 一致, t_s 时刻系统切除部分负荷,过程中不存在暂态冲击且能立即实现功率的重新分配。可见,采用本文所提改进下垂控制的 3 台 DG 单元准确实现了按容分配负荷。

同时,分别记录了传统下垂与改进下垂方案的实验负载电压波形数据,并导入 Matlab 对其进行 FFT 分析,图 9 为分析结果。传统下垂方案下负载电压 THD 为 1.27% ,且电压幅值偏差较大,而采用本文所提改进下垂方案时负载电压 THD 仅为 0.8% ,保障了输出电能质量。

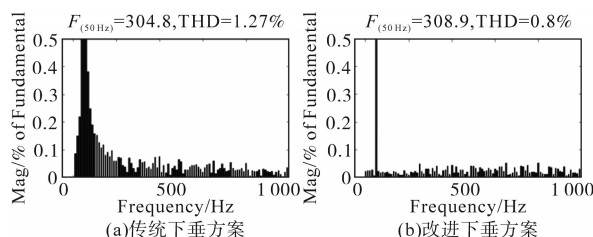


图 9 实验波形 FFT 分析结果

Fig.9 Experimental waveform FFT analysis results

6 结论

针对孤岛微电网系统采用传统下垂控制时,因各 DG 单元线路阻抗不匹配所造成的功率分配不合理问题,本文分析了线路阻抗对系统功率分配的影响,并提出了一种能够根据各 DG 单元额定容量自适应调整自身等效输出阻抗,从而实现功率按容分配的控制策略。仿真及实验表明,所提控制策略能准确实现功率按容分配,且改进下垂控制器仅通过改变虚拟阻抗和控制相角实现功率分配,能有效提高供电电能质量。

参考文献

- [1] 曹文远,韩民晓,谢文强,等. 交直流配电网逆变器并联控制技术现状分析[J]. 电工技术学报, 2019, 34(20): 4226-4241.
- [2] 崔嘉,杨俊友,葛维春,等. 互联微电网孤岛运行频率稳定

- 性协调控制策略[J]. 电网技术, 2019, 43(8):2901-2909.
- Cui Jia, Yang Junyou, Ge Weichun, *et al.* Coordinated control strategy for interconnected microgrids in islanded mode considering frequency stability[J]. Power System Technology, 2019, 43(8):2901-2909.
- [3] 伍家驹, 刘斌. 逆变器理论及其优化设计的可视化算法[M]. 第2版. 北京: 科学出版社, 2021.
- Wu Jiaju, Liu Bin. Visualization algorithm of inverter theory and its optimization design[M]. 2nd edition. Beijing: Science Press, 2021.
- [4] 苗海东, 王金梅, 马文涛, 等. 一种改进的微电网无功分配控制策略研究[J]. 电气传动, 2021, 51(1): 51-55.
- Miao Haidong, Wang Jinmei, Ma Wentao, *et al.* An improved reactive power distribution control strategy for microgrid[J]. Electric Transmission, 2021, 51(1): 51-55.
- [5] Ghanbari N, Bhattacharya S. Adaptive droop control method for suppressing circulating currents in DC microgrids[J]. IEEE Open Access Journal of Power and Energy. 2020, 7: 100-110.
- [6] 耿英明, 侯梅毅, 朱国防, 等. 基于虚拟阻抗的微电网有功均分阻性下垂控制策略[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(10): 132-138.
- Geng Yingming, Hou Meiyi, Zhu Guofang, *et al.* Active power sharing and resistive droop control strategy for microgrid based on virtual impedance[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(10): 132-138.
- [7] 陈巧地, 张兴, 李明, 等. 基于阻抗辨识的下垂控制并网逆变器孤岛检测方法[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7):123-132.
- Chen Qiaodi, Zhang Xing, Li Ming, *et al.* Islanding detection method of droop control grid-connected inverter based on impedance identification [J]. Power System Automation, 2020, 44(7): 123-132.
- [8] 王二永, 王帅. 基于自适应虚拟电阻的低压微电网下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2):144-149.
- Wang Eryong, Wang Shuai. Low voltage microgrid droop control strategy based on adaptive virtual resistance[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2):144-149.
- [9] 郭倩, 林燎源, 武宏彦, 等. 考虑自适应虚拟阻抗的微电网分布式功率控制策略[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(19): 23-29.
- Guo Qian, Lin Liaoyuan, Wu Hongyan, *et al.* Distributed power control strategy for microgrid considering adaptive virtual impedance[J]. Power System Automation, 2016, 40(19):23-29.
- [10] Wei B, Marzàbal A, Ruiz R, *et al.* DAVIC: A new distributed adaptive virtual impedance control for parallel-connected voltage source inverters in modular UPS system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics. 2019, 34(6): 5953-5968.
- [11] 邱春风, 曹炜, 刘美娜. 基于功率下垂特性的直流微电网分布式控制[J]. 电气传动, 2021, 51(3): 48-54.
- Qiu Chunfeng, Cao Wei, Liu Meina. Distributed control of DC microgrid based on power droop characteristics[J]. Electric Transmission, 2021, 51(3): 48-54.
- [12] 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, 5209.
- Liang Haifeng, Zheng Can, Gao Yajing, *et al.* Research on improved droop control strategy for microgrid[J]. Journal of Chinese Electrical Engineering, 2017, 37(17): 4901-4910, 5209.
- [13] 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.
- Cheng Qiming, Gao Jie, Cheng Yinman, *et al.* An inverter control method for islanding operation[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 203-209.

收稿日期:2021-01-08

修改稿日期:2021-03-24