

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.02.023

基于改进下垂的多逆变器并联控制策略

罗军杰, 粟时平, 倪亮, 李志轩, 苏乾坤
(长沙理工大学电气与信息工程学院, 长沙 410114)

摘要:针对微电网孤岛运行时,传统解耦式下垂控制策略由于未能考虑线路阻抗的影响,多逆变器并联运行时存在无功功率分配不均、环流等问题,论文提出一种基于自适应电压补偿的改进下垂控制策略。文中首先针对因线路阻抗不同所带来的电压跌落问题,增加了线路压降补偿环节,在此基础上,考虑逆变器出口处电压与母线电压的一致性,改进了下垂控制式,并利用低带宽通信技术获取各逆变器输出功率信息,引入自适应电压补偿环节,提高了逆变器间无功功率的均分精度。最后,基于 Matlab 平台搭建文章所提控制策略的仿真模型,仿真结果验证了所提控制策略的正确性与有效性。

关键词:微电网;下垂控制;线路阻抗;功率均分;电压补偿

Parallel Control Strategy of Multiple Inverters Based on Improved Droop

LOU Junjie, SU Shiping, NI Liang, LI Zhixuan, SU Qiankun

(School of electrical and information engineering, Changsha University of technology, Changsha 410114)

Abstract: In view of such problems as not consideration the influence of line impedance of the line under the traditional decoupling droop control strategy, the uneven reactive power distribution and circulating current of multiple inverters in parallel operation in the case of isolated island operation of micro grid, a kind of improved droop control strategy based on adaptive voltage compensation is proposed in this paper. Firstly, aiming at the voltage drop caused by different line impedance, the line voltage drop compensation link is added. On this basis, considering the consistency between the voltage at the outlet of the inverter and the bus voltage, the droop control type is improved, the output power information of each inverter is obtained by using low bandwidth communication technology, and the adaptive voltage compensation link is introduced to improve the accuracy of reactive power sharing between inverters. Finally, the simulation model of the proposed control strategy is set up based on Matlab platform, and the the correctness and effectiveness of the proposed control strategy is verified.

Keywords: micro grid; droop control; line impedance; power sharing; voltage compensation

0 引言

随着电能使用量的增加,传统发电技术与环境之间的矛盾日益凸显。近年来,为保护生态环境,实现绿色发展,国家提出了“碳达峰”、“碳中和”的发展目标,传统化石能源发电逐渐面临淘汰,而以风电、太阳能为主的新能源发电技术的发展得到了广泛的关注和强有力的发展^[1-5]。

相比于传统大电网,微电网是一个整合了分布式电源(distributed generation, DG)、储能、负荷以及控制装置的独立电力系统,其有孤岛与并网两种运

行模式^[6-8]。下垂控制作为逆变器控制策略的一种,只需通过检测本身的电压和频率参数就能够实现 DG 间的功率合理分配,基于这种简单灵活的控制特性得到了广泛应用^[9-13]。但由于微电网中各 DG 并非集中在一起,逆变器输出到母线集中点上的电压受到距离影响而存在不一致;同时,阻感性的低压微电网之中还存在严重的功率耦合问题,因此传统下垂控制策略无法实现无功有效分配^[14-18]。

众多学者针对微电网中多逆变器并联时功率均分问题已有许多研究。文献[19]通过对本地负荷和线阻抗进行设计,根据等效阻抗来设计虚拟复阻

抗以此来缓解无功均分与电压平衡的矛盾。文献[20]利用集中通信,通过低带宽通信技术获取各逆变器的功率信息,并通过中央控制器在传统的下垂控制中增加积分项,有效的提高了功率均分精度。文献[21]通过分析逆变器并联环流的产生机理,设计自适应虚拟阻抗,忽略逆变器输出电压与参考电压值之间的静态误差,提出了一种新的非线性的下垂控制式。文献[22]利用相邻通信获取逆变器无功信息,并采用一致性算法对各逆变器的无功差值进行动态调整,实现了无功功率的精确分配。文献[23]在无功下垂控制环节通过引入电压补偿环节,以此缓解各逆变器间因线路阻抗的不同所带来的无功功率不平衡问题。

论文从逆变器并联系统中固有的电压降落出发,分析逆变器出口电压与交流母线公共连接点处的电压差异,通过增加电压补偿项,在此基础上考虑逆变器出口处电压与母线电压的一致性,改进传统下垂控制式,有效的降低了因线路阻抗差异带来的逆变器并联系统间的电压差,同时借助逆变器之间的稀疏通信技术,增加自适应电压积分补偿环节,使得多逆变器并联时的无功均分精度及响应速度得到了提升。最后通过 Matlab/Simulink 仿真实验,验证了所提控制策略的有效性与准确性。

1 多逆变器并联系统及传统下垂控制原理

1.1 多逆变器并联系统结构

微电网多逆变器并联系统包括由全控开关器件组成的逆变器、直流电源、LC 滤波器,线路阻抗、负载阻抗等,结构见图 1。

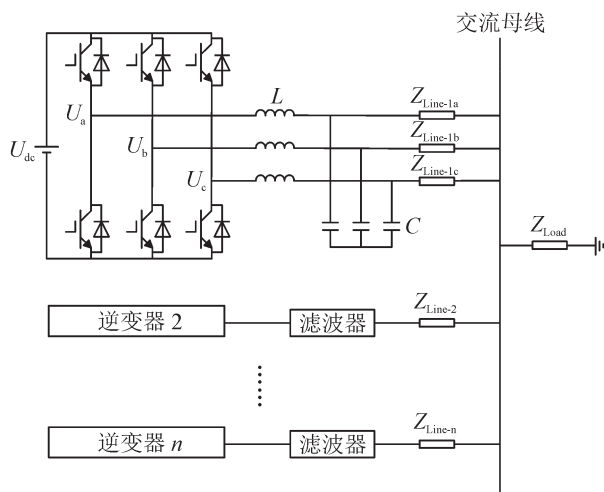


图1 多逆变器并联系统示意图
Fig. 1 Schematic diagram of multi inverter parallel system

各逆变器交流侧连接处为交流母线,逆变器输出功率经其传输给交流侧负载^[24]。图中: U_{dc} 为直流

侧电源, U_a, U_b, U_c 分别为交流侧 A、B、C 三相电压幅值; L, C 分别为滤波器的电感与电容。 $Z_{line-1a}, Z_{line-1b}, Z_{line-1c}$ 分别为 DG₁ 交流侧 A、B、C 三相的线路阻抗, Z_{load} 为交流侧负载。

1.2 传统下垂控制原理

为简化分析,建立 2 个 DG 组成的逆变器并联结构模型,见图 2。根据原理图推导可知逆变器的复功率表达式为

$$S = UI_i = P_i + jQ_i \quad (1)$$

图2 两台逆变器并联结构简化模型
Fig. 2 Simplified model of parallel structure of two inverters

由式(1)结合逆变器并联原理模型,可以推导出第 i 逆变器的有功功率 P_i 以及无功功率 Q_i 的一般表达式为

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

式中: U_i 为 DG_i 所接逆变器的输出电压幅值; U_{PCC} 为逆变器连接公共点处的电压幅值; Z_i 为 DG_i 的馈线阻抗; φ_i 为 DG_i 到公共点之间的线路阻抗相位角; δ_i 为 DG_i 输出电压的相角。在实际生活中,考虑到一般电力系统中传输线路的感抗是远远大于阻抗的^[25],即 $X_n \gg R_n$,为简化分析,则可认为 $\sin \delta_i \approx \delta_i$, $\cos \delta_i \approx 1$ 。于是,式(2)化简得

$$\begin{cases} P_i = \frac{U_i U_{PCC} \sin(\delta_i)}{Z_i} \\ Q_i = \frac{U_i U_{PCC} - U_{PCC}^2}{Z_i} \end{cases} \quad (3)$$

由式(3)可推导出下垂控制方程式为

$$\begin{cases} \omega_i = \omega_n - k_{pi} P_i \\ U_i = U_n - k_{qi} Q_i \end{cases} \quad (4)$$

式中: ω_i, ω_n 分别为第 i 个逆变器输出角速度的实际值与额定值; k_{pi} 与 k_{qi} 分别为 P 和 Q 下垂控制系数。

通过传统下垂控制表达式可以看出,由于整个电力系统是以一种稳定的频率运行,因此频率可以

看作电力系统中的全局变量,其不受线路阻抗差异的影响,因此传统 P/f 控制式可以实现有功功率的均分;但各逆变器输出电压却受线路阻抗的影响,各逆变器的馈线阻抗不一致则会导致各逆变器最终输出到母线连接点处的电压不一致。所以电压是一局部变量,在各个并联的逆变器之间并不相同,即存在电压偏移,尤其以低压微电网最为严重。由于电压与无功是相互关联的,电压偏移的存在即说明各逆变器之间无功没有有效均分,而这也是逆变器环流产生的原因^[26]。多逆变器并联系统无功不能有效均分不仅会导致整个微电网的运行效率降低,甚至会严重损害微电网系统的运行。所以针对微电网中逆变器并联运行时存在的功率均分问题有必要深入研究。

2 改进下垂控制

单个 DG 连通交流母线的向量图见图 3。

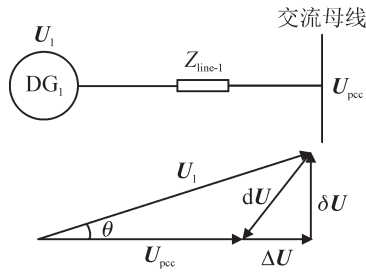


图3 单台逆变器结构简化模型
Fig. 3 Simplified structure model of single inverter

由于 DG 与交流母线之间线路阻抗 Z_{line-1} 的存在,使得逆变器输出电压值与交流母线公共点之间的电压值存在差值。为了弥补这一误差,通常会在下垂控制式中加入电压降分量补偿,而电压降分量有两种:1)电压降横分量 ΔU ; 2)电压降纵分量 ΔU 。而考虑到在阻感性的电路中,电压降路通常是由于纵分量引起。所以,下垂控制式又可写成式(5)

$$\begin{cases} \omega_i = \omega_n - k_{pi} P_i \\ U_i = U_n - k_{qi} Q_i + \Delta U \end{cases} \quad (5)$$

式中: $\Delta U = (P_i R_i + Q_i X_i) / U_{pcc}$ 。 R_i 为 DG 与交流母线连线的线路阻抗; X_i 为 DG 与交流母线连线的线路感抗。通过增加电压补偿环节可以改善各 DG 并联时因线路阻抗的不同而引起的环流问题,增加电压补偿环节后,考虑到控制过程中电压环又经过 PI 控制器调节,实现了逆变器输出电压与母线连接点电压之间无静态误差,即 $U_i = U_{pcc}$ 。于是式(5)中的 Q 、 U 控制表达式又可写成式(6)

$$U_i^2 - (U_n - k_{qi} Q_i) U_i - (P_i R_i + Q_i X_i) = 0 \quad (6)$$

由于电压 U_i 为正数,因此可解得

$$U_i = \frac{1}{2} (U_n - k_{qi} Q_i) + \frac{1}{2} \sqrt{(U_n - k_{qi} Q_i)^2 + 4(P_i R_i + Q_i X_i)} \quad (7)$$

考虑传统下垂控制中,各逆变器仅参考本地 DG 发出的无功功率,逆变器之间不存在通信环节。论文在改进传统下垂控制式的基础上,为了更加精确的实现逆变器之间功率均分,提高电力系统运行稳定性,改善电能质量,在无功下垂控制环节中增加了自适应电压积分补偿环节,见式(8)

$$\Delta U_\lambda = k_m \int (Q_i - Q_{i_ref}) dt \quad (8)$$

式中: $k_m = n_1 + n_2(Q_i - Q_{i_ref})$; ΔU_λ 为基于无功差值积分的补偿量; Q_{i_ref} 为各并联逆变器理论应发出的无功功率。通过对无功积分补偿系数 k_m 的设置可实现自适应调节。当无功功率差值增大的时候, k_m 值也增大,达到快速增加积分补偿量,不仅稳定了逆变器输出电压,同时提高了系统的动态响应速度;而当无功功率差值较小时, k_m 值也相应较小,从而实现了更加精确的电压补偿。

其中, Q_{i_ref} 的大小与各并联逆变器的实际容量有关。当 i 个容量相同的 DG 并联时:

$$Q_{i_ref} = \frac{Q_{load}}{i} \quad (9)$$

当 i 个容量不同的 DG 并联时:

$$Q_{i_ref} = \frac{S_i}{S_1 + S_2 + \dots + S_i} Q_{load} \quad (10)$$

式(10)中 S_i 为各 DG 的额定容量。

基于无功积分电压补偿环节是通过稀疏通信获取各逆变器输出的无功功率信息,并传输至中央控制器,通过中央控制器的计算并统一调度,将各个逆变器应发的平均无功功率传输至各逆变器单元。稀疏通信技术的加入不仅提高了逆变器控制的灵活性,增强了系统控制可靠性,且随着科技发展,现阶段该技术实现成本低,具有经济性。

综上分析,本文提出的改进下垂控制式见式(11)。图 4 即基于本文提出的改进无功下垂控制策略的控制框图。

$$\begin{cases} \omega_i = \omega_n - k_{pi} P_i \\ U_i = \frac{1}{2} (U_n - k_{qi} Q_i) + \Delta U_\lambda + \frac{1}{2} \sqrt{(U_n - k_{qi} Q_i)^2 + 4(P_i R_i + Q_i X_i)} \end{cases} \quad (11)$$

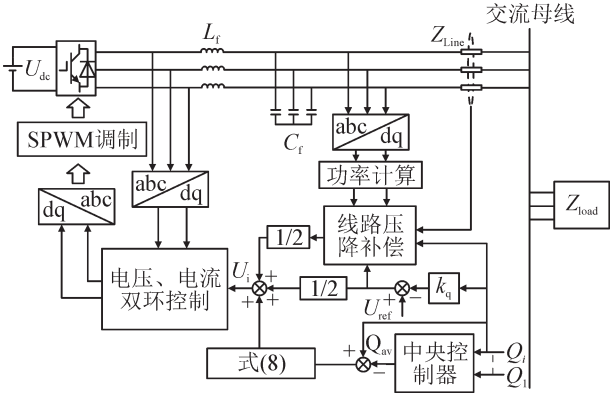


图4 改进控制策略逆变器控制框图
Fig. 4 Inverter control block diagram of improved control strategy

3 仿真验证及分析

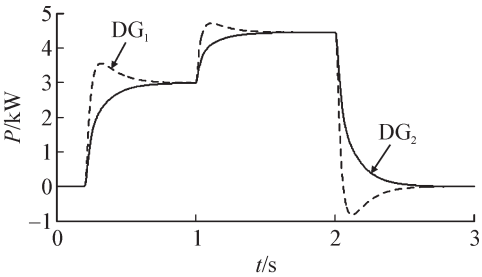
为验证论文提出的改进型下垂控制策略,基于 Matlab/Simulink 平台建立了相应仿真模型,对逆变器并联间的功率均分问题进行研究。模型综合考虑 DG 容量及线路阻抗两个变量,由于 DG 容量与线路阻抗一致的结果显而易见,故不做分析;同时,为探究论文所提控制策略的适用性,故增加多台逆变器并联情景,则总共可分为 4 种工况。通过模拟微电网现实生活中不同的运行场景,展现了文章所提控制策略在不同情景下的功率均分情况。相关仿真参数见表 1。

表1 仿真模型系统参数
Table 1 Simulation model system parameters

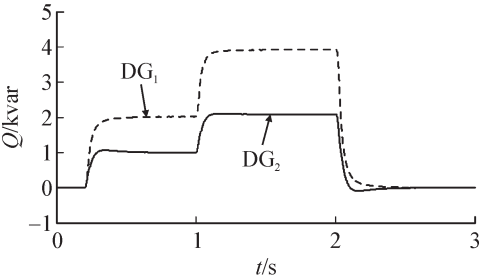
参数	数值
直流侧电压 U_{dc}/V	800
额定频率 f_{ref}/Hz	50
交流侧额定电压 U_{abc_ref}/V	380
滤波电感 L_f/H	5×10^{-3}
滤波电容 C_f/F	100×10^{-6}
DG ₁ 线路阻抗 Z_{line1}/Ω	$0.05+j0.000\ 5$
DG ₂ 线路阻抗 Z_{line2}/Ω	$0.1+j0.001$
DG ₃ 线路阻抗 Z_{line3}/Ω	$0.15+j0.001\ 5$
负载1	$6\ 000+j3\ 000$
负载2	$9\ 000+j6\ 000$
有功下垂控制系数 k_p	0.1×10^{-4}
无功下垂控制系数 k_q	3×10^{-4}
自适应电压补偿系数 n_1	2×10^{-2}
自适应电压补偿系数 n_2	1×10^{-4}

3.1 工况 1:DG 单元容量一致,线路阻抗参数不一致
两个容量一致的 DG 通过逆变器并联一起,公共负载连接在两逆变器的公共交流母线连接处。0.2 s 时公共负载接入有功功率 $P=6\text{ kW}$,无功功率 $Q=3\text{ kvar}$ 的负载 1.1 s 时切换为有功功率 $P=9\text{ kW}$,

无功功率 $Q=6\text{ kvar}$ 的负载 2.2 s 时,负载全部断开。
应用传统下垂控制的仿真结果见图 5。可以看出传统下垂控制下,由于线路阻抗的影响,两逆变器输出电压存在严重偏差,虽然两并联 DG 间的有功功率能够实现有效均分,但对于无功功率却有较大偏差。



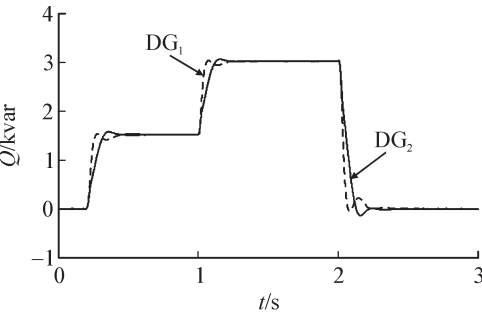
(a) DG 输出有功功率



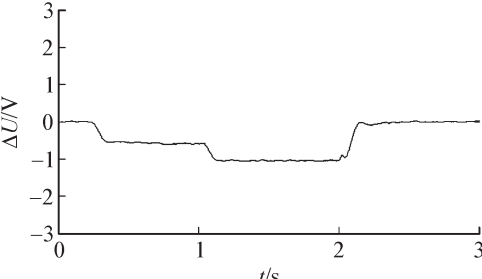
(b) DG 输出无功功率

图5 工况 1 传统下垂控制策略下仿真波形
Fig. 5 Simulation waveform of traditional droop control strategy at condition 1

而相同条件下应用式(11)提出的改进下垂控制策略仿真结果见图 6。



(a) DG 输出无功功率



(b) 逆变器输出电压有效值差值

图6 工况 1 改进下垂控制下仿真波形
Fig. 6 Simulation waveform of improved droop control at condition 1

由于 P/f 控制式没有变化,则有功分布情况与传统控制策略一致。而针对无功负载,可以看出,改进的下垂控制方法在工况 1 的情况下,负载 1 接入时, DG_1 与 DG_2 分别发出 1.5 kvar 的无功功率,实现了并联逆变器间的无功功率有效均分。负载 1 切换为负载 2 时,由于自适应电压补偿项的加入,逆变器快速响应,在 1.2 s 时,负载无功功率得到了完美均分,且负载接入时,两台逆变器之间的电压差值稳定在 1.2 V 以内,减小电压幅度变化范围。

对比于传统下垂控制仿真结果,工况 1 的仿真结果说明改进的下垂控制能够很好地实现逆变器并联之间的功率均分问题,提高系统的稳定性。

3.2 工况 2: DG 容量不同,线路阻抗参数一致

设置的逆变器容量比为 2:1,线路阻抗参数一致,负载投切情况同工况 1 的两 DG 逆变器并联运行仿真模型,最终仿真波形见图 7。可以看出两 DG 的有功与无功出力与其容量比成一样比例,即 2:1,且两逆变器输出电压差值误差范围满足要求。

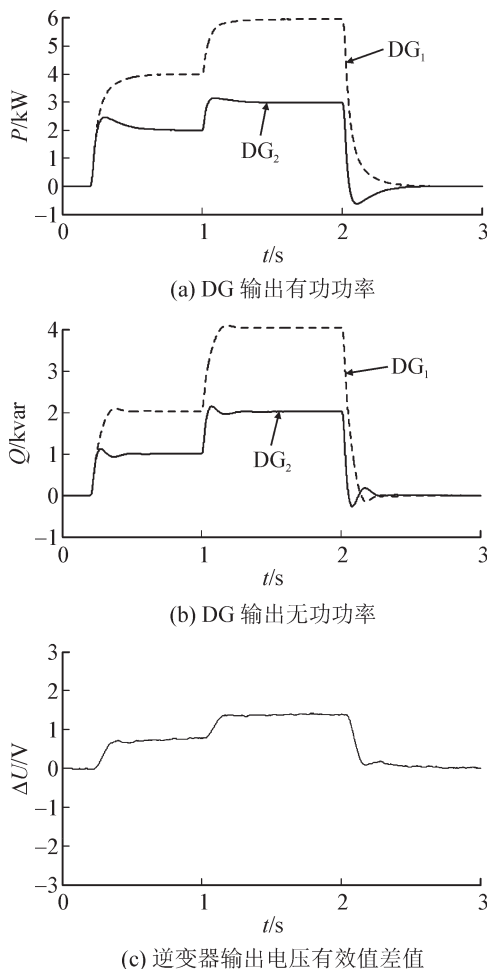


图 7 工况 2 改进下垂控制下仿真波形
Fig. 7 Simulation waveform of improved droop control at condition 2

3.3 工况 3: DG 容量不同,且线路阻抗参数不一致

同工况 2,设置容量比为 2:1 的两个 DG 并联,但线路阻抗参数不一致。图 8 为工况 3 下改进下垂控制策略的仿真结果。从图 8(b)可以看出本文所提的改进无功下垂控制策略对于此类工况依然适用,实现了两 DG 输出功率比与其容量比保持一致,且图 8(c)中可以看到两逆变器输出电压有效值差值几乎为零,所提控制策略有效的抑制了逆变器间的环流。

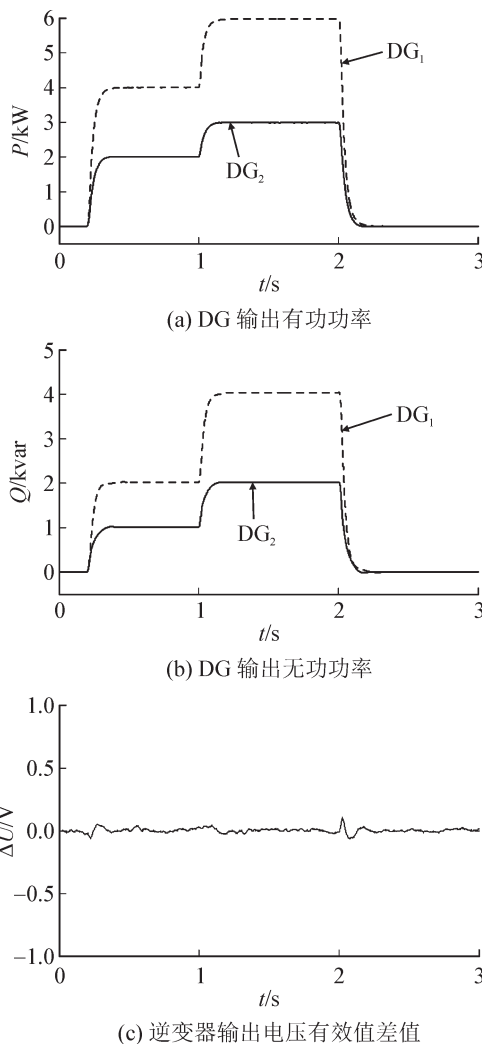


图 8 工况 3 改进下垂控制下仿真波形
Fig. 8 Simulation waveform of improved droop control at condition 3

3.4 工况 4: 3 台容量一致的 DG 并联运行,线路阻抗参数不一致

基于 Matlab/Simulink 平台建立了 3 台逆变器并联的仿真模型,3 个 DG 对应的线路阻抗各不相同。最后仿真波形见图 9,可以看出 3 个 DG 并联运行时无功功率得到了有效均分,说明文章所提改进下垂控制策略对于多逆变器并联时的无功功率均分问题适用具有良好的扩展性。

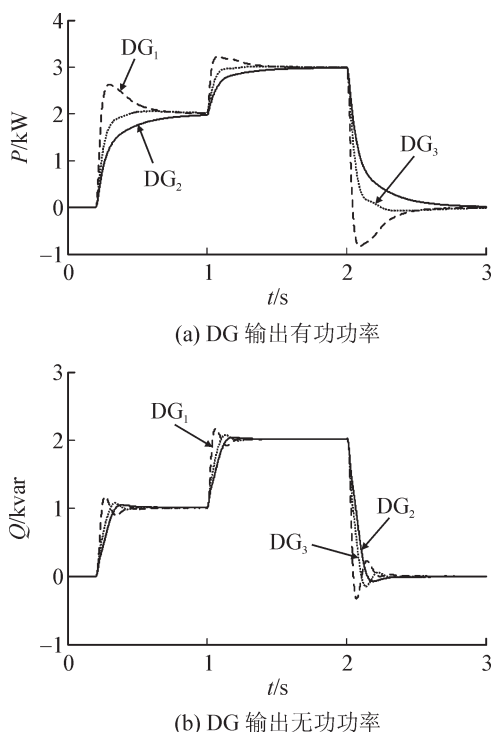


图9 工况4改进下垂控制下仿真波形
Fig. 9 Simulation waveform of improved droop control at condition 4

4 结语

针对微电网中逆变器并联时,由于线路阻抗不匹配以及并联的DG容量不相同等原因造成的逆变器间的功率均分问题,论文通过增加线路压降补偿环节,减小了固有的电压降落误差,在此基础上,考虑逆变器出口处电压与母线电压的一致性,改进了下垂控制式,并利用稀疏通信技术获取各DG的无功信息,引入自适应电压补偿环节,提高了无功功率均分精度及动态响应速度。最后,基于仿真实验,验证了文章所提控制策略的正确性与有效性。

参考文献

- [1] 米阳,王鹏,邓锦,等. 孤岛交直流混合微电网群分层协调控制[J]. 电力系统保护与控制,2021,49(20):1-8.
MI Yang, WANG Peng, DENG Jin, et al. Hierarchical coordinated control of island AC/DC hybrid microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(20): 1-8.
- [2] 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.
YANG Xinfu, SU Jian, LYU Zhipeng, et al. Overview of microgrid technology[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(1): 57-70.
- [3] 赵恩盛,韩杨,周思宇,等. 微电网惯量与阻尼模拟技术综述及展望[J]. 中国电机工程学报,2022,42(4):1413-1427.
ZHAO Ensheng, HAN Yang, ZHOU Siyu, et al. Review

- and prospect of inertia and damping simulation technologies of microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(4): 1413-1427.
- [4] 吕金历,冯智慧,孙亚璐,等. 直流微电网中风电机组的双向扩展惯性控制方法[J]. 电网与清洁能源,2022,38(6):89-97.
LYU Jinli, FENG Zhihui, SUN Yalu, et al. Bidirectional expansion inertial control method for wind turbines in DC microgrid[J]. Power System and Clean Energy, 2022, 38(6): 89-97.
- [5] 赵奇,吕洋,王毅,等. 考虑微电网灵活调节潜力的主动配电网鲁棒优化[J]. 浙江电力,2022,41(1):55-63.
ZHAO Qi, LYU Yang, WANG Yi, et al. Robust optimization of active distribution networks considering the flexible regulation potential of microgrids[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(1): 55-63.
- [6] 韩肖清,李廷钧,张东霞,等. 双碳目标下的新型电力系统规划新问题及关键技术[J]. 高电压技术,2021,47(9):3036-3046.
HAN Xiaoqing, LI Tingjun, ZHANG Dongxia, et al. New issues and key technologies of new power system planning under double Carbon goals[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3036-3046.
- [7] 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 研究现状分析[J]. 电工技术学报,2019,34(20):4226-4241.
CAO Wenyuan, HAN Minxiao, XIE Wenqiang, et al. Analysis on research status of parallel inverters control technologies for AC/DC distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(20): 4226-4241.
- [8] 焦皎,孟润泉,任春光,等. 交直流微电网AC/DC双向功率变换器控制策略[J]. 电力系统保护与控制,2020,48(16):84-92.
JIAO Jiao, MENG Runquan, REN Chunguang, et al. Bidirectional AC/DC interlinking converter control strategy for an AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(16): 84-92.
- [9] ISLAM S, DE S, ANAND S, et al. An improved droop control method to enhance dynamic performance of AC microgrid[C]//2018 20 th National Power Systems Conference (NPSC). [S. l.]: IEEE, 2018: 1-6.
- [10] 张成,赵涛,朱爱华,等. 弱电网下并联逆变器稳定性及电能质量治理研究[J]. 电力工程技术,2022,41(3):224-230.
ZHANG Cheng, ZHAO Tao, ZHU Aihua, et al. Stability and power quality control of parallel inverters in weak current network[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(3): 224-230.
- [11] 米阳,宋根新,宋元元,等. 孤岛交直流混合微电网群多

- 级功率管理策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(7): 38-45.
- MI Yang, SONG Genxin, SONG Yuanyuan, et al. Strategy of multi-level power management for islanded AC/DC hybrid microgrid cluster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(7): 38-45.
- [12] 钟诚, 王禹夫. 多逆变器下垂协调控制方法综述[J]. 电气自动化, 2017, 39(6): 7-10.
- ZHONG Cheng, WANG Yufu. Review of the droop coordinated control method for multiple inverters[J]. Electrical Automation, 2017, 39(6): 7-10.
- [13] 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.
- LIN Liaoyuan, LIN Zhao, LIU Wei, et al. Wireless current sharing scheme for parallel operation of inverters using resistive output impedance[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(8): 43-50.
- [14] 马文涛, 王金梅, 苗海东, 等. 不同功率等级逆变器并联的改进下垂控制策略研究[J]. 太阳能学报, 2021, 42(8): 16-22.
- MA Wentao, WANG Jinmei, MIAO Haidong, et al. Research on improved droop control strategy for paralleled inverters with different power levels[J]. Acta Energetica Sinica, 2021, 42(8): 16-22.
- [15] 常振东, 陶彩霞. 并联微网逆变器输出功率精确分配研究[J]. 电测与仪表, 2019, 56(11): 75-80.
- CHANG Zhendong, TAO Caixia. Research on accurate output power distribution of parallel micro-grid inverter[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2019, 56(11): 75-80.
- [16] 白小丹, 苗虹, 曾成碧, 等. 适用于低压微网中逆变器无功均分的改进下垂控制策略[J]. 高电压技术, 2020, 46(4): 1310-1318.
- BAI Xiaodan, MIAO Hong, ZENG Chengbi, et al. Improved droop control strategy for reactive power sharing of inverters in low-voltage microgrids[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(4): 1310-1318.
- [17] 周国庆, 严干贵, 赵书健, 等. 低压微电网孤岛运行模式下改进下垂控制[J]. 吉林电力, 2021, 49(1): 6-10.
- ZHOU Guoqing, YAN Gangui, ZHAO Shujian, et al. Improved droop control strategy of low-voltage microgrid under isolated island operation mode[J]. Jilin Electric Power, 2021, 49(1): 6-10.
- [18] 张继红, 赵锐, 刘云飞, 等. 低压微网阻性逆变器并联运行控制策略[J]. 高电压技术, 2022, 48(1): 136-146.
- ZHANG Jihong, ZHAO Rui, LIU Yunfei, et al. Resistive inverters output impedance parallel operation strategy in low-voltage microgrid[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(1): 136-146.
- [19] 杨帅帅, 卢子广, 宫萍萍. 基于等效阻抗的逆变器并联与环流抑制研究[J]. 电力电子技术, 2021, 55(7): 64-67.
- YANG Shuaishuai, LU Ziguang, GONG Pingping. Research on parallel connection and circulating current suppression of inverters based on equivalent impedance[J]. Power Electronics, 2021, 55(7): 64-67.
- [20] 吕志鹏, 吴鸣, 黄红, 等. 一种具有网络自适应能力的分布式电源改进下垂控制策略[J]. 电网技术, 2018, 42(9): 2948-2957.
- LYU Zhipeng, WU Ming, HUANG Hong, et al. An improved droop control with network self-adaptability for distributed generation[J]. Power System Technology, 2018, 42(9): 2948-2957.
- [21] 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, 33(7): 1450-1460.
- CHEN Jie, LIU Mingao, CHEN Xin, et al. Wireless parallel and circulation current reduction of droop-controlled inverters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(7): 1450-1460.
- [22] 张莹, 孟润泉, 王子昂, 等. 一种基于一致性算法的改进下垂控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 104-111.
- ZHANG Ying, MENG Runquan, WANG Ziang, et al. An improved droop control strategy based on a consensus algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 104-111.
- [23] 付国宏, 杨赞, 王元超, 等. 电子电力变压器并联运行的自适应下垂控制策略[J]. 电力系统及其自动化学报, 2019, 31(1): 77-83.
- FU Guohong, YANG Yun, WANG Yuanchao, et al. Adaptive droop control strategy for parallel operation of electronic power transformers[J]. Proceedings of the CSU-EPSC, 2019, 31(1): 77-83.
- [24] 郑晨, 周林, 刘雅娟, 等. 多逆变器并联并网系统稳定性分析[J]. 太阳能学报, 2020, 41(1): 115-124.
- ZHENG Chen, ZHOU Lin, LIU Yajuan, et al. Stability study of multi-parallel inverter system[J]. Acta Energetica Sinica, 2020, 41(1): 115-124.
- [25] 吕艳玲, 杜怡志. 低电压逆变器并联改进下垂控制技术[J]. 电机与控制学报, 2020, 24(10): 38-47.
- LYU Yanling, DU Yizhi. Improved droop control technology of low voltage inverter parallel[J]. Electric Machines and Control, 2020, 24(10): 38-47.
- [26] 许立, 董成哲. 基于虚拟阻抗的低压微网多逆变器环流抑制研究[J]. 电源学报, 2022, 20(5): 161-168.
- XU Li, DONG Chengzhe. Study on circulating current suppression of multi inverter in low-voltage microgrid based on virtual impedance[J]. Journal of Power Supply, 2022, 20

(5):161-168.

作者简介:

罗军杰(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为微电网保护与控制。E-mail:1772242586@qq.com。

粟时平(1963—),男,教授,主要研究方向为电力系统运行控制、新能源发电等。

倪亮(1998—),男,硕士研究生,主要研究方向为微电网运行与控制。

李志轩(1996—),男,硕士研究生,研究方向为隔离型变换器运行与控制。

苏乾坤(1999—),男,硕士研究生,主要研究方向为柔性多状态开关运行控制。

(上接第150页)

[21]D. FATEH, A. A. M. Birjandi, J. M. Safe sub synchronous oscillations response for large DFIG -based wind farms[J]. IEEE Access, 2020: 169822-169834

[22]H. LI . An improved fast detection method on subsynchronous resonance in a wind power system with a series compensated transmission line[J]. IEEE Access , 2019 (7) : 61512-61522.

[23]BAESMAT H J, M. BODSON. Suppression of sub-synchronous resonances through excitation control of doubly fed induction generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems 2019, 34(6):4329-4340.

[24]W DU Y W W, Q. FU. Concept of modal repulsion for examining the sub-synchronous oscillations in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4):4614-

4624.

作者简介:

鲁翔(1985—),男,高级工程师,研究方向为高压直流输电。

陈立群(1992—),男,工程师,研究方向为电力电子技术。

李成博(1985—),男,高级工程师,研究方向为电力电子技术。

李长伟(1980—),男,高级工程师,研究方向为电力电子技术。

段子越(1997—),男,博士研究生,研究方向为分频输电系统。

孟永庆(1976—),男,副教授,研究方向为电力系统运行与控制。