

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191303

自适应高通滤波下垂控制的孤岛直流微电网功率分配控制

喻思¹, 米阳¹, 马宇辰¹, 牛庆松², 亓富军², 彭静²

(1. 上海电力学院, 上海 200090; 2. 国网临沂供电公司, 山东 临沂 276002)

摘要: 直流微电网孤岛运行时, 由于不匹配线路阻抗及本地负荷因素的影响, 传统“电压-功率”下垂控制难以使得各分布式电源按照下垂系数精确分配负荷功率。提出了一种基于自适应高通滤波下垂控制的孤岛直流微电网功率分配控制策略。通过在分布式电源下垂控制中引入采样保持器, 根据采样保持器输出结果不断自适应地修改下垂系数, 进而减小分布式电源实际输出功率与期望输出功率的偏差, 同时高通滤波控制也有效提高了母线电压质量。最后基于 RTDS 仿真平台搭建不同工况下的实验模型, 实验结果验证了所设计控制策略的有效性。

关键词: 直流微电网; 负荷功率分配; 高通滤波控制; 分布式电源

Power distribution control of an island DC microgrid based on adaptive high-pass filter droop control

YU Si¹, MI Yang¹, MA Yuchen¹, NIU Qingsong², QI Fujun², PENG Jing²

(1. Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China; 2. State Grid Linyi Power Supply Company, Linyi 276002, China)

Abstract: For the islanded DC microgrid, it is difficult for the traditional "voltage-power" droop control to make the distributed generation to supply the load power accurately according to the droop coefficient. This is because of the unmatched line impedances and local loads. An island DC microgrid power allocation control strategy is proposed by using adaptive high-pass filtering droop control. By introducing the sample-and-holder, the droop coefficient is modified when the actual output power of DG deviates from the expected output power. At the same time, the high-pass filter control guarantees good bus voltage quality. Finally, based on the platform of RTDS, an experimental scheme under different working conditions is designed and the results verify the effectiveness of the proposed control strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61873159), Shanghai Committee of Science and Technology Projects (No. 18020500700), Shanghai Green Energy Grid Engineering Technology Research Center Projects (No. 13DZ2251900), "Electrical Engineering" Shanghai Class II Plateau Discipline, and Shanghai key Laboratory of Power Station Automation Technology.

Key words: DC microgrids; load power sharing; high-pass filtering droop control; distributed generation

0 引言

为协调全球能源危机及环境污染问题, 实现人类社会的可持续发展, 越来越多的可再生能源进入人们的视野。微电网^[1-2]作为一种将区域内分布式电源(Distributed Generation, DG)、储能和负荷整合起来的新型组网形式, 是实现大量分布式电源本地消

纳的有效解决方法之一^[3-4]。随着微电网内光伏、燃料电池、储能等直流电源的大量接入, 以及 LED 照明、电动汽车等直流负荷的迅速发展, 直流微电网因其在结构上减少了整流装置, 在降低成本、减少损耗的同时不存在频率稳定、无功补偿等问题备受国内外学术界和工业界的关注^[5-8]。直流微电网内各部分模块分别通过变换器连接于公共直流母线上, 各变换器之间的相互作用及影响增加了系统的耦合程度与控制难度; 现今, 随着直流负荷需求的不断增加, 直流微电网的容量需要进一步扩大, 如何协调微电网内多分布式电源间的控制逐渐成为当前研究的热点^[9-11]。

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(61873159); 上海市科委项目资助(18020500700); 上海绿色能源并网工程技术研究中心项目资助(13DZ2251900)“电气工程”上海市 II 类高原学科; 上海市电站自动化技术重点实验室

作为一个独立的整体,微电网可以实现并网及孤岛两种运行模式^[12]。孤岛运行时,微电网需要依靠自身内分布式电源间的协调控制实现合理的功率分配及电压稳定控制^[13]。随着微电网网络结构日益趋于复杂化,考虑到不匹配线路阻抗、本地负荷差异等因素的影响,传统下垂控制无法实现理想的功率分配控制效果,保证分布式电源按照其容量精确分配负荷功率,降低了分布式电源的效率^[14],同时下垂控制及线路阻抗会导致电压损耗,进一步降低直流母线电压质量,严重情况下甚至破坏系统的稳定运行^[15-17]。

近年来,国内外很多学者就以上问题展开了相关研究。文献[18-20]通过自适应改变下垂系数消除了不匹配线路阻抗的影响,但是较大的下垂系数会降低电压调节性能,需要加入额外的电压二次补偿控制来恢复电压,否则微电网无法稳定运行。文献[21]提出了一种新型电压导数下垂控制,改善电流负荷分配精度的同时提高输出电压质量,但该方法并没有完全消除不匹配线路阻抗对电流负荷分配的影响。文献[22]提出了一种根据负载情况改变下垂参数的柔性控制方法,但轻载情况下负荷分配精度仍有较大误差,并且工程上获取高次电流电气量非常困难。文献[23]通过向微电网主动注入单脉冲扰动计算出线路阻抗信息,以此改变下垂系数,消除了不匹配线路阻抗对电流负荷分配的影响,但在线路阻抗和等效电容较小的情况下,该方法误差较大。

综上所述,现有研究方法大多无法在保证微电网经济灵活运行的情况下,同时达到良好的负荷功率分配及直流母线电压控制效果。因此,本文提出一种用于负荷功率精确分配的自适应高通滤波下垂控制,精确分配负荷功率的同时有效避免了传统下垂控制导致的直流母线电压严重偏离额定值,最大程度地发挥了分布式电源的效率。该分布式控制策略简单易行,无需辨别微电网复杂网络端口信息,具有良好的网络自适应能力。最后,利用 RTDS 实验平台设计不同工况下的算例,所得结果验证了所设计控制策略的有效性。

1 微电网结构及负荷功率分配误差分析

1.1 微电网结构

本文主要研究孤岛运行模式下,直流微电网内并联分布式电源间的负荷功率分配及电压稳定问题。典型微电网结构如图 1 所示,包含交流主网、直流母线、分布式电源(含储能单元)、本地负荷及

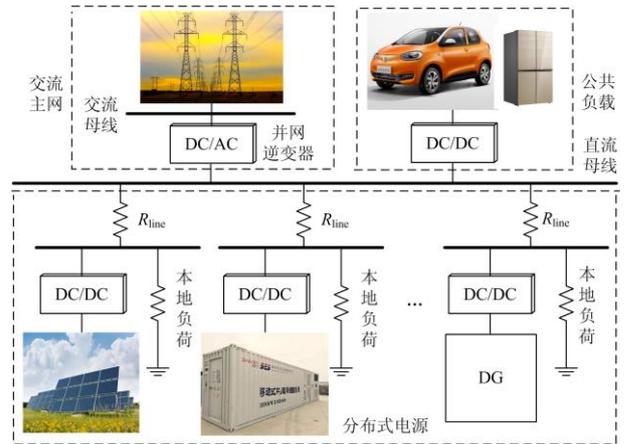


图 1 典型微电网结构

Fig. 1 Typical structure of microgrid

公共负荷,各 DG 单元通过相应变流器和线路阻抗连接于公共直流母线上。 R_{line} 表示相应 DG 单元上的线路阻抗。

$$\sum_{i=1}^N P_{dci} = P_{pub} + \sum_{i=1}^N P_{Li} + \sum_{i=1}^N \Delta P_i \quad (1)$$

式中: $P_{dci}(i=1,2,\dots,N)$ 为第 i 个 DG 单元的输出功率; P_{pub} 为公共直流母线上的公共负荷; P_{Li} 为第 i 个 DG 单元的本地负荷; ΔP_i 为相应 DG 单元出口线路阻抗上的功率损耗。

1.2 传统下垂控制下负荷功率分配误差分析

孤岛运行时, DG 单元通常采用下垂控制实现负荷功率在各 DG 单元之间的自主分配,传统“电压-功率”下垂控制表达式如式(2)所示。

$$u_{dci} = u_{ref} - m_i P_{dci} \quad (2)$$

式中: u_{dci} 为第 i 个 DG 单元变流器实际直流输出电压值; u_{ref} 为直流输出电压参考值; m_i 为第 i 个 DG 单元的下垂系数。

图 2 为两组 DG 单元并联运行时的等效电路图, u_{pcc} 为直流母线电压。根据图 2,当系统稳定运行时,若不考虑本地负荷及不匹配线路阻抗的影响,各 DG 单元输出电压满足:

$$u_{dc1} = \dots = u_{dci} = \dots = u_{dcN} = u_{pcc} \quad (3)$$

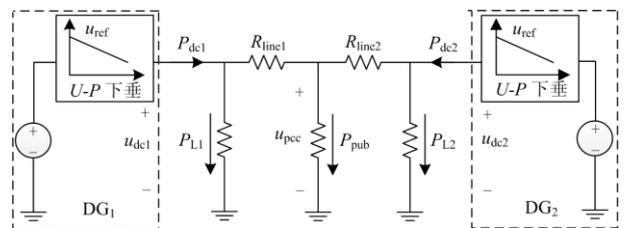


图 2 2 组 DG 并联运行等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuit diagram of two groups of DG

根据式(2)、式(3)得, 当各 DG 单元根据其额定容量设置下垂系数时, 可使其按各自容量成比例精确地分配负荷功率, 即

$$\frac{P_{dci}}{P_{dcj}} = \frac{P_{ratedi}}{P_{ratedj}} = \frac{m_j}{m_i} \quad (4)$$

式中, P_{ratedi} 为第 i 个 DG 单元额定最大输出功率。

然而, 实际微电网中线路阻抗无法忽略, 输电线路往往无法保证各 DG 单元线路阻抗参数完全相同, 导致各 DG 单元实际输出电压不一致。同时, 当 DG 出口处存在本地负荷, 其功率突变会进一步影响微电网的供电可靠性, 严重情况下甚至导致变流器重载运行甚至损坏。以两个具有相同额定容量 DG 单元的孤岛直流微电网为例, 采用相同的下垂系数, 当线路阻抗不一致且本地负荷存在差异时, 传统下垂控制下负荷功率分配特性如图 3 所示。

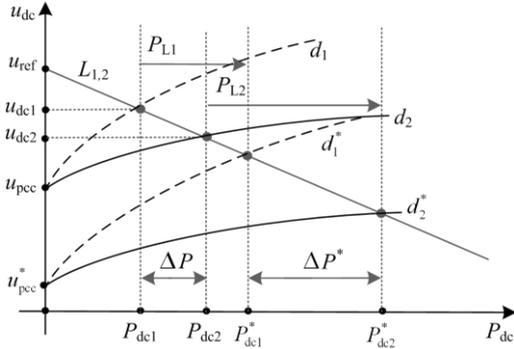


图 3 含本地负荷的 DG 单元下垂特性

Fig. 3 Droop characteristics of DG units with local loads

传统下垂控制下 DG 单元的下垂特性曲线分别为 L_1 、 L_2 , 不考虑各 DG 出口存在本地负荷时, 负荷特性曲线分别为 d_1 、 d_2 , 线路阻抗不匹配导致 DG 单元实际输出电压 $u_{dc1} \neq u_{dc2}$, 此时系统存在负荷功率分配偏差为 ΔP ; 考虑含本地负荷时, 当 DG₁ 出口处的本地负荷增加 P_{L1} , DG₂ 出口处的本地负荷增加 P_{L2} , 且 $P_{L1} \neq P_{L2}$ 时, 负荷特性曲线分别向右平移为 d_1^* 、 d_2^* , 当 DG 达到新的稳定运行状态时, DG₁、DG₂ 的实际输出功率分别为 P_{dc1}^* 、 P_{dc2}^* , 此时, 新的负荷功率分配偏差为 ΔP^* , 根据图 3 得

$$\Delta P^* = P_{dc1}^* - P_{dc2}^* = \Delta P + (P_{L2} - P_{L1}) \quad (5)$$

由式(5)可以看出, DG 单元间的负荷功率分配不仅与线路阻抗有关, 还与其出口处的本地负荷有关, 本地负荷的波动将进一步影响各 DG 单元间的负荷功率分配精度。

2 孤岛直流微电网改进负荷功率分配控制

2.1 改进负荷功率分配的自适应下垂控制

针对传统下垂控制由于不匹配线路阻抗及本地负荷的存在导致分布式电源间无法实现负荷功率精确分配的问题, 本文提出基于自适应下垂控制的改进负荷功率分配控制策略, 如式(6)一式(8)所示。

$$u_{dci_{(n+1)}} = u_{ref} - M_{i_n} P_{dci_n} \quad (6)$$

$$P_{dci_n}^* = \frac{P_{ratedi}}{\sum_{i=1}^N P_{ratedi}} \sum_{k=1}^N P_{dci_k} \quad (7)$$

$$M_{i_n} = m_0 + k_p (P_{dci_n} - P_{dci_n}^*) \quad (8)$$

式中: $u_{dci_{(n+1)}}$ 为 DG_i 单元在第 $n+1$ 次采样周期的输出电压; M_{i_n} 为 DG_i 单元在第 n 次采样周期的下垂系数; P_{dci_n} 为 DG_i 单元在第 n 次采样周期的输出功率; $P_{dci_n}^*$ 为 DG_i 单元在第 n 次采样周期的期望输出功率; m_0 为初始下垂系数; k_p 为功率调节系数, 主要影响分布式电源间负荷功率的收敛效果。

基于式(6)一式(8), 本文提出的自适应下垂控制具体工作过程为: 在每个 DG 单元的本地下垂控制中引入采样保持器, 同时, 为减轻系统对于通信总线的压力, 利用低带宽通信在每个周期采集 DG 单元的当前输出功率信息, 并根据式(7)计算出当前期望输出功率。此时, 无论各 DG 单元线路阻抗及本地负荷如何配置, 一旦 DG 单元实际输出功率与期望输出功率存在偏差, 采样保持器立即工作, 根据式(8)期望输出功率与本地输出功率采样结果做差, 输出结果在每个采样周期自适应地修改相应下垂系数, 直至完全消除不匹配线路阻抗及本地负荷因素对负荷功率分配的影响。

2.2 自适应高通滤波下垂控制时序分析

为详细阐述本文所提控制策略下直流微电网 DG 单元负荷功率分配调节过程, 以并联运行的两台具有相同额定容量的 DG 单元为例进行自适应高通滤波下垂控制时序分析, 此时, 各 DG 单元应均分负荷功率。首先, 各 DG 单元运行在传统下垂控制模式, T 秒时, 同步触发信号由 $S=0$ 切换为 $S=1$, 触发各 DG 单元采样保持器工作, 在第一个采样周期, 根据式(6)一式(8), 有

$$u_{dci_1} = u_{ref} - M_{i_0} P_{dci_0} = u_{ref} - [m_0 + k_p (P_{dci_0} - P_{ave_0})] P_{dci_0} \quad (9)$$

若 $R_{linej} > R_{linei}$, 则 $P_{dci_0} < P_{dcj_0}$; 采样保持器

进行第一个采样周期后, 有

$$\begin{cases} u_{dci_1} = u_{ref} - [m_0 + k_p (P_{dci_0} - P_{ave_0}^*)] P_{dci_0} \\ u_{dcj_1} = u_{ref} - [m_0 + k_p (P_{dcj_0} - P_{ave_0}^*)] P_{dcj_0} \end{cases} \quad (10)$$

根据式(10), 有 $P_{dci_0} - P_{ave_0}^* < 0$, $P_{dcj_0} - P_{ave_0}^* > 0$, 故 $M_{i_0} < M_{j_0}$, 由此分析出第一次采样周期后, DG_i 单元减小下垂系数为 M_{i_0} 以相应增大其输出负荷功率, 故 $P_{dci_0} < P_{dci_1}$, 而 DG_j 单元则增大下垂系数为 M_{j_0} 以相应减小其输出负荷功率, 故 $P_{dcj_1} < P_{dcj_0}$ 。随着采样周期不断进行, 采样保持器不断进行工作自适应地修改相应 DG 单元的下垂系数, 如图 4 所示, P_{dci_n} 不断增大, P_{dcj_n} 不断减小, 其负荷功率分配偏差不断减小直至最后完全消除。当 DG 单元出口处存在本地负荷及发生波动时, 分析过程和上述类似。

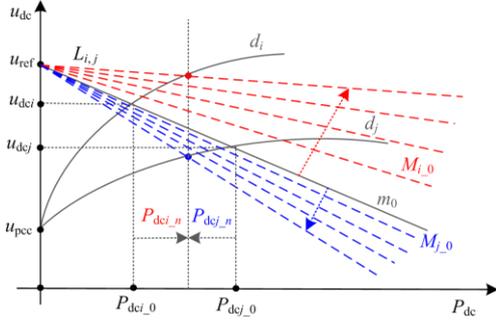


图 4 第一次采样周期后 DG 负荷功率分配
Fig. 4 Load power distribution of DG after the first sampling period

2.3 直流母线电压稳定控制

直流母线电压作为判断直流微电网是否稳定运行状况的重要指标, 需控制在合理的波动范围内 ($\pm 5\% u_{ref}$) 才能保证微电网的正常稳定运行。通常情况下, 直流母线电压偏差由两部分叠加组成, 第一部分是下垂控制有差调节产生的 DG 输出电压偏差 Δu_{dci} , 这部分电压偏差一般较大。因为实际微电网中下垂系数远大于线路阻抗参数, 改变下垂系数可以改变负荷功率在 DG 单元间的分配, 较大的下垂系数可以提高负荷功率分配的精度, 但同时会导致 DG 输出电压大幅度偏离额定值, 进而降低直流母线电压质量, 严重时甚至会导致整个微电网崩溃。第二部分则是相应线路阻抗上的损耗电压, 这部分电压一般很小, 可忽略不计。为保证直流微电网良好的电压质量, 在上述改进负荷功率分配的自适应下垂控制的基础上设计了高通滤波控制, 优化负荷功率分配的同时有效消除有差下垂控制导致的 DG 输出电压大幅度偏差, 其具体确定方法如下。

对式(2)所示传统下垂控制公式两边进行求导, 得

$$\begin{cases} \frac{d\Delta u_{dci}}{dt} + M_i \frac{dP_{dci}}{dt} = 0 \\ \Delta u_{dci} = u_{dci} - u_{ref} \end{cases} \quad (11)$$

为了维持直流母线电压的稳定, 实现 DG 输出电压无偏差控制 $\Delta u_{dci}=0$, 同时保证各 DG 单元输出功率不受影响, 即 $dP_{dci}/dt=0$, 在等式(11)左边增加一个电压补偿项 $k_v \Delta u_{dci}$, 得

$$\frac{d\Delta u_{dci}}{dt} + M_i \frac{dP_{dci}}{dt} + k_v \Delta u_{dci} = 0 \quad (12)$$

式中, k_v 为 DG 输出电压补偿系数。

对式(12)应用拉普拉斯变换, 得

$$s\Delta u_{dci}(s) + M_i s\Delta P_{dci}(s) + k_v \Delta u_{dci}(s) = 0 \quad (13)$$

进一步化简, 得

$$\Delta u_{dci}(s) = -M_i \frac{s}{s + k_v} P_{dci}(s) \quad (14)$$

基于上述分析, 本文提出的自适应高通滤波下垂控制表达式为

$$u_{dci} = u_{ref} - M_i \frac{s}{s + k_v} P_{dci} \quad (15)$$

式(15)相当于将 DG 输出功率进行高通滤波后再作为自适应下垂控制的实际输入功率参与微电网的功率分配。该控制可使微电网在线路阻抗参数不确定的情况下 DG 输出电压始终运行于额定值, 保证了微电网直流母线较高的电压质量。

综上所述, 本文提出的基于自适应高通滤波下垂控制的孤岛直流微电网功率分配控制的控制系统框图如图 5 所示。其中 S/H 为采样保持器, 同步信号 S 为开关函数, S=0 表示采样保持器不工作, 系统工作在传统下垂控制模式; S=1 表示采样保持器工作, 系统工作在改进下垂控制模式。

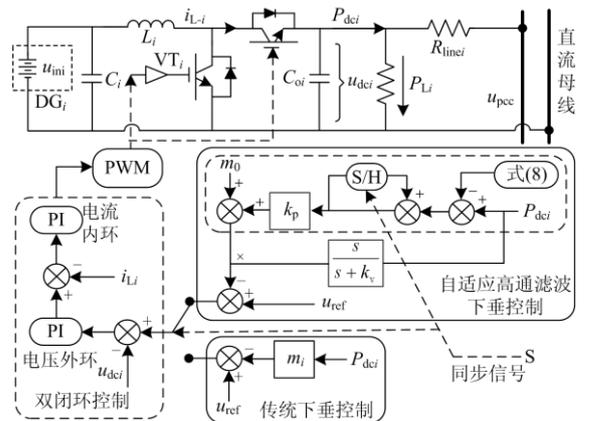


图 5 基于自适应高通滤波下垂控制系统框图
Fig. 5 System block diagram based on adaptive high-pass filtering droop control

3 基于 RTDS 平台验证

为验证本文所设计控制策略的有效性, 基于 RTDS 平台搭建了如图 6 所示含三组并联分布式电源(DG₁、DG₂、DG₃)的孤岛直流微电网系统。对孤岛直流微电网分布式电源间负荷功率分配进行具体分析, 系统控制参数见表 1。

表 1 微电网系统参数

Table 1 System parameter of the microgrid

参数	取值	参数	取值
u_{ref}	400 V	R_{line1}	0.1 Ω
R_{line2}	0.2 Ω	R_{line3}	0.3 Ω
m_0	0.008	k_p	5e-8
w_c	50 rad/s	k_v	1

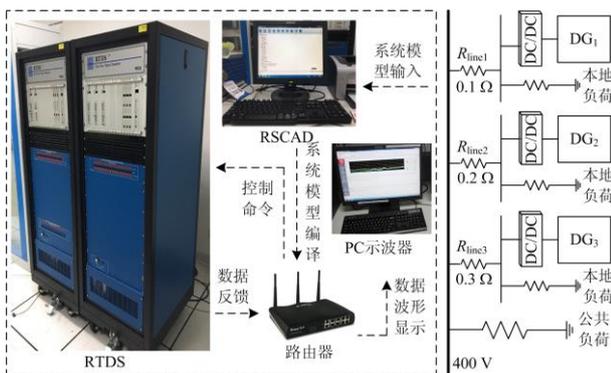


图 6 基于 RTDS 的控制框图

Fig. 6 Control diagram based on RTDS

3.1 算例 1: 不考虑本地负荷时 DG 负荷功率分配

本算例主要验证不考虑本地负荷时孤岛直流微电网 DG 单元间的负荷功率分配, 直流母线处公共负荷初始为 8 kW, 4 s 后增加 3 kW, 各 DG 单元具有相同的额定容量(20 kW), 故其输出功率应该均分; 由图 7 可知, 传统下垂控制无法达到理想的负荷功率分配效果, 分配偏差始终存在, 且下垂系数的引入导致母线电压严重偏离额定值, 甚至超出安全运行范围($\pm 5\% u_{ref}$)。图 8 为基于自适应高通滤波下垂控制的直流微电网功率分配控制波形图。由图 8(a)可知, 在本文所提控制策略下, DG 单元间的输出功率很快收敛, 最终实现了负荷功率的平均分配; 同时, 图 8(b)说明高通滤波控制的引入消除了传统下垂控制导致的 DG 输出电压大幅度跌落, 此时无论负荷如何变化, 直流母线电压基本维持在额定值附近, 保证了微电网良好的供电质量。

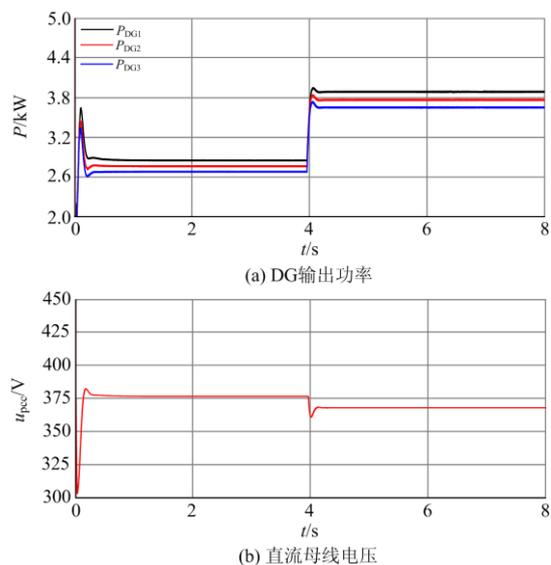


图 7 传统下垂控制下实验结果

Fig. 7 Experiment result with traditional droop control

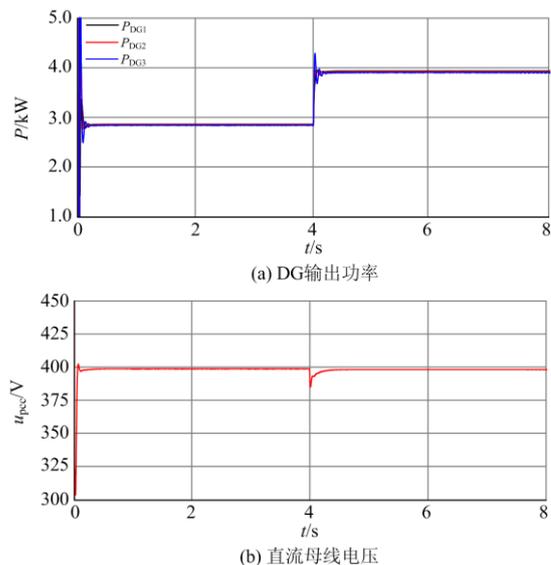


图 8 改进下垂控制下实验结果

Fig. 8 Experiment result with improved droop control

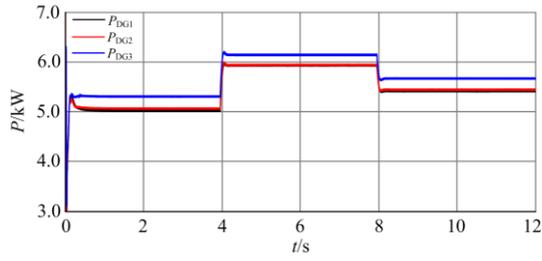
3.2 算例 2: 考虑本地负荷时 DG 负荷功率分配

本算例主要研究同时考虑不匹配线阻及本地负荷时本文所提控制策略的有效性, 并与传统下垂控制进行了对比验证。负荷功率分布情况如表 2 所示, 所得实验结果如图 9、图 10 所示。对比图 7(a)、图 9(a)知, 由于考虑了本地负荷的影响, DG 间输出功率分配误差情况有所不同, 表明本地负荷对负荷功率分配精度也存在影响。由图 10 可知, 在本文所提控制策略下, 负荷功率实现了均分, 且直流母线电压偏差很小, 提高了微电网的整体运行效率。

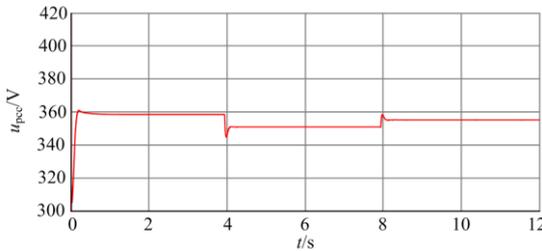
表 2 负荷功率分布情况

Table 2 Load power distribution

时间/s	DG ₁ 本地 负荷/kW	DG ₂ 本地 负荷/kW	DG ₃ 本地 负荷/kW	公共 负荷/kW
0~4	1.8	1.8	3.6	8
4~8	4.4	1.8	3.6	8
8~12	4.4	1.8	1.2	8



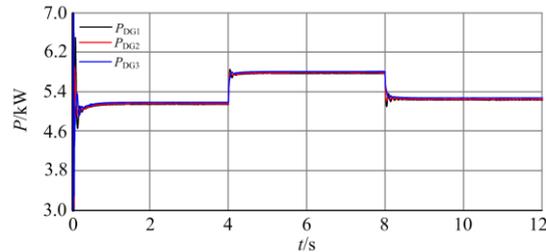
(a) DG输出功率



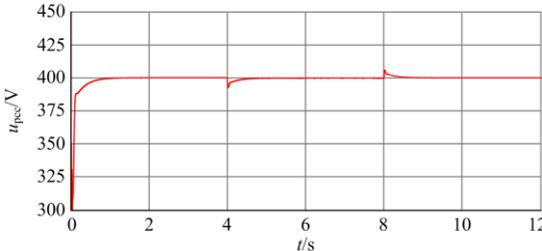
(b) 直流母线电压

图 9 传统下垂控制下实验结果

Fig. 9 Experiment result with traditional droop control



(a) DG输出功率



(b) 直流母线电压

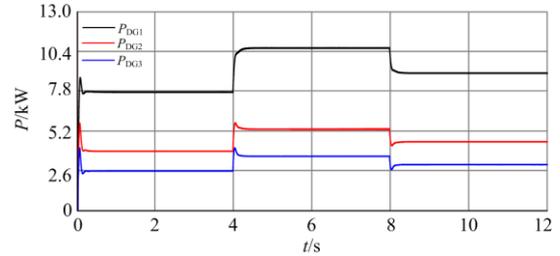
图 10 改进下垂控制下实验结果

Fig. 10 Experiment result with improved droop control

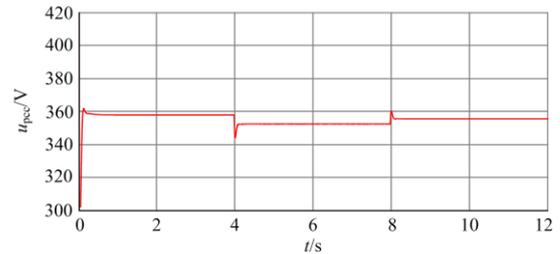
3.3 算例 3: DG 负荷功率 1:2:3 分配

为不失一般性, 本算例以三组分布式电源具有

不同容量(DG₁=10 kW, DG₂=20 kW, DG₃=30 kW)为例, 研究本文所提控制策略下负荷功率分配的有效性, 负荷分布情况同算例 2 中表 2 所示, 实验结果如图 11、图 12 所示。可以看出, 较传统下垂控制, 本文所提控制策略可以实现 DG 间输出功率按比例 1:2:3 分配。



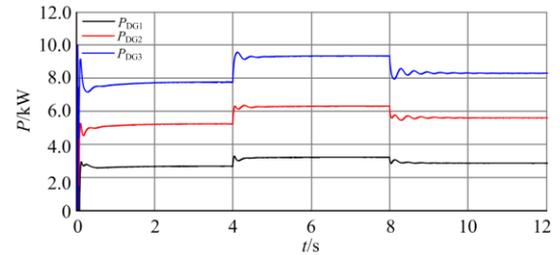
(a) DG输出功率



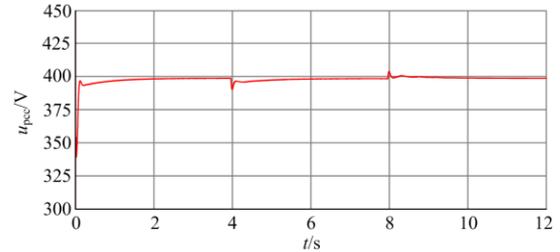
(b) 直流母线电压

图 11 传统下垂控制下实验结果

Fig. 11 Experiment result with traditional droop control



(a) DG输出功率



(b) 直流母线电压

图 12 改进下垂控制下实验结果

Fig. 12 Experiment result with improved droop control

4 结论

本文针对孤岛直流微电网并联分布式电源间负荷功率分配问题, 同时考虑了不匹配线阻及本地负

荷的影响, 详细分析了传统下垂控制策略下, 不匹配线阻及本地负荷对并联 DG 单元间负荷功率分配的影响。提出一种基于自适应高通滤波下垂控制的孤岛直流微电网负荷功率分配控制策略。同时, 在不需要依靠额外电压二次控制的情况下, 利用高通滤波控制直接消除了传统有差下垂控制导致的 DG 输出电压偏差, 进一步使得直流母线电压基本维持在额定值附近, 微电网的稳定性和经济性大大提升。最后利用 RTDS 平台搭建不同工况下的具体算例, 其结果验证了本文所提控制策略的有效性。

参考文献

- [1] 李霞林, 郭力, 王成山. 直流微电网关键技术研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 2-17.
LI Xialin, GUO Li, WANG Chengshan. Review of the key technologies of DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [2] 王成山, 李微, 王议锋, 等. 直流微电网母线电压波动分类及抑制方法综述[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1): 84-97.
WANG Chengshan, LI Wei, WANG Yifeng, et al. Summarization of classification and suppression methods of DC microgrid bus voltage fluctuation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 84-97.
- [3] GUO W, MU L. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 56-62. DOI: 10.1186/s41601-016-0019-8.
- [4] KHORSANDI A, ASHOURLOO M, MOKHTARI H. Automatic droop control for a low voltage DC microgrid[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(1): 41-47.
- [5] WANG Panbao, LU Xiaonan, YANG Xu, et al. An improved distributed secondary control method for DC microgrids with enhanced dynamic current sharing performance[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(9): 6658-6673.
- [6] 刘宁宁, 曹炜, 赵晋斌. 直流微电网的一种增量式下垂[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(8): 24-30.
LIU Ningning, CAO Wei, ZHAO Jinbin. An incremental droop control method for DC micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(8): 24-30.
- [7] 肖湘宁, 王鹏, 陈萌, 等. 基于分布式多代理系统的孤岛微电网二次电压控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(8): 1894-1902.
XIAO Xiangning, WANG Peng, CHEN Meng, et al. Secondary voltage control in an islanded microgrid based on distributed multi-agent system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(8): 1894-1902.
- [8] 米阳, 吴彦伟, 纪宏澎, 等. 基于多组储能动态调节的独立直流微电网协调控制[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(5): 170-176.
MI Yang, WU Yanwei, JI Hongpeng, et al. Coordinative control based on dynamic load allocation among multiple energy storages for islanded DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(5): 170-176.
- [9] 刘一琦, 王建曠, 傅裕, 等. 直流微电网中不同网络结构的负荷功率分配精度研究[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 53-59.
LIU Yiqi, WANG Jianze, FU Yu, et al. Load power sharing accuracy for different network configurations of DC microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 53-59.
- [10] LOH P C, LI D, CHAI Y K. Autonomous operation of hybrid microgrid with AC and DC subgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(5): 2214-2223.
- [11] 柏管, 陈卓, 刘飞. 基于自调节下垂控制的额分布式电源并联运行技术[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 120-126.
BAI Guan, CHEN Zhuo, LIU Fei. Parallel operation technology of distributed generation based on self-regulation droop control[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 120-126.
- [12] TAH A, DAS D. An enhanced droop control method for accurate load sharing and voltage improvement of isolated and interconnected DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2016, 7(3): 1194-1204.
- [13] 谢文强, 韩民晓, 王皓界, 等. 基于虚拟电压的直流微电网多源协调控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(5): 1408-1418.
XIE Wenqiang, HAN Minxiao, WANG Haojie, et al. Multi-source coordinated control strategy of DC micro-grid based on virtual voltage[J]. Proceedings of the CESS, 2018, 38(5): 1408-1418.
- [14] 孙孝峰, 杨雅麟, 赵巍, 等. 微电网逆变器自适应下垂控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2386-2391.
SUN Xiaofeng, YANG Yalin, ZHAO Wei, et al. An adaptive droop control method for inverters in microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2386-2391.
- [15] 杜燕, 苏建徽, 张榴晨, 等. 改进负荷分配的孤岛微网下垂控制方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(15):

- 24-29, 125.
- DU Yan, SU Jianhui, ZHANG Liuchen, et al. A droop control method for improving load distribution in an island microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(15): 24-29, 125.
- [16] GUERRERO J M, VASQUEZ J C, MATAS J, et al. Hierarchical control of droop-controlled AC and DC microgrids—a general approach toward standardization[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 58(1): 158-172.
- [17] JIN C, WANG J J, WANG P. Coordinated secondary control for autonomous hybrid three-port AC/DC/DS microgrid[J]. CSEE Journal of Power & Energy Systems, 2018, 4(1): 1-10.
- [18] 陆晓楠, 孙凯, 黄立培, 等. 直流微电网储能系统中带有母线电压跌落补偿功能的负荷功率动态分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(16): 37-46.
- LU Xiaonan, SUN Kai, HUANG Lipai, et al. Dynamic load power sharing method with elimination of bus voltage deviation for energy storage systems in DC micro-grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(16): 37-46.
- [19] LU X, SUN K. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 61(6): 2804-2815.
- [20] 李鹏程, 张纯江, 袁然然, 等. 改进 SOC 下垂控制的分布式储能系统负荷电流分配方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(13): 3746-3754.
- LI Pengcheng, ZHANG Chunjiang, YUAN Ranran, et al. Load current sharing method of distributed energy storage systems by improved SOC drooping control[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(13): 3746-3754.
- [21] KHORSANDI A, ASHOURLOO M, MOKHTARI H. Automatic droop control for a low voltage DC microgrid[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(1): 41-47.
- [22] 杨捷, 金新民, 吴学智, 等. 一种适用于直流微电网的改进型电流负荷分配控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(1): 59-67.
- YANG Jie, JIN Xinmin, WU Xuezhi, et al. An improved load current sharing control method in DC microgrids[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 59-67.
- [23] 刘琛, 赵晋斌, 王闪闪, 等. 基于单脉冲注入的直流微电网线路阻抗检测[J]. 电工技术学报, 2018, 33(11): 2584-2591.
- LIU Chen, ZHAO Jinbin, WANG Shanshan, et al. A line impedance identification based on single pulse injection in DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(11): 2584-2591.

收稿日期: 2019-10-23; 修回日期: 2019-11-09

作者简介:

喻 思(1996—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为微电网控制、储能优化控制; E-mail: 1445105060@qq.com

米 阳(1976—), 女, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为微电网控制、电力系统稳定与控制等; E-mail: miyangmi@163.com

马宇辰(1996—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网控制、储能优化控制。E-mail: 596815532@qq.com

(编辑 魏小丽)