

DOI: 10.7667/PSPC170490

直流微电网的一种增量式下垂控制方法

刘宁宁, 曹 炜, 赵晋斌

(上海电力学院电气工程学院, 上海 200090)

摘要: 在直流微电网中, 下垂控制是解决负荷功率分配问题的基本控制方法之一。传统的下垂控制方法是基于负荷电流 I 的 $U-I$ 下垂控制, 这种方法虽然可靠性和经济性较好, 但是在实际直流微电网运行中由于各微电源之间线路阻抗不一致或者本地负荷不平衡, 各分布式电源发出的有功功率会出现分配不均进而产生系统环流。为此, 提出一种电压增量式 $P-\dot{V}$ 下垂控制方法。该方法引入了电压变化率 \dot{v} , 并且利用平均负荷 p_{av} 来校正每台变化器的输出功率, 从而达到输出有功功率一致、减小系统环流的目的。对该控制方法分别在连线阻抗不一致和本地负荷不平衡的工况下进行了仿真验证, 其结果验证了该控制方法的有效性。

关键词: 增量式控制; 电压变化率; 线路阻抗; 本地负荷; 功率分配

An incremental droop control method for DC micro-grid

LIU Ningning, CAO Wei, ZHAO Jinbin

(College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Shanghai 200090, China)

Abstract: In the DC micro-grid, the droop control is a basic control method to solve the problem of load sharing. The conventional droop control method is the $U-I$ droop control based on the load current I . Although the reliability and economy of this method are better, due to the inconsistent line impedances or unbalanced local load between micro sources during real DC micro-grid operation, the load will not be shared accurately between DGs and then produce system circulation. A voltage incremental $P-\dot{V}$ droop control method is proposed, which introduces the voltage change rate \dot{v} and corrects the output power of each DG by using the average power p_{av} , to achieve reasonable load share and reduce the circulating current. The control method is simulated in the line impedance inconsistency and local load imbalance to verify the feasibility of the control method.

This work is supported by Natural Science Foundation of Shanghai (No. 16ZR1413000).

Key words: incremental control; voltage change rate; line impedances; local load; load sharing

0 引言

近几年来, 化石能源的逐渐减少和环境污染问题的日益加剧, 光伏、风能和燃料电池等分布式可再生能源(Distributed Energy Resources, DERs)成为人们研究的热点^[1-2]。随着电力电子技术的不断发展, 微电网成为了未来智能配用电系统的重要组成部分, 对推动能源减排和实现能源可持续发展具有重要意义。相比于交流微电网, 直流微电网不存在无功、谐波等问题。而且直流微电网可以更加高效可靠地接纳风、光等分布式可再生能源(DERs)以及其他直流负荷(个人电脑、LED 照明和电动汽车等)^[3-4]。

直流微电网中, 分布式发电单元和负荷必须通过直流变换器接入各个电压等级母线。如何实现各个发电单元之间负荷功率的合理分配和良好的电压

质量是整个直流微电网系统的重要研究目标。直流微电网中对于变换器的控制策略研究主要分为集中式控制和分布式控制两种^[5-7], 前者主要结构是由顶层的集中控制器和底层的控制单元组成, 各个单元基于高速通信网络实现的一种信息采集、参数整合和信息交互的控制模式。这种通信方式适用于大容量的直流微电网; 而后者基于本地信息完成自身的一些控制目标, 不需要通信线即可实现功率分配和电压调整, 更适用于容量较小的直流微电网^[8]。传统的 $U-I$ 下垂控制策略是采集输出电流的信息并根据线路的阻抗线性化来调整母线的电压进而调整功率的分配。该策略在实际运行中存在以下几个问题: 1) 低压直流系统中, 由于线路电阻的存在, 母线电压会随着输出电流的增加而减小, 当电流变化较大或下垂系数选取较大时会产生较大的电压偏差; 2) 各个 DG 之间连线阻抗的不一致或者由于存在不平衡的本地负荷影响功率分配的准确度^[9-10]。

基金项目: 上海市自然科学基金项目资助(16ZR1413000)

针对以上这两个问题, 现在学者主要提出了以下几种解决方案: 第一种是改进的自适应下垂系数法, 将 $U-I$ 的下垂控制系数用功率和电压的有关函数表示。当微电网孤岛运行时, 功率进入某一个预设的区间可以调整下垂系数, 有效地降低了电压幅值和频率的波动。这种方法在文献[11-13]中已有应用, 但是该方法稳定性差, 不足以满足复杂的微网系统。针对第二个问题, 文献[14]中提出了一种基于虚拟电阻的改进下垂控制, 可以减小因为连线阻抗不一致而带来的环流, 但并没有考虑 DG 带有本地负荷的情况^[15-17]。文献[18]将分层控制体系引入到直流微电网的控制中, 在不同的时间尺度分别实现对设备和系统参数的控制调整, 旨在实现直流微电网控制系统的整体性能。文献[19]采用基于动态虚拟阻抗的改进控制, 使得虚拟阻抗值能够自适应调整取值, 降低线路电压降落。文献[20-22]中通过引入通信来交换 DG 之间的电流、电压和功率参数, 主控制器综合信息可以调整各个 DG 之间的功率分配。

本文在解决由于线路阻抗不一致和本地负荷不平衡引起的功率分配不合理的问题上, 提出了一种增量式下垂控制方法。引入电压变化率 \dot{v} , 在 $P-\dot{V}$ 下垂控制方式下利用通信分享微源间的功率信息来调整输出功率的差值, 实现了功率的均分, 减小了系统环流。并且在稳态的时候能够通过调整电压变化率 \dot{v} 来满足对电压质量的要求。最后的仿真结果均验证了该方法的可靠性与可行性。

1 传统下垂控制策略分析

直流微电网一般由微电源、直流变换器、储能装置和负荷组成。其运行模式有孤岛运行和并网运行两种, 当工作在并网模式下, 直流微电网需要外部交流电网通过双向 DC-AC 变流器互联进行能量的流动; 在孤岛运行模式下直流微电网不需要跟大电网互联, 多个分布式电源给负荷供电。根据本文所提的下垂控制策略设计了如图 1 所示的简化模型。

图 1 中: DG_i 为直流微电网中多个分布式发电

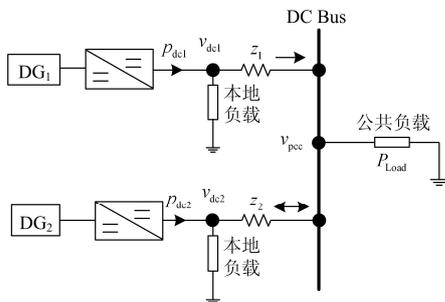


图 1 微电网简化结构示意图

Fig. 1 Microgrid simplified structure schematic

单元, p_{dci} 为 DG_i 的输出功率, $Z_{linei} = R_{linei} + jX_{linei}$ 为分布式电源 DG_i 与公共负载之间的连线阻抗。

在两机并联的简化模型中, 下垂控制公式表示为

$$v_{dci} = v_{dci}^* - i_{dci} \cdot R_{di} \quad (1)$$

式中: v_{dci} 为 DC/DC 变换器空载时的电压; v_{dci}^* 为 DG_i 输出电压的参考值; i_{dci} 为 DG_i 的输出电流; R_{di} 为 DG_i 的阻性下垂系数, $i=1,2,\dots$ 。在直流微电网中各个微电源的下垂特性不尽相同, 主要是对下垂曲线中的下垂系数的要求不同。由式(1)可知, 由阻性下垂系数引起的直流母线电压跌落为

$$\Delta v_{dci} = v_{dci}^* - v_{dci} = i_{dci} \cdot R_{di} \quad (2)$$

图 2 表示了微电源不同下垂系数的下垂曲线, 空载时($i_{dci} = 0$)电压跌落 $\Delta v_{dci} = 0$ 。当带负载运行时电压跌落 Δv_{dci} 随着负荷电流 i_{dci} 的增加而增大。为了保证电压跌落在允许的范围内, 阻性下垂系数应该取决于直流微电网所允许的最大电压扰动 Δv_{dcmax} 与最大负荷电流 i_{maxi} , 满足式(3)。

$$R_{di} \leq \frac{\Delta v_{dcmax}}{i_{maxi}} \quad (3)$$

式中: $\Delta v_{dcmax} = \Delta v\% \times V_N$, $\Delta v\%$ 一般取值 5%^[23]; i_{maxi} 为 DG_i 满负荷时的输出电流。

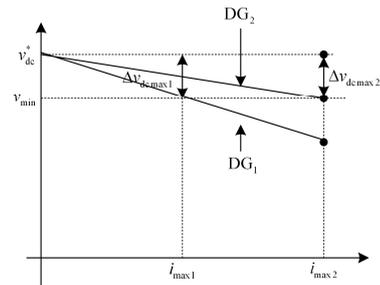


图 2 不同下垂系数的下垂曲线

Fig. 2 Droop curve with different droop coefficients

在实际的低压直流微电网中, 线路参数成阻性特点^[24], 因此微电网中的连线阻抗 $Z_{linei} \approx R_{linei}$, 下垂公式被修改为

$$v_{dc1} = v_{dc}^* - i_{dc1} \cdot R_{d1} - i_{dc1} \cdot R_{line1} \quad (4)$$

$$v_{dc2} = v_{dc}^* - i_{dc2} \cdot R_{d2} - i_{dc2} \cdot R_{line2} \quad (5)$$

在不考虑连线阻抗的情况下, 每个微电源所发出的功率与下垂系数成反比, 即

$$\frac{i_{dc1}}{i_{dc2}} = \frac{R_{d2}}{R_{d1}} \quad (6)$$

但是在系统较大的直流微电网中, 不同微电源之间的连线阻抗上会产生较大的压降, 影响功率分配的精度。由式(4)、式(5)可得

$$\frac{i_{dc1}}{i_{dc2}} = \frac{R_{d2} + R_{line2}}{R_{d1} + R_{line1}} \quad (7)$$

由式(7)可以看出, 只有当 $R_{dr} \gg R_{linei}$ 时^[25], 才能满足式(6)。虽然提高 R_{dr} 有利于提高功率分配的精度, 但是下垂系数 R_{dr} 较大时电压跌落严重, 影响直流微电网的稳定性。

2 增量式下垂控制分析

2.1 基本方法理论分析

在上述传统下垂控制分析中, 功率 p 的合理分配不仅与 $U-I$ 下垂曲线有关, 而且还受到微电源之间连线阻抗不一致的影响。本文引入了电压变化率 \dot{v} , 提出了一种增量式 $P-\dot{V}$ 下垂控制方法代替电压传统的 $U-I$ 下垂控制。电压变化率 \dot{v} 使电压 v 以增量的形式改变, 减小了电压 v 与功率 p 的耦合关系, 便于控制且提高了系统的稳定性。增量式 $P-\dot{V}$ 下垂控制的表达式为

$$\dot{v}_{dci} = \dot{v}_{refi} - k_i \cdot (P_{refi} - P_{dci}) \quad (8)$$

$$v_{dci} = v_{dci}(0) + \int \dot{v}_{dci} dt \quad (9)$$

式中: \dot{v}_{refi} 为电压变化率的参考值, 稳态时为 0; P_{refi} 为每台变换器的负载功率参考值; k_i 为 $P-\dot{V}$ 下垂控制器的下垂控制系数; $v_{dci}(0)$ 为 DG_i 负荷变化时设定的初始电压值。

在图 3 中 \dot{v}_{dcmax} 表示 $p_{dci} = 0$ 时的电压变化率, $-\dot{v}_{dcmax}$ 表示 $p_{dci} = p_{Ni}$ 时母线电压所允许的电压变化率极值(各组微电源电压变化率极值预设相同)。每一组 DG_i 下垂控制器的下垂系数 k_i 根据两点式确定; 负荷功率参考值的初值表达式为

$$k_i = -\frac{2\dot{v}_{dcmax}}{p_{Ni}} \quad (10)$$

$$P_{refi}(0) = p_{Ni} / 2 \quad (11)$$

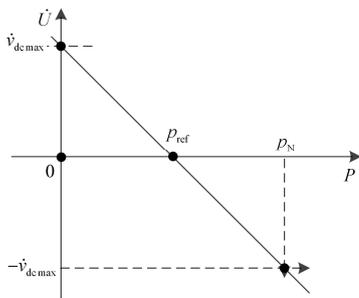


图 3 下垂控制器中下垂系数的确定

Fig. 3 Determination of droop coefficient in droop controller

2.2 连线阻抗不一致情况分析

在本文所设计的两机并联直流微电网模型中,

如图 1, 假设连线阻抗 $R_{line1} > R_{line2}$ (即分布式电源 DG_1 距离公共负载较 DG_2 远)。在连线阻抗不一致的情况下分析两机供电的运行状况(不考虑本地负荷), 输出功率为

$$P_{dci} = \frac{v_{dci} - v_{pcc}}{R_{linei}} v_{dci} \quad (12)$$

t_0 时刻, 直流微电网中两台 DG 分别运行在原始工作点 A、B (假设状态 I), 此时, 电压变化率 $\dot{v}_{dc1} = \dot{v}_{dc2} = 0$, $p_{load} = p_{dc1}(t_0) + p_{dc2}(t_0) = P_{ref1} + P_{ref2}$ 。设在稳态 I 运行时负荷突然增加 Δp_l , 这部分负荷将由 DG_1 和 DG_2 共同分担。

由式(8)得

$$\dot{v}_{dc1} = \dot{v}_{ref1} - k_1 \cdot (P_{ref1} - P_{dc1}) \quad (13)$$

$$\dot{v}_{dc2} = \dot{v}_{ref2} - k_2 \cdot (P_{ref2} - P_{dc2}) \quad (14)$$

其中, 稳态 I 时 $\dot{v}_{ref1} = \dot{v}_{ref2} = 0$; t_1 时刻(状态 II) $\dot{v}_{dc1} = \dot{v}_{dc2}$ (即两台 DG 的电压跌落状态相同)。由式(13)一式(14)得

$$k_1 \cdot (P_{ref1} - P_{dc1}) = k_2 \cdot (P_{ref2} - P_{dc2}) \quad (15)$$

联立式(10)、式(11)得

$$k_1 \cdot P_{dc1} = k_2 \cdot P_{dc2} \quad (16)$$

$$\frac{P_{dc1}}{P_{N1}} = \frac{P_{dc2}}{P_{N2}} \quad (17)$$

式(17)表明负荷的分配比例与两台 DG 的额定功率成正比, 而且 DG 额定功率越大所需要承担的负荷越大, 与线路的连线阻抗无关。因此, 增加的负荷分为两部分, 即 $\Delta p_l = \Delta p_{l1} + \Delta p_{l2}$, DG_1 和 DG_2 的运行点分别由 A 点和 B 点滑落到 A' 点和 B' 点。此时, 由于 $\dot{v}_{dc2}(t_1) < \dot{v}_{dc1}(t_1) < 0$, DG_2 母线电压跌落的速度要比 DG_1 母线电压跌落的速度快。由式(12)可知, DG_2 的输出功率会逐渐减小, 这时增加的负荷会有一部分转移到 DG_1 , 这样就会使得 DG_1 和 DG_2 的运行点沿着各自的 $P-\dot{V}$ 下垂曲线移动, 最终在 t_2 时刻到达 A'' 点和 B'' 点, 此时 $\Delta p_l = \Delta p'_{l1} + \Delta p'_{l2}$ ($\Delta p'_{l1} < \Delta p_{l1}, \Delta p'_{l2} > \Delta p_{l2}$) 到达状态 III, 两台 DG 的电压变化率相同 ($\dot{v}_{dc1}(t_2) = \dot{v}_{dc2}(t_2) < 0$)。如图 4 所示。

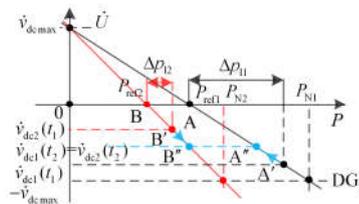


图 4 增量式 $P-\dot{V}$ 下垂控制器理论分析

Fig. 4 Theoretical analysis of incremental $P-\dot{V}$ droop controller

2.3 直流母线电压跌落补偿

上述方法在状态III时能实现功率的精准分配, 但是此时电压变化率仍然小于零 ($\dot{v}_{dc1}(t_2) =$

$\dot{v}_{dc2}(t_2) < 0$), 母线电压仍会下降。为此, 本文在控制环节引入了功率-电压补偿控制器, 如图5所示。

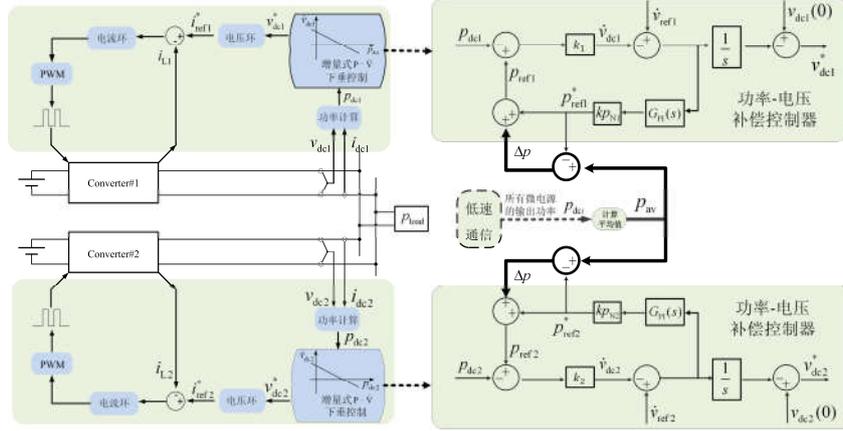


图5 系统控制框图

Fig. 5 System control block diagram

控制器原理分析如图6所示。

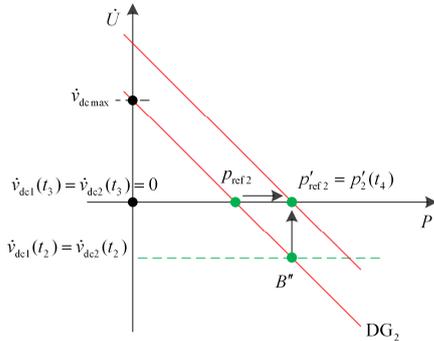


图6 功率-电压补偿控制器原理

Fig. 6 Principle of power-voltage compensation controller

控制器主要有两个作用: 一是提高负载功率的参考值 p_{refi} , 第2.3节中分析指出, 在 t_2 时刻输出功率 p_{dci} 保持不变与负荷达到了平衡。为了实现理想的功率分配, 本文基于低速通信引入了补偿控制器: 采集所有微电源的输出功率 p_{dci} , 然后计算功率的平均值 p_{av} , 补偿功率 Δp_i 由式(19)得到。

$$p_{av} = \frac{P_{Ni}}{\sum_{i=1}^n P_{Ni}} \times \sum_{i=1}^n p_{dci} \quad (18)$$

$$\Delta p_i = p_{av} - p_{refi}^* \quad (19)$$

在暂态过程中每个微电源的输出功率 p_{dci} 与补偿功率 Δp_i 互不相等, 由于补偿环节采用了PI控制, 根据控制理论可知, 在系统进入稳态时 Δp_i 一定为0。控制器利用偏差 Δp_i 作为补偿来提高负载功率的参考值, 进而使得输出功率 p_{dci} 与 p_{av} 相等, 实现了

功率精准分配; 另一方面使得电压变化率归零, 在 $P-\dot{V}$ 下垂系数不变的情况下, 在通过控制器增大功率参考值 p_{refi} 的过程中, 使得 $P-\dot{V}$ 下垂曲线向上平移驱使着电压变化率 \dot{v}_{dci} 逐渐向零靠近, 在 t_3 时刻 $\dot{v}_{dc1}(t_3) = \dot{v}_{dc2}(t_3) = 0$, 电压不再发生变化到达状态IV, 此时系统达到稳态与起始状态I类似, 负荷分配及功率-电压补偿过程结束。整个过程的状态变化如图7所示。

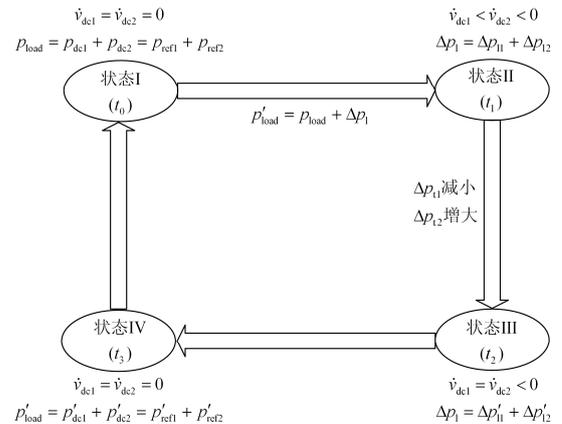


图7 增量式 $P-\dot{V}$ 下垂控制状态变化

Fig. 7 Incremental $P-\dot{V}$ droop control state change

考虑到通信通道可能出现故障的情况, 本文在控制器的设计中仍然保留了传统下垂控制。当微电源收不到远方信号时, 则按照传统下垂控制来分担负荷, 当然此时的功率分配会受到网络结构和参数的影响, 但是会降低由通信故障带来的影响, 提高了系统的稳定性。

3 仿真验证

3.1 线路阻抗不一致时仿真验证

为了验证增量式 $P-\dot{V}$ 下垂控制的有效性, 图 1 中以两台微电源为例, 在不考虑本地负荷且线路阻抗不一致的情况下进行的。系统采用 $P-\dot{V}$ 增量式下垂控制, 为了对比分析: $0\sim 2\text{ s}$ 时, 线路阻抗 $R_{\text{line}1} = R_{\text{line}2} = 5\ \Omega$; $2\sim 4\text{ s}$ 时, 线路阻抗 $R_{\text{line}1} = 5\ \Omega$, $R_{\text{line}2} = 2.5\ \Omega$; 在 4.0 s 时突变公共负荷, 增加 $\Delta p_L = 1000\text{ W}$ 。其余参数两台微电源相同: 母线电压为 500 V , 公共负荷为 2500 W , 负荷功率参考值的初值 $p_{\text{ref}1}(0) = p_{\text{ref}2}(0) = 1000\text{ W}$ 。图 8(a)—图 8(d) 分别对应 DG_1 和 DG_2 的输出电压、输出电压的变化率、输出功率和负荷功率参考值的仿真结果。

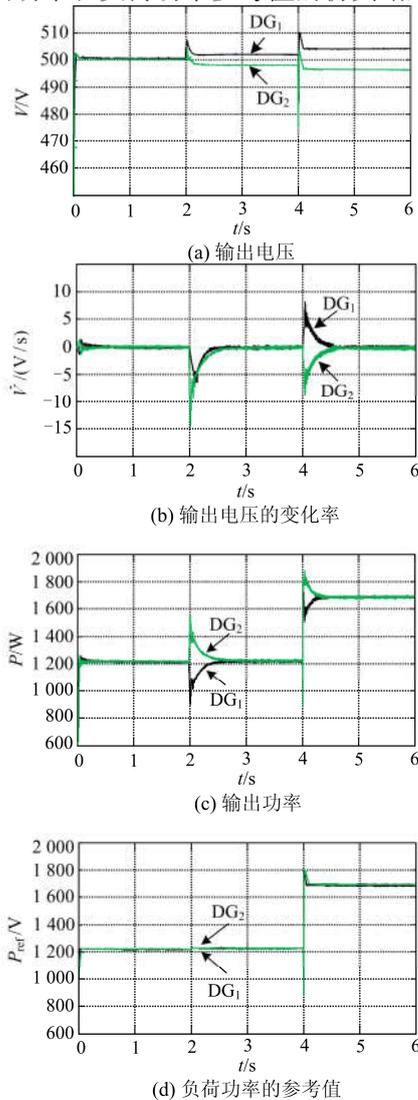


图 8 线路阻抗不一致时的仿真结果

Fig. 8 Simulation results of two inverters under the condition that line impedances are inconsistent

由图 8 可知:

1) $t = 0\sim 2\text{ s}$ 时两台微电源的参数完全一致, $p_{\text{dc}1} = p_{\text{dc}2} = 1220\text{ W}$ 实现功率均分。

2) $t = 2\sim 4\text{ s}$ 时系统运行在 $P-\dot{V}$ 下垂控制模式, 正如第 2.2 节所分析的, 虽然线路阻抗不一致, 但由于两台微电源容量相同, 稳态时仍然能够实现功率的均分。并且在 $t = 4\text{ s}$ 时增加公共负荷 1000 W , 在经过暂态过程之后 $p_{\text{dc}1} = p_{\text{dc}2} = 1710\text{ W}$ 。

3) 同时电压变化率的仿真结果也验证了第 2.2 节中策略的可行性: 在 $t = 2\text{ s}$ 时, \dot{v}_1 开始下降得比较快, 但是随后在 t_2 时刻 $\dot{v}_1 = \dot{v}_2$ 进入第 2.3 节所述的状态 III。在 t_2 时刻之后, 第 2.3 节中设计的电压补偿器开始发挥作用, 一方面提高输出功率的参考值, 另一方面使电压变化率置零, 稳定了输出电压, 最终在 t_3 时刻进入状态 IV。

3.2 线路阻抗一致、本地负荷不平衡时的仿真验证

图 1 是在考虑本地负荷且线路阻抗一致时进行的仿真。仿真参数设置: $R_{\text{line}1} = R_{\text{line}2} = 5\ \Omega$; DG_1 和 DG_2 的本地负荷分别为 $p_1 = 500\text{ W}$ 、 $p_2 = 0\text{ W}$; DG_1 和 DG_2 的容量相同; 公共负荷为 2500 W 。仿真过程: 2 s 时并入本地负荷; 4 s 时公共负荷 Δp_{load} 增加 1000 W 。图 9(a)—图 9(b) 分别对应 DG_1 和 DG_2 的输出功率和负荷功率参考值的仿真结果。

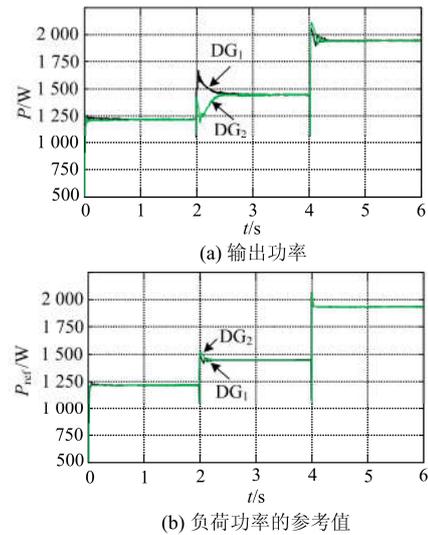


图 9 本地负荷不平衡时输出功率仿真结果

Fig. 9 Output power with the inconsistent local loads

由图 9(b) 可知, 在低速通信的情况下能及时分享功率信息来校正负荷功率参考值, 使得增加的负荷能够在两台之间均分。由图 9(a) 可知, 在 $t = 2\text{ s}$ 时 DG_1 加入了本地负荷, 两台微电源分别增发功率 250 W , 能够实现功率的均分。并且在 $t = 4\text{ s}$ 时增加

了公共负荷 1 000 W, DG_1 和 DG_2 输出功率 $p_{dc1} = p_{dc2} = 1940$ W。实现了负荷比例 1:1 分配, 从而验证了该控制策略的可行性。

3.3 通信故障仿真验证

本实验验证微网系统正常工作时, 通信通道突然失效对整个系统运行稳定性和功率分配的影响。仿真参数设置: 线路阻抗 $R_{line1} = 5 \Omega$, $R_{line2} = 2.5 \Omega$; DG_1 和 DG_2 的容量相同; 公共负荷为 2 500 W。在 2.0 s 时通信通道发生故障, 控制器自动切换至传统下垂控制模式; 在 4.0 s 时恢复通信。整个仿真实验运行 6 s, 图 10(a)、图 10(b) 分别对应 DG_1 和 DG_2 的输出功率和输出电压的仿真结果。

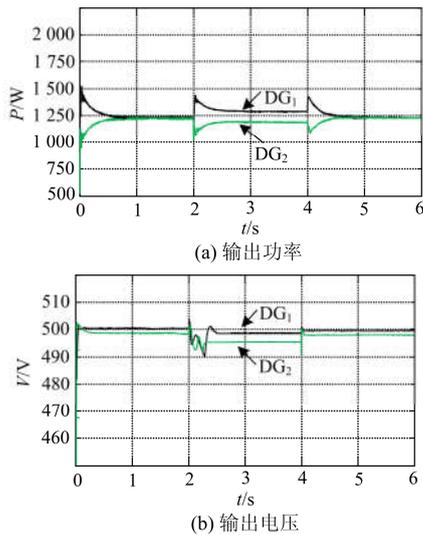


图 10 通信故障仿真结果

Fig. 10 Simulation results of communication failure test

由图 10 可知:

1) $t = 0 \sim 2$ s 时通信正常, 系统运行在 $P-\dot{V}$ 下垂控制模式下, 由于两台微电源参数一致, 负荷功率实现均分。

2) $t = 2 \sim 4$ s 时通信中断, 系统切换至传统下垂控制模式运行, 正如式(7)分析, 由于两微电源的连线电阻不同使得功率分配不再按照 1:1。在 $t = 4$ s 时通信恢复正常, 经过短暂的扰动之后, 系统恢复稳态运行。并且由图 10(b) 的输出电压可以看出, 整个变化过程电压基本稳定在 500 V, 电压质量满足要求。

4 结语

本文针对直流微电网中采用 $U-I$ 下垂控制, 当线路阻抗和本地负荷不一致时引起的功率分配不合理以及系统环流问题, 提出了一种电压增量式 $P-\dot{V}$ 控制方法。该策略通过引入变量 \dot{v} 降低了电压与功率的相互影响, 并且利用通信分享微源间的

功率信息来调节输出功率的差值, 最终达到各个微源的输出功率一致。并且在线路阻抗不一致和本地负荷不平衡时进行了仿真, 其结果验证了该控制策略的可行性和有效性。

参考文献

- [1] LI Y W, KAO C N. An accurate power control strategy for power-electronics-interfaced distributed generation units operating in a low-voltage multibus microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2009, 24(12): 2977-2988.
- [2] KAZMIERKOWSKI M P. Grid converters and power electronics[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2011, 5(2): 54-54.
- [3] 李霞林, 郭力, 王成山, 等. 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, et al. Key technologies of DC microgrids: an overview[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(1): 2-17.
- [4] 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.
- [5] 刘家赢, 韩肖清, 王磊, 等. 直流微电网运行控制策略[J]. 电网技术, 2014, 38(9): 2356-2362.
LIU Jiaying, HAN Xiaoqing, WANG Lei, et al. Operation and control strategy of DC microgrid[J]. Power System Technology, 2014, 38(9): 2356-2362.
- [6] 吴卫民, 何远彬, 耿攀, 等. 直流微电网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报, 2012, 27(1): 98-106, 113.
WU Weimin, HE Yuanbin, GENG Pan, et al. Key technologies for DC micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 98-106, 113.
- [7] CAO X, CHEN J, XIAO Y, et al. Building-environment control with wireless sensor and actuator networks: centralized versus distributed[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2010, 57(11): 3596-3605.
- [8] JIN C, WANG P, XIAO J, et al. Implementation of hierarchical control in DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 61(8): 4032-4042.
- [9] 郑玉芳. 微电网逆变器输出阻抗控制策略研究[D]. 湖南大学, 2016..
- [10] SHUAI Zhikang, MO Shanglin, WANG Jun, et al. Droop control method for load share and voltage regulation in high-voltage microgrids[J]. Journal of Modern Power

- Systems and Clean Energy, 2016, 4(1): 76-86.
- [11] 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.
- [12] 姚玮, 陈敏, 牟善科, 等. 基于改进下垂法的微电网逆变器并联控制技术[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(6): 77-80, 94.
YAO Wei, CHEN Min, MOU Shanke, et al. Paralleling control technique of microgrid inverters based on improved droop method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(6): 77-80, 94.
- [13] 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.
- [14] AUGUSTINE S, MISHRA M K. Adaptive droop control strategy for load sharing and circulating current minimization in low-voltage standalone DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(1): 132-141.
- [15] LU X, SUN K, GUERRERO J M, et al. State-of-charge balance using adaptive droop control for distributed energy storage systems in DC microgrid applications[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2014, 1(6): 2804-2815.
- [16] FERREIRA R A F, BRAGA H A C, FERREIRA A A, et al. Analysis of voltage droop control method for dc microgrids with Simulink: modelling and simulation[C] // 10th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications, Fortaleza, 2012: 1-6.
- [17] PECAS LOPES J A, MOREIRA C L, MADUREIRA A G. Defining control strategies for analyzing microgrids islanded operation[C] // IEEE Russia Power Tech, St Petersburg, 2005: 1-7.
- [18] SHAFIEE Q, DRAGIČEVIĆ T, VASQUEZ J C, et al. Hierarchical control for multiple DC microgrids clusters[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2014, 29(4): 922-933.
- [19] 赵巧娥, 张乐乐, 武晓冬, 等. 基于并联虚拟电阻的多逆变器控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 30-39.
ZHAO Qiaoe, ZHANG Lele, WU Xiao, et al. Control strategy for multi-inverters based on parallel virtual resistance[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 30-39.
- [20] LU X, GUERRERO J M, SUN K, et al. An improved droop control method for DC microgrids based on low bandwidth communication with DC bus voltage restoration and enhanced current sharing accuracy[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2014, 29(4): 1800-1812.
- [21] ANAND S, FERNANDES B G, GUERRERO J. Distributed control to ensure proportional load sharing and improve voltage regulation in low-voltage dc microgrids[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2013, 28(4): 1900-1913.
- [22] LIU W, GU W, SHENG W, et al. Decentralized multi-agent system-based cooperative frequency control for autonomous microgrids with communication constraints[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(2): 446-456.
- [23] SANNINO A, POSTIGLIONE G, BOLLEN M H J. Feasibility of a DC network for commercial facilities[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2003, 39(5): 1499-1507.
- [24] 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.
- [25] 支娜, 张辉, 肖曦. 提高直流微电网动态特性的改进下垂控制策略研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(3): 31-39.
ZHI Na, ZHANG Hui, XIAO Xi. Research on the improved droop control strategy for improving the dynamic characteristics of DC microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(3): 31-39.

收稿日期: 2017-04-06; 修回日期: 2017-08-25

作者简介:

刘宁宁(1992—), 男, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为微电网逆变器关键技术研究; E-mail: liu3923@126.com

曹炜(1963—), 女, 硕士, 副教授, 研究方向为电力系统分析与控制; E-mail: cw-jenny@163.com

赵晋斌(1972—), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 研究方向为现代电力电子技术及其在新能源发电与电力系统中的应用。E-mail: zhaojinbin@shiep.edu.cn

(编辑 魏小丽)