



带母线电压多级补偿的直流微网 下垂控制策略

刘宿城*, 吴亚伟, 李中鹏, 刘晓东, 方 炜

(安徽工业大学电力电子与运动控制省重点实验室 安徽 马鞍山 243032)

【摘要】 直流微网采用分层控制可实现不同控制目标在不同时间刻度的解耦设计。其中, 底层初级控制广泛采用下垂策略实现并联电压模块的自主均流。但高均流精度依赖于较大的下垂系数, 同时会引起较大的母线电压跌落。该文提出一种带母线电压多级前馈补偿的直流微网分段线性下垂控制策略, 按照负荷区间能够柔性设置各并联模块的下垂系数, 同时, 对于母线电压跌落利用母线电压多级前馈进行补偿, 在初级控制上可以同时解决并联模块的均流性能与母线电压跌落问题。最后, 设计了实验室样机, 实验结果验证了该控制策略的优越性。

关键词 均流; 下垂控制; 直流微网; 分段线性化; 电压补偿

中图分类号 TM727 **文献标志码** A **doi**:10.12178/1001-0548.2018249

Droop Control Strategy with Bus Multi-Level Compensation for DC Microgrid

LIU Su-cheng*, WU Ya-wei, LI Zhong-peng, LIU Xiao-dong, and FANG Wei

(Key Lab of Power Electronics & Motion Control, Anhui University of Technology Maanshan Anhui 243032)

Abstract DC microgrids deploy hierarchical control to achieve decoupling design in different time scales for different control objectives, where the droop strategy is widely used in the primary control for autonomous current sharing of voltage modules in parallel. While the improvement of current sharing relies on the increase of the droop coefficient, this will also produce large voltage drop. In this paper, a piecewise linear droop control (PWLDC) with multi-level feedforward compensation of bus voltage for DC microgrid is proposed, where the droop coefficient can be flexibly configured according to partition of load range and bus voltage deviation be compensated by multi-level feedforward of reference. In the primary level, the current sharing performance of parallel module and voltage regulation can be solved at the same time. Finally, a laboratory prototype is designed and the control strategy is validated by experimental results.

Key words current sharing; droop control; DC microgrid; piece-wise linear; voltage compensation

目前, 微电网已成为可再生能源利用的有效组网形式^[1-2]。相对于交流微网, 直流微网无需考虑相位、无功和频率调控且具备高效和低成本的优势^[3-4]。

为了实现直流微网的可靠运行, 在直流微网的能量管理策略中普遍采用分层控制以实现不同控制目标的解耦设计^[5]。其中, 在初级控制层面广泛采用下垂控制策略实现微网底层初级控制中模块间的自主均流和模块单元热插拔^[6-7]。由于负载或微源的电流或功率并非时刻保持不变, 传统下垂控制策略无法对其进行实时调节, 所以如何优化下垂控制策略的功率分配精度, 减小因其引起的母线电压偏差

成为研究的关注焦点之一。

文献 [8] 利用下垂系数是输出电流的函数关系, 提出当输出电流增加时增大下垂系数, 在轻载时可减小母线电压偏差的改进下垂控制, 尤其在重载时可减小传感器与线路电阻的影响。文献 [9] 提出一种混合储能并联控制策略, 可实现不同类型储能模块的频段功率响应以及同类型储能模块的功率均分。文献 [10] 采用储能 SoC 幂指数下垂控制来提高储能单元 SoC 均衡和功率分配。文献 [11] 提出一种根据母线电压差值自适应调整下垂系数以抑制并联变流器间环流的改进下垂控制策略。文献 [12]

收稿日期: 2018-09-30; 修回日期: 2018-12-05

基金项目: 国家自然科学基金(51407003); 安徽省自然科学基金(1708085ME106); 安徽高校自然科学研究重点项目(KJ2017A067)

作者简介: 刘宿城(1981-), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力电子学的研究. E-mail: liusucheng@gmail.com

针对低压直流微网, 提出一种利用因负荷增加而导致系统输出特性呈现非线性变化特点的自适应下垂控制策略使功率模块间的均流精度得到提高, 但并未解决母线电压偏差问题。文献 [13] 针对多端柔性直流输电系统, 通过分析下垂系数与换流站等效电阻的关系提出改进下垂控制策略, 可灵活实现换流站多端协调。文献 [14] 研究了直流微网中功率单元的均流误差和参考电压偏差二者间的矛盾, 但对线路阻抗的影响并未分析。文献 [15] 提出一种基于 DBS 改变下垂输出电压特性的下垂控制策略, 以在输入电压变化时获得均等的电流分配。文献 [16] 借助通信网络提出一种基于 P 控制器的控制策略来修改下垂增益以获得精确的电流分配和电压调节。文献 [17-18] 通过使用低带宽通信共享输出电流信息来提高负荷均流精度并补偿母线电压跌落。文献 [19-20] 采用分布式弱通信网络, 通过离散一致性迭代算法动态寻求最优下垂系数, 在满足模块均流精度的同时, 可降低母线电压偏差, 但会使系统的暂态性能降低。文献 [21] 通过引入电压变化率 \dot{V} 代替下垂控制中的电压 V , 改善负荷电流的分配精度, 同时引入 \dot{V} 归零控制器补偿母线电压跌落。文献 [22] 通过增加补偿电阻减小功率扰动对母线电压的影响, 增强阻尼特性从而提高系统的动态特性。文献 [23] 提出一种分段线性下垂控制方法, 根据负荷轻重不同分割下垂特性曲线来改善模块间的均流效果, 但并未考虑对母线电压偏差进行补偿。

综上所述, 在底层初级控制中, 现有的下垂控制策略虽然可以满足功率模块间的均流性能或功率分配效果, 但因下垂特性导致的母线电压偏差还需通过二次功率加以补偿。为此, 本文提出一种带母线电压多级补偿的直流微网分段线性下垂控制策略 (piecewise linear droop control, PWLDC), 根据负荷轻重不同对负荷区间实施分段控制, 将负荷区间分成 3 个区域来灵活配置微源电压模块的下垂系数。同时, 引入母线电压多级前馈补偿以补偿母线电压跌落问题, 可在初级控制层面解决模块均流性能与母线电压偏差间的矛盾。充分考虑线路阻抗对均流精度的负面影响, 在保证母线电压偏差范围合理的基础上, 通过增加下垂系数提高系统模块间的均流性能。由于在负荷区域 1 (轻负荷) 时模块的输出电流较小, 导致较低的母线电压跌落, 因此 PWLDC 策略主要在负荷区域 2 和负荷区域 3 实现电压前馈补偿。本文首先对传统下垂控制中存在的

问题进行分析, 然后提出 PWLDC 策略的设计思路, 进而探讨其实现方式, 最后通过实验验证所提控制策略的优越性。

1 传统下垂控制存在问题分析

图 1 为典型的光伏主导型直流微网结构: 当母线电压由光伏和储能或者多个储能单元控制时, 系统采用下垂控制策略。直流微网可通过双向 AC/DC 变换器与交流电网相联, 运行在并网或孤岛模式。

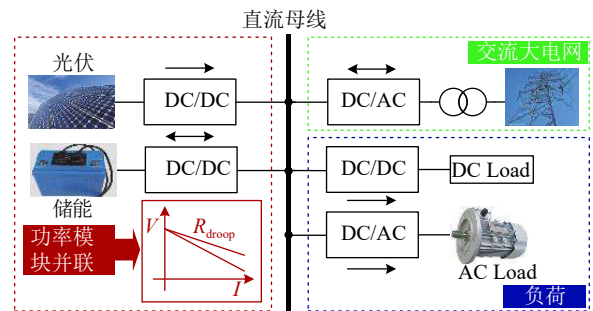
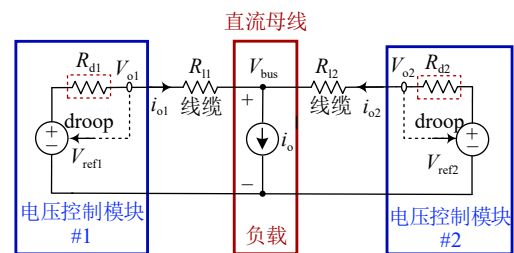


图1 光伏主导型直流微网典型拓扑

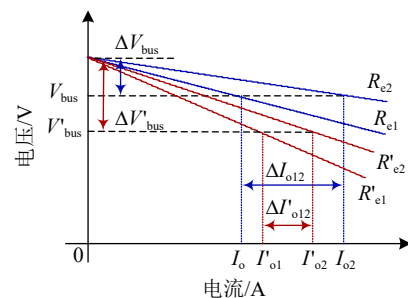
图 2 为包含两台微源电压控制模块的直流微网等效模型及其电压-电流下垂特性曲线, 根据图 2a 可得母线电压为:

$$V_{bus} = V_{refj} - i_{oj}(R_{dj} + R_{lj}) \quad (1)$$

式中, 下标 j 表示第 $j(j=1,2)$ 台电压控制模块; V_{bus} 为直流母线电压; V_{refj} 、 i_{oj} 、 R_{dj} 和 R_{lj} 分别为第 j 台电压控制模块的参考电压、输出电流、下垂系数和线路电阻; 图 2a 中 i_o 表示负荷电流。



a. 直流微网等效模型



b. 电压-电流下垂特性曲线

图2 直流微网等效模型及其下垂特性曲线

由式 (1) 可知, 下垂系数和线路电阻的大小与母线电压跌落深度呈正相关, 并且功率模块的输出电流越大, 母线电压跌落越多。

再看均流性能与母线电压偏差的关系。根据图 2b, 假设 R_{ej} 为第 j 条电源支路的等效电阻 ($R_{ej}=R_{dj}+R_{lj}$), 当两台模块的参考电压和下垂系数均相同仅线路电阻不同 ($R_{l1}\neq R_{l2}$) 时, 可作出两模块的电压-电流下垂特性曲线如图 2b 中两条实线所示。当下垂系数增大 (R_{ej} 增加到 R'_{ej}), 下垂特性曲线如图 2b 中的两条虚线所示。可以看出, 随着下垂系数增大, 模块间有更好的均流效果 ($\Delta I_{o12}>\Delta I'_{o12}$), 但是, 母线电压跌落也更多 ($\Delta V'_{bus}>\Delta V_{bus}$), 这与式 (1) 相吻合。

可见, 传统下垂控制策略虽能提高系统的均流性能, 但是也会带来较大的母线电压跌落问题, 使得设计无法兼顾均流精度及母线电压调整的要求。

2 PWLDC 策略的提出

针对传统下垂控制策略无法兼顾均流精度与母线电压发生跌落的矛盾, 提出 PWLDC 策略: 1) 根据直流微网负荷区间的轻重不同对下垂系数进行分段柔性配置; 2) 同时, 针对母线电压跌落问题, 采用母线电压多级前馈补偿方法, 可在初级控制层面同时解决模块均流与实现母线电压调整率间的矛盾。

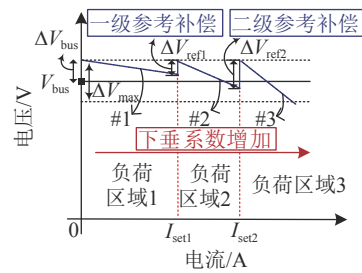
图 3a 为所提 PWLDC 策略的下垂特性曲线, 图 3b、3c 为 PWLDC 策略与传统下垂控制输出特性对比。由图 3a 可得, PWLDC 策略以负荷电流 I_o 为对象将直流微网的负荷分为 3 个区域: 负荷区域 1、负荷区域 2 和负荷区域 3。为了满足模块均流要求, 根据 3 个轻重不同的负荷区间灵活配置下垂系数, 负荷越重时为取得更好的均流效果取较大下垂系数; 同时, 为了补偿因采用传统下垂控制而导致的直流母线电压跌落问题, 根据跌落量的不同, 分别在负荷区域 2 和区域 3 中加入一级和二级参考电压补偿 ΔV_{refn} (n 在负荷区域 2 取 1, 在负荷区域 3 取 2)。当直流微网工作在负荷区域 2 时 ($I_{set1}\leq I_o<I_{set2}$), PWLDC 策略在增加下垂系数的同时加入参考电压补偿 ΔV_{ref1} , 此时电压模块的电压-电流下垂特性曲线为 #2 段, 母线电压为:

$$V_{bus} = V_{ref} - i_{oj}R_{ej} - k_1(i_{oj} - I_{set1}) + \Delta V_{ref1} \quad (2)$$

同理, 当 $I_o \geq I_{set2}$ 时, 系统工作于区域 3, 此时, 分段系数和参考电压补偿分别设定为 k_2 和 ΔV_{ref2} , 功率模块的电压-电流下垂特性曲线为图 3c 中 #3 段, 母线电压为:

$$V_{bus} = V_{ref} - i_{oj}R_{ej} - k_2(i_{oj} - I_{set2}) + \Delta V_{ref2} \quad (3)$$

式中, V_{ref} 表示为直流母线参考电压; k_n 和 I_{setn} ($n=1,2$) 分别表示在 PWLDC 策略下, 变换器模块工作于输出特性曲线 #2 和 #3 时的分段系数和分段电流设定点。 k_1 为负荷区域 2 的分段系数, 设模块的初始下垂系数为 R_d ($R_{d1}=R_{d2}=R_d$), 则通过 k_1 的取值可以改变下垂曲线的斜率, 在区域 2 时为 (R_d+k_1) ; k_2 为负荷区域 3 的分段系数, 则通过 k_2 的取值可以改变下垂曲线的斜率, 在区域 3 时为 (R_d+k_2) 。



a. PWLDC 策略的下垂特性曲线

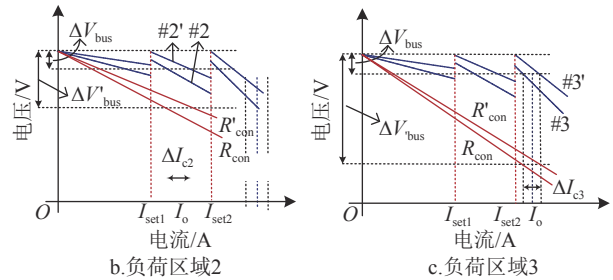


图 3 PWLDC 的下垂曲线及其与传统下垂控制的对比

同样以图 2a 所示的直流微网等效模型为例, 在确保相同的均流精度条件下, 对采用传统下垂控制策略和 PWLDC 策略所引起的直流母线电压跌落进行对比分析, 结果如图 3b 和 3c 所示。其中, 图 3b 表示处于负荷区域 2 的负荷电流在 I_{set1} 和 I_{set2} 之间时, 采用传统下垂控制策略的功率单元输出电压-电流特性曲线对应为 R_{con} 与 R'_{con} 段, 采用 PWLDC 策略时功率单元的电压-电流特性曲线对应为 #2 与 #2' 段。可以得到, 在保证两种控制策略实现均流误差都为 ΔI_{c2} 的前提下, 采用后者所导致的母线电压跌落明显小于前者 ($\Delta V_{bus}<\Delta V'_{bus}$)。同理, 两种控制策略在负荷区域 3 的对比如图 3c 所示, 在相同的均流误差 ΔI_{c3} 条件下, 采用后者所导致的母线电压跌落也明显小于前者 ($\Delta V_{bus}<\Delta V'_{bus}$)。

由上述分析可知, PWLDC 控制策略在实现并联功率单元均流性能时, 加入母线电压多级前馈补偿, 通过对 ΔV_{refn} 、 k_n 和 I_{setn} 的设定, 使系统在整个负荷区间既能获得较好的均流性能, 也能获得较低的母线电压调整率, 实现优化控制。

3 PWLDC 策略的实现

考虑线路阻抗对均流性能的负面影响, 假设文中取下垂系数 R_{dj} 的值远大于线路电阻, 令最大直流母线电压偏差为 ΔV_{\max} (一般为 $5\%V_{\text{ref}}$), 则根据直流母线电压偏差的约束条件, 下垂系数的取值应满足:

$$R_{dj}i_{oj} \leq \Delta V_{\max} \quad (4)$$

为了与式 (4) 相符合, 则模块初始下垂系数 $R_d < 2\Delta V_{\max}/i_o$ 。令 R_d 为初始下垂系数, 则对系统负荷进行分区后可得分段电流点 $I_{\text{set}n}$ 为:

$$I_{\text{set}n} = \frac{\Delta V_{\max}}{R_d} n \quad (5)$$

参考电压补偿信号 $\Delta V_{\text{ref}n}$ 可取值为:

$$\Delta V_{\text{ref}n} = \frac{(I_{\text{set}1} + I_{\text{set}2})}{2} R_d n \quad (6)$$

式中, n 在负荷区域 2 时取值为 1, 在负荷区域 3 时取值为 2, 若有多个分割区域, 依次顺延。

根据直流母线电压跌落范围的要求, 设置负荷电流分段点 $I_{\text{set}1}$ 为 $\Delta V_{\max}/R_d$, 则 $I_{\text{set}2}$ 取值为 $I_{\text{set}1}$ 的两倍。当采用 PWLDC 策略且两电源模块工作在同一个负荷区域时, 可得直流母线电压为:

$$V_{\text{bus}} = \frac{V_{\text{ref}} + \Delta V_{\text{ref}n} + k_n I_{\text{set}n}}{1 + \frac{(R_{e1} + k_n)(R_{e2} + k_n)}{R(R_{e1} + R_{e2} + 2k_n)}} \quad (7)$$

式中, R 表示系统的负荷电阻。

另一方面, 假设直流母线电压工作偏差为 ΔV_{bus} , 则实际的母线电压为:

$$V_{\text{bus}} = V_{\text{ref}}(1 - \Delta V_{\text{bus}}/V_{\text{ref}}) \quad (8)$$

结合式 (7) 与式 (8), 可求得分段系数 k_n 的取值为:

$$k_n \approx \frac{(V_{\text{ref}} - RI_{\text{set}n})(R_{e1} + R_{e2}) - \Delta V_{\text{bus}}(2R + R_{e1} + R_{e2}) - 2R\Delta V_{\text{ref}n}}{2(\Delta V_{\text{bus}} + 2I_{\text{set}n}R - V_{\text{ref}})} \quad (9)$$

为了更加明确 R_{ej} 和 k_n 相互间的影响, 保持 R_{lj} 只在 $0 \sim R_d$ 范围内, 令 $R_d = 0.5 \Omega$, 则直流微网两条支路线路电阻 R_{lj} 的取值在 $0 \sim 0.5 \Omega$ 之间, 支路等效电阻 R_{ej} 在 $0.5 \sim 1 \Omega$ 之间, 基于式 (9) 可得 k_n 与 R_{e1} 和 R_{e2} 的三维关系曲面图, 如图 4 所示。 k_n 的大小与 R_{ej} 呈正相关, 并且当 R_{ej} 确定时, 也可根据图 4 得到对应的 k_n 值。

针对电源模块在电流分段点处因指令不同而导致的负荷电流不均情况, 将负荷电流平均值作为为

荷区间分段的判断条件, 利用 CAN 通信网络实现相邻模块间的通信。在分区控制时, 将平均电流与每个电源模块所设定的电流分段点 $I_{\text{set}n}$ 进行比较, 当两条支路选则相同的 $I_{\text{set}n}$ 时, 可以确保分区控制的一致性, 使两电源模块始终工作在同一个负荷区域。

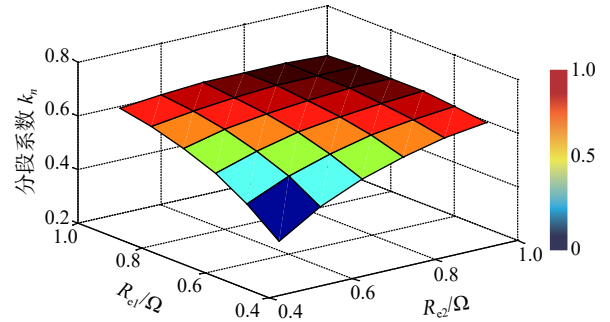


图 4 k_n 取值与支路等效电阻的关系

同时, 为了避免在电流分段点处因受电流扰动影响而导致的重复切换问题, 在负荷分段点处加入滞环算法。图 5 给出了在电流分段点处加入滞环控制的示意图, 其中滞环环宽 D 为 0.1 倍额定输出电流, 当负载电流减轻时电流分段点设定为 $(I_{\text{set}n} - 1/2D)$, 负载电流加重时则为 $(I_{\text{set}n} + 1/2D)$ 。

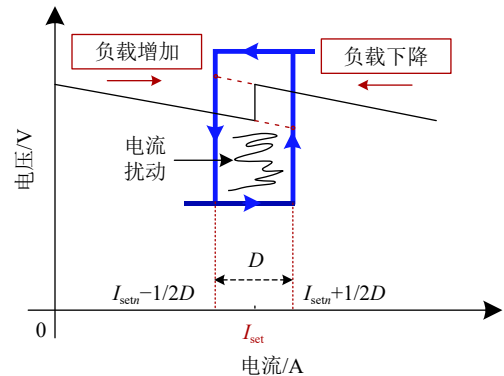


图 5 在电流分段点处的滞环控制

根据上述, 以包含两台下垂控制模块的直流微网为例, 将 PWLDC 策略的实现综合为图 6 所示的结构框图。

4 实验验证

为了验证所提 PWLDC 策略的有效性, 搭建了基于图 6 的直流微网结构的硬件电路实验平台, 如图 7 所示。其中, 两台功率模块单元均为 Buck 变换器电路拓扑, 主要参数如表 1 所列, 其中 V_{gn} 、 V_{on} 、 L_n 、 C_n 和 f_{sn} 分别表示模块 n 的输入电压、输出电压、线路电感、输出滤波电容和开关频率 ($n=1$ 或 2), 控制算法基于 TI DSP2812 处理器实现。

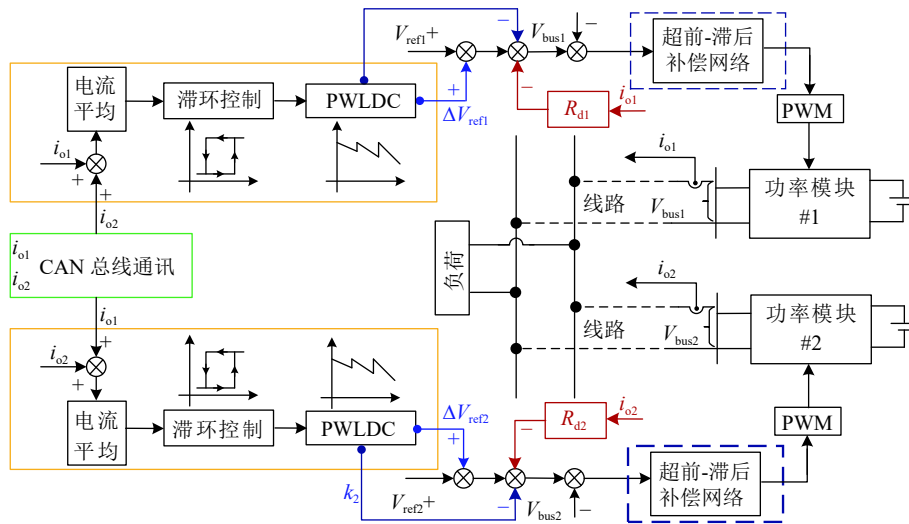


图 6 PWLDC 控制直流微网结构图

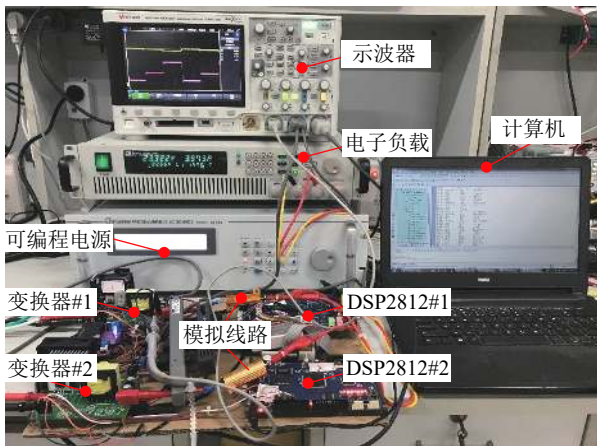


图 7 直流微网实验平台

表 1 直流微网主要参数

参数	取值	参数	取值
V_{s1}/V_{s2}	48 V	C_{bus1}/C_{bus2}	47 μ F
V_{bus1}/V_{bus2}	24 V	R_{l1}/R_{l2}	0.05 Ω /0.1 Ω
L_1/L_2	220 μ H	f_{s1}/f_{s2}	60 kHz
k_1/k_2	0.2/0.3	$\Delta V_{ref1}/\Delta V_{ref2}$	1.5 V/3.0 V
R_d	0.5 Ω	I_{set1}/I_{set2}	2 A/4 A

设置直流微网全负荷区间线性连续变化, 可测得当采用 PWLDC 策略时, 功率模块的输出电压-电流下垂特性曲线如图 8 所示。从图中可看出, 当负载电流上升进入到负荷区域 2 和负荷区域 3 时 (达到所设置的电流分段点), 所提控制策略相应地在两个负荷区域分别引入一级和二级电压前馈补偿, 以此来提高功率模块输出电压参考, 并且调整下垂系数以满足均流要求。

图 9 为当负载电流大小从 1 A 连续上升到 12 A 时, 功率模块 1 和功率模块 2 的输出电压-电流

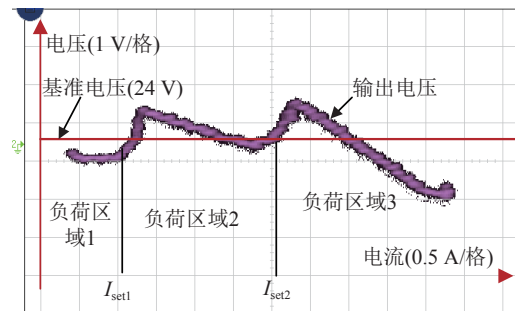
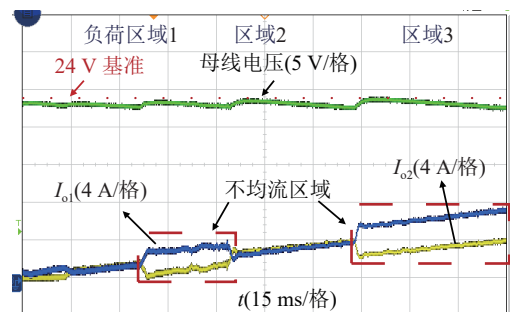
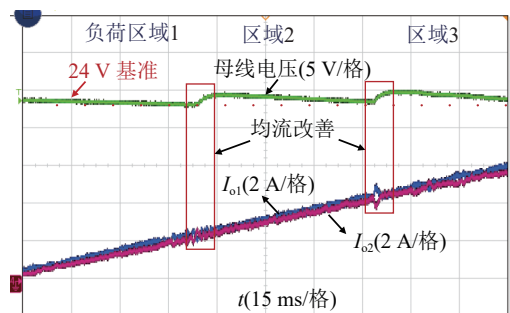


图 8 实测 PWLDC 策略的 V-I 下垂曲线



a. 未加入 CAN 通信母线电压和模块输出电流



b. 加入 CAN 通信母线电压和模块输出电流

图 9 连续全负荷区间的实验波形

波形。由图 9a 可得, 未加入 CAN 通信时两模块的输出电流在设定点 I_{set1} 和 I_{set2} 处出现了电流不均

分; 而图9b显示加入CAN通信后, 在分区电流设定点处消除了电流不均分且分段点处的母线电压得到了补偿。

图10为采用传统下垂控制策略与PWLDC策略的对比实验波形, 设置负载电流大小从2→6→12 A进行连续跳变。图10a与10b为直流微网采用传统下垂控制时, 当 $R_d=0.1 \Omega$ 和 $R_d=0.5 \Omega$ 条件下的实验结果。当 $R_d=0.1 \Omega$ 时, 虽然在负荷区3的母线电压跌落仅为1 V, 但是由两台功率模块的输出电流可以看出均流效果较差; 当 $R_d=0.5 \Omega$ 时, 虽然均流性能得到了保证, 但却又导致在负荷区3的电压跌落高达4 V。而PWLDC策略的实验结果如图10c所示, 与图10a与10b对比可知, 在负荷区域2和区域3时采用PWLDC策略引起的母线电压偏差 ΔV_{bus} 均远小于传统下垂控制的 $\Delta V'_{bus}$, 且均流精度得到提高。因此, PWLDC策略能明显改善直流微网的均流性能且减小母线电压偏差。

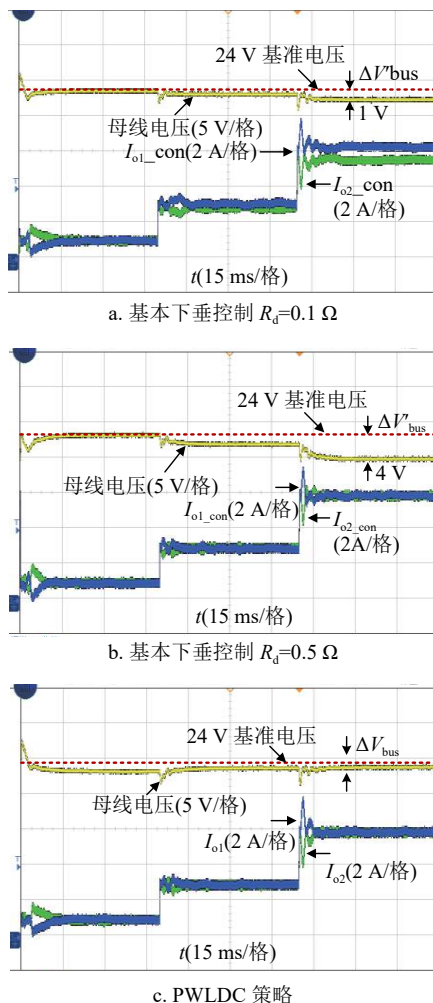


图10 传统下垂控制与PWLDC策略的对比实验波形

5 结束语

针对直流微网中传统下垂控制在模块间均流性能和发生母线电压跌落间的矛盾, 本文提出了带有母线电压多级补偿的分段线性下垂控制策略, 理论分析与实验结果表明:

1) PWLDC策略通过负荷轻重不同分段配置下垂系数, 具有高度设计灵活性; 同时针对母线电压跌落引入母线电压多级前馈补偿, 能够在初级控制层面改善电流功率分配并实现较低的母线电压调整率, 优化和匹配下垂设计。

2) 由于所提控制策略是根据系统的整个负荷区间对下垂系数进行设计, 所以对于负载具有一定的自适应特性, 且控制系统不另外需要传感器, 实现较为方便。

参考文献

- [1] STRASSER T, ANDRÉN F, KATHAN J, et al. A review of architectures and concepts for intelligence in future electric energy systems[J]. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2015, 62(4): 2424-2438.
- [2] 王成山, 武震, 李鹏. 微电网关键技术研究[J]. *电工技术学报*, 2014, 29(2): 1-12.
WANG Cheng-shan, WU Zhen, LI Peng. Research on key technologies of microgrid[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2014, 29(2): 1-12.
- [3] 米阳, 吴彦伟, 符杨, 等. 独立光储直流微电网分层协调控制[J]. *电力系统保护与控制*, 2017, 45(8): 37-45.
MI Yang, WU Yan-wei, FU Yang, et al. Hierarchical coordinated control of island DC microgrid with photovoltaic and storage system[J]. *Power System Protection and Control*, 2017, 45(8): 37-45.
- [4] 张永明, 丁宝, 傅卫东, 等. 基于直流配电与直流微网的电气节能研究[J]. *电工技术学报*, 2015, 30(S1): 389-397.
ZHANG Yong-ming, DING Bao, FU Wei-dong, et al. Electrical energy conservation based on DC distribution and DC microgrid[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(S1): 389-397.
- [5] 朱珊珊, 汪飞, 郭慧, 等. 直流微电网下垂控制技术综述[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(1): 72-84.
ZHU Shan-shan, WANG Fei, GUO Hui, et al. Overview of droop control in DC microgrid[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(1): 72-84.
- [6] 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.
- [7] 朱旋, 陈得宝, 方振国, 等. 平均成本下垂控制策略在分布式发电中的应用[J]. *电力系统保护与控制*, 2015, 43(10): 14-20.
ZHU Xuan, CHEN De-bao, FANG Zhen-guo, et al. Mean

- cost-based droop scheme in the application of distributed generators[J]. *Power System Protection and Control*, 2015, 43(10): 14-20.
- [8] CHEN F, BURGOS R, BOROYEVICH D, et al. A nonlinear droop method to improve voltage regulation and load sharing in DC systems[C]//2015 IEEE First International Conference on DC Microgrids (ICDCM). Atlanta, USA: IEEE, 2015: 45-50.
- [9] 陈美福, 赵新, 金新民, 等. 直流微网中复合储能装置的并联技术研究[J]. 电工技术学报, 2016, 31(S2): 142-149.
CHEN Mei-fu, ZHAO Xin, JIN Xin-min, et al. Research on parallel control strategy of hybrid energy storage units in dc microgrid[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2016, 31(S2): 142-149.
- [10] 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 Peng-cheng, ZHANG Chun-jiang, YUAN Ran-ran, 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.
- [11] 宁雪姣, 杨洪耕, 沙熠, 等. 直流微网中可抑制环流的并联变流器控制策略[J]. 可再生能源, 2017, 35(1): 72-79.
NING Xue-jiao, YANG Hong-geng, SHA Yi, et al. Control strategy of paralleling converters to restrain circulating current in DC microgrid[J]. *Renewable Energy Resources*, 2017, 35(1): 72-79.
- [12] KHORSANDI A, ASHOURLOO M, MOKHTARI H. An adaptive droop control method for low voltage dc microgrids[C]//The 5th Annual International Power Electronics, Drive Systems and Technologies Conference (PEDSTC 2014). Tehran, Iran: IEEE, 2014: 84-89.
- [13] 吴杰, 王志新. 多端柔性直流输电系统的改进下垂控制策略[J]. 电工技术学报, 2017, 32(20): 241-250.
WU Jie, WANG Zhi-xin. Improved droop control strategy for multi-terminal voltage source converter-HVDC[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(20): 241-250.
- [14] GANESH R, PANDA G, PEESAPATI R. Hardware-in-loop implementation of an adaptive droop control strategy for effective load sharing in DC Microgrid[C]//2016 IEEE 6th International Conference on Power Systems (ICPS). New Delhi, India: IEEE, 2016: 1-6.
- [15] WANG J B. Parallel DC/DC converters system with a novel primary droop current sharing control[J]. *IET Power Electronics*, 2012, 5(8): 1569-1580.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] YANG N, PAIRE D, GAO F, et al. Compensation of droop control using common load condition in DC microgrids to improve voltage regulation and load sharing[J]. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 2015, 64: 752-760.
- [19] 吕振宇, 吴在军, 窦晓波, 等. 自治直流微电网分布式经济下垂控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 900-910.
LV Zhen-yu, WU Zai-jun, DOU Xiao-bo, et al. A distributed droop control scheme for islanded DC microgrid considering operation costs[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(4): 900-910.
- [20] 吕振宇, 苏晨, 吴在军, 等. 孤岛型微电网分布式二次调节策略及通信拓扑优化[J]. 电工技术学报, 2017, 32(6): 209-219.
LV Zhen-yu, SU Chen, WU Zai-jun, et al. Distributed secondary control strategy and its communication topology optimization for islanded microgrid[J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2017, 32(6): 209-219.
- [21] 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 Xin-min, WU Xue-zhi, et al. An improved load current sharing control method in DC microgrids[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2016, 36(1): 59-67.
- [22] 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.
- [23] HAILU T, FERREIRA J A. Piece-wise linear droop control for load sharing in low voltage DC distribution grid[C]//2017 IEEE Southern Power Electronics Conference (SPEC). Puerto Varas, Chile: IEEE, 2017: 1-6.

编辑 刘飞阳