

DOI: 10.7667/PSPC171788

直流微电网潮流控制器与分布式储能协同控制策略

邓诗蕾, 王明渝

(重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

摘要: 针对直流微电网互联变换器提出一种能根据两端直流母线电压判断自身传输功率方向与大小的智能控制策略。该策略首先将两个直流微电网之间的互联变换器作为微电网潮流控制器(Microgrid Power Flow Controller, MPFC)来控制互联线路上的潮流。然后提出一种微网自适应功率下垂控制方法使 MPCF 与分布式储能协同控制直流母线电压。最后使用 Matlab/Simulink 仿真验证该控制方法能够有效提高系统的稳定性和效率, 并且能够减小因不需要的功率流动所带来的功率损耗及储能的充放电次数。

关键词: 直流微电网; 微电网潮流控制器; 分布式储能; 智能控制; 自适应下垂控制

Cooperative control strategy of DC microgrid power flow controller and distributed energy storage system

DENG Shilei, WANG Mingyu

(State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology,
Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract: An intelligent control strategy for DC microgrid interconnection converters is presented to estimate the direction and magnitude of power flow according to the DC bus voltage. In this strategy, the interconnection converter is utilized as the Microgrid Power Flow Controller (MPFC) to control the power flow on the interconnected lines between two DC microgrids. Then a microgrid self-adaptive droop control method is proposed to ensure MPCF and distributed energy storage to control DC bus voltage cooperatively. Finally, simulation results are presented in the Matlab/Simulink to verify the effectiveness of the proposed method, which can improve the stability and power utilization of the system and reduce the power loss caused by the redundant power transmission and the charge-discharge times of energy storage.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51677016).

Key words: DC microgrid; microgrid power flow controller; distributed energy storage; intelligent control strategy; self-adaptive droop control strategy

0 引言

随着可再生能源发电技术、电力电子技术的不断发展和直流负荷的不断增多, 直流微电网的概念被提出。直流微电网是由分布式发电系统、储能系统和电力电子变换器所构成的电网结构, 相比于交流电网其在接入新能源发电系统、储能系统、直流负荷时减少了电压转换环节和损耗; 受控量相对较少, 可靠性更高; 不需进行频率、无功功率控制和谐波补偿^[1]。

直流微电网的发展必定会朝拓扑复杂化、线路

冗余化方向发展, 直流微电网潮流控制策略的研究也就变得十分必要。文献[2]提出用变流器控制层、母线控制层以及调度管理层的3层控制结构来控制母线电压, 其有效增强直流微电网的稳定性但未考虑微电网互联的情况; 文献[3]提出一种可以根据交流混合微电网某一侧“占优”来控制另一侧母线电压的控制策略, 但其没有给出“占优”的判断依据; 文献[4]提出使用直流断路器或高频隔离双向DC/DC变换器互联直流微电网, 前者成本低、损耗小但不可变换电压; 后者可变换电压、电气隔离、控制潮流, 但其没有进一步探讨互联时的控制策略。文献[5]提出用高低压直流母线电压标幺值之比 s 决定潮流控制器工作状态, 但该方法降低了系统的稳

定性。文献[6]提出有直流潮流控制器主要有可变串联电阻器、串联电压源、直流变压器3种, 前两者分别存在增加损耗和需要外部电源的缺点, 故提出一种能够灵活调节功率的双有源桥拓扑的直流变压器, 但其控制策略需要一条额外的直流线路。

本文在此基础上提出将直流微电网互联变换器作为潮流控制器, 并给出一种智能自适应下垂控制策略, 使潮流控制器能够与原分布式储能协同控制直流母线电压, 最终提高整个微电网系统的稳定性。

1 直流微电网互联典型拓扑

图1给出了直流微电网互联拓扑图, 每个直流微电网都有独立的发电单元、分布式储能单元和负荷单元, 其中发电单元包括风力、光伏等, 负荷单元包括直流负荷和交流负荷^[7-9], 两直流微电网之间由高频隔离双向DC/DC变换器互联。 P_{PV} 、 P_W 分别为光伏电池和风力发电机输入直流母线的功率; P_{Load1} 、 P_{Load2} 为直流母线端流向直流负荷和交流负荷的功率; P_b 为储能单元的充放电功率, P 为两微电网交换的功率, P_b 与 P 以流入母线方向为正。

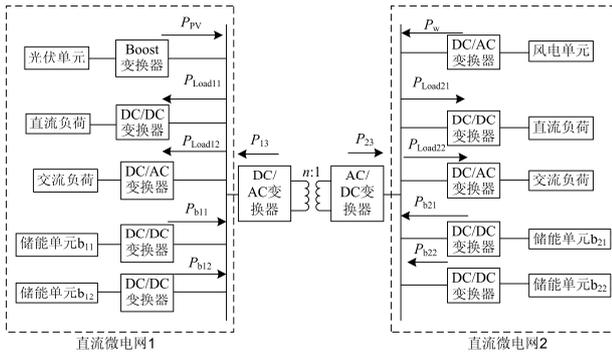


图1 带潮流控制器直流微电网结构图

Fig. 1 Structure of DC microgrid with power flow controller

2 系统控制策略

2.1 基于电容电压检测的功率控制原理分析

图2为左侧直流微电网母线等效电路图, 母线电压与母线上传输功率关系如式(1)所示^[10]。

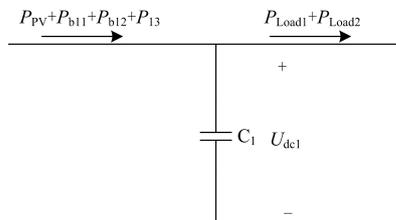


图2 直流母线等效电路图

Fig. 2 Equivalent circuits of the DC microgrid

$$U_{dc1} \times C_1 \frac{dU_{dc1}}{dt} = P_{PV} + P_{b11} + P_{b12} + P_{13} - P_{Load1} - P_{Load2} \quad (1)$$

由此可以得到

$$\Delta p \approx \frac{u_{dc}^2(t) - u_{dc}^2(t-t_0)}{t_0} \times \frac{C_1}{2} \quad (2)$$

式中: Δp 为 t 时刻系统不平衡功率瞬时值; t_0 为常数; C_1 为对地等效电容值; $u_{dc}(t)$ 为 t 时刻母线电压值。

由式(2)可知当 t_0 足够小时, Δp 与 t 和 $t-t_0$ 时刻的瞬时电压平方的变化斜率值成正比关系^[11]。则可得负荷与发电单元之间不平衡功率的平均值 ΔP 为

$$\Delta P = P_{Load1} + P_{Load2} - P_{PV} = P_{b11} + P_{b12} + P_{13} = p_{b11} + p_{b12} + p_{13} + \Delta p \quad (3)$$

式中: p_{b11} 、 p_{b12} 、 p_{13} 分别为 t 时刻储能单元、潮流控制器与母线交换功率瞬时值。

由式(2)、式(3)可知, 负荷单元与发电单元之间不平衡功率的平均值等于 t 时刻平衡功率的瞬时值、储能与潮流控制器和母线交换功率瞬时值之和。在此采用一致平均法, 通过测量所得的各储能点和潮流控制器的电压和输出功率构建一个稀疏的信息交流网络, 再进行一致性计算获得全网的一致性响应, 最终可得此时所需的总补偿功率 ΔP 和平均SOC。此方法可实现“即插即用”, 且任意一条信息通道受阻, 不会影响一致性结果和整个系统的稳定性^[12-13]。

2.2 直流微电网分层控制策略

为保证直流母线电压稳定、提高新能源发电的功率利用率、减少多余功率调度带来的损耗。故采用潮流控制器和本侧储能协同控制本侧直流母线电压, 潮流控制器调度对侧储能来控制本侧直流母线电压, 发电单元稳压控制或按优先级依次切除负载的多重后备电压分层控制策略^[14-17]。设定直流母线上允许电压波动范围为 $0.95U_{dc_ref}$ 到 $1.05U_{dc_ref}$, 储能双向DC/DC变换器和潮流控制器的工作阀值电压分别为 $0.98U_{dc_ref}$ 和 $1.02U_{dc_ref}$ ^[18], 图3给出了分层控制策略与直流微电网电压的关系图。

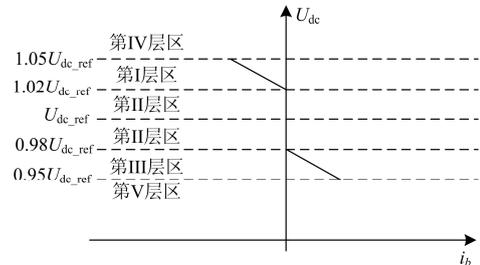


图3 直流微电网分层控制示意图

Fig. 3 Schematic of hierarchical control of the DC microgrid

第 I 层区：储能和潮流控制器工作于充电模式吸收多余功率，调节直流母线电压；第 II 层区：闭锁储能和潮流控制器；第 III 层区：储能和潮流控制器工作于放电模式补偿缺额功率，调节直流母线电压；第 IV 层区： $\Delta P < 0$ 且储能与潮流控制器因充电饱和和退出运行，发电单元由 MPPT 模式变为稳压模式运行；第 V 层区： $\Delta P > 0$ 且储能与潮流控制器因储存容量不足退出运行，此时按优先级切除负载。

2.3 潮流控制器智能控制策略

2.3.1 潮流控制器工况

为实现潮流控制器与储能协同控制电压，同时优先进行本地储能调度以提高系统的效率，减小微电网间多余功率交换所带来的功率损耗，则设置其阈值电压也为 $0.98U_{dc1_ref}$ 、 $0.98U_{dc2_ref}$ 、 $1.02U_{dc1_ref}$

和 $1.02U_{dc2_ref}$ ，故其有如表 1 所示的 9 个工况。

工况 1：当左侧(右侧)出现 $\Delta P_1 < 0$ ($\Delta P_2 < 0$) 进入第 I 层区且储能裕度不足时，潮流控制器调度右侧(左侧)分布式储能储存功率稳定左侧(右侧)直流母线电压，则右侧(左侧)也进入第 I 层区。

工况 2：左侧 $\Delta P_1 < 0$ 位于第 I 层区且储能仍有裕度工作于充电模式，右侧处于第 II 层区。此时潮流控制器可将右侧作为等效储能与左侧分布式储能共同控制左侧直流母线电压，同时保证右侧直流母线电压始终保持在 $0.98U_{dc2_ref} < U_{dc2} < 1.02U_{dc2_ref}$ 。即左侧储能仍有裕度的情况下，潮流控制器只对右侧直流母线对地电容储存功率和负荷与发电单元之间不平衡功率进行调度而不调度右侧储能储存功率。

表 1 潮流控制器工况

Table 1 Working condition of power flow controller

工况	左侧	右侧	控制侧 电压 U_{dc_c}	非控制侧电 压 U_{dc_nc}	功率传输 方向	控制侧参考 电压 U_{dc_ref}	U_{SOC_min}	U_{SOC_max}
1	I	I			开启储能调度，控制端同上一工况相同			
2	I	II	U_{dc1}	U_{dc2}	→	$1.02U_{dc1_ref}$	$0.98U_{dc2_ref}$	$1.02U_{dc2_ref}$
3	I	III	U_{dc2}	U_{dc1}	→	$0.98U_{dc2_ref}$	$0.98U_{dc1_ref}$	$1.05U_{dc2_ref}$
4	II	I	U_{dc2}	U_{dc1}	←	$1.02U_{dc2_ref}$	$0.98U_{dc1_ref}$	$1.02U_{dc1_ref}$
5	II	II			闭锁，不动作			
6	II	III	U_{dc2}	U_{dc1}	→	$0.98U_{dc2_ref}$	$0.98U_{dc1_ref}$	$1.02U_{dc1_ref}$
7	III	I	U_{dc1}	U_{dc2}	←	$0.98U_{dc1_ref}$	$0.98U_{dc2_ref}$	$1.05U_{dc2_ref}$
8	III	II	U_{dc1}	U_{dc2}	←	$0.98U_{dc1_ref}$	$0.98U_{dc2_ref}$	$1.02U_{dc2_ref}$
9	III	III			开启储能调度，控制端同上一工况相同			

工况 3：左侧 $\Delta P_1 < 0$ 处于第 I 层区且储能工作于充电模式，右侧 $\Delta P_2 > 0$ 处于第 III 层区且储能工作于放电模式。当微电网处于第 I 层区时，即使母线电压继续升高仍有发电单元稳压控制这一后备级电压控制方式，而工作于第 III 层区时，如果电压持续跌落只能够切除负载。综合考虑，为减小对负载的影响，提高系统稳定性，故定义潮流控制器控制优先级为第 III 层区 > 第 I 层区 > 第 II 层区。故此时潮流控制器将左侧等效为储能与右侧储能协同控制右侧电压，同时保证 $0.98U_{dc1_ref} < U_{dc1} < 1.05U_{dc1_ref}$ 。因未对左侧电压进行控制，当 $|\Delta P_1| < |\Delta P_2|$ 时，其会进入工况 6，左侧储能退出运行，当 $|\Delta P_1| > |\Delta P_2|$ 则会保持在工况 3，即右侧分布式储能仍有裕度的情况下，左侧分布式储能始终不参与补偿右侧不平衡功率。

工况 5：左右侧都处于第 II 层区，储能与潮流控制器闭锁。

工况 6：左侧处于第 II 层区，右侧 $\Delta P_2 > 0$ 处于第 III 层区且储能工作于放电模式。此时潮流控制器将左侧等效为储能与右侧储能共同调控右侧直流母

线电压，同时保证 $0.98U_{dc1_ref} < U_{dc1} < 1.02U_{dc1_ref}$ 。

工况 9：左侧(右侧)出现 $\Delta P_1 > 0$ ($\Delta P_2 > 0$) 且左侧(右侧)分布式储能裕度不足，此时潮流控制器调度右侧(左侧)储能储存功率稳定左侧(右侧)直流母线电压，使右侧(左侧)也进入第 III 层区。

工况 4、7、8 分别与工况 2、3、6 相同。可以看出，潮流控制器可根据两侧状态智能选择一侧等效为储能，并与另一侧实际储能协同控制另一侧电压，故潮流控制器与储能系统的控制策略基本近似。

2.3.2 潮流控制器等效储能控制策略

对于一般储能的储存容量与其 SOC 正相关，超级电容的 SOC 可表示为

$$SOC = \frac{U_{sc} - U_{sc_min}}{U_{sc_max} - U_{sc_min}} \quad (4)$$

式中： U_{sc_max} 和 U_{sc_min} 分别为超级电容工作电压的最大值和最小值。

由式(1)可知直流母线电压值与其不平衡功率直接相关。故由表 2 所给出的各工况下非受控端电压的上下限要求，可得在某一时刻在将非受控端直

流微电网等效为超级电容的等效 SOC 为

$$\text{SOC}_e = \frac{u_{\text{dc_nc}} - U_{\text{SOC_min}}}{U_{\text{SOC_max}} - U_{\text{SOC_min}}} \quad (5)$$

式中: $u_{\text{dc_nc}}$ 为非控制侧实际工作电压; $U_{\text{SOC_min}}$ 为非控制侧允许工作下限电压; $U_{\text{SOC_max}}$ 为非控制侧允许工作上限电压。

2.4 基于 SOC 的潮流控制器与储能的自适应下垂系数协同控制策略

2.4.1 直流微电网等效储能

在多储能直流微电网中采用下垂控制, 同时为防止过充和过放, 要求 $0.2 < \text{SOC} < 0.8$ ^[19]。将其推广至等效储能中, 式(6)给出了右侧直流微电网作为等效储能的 SOC。当左侧分布式储能仍有裕度补偿不平衡功率, 为减小远距离功率调度所带来的损耗, 优先进行本地功率平衡, 故此时右侧分布式储能不参与功率补偿, 右侧的等效储能 SOC_{13} 只与 $u_{\text{dc}2}$ 有关, 其值为 SOC_e 。而当左侧储能退出运行, 为提高系统稳定性, 右侧储能仍有裕度时潮流控制器要调度右侧储能承担左侧不平衡功率, 则设置此时的右侧等效储能 SOC 为右侧分布式储能 SOC 的平均值 $A_{\text{SOC}2}$, 使右侧微电网能进入第 I 或 III 层区。

$$\text{SOC}_{13} = \begin{cases} \text{SOC}_e & 0.2 \leq A_{\text{SOC}1} \leq 0.8 \\ A_{\text{SOC}2} & (\Delta P_1 > 0 \cap A_{\text{SOC}1} < 0.2) \\ & \cup (\Delta P_1 < 0 \cap A_{\text{SOC}1} > 0.8) \end{cases} \quad (6)$$

式中: $A_{\text{SOC}1}$ 和 $A_{\text{SOC}2}$ 分别为左和右侧分布式储能 SOC 的平均值。

2.4.2 多储能基于 SOC 自适应功率协同控制策略

考虑阈值电压, 常规下垂控制应该满足

$$U_{\text{dc}} = \begin{cases} 1.02U_{\text{dc_ref}} - m_z I_{\text{bz}} & \text{电池充电, } I_b < 0 \\ 0.98U_{\text{dc_ref}} - m_z I_{\text{bz}} & \text{电池放电, } I_b > 0 \end{cases} \quad (7)$$

式中: m_z 为所有储能等效总储能的下垂系数; I_{bz} 为等效总储能输出电流。

m_z 设定要求为最大功率输出时电压偏差不超过允许值的常数, 而在直流微电网互联时, 其传输功率变化范围较大, 则其可能导致输出功率较小时母线电压偏差过小而在阈值电压附近波动, 故在此提出一种自适应于输出功率和工作储能个数的下垂系数控制方法。同时采用基于 SOC 的改进下垂控制来防止储能过充或过放及减小突然退出对母线电压造成的冲击, 下垂系数如式(8)所示。

$$m_1 = \begin{cases} m_0 \exp[p(\text{SOC}_j^n - A_{\text{soc}}^n)] & I_b < 0 \\ m_0 \exp[-p(\text{SOC}_j^n - A_{\text{soc}}^n)] & I_b > 0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: m_0 为均一化下垂系数; p 和 n 为影响 SOC 均

衡速率的常数量。

此时下垂系数值与 SOC 的幂指数值有关, 其在保证系统稳定性的同时, 可以使在 SOC 全变化范围内的均衡速度相较于常规 SOC 下垂控制更快^[20]。由式(3)所得的所需补偿 ΔP 的大小和 U_{dc} 允许工作电压取值为 $0.95 \sim 0.98U_{\text{dc_ref}}$ 和 $1.02 \sim 1.05U_{\text{dc_ref}}$, 可以得到的此时下垂系数 m_z 的最大值为

$$m_{z_max} = \left| \frac{0.03 \times U_{\text{dc_ref}} \times U_{\text{dc}}}{\Delta P} \right| \approx \left| \frac{0.03 \times U_{\text{dc_ref}}^2}{\Delta P} \right| \quad (9)$$

式(10)给出了总储能下垂系数 m_z 与各分布式储能和等效储能的下垂系数 m_j 的关系。

$$m_z = \frac{1}{\sum_{j=1}^z \frac{1}{m_j}} = \begin{cases} \frac{1}{\sum_{j=1}^z \frac{1}{m_0 \exp[p(\text{SOC}_j^n - A_{\text{soc}}^n)]}} I_b < 0 \\ \frac{1}{\sum_{j=1}^z \frac{1}{m_0 \exp[-p(\text{SOC}_j^n - A_{\text{soc}}^n)]}} I_b > 0 \end{cases} \quad (10)$$

式中, z 为工作中的储能和等效储能个数。

取 $\text{SOC}_j^n - A_{\text{soc}}^n$ 的边界值可得电压工作于允许范围内 m_z 最大值为

$$m_{z_max} = \frac{m_0 \times e^p}{z} < \left| \frac{0.03 \times U_{\text{dc_ref}}^2}{\Delta P_L} \right| \quad (11)$$

此时 m_0 范围为

$$m_0 \leq \left| \frac{0.03 \times U_{\text{dc_ref}}^2}{\Delta P} \right| \times \frac{z}{e^p} \quad (12)$$

将式(12)的最大值直接代入式(8)即可得到每一个储能的下垂系数值, 此时求得的下垂系数既可以保证电压波动不会偏大超过允许范围, 也不会过小导致其波动值不断穿越阈值电压, 还可以保证其功率分配按照储能 SOC 值分配。

3 仿真实验及分析

为了验证所提出的智能下垂控制策略, 使用 Matlab 按图 1 微电网结构图搭建了仿真模型, 具体仿真参数如表 2 所示。图 4 给出了两直流微电网在不同工况下的不平衡功率值。

1) 潮流控制器工况

工况 2(0~0.04 s): 由图 5 给出的直流微电网的电压波形可知, 0 时刻左侧电压为 405 V, 右侧为

表 2 仿真参数表

Table 2 Table of simulation parameters

左侧电压参考值/V	400
右侧电压参考值/V	750
储能 b_{11} 初始 SOC	70%
储能 b_{12} 初始 SOC	30%
储能 b_{21} 、 b_{22} 初始 SOC	20.1%
蓄电池充放电限制 SOC	20%~80%
储能、互联变器工作阈值电压/V	$0.98U_{dc_ref}$ 、 $1.02U_{dc_ref}$
允许工作电压范围/V	$0.95U_{dc_ref}$ ~ $1.05U_{dc_ref}$
n	2
p	2

750 V，两侧都为工作第 II 层区，由图 2 知，左侧直流微电网在 0 时刻突增 $\Delta P_1 = -1.5$ kW，左侧电压开始上升至 408 V 进入第 I 层区，左侧储能和潮流控制器同时动作。如图 6(a)所示，0 时刻 i_{b11} 、 i_{b12} 和 i_{13} 上升，其电流分配按 $SOC_{b11} = 70%$ 、 $SOC_{b12} = 30%$ 和式(5)给出的 $SOC_{13} = 50%$ 代入式(8)所得到 m_{b11} 、 m_{b12} 和 m_{13} 。同时由图 5 可以看出， u_{dc2} 因吸收功率而上升， SOC_{13} 同时上升， i_{13} 不断减小，在 0.01 s 左右时 SOC_{13} 达到限定最大值 80%，即右侧电压上升至 759 V，潮流控制器退出运行， i_{13} 也迅速减少到 0，而 i_{b11} 和 i_{b12} 会迅速上升，即 ΔP_1 由 b_{11} 和 b_{12} 共同承担。0.01~0.04 s 左侧电压始终保持在第 I 层区范围，而右侧母线电压为 759 V 不变，其电压始终保持在第 II 层区范围，右侧储能不动作。

工况 6(0.04~0.08 s)：0.04 s 时突增 $\Delta P_2 = 5$ kW，图 5 可以看出， u_{dc2} 由 759 V 开始下降至 735 V，其由第 II 层区进入由第 III 层区，右侧储能动作，同时潮流控制器经过工况 2 和工况 3 最后稳定于工况 6， u_{dc1} 则最后稳定于 400 V 左右，处于工作第 II 层区，此时充分利用 ΔP_1 补偿 ΔP_2 ，实现左侧储能不动作的同时减小右侧储能放电功率。0.08 s 时左侧 ΔP_1 由 -1.5 kW 突变为 0，由图 6(b)可以看出，因 P_{23} 存在左侧直流母线电压下降，当 $SOC_{23} = 20%$ 即

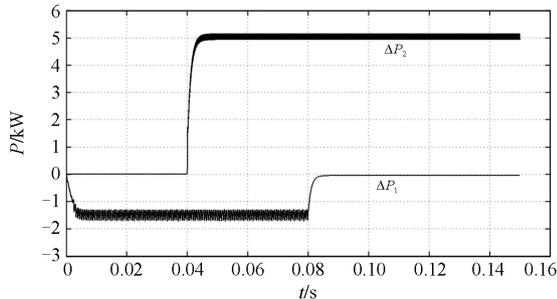


图 4 负荷与发电单元之间功率不平衡波形图

Fig. 4 Waveforms of the unequal power between generators and loads

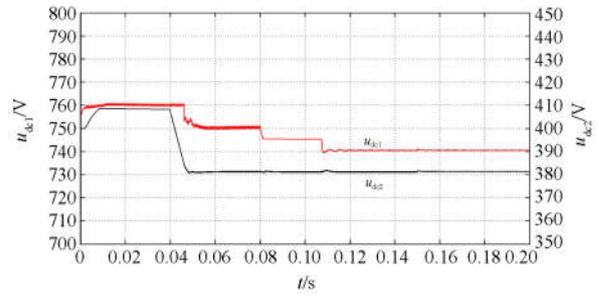
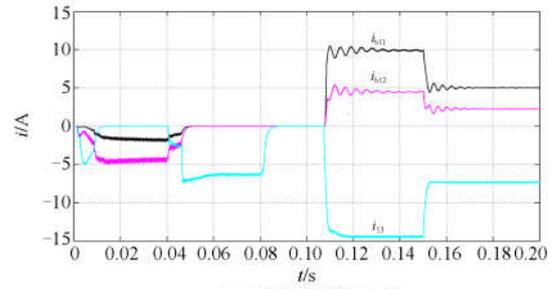
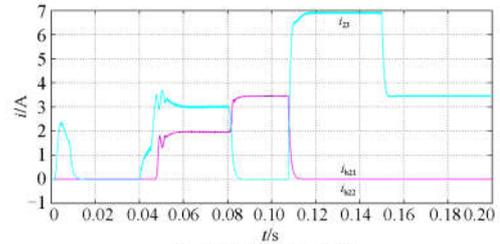


图 5 两直流微电网直流母线电压

Fig. 5 Bus voltage of two DC microgrids



(a) 左侧储能输出电流



(b) 右侧储能输出电流

图 6 各工况下储能输出电流

Fig. 6 Output of battery current under different conditions

电压下降至 395.2 V 时潮流控制器退出运行， i_{23} 为 0， i_{b11} 和 i_{b12} 上升承担 ΔP_2 ，右侧始终由储能 b_{21} 、 b_{22} 保持在第 III 层区，而左侧母线电压为 395.2 V 不变，左侧储能不动作。

工况 9(0.105~0.2 s)：0.105 s 右侧储能 SOC_{b21} 和 SOC_{b22} 因达到限定最小值 20% 退出运行，潮流控制器承担所有右侧不平衡功率， u_{dc2} 持续下降进入第 III 层区，左侧储能动作维持左侧直流母线电压稳定，潮流控制器稳定在工况 9。0.15 s 时， ΔP_2 由 5 kW 突变为 2.5 kW， i_{23} 减小， u_{dc2} 仍能保持稳定，此时始终由左侧储能承担右侧 ΔP_2 。

2) 自适应下垂控制

图 7(a)给出了右侧直流微电网工作中的分布式储能与等效储能的总个数 z 。0.06~0.082 s 时由式(5)可知， $SOC_{23} = 50%$ 且 $SOC_{b21} = SOC_{b22} = 20.1%$ ，此时 $z = 3$ 而右侧不平衡功率为 $\Delta P_2 = 5$ kW，将其代入式(12)

得到 $m_0 \approx 1.37$, 由式(8)可得 $m_{b11} = m_{b12} = 1.52$, $m_{13} = 0.995$, m 越小其承担功率越大, 可以看到图6中各储能电流比值与的 m 比值相同。0.082~0.108 s 因潮流控制器退出运行 $z=2$, 则 $m_{b11} = m_{b12} = m_0 \approx 0.914$ 。0.108~0.15 s 因右侧分布式储能达到限值退出运行, 潮流控制器重新投入 $z=1$, 则 $m_{13} = m_0 \approx 0.457$ 。0.15 s 时, ΔP_2 突变为 2.5 kW, $z=1$, 则 $m_0 \approx 0.914$ 。综上所述, 由图5可以看出, 在工作储能数 z 和 ΔP_2 不断变化情况下, 自适应下垂控制可以始终保持 u_{dc2} 在允许范围内同时减小波动。

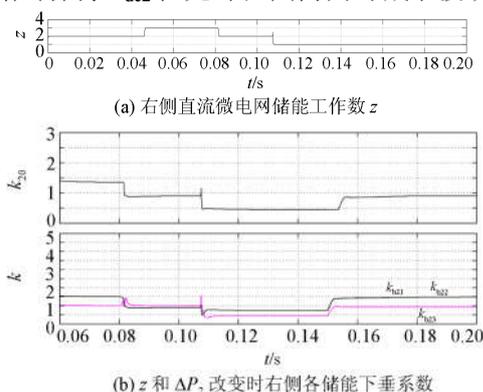


图7 自适应下垂控制的下垂系数波形

Fig. 7 Waveforms of droop coefficient in self-adaptive droop control strategy

4 结论

1) 本文将直流微电网互联变换器作为潮流控制器, 并针对其提出了一种智能控制策略, 实现潮流控制器在两微电网电压稳定运行时闭锁; 在某一侧出现不平衡功率时, 若该侧储能仍有裕度时只调度对侧负载与发电之间的不平衡功率, 若该侧储能没有裕度则调度对侧储能功率, 该方法有效提高了整个直流微电网系统的稳定性、能源的利用率, 减少了储能充放电次数。

2) 提出一种基于 SOC 自适应下垂系数协同控制策略, 使均一化下垂系数 m_0 根据微电网不平衡功率的大小和实时工作储能个数进行调节以减小电压稳态偏差。同时每一个分布式储能与潮流控制器承担的功率按其 SOC 分配, 以防止某一储能因过充或过放而突然退出运行对直流母线电压产生冲击。

最后使用 Matlab/Simulink 搭建仿真模型, 仿真结果表明, 本文提出的控制策略能够在两直流微电网稳定运行的前提下有效减小电压波动和储能充放电次数。

参考文献

[1] FARHADI M, MOHAMMED O A. Event-based

protection scheme for a multiterminal hybrid DC power system[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6(4): 1658-1669.

[2] 刘喜梅, 戴雪梅, 李梅航. 基于微网技术的家庭能源管理系统研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(20): 66-72.

LIU Ximei, DAI Xuemei, LI Meihang. Research on the home energy management system based on the microgrid technology[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(20): 66-72.

[3] 任志航, 李民, 马凯琪, 等. 交直流混合微电网微元建模与控制[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(21): 82-88.

REN Zhihang, LI Min, MA Kaiqi, et al. Modeling & control of hybrid AC/DC micro-grid micro components[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(21): 82-88.

[4] 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.

[5] 任春光, 赵耀民, 韩肖清, 等. 双直流母线直流微电网的协调控制[J]. 高电压技术, 2016, 42(7): 2166-2173.

REN Chunguang, ZHAO Yaomin, HAN Xiaoqing, et al. Coordination control of DC microgrid with two DC buses[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(7): 2166-2173.

[6] 姚良忠, 崔红芬, 李官军, 等. 柔性直流电网串联直流潮流控制器及其控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(4): 945-952.

YAO Liangzhong, CUI Hongfen, LI Guanjun, et al. Studies of series DC power flow controller and its control strategy in the VSC based DC grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(4): 945-952.

[7] FENG Lin, ZHANG Jingning, LI Guojie, et al. Cost reduction of a hybrid energy storage system considering correlation between wind and PV power[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1(1): 86-94. DOI: 10.1186/s41601-016-0021-1.

[8] 王成山, 杨占刚, 王守相, 等. 微网实验系统结构特征及控制模式分析[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(1): 99-105.

WANG Chengshan, YANG Zhangang, WANG Shouxiang, et al. Analysis of structural characteristics and control approaches of experimental microgrid systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(1): 99-105.

- [9] DRAGICEVIC T, LU Xiaonan, VASQUEZ J C, et al. DC microgrids, part I: a review of control strategies and stabilization techniques[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(7): 4876-4891.
- [10] 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.
- [11] 文波, 秦文萍, 韩肖清, 等. 基于电压下垂法的直流微电网混合储能系统控制策略[J]. 电网技术, 2015, 39(4): 892-898.
WEN Bo, QIN Wenping, HAN Xiaoqing, et al. Control strategy of hybrid energy storage systems in DC microgrid based on voltage droop method[J]. Power System Technology, 2015, 39(4): 892-898.
- [12] 朱晓荣, 蔡杰. 多储能直流微电网的分布式控制[J]. 现代电力, 2016, 33(2): 13-21.
ZHU Xiaorong, CAI Jie. Distributed control strategy for the battery-based DC microgrid[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(2): 13-21.
- [13] 王炜信, 段建东, 张润松, 等. 孤岛电网中多储能设备SOC一致性优化策略[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 126-135.
WANG Weixin, DUAN Jiandong, ZHANG Runsong, et al. Optimal state-of-charge balancing control for paralleled battery energy storage devices in islanded microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 126-135.
- [14] 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 Yanwei, 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.
- [15] 李培强, 段克会, 董彦婷, 等. 含分布式混合储能系统的光伏直流微网能量管理策略[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(13): 42-48.
LI Peiqiang, DUAN Kehui, DONG Yanting, et al. Energy management strategy for photovoltaic DC microgrid with distributed hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(13): 42-48.
- [16] CHEN D, XU L. DC microgrid with variable generations and energy storage[C] // IET Conference on Renewable Power Generation (RPG 2011), September 6-8, 2011, Edinburgh, UK: 1-6.
- [17] 王毅, 张丽荣, 李和明, 等. 风电直流微电网的电压分层协调控制[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(4): 16-24.
WANG Yi, ZHANG Lirong, LI Heming, et al. Hierarchical coordinated control of wind turbine-based DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(4): 16-24.
- [18] 姚钢, 纪飞鹏, 殷志柱, 等. 直流配电电能质量研究综述[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(16): 163-170.
YAO Gang, JI Feipeng, YIN Zhizhu, et al. Review on the research of DC power distribution power quality[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(16): 163-170.
- [19] QIAN H, ZHANG J H, LAI J S, et al. A high-efficiency grid-tie battery energy storage system[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(3): 886-896.
- [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.

收稿日期: 2017-12-08; 修回日期: 2018-04-02

作者简介:

邓诗蕾(1995—), 女, 硕士研究生, 通信作者, 主要研究方向为微电网运行与控制、谐振变换器建模及控制; E-mail: 20151102011t@cqu.edu.cn

王明渝(1960—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电能变换及控制、电气传动等。E-mail: ceemwang@cqu.edu.cn

(编辑 许威)