

DOI: 10.7667/PSPC170368

基于混合储能动态调节的独立混合微电网分布式协调控制

范其丽¹, 郑晓茜¹, 王璞², 冯越²

(1. 郑州职业技术学院, 河南 郑州 450121; 2. 国网驻马店供电公司, 河南 驻马店 463000)

摘要: 为了减少功率损耗和确保独立交直流混合微电网稳定运行, 设计一种新的基于混合储能动态调节的分布式协调控制策略。通过检测直流电压和交流电压频率, 该策略对连接交直流微电网的双向 AC/DC 变流器输出功率进行动态调节。混合储能中采用下垂控制自动调节蓄电池的输出功率, 同时超级电容器迅速提供负荷功率的高频分量, 以减小负载突变对蓄电池和母线电压造成的冲击。此外, 在逆变器的下垂控制器中引入电压前馈补偿量来减小交流负荷的电压波动。最后, 利用 Matlab/Simulink 搭建了混合微电网仿真模型。仿真结果表明, 在不同工况下, 该分布式控制策略均能控制混合微电网稳定运行及电压稳定。

关键词: 交直流混合微电网; 分布式控制; 混合储能; 下垂控制; 电压质量

Decentralized control for autonomous hybrid microgrid with hybrid storage system dynamical regulating

FAN Qili¹, ZHENG Xiaoxi¹, WANG Pu², FENG Yue²

(1. Zhengzhou Technical College, Zhengzhou 450121, China;

2. State Grid Zhumadian Power Supply Company, Zhumadian 463000, China)

Abstract: The paper proposes a decentralized control strategy with hybrid storage system dynamical regulating to reduce power loss and assure the stable operation of the hybrid microgrid. The strategy adaptively adjusts active power flow between AC and DC side through detecting DC bus voltage and AC frequency. The storage battery in the hybrid storage system provides active power using the droop control, and the super-capacitor rapidly provides high frequency component of the load fluctuation to reduce the impact on storage battery and DC bus. Besides, the paper designs voltage feedforward compensation in droop controller of load inverter to reduce AC voltage amplitude fluctuation. Finally, the hybrid AC/DC microgrid model is built on Matlab/Simulink, the simulation results indicate the proposed method can effectively maintain the hybrid microgrid stable operation and ensure voltage stability under different conditions.

This work is supported by Scientific Research Project of Henan Province College(No. 16B140005).

Key words: hybrid AC/DC microgrid; decentralized control; hybrid storage system; droop control; voltage quality

0 引言

微电网作为一种可充分利用新能源发电的新型电网形式, 存在交直流灵活供电模式并且可运行在孤岛和并网两种状态^[1]。由于传统电力系统为交流供电形式, 因此现有的研究大都集中在交流微电网的运行控制^[2]。在实际系统中, 许多分布式电源(DG)通常以直流形式输出电能(如光伏发电系统), 且直流微电网可有效连接源荷, 减少交直流频繁转换, 为直流负载提供高质量电能^[3-5], 因此近年来直流微电网逐渐引起重视。在实际运行中, 可将直流微电

网和交流微电网通过双向 AC/DC 变流器互联, 通过对该变流器进行控制来实现混合微电网的稳定运行^[6], 有效降低投入成本和功率损耗的同时可充分利用新能源发电。

为了协调混合微电网稳定运行和电压稳定, 文献[7]提出一种新的双层协调控制策略。在该策略中, 第一层对直流母线电压和交流电流进行控制, 第二层控制对母线电压跌落问题进行动态补偿以减小电压波动。但是, 该分层控制方法对通讯依赖程度高, 一旦通讯故障, 系统无法正常运行。混合微电网中直流微电网和交流微电网主要通过双向 AC/DC 进行功率交换, 文献[8]设计一种双向 AC/DC 变流器控制策略, 该策略采用能量的双向控制

来平衡交直流侧之间的有功功率平衡, 在确保混合微电网稳定运行的同时可减小功率损耗。但是, 母线电压波动比较大且对通讯依赖程度高。文献[9]提出一种新的分散协调控制策略对双向 AC/DC 变流器的输出功率进行控制, 但其未对各分布式电源和储能装置的具体控制展开研究。文献[10]提出了具备死区控制的交直流混合微电网功率平衡控制策略, 但整个系统冗余复杂, 不能满足控制系统实时性和快速性的需求。

基于以上分析, 本文提出一种新的分布式协调控制策略。通过检测直流母线电压和交流电压频率, 该策略动态调节双向 AC/DC 的输出功率, 不依赖通讯, 可靠性高。同时, 混合储能系统中蓄电池采用下垂控制调节其有功输出, 超级电容器迅速提供检测到的负载功率高频分量, 从而可减小负荷突变对母线和蓄电池造成的冲击。此外, 在交流负荷逆变器中增加前馈补偿控制来减小扰动发生时交流电压幅值的波动, 从而可提高供电电压质量。

1 系统结构及建模

本文研究的混合微电网结构如图 1 所示, 主要包括交流微电网和直流微电网两部分, 并通过双向 AC/DC 变流器互联。具体建模如图 1 所示。

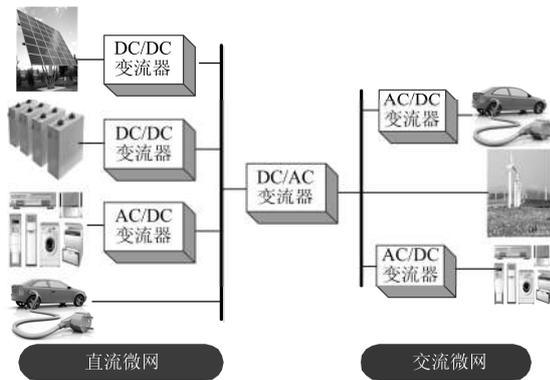


图 1 独立混合微电网结构

Fig. 1 Structure of island hybrid microgrid

1.1 光伏发电系统

光伏系统输出电流为 [11]

$$I = I_{ph} - I_d \left[e^{\frac{q(U+IR_s)}{AKT}} - 1 \right] - \frac{U + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

式中: U 是光伏输出电压; I 是光伏输出电流; I_{ph} 是光伏板的光生电流; R_s 和 R_{sh} 均表示电阻; I_d 为二极管的漏电流; T 为温度; q 是电子电荷量; A 和 k 均为常数。

1.2 风力发电系统

当风通过风力机时, 风能转换为动能并通过风力涡轮机转子转换为机械功率, 风力机吸收的机械功率为 [12]

$$P = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p \quad (2)$$

式中: C_p 为风能利用系数; v 为风速; S 为接收面积; ρ 是空气密度。

1.3 储能系统

储能电池的输出电压为 [13]

$$V_b = V_o + R_b \cdot i_b - K \frac{Q}{Q + \int i_b dt} + C \exp\left(B \int i_b dt\right) \quad (3)$$

$$SOC = 100 \left(1 + \frac{\int i_b dt}{Q} \right) \quad (4)$$

式中: R_b 是蓄电池的电阻; V_b 和 V_o 是电池输出电压和开路电压; i_b 为充电电流; K 是电池极化电压; Q 是电池容量; K 、 B 和 C 均为常数。

2 混合储能系统控制策略

蓄电池在缓冲新能源发电功率波动和控制电压稳定方面发挥重要作用, 但当负荷有功功率突然波动时, 受外界条件影响, 此时新能源发电功率通常是不变的, 蓄电池需要根据负荷功率需求迅速调整充放电功率。但是, 蓄电池功率密度小, 在响应速度方面难以满足要求, 若此时对负荷功率的高频分量进行检测, 并利用超级电容器迅速提供检测到的该突变部分有功功率, 便可以有效地减小由于负荷波动对母线和蓄电池造成的冲击, 同时可降低对蓄电池响应速度和功率密度等方面的要求 [14], 从而提高混合储能系统的响应速度。基于以上分析, 本文采用超级电容器和蓄电池并配以适当控制构成混合储能系统, 在满足动态响应的情况下减小电压波动。

2.1 混合储能系统主电路分析

图 2 所示的混合储能系统中, 超级电容器由电容 C_{sc} 和电阻 R_{sc} 串联等效, u_{sc} 表示其开路电压, u_{bat} 为蓄电池的输出电压, 半桥变流器 1 由电感 L_1 、开关管 S_1 和 S_2 及二极管 VD_1 、 VD_2 构成, 变流器 2 由电感 L_2 、开关管 S_3 和 S_4 及二极管 VD_3 、 VD_4 构成, i_{L1} 、 i_{L2} 分别为电感 L_1 、 L_2 的电流, u_{dc} 和 i_{dc} 为负载的电压和电流, i_{scout} 和 i_{batout} 均为输出电流。

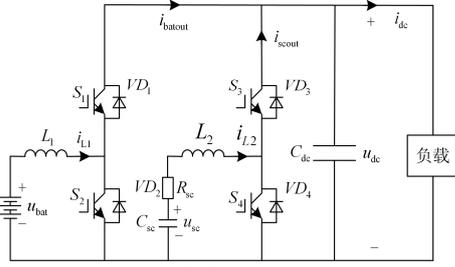


图2 混合储能系统电路图

Fig. 2 Topology of hybrid energy storage system

混合储能系统的状态空间方程为

$$\begin{cases} u_{L1} = L_1 \frac{di_{L1}}{dt} = \lambda(u_{bat} - \alpha u_{dc}) \\ C_{sc} \frac{du_{sc}}{dt} = -i_{L2} \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} u_{L2} = L_2 \frac{di_{L2}}{dt} = \mu(u_{sc} - R_{sc}i_{L2} - \beta u_{dc}) \\ C_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = i_{batout} + i_{scout} - i_{dc} = \alpha i_{L1} + \beta i_{L2} - i_{dc} \end{cases} \quad (6)$$

式中： u_{L1} 和 u_{L2} 分别为电感 L_1 和 L_2 的电压； λ 、 μ 、 α 和 β 按以下原则取值。

(1) 变流器1在Boost运行模式， S_1 关断， S_2 工作在开关状态，此时 $\lambda=1$ ， $\alpha=1-d_2$ ，其中 d_2 表示该模式下 S_2 的占空比。

(2) 变流器1在Buck运行模式， S_1 工作在开关状态， S_2 关断，此时 $\lambda=-1$ ， $\alpha=d_1$ ，其中 d_1 表示该模式下 S_1 的占空比。

(3) 变流器2在Boost运行模式， S_3 关断， S_4 工作在开关状态，此时 $\mu=1$ ， $\beta=1-d_4$ ，其中 d_4 表示该模式下 S_4 的占空比。

(4) 变流器2在Buck运行模式， S_3 工作在开关状态， S_4 关断，此时 $\mu=-1$ ， $\beta=d_3$ ，其中 d_3 表示该模式下 S_3 的占空比。

2.2 混合储能系统控制策略

蓄电池系统采用下垂控制根据负荷功率需求自动调整输出功率以确保母线电压稳定，和缓冲分布式发电的功率波动。

蓄电池下垂控制器的下垂特性为^[10]

$$U_{dc} - I_{dc}Z_{dc} - U_{dc}^* = dP_{dc} \quad (7)$$

$$d = \frac{U_{dc}^{\min} - U_{dc}^{\max}}{P_{dc}^{\max}} \quad (8)$$

式中： Z_{dc} 是蓄电池系统的输出阻抗； U_{dc}^* 是直流母线电压的参考值； U_{dc}^{\min} 和 U_{dc}^{\max} 是变流器1的最小和最大输出电压； P_{dc}^{\max} 是蓄电池的最大输出功率。

如图3所示，采用下垂控制对变流器1的输出功率进行调整。

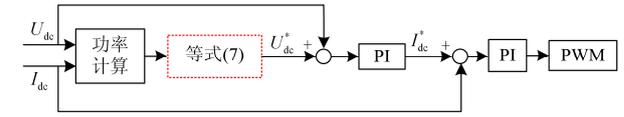


图3 蓄电池下垂控制

Fig. 3 Droop control of storage battery

图3中， I_{dc}^* 是变流器1输出电流的参考值。

在本文负载功率波动时，采用单极点高通滤波器检测其有功功率高频分量，该方法具有简单可靠、容易实现的特点。用 P_{scref} 表示负载波动时检测到的高频功率分量，则有

$$P_{scref} = U_{sc} \cdot I_{scref} \quad (9)$$

进而得变流器2控制器的参考电流为

$$I_{scref} = \frac{P_{scref}}{U_{sc}} \quad (10)$$

超级电容作为平滑负载突变高频分量的主要设备，它能够承受较大的充电电流并且能够迅速的回馈电能。结合检测到的负荷有功功率的高频分量和等式(10)可得出超级电容的控制器电流参考值，具体控制原理如图4所示。

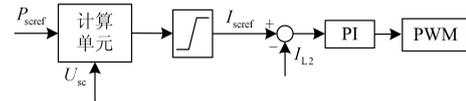


图4 超级电容的控制

Fig. 4 Control of super-capacitor

由上述分析可知，通过蓄电池和超级电容互补供电，在满足直流母线上有功功率供需平衡的基础上可减小负荷突变对蓄电池及母线电压造成冲击。

3 混合微电网的分布式控制策略

通过检测直流侧母线电压和交流侧电压频率，本文设计了一种分布式控制方法对交直流侧的交换功率进行控制。该分布式控制方法不依赖通讯，可靠性高，可减小电压波动，可确保混合微电网稳定运行。

3.1 AC/DC双向变流器分布式控制

本文设计的分布式协调控制策略需满足如下假设。

假设：混合微电网中交直流侧容量应相匹配。若一侧的容量远大于另一侧的容量，这时容量小的一侧即使通过AC/DC进行有功功率交换也很难平滑容量大的一侧的功率波动。

在满足如上假设的情况下，将直流侧母线电压

和交流侧电压频率通过式(11)进行规范化。

$$(Y)' = \begin{cases} \frac{Y - Y_n}{Y_{\max} - Y_n}, & \text{若 } Y > Y_n \\ \frac{Y_n - Y}{Y_{\min} - Y_n}, & \text{若 } Y < Y_n \end{cases} \quad (11)$$

式中： Y 表示直流母线电压 U_{dc} 和交流电压频率 f ； $(Y)'$ 为规范化后的值； Y_n 、 Y_{\max} 和 Y_{\min} 分别是 Y 的额定值、最大允许值和最小允许值。当 $Y_{\max} - Y_n = Y_n - Y_{\min}$ 时有

$$(Y)' = \frac{Y - 0.5(Y_{\max} + Y_{\min})}{0.5(Y_{\max} - Y_{\min})} \quad (12)$$

至此，可将 U_{dc} 和 f 规范化至-1和1之间。

将交流侧微电源下垂特性代入等式(11)可进一步得出

$$(U_{dc})' = 1 + \frac{dP_{dc}}{0.5(U_{\max} - U_{\min})} \quad (13)$$

$$(f)' = 1 + \frac{k_2 P_{ac}}{0.5(f_{\max} - f_{\min})} \quad (14)$$

式中： k_2 为交流侧有功频率下垂特性的下垂系数； P_{ac} 为交流侧输出有功功率； f_{\max} 和 f_{\min} 分别为交流频率的最大和最小值。

这样，可根据规范化后的 $(U_{dc})'$ 和 $(f)'$ 对双向AC/DC的功率按照式(15)进行控制。

$$P_{exc} = (k_p + k_i/s)[(f)' - (U_{dc})'] \quad (15)$$

式中： k_p 和 k_i 为PI控制器的参数； P_{exc} 是双向AC/DC的交换功率。

为了避免不必要的功率交换造成的功率损耗，本文根据 $(U_{dc})'$ 和 $(f)'$ 波动范围波动控制双向AC/DC变流器是否输出功率。具体地

$$\text{条件 A: } |(f)'| > |(f)'|_g \quad (16)$$

$$\text{条件 B: } |(U_{dc})'| > |(U_{dc})'|_g \quad (17)$$

等式(15)和式(16)中，本文 $|(f)'|_g$ 和 $|(U_{dc})'|_g$ 均取0.2，这样，交直流侧交换有功功率 P_{exc} 为

$$P_{exc} = \begin{cases} (k_p + k_i/s)[(f)' - (U_{dc})'], & A \cup B = 1 \\ 0, & A \cup B = 0 \end{cases} \quad (18)$$

式中， \cup 表示逻辑或。这样，减小功率损耗的同时通过上式控制AC/DC变流器的交换功率可控制混合微电网稳定运行并减小电压波动。

3.2 直流侧负荷逆变器控制方法

为了满足直流侧供电多样性的需求，可将交流负荷通过逆变器连接至直流母线^[15-21]。同时，为了提高交流负荷的电压质量，减小交流电压幅值波动，

本文设计出一种带有电压跌落补偿功能的逆变器下垂控制策略。具体控制如图5所示。

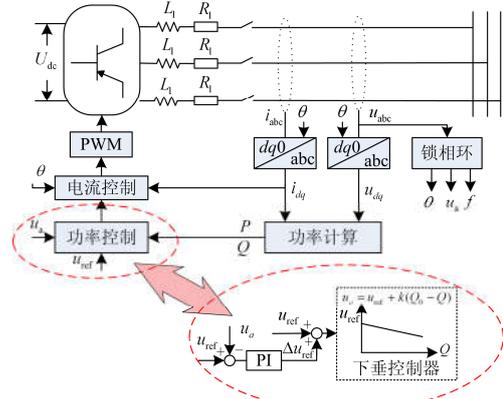


图5 交流负荷逆变器控制

Fig. 5 Control of AC load inverter

图5中： R_1 和 L_1 表示线路电阻和电感； u_{abc} 和 i_{abc} 是电压和电流； f 、 θ 和 u_a 分别表示交流电压的频率，相角及幅值； u_d 、 u_q 和 i_d 、 i_q 分别为交流电压电流的dq轴分量； P 和 Q 是逆变器输出有功和无功功率； u_{ref} 是交流电压的参考值。逆变器采用下垂控制为

$$u_a = u_{ref} + k_1(Q_0 - Q) \quad (19)$$

$$f = f_{ref} + k_2(P_0 - P) \quad (20)$$

式中： k_1 和 k_2 为下垂系数； P_0 和 Q_0 分别为 P 和 Q 的参考值。

此外，在逆变器下垂控制器的控制外环增加补偿量，如图5所示，采用PI控制器对检测到的交流电压幅值和其参考值的差值进行调节，将调节后的补偿量动态叠加给 u_{ref} ，这样，可得到

$$u_a = u_{ref} + k_1(Q_0 - Q) + (k_{p1} + k_{i1}/s)(u_{ref} - u_a) \quad (21)$$

式中， k_{p1} 和 k_{i1} 为PI控制器的参数。这样，便可根据等式(21)并通过动态调节逆变器的输出功率来减小交流负荷的电压幅值波动，有利于提高电压质量，具体控制效果的对比分析将在仿真部分给出。

4 仿真分析

如图1所示，利用Matlab/Simulink搭建仿真模型，对源荷功率波动及故障等暂态情况下该分布式控制策略的有效性进行探究。其中，直流侧DG额定发电功率为3kW，交流侧DG额定功率为4kW，蓄电池额定容量4.5kWh。仿真中交流电压为380V/50Hz，直流电压为380V，同时采用可变负荷来探究负荷波动对系统运行的影响，直流负荷总功率

0~3 kW, 交流负荷有功总功率 0~3 kW。

4.1 直流侧负荷功率波动时

本算例主要仿真分析直流侧负荷功率波动对混合微电网运行的影响。仿真中, 本文提出的分布式控制根据直流电压和交流频率自动调整双向 AC/DC 变流器的输出有功功率, 以确保两侧电压稳定。图 6 所示为直流侧负荷波动时系统运行特性。

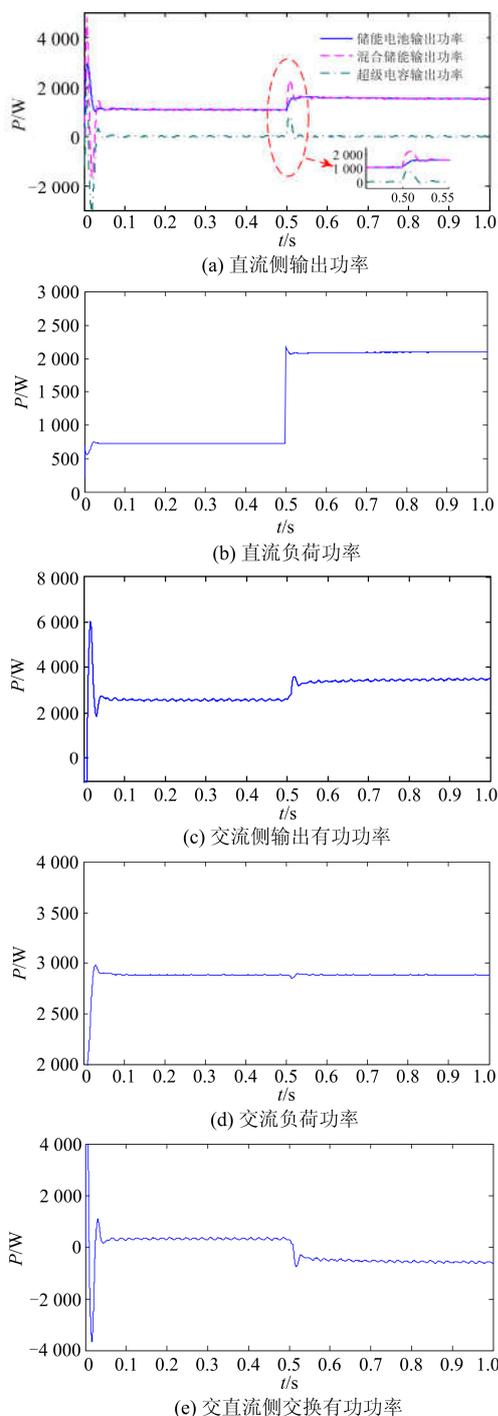


图 6 直流侧负荷功率波动时运行特性

Fig. 6 Operation characteristics when load in DC side fluctuates

仿真开始时, 直流侧发电功率约为 1.2 kW、负荷功率约为 0.7 kW, 交流侧输出功率约为 2.4 kW, 交流负荷功率约为 2.9 kW, 此时从图 6(e)可看出, 直流侧微电网通过双向 AC/DC 向交流侧输送约 0.5 kW 有功功率以满足交直流侧的有功功率供需平衡。在 0.5 s 时, 直流负荷增加至约为 2.1 kW, 交流负荷功率此时保持不变, 由图 6(e)可看出, 此时双向 AC/DC 功率方向发生变化, 由交流侧向直流侧输送约 0.6 kW 有功功率来保持系统的有功功率平衡, 具体交直流侧电源出力情况如表 1 所示。特别的, 如图 6(a), 负荷功率波动时, 在蓄电池调整输出功率的同时, 超级电容器迅速充放电以补偿负荷突变功率的高频分量, 从而可减小负荷功率波动对母线及蓄电池的冲击, 有利于提高储能系统的可靠性, 同时负荷功率波动时各端输出功率平滑切换, 系统保持稳定运行。

表 1 直流负荷波动时交直流侧电源出力

Table 1 Power outputs of sources in both sides when DC load fluctuates

参数	kW	
	0~0.5 s	0.5~1.0 s
直流负荷	0.7	2.1
交流负荷	2.9	2.9
直流侧电源输出功率	1.2	1.5
交流侧电源输出功率	2.4	3.5
交直流侧交换功率	0.5	0.6

直流侧负荷功率波动时直流母线电压如图 7 所示。

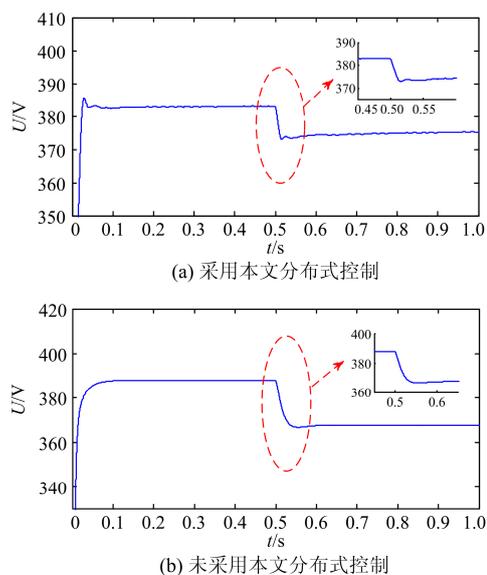


图 7 直流负荷波动时的直流母线电压

Fig. 7 DC bus voltage when DC load fluctuates

图 7 所示分别为采用和未采用本文提出的分布式协调控制方法时的母线电压, 扰动发生时母线电压分别跌落约 6 V 和 18 V, 具体直流母线电压偏差如表 2 所示。通过对比图 7 和表 2 可看出本文采用的分布式控制方法可减小直流侧母线电压波动, 且响应速度快, 过渡平滑。

表 2 直流负荷波动时直流母线电压偏差

Table 2 DC voltage deviation when DC load fluctuates

V		
时间	采用分布式控制	未采用分布式控制
0~0.5 s	2	8
0.5~1.0 s	6	18

图 8 所示为直流侧交流负荷逆变器的输出电压, 图 9(a)和图 9(b)分别为该电压当采用和未采用本文提出的电压前馈补偿下垂控制时的电压幅值, 表 3 为扰动发生前后交流电压幅值的波动值。

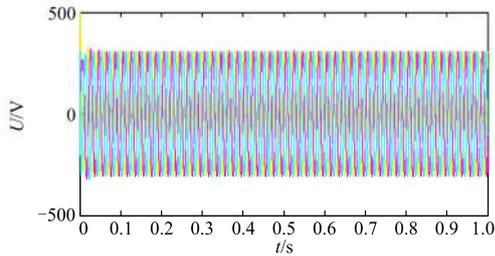
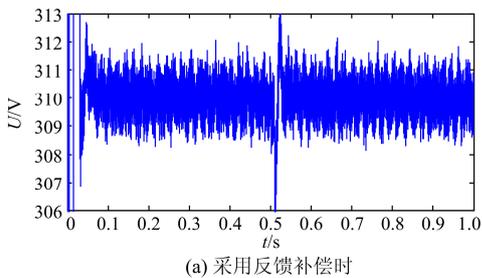
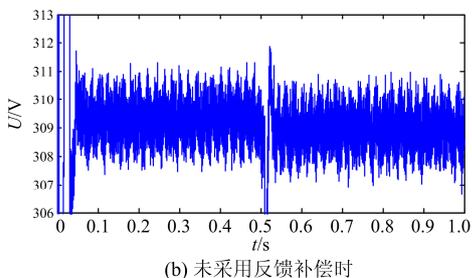


图 8 直流负荷波动时的交流负荷电压

Fig. 8 AC load voltage when DC load fluctuates



(a) 采用反馈补偿时



(b) 未采用反馈补偿时

图 9 直流负荷波动时的交流电压幅值

Fig. 9 Amplitude of AC bus voltage when DC load fluctuates

表 3 直流负荷波动时交流电压幅值偏差

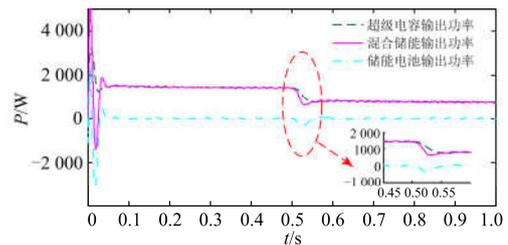
Table 3 AC voltage amplitude deviation when DC load fluctuates

V		
时间	采用反馈补偿时	未采用反馈补偿时
0~0.5 s	310 ± 1.5	309 ± 2.0
0.5~1.0 s	310 ± 1.5	309 ± 2.0

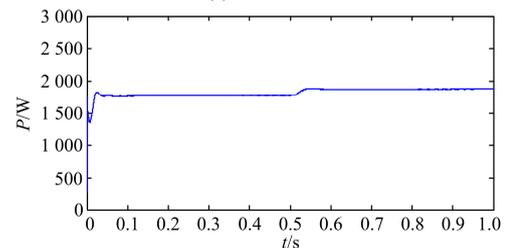
通过对比图9(a)、图9(b)和表 3 可看出, 在 0~0.5 s 和 0.5~1.0 s 时, 采用反馈补偿控制均可将交流电压幅值由 309 ± 2.0 V 调节至 310 ± 1.5 V, 从而有利于减小交流电压波动和改善电压质量。

4.2 交流侧负荷功率波动时

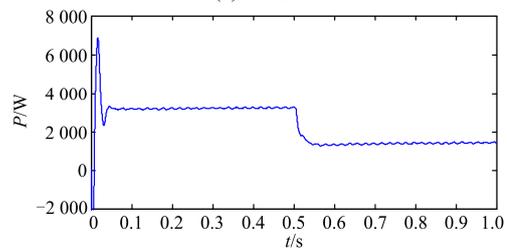
本算例主要仿真分析了交流侧负荷功率波动对混合微电网运行的影响。仿真中, 本文提出的分布式控制根据直流电压和交流频率自动调整双向 AC/DC 变流器的输出有功功率, 以确保两侧电压稳定。图 10 所示为交流侧负荷波动时系统运行特性。



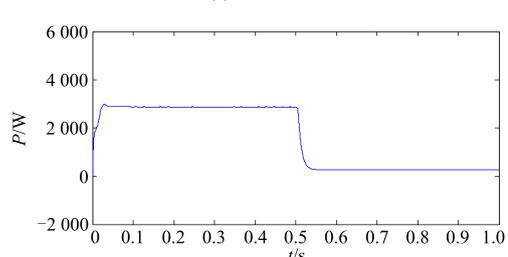
(a) 直流侧输出功率



(b) 直流负荷功率



(c) 交流侧输出功率



(d) 交流负荷功率

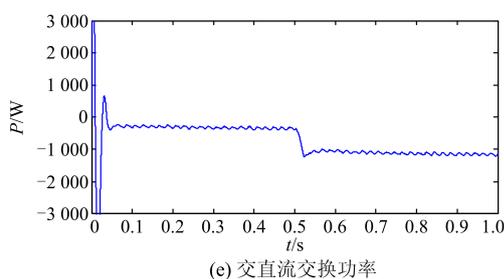


图 10 交流侧负荷功率波动时运行特性

Fig. 10 Operation characteristics when load in AC side fluctuates

仿真开始时, 直流侧输出有功功率约 1.9 kW、负荷功率 1.6 kW, 交流侧输出有功 3.2 kW、负荷功率约 3.5 kW, 此时, 交直流侧交换有功功率如图 10(e)所示约为 0.3 kW。在 0.5 s 时交流负荷波动, 此时本文提出的分布式控制迅速调整双向 AC/DC 变流器的输出功率, 从而可确保母线上有功功率供需平衡, 具体交直流侧电源出力情况如表 4 所示。此外, 有图 6(a)可看出, 超级电容迅速提供负荷波动的高频功率分量, 从而可减小负荷波动等扰动对直流母线和蓄电池造成的冲击。

表 4 交流负荷波动时交直流侧电源出力

Table 4 Power outputs of sources in both sides when AC load fluctuates

参数	0~0.5 s	0.5~1.0 s
直流负荷	1.6	1.8
交流负荷	3.5	0.4
直流侧电源输出功率	1.9	0.7
交流侧电源输出功率	3.2	1.5
交直流侧交换功率	0.3	1.1

图 11 为交流负荷波动时的直流母线电压, 可以看出, 扰动发生时母线电压波动约为 7 V, 波动小, 有利于确保负荷稳定可靠供电。

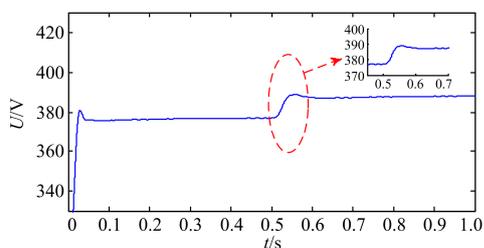


图 11 交流负荷波动时直流母线电压

Fig. 11 DC bus voltage when AC load fluctuates

图 12 所示为直流侧交流负荷逆变器的输出电压, 图 13(a)和图 13(b)分别为该电压当采用和未采用本文提出的电压前馈补偿下垂控制时的电压幅值, 表

5 为扰动发生前后交流电压幅值的波动值。

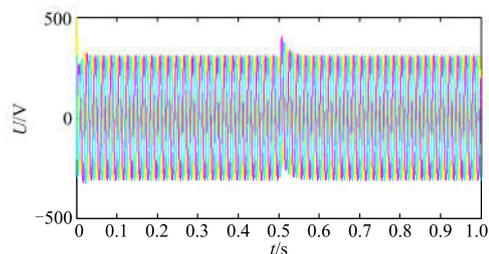
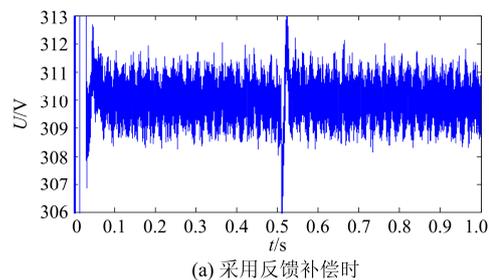
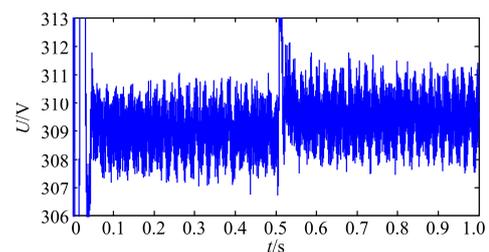


图 12 交流侧负荷波动时交流母线电压

Fig. 12 AC bus voltage when load in AC side fluctuates



(a) 采用反馈补偿时



(b) 未采用反馈补偿时

图 13 交流负荷波动时交流电压幅值

Fig. 13 Amplitude of AC bus voltage when AC load fluctuates

表 5 交流负荷波动时交流电压幅值偏差

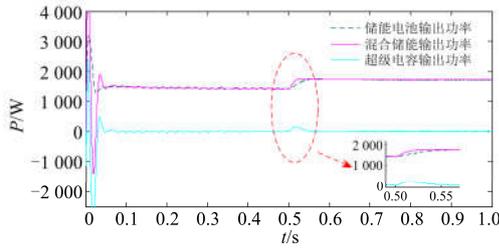
Table 5 AC voltage amplitude deviation when AC load fluctuates

时间	采用反馈补偿时	未采用反馈补偿时
0~0.5 s	310 ± 1.7	309 ± 2.0
0.5~1.0 s	310 ± 1.9	309 ± 3.0

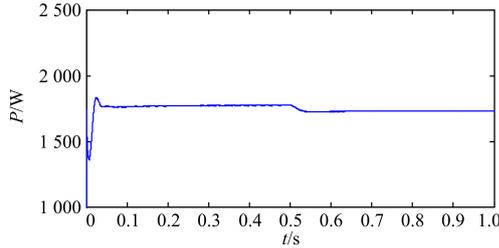
通过对比图 13(a)、13(b)和表 5 可看出, 在 0~0.5 s 时, 采用反馈补偿控制均可将交流电压幅值由 309 ± 2.0 V 调节至 310 ± 1.7 V, 在 0.5~1.0 s 时从 309 ± 3.0 V 调节至 310 ± 1.9 V, 因此采用的反馈补偿控制可有效减小交流电压波动和改善电压质量。

4.3 交直流侧断开连接时

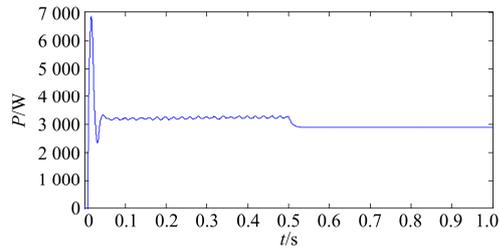
本算例主要仿真分析了交流侧微电网断开连接等扰动时的系统运行, 仿真中直流侧仍采用混合储能系统控制直流母线上的有功功率供需平衡。图 14 所示为交直流侧断开连接时系统运行特性。



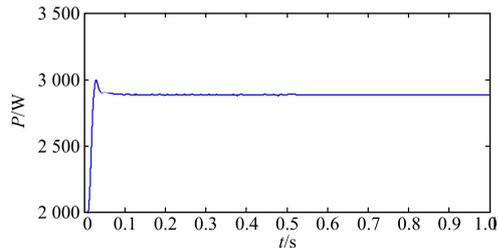
(a) 直流侧输出功率



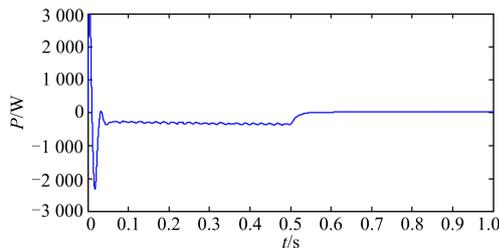
(b) 直流负荷功率



(c) 交流侧输出功率



(d) 交流负荷功率



(e) 交直流交换功率

图 14 交直流侧断开时运行特性

Fig. 14 Operation characteristics when DC is disconnected from AC

仿真开始时, 在 0~0.5 s, AC/DC 变流器正常运行, 可确保交直流侧的功率平衡。在 0.5 s 时由于故障等原因, 交直流侧断开连接, 由图 14 可以看出断开连接以后, 交直流侧微电网均能平滑切换, 迅速

过渡至新的稳态, 且波动小。以上过程中, 交直流侧电源出力情况如表 6 所示。

表 6 交直流侧断开时两侧电源出力
Table 6 Power outputs of sources in both sides when DC is disconnected from AC side

参数	kW	
	0~0.5 s	0.5~1.0 s
直流负荷	1.8	1.7
交流负荷	2.8	2.9
直流侧电源输出功率	1.4	1.7
交流侧电源输出功率	3.2	2.9
交直流侧交换功率	0.4	0

图 15 为交流负荷波动时的直流母线电压, 可以看出, 交直流侧微电网断开连接时母线电压波动小, 约为 6 V, 且切换平滑, 有利于负荷可靠供电。

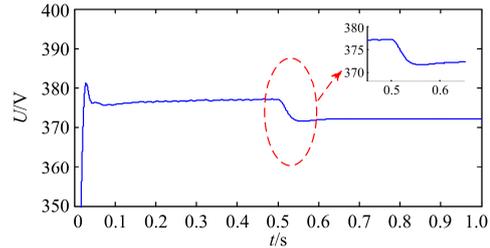


图 15 交直流侧断开时直流母线电压

Fig. 15 DC bus voltage when DC is disconnected from AC side

图 16 所示为直流侧交流负荷逆变器的输出电压, 图 17(a)和图 17(b)分别为该电压当采用和未采用本文提出的电压前馈补偿下垂控制时的电压幅值, 表 7 为扰动发生前后交流电压幅值的波动值。

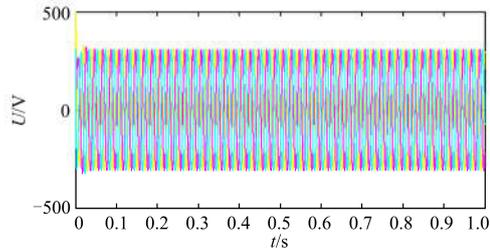
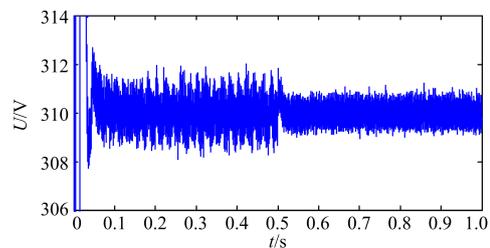


图 16 交直流断开时交流母线电压

Fig. 16 AC bus voltage when DC is disconnected from AC side



(a) 采用反馈补偿时

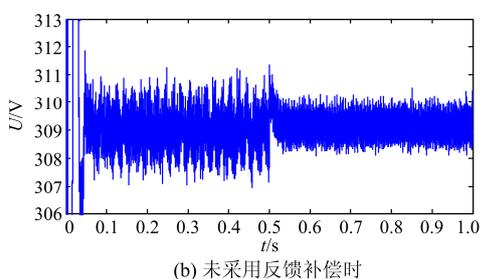


图 17 交直流侧断开时交流电压幅值

Fig. 17 Amplitude of AC bus voltage when DC is disconnected from AC side

表 7 交直流侧断开时交流电压幅值偏差

Table 7 AC voltage amplitude deviation when DC is disconnected from AC side

时间	采用反馈补偿时	未采用反馈补偿时	v
0~0.5 s	310 ± 1.8	309 ± 2.0	
0.5~1.0 s	310 ± 1.0	309 ± 1.2	

通过对比图 17(a)、图 17(b)和表 7 可看出, 在 0~0.5 s 时, 采用反馈补偿控制均可将交流电压幅值由 309 ± 2.0 V 调节至 310 ± 1.8 V, 当交直流侧断开连接后, 在 0.5~1.0 s 时反馈补偿控制将交流电压幅值从 309 ± 1.2 V 调节至 310 ± 1.0 V, 因此采用的反馈补偿控制可有效减小交流电压波动和改善电压质量。

5 结论

为了减小功率损耗和协调混合微电网稳定运行, 本文设计一种新的分布式控制策略。该策略结合直流电压和交流频率动态调节双向 AC/DC 变流器的输出功率, 且该方法通讯依赖程度低, 可靠性高。同时采用蓄电池和超级电容器混合供电来确保直流母线上的有功功率平衡, 在负荷逆变器的下垂控制器中加入电压前馈补偿量以减小电压波动。利用 Matlab/Simulink 对源荷功率波动及故障等暂态情况下该分布式控制策略的有效性进行探究, 结果表明, 在不同工况下, 该分布式控制均可确保混合微电网稳定运行和电压稳定。

参考文献

[1] 丁明, 田龙刚, 潘浩, 等. 交直流混合微电网运行控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(9): 1-8.
DING Ming, TIAN Longgang, PAN Hao, et al. Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(9): 1-8.

[2] 蔡冰倩, 贾利虎, 朱永强, 等. 新型交直流混合微电网结构设计[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 147-154.
CAI Bingqian, JIA Lihu, ZHU Yongqiang, et al. New architecture design for hybrid AC/DC micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 147-154.

[3] 麻常辉, 潘志远, 刘超男, 等. 基于自适应下垂控制的风光储微网调频研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 21-27.
MA Changhui, PAN Zhiyuan, LIU Chaonan, et al. Frequency regulation research of wind-PV-ES hybrid microgrid system based on adaptive droop control[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 21-27.

[4] 刘海涛, 吕志鹏, 苏剑, 等. 具有功率精确分配能力的逆变器电压谐波分频下垂控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(19): 9-14.
LIU Haitao, LÜ Zhipeng, SU Jian, et al. Inverter's frequency dividing droop controller with accurate load sharing ability[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(19): 9-14.

[5] LIU X, WANG P, LOH P C. A hybrid AC/DC micro-grid and its coordination control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 278-286.

[6] 高泽, 杨建华, 季宇, 等. 交直流混合微电网负荷分配与直流电压控制研究[J]. 电器与能效管理技术, 2015(2): 56-60.
GAO Ze, YANG Jianhua, JI Yu, et al. AC/DC hybrid micro grid load distribution and DC voltage control[J]. Low Voltage Apparatus, 2015(2): 56-60.

[7] 陆晓楠, 孙凯, GURRERO J, 等. 适用于交直流混合微电网的直流分层控制系统[J]. 电工技术学报, 2013, 28(4): 35-42.
LU Xiaonan, SUN Kai, GURRERO J, et al. DC hierarchical control system for microgrid applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 35-42.

[8] 唐磊, 曾成碧, 苗虹, 等. 交直流混合微电网中 AC/DC 双向功率变流器的新控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 13-18.
TANG Lei, ZENG Chengbi, MIAO Hong, et al. One novel control strategy for the AC/DC bi-directional power converter in micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 13-18.

[9] GU Y J, XIANG X, LI W H, et al. Mode-adaptive decentralized control for renewable DC microgrid with enhanced reliability and flexibility[J]. IEEE Transactions

- on Power Electronics, 2014, 29(9): 5072-5080.
- [10] EGHTEHDARPOUR N, FARJAH E. Power control and management in a hybrid AC/DC microgrid[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(3): 1494-1505.
- [11] 刘东冉, 陈树勇, 马敏, 等. 光伏发电系统模型综述[J]. 电网技术, 2011, 35(8): 47-52.
LIU Dongran, CHEN Shuyong, MA Min, et al. A review on models for photovoltaic generation system[J]. Power System Technology, 2011, 35(8): 47-52.
- [12] 陈家伟, 陈杰, 龚春英. 永磁直驱风力发电系统气动载荷抑制策略[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(21): 99-108.
CHEN Jiawei, CHEN Jie, GONG Chunying. An aerodynamic load reduction method for PMSG-based direct-drive WECS[J]. Proceedings of the CSEE, 33(21): 99-108.
- [13] TREMBLAY, DESSAINT L A, DEKKICHE A I. A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles[J]. IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 2007: 284-289.
- [14] 张纯江, 董杰, 刘君, 等. 蓄电池与超级电容混合储能系统的控制策略[J]. 电工技术学报, 2010, 29(4): 334-340.
ZHANG Chunjiang, DONG Jie, LIU Jun, et al. A control strategy for battery-ultracapacitor hybrid energy storage system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2010, 29(4): 334-340.
- [15] 李浩琛, 韩如成, 梁延科, 等. 独立光伏微电网的多逆变器并联控制策略[J]. 可再生能源, 2016, 34(3): 368-374.
LI Haochen, HAN Rucheng, LIANG Yanke, et al. Control strategy of parallel multiple inverters in standalone photovoltaic microgrid[J]. Renewable Energy Resources, 2016, 34(3): 368-374.
- [16] GUO Wenming, MU Longhua. 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.
- [17] 陈仕龙, 张杰, 刘红锐, 等. 特高压直流输电线路单端电流方向暂态保护[J]. 电工技术学报, 2016, 31(2): 171-177.
CHEN Shilong, ZHANG Jie, LIU Hongrui, et al. A Single-Ended Current Direction Transient Protection of UHVDC Transmission Line[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(2): 171-177.
- [18] 曾能先, 程思勇, 季严飞, 等. 基于外网等值模型的输电线路不平衡度计算方法[J]. 广东电力, 2016, 29(4): 99-104.
ZENG Nengxian, CHENG Siyong, JI Yanfei, et al. Calculation Method for Degree of Unbalance of Power Transmission Lines Based on Equivalent Value Model of Outer Power Grid[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(4): 99-104.
- [19] 任洪波, 吴琼, 邱留良, 等. 分布式能源系统可靠性评价[J]. 热力发电, 2016, 45(4): 65-69.
REN Hongbo, WU Qiong, QIU Liuliang, et al. Reliability assessment of distribution energy system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(4): 65-69.
- [20] 王敦青, 张厚荣, 罗望春, 等. 强寒潮下超高压输电线路直流融冰效果差异分析[J]. 广东电力, 2016, 29(12): 110-114.
WANG Xiaoping, ZHANG Hourong, LUO Wangchun, et al. Analysis on Differences in DC De-icing Effects on EHV Power Transmission Lines Under Strong Cold Wave Weather[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(12): 110-114.
- [21] 施涛, 高山, 张宁宇. 含风电场的机组组合二阶段随机模型及其改进算法[J]. 电工技术学报, 2016, 31(16): 172-180.
Shi Tao, Gao Shan, Zhang Ningyu. Two-Stage Stochastic Model of Unit Commitment with Wind Farm and an Improved Algorithm[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(16): 172-180.

收稿日期: 2017-03-15; 修回日期: 2017-06-25

作者简介:

范其丽(1979—), 女, 硕士, 讲师, 主要研究方向为电力电子在电力系统中的应用; E-mail: path114@163.com

冯越(1981—), 男, 通信作者, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统规划。E-Mail: feng_yue_feng@163.com

(编辑 张爱琴)