

交直流混合微电网运行控制策略研究

丁明¹, 田龙刚¹, 潘浩¹, 张雪松², 周金辉²

(1. 合肥工业大学电气与自动化工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 国网浙江省电力公司
电力科学研究院, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为解决交直流混合微电网中功率波动、交直流系统之间功率平衡、直流侧源荷比相对较大光伏利用率不高的问题, 研究了交直流混合微电网并网运行时, 在蓄电池的平抑作用下, 直流侧光伏发电以恒定的功率通过交流侧并入大电网, 提高直流侧光伏利用率。孤岛运行时, 蓄电池作为平衡节点, 和双向 AC/DC 变换器一起维持整个系统的电压、频率稳定, 并实现交、直流系统之间功率平衡的控制方案。最后利用 PSCAD/EMTDC 软件对系统功率波动、并网运行向非计划孤岛运行切换、孤岛运行向并网运行切换进行了仿真验证, 运行结果表明该控制方案能有效平抑系统功率波动, 维持交直流混合微电网稳定运行。

关键词: 交直流混合微电网; 光伏发电; 蓄电池储能; 功率平衡

Research on control strategy of hybrid AC/DC microgrid

DING Ming¹, TIAN Longgang¹, PAN Hao¹, ZHANG Xuesong², ZHOU Jinhui²

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China;
2. Z(P)EPC Electric Power Research Institute, Hangzhou 310014, China)

Abstract: To solve the problems of hybrid AC/DC microgrid power fluctuations, power balance between the AC and DC systems, and low PV utilization because of relatively large DC side power load ratio, this paper proposes that in grid-connected operation, under the stabilizing role of the battery, the DC side outputs photovoltaic power into the grid constantly through the AC side to improve the DC side photovoltaic utilization. In islanded operation, the battery as the balance nodes maintains the entire system voltage, frequency stability, and achieves the power balance between the AC and DC systems with the bi-directional AC/DC converter. Finally the PSCAD/EMTDC software is used for the simulation of system power fluctuations, grid-connected operation switching to non-program islanded operation, and islanded operation switching to grid-connected operation, the result shows that the control scheme can effectively stabilize the system power fluctuations and maintain the hybrid AC/DC microgrid stable operation.

Key words: hybrid AC/DC microgrid; photovoltaic power generation; battery energy storage; power balance

中图分类号: TM732 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2015)09-0001-08

0 引言

近年来, 越来越多的可再生能源通过接入微电网得到了极大的利用。微电网从网架结构和供电方式上可分为交流微电网、直流微电网和交直流混合微电网^[1-2]。随着数字社会的发展, 直流用电设备越来越多, 如电动汽车、新型家用电器、电脑通信设备等, 未来将会出现直流设备与交流设备共享市场的格局。为了降低单纯的交流/直流微电网在应用中

因多重 AC/DC 或 DC/AC 变换带来的功率损耗、谐波电流及控制难度, 提高系统的可靠性和经济性, 也为了各式各样的可再生能源和用电设备更好地接入微电网, 交直流混合微电网得到了国内外的重视与研究^[3-7]。交直流混合微电网具有非常明显的特点: (1) 交直流混合微电网系统包括交流子系统(交流母线)、直流子系统(直流母线)、交直流母线间双向 AC/DC 变换器; (2) 既可以直接向交流负载供电, 又可以直接向直流负载供电, 降低因多重变换器带来的损耗; (3) 交、直流子系统间功率可双向流动, 各子系统可独立控制也可协调控制, 混合微电网可

以在并网模式与孤岛模式之间切换运行^[1-4,8-9]。

光伏发电容易受到环境温度和光照的影响,其发电功率具有不稳定性,本文在直流侧配置蓄电池储能,通过双向 DC/DC 变换器控制蓄电池的充放电来平抑光伏发电及负荷的功率波动。在交直流混合微电网并网运行时,交流母线电压和频率由大电网支撑,直流母线电压可以通过交直流母线间双向 AC/DC 变换器控制,也可以通过储能系统来控制^[9]。针对目前因直流负荷较小而直流侧光伏发电容量较大(安装时考虑到未来直流负荷增长)导致的直流侧源荷比较大的问题,本文采用储能系统来控制直流母线电压,而双向 AC/DC 变换器采用 P/Q 控制,在满足直流侧负荷的情况下,将直流侧光伏发电功率定额并入大电网,提高直流侧光伏利用率。在交直流混合微电网孤岛运行时,双向 AC/DC 变换器则切换到 V/f 控制,以蓄电池为平衡节点来支撑系统母线电压、频率稳定,实现交直流系统之间的功率平衡。在交直流混合微电网切换运行时,交直流系统之间的功率通过双向 AC/DC 进行平衡,切换前后缺额功率由蓄电池平抑,保证切换前后系统稳定运行。

1 系统结构及仿真模型

1.1 交直流混合微电网系统结构

如图 1 所示,交直流混合微电网系统由交流子系统、直流子系统、功率交换系统、微电网控制器组成。交流子系统中,光伏发电单元通过 DC/AC 逆变器连接至交流母线,实现 MPPT 及单位功率因数控制,交流负荷直接接至交流母线。直流子系统中,光伏发电单元通过 Boost 变换器实现最大功率跟踪,蓄电池储能通过双向 DC/DC 变换器实现充放电控制,直流负荷直接接至直流母线。功率交换单元由隔离变压器及双向 AC/DC 变换器构成。整个系统通过交流侧的并网接口可以在并网和孤岛模式间切换运行。微电网控制器除了要完成孤岛检测、

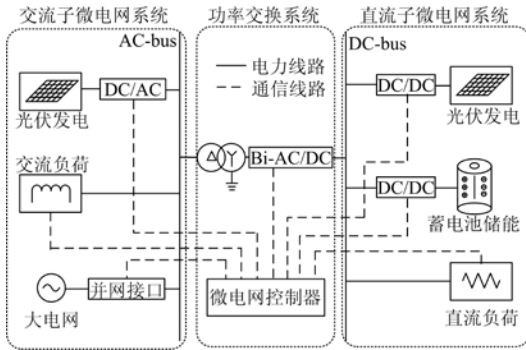


图 1 交直流混合微电网系统结构

Fig. 1 Hybrid AC/DC microgrid system structure

自动并网功能外,还需要通过通信系统、储能变流器、负荷控制器和光伏控制器等,实现微电网不同工况的稳定运行和顺利切换。

1.2 光伏电池仿真模型

根据图 2 所示的光伏电池等效电路,可以得到光伏电池的函数方程为^[10]

$$I_{pv} = I_{ph} - I_o \left\{ \exp \left[\frac{q(V_{pv} + I R_s)}{AKT} \right] - 1 \right\} - \frac{V_{pv} + I R_s}{R_p} \quad (1)$$

其中: I_{ph} 为光电流(A); I_o 为反向饱和电流(A); R_p 为光伏电池并联电阻(Ω); R_s 为光伏电池串联电阻(Ω); q 为电子电荷(1.6×10^{19} C); A 为二极管因子; K 为玻尔兹曼常数(1.38×10^{-23} J/K); T 为绝对温度(K)。

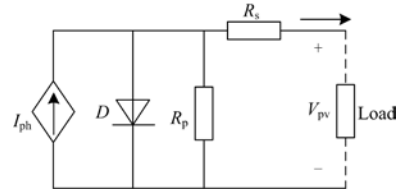
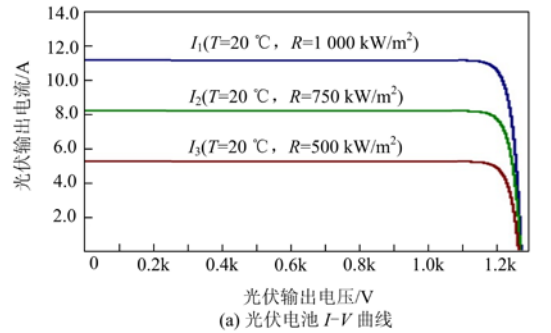


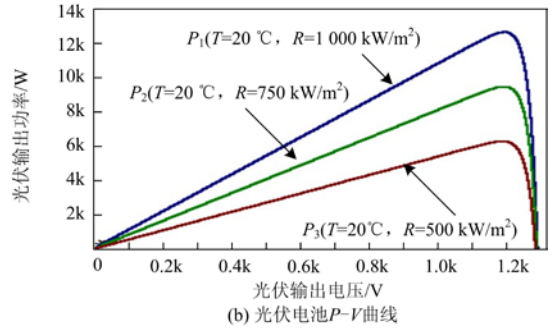
图 2 光伏电池等效电路

Fig. 2 Photovoltaic cells equivalent circuit

根据式(1)在 PSCAD/EMTDC 搭建光伏电池模型,其参数为 $U_{max}=1\ 200$ V, $U_{oc}=1\ 280$ V, $I_m=10.25$ A, $I_{sc}=10.65$ A, 标准温度为 $28\ ^\circ\text{C}$, 标准光照为 $1\ 000\ \text{kW/m}^2$ 。在温度不变、改变光照的情况下 I - V 、 P - V 曲线如图 3(a)、图 3(b)所示。



(a) 光伏电池 I - V 曲线



(b) 光伏电池 P - V 曲线

图 3 光伏电池特性曲线

Fig. 3 Characteristic curves of photovoltaic cells

在光伏发电中, 常采用最大功率跟踪控制, 即 MPPT 控制, 常用的最大功率计算方法有电导增量法、扰动观测法, 牛顿拉夫逊法等, 其中牛顿拉夫逊法计算速度快, 精度高, 得到了广泛应用。本文在求解最大功率点电流和电压时采用了牛顿拉夫逊迭代算法^[11], 基本原理是应用牛顿拉夫逊迭代法对式(2)进行迭代求解, 经过 k 次迭代, 当 $|U_{k+1} - U_k| < \varepsilon$ 时, $U_{\max} = U_{k+1}$, 对应的电流为 I_{\max} , 此时, $P_{\max} = U_{\max} I_{\max}$ 。

$$U_{k+1} = U_k - P'(U_k) / P''(U_k) \quad (2)$$

式中: U_{k+1} 和 U_k 分别为 U 的第 $k+1$ 次和第 k 次迭代值; $P'(U_k)$ 和 $P''(U_k)$ 分别是第 k 次迭代下 P 对 U 的一阶和二阶导数; ε 为迭代精度。

1.3 蓄电池仿真模型

蓄电池作为分布式发电中的储能设备, 其作用不言而喻, 但是蓄电池内部参数之间的关系较为复杂, 而且相互之间呈高度非线性关系, 这成为蓄电池建模的难点。常用的蓄电池模型有谢菲尔德模型^[12]、戴维南模型^[13]以及通用模型^[14]。本文所采用的蓄电池模型为通用模型, 其物理模型如图 4 所示, 由受控电压源和一个定值电阻串联组成, 其中 E_{bat} 由式(3)确定。

$$E_{\text{bat}} = E_0 - K \left(\frac{Q}{Q - \int I_{\text{battery}} dt} \right) + A \exp \left(-B \int I_{\text{battery}} dt \right) \quad (3)$$

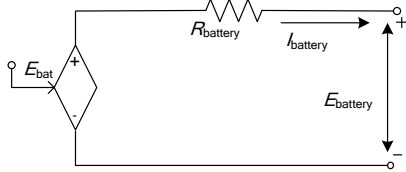


图 4 通用蓄电池模型

Fig. 4 Universal battery model

其中: E_{bat} 为蓄电池空载时的电压(V); E_0 为蓄电池额定电压(V); K 为极化电压(V); Q 为蓄电池容量(Ah); $\int I_{\text{battery}} dt$ 为实际充放电电量(Ah); A 为指数域电压降落值(V); B 为指数域时间常数倒数(Ah⁻¹); E_{battery} 为蓄电池实际端电压(V); R_{battery} 为终端电阻(Ω); I_{battery} 为蓄电池充放电电流(A)。

根据式(3)在 PSCAD/EMTDC 中搭建通用蓄电池模型进行充放电仿真, 参数为: 蓄电池容量 $Q=600$ Ah, 蓄电池额定电压 $E_0=150$ V, 初始 $SOC=80\%$, 充放电电流 40 A, 为了保护蓄电池, 设置了 $SOC_{\max}=95\%$ 和 $SOC_{\min}=35\%$ 以限制过充过放, 该蓄电池充放电结果如图 5 所示。

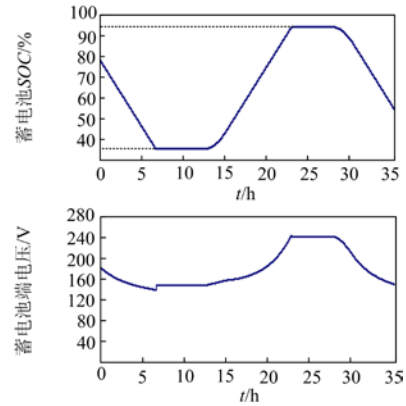


图 5 蓄电池充放电 SOC、端电压曲线

Fig. 5 SOC/terminal voltage curve of battery charge and discharge

2 交直流混合微电网控制策略

2.1 直流侧光伏发电控制策略

直流侧光伏发电单元通过 Boost 变换器连接至直流母线, 其拓扑结构如图 6 所示, 所采用的控制策略为电压环控制模式, 控制策略如图 7 所示。光伏电池输出电压 U_{pv} 经过牛顿拉夫逊迭代计算后得到最大功率点对应的电压 U_m , 将 U_m 作为光伏电池出口电压 U_{pv} 的参考值, 经过 PI 调节后做为调制波与载波比较后, 输出信号驱动开关管 K_0 , 以实现最大功率跟踪。

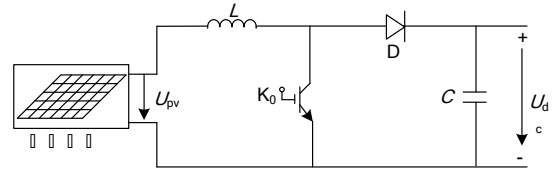


图 6 直流侧光伏发电拓扑结构

Fig. 6 Topology of DC side photovoltaic power generation

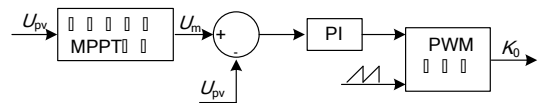


图 7 直流侧光伏发电控制策略

Fig. 7 Control strategy of DC side photovoltaic power generation

2.2 交流侧光伏发电控制策略

交流侧光伏发电单元通过 DC/AC 变换器连接至交流母线, 其拓扑结构如图 8 所示, 所采用的控制策略为电压-无功(UQ)控制, 即以直流电压、无功功率为外环控制, 电流为内环控制, 通常将无功设置为 0, 可实现单位功率因数控制, 控制策略如图 9 所示。 U_m 与光伏电池出口电压 U_{pv} 的差值经过 PI

调节后输出为直轴电流参考值，无功参考值与实测值的差值经过 PI 调节后输出为交轴电流参考值，然后与交、直轴电流实测值的差经过 PI 控制器调节，

再经过解耦，输出值经过 dq 反变换输入到 PWM 发生器来驱动开关管。该控制策略不但可以实现最大功率跟踪，也可以实现单位功率因数控制。

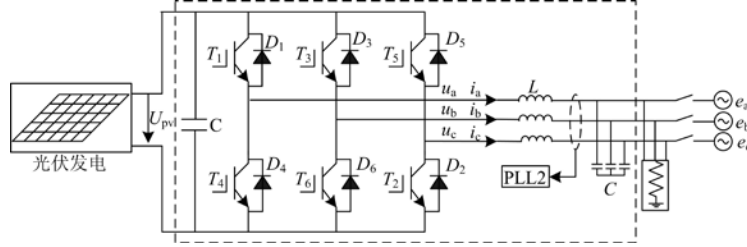


图 8 交流侧光伏发电拓扑结构

Fig. 8 Topology of AC side photovoltaic power generation

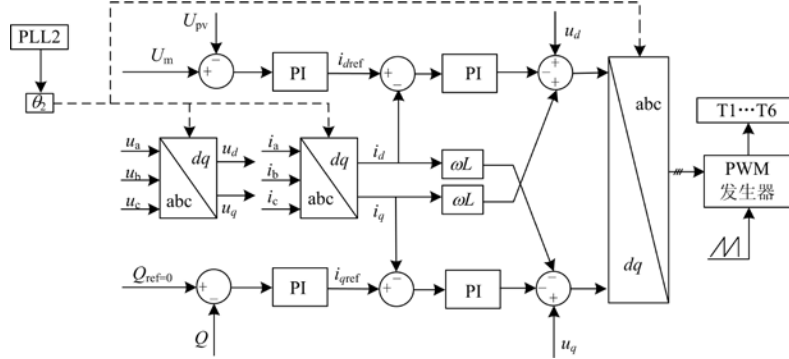


图 9 交流侧光伏发电控制策略

Fig. 9 Control strategy of AC side photovoltaic power generation

2.3 蓄电池充放电控制策略

蓄电池通过双向 DC/DC 变换器来控制充放电，其拓扑结构如图 10 所示，其为 Buck/Boost 变换器， K_1 开通， K_2 关断，为 Boost 变换器，蓄电池放电， K_1 关断， K_2 开通，为 Buck 变换器，蓄电池充电。所采用的控制策略为电压外环电流内环控制，电压外环控制直流母线电压稳定，电流内环控制蓄电池充放电电流，控制策略如图 11 所示。 U_{dc} 与直流母线电压参考值的差值经过 PI 调节后输出为蓄电池充放电

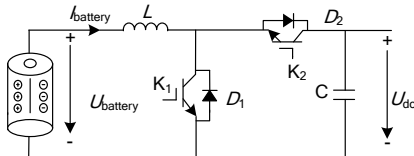


图 10 蓄电池充放电控制拓扑结构

Fig. 10 Topology of of battery charge and discharge control

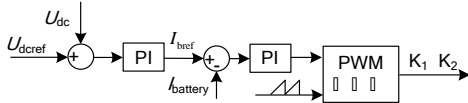


图 11 蓄电池充放电控制策略

Fig. 11 Control strategy of battery charge and discharge

电流参考，与充放电电流实测值的差值经过 PI 调节，输入到 PWM 发生器来驱动开关管 K_1 和 K_2 。

2.4 AC/DC 变换器控制策略

连接交、直流子系统，实现系统功率平衡的是交直流母线间 AC/DC 变换器，其拓扑结构同图 8 虚线框内所示。AC/DC 变换器在交直流混合微电网稳定运行中的作用主要有三方面：一是孤岛运行时，采用 V/f 控制，支撑交流母线电压、频率稳定，实现交、直流系统之间的功率平衡；二是并网运行时，采用 P/Q 控制，将直流侧盈余光伏发电功率额定通过交流侧并入大电网，提高直流侧光伏利用率；三是并网运行与孤岛运行切换时，使交、直流侧功率进行平衡，保证切换前后系统稳定运行。P/Q 控制采用功率外环电流内环控制方式，V/f 控制采用电压外环电流内环控制方式。两种控制可共用一个电流内环，切换运行时，只需切换外环控制，其控制策略如图 12 所示。模式 1 表示 V/f 控制，模式 2 表示 P/Q 控制，V/f 控制时， dq 变换的相位角由一个设定的标准 50 Hz 正弦电压提供，电压外环经 PI 调节后做为电流内环参考；P/Q 控制时， dq 变换的相位角为网侧相位角，功率外环经 PI 调节后做为电流内环参考。两种控制共用一个电流内环，控制模式之间的切换由并网点 PCC 发出信号。

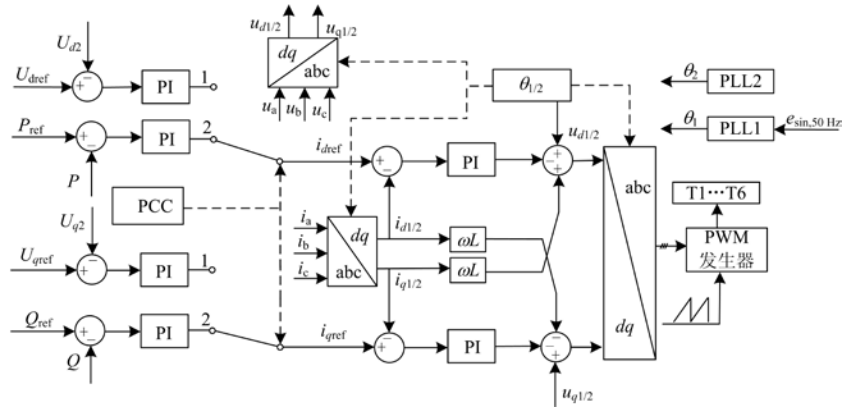


图 12 AC/DC 变换器控制策略

Fig. 12 Control strategy of AC/DC converter

3 算例仿真分析

3.1 仿真参数

在 PSCAD/EMTDC 中搭建如图 1 所示的交直流混合微电网，系统参数如表 1 所示。

表 1 微电网仿真参数

Table 1 Microgrid simulation parameters

仿真参数	数值
交流母线电压	380 V
直流母线电压	380 V
交流侧光伏最大电压	1 200 V
交流侧光伏最大电流	10.25 A
直流侧光伏最大电压	250 V
直流侧光伏最大电流	41.25 A
交流侧重要负荷	10 kW
交流侧次要负荷	2 kW
直流侧重要负荷	3 kW
直流侧次要负荷	2 kW
蓄电池容量	600 Ah
蓄电池额定电压	150 V
蓄电池初始 SOC	80%
并网运行直流侧输出有功	5 kW
并网运行直流侧输出无功	0 kvar

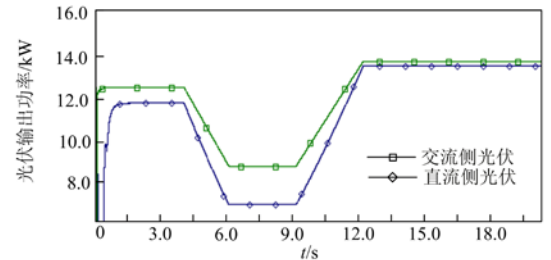
光伏发电假设温度一直为 20 °C，光照为 1 000 kW/m²，4 s 光照开始减弱，到 6 s 时降为 700 kW/m²，9 s 光照又开始增强，到 12 s 时变为 1 100 kW/m²。则交直流两侧光伏发电功率 P_{pvac} 、 P_{pvdc} 和交流侧输出电压跟踪如图 13 所示，光伏输出功率随着光照的变化而波动， U_{pv} 能够很好地跟踪 U_m 。

蓄电池容量设计对于系统稳定运行至关重要，本文采用工程上的经验公式确定蓄电池容量。

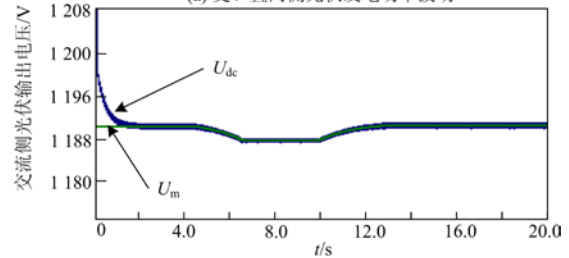
$$\text{蓄电池容量} = \frac{AQ_L N_L T_o}{C_c} (\text{Ah})$$

式中：A 为安全系数，取 1.1~1.4 之间； Q_L 为负载日

平均耗电量； N_L 为最长连续阴雨天数； T_o 为温度修正系数，一般 0 °C 以上取 1，-10 °C 以上取 1.1，-10 °C 以下取 1.2； C_c 为蓄电池放电深度，浅循环型蓄电池取 50%，深循环型蓄电池取 75%。



(a) 交、直两侧光伏发电功率波动



(b) 交流侧光伏最大电压和输出电压

图 13 交、直流侧光伏发电功率及电压曲线

Fig. 13 PV power and voltage curve of AC/DC side

本文中，交流侧重要负荷 10 kW，主要为空调用电，日平均供电 4 h，负载同时率 0.8；次要负荷 2 kW，为白天照明用电，日平均供电 8 h，负载同时率 0.8。直流侧主要负荷 3 kW，其中 2 kW 为机房通信用电，日平均供电 24 h，负载同时率 1；1 kW 为直流展厅白天照明用电，日平均供电 4 h，负载同时率 0.8；次要负荷 2 kW，供直流展厅电子产品充电，日平均供电 4 h，负载同时率 0.8。由此计算得负载日平均耗电量 $Q_L = 102.4$ kWh。

$$\text{蓄电池容量} = \frac{1.1 \times 102.4 \times 4 \times 1}{0.75} = 600.747 (\text{Ah})$$

其中：安全系数取1.1；根据本地气象信息，最长连阴雨天数取4天；温度修正系数取1；根据蓄电池类型，放电深度取75%。

蓄电池的额定电压150 V，蓄电池SOC在35%~95%范围内，其端电压范围为155~255 V，直流母线电压为380 V，考虑到不同工况切换时的电压波动并留一定裕度，取储能逆变器的最高工作电压1 000 V。

交直流混合微电网系统直流侧最大负荷5 kW，直流侧光伏最大输出功率10 kW，交流侧最大负载12 kW，交流侧光伏最大输出功率12 kW。储能逆变器的功率选择要考虑如下要素：一能完全吸收新能源功率，此时储能逆变器的最大输入功率为22 kW；二能在孤岛运行且阴雨时满足全部负荷，此时储能逆变器的最大输出功率为17 kW；考虑一定的裕度，取储能逆变器最大输入/输出功率均为50 kW。

3.2 运行仿真分析

将交直流两侧光伏发电功率、负荷功率，直流侧输入到交流侧的平衡功率分别表示为： P_{pvdc} ， P_{pvdc} ， P_{Ldc} ， P_{exch} 。

3.2.1 并网运行($t=0\sim 8\text{ s}$, $18.5\sim 20\text{ s}$)

a) $t=0\sim 2\text{ s}$: P_{Ldc} 为 5 kW, $P_{Ldc} < P_{pvdc} - P_{exch}$, 蓄电池充电;

b) $t=2\sim 4\text{ s}$: 2 s 时 P_{Ldc} 突增到 6 kW, $P_{Ldc} < P_{pvdc} - P_{exch}$, 蓄电池充电, 4 s 时 P_{pvdc} 因光照减弱开始减小;

c) $t=4\sim 4.8\text{ s}$: 4 s 时 P_{Ldc} 恢复到 5 kW, $P_{Ldc} < P_{pvdc} - P_{exch}$, 蓄电池充电;

d) $t=4.8\sim 8\text{ s}$: P_{Ldc} 保持为 5 kW, 4.8 s 时因 P_{pvdc} 降低, $P_{Ldc} > P_{pvdc} - P_{exch}$, 蓄电池放电。

e) $t=18.5\sim 20\text{ s}$: $P_{Ldc} > P_{pvdc} - P_{exch}$, 蓄电池充电。

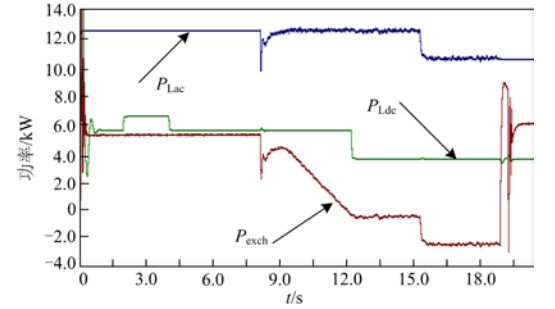
3.2.2 孤岛运行($t=8\sim 18.5\text{ s}$)

a) $t=8\sim 9.6\text{ s}$: $P_{Ldc} + P_{Lac} > P_{pvdc} + P_{pvac}$, 蓄电池放电, 9 s 时 P_{pvdc} 、 P_{pvac} 因光照增强开始变大, 随着 P_{pvac} 的增大, 直流侧输入到的交流侧的平衡功率 P_{exch} 开始减小;

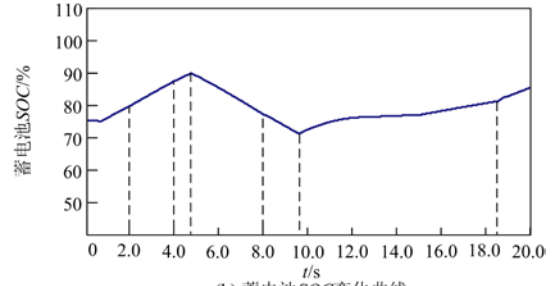
b) $t=9.6\sim 18.5\text{ s}$: $P_{Ldc} + P_{Lac} < P_{pvdc} + P_{pvac}$, 蓄电池充电, 11.5 s 时 $P_{pvac} = P_{Lac}$, 交流侧光伏功率开始盈余, 交流侧向直流侧输入光伏功率, $P_{exch} < 0$, 为了延长孤岛模式下蓄电池的使用时间, 12 s 时直流侧次要负荷切除, 15 s 时交流侧次要负荷切除。

仿真结果如图 14(a)~图 14(e)所示, 由图 14 可知, 并网运行时, 交流母线电压、频率由大电网支撑, 直流侧光伏功率波动及负荷突变能够被蓄电池平抑, 维持直流母线电压稳定, 且定额向交流侧输入光伏功率。孤岛运行时, 蓄电池平抑了光伏、负荷功率波动, 维持了直流系统电压稳定, 双向 AC/

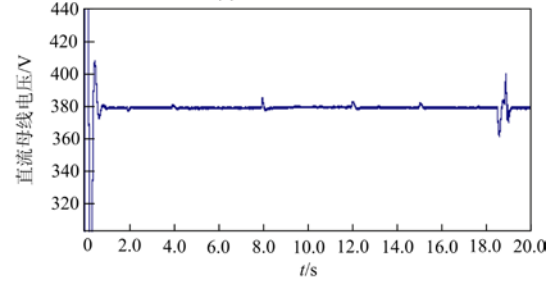
DC 变换器维持了交流系统电压、频率稳定, 并作为桥梁实现了两侧的功率平衡。



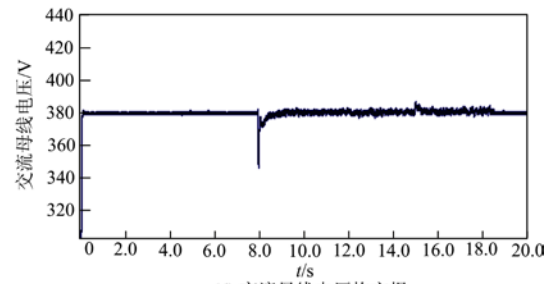
(a) 交直流侧负荷及平衡功率



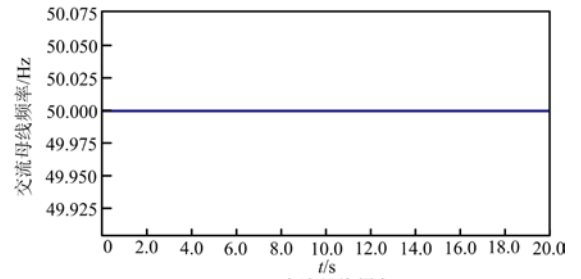
(b) 蓄电池SOC变化曲线



(c) 直流母线电压



(d) 交流母线电压均方根



(e) 交流母线频率

图 14 交直流混合微电网运行仿真结果

Fig. 14 Operation simulation results of hybrid AC/DC microgrid

3.2.3 切换运行

8 s 时, 大电网故障, PPC 发出信号, 交直流混合微电网由并网运行向非计划孤岛切换。切换前后, 因蓄电池和双向 AC/DC 变换器在实时维持系统稳定、功率平衡, 因此在切换瞬间, 蓄电池能够快速将切换功率缺额平抑, 保证切换前后系统稳定运行。

由图 14(a)可知, 切换前, 微电网与大电网之间有功率交换 $P_{pcc}=P_{pvac}+P_{exch}-P_{Lac}$ 。此系统切换前 $P_{pcc}=1$ kW, 即微电网向大电网输送功率 1 kW, 切换时蓄电池减小放电电流以平抑此输送功率, 记为工况 1, 如图 15(a)所示。将交流侧次要功率从 2 kW 增加为 3 kW, 可以使得切换前 $P_{pcc}=0$ kW, 即微电网与大电网无功率交换, 记为工况 2, 如图 15(b)所示, 切换时蓄电池放电电流不变。将交流侧次要功率从 2 kW 增加为 4 kW, 可以使得切换前 $P_{pcc}=-1$ kW, 即微电网从大电网吸收功率 1 kW, 记为工况 3, 如图 15(c)所示, 切换时蓄电池增大放电电流以平抑此吸收功率。切换瞬间因蓄电池平抑切换功率缺额, 直流母线电压会有短暂的波动, 如图 14(c)所示, 切换瞬间三相交流电压暂态波形如图 16 所示。综上, 不论切换前后微电网与大电网是否有功率交换, 交直流混合微电网均可实现从并网运行顺利切换到非计划孤岛运行。

18.5 s 时, 大电网供电恢复, PCC 发出信号, 交直流混合微电网由孤岛运行向并网运行切换, 切换前交流母线电压幅值、频率、相角与大电网保持一致, 顺利切换, 如图 14(d)、图 14(e)所示。由图 17 可知此时 P_{exch} 由 -3 kW 变 5 kW, 蓄电池将增加

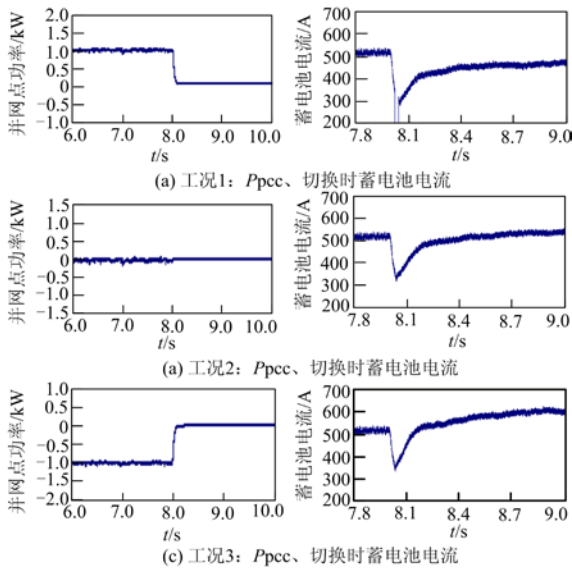


图 15 不同工况下 P_{pcc} 、切换时蓄电池电流波形

Fig. 15 P_{pcc} and battery current in switching moment of different conditions

充电电流以平抑, 因此直流母线电压会有一个波动, 但很快就稳定, 如图 14(c)所示, 切换瞬间三相交流电压暂态波形如图 18 所示。综上, 交直流混合微电网能够从孤岛运行顺利切换到并网运行。

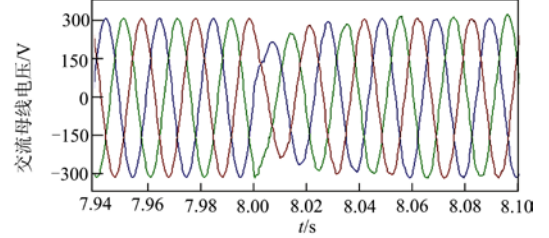


图 16 并网向非计划孤岛切换交流电压

Fig. 16 AC voltage of grid-connected operation switching to non-program islanded operation

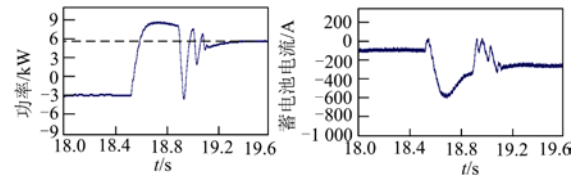


图 17 孤岛向并网切换 P_{exch} 、蓄电池电流

Fig. 17 P_{exch} and battery current of islanded operation switching to grid-connected operation

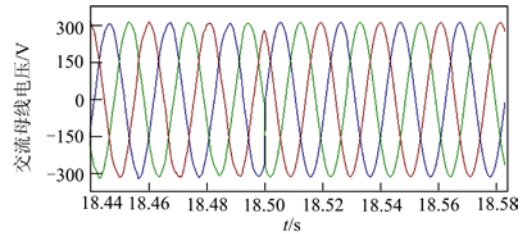


图 18 孤岛向并网切换交流电压

Fig. 18 AC voltage of islanded operation switching to grid-connected operation

4 结论

(1) 建立了光伏发电、蓄电池储能模型并进行了光伏电池 MPPT 控制、蓄电池充放电仿真, 验证了所建模型的正确性。

(2) 交直流混合微电网并网运行时, 针对目前直流侧源荷比较大, 在蓄电池的平抑作用下, 直流侧光伏发电以恒定的功率通过交流侧并入大电网, 提高直流侧光伏利用率。

(3) 交直流混合微电网孤岛运行时, 蓄电池作为平衡节点, 和双向 AC/DC 变换器一起维持系统的稳定运行, 并实现交直流两侧的功率平衡。

(4) 交直流混合微电网由并网运行向非计划孤岛运行切换、孤岛运行向并网运行切换时, 蓄电池

都能够平抑切换功率缺额, 实现顺利切换。

参考文献

- [1] LIU Xiong, WANG Peng, LOH P C. A hybrid AC/DC microgrid and its coordination control[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2011, 2(2): 278-286.
- [2] 黄文涛, 邹能灵, 范春菊, 等. 微电网结构特性分析与设计[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(18): 149-155.
HUANG Wentao, TAI Nengling, FAN Chunju, et al. Study on structure characteristics and designing of microgrid[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(18): 149-155.
- [3] GUERRERO J M, LOH P C, LEE T L, et al. Advanced control architectures for intelligent microgrids — part II: power quality, energy storage, and AC/DC microgrids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, 60(4): 1263-1270.
- [4] 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 of the AC/DC bi-directional power converter in micro-grid[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 13-18.
- [5] 陆晓楠, 孙凯, GUERRERO 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, GUERRERO J, et al. DC hierarchical control system for microgrid applications[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(4): 35-42.
- [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): 98-113.
WU Weimin, HE Yuanbin, GENG Pan, et al. Key technologies for micro-grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(1): 98-113.
- [7] 张犁, 孙凯, 吴田进, 等. 基于光伏发电的直流微电网能量变换与管理[J]. 电工技术学报, 2013, 28(2): 248-254.
ZHANG Li, SUN Kai, WU Tianjin, et al. Energy conversion and management for DC microgrid based on photovoltaic generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 248-254.
- [8] 陆晓楠. 交直流混合微电网中电力电子接口变换器控制策略研究[D]. 北京: 清华大学, 2013.
LU Xiaonan. Research on the control strategy of the power electronics interfacing converters in AC and DC hybrid microgrids[D]. Beijing: Tsinghua University, 2013.
- [9] 董博. 交直流混合母线微电网运行控制与储能系统能量管理研究[D]. 北京: 清华大学, 2012.
DONG Bo. Research on control strategy of hybrid AC-and DC-bus microgrid and energy management of storage system[D]. Beijing: Tsinghua University, 2012.
- [10] 周念成, 闫立伟, 王强钢. 光伏发电在微电网中接入及动态特性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(14): 119-127.
ZHOU Niancheng, YAN Liwei, WANG Qianggang. Research on dynamic characteristic and integration of photovoltaic generation in microgrids[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(14): 119-127.
- [11] 茆美琴, 余世杰, 苏建徽. 带有 MPPT 功能的光伏阵列 Matlab 通用仿真模型[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(5): 1248-1251.
MAO Meiqin, YU Shijie, SU Jianhui. Versatile Matlab simulation model for photovoltaic array with MPPT function[J]. Journal of System Simulation, 2005, 17(5): 1248-1251.
- [12] 金晓东, 丁明, 茆美琴. 分布式发电系统中的蓄电池模型[J]. 仪器仪表用户, 2008, 15(2): 88-90.
JIN Xiaodong, DING Ming, MAO Meiqin. Battery model of distributed power generation system[J]. Electronic Instrumentation Customer, 2008, 15(2): 88-90.
- [13] HE Hongwen, XIONG Rui, ZHANG Xiaowei, et al. State-of-charge estimation of the lithium-ion battery using an adaptive extended Kalman filter based on an improved thevenin model[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2011, 60(4): 1461-1469.
- [14] WANG Shuzhao, WU Hongbin. Research on control strategy of the stand-alone PV/battery system[J]. Advanced Materials Research, 2014, 860: 168-171.

收稿日期: 2014-08-01; 修回日期: 2014-09-27

作者简介:

丁明(1956-), 男, 硕士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统规划及可靠性、新能源及其利用、柔性输电系统的仿真与控制等;

田龙刚(1988-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为分布式发电与微电网技术; E-mail: tlg123634@163.com

潘浩(1992-), 男, 博士研究生, 主要研究方向为电力系统规划及可靠性。

(编辑 周金梅)