

DOI: 10.7667/PSPC161725

## 交直流混合微电网微元建模与控制

任志航<sup>1</sup>, 李民<sup>1</sup>, 马凯琪<sup>1</sup>, 王强<sup>2</sup>, 唐保国<sup>2</sup>, 岳帅<sup>1</sup>

(1. 许继集团有限公司, 河南 许昌 461000; 2. 国网山西省电力公司, 山西 太原 030001)

**摘要:** 随着直流负荷的增多, 传统的交流微电网已经不能满足系统负载多样性及经济性等方面的需求, 交直流混合微电网逐步成为研究热点和难点。仿真研究中, 分布式发电(Distributed Generation, DG)的随机性、时变性和非线性化特性, 使得混合微电网中 DG 的建模和算法实现比较困难, DG 与储能之间的协调控制亦是一个难题。为此, 基于实际工程需求搭建了一种包含直流大电网的交直流混合微电网的系统结构, 提出了相应元件的物理模型与控制策略, 并在仿真平台下着重模拟了各微元在不同工况下的协同运行。仿真结果表明, 所提出的交直流混合微电网结构合理, 各元件的控制策略和性能良好, 且整个系统具有较快的响应速度, 很好地满足了系统安全稳定性要求。

**关键词:** 交直流混合微电网; 微元建模; 运行模式; 控制策略

### Modeling & control of hybrid AC/DC micro-grid micro components

REN Zhihang<sup>1</sup>, LI Min<sup>1</sup>, MA Kaiqi<sup>1</sup>, WANG Qiang<sup>2</sup>, TANG Baoguo<sup>2</sup>, YUE Shuai<sup>1</sup>

(1. XJ Group Corporation, Xuchang 461000, China; 2. State Grid Shanxi Electric Power Company, Taiyuan 030001, China)

**Abstract:** With the increasing of DC loads, the traditional AC micro-grids can not meet the demands of system load diversity and economy. Hybrid AC/DC micro-grid gradually becomes a research hotspot. In the simulation study, the random, time-varying and nonlinear characteristics of the Distributed Generation (DG) make the DG modeling, algorithm realization and the coordination and cooperation between DG and energy storage relatively complex in hybrid micro-grid. Based on engineering application requirements, a hybrid AC/DC micro-grid system containing the DC distribution grid is built. Furthermore, the physical models and control strategies of the corresponding micro components are proposed. Finally, this paper mainly focuses on the simulation of micro components under different working conditions. The simulation results show that the proposed hybrid AC/DC micro-grid structure is reasonable, and the control strategies and performance of the components are good. The whole system has fast response speed, and can well satisfy the requirements of system security and stability.

**Key words:** hybrid AC/DC micro-grid; micro components modeling; operation mode; control strategy

## 0 引言

与传统能源相比, 以太阳能、风能和生物能等为代表的新能源具有清洁无污染、能源利用率高、经济性能好和可持续发展的优势, 代表着未来电力行业的一个重要方向<sup>[1]</sup>。以新能源为基础的分布式发电形式多样灵活, 在一定程度上缓解了电力系统中的负荷压力, 并且可以作为大电网的备用电源, 增强了电力供电的可靠性和安全性<sup>[2-4]</sup>。

但是, 分布式发电的随机性、波动性和差异性会对大电网产生不利的影 响, 并且当大电网出现故障停止运行时, 微电网必须脱网运行, 否则会产生孤岛效应, 影响用电安全和电能质量<sup>[5]</sup>。微电网尤其是交直流混合微电网技术很好地解决了这些问题, 为分布式发电的发展提供了一个有效途径<sup>[6-8]</sup>。交直流混合微电网是 DG、储能和交直流负荷的有机整体, 具有一定的自治能力, 配合先进的能量管理与保护控制手段, 在脱离大电网的条件下能够稳定交流微电网与直流微电网内母线电压、频率(直流微电网无频率), 从而实现交直流侧的能量平衡, 保证微电网内负荷的供电可靠性。另外, 交直流混合

基金项目: 国家电网科技项目“适应不同应用场景的分布式电源接入装备关键技术研究”(SGXJ0000KJJS1601515)

主动配电网架的新趋势也助力混合微电网的迅速发展。目前, 交直流混合微电网尚处于探索阶段, 有许多问题需要解决, 例如, 能量管理系统、协调控制、拓扑优化与控制<sup>[9-12]</sup>等。同时, 目前研究的混合微电网多数是把直流微电网当作可控电源或负载处理, 这与未来交直混联的网架趋势不相符<sup>[13-15]</sup>。

基于此, 本文根据新型的互为支撑型交直流混合微电网中的微元特性建立了光伏(PV)、储能和混合微电网潮流控制器的仿真模型, 并搭建了互为支撑的交直流混合微电网算例, 不同工况下的仿真结果亦证明了本文所建微元级和系统级仿真模型的正确有效和互为支撑的混合微电网系统良好的动/静态稳定性。

## 1 微元建模分析

### 1.1 光伏系统

本文中交流光伏依据光伏电池的等效参数模型而建, 它由受控电流源、反并联二极管和串并联电阻组成, 如图 1 所示。

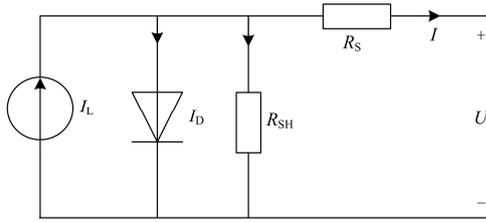


图 1 交流光伏等效参数模型

Fig. 1 Equivalent parameter model of AC PV

图中, 受控电流源  $I_L$  为光生电流, 代表受有效入射辐照度控制产生的光电流大小; 反并联二极管  $I_D$  代表光电池 PN 结反压时使光生载流子减小的复合效应; 并联电阻  $R_{SH}$  代表制造工艺和材料缺陷产生的半导体表面电流效应; 串联电阻  $R_S$  代表金属连接线与半导体之间的接触电阻。该模型是由光伏效应、PN 结承受反压特性和因制造工艺缺陷而引入的误差得到, 有明确的物理意义。据此可推理出光伏电池数学模型为

$$I = I_L - I_D \{ \exp[q(U + IR_S) / AkT] - 1 \} - (U + IR_S) / R_{SH} \quad (1)$$

式中:  $U$  为电池端电压;  $q$  是一个标准电子电荷 ( $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ );  $k$  为是波尔兹曼常数;  $T$  是工作温度(单位为 K);  $A$  是二极管 PN 结的理想因子。

实际研究发现, 当光伏电池工作温度不变时, MPP 点跟随光照强度变化的同时, 端电压基本维持在一个恒定的范围。本文交流光伏 MPPT 算法采用了修正系数法。具体实现过程描述为: 将标准测试

环境下(标准温度  $T_{stc}$  为  $25^\circ\text{C}$ 、标准光照强度  $E_{stc}$  为  $1200 \text{ W/m}^2$ )的 MPP 点电压  $U_{mpp0}$  和电流  $I_{mpp0}$  分别乘以对应的电压和电流温度修正系数  $tempCorrU$ 、 $tempCorrI$ , 即可得到某光照条件下的 MPP 点的电压  $U_{mpp}$  和电流  $I_{mpp}$ 。

$$tempCorrU = 1 + au \times (\theta - T_{stc}) \quad (2)$$

$$tempCorrI = 1 + ai \times (\theta - T_{stc}) \quad (3)$$

$$\ln(Equot) = \ln(E) / \ln(E_{stc}) \quad (4)$$

式中:  $au$  和  $ai$  是光伏电池本身特性决定的, 本模型所采用的数值分别为  $-0.0039$  和  $0.0004$ ;  $E$  是实际光照强度;  $\theta$  是实际温度。则不同光照强度条件下 MPP 点电压  $U_{mpp}$ 、电流  $I_{mpp}$  由下式确定。

$$U_{mpp} = U_{mpp0} \times \ln(Equot) \times tempCorrU \quad (5)$$

$$I_{mpp} = I_{mpp0} \times (E / 1200) \times tempCorrI \quad (6)$$

由式(5)、式(6)得最大功率

$$P_{mpp} = U_{mpp} \times I_{mpp} \quad (7)$$

图 2 是交流光伏的控制模型, 主要由光照模型(Solar Radiation Model)、温度模型(Temperature Model)、光伏电池模型(Photovoltaic Model)、直流侧母线及电容模型(DC Busbar and Capacitor Model)以及控制模型(Control Model)组成。其中, Photovoltaic Model 实现式(1)所示的光伏电池的輸出特性。

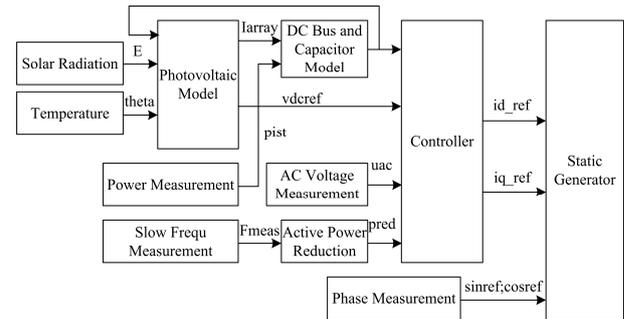


图 2 交流光伏控制模型

Fig. 2 Control frame model of AC PV

经实际调查发现, 光伏电池输出特性受光照和温度的影响, 在一定时间段内, 光伏组件的工作温度变化不是很明显, 对输出功率影响较小。基于此, 直流光伏应用了基于温度系数的建模方法。该方法具体描述为: MPP 点最大功率与一定范围内与光照强度  $E$  成正比, 具体关系如式(8)所示。

$$P_{mpp} = E / E_{stc} \times P_{stc} \times [1 + \gamma T - T_{stc}] \quad (8)$$

式中:  $P_{stc}$  是在标准测试环境( $T_{stc}$ 、 $E_{stc}$ )下的测试结果;  $\gamma$  为最大功率点的温度系数。

当光照强度  $E < 120 \text{ M/m}^2$  时, 按照式(8)计算时

结果会偏大, 此时对式(8)作出修正, 如式(9)所示。

$$P_{mpp} = 0.008 \times E/E_{stc} \times P_{stc} \times [1 + \gamma T - T_{stc}] \quad (9)$$

图 3 是直流光伏模块的控制模型。

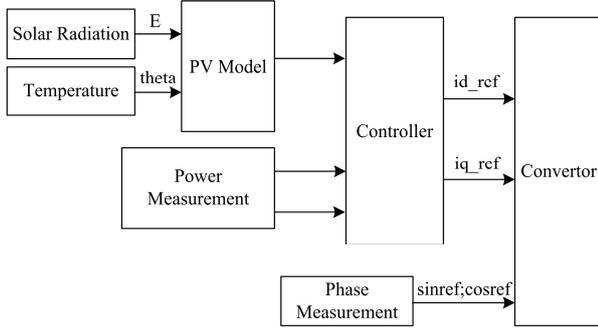


图 3 直流光伏控制模型

Fig. 3 Control frame model of DC PV

### 1.2 储能系统

储能建模包括直流储能和交流储能, 两者均采用电压源+滤波器+PWM 调制的结构, 模型整体包含储能电池模型和 PCS 变流器控制模型两部分。下面分别介绍变流器 PCS 和储能电池的建模过程。

#### 1) 储能变流器 PCS

根据交流储能运行于不同工况下的工作模式, 其变流器 PCS 控制(PWM)分为两个部分, 即稳态控制模块(P/Q 控制)和动态控制模块(V/f 控制)。其中, 稳态 P/Q 控制模块包含两个功能: P/Q 调度功能和 P/Q 自适应补偿功能。储能工作在 P/Q 调度模式情况下, 可以根据微电网上层能量管理系统的调度指令, 计划性地调整自身出力, 起到削峰填谷的作用, 从而提高了 DG 的利用率, 对电网的安全运行和经济效益发挥了积极作用; 储能工作在 P/Q 自适应补偿模式时, 常用于平滑分布式电源波动性出力, 以减小波动对外电网的冲击和提高微电网内的电能质量。

运行于 V/f 模式的储能在混合微电网系统交流侧与大电网断开时, 可以作为交流侧主电源运行, 提供稳定的电压和频率支撑, 维持系统正常运行。

建模过程中使用了软件内置电流控制器, 因而在控制模型中仅对恒功率外环控制和压频外环控制以及模式切换进行建模, 控制输出作为内环电流给定值。交流储能的控制模型见图 4。

直流储能控制模式与交流储能类似, 不同的是: 动态控制部分改为恒直流母线电压控制(V 控制), 在直流侧脱离大电网情况下可以稳定直流侧母线电压, 保证直流侧稳定运行。直流储能 PCS 的控制模型见图 5。

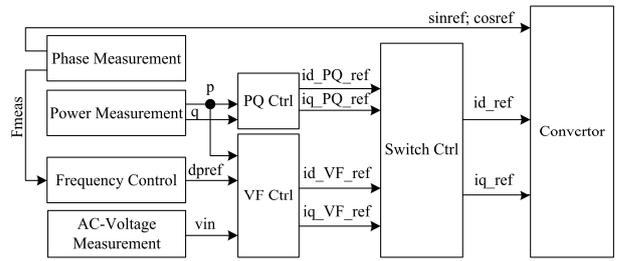


图 4 交流储能控制模型

Fig. 4 Control frame model of AC energy storage

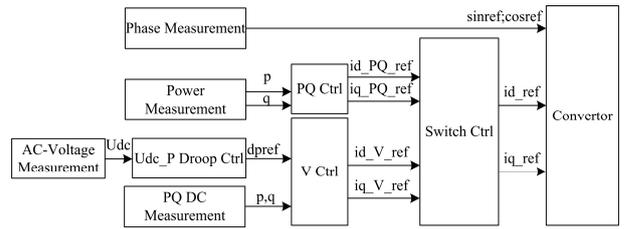


图 5 直流储能控制模型

Fig. 5 Control frame model of DC energy storage

#### 2) 储能电池

图 6 为本文所用储能电池等效电路模型, 该模型电路结构简单, 考虑了电池内部的非线性特征, 并且适用于铅酸电池、镉镍电池和锂电池等, 在短期仿真中具有较高的拟合度, 通用性较强。

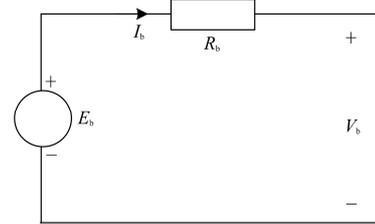


图 6 蓄电池等效模型

Fig. 6 Equivalent model of battery

该电池模型由一个受控电压源和一常值内阻组成, 该模型有以下几点假设前提:

- 1) 电池内阻在充放电过程中保持恒定;
  - 2) 模型参数都是通过放电特性曲线得到, 假定其完全适用于充电特性;
  - 3) 温度对电池模型无影响;
  - 4) 电池容量不随电流变化而变化;
  - 5) 不考虑蓄电池的自放电特性和记忆特性。
- 受控电压为

$$E_b = E_0 - K \left( Q / \left( Q - \int_0^t idt \right) \right) + A \exp(-B \int_0^t idt) \quad (10)$$

式中:  $A$  是指数区域幅值;  $B$  是指数区域时间常数的倒数;  $K$  是极化电压;  $Q$  是蓄电池的容量, 单位安时(Ah);  $E_b$  是蓄电池的空载电压;  $E_0$  是蓄电池的

恒定电压。

### 1.3 混合微电网潮流控制器

混合微电网潮流控制器(HMFC)是交流母线和直流母线的连接接口, 可以通过不同模式控制交直流微电网间的功率流动大小和方向。此外, 在交直流一侧或两侧失去大电网支撑或负荷突变的情况下, 可以维持失稳侧微电网的稳定运行。本次仿真中 HMFC 采用电压型双闭环电流控制算法。其中, 外环控制主要用于实现不同的控制目的以及模式切换, 同时产生内环控制器的参考信号, 动态响应过程相对比较慢; 内环控制实现精细的调节, 使 HMFC 的两侧功率能够精确地按照外环参考传输, 用于提高逆变器输出的电能质量, 动态响应较快。

根据交直流混合微电网的功能要求, 本次建模中外环控制实现三种控制功能: 恒功率 P/Q 控制; 恒压恒频 V/f 控制; 恒直流母线电压 V 控制。

整体思路为: 当混合微电网交流母线“占优”(PCC-AC 闭合, PCC-DC 断开)时, HMFC 工作在 V 模式, 用于稳定直流母线电压, 此时通过对直流母线电压的闭环 PI 控制得到功率环节的有功参考值, 再经过有功和无功闭环 PI 控制得到内环解耦电流参考值  $i_{d\_ref}$ 、 $i_{q\_ref}$ ; 当混合微电网直流母线“占优”时(PCC-DC 闭合, PCC-AC 断开), HMFC 工作在 V/f 模式, 用来稳定交流母线电压和频率, 此时通过对交流母线频率的闭环 PI 控制得到功率环节的有功参考值, 再经过有功闭环 PI 控制得到内环解耦直流轴电流参考值  $i_{d\_ref}$ , 而交轴电流参考  $i_{q\_ref}$  直接由交流母线电压闭环 PI 控制得到; 混合微电网“自占优”(PCC-DC 和 PCC-AC 同时闭合)或双侧均断开, HMFC 工作在 P/Q 模式, 用于完成交直流两侧的功率交换, 此时直接通过有功和无功闭环 PI 控制得到内环解耦电流参考值  $i_{d\_ref}$ 、 $i_{q\_ref}$ 。

由此可见, 本模型中 HMFC 可以根据系统不同的工况条件进行不同模式的切换, 从而实现不同的控制功能, 使整个系统持续稳定运行。图 7 为 HMFC 的控制模型。

## 2 系统仿真验证

基于上述各微电网微元模型, 本文所提交直流混合微电网的网络拓扑如图 8 所示。

图中, 交流母线电压为 0.4 kV, 直流母线为 0.75 kV, 交/直流储能额定容量为 0.5 MVA, 交/直流光伏最大输出功率为 0.5 MW, 交流负荷最大功率为 0.7 MVA(按照交流储能最大提供 0.5 Mvar 无功功率, 交流光伏最大提供 0.5 MW 有功功率计算), 直流负荷最大功率为 1 MW, 潮流控制器额定容量

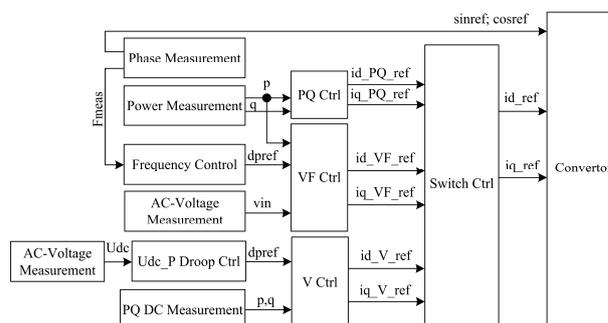


图 7 HMFC 的控制模型

Fig. 7 Control frame model of HMFC

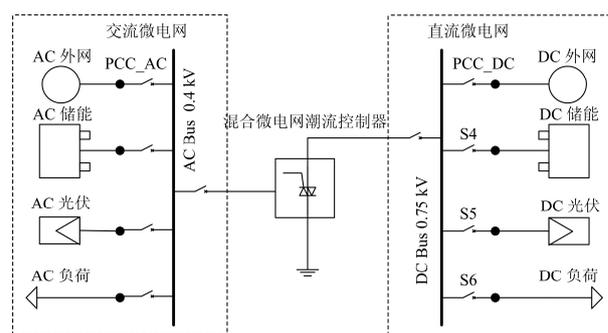


图 8 交直流混合微电网网络拓扑

Fig. 8 Topology of hybrid AC/DC micro-grid

为 1 MVA。图 8 所示微电网与传统交直流混合微电网相比, 主要区别是交/直流双侧微电网均有外电网支撑, 同时通过 HMFC 连接双侧微电网, 可以使交流微电网和直流微电网互为支撑, 增强了混合微电网的安全性和稳定性。另外, 本文所提交直流混合微电网既可以交流微电网或直流微电网单独运行, 又可以交/直流微电网联动运行。

### 2.1 交流微电网单独运行

为充分验证交流光伏和交流储能的性能以及在多种微电网系统运行模式下两者互相配合的性能, 设置如下仿真条件。

交直流混合微电网中 HMFC 以及直流微电网退出运行, 交流微电网系统单独运行, 光伏系统以额定功率运行, 交流负荷为 0.7 MW 阻性负荷。仿真步骤描述如下:

- 1) 图 8 所示交流微电网系统并网启动, 储能以最大功率进行充电;
- 2) 3 s 时刻断开 PCC-AC, 系统离网运行;
- 3) 6 s 时刻设置负荷事件, 交流负荷由 0.7 MW 下降到 0.5 MW;
- 4) 9 s 时刻再次设置负荷事件, 交流负荷由 0.5 MW 下降到 0.3 MW, 仿真持续 16 s。

图 9 给出了仿真过程中储能系统与光伏系统的

出力波形；图 10 和图 11 是仿真过程中交流母线电压与频率的实时波形。

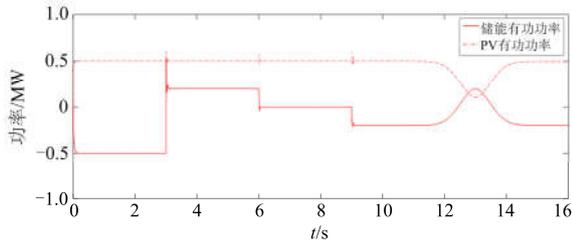


图 9 交流微电网中光、储系统综合出力曲线

Fig. 9 Power curves of PV and energy storage in AC micro-grid

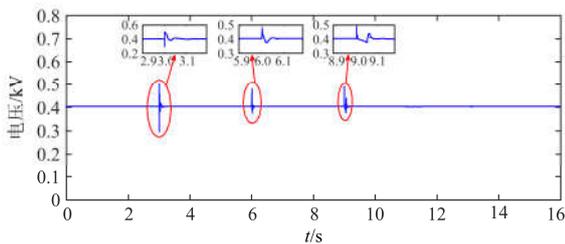


图 10 交流微电网中母线电压波形

Fig. 10 Bus voltage curve of AC micro-grid

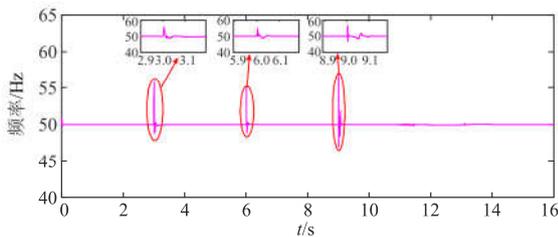


图 11 交流微电网中微电网系统母线频率

Fig. 11 Bus frequency curve of AC micro-grid

从图 9—图 11 可以看出，在 3 s 时刻微电网系统离网后，储能系统运行于 V/f 控制模式，维持交流微电网电压频率的稳定；之后发生在仿真 6 s 和 9 s 的负荷投切以及 12~14 s 的光伏功率波动均旨在验证微电网的离网能量平衡性能，结果表明，储能系统可以迅速地自动补偿系统内的功率缺额，维持离网系统内的能量平衡。另外，从图 10 和图 11 的局部放大图中可以清楚看出，在 3 s、6 s、9 s 三个时间点系统电压与频率均有较为明显的波动，但储能系统均可在很短的时间(100 ms)内完成稳定控制，结果亦证明所建模型的优良性能。

### 2.2 直流微电网单独运行

与交流微电网类似，直流微电网独立运行功能验证中，主要分析直流微电网并网切换运行控制问题。

交直流混合微电网中 HMFC 以及交流微电网

退出运行，直流微电网系统单独运行，光伏系统以额定功率运行，直流负荷为 0.5 MW 阻性负荷。仿真步骤描述如下：

- 1) 仿真并网启动，直流储能满功率充电运行；
- 2) 3 s 下达调度命令，直流储能满功率放电；
- 3) 6 s 时刻断开 PCC-DC，系统进入离网运行态，仿真共进行 15 s。

图 12 给出了仿真过程中直流储能及光伏系统的出力波形；仿真过程中直流母线电压的实时波形由图 13 给出。从图中可以看出：在 3 s 时刻改变调度指令后直流储能系统同样可以很快跟踪新的调度指令值(50 ms 内)；在 6 s 时刻微电网系统离网后，直流储能系统运行于 V 控制模式，期间储能自动补充系统内的功率缺额，稳定了直流微电网系统内的电压。由图 13 可以看出，离网之后直流母线电压略有上升，这是由于直流储能 V 控制采用的  $U_{dc}$ -P 下垂算法特性所致；另外，从图 13 的局部放大图中可以清楚看出，在 6 s 时刻的直流微电网系统并网网切换过程中，直流储能快速完成系统的稳定控制(20ms 内)，印证了储能模型的良好性能。

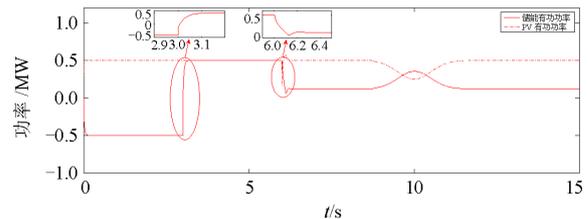


图 12 直流微电网中光、储系统综合出力曲线

Fig. 12 Power curves of PV and energy storage in DC micro-grid

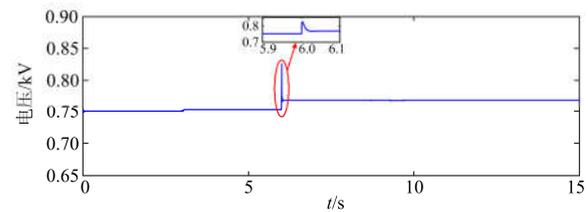


图 13 直流微电网中母线电压波形

Fig. 13 Bus voltage curve of DC micro-grid

### 2.3 交流微电网与直流微电网联动运行

HMFC 是本文中互为支撑型交直流混合微电网的关键设备，为充分验证 HMFC 在混合微电网不同运行工况下对两侧微电网的支撑作用以及交流微电网与直流微电网的协调运行，本部分设定 HMFC 多次运行模式的切换。根据自定义的仿真模型，功率设定值为正时，由直流微电网向交流微电网提供功率；功率设定值为负时，由交流微电网向直流微电网提供功率。具体仿真步骤描述如下：

1) 系统由 PCC-AC、PCC-DC 同时闭合的模式启动, HMFC 运行于 P/Q 功率调度模式, 初始时刻有功设定值为 $-0.1$  MW;

2) 3 s 下达 HMFC 调度指令  $0.4$  MW;

3) 6 s 断开 PCC-DC 开关;

4) 9 s 闭合 PCC-DC 开关;

5) 12 s 断开 PCC-AC, 仿真持续 15 s。

图 14 是上述仿真过程中, HMFC 的功率波形; 图 15 给出仿真过程中直流母线电压的波形; 图 16 和图 17 是仿真过程中交流母线电压与频率波形。

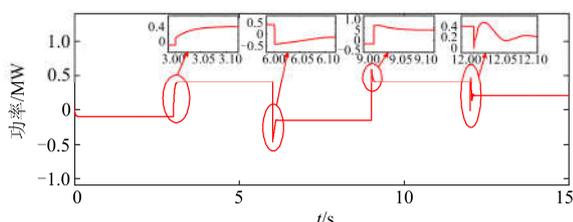


图 14 交直流混合微电网中 HMFC 功率交换波形

Fig. 14 Power curve of HMFC in hybrid AC/DC micro-grid

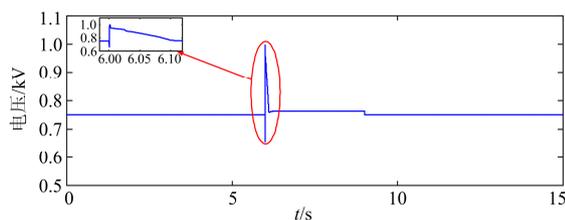


图 15 直流微电网中母线电压波形

Fig. 15 Bus voltage curve of DC micro-grid

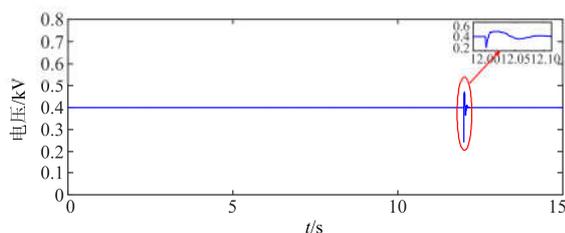


图 16 交流微电网中母线电压波形

Fig. 16 Bus voltage curve of AC micro-grid

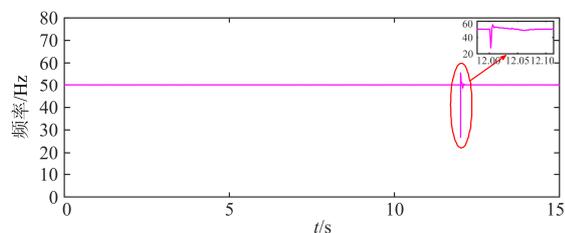


图 17 交流微电网中母线频率波形

Fig. 17 Bus frequency curve of AC micro-grid

由图 14—图 17, 在 0~6 s 内 HMFC 工作在 P/Q 模式, 这一阶段内 HMFC 可以准确按照调度命令改变潮流流向及大小; 在 6~9 s 以及 12~15 s 内, HMFC 分别工作在 V 模式和 V/f 模式, 期间 HMFC 自动补偿了两种单电源运行工况下“从属”母线所在微电网(公共连接点断开的一侧)内的功率缺额; 另外, 从局部图可以看出, 在 3 s、6 s、9 s 及 12 s 发生的混合微电网系统运行模式转换过程中, HMFC 均可在很短的时间(100 ms)内完成其工作模式的切换过程, 这也显示出 HMFC 的优良性能。

### 3 结论

本次仿真搭建的微元模型, 动态响应过程迅速, 实现功能多样, 很好地满足了系统运行灵活性和稳定性要求。并且, 在不同工况下, 微元之间互相配合和协调作用明显, 充分验证了控制策略的合理性和完整性。实验结果与分析表明, 本文提出的交直流混合微电网网络拓扑结构在系统暂稳特性和鲁棒性方面表现良好。特别是交直流两侧互相支撑的特性, 预计在建设坚强的交直流混合配电网中将有广阔的应用前景。

### 参考文献

- [1] 田世明, 栾文鹏, 张冬霞, 等. 能源互联网技术形态与关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(14): 3482-3494.  
TIAN Shiming, LUAN Wenpeng, ZHANG Dongxia, et al. Technical forms and key technologies on energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(14): 3482-3494.
- [2] 王成山, 李鹏. 分布式发电、微网与智能配电网的发展与挑战[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(2): 10-14, 23.  
WANG Chengshan, LI Peng. Development and challenges of distributed generation, the micro-grid and smart distribution system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(2): 10-14, 23.
- [3] 张丹, 王杰. 国内微电网项目建设及发展趋势研究[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 451-458.  
ZHANG Dan, WANG Jie. Research on construction and development trend of micro-grid in China[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 451-458.
- [4] 李献伟, 李保恩, 王鹏. 微电网技术现状及未来发展分析[J]. 通讯电源技术, 2015, 32(5): 202-207.  
LI Xianwei, LI Baoen, WANG Peng. The technical status and development tendency of micro-grid[J]. Telecom Power Technologies, 2015, 32(5): 202-207.

[5] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.  
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.

[6] 李瑞生. 微电网关键技术实践及实验[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(2): 73-78.  
LI Ruisheng. Practice and experiment of the key micro-grid technologies[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(2): 73-78.

[7] 陈丽娟, 王致杰. 基于改进下垂控制的微电网运行控制研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(4): 16-21.  
CHEN Lijuan, WANG Zhijie. Research of operation control of micro-grid based on improved droop control[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(4): 16-21.

[8] 冯庆东. 分布式发电及微网相关问题研究[J]. 电测与仪表, 2013, 50(2): 99-104.  
FENG Qingdong. A review of the state of the art of distributed generation and micro grid[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2013, 50(2): 99-104.

[9] 殷晓刚, 戴冬云, 韩云, 等. 交直流混合微电网关键技术研究[J]. 高压电器, 2012, 48(9): 87-92.  
YIN Xiaogang, DAI Dongyun, HAN Yun, et al. Discussion on key technologies of AC-DC hybrid micro-grid[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(9): 87-92.

[10] 丁明, 田龙刚, 张雪松, 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): 101-105.  
DING Ming, TIAN Longgang, ZHANG Xuesong, et al. Research on control strategy of hybrid AC & DC micro-grid[J]. Power System Protection and control, 2015, 43(9): 101-105.

[11] NUNNA K, DOOLLA S. Multi agent based distributed energy resource management for intelligent micro-grids[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 60(4): 1678-1687.

[12] GUO Wenming, MU Longhua. Control principles of micro-source inverters used in microgrid[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2016, 1: 7pp. DOI 10.1186/s41601-016-0019-8

[13] BRACALE A, CARAMIAA P, CARPINELLI G, et al. A hybrid AC/DC smart grid to improve power quality and reliability[C] // Energy Conference and Exhibition, 2012: 507-514.

[14] 马钊, 周孝信, 尚宇炜, 等. 未来配电系统形态及发展趋势[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1289-1298.  
MA Zhao, ZHOU Xiaoxin, SHANG Yuwei, et al. Form and development trend of future distribution system[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1289-1298.

[15] LASSETER R H. Microgrids and distributed generation[J]. Intelligent Automation & Soft Computing, 2010, 16(2): 225-234.

收稿日期: 2016-10-17; 修回日期: 2017-03-09

作者简介:

任志航(1973—), 男, 高级工程师, 从事保护自动化系统开发方面的工作; E-mail: 13703742226@139.com

李 民(1993—), 男, 本科, 从事分布式发电、微电网等方面的研究; E-mail: 1250687229@qq.com

马凯琪(1989—), 男, 硕士, 从事电力电子控制及微电网方面的研究。E-mail: 892002805@qq.com

(编辑 姜新丽)