

直流微网系统的多模态运行控制

孟 明, 贺海博

(华北电力大学电力工程系, 河北保定 071003)

Multi-mode Operation Control of DC Microgrid System

MENG Ming, HE Haibo

(School of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

摘 要: 详细分析了系统处于并网和孤岛模式的运行情况, 归纳设计了系统的 9 种工作模式, 并针对每一种工作模式提出基于本地信息的系统整体协调控制策略, 来协调光伏接口、储能接口及网侧接口的工作方式, 旨在保证直流母线电压维持恒定, 确保对电压变化敏感的重要负荷(如恒功率负载)的可靠供电和系统的能量平衡及稳定运行。根据电网状态、分布式电源输出功率与负载需求关系、蓄电池荷电状态等本地信息, 决定系统的工作模式及模式间切换, 所提控制策略有效维持了直流母线电压的恒定, 实现了直流微网系统的运营可靠性。最后利用 Matlab/Simulink 进行仿真研究, 结果验证了所提方案的有效性。

关键词: 直流微网; 光伏发电; 协调控制; 运行模式; 电压控制

Abstract: 9 kinds of operation modes are designed after detailed analyzing the grid-connected and islanded operation condition. For each operation mode, a coordinated control scheme for whole system based on local information is proposed to coordinate working modes between PV interface, battery energy storage interface and the net side interface, which can guarantee the DC bus voltage maintain constant, thus to ensure reliable power supply for critical loads that are sensitive to voltage changes (such as constant power load (CPL)) and the operation stability and power balance of system. Such local information as the state of power grid, the relationship between DG power output and loads demand and the SOC of battery decides the operation modes and conversion between different modes of the system. The proposed control scheme can maintain the DC bus voltage constant effectively, which realizes reliable operation of the DC microgrid system. In the end, simulations are carried out in Matlab/Simulink simulation environment, and the results verify the effectiveness of proposed scheme.

Keywords: DC microgrid; photovoltaic generation; coordinated control; operation modes; voltage control

0 引 言

微网是一种将分布式发电(distributed generation, DG)单元、负荷和储能装置整合在一起的电网形式^[1], 能够实现可再生能源的高效利用, 同时可以解决 DG 单元单机并入主网所造成的不良影响。目前微网结构主要包括交流微网, 直流微网和混合微网。以往的研究主要以交流微网为主, 直流微网的研究与应用相对较少, 直流微网与交流微网相比, 具有高效率、低成本优势, 不需要对频率、相位和无功功率等进行控制^[2-4], 可方便接入直流性质的微电源(如光伏、燃料电池等)和直流负荷。

直流微网中不同单元之间的协调控制和系统的运行模式是直流微网的研究热点^[5], 相关学者对此进行了研究。文献 [6-7] 提出以直流母线电压为控制信号的直流微网能量管理策略, 分析了系统孤岛状态下多种运行模式及各单元协调参与母线电压调节的作用。文献 [8] 整合光伏发电和储能控制技术, 设计了 4 种不同的工作模式, 研究了每一种模式下的运行控制策略, 并提出储能系统的自适应调节下垂系数的控制策略, 提高了电池和系统的运行效率。文献 [9-10] 将直流微网中的各单元接口变换器进行模块化控制, 提出了 4 种工作模式, 以直流总线电压作为信息载体决定各模式间的自由切换。文献 [11] 提出一种基于储能的孤立直流微网系统, 分析了直流微网的构成及各部分控制策略, 通过蓄电池充放电控制抑制和消除直流母线电压波动, 以实现电压暂态稳定。文献 [12] 提出一种基于直流微网母线电压变化的自适应分级控制方法, 依据母线电压将系统控制分为三级, 分别对每级控制所对应的系统运行模式和切换条件进行分析, 并给出相应的控制方法。

现有文献大多单独讨论并网或是孤岛方式下直流微网的运行与控制，且运行模式的设置基本集中在几种常见的工作状态。本文在此基础上，考虑到系统在运行过程中出现的瞬时功率波动造成直流母线电压波动或突变，影响对电压变化敏感的重要负荷(如恒功率负载)的稳定运行这一问题^[5]，详细分析了系统处于并网和孤岛模式的运行情况，归纳设计出系统的 9 种工作模式，且在每种模式中母线电压均能维持恒定。根据电网状态、分布式电源输出功率与负载需求关系、蓄电池荷电状态等本地信息决定系统的工作模式及模式间切换，同时协调光伏接口、储能接口及网侧接口的工作方式，来抑制和缓冲直流母线电压的波动，提高供电质量，从而确保系统的能量平衡及稳定运行。本文所提控制策略有效维持了直流母线电压恒定，实现了直流微网系统的运营可靠性。

1 系统结构

本文研究的直流微网系统结构如图 1 所示，该系统主要包含光伏发电(PV)单元，蓄电池储能(battery energy storage, BES)装置，并网变流器(grid-connected converter, GCC)和负载(恒功率负载(constant power load, CPL)和本地负载)。

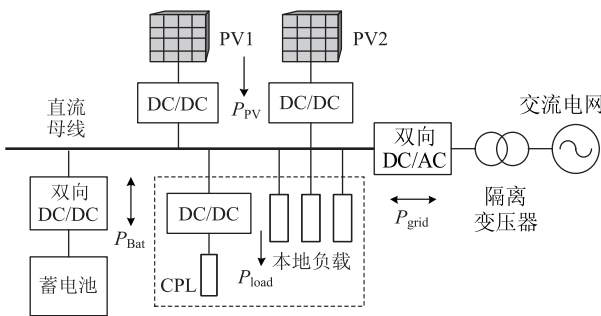


图 1 直流微网结构

图中， P_{PV} 表示 PV 发电总功率； P_{Bat} 表示储能装置充放电功率； P_{load} 表示负载消耗功率； P_{grid} 表示直流微网和交流电网的交换功率。2 组 PV 分别通过 DC/DC 变换器将其发电功率馈入直流母线；蓄电池通过双向 DC/DC 变换器与直流母线连接，在系统不同运行模式下可以实现充放电控制；直流微网通过双向 DC/AC 变换器经隔离变压器与交流电网相连，可实现能量的双向流动。

2 系统工作模态及能量管理

2.1 系统控制目标

计及能量变化影响的直流母线简化等效电路^[13]如图 2 所示。图中， U_{dc} 为直流母线电压值； C 为直流母线等效电容值； P_C 为直流母线电容充电功率。

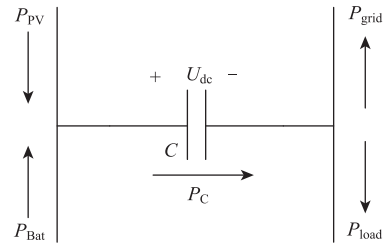


图 2 直流母线等效简化电路

由图 2 得到直流母线电容充电功率 P_C 为

$$P_C = P_{PV} + P_{Bat} - P_{load} - P_{grid} \quad (1)$$

进而得到直流母线电容电压 U_{dc} 与功率关系为

$$U_{dc} \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{1}{C} (P_{PV} + P_{Bat} - P_{load} - P_{grid}) \quad (2)$$

由式(2)可知，直流母线电压的稳定与否和系统的能量是否平衡直接相关，不平衡的能量流动会造成母线电压产生偏差。因此，通过控制直流母线电压的恒定来保证系统的能量平衡，从而确保系统正常运行。

2.2 工作模态及能量管理

直流母线电压是衡量系统稳定与否的重要指标。控制直流母线电压的稳定，便可以维持系统的稳定运行。因此，在系统的任意运行时刻，都需要有一端变流器以电压源工作并控制直流母线电压，确保直流微网在各种工作模式下都能够稳定运行。本文通过详细分析系统处于并网和孤岛模式的运行情况，考虑电网状态、分布式电源输出功率与负载需求关系、蓄电池荷电状态等本地信息，依据直流母线稳压变换器的不同，将系统分为 4 种稳压状态，9 种不同工作模态。具体描述如下。

2.2.1 网侧接口变换器稳压状态

①工作模态 1-1：系统并网运行， P_{PV} 等于 P_{load} ，2 组 PV 单元均以最大功率跟踪模式(maximum power point tracking, MPPT)运行。若蓄电池 $SOC < 90\%$ ，储能装置充电，否则待机。

②工作模态 1-2：系统并网运行， P_{PV} 大于

P_{load} , 2组PV单元均以MPPT模式运行。若蓄电池SOC $<90\%$, 储能装置充电, 否则待机。

③ 工作模式1-3: 系统并网运行, P_{PV} 小于 P_{load} , 2组PV单元均以MPPT模式运行。若蓄电池SOC $<90\%$, 储能装置充电, 否则待机。

2.2.2 储能接口变换器稳压状态

① 工作模式2-1: 系统孤岛运行, P_{PV} 等于 P_{load} , 2组PV单元均以MPPT模式运行。储能装置稳压, 既不充电也不放电。

② 工作模式2-2: 系统孤岛运行, P_{PV} 大于 P_{load} , 2组PV单元均以MPPT模式运行。蓄电池SOC $<90\%$, 储能装置充电稳压。

③ 工作模式2-3: 系统孤岛运行, P_{PV} 小于 P_{load} , 2组PV单元均以MPPT模式运行。蓄电池SOC $>40\%$, 储能装置放电稳压。

④ 工作模式2-4: 系统并网运行且网侧需要输出功率超过并网变流器额定容量 P_{gr} , 2组PV单元

均以MPPT模式运行, 并网变流器工作在限流控制模式, 输出电流钳位于 I_{gmax} , 储能装置放电稳压。

2.2.3 PV接口变换器稳压状态

工作模式3: 系统孤岛运行, P_{PV} 大于 P_{load} , 蓄电池SOC $\geq 90\%$, 蓄电池停止工作。PV1以MPPT模式运行, PV2由MPPT控制切换为恒压控制稳压。

2.2.4 切负荷稳压状态

工作模式4: 系统孤岛运行, P_{PV} 小于 P_{load} , 蓄电池SOC $<40\%$, 蓄电池停止工作。2组PV单元均以MPPT模式运行, 切除不重要负荷稳压。

可以看出, 在不同的工作模式下, 直流微网母线电压的稳定需要系统各部分协调参与控制来保证。各接口变换器的协调合理控制, 实现了能量的最优利用和系统的稳定运行。为了更直观地描述上述各工作模式的运行情况, 在此给出工作模式选择、运行整体流程图, 如图3所示。

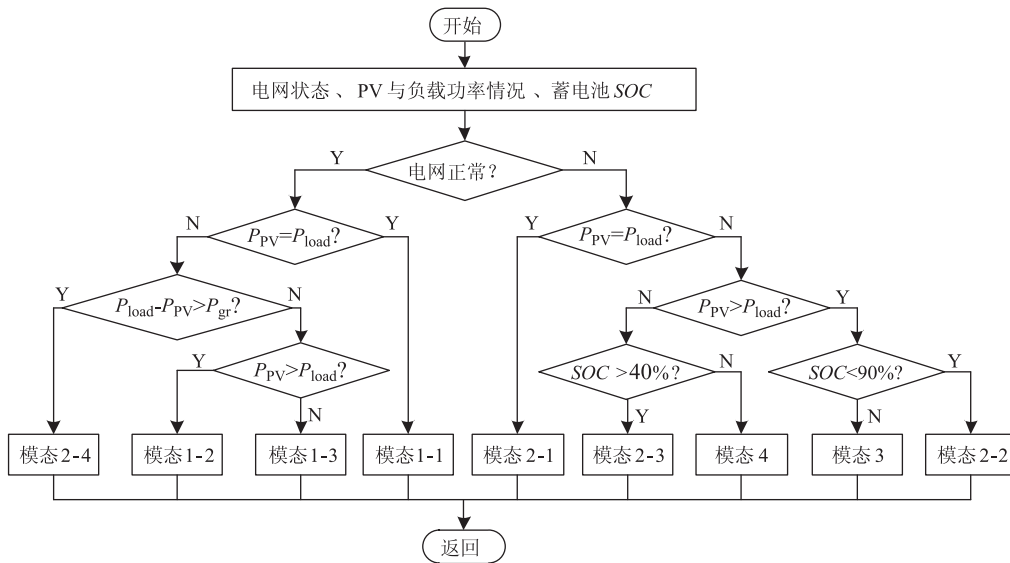


图3 运行模式管理流程图

3 运行控制策略

3.1 总体运行控制策略

本文提出的直流微网系统运行控制总体结构图如图4所示, 图中开关均采用滞环控制。

3.2 变换器运行方式

3.2.1 工作方式

各接口变换器在系统不同工作模式下的工作方式如表1所示。

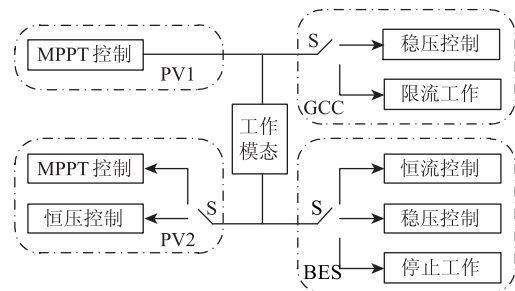


图4 运行控制总体结构图

表 1 各接口变换器工作方式

工作模式	光伏接口	储能接口	网侧接口
模态 1-1	MPPT	充电或待机	稳压
模态 1-2	MPPT	充电或待机	逆变稳压
模态 1-3	MPPT	充电或待机	整流稳压
模态 2-1	MPPT	稳压	不工作
模态 2-2	MPPT	充电稳压	不工作
模态 2-3	MPPT	放电稳压	不工作
模态 2-4	MPPT	放电稳压	限流
模态 3	PV1 MPPT PV2 稳压	不工作	不工作
模态 4	MPPT	不工作	不工作

3.2.2 具体控制方式

3.2.2.1 光伏接口变换器

光伏接口变换器包括 MPPT 和恒压两种控制模式，如图 5 所示。其中，MPPT 模式采用占空比扰动法实现，恒压控制模式可以维持直流母线电压恒定。当直流微网并网运行时，光伏阵列始终工作在 MPPT 模式，以充分利用光伏发电能量；孤岛运行时，根据系统内能量情况存在 MPPT 运行模式和恒压控制模式。

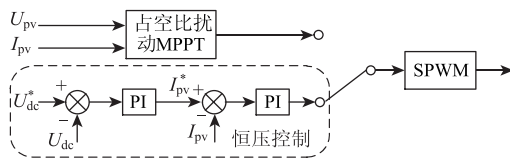


图 5 光伏接口变换器控制框图

3.2.2.2 储能接口变换器

储能接口变换器控制可以在恒流、稳压和停止工作 3 种模式间进行切换来参与系统的协调控制，如图 6 所示。恒流控制实现对储能系统进行恒流充电控制，缓冲和平抑 PV 单元输出的间歇性功率，提高电能质量。稳压控制实现母线电压维持恒定。停止工作是为了避免蓄电池深度充(放)电，

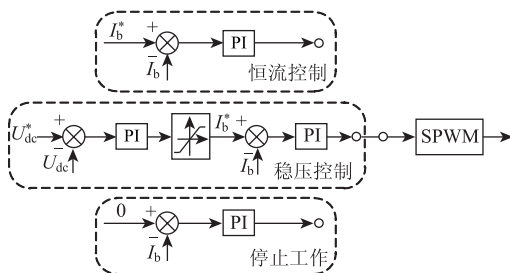


图 6 储能接口变换器控制框图

当其 SOC 达到上限值 90%(或下限值 40%)时对蓄电池实现保护而设定的一种工作模式。

3.2.2.3 并网接口变换器 GCC

直流微网通过并网接口变换器与大电网相连，实现功率的双向流动。根据系统不同工作模式的运行要求，将 GCC 设置为两种控制模式——限流控制和稳压控制，如图 7 所示。限流控制采用电流跟踪 PWM 控制方法中的滞环比较方式实现，当电网需要输出功率超过并网变流器额定容量时，为了保护并网变流器而使其工作在限流控制模式，输出电流钳位在 I_{gmax} 。稳压控制采用基于前馈解耦的双闭环控制，维持直流母线电压恒定并控制功率流动方向和功率因数。

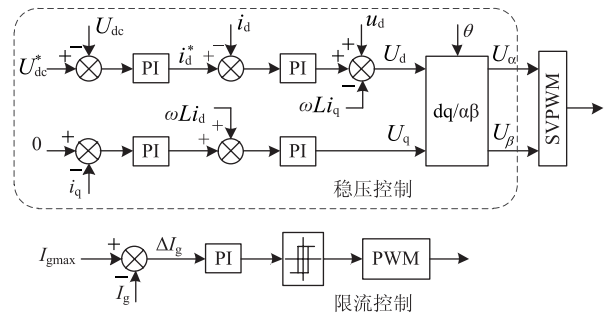


图 7 并网接口变换器 GCC 控制框图

4 仿真实验

在 Matlab/Simulink 仿真平台下构建如图 1 所示的仿真模型，对各种工作模式及模式间切换进行仿真研究。其中，直流母线电压设定为 500V，网侧接口单元采用容量为 3kW 的并网变流器。PV1 和 PV2 在标准条件下(光照强度为 1kW/m²，温度为 25℃)最大跟踪功率分别为 3.5kW 和 2.1kW。储能系统采用 4kW 的蓄电池，其 SOC 上下限值分别为 90%和 40%。负载包括 2 个 2.5kW 直流恒功率负载和 2 个由电阻模拟的本地负载，阻值分别为 250Ω 和 83.3Ω，分别记为 L1、L2、L3、L4，优先级依次降低。

由于所有工作模式都是基于系统处于并网或孤岛运行情况，为了方便而直观地呈现仿真研究结果，对系统在并网和孤岛运行情况下进行仿真。

4.1 并网运行

并网运行情况下工作模式及模式间切换仿真结果如图 8 所示。

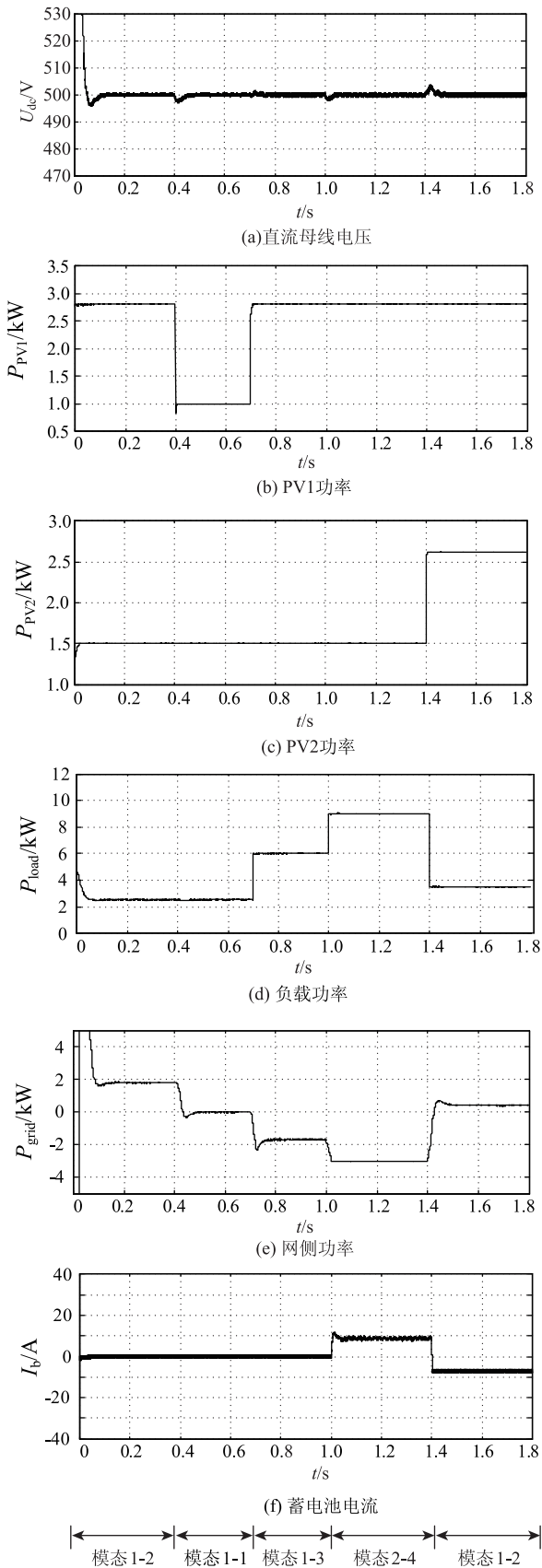


图8 并网运行仿真结果

仿真开始时设定 PV1 光照强度为 $1\text{kW}/\text{m}^2$, PV2 光照强度为 $0.75\text{kW}/\text{m}^2$, 蓄电池处于满荷电状态($\text{SOC}=90\%$), L1 接入系统, 此时由于 P_{PV} 大于 P_{load} , 系统工作在模式 1-2, GCC 逆变稳压。

在 0.4s 时, PV1 光强由 $1\text{kW}/\text{m}^2$ 阶跃变化到 $0.4\text{kW}/\text{m}^2$, 由于光强突减, PV 出力减少, 使得 P_{PV} 等于 P_{load} , 系统自然切换为工作模式 1-1 运行, GCC 稳压, 直流微网与交流电网之间不存在能量交换。

在 0.7s 时, PV1 光强恢复到 $1\text{kW}/\text{m}^2$, 同时 L2 和 L3 接入系统, 此时 P_{PV} 小于 P_{load} , 系统切换为工作模式 1-3 运行, GCC 整流稳压。

在 1s 时, L4 接入系统, 此时需要电网输出功率超过并网逆变器额定容量, 系统进入工作模式 2-4 运行, GCC 工作在限流模式, 蓄电池放电稳压。

在 1.4s 时, PV2 光强由 $0.75\text{kW}/\text{m}^2$ 阶跃变化到 $1.2\text{kW}/\text{m}^2$, 同时将 L2 和 L4 切除, 此时 P_{PV} 大于 P_{load} , 系统重新切换为模式 1-2 运行, 由于在前一工作模式中蓄电池放电维持系统能量平衡, 在当前工作模式蓄电池进行恒流充电补充能量。

4.2 孤岛运行

孤岛运行情况下工作模式及模式间切换仿真结果如图 9 所示。

初始时刻设定 PV2 光照强度为 $0.75\text{kW}/\text{m}^2$, 将 PV1 光照强度始终设定为 $1.2\text{kW}/\text{m}^2$, 蓄电池 SOC 初始值是 89.99985% (为了模拟蓄电池深度充电状态), L1 和 L2 接入系统, 此时 P_{PV} 等于 P_{load} , 系统工作在模式 2-1, 蓄电池控制母线电压, 由于此时系统能量已达平衡, 蓄电池既不充电也不放电。

在 0.5s 时, 切除 L1 和 L2, 同时将 L3 和 L4 接入系统, 此时 P_{PV} 大于 P_{load} , 系统切换为工作模式 2-2 运行, 蓄电池充电稳压。

在 0.7s 时, PV2 光照强度由 $0.75\text{kW}/\text{m}^2$ 阶跃变化到 $1\text{kW}/\text{m}^2$, PV 单元输出功率继续增加, 系统继续工作在模式 2-2, 蓄电池持续充电。

在 1s 时, 蓄电池 SOC 达到 90% , 为了避免其深度充电, 将蓄电池切换为停止工作模式, 无法控制母线电压稳定, 此时 PV2 由 MPPT 模式切换到恒压控制模式稳压, 系统切换为模式 3 运行。

在 1.3s 时, L1 接入系统, 此时 P_{PV} 小于 P_{load} , 蓄电池转为稳压控制, 进行放电, 同时 PV2

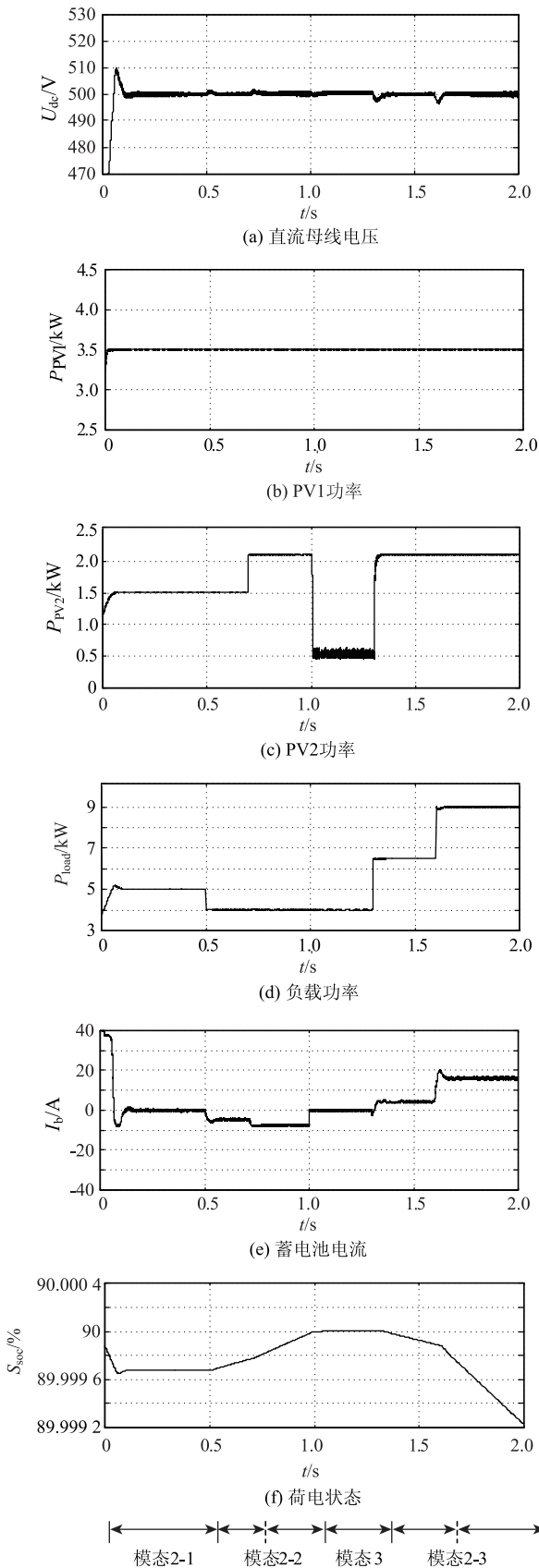


图 9 孤岛运行仿真结果

由恒压控制切换为 MPPT 模式，系统切换为模式 2-3 运行。

在 1.6s 时，L2 接入系统，蓄电池继续放电稳压，系统仍处于模式 2-3 运行。

图 10 对工作模式 4 进行仿真验证。为了模拟蓄电池深度放电状态，设定初始 SOC 为 40.000 6%，L1、L2 和 L4 接入系统，此时 P_{PV} 小于 P_{load} ，工作在模式 2-3，蓄电池放电稳压，当 SOC 下降到 40% 时，蓄电池停止工作，为了维持直流母线电压稳定需切除优先级最低的负载 L4，系统进入模式 4 运行，此后由于 P_{PV} 大于 P_{load} ，直流母线电压升高，一段时间后投入蓄电池，系统切换为模式 2-2 运行，蓄电池充电稳压，最终将母线电压稳定在设定值。

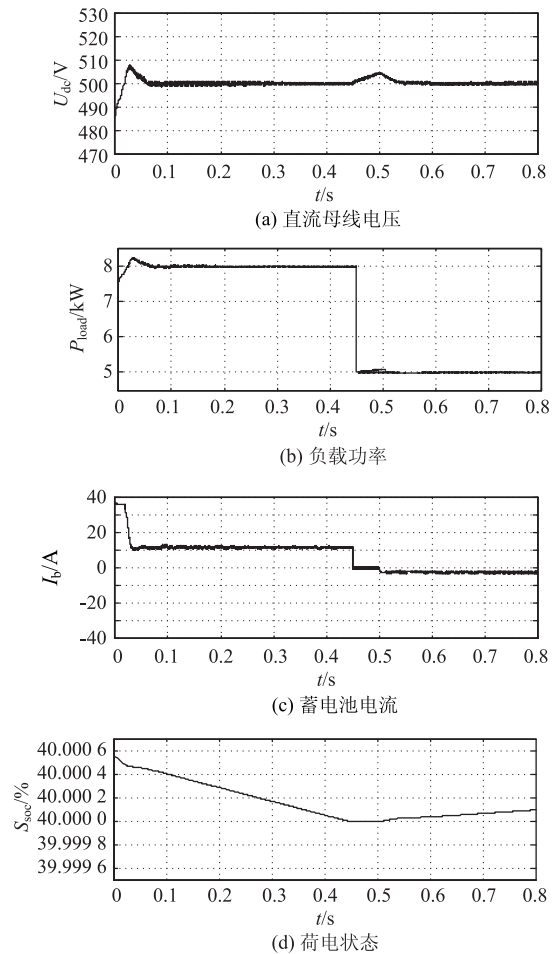


图 10 切负荷仿真结果

5 结 论

本文在构建光伏直流微网结构的基础上，考

虑到系统运行过程中出现的瞬时功率波动造成直流母线电压波动或突变,影响对供电质量要求较高的恒功率负载的稳定运行这一问题,对系统并网和孤岛模式的运行情况进行合理详细的分析,归纳设计出系统的9种工作模态。针对每种模态提出基于本地信息的整体协调控制方法,并进行仿真验证,结果表明:系统在不同工作模态以及模态发生切换时,利用本文所提控制策略能够协调各变流器控制来缓冲和抑制系统瞬时功率的波动,从而在允许的工作范围内有效控制直流母线电压稳定,保证恒功率负荷的供电质量和可靠工作,进而保障系统的能量平衡和稳定运行。

参 考 文 献

- [1] 李富生,李瑞生,周逢权. 微电网技术及工程应用[M]. 北京:中国电力出版社,2013.
- [2] 吴卫民,何远彬,耿攀,等. 直流微网研究中的关键技术[J]. 电工技术学报,2012,27(1):98-106.
- [3] 雍静,徐欣,曾礼强,等. 低压直流供电系统研究综述[J]. 中国电机工程学报,2013,33(7):42-52.
- [4] 朱晓荣,张慧慧. 光伏直流微网协调直流电压控制策略的研究[J]. 现代电力,2014,31(5):21-26.
- [5] 张学,裴玮,邓卫,等. 多源/多负荷直流微电网的能量管理和协调控制方法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(31):5553-5562.
- [6] Bryan J, Duke R, Round S. Decentralized generator scheduling in a nanogrid using DC bus signaling [C] //Power Engineering Society General Meeting, IEEE, 2004: 977-982.
- [7] Schonberger J, Duke R, Round S D. DC bus signaling: a distributed control strategy for a hybrid renewable nanogrid [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2006, 53(5): 1453-1460.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Sun Kai, Zhang Li, Xing Yan, et al. A distributed control strategy based on DC bus signaling for modular photovoltaic generation systems with battery energy storage [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2011, 26(10): 3032-3045.
- [11] 唐文强,吕智林,胡立坤,等. 直流微电网孤立运行控制策略研究[J]. 广西大学学报:自然科学版,2014,39(5):1027-1033.
- [12] Chen Dong, Xu Lie, Yao Liangzhong. DC voltage variation based autonomous control of DC microgrids [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(2): 637-648.
- [13] Chen Dong, Xu Lie. Autonomous DC voltage control of a DC microgrid with multiple slack terminals [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 1897-1905.

收稿日期:2015-04-20

作者简介:

孟明(1967—),男,博士,副教授,研究方向为新能源发电、智能微电网、电机与控制等,E-mail: mmwxp@126.com;
贺海博(1988—),男,硕士研究生,研究方向为新能源发电、智能微电网等,E-mail: hhb_0913@163.com.

(责任编辑:杨秋霞)