

DOI: 10.7667/PSPC201774

# 基于微网技术的家庭能源管理系统研究

刘喜梅, 戴雪梅, 李梅航

(青岛科技大学自动化与电子工程学院, 山东 青岛 266000)

**摘要:** 家庭能源管理系统是未来智能电网在配电侧发展的重要研究方向。以包含光伏发电、蓄电池储能和家庭负荷的家庭直流微电网系统为研究对象, 研究了各个单元的基本控制策略, 并提出了基于微网技术的家庭微网能量调度策略。系统的工作模式包括并网工作模式和离网工作模式, 通过能量调度策略来维持系统功率平衡和直流电压稳定。在 Matlab/Simulink 下搭建了家庭直流微电网系统并对该控制策略进行仿真验证。仿真结果表明, 系统在并网运行模式和离网运行模式下均能保持直流侧电压稳定, 验证了家庭能源管理系统的正确性和有效性。

**关键词:** 微网系统; 家庭能源管理系统; 光伏发电系统; 储能系统; 能量调度策略

## Research on the home energy management system based on the microgrid technology

LIU Ximei, DAI Xuemei, LI Meihang

(College of Automation & Electronic Engineering, Qingdao University of Science & Technology, Qingdao 266000, China)

**Abstract:** The home energy management system is one of the most important applications of future smart power grids. This paper takes home DC microgrid system which contains photovoltaic power generation system, battery energy storage system and home load as a study objective. It studies the basic control strategy of each unit, and proposes an energy scheduling policy for home microgrid based on microgrid technology. The system can operate not only in-grid mode but also in off-grid mode. The energy scheduling policy can balance the system power and stabilize the DC voltage. The home DC microgrid system is simulated using Matlab/Simulink to verify the proposed control strategy. Simulation results indicate that the DC voltage can be stabilized under both in-grid mode and off-grid mode, verifying the validity and effectiveness of home energy management system.

**Key words:** microgrid system; home energy management system; photovoltaic power generation system; energy storage system; energy scheduling policy

## 0 引言

能源危机和环境污染等问题的日益严峻促进了可再生能源的发展<sup>[1-3]</sup>。利用风电和光伏等可再生能源的分布式发电技术受到越来越多的关注, 但是分布式能源的随机性和间歇性造成的并网问题严重制约了其发展<sup>[4-7]</sup>。因此, 整合分布式发电系统、储能元件和负载的微网技术将是解决大规模分布式发电系统并网问题的最有效途径之一<sup>[8-10]</sup>。

随着智能电网的快速发展, 以太阳光能为主的家庭微电网系统成为未来智能电网在配电侧发展的重要研究方向<sup>[11-12]</sup>。其中家庭直流微网是通过直流母线对家庭负荷进行供电的微电网, 在能源管理系统的协调控制下由交流电网、分布式能源和储能装置共同向直流母线供电, 满足家庭负荷需求。

采用适当的直流母线电压控制方法, 通过对各换流器进行协调控制可以实现直流母线电压稳定的目的。文献[13]提出了一种考虑电网分时电价的直流微电网分层协调控制策略, 将储能单元的剩余充放电功率与电网电价相结合, 采用低价购电和高价售电的策略来降低系统的运行成本。文献[14]提出了一种直流微网层次控制架构, 建立了相应的变流器控制层、母线控制层以及调度管理层的 3 层控制结构, 保证了直流母线电压在不同层级之间平滑过渡, 但直流微电网内各单元的运行曲线已提前确定, 降低了系统运行的灵活性。文献[15]将混合储能系统引入到直流微网系统中, 并且提出了一种基于混合储能系统的电压分层协调控制策略来调节直流母线电压, 但是由于直流电压被分了 5 个层区, 其控制策略相对来说比较复杂。文献[16]针对独立运行

的光储直流微网, 提出了分层协调控制策略, 它可以有效减小母线电压波动并控制独立微电网稳定运行, 但是并未考虑并网模式, 应用范围较小。

本文从家庭能量综合管理角度考虑, 以维持直流母线电压稳定为主要目的, 提出一种基于微网技术的家庭微网能量调度策略, 实现光伏能量和储能系统能量的最优化利用。

## 1 家庭微网系统结构

本文研究的家庭微网系统结构如图 1 所示。该系统是由光伏发电系统、蓄电池储能系统、家庭负荷、DC/DC 变换器和双向 DC/AC 变换器组成的小型配电系统。考虑到光伏发电系统受辐射、温度和光照等因素的影响, 太阳能电池输出电压会有很大的波动, 本系统利用 DC/DC 变换器将光伏组件的输出电压升高至系统所需的直流母线电压, 并且可以实现稳压和最大功率追踪的功能。蓄电池储能系统通过双向 DC/DC 变换器连接至公共直流母线上, 直流母线通过双向 DC/AC 变换器输出稳定交流电供给家庭负载或将电能馈入交流电网。

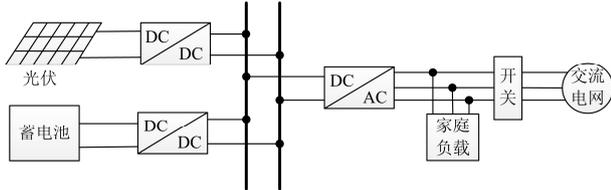


图 1 家庭微网系统结构图

Fig. 1 Structure diagram of home microgrid system

## 2 系统基本控制

家庭直流微网系统的基本控制包括光伏发电系统、蓄电池储能系统和家庭负载的基本控制。各个单元的基本控制策略根据微网系统的运行工况不同而采用相应的控制策略。

### 2.1 光伏发电系统基本控制

光伏发电系统的基本控制原理如图 2 所示, 图中:  $I_{pv}$  和  $U_{pv}$  分别为光伏阵列的输出电流和输电电压;  $U_{dc}$  为直流母线电压测量值;  $U_{dc}^*$  为直流母线电压参考值;  $L$  为电感;  $C$  为电容器;  $D$  为二极管;  $S$  为带反并联二极管的 IGBT。一般情况下, 光伏发电系统的输出电压较低, 因此需要通过单向 DC/DC 变换器与直流母线相连。光伏发电系统的 DC/DC 变换器一般采用最大功率跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)控制和恒定直流电压控制。

1) MPPT 控制。在正常情况下, 一般要求光伏发电系统能够最大功率输出, 其控制方法有恒定电压控制法、扰动观测法、导纳增量法和基于梯度变

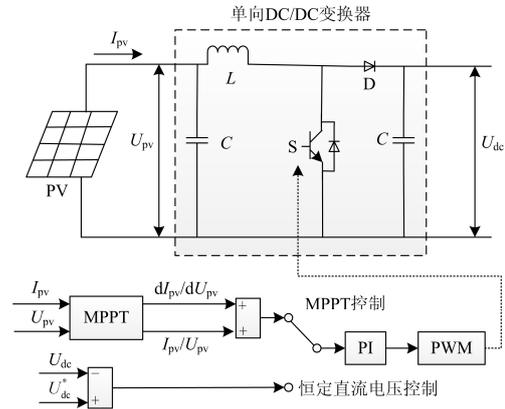


图 2 光伏发电系统控制原理图

Fig. 2 Control schematic diagram of PV generation system

步长的导纳增量法<sup>[17-19]</sup>, 本文采用导纳增量法加内环调节。

增量导纳法根据光伏阵列输出电压与功率之间的关系  $P=U_{pv} \cdot I_{pv}$  光伏阵列输出功率。

令  $dP/dU_{pv}=0$  可得其最大功率点, 即

$$\frac{dP}{dU_{pv}} = \frac{d(U_{pv} \cdot I_{pv})}{dU_{pv}} = I_{pv} + U_{pv} \frac{dI_{pv}}{dU_{pv}} = 0 \quad (1)$$

由式(1)可得:

$$\frac{dI_{pv}}{dU_{pv}} = -\frac{I_{pv}}{U_{pv}} \quad (2)$$

内环调节器通过极小化误差 ( $dI_{pv}/dU_{pv} + I_{pv}/U_{pv}$ ) 来调整工作点电压, 以达到 MPPT 的目的。

2) 恒定直流电压控制。当光伏发电系统输出的功率大于整个系统消耗功率而引起直流母线电压升高时, 其采用恒定直流电压控制, 以作为整个系统的功率平衡节点来稳定直流母线电压。将直流母线电压测量值与参考值作差, 并经 PI 控制器调节以控制 DC/DC 变换器的占空比来维持直流母线电压的稳定。在这种控制模式下, 其能够自动补偿系统的功率缺额(不超过光伏发电系统的最大输出功率)。

### 2.2 蓄电池储能系统的基本控制

蓄电池储能系统的基本控制原理如图 3 所示, 图中:  $U_{bat}$  和  $I_{bat}$  分别是蓄电池输出电压和电流;  $I_{bat}^*$  为蓄电池输出电流参考值。家庭直流微网系统处于并网模式时, 其采用恒定电流控制, 对蓄电池进行充电; 当其处于离网模式且蓄电池能够正常充放电时, 采用恒定直流电压控制。该控制系统采用电压外环和电流内环的双环控制, 其中电压外环用于控制直流母线电压稳定, 其输出作为电流内环的输入用于限制蓄电池的充放电电流。通过调节蓄电池的充放电功率控制整个系统的功率平衡, 维持直流母线电压的稳定。

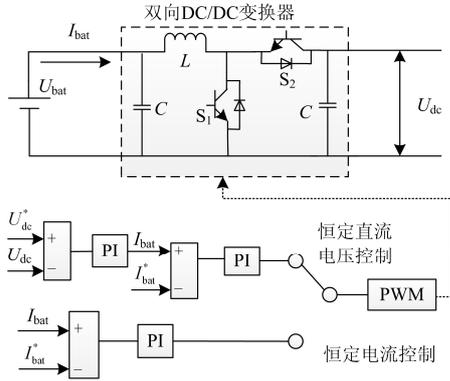
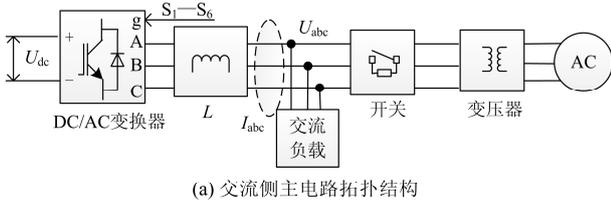


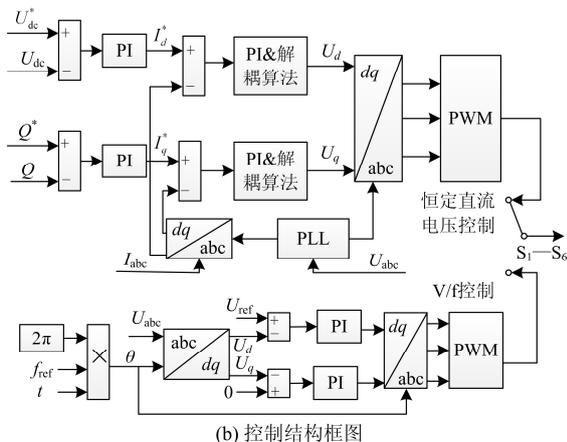
图3 蓄电池储能系统的基本控制原理图  
Fig. 3 Control schematic diagram of battery energy storage system

### 2.3 DC/AC 变换器控制

交流负载侧 DC/AC 变换器控制结构如图 4 所示, 其中 DC/AC 变换器采用两电平电压源变换器,  $U_{abc}$  和  $I_{abc}$  分别为交流侧三相电压和三相电流,  $L$  为线路电感,  $I_d^*$  和  $I_q^*$  分别为交流电流的  $d$  轴和  $q$  轴分量参考值,  $U_d$  和  $U_q$  分别为交流电压的  $d$  轴和  $q$  轴分量,  $Q$  和  $Q^*$  分别为无功功率测量值和参考值,  $U_{ref}$  和  $f_{ref}$  分别为交流电压幅值和交流频率参考值。当家庭微网系统处于并网模式时, 由于家庭负载侧 DC/AC 变换器与交流电网直接相连, 因此可以利用恒定直流电压控制来稳定系统直流母线电压; 当其处于离网模式时, 家庭负载侧 DC/AC 变换器需要采用 V/f 控制来稳定交流侧电压的幅值和频率, 以保证交流负载能够正常工作。



(a) 交流侧主电路拓扑结构



(b) 控制结构框图

图4 DC/AC 变换器控制原理图

Fig. 4 Control schematic diagram of DC/AC converter

### 3 家庭微网能量调度策略

家庭微网系统在并网离网切换、家庭负荷切换和太阳能功率发生波动时均会引起微网内功率的不平衡<sup>[20-21]</sup>。因此对直流母线电压的稳定控制是整个微网系统能否稳定运行的关键。本文根据微网系统所处的不同工作模式而采用相应的控制策略。在不同的工况下, 均由单一变换器来维持直流母线电压的稳定, 从而保证整个系统稳定运行。

#### 3.1 并网模式

当家庭微网系统并网运行时, 系统所需功率优先由光伏发电系统提供, 蓄电池储能系统采用恒定电流控制方式对其进行充电, 家庭微网系统功率不足部分由交流电网补偿, 双向 DC/AC 变换器采用定直流电压控制方式来稳定系统直流母线电压。

#### 3.2 离网模式

为了防止蓄电池由于深度放电或者深度充电造成损坏, 设定蓄电池荷电状态(State of Charge, SOC)的最小阈值  $\alpha$  和最大阈值  $\beta$ : 规定当蓄电池  $SOC > \beta$  或者  $SOC < \alpha$  时, 蓄电池必须离网处于闲置状态; 反之, 则表示蓄电池处于正常工作状态, 可以参与家庭微网系统的管理调度。

当家庭微网系统离网运行且蓄电池储能系统能够正常工作时, 系统直流母线电压由蓄电池储能系统维持, 作为系统功率平衡点来补偿系统的有功功率缺额。当蓄电池储能系统由于闲置无法参与调度时, 系统的直流电压由光伏发电系统来维持, 根据负荷消耗功率发出相应的功率。如果负荷消耗功率大于光伏发电系统的最大功率, 则应切除非重要负荷以保证家庭重要负荷正常工作。

基于以上分析可得家庭能源管理系统的整体结构框图如图 5 所示, 图中:  $P_{AC}$  为交流电网有功功率;  $P_{PV}$  为光伏系统有功功率;  $P_{bat}$  为蓄电池储能系统有功功率;  $P_L$  为交流负荷有功功率; Grid\_on 为并网状态信号; Grid\_off 为离网状态信号。

从图 5 中可以看出, 当 Grid\_on 状态信号激活时, 表示家庭微网系统处于并网状态, 此时光伏发电系统采用 MPPT 控制实现光伏系统的最大功率输出, 蓄电池储能系统采用恒定电流控制对蓄电池充电, 双向 DC/AC 变换器采用恒定直流电压控制用以稳定微网系统直流电压。当 Grid\_off 状态信号激活时, 表示家庭微网系统处于离网状态, 此时双向 DC/AC 变换器采用 V/f 控制来稳定交流侧电压幅值和频率, 光伏发电系统和蓄电池储能系统则根据蓄电池是否受限采用不同的调度策略: 当  $\alpha \leq SOC \leq \beta$  时表示蓄电池正常工作, 此时光伏发电系统采用

MPPT 控制实现光伏系统的最大功率输出, 蓄电池储能系统采用恒定直流电压控制以稳定微网系统直流母线电压; 反之则表示蓄电池受限处于闲置状态,

将不参与系统调度, 此时光伏发电系统采用恒定直流电压控制以稳定微网系统直流电压。

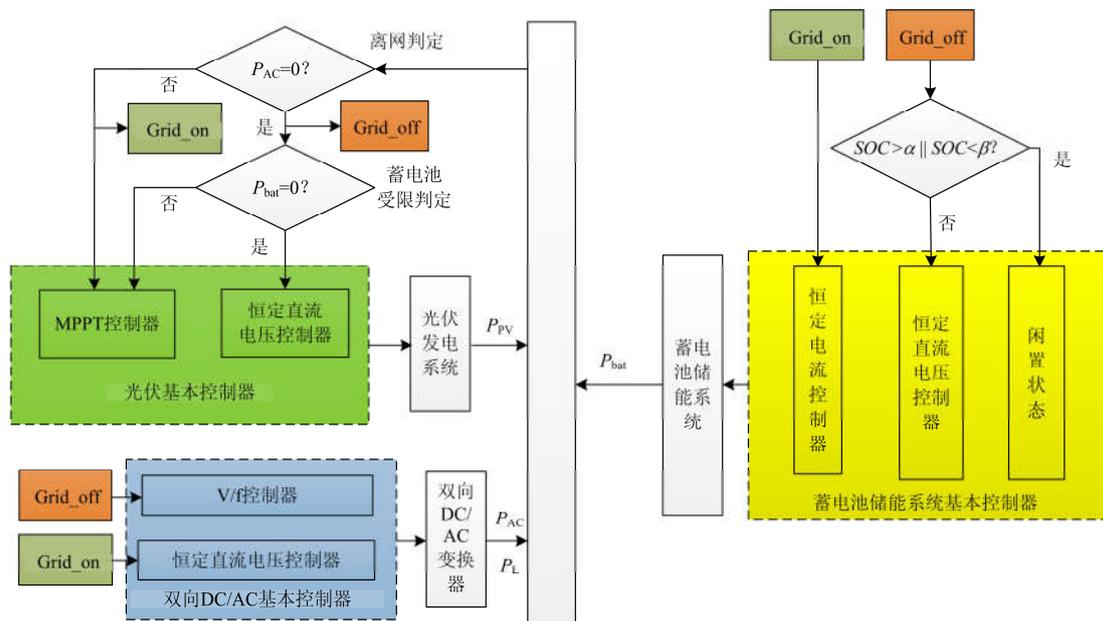


图 5 家庭能源管理系统框图

Fig. 5 Structure diagram of home energy management system

## 4 仿真实证

基于以上变流器拓扑结构、基本控制策略和能量调度策略, 本文在 Matlab/Simulink 下搭建如图 1 所示的含光伏发电系统、蓄电池储能系统和家庭负荷的家庭直流微网系统。其中光伏发电系统的光照强度和温度曲线如图 6 所示, 光伏阵列采用 Matlab 中的 SunPower SPR-305E-WHT-D 模块, 为了提高其输出电压和有功功率, 需要将该模块进行串联和并联。微网系统内各单元的部分重要仿真参数如表 1 所示。为方便起见, 本文规定各单元吸收有功功率为负值, 发出有功功率为正值。

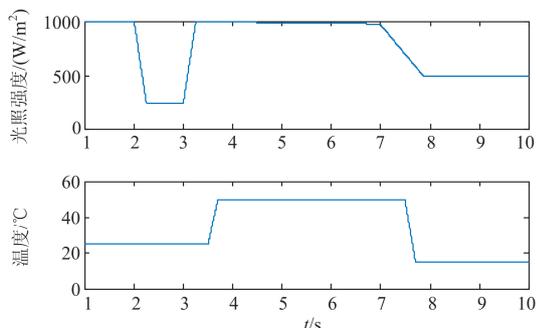


图 6 光照强度和温度变化曲线

Fig. 6 Curve of illumination intensity and temperature

表 1 部分仿真参数

Table 1 Partial simulation parameters

模块参数	数值
直流侧额定电压 $U_{dc}/V$	700
光伏模块最大功率/W	305
光伏最大功率点电压/V	54.7
光伏串联模块数	5
光伏并联模块数	3
蓄电池额定电压/V	200
蓄电池额定容量/Ah	4
交流侧线电压有效值/V	260
交流线路电感 $L/mH$	10

### 4.1 并网运行仿真

家庭微网系统并网运行时, 光伏系统以最大功率输出, 根据光伏模块参数可得其最大功率为  $305 \times 5 \times 3 = 4575$  W。蓄电池处于恒定电流充电模式, 此时系统直流电压由 DC/AC 变换器控制, 直流电压如图 7 所示, 光伏功率  $P_1$ 、蓄电池功率  $P_2$ 、负荷功率  $P_3$  和交流电网功率  $P_4$  仿真曲线如图 8 所示。由图 8 可以看出, 当光照强度和温度发生变化时, 光伏发电系统能够很好跟踪最大功率点, 蓄电池储能系统恒定吸收 1.12 kW 功率, 家庭负荷在 1~2.5 kW 波动, 交流电网则补偿系统有功功率缺额或者吸收过多的有功功率。

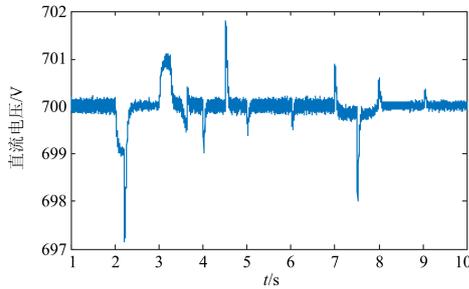


图 7 直流母线电压

Fig. 7 DC bus voltage

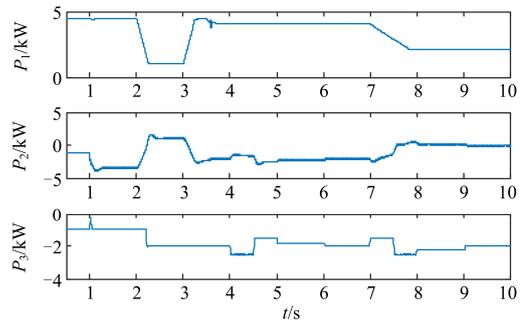


图 10 有功功率曲线

Fig. 10 Curve of active power

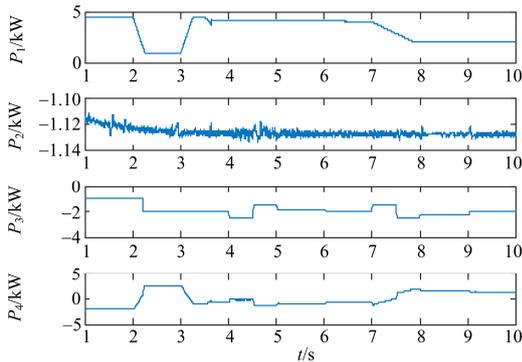


图 8 有功功率曲线

Fig. 8 Curve of active power

### 4.2 离网运行仿真

当家庭微网系统离网运行时，双向 DC/AC 变换器需要切换工作模式来控制交流负荷的电压幅值和频率，其线电压幅值为 260 V，频率为 50 Hz。根据蓄电池 SOC 的工作区间，光伏发电系统和蓄电池储能系统的工作模式则分两种情况进行仿真分析。

1) 蓄电池 SOC 在正常工作区间( $10\% < SOC < 90\%$ )

蓄电池初始 SOC 设置为 80%，其能够按照以上控制策略和调度策略进行充放电。在 1 s 时，家庭微网系统与交流电网断开连接，此时交流电网功率为 0，蓄电池储能系统接替交流电网来稳定直流母线电压，平衡系统的有功功率。直流母线电压如图 9 所示，光伏功率  $P_1$ 、蓄电池功率  $P_2$  和负荷功率  $P_3$  仿真曲线如图 10 所示。

### 2) 蓄电池受限

为了验证当蓄电池达到极限状态( $SOC \geq 90\%$  或者  $SOC \leq 10\%$ )时系统调度策略的有效性，设定蓄电池初始 SOC 为 10.45%，光照强度为  $600 \text{ W/m}^2$  和  $50^\circ\text{C}$ ，此时光伏系统的最大功率为 2.5 kW。在上述控制策略和调度策略下，系统的直流电压如图 11 所示，SOC 曲线如图 12 所示，光伏功率  $P_1$ 、蓄电池功率  $P_2$  和负荷功率  $P_3$  如图 13 所示。由图 12 可知，在 2~10.95 s 区间内，蓄电池 SOC 大于 10%，此时负荷功率在 3~4 kW 波动，光伏最大功率为 2.5 kW，因此蓄电池需要放电以维持系统功率平衡，其 SOC 下降；在 10.95 s 时，蓄电池过度放电，其 SOC 达到限幅值 10%，此时光伏发电系统接替蓄电池储能稳定直流电压，工作在恒定直流电压控制模式。从图 13 可以看出，由于光伏发电系统最大功率为 2.5 kW，

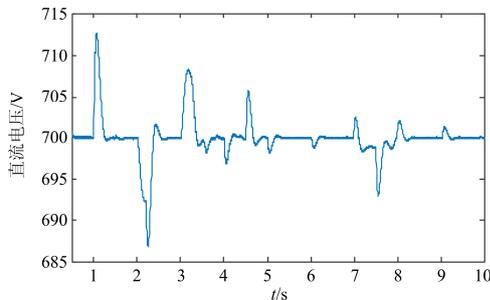


图 9 直流母线电压

Fig. 9 DC bus voltage

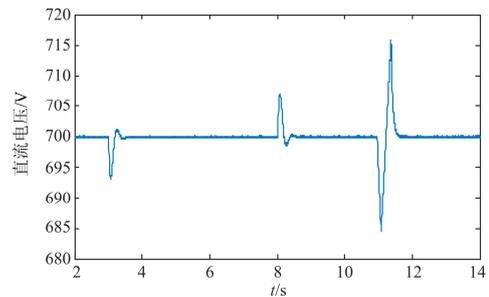


图 11 直流母线电压

Fig. 11 DC bus voltage

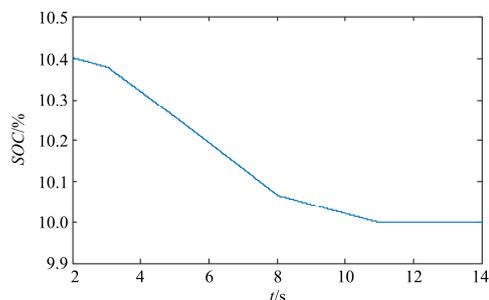


图 12 蓄电池 SOC 曲线

Fig. 12 SOC curve of storage battery

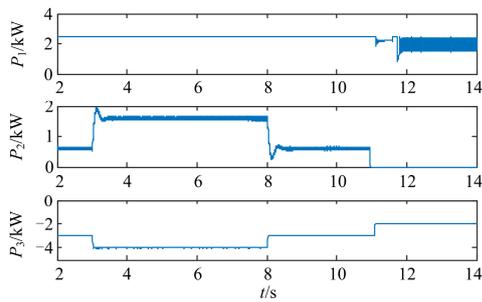


图 13 有功功率曲线

Fig. 13 Curve of active power

小于负荷功率 3 kW, 为了维持直流母线电压稳定, 系统自动切掉 1 kW 非重要负荷。

## 5 结论

针对含光伏发电系统、蓄电池储能系统和家庭负荷的家庭微网系统, 为了实现光伏能量和储能系统能量的最优化利用, 本文提出了基于微网技术的能量调度策略。它可以根据系统运行工作模式的不同采用相应的控制策略来稳定直流母线电压。仿真结果表明在系统并网和离网切换、光伏系统功率和负荷功率波动以及蓄电池工作状态异常时, 整个家庭微网系统均能够稳定运行, 验证了家庭能量管理策略的正确性和有效性。该控制策略简单易实现且无需通信, 具有一定的参考价值。

## 参考文献

- [1] 李建林, 马会萌, 惠东. 储能技术融合分布式可再生能源的现状与发展趋势[J]. 电工技术学报, 2016, 31(14): 1-10, 20.  
LI Jianlin, MA Huimeng, HUI Dong. Present development condition and trends of energy storage technology in the integration of distributed renewable energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(14): 1-10, 20.
- [2] 刘永坤, 李成. 我国能源效率及其影响因素分析[J]. 热力发电, 2015, 44(3): 1-7.  
LIU Yongkun, LI Cheng. China's energy efficiency and its influencing factors[J]. Thermal Power Generation, 2015, 44(3): 1-7.
- [3] 赵涛涛. 基于  $Zn_2SnO_4$  纳米线固态染料敏化太阳能电池光生电荷分离与光电性质研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 75-81, 158.  
ZHAO Taotao. Separation of photogenerated charges and photoelectric properties in solid state dye-sensitized solar cells with  $Zn_2SnO_4$  nanowires[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2015, 43(5): 75-81, 158.
- [4] 熊远生, 俞立, 徐建明. 光伏发电系统多模式接入直流微电网及控制方法[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(12): 37-43.  
XIONG Yuansheng, YU Li, XU Jianming. Multimode of photovoltaic generation system connected to DC microgrid and control methods[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(12): 37-43.
- [5] KHAN O, XIAO W D, MOURSIS M S E. A new PV system configuration based on submodule integrated converters[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(5): 3278-3284.
- [6] 郭明亮, 戴朝华, 邓惠文, 等. 基于单体光伏/单体储能电池模组的新型光伏储能发电系统[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(3): 56-61.  
WU Mingliang, DAI Chaohua, DENG Huiwen, et al. A novel PV energy storage generating system based on single PV cell/single energy storage cell module[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(3): 56-61.
- [7] 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 distributed energy system[J]. Thermal Power Generation, 2016, 45(4): 65-69.
- [8] 薛士敏, 齐金龙, 刘冲. 直流微电网保护综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3404-3412.  
XUE Shimin, QI Jinlong, LIU Chong. A research review of protection for DC microgrid[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3404-3412.
- [9] AUGUSTINE S, LAKSHMINARASAMMA N, MISHRA M K. Control of photovoltaic-based low-voltage dc microgrid system for power sharing with modified droop algorithm[J]. IET Power Electronics, 2016, 9(6): 1132-1143.
- [10] 王毅, 于明, 李永刚. 基于模型预测控制方法的风电直流微网集散控制[J]. 电工技术学报, 2016, 31(21): 57-66.  
WANG Yi, YU Ming, LI Yonggang. Model predictive controller-based distributed control of wind turbine dc microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(21): 57-66.
- [11] 许志荣, 杨苹, 郑成立. 用户侧光储型微电网中央控制器研制[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 426-433.  
XU Zhirong, YANG Ping, ZHENG Chengli. Control device development of user-side PV-ESS microgrid[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 426-433.

- [12] BASIT A, SIDHU G A S, MAHMOOD A, et al. Efficient and autonomous energy management techniques for the future smart homes[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 8(2): 917-926.
- [13] 郭力, 张绍辉, 李霞林, 等. 考虑电网分时电价的直流微电网分层协调控制[J]. 电网技术, 2016, 40(7): 1992-2000.  
GUO Li, ZHANG Shaohui, LI Xialin, et al. Hierarchical coordination control for DC microgrid considering time-of-use price[J]. Power System Technology, 2016, 40(7): 1992-2000.
- [14] 李武华, 顾云杰, 王宇翔, 等. 新能源直流微网的控制架构与层次划分[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 156-163.  
LI Wuhua, GU Yunjie, WANG Yuxiang, et al. Control architecture and hierarchy division for renewable energy DC microgrids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 156-163.
- [15] 孟润泉, 刘家赢, 文波, 等. 直流微网混合储能控制及系统分层协调控制策略[J]. 高电压技术, 2015, 41(7): 2186-2193.  
MENG Runquan, LIU Jiaying, WEN Bo, et al. Hybrid energy storage control and system hierarchical coordinated control strategy for DC microgrids[J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(7): 2186-2193.
- [16] 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.
- [17] 杨勇, 朱彬彬, 赵方平, 等. 一种电流预测控制的自适应变步长最大功率跟踪方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(6): 855-862.  
YANG Yong, ZHU Binbin, ZHAO Fangping, et al. An adaptive and variable step MPPT method based on current predictive controllers[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(6): 855-862.
- [18] MAHMOUD Y, EL-SAADANY E F. A novel MPPT technique based on an image of PV modules[J]. IEEE Transactions on Energy Conversion, 2017, 32(1): 213-221.
- [19] 徐鹏飞, 马高峰, 高金辉. 微元步长自适应增量电导法实现 MPPT 的控制[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2015, 43(1): 59-62.  
XU Pengfei, MA Gaofeng, GAO Jinhui. Infinitesimal step adaptive incremental conductance method MPPT control[J]. Journal of Henan Normal University (Natural Science Edition), 2015, 43(1): 59-62.
- [20] 李东东, 徐连连, 刘翔, 等. 考虑可削减负荷参与的含风光储微网经济优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(2): 35-41.  
LI Dongdong, XU Lianlian, LIU Xiang, et al. Optimal dispatching of microgrid considering the participation of reducible loads, distributed generators (DG) and energy storage units[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(2): 35-41.
- [21] CHOE S, SON Y K, SUL S K. Control and analysis of engine governor for improved stability of DC microgrid against load disturbance[J]. IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics, 2016, 4(4): 1247-1258.

收稿日期: 2017-03-11; 修回日期: 2017-05-11

作者简介:

刘喜梅(1961—), 女, 博士, 博士生导师, 研究方向为智能控制, 复杂系统的建模及优化控制, 软测量技术; E-mail: liuximeiqd@163.com

戴雪梅(1991—), 女, 通信作者, 硕士研究生, 研究方向为智能控制理论及应用; E-mail: 1964109080@qq.com

李梅航(1988—), 男, 博士研究生, 研究方向为柔性直流输电和新能源并网。E-mail: limeihangqd@163.com

(编辑 姜新丽)