

# 基于混合储能的光伏微网孤网运行的综合控制策略

田慧雯, 李咸善, 陈铁, 谭思

(三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 孤网运行的光伏微网输出功率具有间歇性和随机性。为了保证系统供电的可靠性及稳定性, 将能量密度大的蓄电池和功率密度高的超级电容器构成混合储能系统应用于光伏微网的思路成为研究热点。在现有蓄电池电流多滞环控制策略的基础上进行改进, 提出基于功率的储能单元控制策略。该方法优化了储能系统的工作状态, 有利于提高蓄电池的工作寿命。通过 Matlab/Simulink 仿真软件搭建了基于混合储能的光伏微网孤网运行仿真模型, 并对该光伏微网的控制策略进行验证和分析。结果表明, 混合储能系统能迅速平衡系统的瞬时功率, 优化系统运行状态, 保证供电的可靠性。

**关键词:** 孤岛微网; 光伏发电; 蓄电池; 超级电容; 功率平衡; 运行状态优化

## Comprehensive control strategy of hybrid energy storage-based photovoltaic island microgrid

TIAN Hui-wen, LI Xian-shan, CHEN Tie, TAN Si

(College of Electrical Engineering & New Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** The output power of the photovoltaic island microgrid is intermittent and random. To ensure the reliability and stability of power supply, the idea that combines the high energy density battery with supercapacitor which has high power density to form hybrid energy storage system applied to photovoltaic (PV) microgrid becomes a research hotspot. On the basis of existing research, this paper proposes a multi-hysteresis control strategy based on energy management. The energy storage system working state can be optimized and the working life of the battery can be greatly improved by this control strategy. Using MATLAB/Simulink software, a simulation module for PV Island microgrid based on hybrid energy storage is constructed, and the control strategy of PV microgrid is verified and analyzed. Simulation results show that the proposed hybrid energy storage system can balance the instantaneous power rapidly, optimize the microgrid operation, and ensure the reliability of power supply.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277110).

**Key words:** island microgrid; photovoltaic generation; battery; supercapacitor; power balance; operation optimization

中图分类号: TM76 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)19-0122-07

## 0 引言

对于孤岛模式运行的光伏微网系统, 其电能具有间歇性、波动性和随机性, 一般在系统中配备有储能装置。储能装置多采用蓄电池和超级电容器。超级电容的高密度特性可以实现瞬时的功率吸纳或放出, 但是不能长时间为负荷提供电能; 蓄电池能较长时间为负荷提供电能, 但具有循环利用寿命低、功率密度低等缺点, 当前混合储能系统已经成为研究热点<sup>[1-2]</sup>。该系统中铅酸电池能量密度较大, 作为系统长期储能设备, 而超级电容功率密度高, 作为短期储能设备来调节系统的即时变化功率。超级电容和铅酸蓄电池的特性比较如表 1 所示<sup>[3-4]</sup>。

表 1 超级电容和铅酸蓄电池的特性比较

Table 1 Comparison of supercapacitor and battery

	超级电容器	蓄电池
放电时间	1~30 s	0.3~3 h
充电时间	1~30 s	1~5 h
能量密度/(Wh/kg)	1~10	20~100
功率密度/(W/kg)	1000~2000	50~200
循环效率/%	0.9~0.95	0.7~0.85
循环寿命/次	>100000	500~2000

由于光伏电池可以直接产生直流电, 蓄电池及超级电容等储能设备也适合于直流电输出, 本文采用直流微网。目前日本的 Sendai 智能微电网中采用了直流系统<sup>[5]</sup>。直流电传输可以避免非同步问题引起的系统稳定性下降的问题; 在稳态运行状态中, 直流输电可以避免无功引起的电压下降。当直

流微电网需要与现有的交流大电网并列运行时, 直流微网只采用一个 DC/AC 变流器, 因此总体成本和损耗相对交流微网低。

本文详细研究基于混合储能的光伏微网孤岛运行系统的结构, 给出光伏电池、蓄电池与超级电容器这三个能量单元的电路模型, 根据控制的目的分别设计出三个能量单元的控制电路及控制方式。为了提高蓄电池的使用寿命, 优化系统运行状态, 设计出蓄电池与超级电容器相结合的储能系统, 采用基于能量管理的蓄电池电流多滞环控制策略, 并通过 Matlab/Simulink 仿真软件对系统进行仿真, 得出直流母线的电压波形图及混合储能系统的充放电电流波形图, 来分析系统中各能量单元控制方法及提高系统可靠性方面的有效性。

## 1 系统构成

本文系统由主电路和控制电路两部分构成, 主电路元件包括光伏组件、蓄电池组、超级电容器、负载及相应的变换器, 如图1所示。光伏组件、蓄电池组及超级电容器通过DC/DC变换器接入500 V直流母线, 直流微网采用DC/AC变流器变为工频交流电后接入交流电网, 从而为负荷供电。

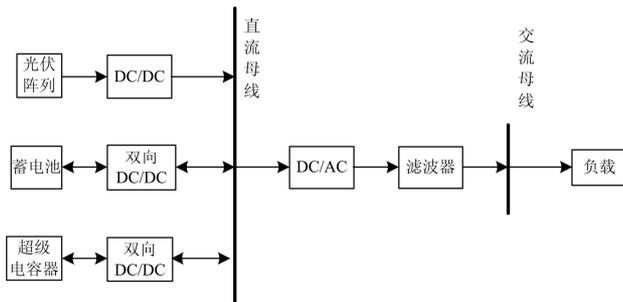


图1 系统结构图

Fig. 1 System structure diagram

## 2 系统能量管理及控制

### 2.1 逆变器控制

本文设计的光伏微网系统运行在孤岛模式下, 没有大电网为其提供电压和频率支撑, 因此微网必须具备能够维持自身的电压和频率的能力<sup>[6-10]</sup>。在这种情况下, 微网应采用 V/f 控制。采用这种控制方法的布式电源在满足负荷功率的情况下, 无论系统负荷功率如何变化, 其端口输出的电压和频率都维持恒定的值。

三相逆变器采用以滤波电容电流反馈为内环的双闭环控制策略, 控制示意图如图2所示。由于电流环包含负载电流, 因此由负载变化引起的系统性能变化可以被电流环抑制<sup>[11]</sup>。

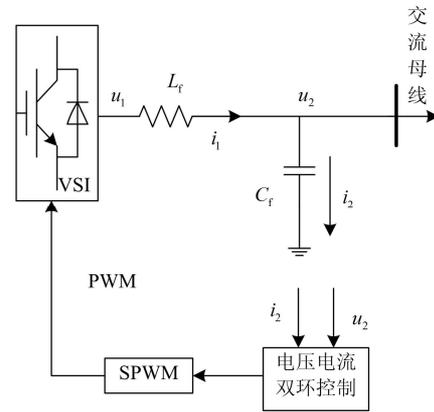


图2 电压逆变器 V/F 控制示意图

Fig. 2 Schematic of voltage inverter V/F control

电流内环按照电压外环输出的电流给定值  $i_{2ref}$  进行电流控制, 能够快速抑制负载扰动影响, 提高系统的动态响应性能; 电压外环用于稳定负载电压  $u_2$ , 改善输出电压波形, 提高输出精度, 同时给电流内环提供电流指定信号, 控制框图如图3所示。

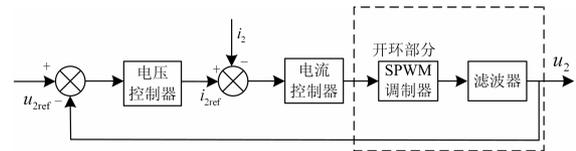


图3 双闭环控制框图

Fig. 3 Block diagram of double closed loop control

### 2.2 最大功率点跟踪 (MPPT)

光伏阵列输出电流与光照强度、温度和端电压有关, 设在参考条件下,  $I_{sc}$  为短路电流,  $V_{oc}$  为开路电压,  $I_m$ 、 $V_m$  为最大功率点电流和电压, 则当光伏阵列电压为  $V$ , 其对应点电流  $I$  为

$$I = I_{sc} (1 - C_1 (e^{\frac{V-DV}{C_2 V_{oc}}} - 1)) + DI \quad (1)$$

其中

$$C_1 = (1 - I_m / I_{sc}) e^{-\frac{V_m}{C_2 V_{oc}}} \quad (2)$$

$$C_2 = (V_m / V_{oc} - 1) / \ln(1 - I_m / I_{sc}) \quad (3)$$

$$DI = a \cdot S / S_{ref} \cdot DT + (S / S_{ref} - 1) \cdot I_{sc} \quad (4)$$

$$DV = -b \cdot DT - R_s \cdot DI \quad (5)$$

$$DT = T - T_{ref} \quad (6)$$

式中:  $S$  为光伏阵列倾斜面上的总太阳辐射;  $T$  为太阳电池温度;  $S_{ref}$ 、 $T_{ref}$  为太阳辐射和光伏电池温度参考值, 一般取为  $1 \text{ kW/m}^2$ ,  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ ;  $a$  为在参考日照下, 电流变化温度系数 ( $\text{Amps}/^\circ\text{C}$ );  $b$  为在参考日照下, 电压变化温度系数 ( $\text{V}/^\circ\text{C}$ );  $R_s$  为光伏阵列的串联电阻, 它受光伏组件的串并联数影响, 一般

只有几欧姆。

光伏阵列采用最大功率点跟踪策略, 保证光能得到最大的利用<sup>[12-13]</sup>。本文采用变步长扰动观察法, 通过给光伏阵列工作点电压施加扰动  $\alpha \cdot |dP/dV|$  ( $\alpha$  为系数), 同时记录扰动后的输出功率, 如果输出功率增加, 则保持原方向继续扰动, 否则反方向扰动, 最终使光伏阵列工作在最大功率点附近。该方法相较于固定步长扰动观察法满足了搜索的稳定性和快速性, 改善扰动观测的精度, 并且系统实现容易。BOOST 电路控制结构框图如图 4 所示。  $V_k$ 、 $I_k$  分别为光伏电池当前输出电压值和输出电流值。

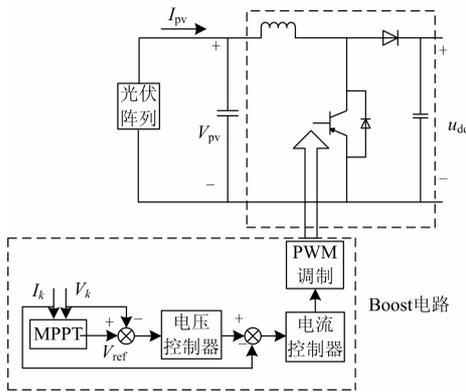


图 4 Boost 电路及其控制

Fig. 4 Boost circuit and its control

### 2.3 混合储能单元控制策略及其改进

由于系统采用直流母线连接的结构, 因此必须维持直流母线电压  $u_{dc}$  的稳定。

单一采用蓄电池作为储能设备时, 蓄电池为了维持直流母线电压恒定, 往往需要频繁的吸收和发出较大的功率, 且经常在充电与放电状态间切换<sup>[14-17]</sup>。采用蓄电池与超级电容器的混合储能方式能改善蓄电池的工作条件。

本文提出根据负载与光伏阵列输出功率差值来确定蓄电池充放电电流的改进控制策略, 相对于直流母线电压, 功率对于负载的变化更为敏感, 基于功率差值的电流控制策略更能快速平衡系统的瞬时功率。该控制策略能避免蓄电池在大电流高电压的情况下充放电, 及长期在充电与放电状态间切换所造成充放电电流的剧烈波动。

直流母线电压  $u_{dc}$  与各能量单元功率的关系为

$$C_{dc} u_{dc} \frac{du_{dc}}{dt} = P_{PV} - P_{Load} - P_{Storage} \quad (7)$$

式中:  $C_{dc}$  为直流母线电容;  $u_{dc}$  为直流母线电压;  $P_{PV}$  为光伏阵列输出功率;  $P_{Load}$  为负荷功率;  $P_{Storage}$  为混合储能单元需要调节的功率。

要使  $u_{dc}$  维持稳定, 就要使系统的功率达到平衡, 即

$$P_{Storage} = P_{PV} - P_{Load} \quad (8)$$

本文将控制直流母线电压恒定与系统功率平衡相结合。蓄电池控制框图如图 5 所示。将当前负载与光伏阵列输出的功率差  $\Delta P_k = P_{PV} - P_{Load}$  输入电流多滞环控制器, 输出蓄电池电流参考值  $I_{L1-ref}$  与实际蓄电池电流值  $I_{L1}$  进行比较, 误差  $e$  经过 PI 调节器, 通过 PWM 调制成 PWM 波, 从而驱动双向 DC-DC 变换电路开关开通或是关断, 实现电流  $I_{L1}$  对电流参考值  $I_{L1-ref}$  的无静差跟踪控制。蓄电池充电时控制开关  $S_1$ , 放电时控制  $S_2$ 。

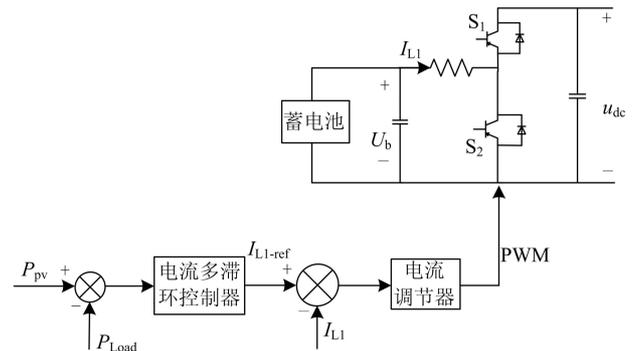


图 5 蓄电池控制框图

Fig. 5 Block diagram of battery control

蓄电池电流多滞环控制框图如图 6 所示。比较当前  $\Delta P_k$  与前一时刻  $\Delta P_{k-1}$  的值, 判断滞环曲线的方向; 根据当前功率差值的绝对值  $|\Delta P_k|$ , 并结合滞环曲线得出蓄电池参考电流的绝对值  $I$ , 通过比较功率差值  $\Delta P_k$  与 0 的大小关系, 确定蓄电池参考电流  $I_{L1-ref}$  的符号, 并发送到电流调节器。特别地, 当功率差值  $\Delta P_k \in (-P_1, P_1)$  时, 即功率差值较小时, 可仅由超级电容器调节, 蓄电池不工作。

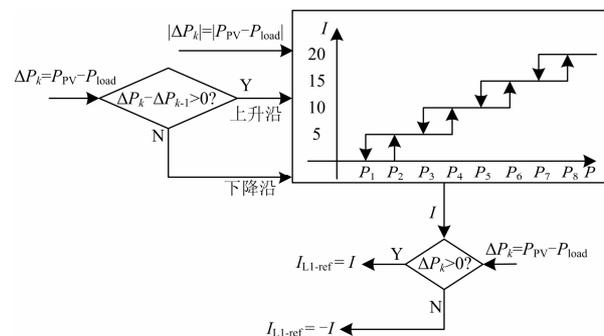


图 6 蓄电池电流多滞环调节策略框图

Fig. 6 Block diagram of battery current multi-hysteresis control strategy

超级电容器通过双向 DC/DC 变换电路并接在直流母线上, 由于超级电容器通过变换电路进行升压放电, 减少了所需单体电容器的个数, 从而节省了整个系统的成本。

通过对蓄电池的充放电控制, 蓄电池已调节了大部分光伏阵列输出功率与负载的差额功率, 但直流母线电压还无法维持在所要求的范围内。超级电容器采用维持直流母线电压恒定的双闭环控制策略, 完成剩余差额功率的调节。外环为直流母线电压控制环, 内环为超级电容器工作电流控制环, 维持直流母线电压与给定电压值  $u_{dc-ref}$  相等。控制框图如图 7 所示。直流母线电压  $u_{dc}$  与给定电压值  $u_{dc-ref}$  进行比较, 误差经电压调节器输出超级电容器参考电流  $I_{L2-ref}$ , 参考电流  $I_{L2-ref}$  与实际电流  $I_{L2}$  比较后误差  $e_2$  经电流调节器, 通过 PWM 调制成 PWM 波, 驱动双向 DC-DC 变换电路的开关。

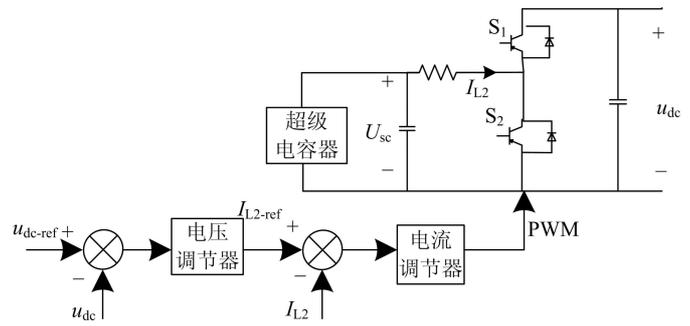


图 7 超级电容器控制策略框图

Fig. 7 Block diagram of supercapacitor control

### 3 动态仿真与分析

本文在 Matlab/Simulink 环境下对基于混合储能的光伏独立微网的能量单元及主要元件进行建模, 根据图 1 所示的网络结构搭建了该光伏微网的动态仿真模型, 如图 8 所示。在实现各能量单元的控制策略及其能量管理的相互协调配合的同时, 对基于混合储能的光伏独立微网的动态性能进行分析。

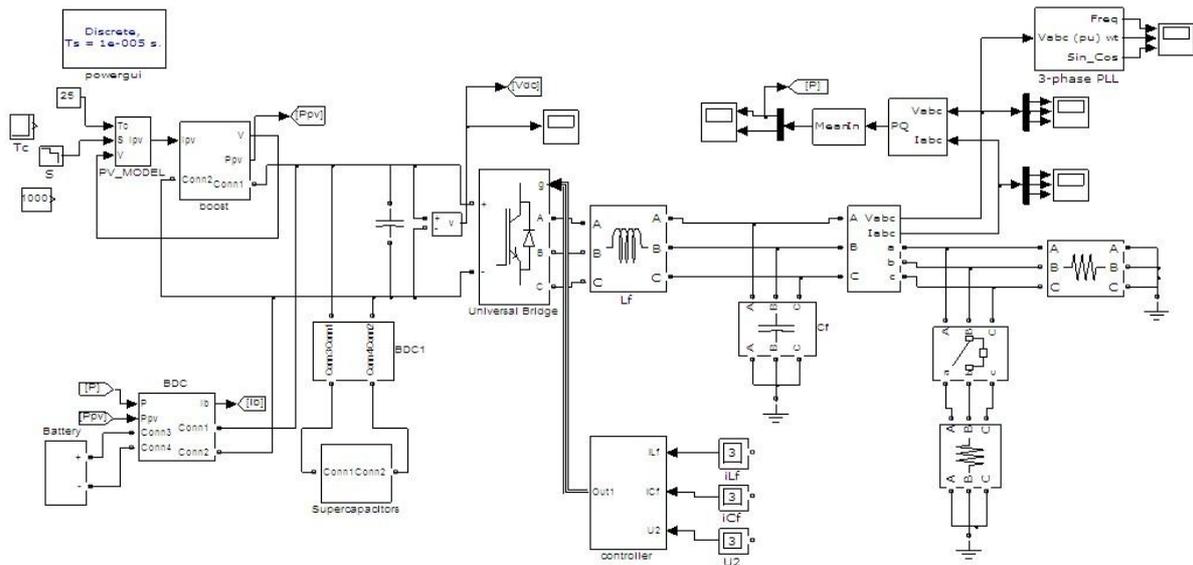


图 8 混合储能光伏微网系统仿真模型

Fig. 8 Simulation model of hybrid energy storage-based photovoltaic island microgrid

仿真参数如下: 光伏阵列额定容量为 16.85 kW, 蓄电池容量为 100 Ah, 额定电压 240 V, 超级电容器电容 10 F, 额定电压 250 V。直流母线电压 500 V, 交流母线为工频 220 V。设定光伏电池初始工作在温度为 25 °C, 光照为 1 000 W/m<sup>2</sup> 环境下, 在 0.4 s 处, 光照降低至 900 W/m<sup>2</sup>, 在 0.8 s 处光照降低至 700 W/m<sup>2</sup>, 光照强度及系统负荷如图 9 所示, 仿真时间为 1 s。

如图 10 为微网系统输出功率波形。曲线 1 为系统中蓄电池吸收或输出功率, 曲线 2 为光伏阵列输出功率与负荷功率差。从图中可以看出, 蓄电池实时调节了大部分光伏阵列输出功率与负荷功率的差值, 剩余的功率差由超级电容器进行调节, 曲线 3 为超级电容器输出功率。

如图 11 所示, 曲线 1 为采用混合储能方式的蓄电池充放电电流波形, 曲线 2 为单一采用蓄电池作为储

能设备时蓄电池的充放电电流，正值为充电电流，负值为放电电流。从中可以看出单一采用蓄电池作为储能设备时，蓄电池充放电电流波动大，常在充电与放电状态间切换，这对蓄电池是不利的。当采用混合储能方式时，蓄电池根据负载、光伏电池的状况和系统指令以分段恒流的方式充放电，蓄电池充放电电流波动小，且不会引起过放电及过充电，实现对蓄电池充放电的灵活控制，优化蓄电池的工作过程，延长使用寿命。

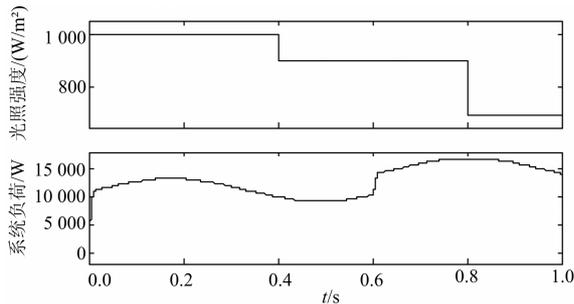


图 9 光照强度及系统负荷  
Fig. 9 Light intensity and system load power

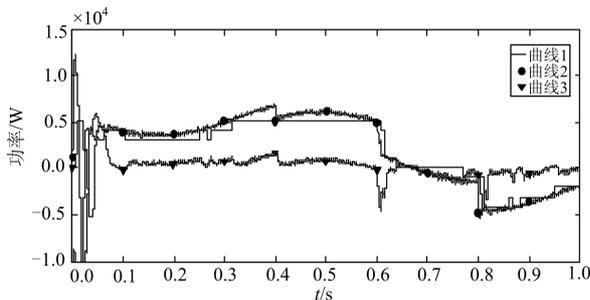


图 10 微网系统输出功率  
Fig. 10 Output active power of microgrid

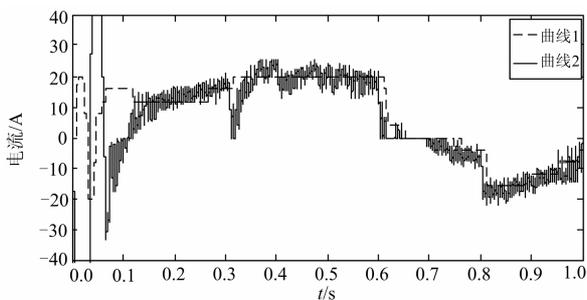


图 11 蓄电池充放电电流波形  
Fig. 11 Battery charging and discharging current waveform

如图12为采用蓄电池储能及采用混合储能时系统输出的有功功率，曲线1为采用本文设计的混合储能时系统输出功率，曲线2为系统负荷曲线，曲线3为采用单一蓄电池储能时系统输出功率。从图上可

以看出，曲线1与曲线2几乎重合，表明采用本文设计的混合储能系统能更加快速精准的跟踪负荷的波动，有效实现了微网的瞬时功率平衡，提高了微

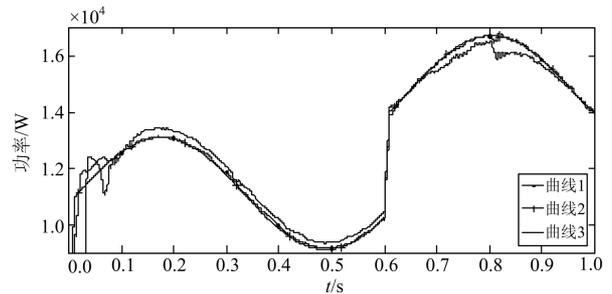


图 12 蓄电池储能及混合储能时系统输出有功功率  
Fig. 12 Output active power of battery energy storage and hybrid energy storage system

网运行的稳定性。

以上都属于系统功率差值较大情况下的仿真，但系统功率差值通常处于较小的范围。图 13 为系统中功率差值较小时，蓄电池和超级电容器的出力情况。从图可以看出，在功率差值较小时，系统仅由超级电容器调节功率差，蓄电池不工作，这样可以减少蓄电池处于工作状态的时间，从而提高蓄电池的使用寿命。

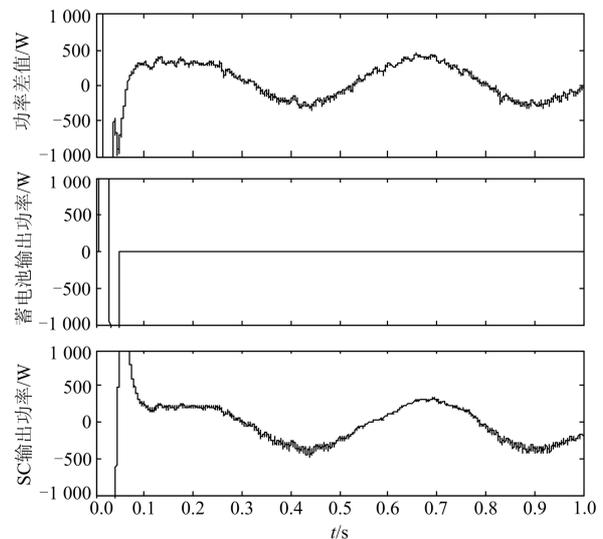


图 13 功率差值较小情况下储能系统输出功率  
Fig. 13 Output power energy of storage system under small power difference

如图 14 所示，设定在 0.6~0.62 s、0.8~0.82 s 时，系统负荷有短时的波动，曲线 1 为蓄电池储能系统输出功率；曲线 2 为混合储能系统输出功率。从图中可以看出，蓄电池储能由于其自身的限制，无法快速响应负荷的变化，且输出功率有限，不能

满足负载功率小扰动情况下的需求, 采用混合储能方式时, 提高了系统峰值功率, 满足系统功率的波动。

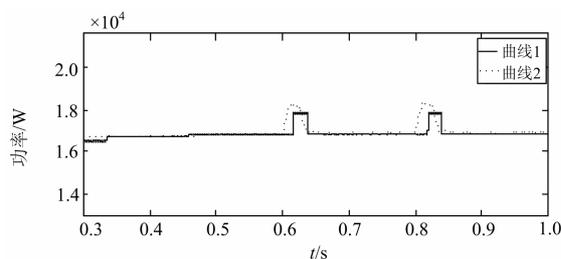


图 14 小扰动情况下储能单元输出有功功率

Fig. 14 Output active power of storage unit under small perturbation

## 4 结论

针对光伏微网系统能量的间歇性和波动性, 提出了采用蓄电池与超级电容器相结合的混合储能系统。由于混合储能系统综合了蓄电池及超级电容器的优点, 使微网能迅速平衡瞬时功率, 维持系统自身电压和频率恒定, 保证孤网运行的稳定性。在蓄电池控制策略上本文提出了功率跟踪多滞环电流控制, 实时跟踪功率需求的变化, 灵活调整蓄电池充放电电流, 避免了蓄电池经常在充电与放电状态间切换, 以及蓄电池大功率的充放电。该方法有利于提升蓄电池的使用寿命。仿真结果也表明本文提出的光伏微网孤网系统结构及其控制策略的有效性。本文的不足之处在于蓄电池在充电过程中始终采用恒流模式, 因此如何优化蓄电池充电过程, 提高充电时间的问题有待进一步深入研究。

## 参考文献

- [1] 张冰冰, 邱晓燕, 刘念, 等. 基于混合储能的光伏波动功率平抑方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(19): 103-109.  
ZHANG Bing-bing, QIU Xiao-yan, LIU Nian, et al. Research on the method for balancing fluctuant PV power based on hybrid energy storage system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(19): 103-109.
- [2] 戴咏喜, 徐冲, 刘以建. 应用于脉冲负载的蓄电池和超级电容器混合储能的研究[J]. 通信电源技术, 2011, 28(4): 12-14.  
DAI Yong-xi, XU Chong, LIU Yi-jian. Research on battery/supercapacitor hybrid storage system applied to pulse load[J]. Telecom Power Technology, 2011, 28(4): 12-14.
- [3] 于芑, 赵瑜, 周玮, 等. 基于混合储能系统的平抑风电

波动功率方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(24): 35-40.

- YU Peng, ZHAO Yu, ZHOU Wei, et al. Research on the method based on hybrid energy storage system for balancing fluctuant wind power[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(24): 35-40.
- [4] 张慧妍. 超级电容器直流储能系统分析与控制技术研究[D]. 北京: 中科院电工研究所, 2006.  
ZHANG Hui-yan. Research on the analysis and control strategy of ultracapacitor DC storage energy system application[D]. Beijing: Institute of Electrical Engineering Chinese Academy of Sciences, 2006.
- [5] MOROZUMI S, NAKAMA H, INOUE N. Demonstration projects for grid-connection issues in Japan[J]. Elektrotechnik & Informations Technik, 2008, 125(12): 426-431.
- [6] 黄建华. 微电网运行控制与保护技术[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.  
HUANG Jian-hua. The micro-grid operation control and protection technology[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [7] 王成山, 肖朝霞, 王守相. 微网综合控制与分析[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 98-103.  
WANG Cheng-shan, XIAO Zhao-xia, WANG Shou-xiang. Synthetical control and analysis of microgrid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 98-103.
- [8] 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 Tian-jin, et al. Energy conversion and management for DC microgrid based on photovoltaic generation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 248-254.
- [9] 孔令国, 蔡国伟. 大规模并网光伏电站的逆变器控制方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(22): 57-63.  
KONG Ling-guo, CAI Guo-wei. Research on control method of inverters for large-scale grid-connected photovoltaic power system[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(22): 57-63.
- [10] 谢东, 张兴, 李善寿, 等. 基于逆变器的分布式发电系统反孤岛控制的小信号建模与分析[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 232-237.  
XIE Dong, ZHANG Xing, LI Shan-shou, et al. Small-

- signal modeling and analysis of anti-islanding control for inverter-based distributed generator system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 232-237.
- [11] 李勋, 朱鹏程, 杨荫福, 等. 基于双环控制的三相 SVPWM 逆变器研究[J]. 电力电子技术, 2003, 37(5): 30-32.  
LI Xun, ZHU Peng-cheng, YANG Yin-fu, et al. Study of the three-phase SVPWN inverter based on double loop control[J]. Power Electronics, 2003, 37(5): 30-32.
- [12] 才利存, 常忠廷. 太阳能并网发电系统的 MPPT 及孤岛检测技术[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(4): 119-138.  
CAI Li-cun, CHANG Zhong-ting. MPPT and anti-islanding of photovoltaic grid-connected system[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(4): 119-138.
- [13] YAU H T, LIANG Qin-cheng, HSIEH C T. Maximum power point tracking and optimal Li-ion battery charging control for photovoltaic charging system[J]. Computers & Mathematics with Applications, 2012, 64(5): 822-832.
- [14] 彭思敏, 窦真兰, 凌志斌, 等. 并联型储能系统孤网运行协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2013, 28(5): 128-134.  
PENG Si-min, DOU Zhen-lan, LING Zhi-bin, et al. Cooperative control for parallel-connected battery energy storage system of islanded power system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(2): 128-134.
- [15] 张国驹, 陈瑶, 唐西胜, 等. 基于波动特征参数的多类型储能协调控制[J]. 电工技术学报, 2013, 28(6): 271-276.  
ZHANG Guo-ju, CHEN Yao, TANG Xi-sheng, et al. Research on coordinated control strategy of multi-type energy storage based on fluctuation characteristic parameters[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(6): 271-276.
- [16] 朱松燃, 张勃然. 铅酸蓄电池技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1988: 323-326.  
ZHU Song-ran, ZHANG Bo-ran. Lead acid battery technology[M]. Beijing: China Machine Press, 1988: 323-326.
- [17] 李立伟, 邹积岩. 蓄电池放电能量并网装置[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(6): 80-83.  
LI Li-wei, ZOU Ji-yan. An instrument for connecting the discharge energy of battery to power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 80-83.

---

收稿日期: 2014-01-14; 修回日期: 2014-03-22

作者简介:

田慧雯(1990-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为微电网孤网运行与控制;

李咸善(1964-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制, 水电站仿真与控制;

陈铁(1975-), 男, 通信作者, 硕士, 讲师, 主要研究方向为水电站仿真与控制, 电力系统运行与控制。E-mail: 623845668@qq.com