

DOI:10.3969/j.issn.1674-1951.2020.04.005

# 光伏-混合储能微电网协调控制及经济性分析

Coordinated control and economic analysis on a PV-hybrid energy storage micro-grid system

王晗雯<sup>1</sup>, 鲁胜<sup>2</sup>, 周照宇<sup>3</sup>

WANG Hanwen<sup>1</sup>, LU Sheng<sup>2</sup>, ZHOU Zhaoyu<sup>3</sup>

(1. 国网宿迁供电公司, 江苏 宿迁 223800; 2. 国电南京自动化股份有限公司, 南京 210003;

3. 河海大学 能源与电气学院, 南京 211100)

(1.State Grid Suqian Power Supply Company, Suqian 223800, China; 2.Guodian Nanjing Automation Company Limited, Nanjing 210003, China; 3.College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China)

**摘要:**微电网黑启动电源的容量和出力不足会导致系统频率和电压失稳。为此,提出采用锂电池-铅酸电池混合储能系统(HESS)作为光储型微电网黑启动电源的协调控制方法。为提高孤岛微电网长期运行能力,以 HESS 调度指令的低频分量作为铅酸电池的功率指令,采用铅酸电池为 HESS 提供容量和功率支撑;锂电池为微电网提供电压和频率支撑,充分发挥锂电池寿命长和铅酸电池性价比高的特性。在此基础上,建立投资成本和运行维护成本的 HESS 成本模型。电力系统计算机辅助设计(PSCAD)仿真试验验证了所提策略的有效性。

**关键词:**光储微电网;混合储能系统;孤岛运行;黑启动;协调控制;铅酸电池;锂电池;光伏;风电

中图分类号:TM 732

文献标志码:A

文章编号:1674-1951(2020)04-0031-06

**Abstract:** Insufficient capacity and output of black-start power supply for micro-grid will lead to its frequency and voltage instability. Therefore, a hybrid energy storage system (HESS) within lithium batteries and lead acid batteries is proposed as the coordinated control method of the black-start power supply for photovoltaic and energy storage micro-grid. In order to improve the long-term operation of island micro-grid, the low-frequency component of an HESS dispatching command is taken as the power command of a lead-acid battery. Lead-acid batteries provide capacity and power support for the HESS for their high cost performance, while lithium batteries provide voltage and frequency support for the micro-grid for their long service lives. According to the characteristics of the batteries, the cost model including investment, operation and maintenance cost of an HESS is established. Power systems computer aided design (PSCAD) simulation tests can verify the effectiveness of the method proposed.

**Keywords:** photovoltaic and energy storage micro-grid; hybrid energy storage system; island operation; black start; coordinated control; lead-acid batter; lithium battery; photovoltaic power; wind power

## 0 引言

随着储能技术的成熟,电池储能较好的稳定性和灵活性使其成为了微电网黑启动电源的首选<sup>[1-4]</sup>。黑启动电源由传统抗干扰性和负荷跟踪性较好的微型燃气轮机、柴油发电机等向电池储能系统等分布式电源过渡<sup>[5]</sup>。

当前,储能系统与风力发电系统和光伏发电系统的协调工作,为系统运行提供电压和频率支撑,提升系统整体运行的可靠性和电能质量。通过为风电场配置一定容量的电池储能系统,可制定储能

型风电场作为电网黑启动电源的方案<sup>[6]</sup>。但是,目前主要还是采用单一储能系统的运行控制方案,存在性能单一和适用性低等不足,不利于储能容量和经济性的优化配置。

综合考虑上述问题,提出通过多类型储能相结合的混合储能系统(HESS)来提高储能系统的性能和适用性<sup>[6-7]</sup>。在多种储能子系统之间借助“能者多劳”的原则来提升系统的整体性能和经济性,现有的 HESS 研究主要针对系统功率波动抑制和功率平滑。文献[8]设计了一种模块化 HESS 集成架构,并提出相应的全局优化与局部分配相结合的双层能量管理策略,保证系统运行的稳定性和经济性;文献[9]提出了一种光伏最大功率点跟踪(MPPT)控制和 HESS 协调平抑光伏并网功率波动策略,通过光

收稿日期:2020-01-25;修回日期:2020-03-10  
基金项目:中央高校基本科研业务费专项资金(2017B16714)

伏和 HESS 的密切配合, 能有效地将光伏并网功率波动抑制在电网可接受范围内; 文献[10]提出采用超导磁储能与蓄电池混合储能最大程度地补偿风电场出口的功率波动, 实现风电场可靠并网。综上所述, 混合储能系统相比单一储能介质具有更加显著的性能优势, 发展大容量混合储能技术十分必要。

锂电池具有能量密度高、循环寿命长的优点, 但成本相对昂贵, 在微电网系统中通常用作黑启动电源, 为微电网提供电压和频率支撑<sup>[11-12]</sup>; 铅酸电池技术成熟、性价比高, 但因为循环寿命相对较短, 在微电网中常被用作电能存储<sup>[13-14]</sup>。

针对光储型微电网在孤岛运行过程中, 单一锂电池配置容量不足会带来的黑启动失败和系统失稳的问题<sup>[15-17]</sup>, 本文提出一种基于锂电池-铅酸电池混合储能的微电网协调控制策略及相应的经济性评价模型。光伏发电系统采用改进扰动观测法的 MPPT 控制, 在系统功率出现大幅值变化时, 通过跟踪负荷和光伏的功率变化, 动态调整铅酸储能的出力, 对锂电储能的容量和出力进行补充, 保证微电网运行的稳定性和经济性。通过电力系统计算机辅助设计(PSCAD)仿真结果验证了本文所提策略的有效性。

## 1 装置层控制策略

### 1.1 铅酸电池-锂电池混合储能系统

本文所提铅酸电池-锂电池混合储能系统完整结构如图 1 所示, 其包括铅酸电池子储能系统、锂电池子储能系统。铅酸电池子储能系统包括铅酸电池和对应的储能变流器, 锂电池子储能系统包括锂电池和对应的储能变流器, 2 个子储能系统在换流器交流侧并联。

铅酸电池储能和锂电储能的变流器分别采用定功率(PQ)控制和电压/频率(V/F)控制。PQ 控制分为功率外环控制器和电流内环控制器, 外环通过给定的有功功率和无功功率指令值得到内环电流指令值, 再通过内环控制器进行矢量电流跟踪, 实现对有功功率和无功功率的灵活解耦控制。V/F 控制通过电压外环实现系统电压的稳定控制, 内环控制器进行矢量电流跟踪; 采用锁相环实现系统频率的跟踪控制<sup>[18]</sup>。

### 1.2 自适应步长 P&O 的 MPPT 控制

光伏逆变器采用 MPPT 控制, 根据外界环境光照强度和温度自动调整光伏阵列的运行工作点, 使其输出功率尽量保持为最大值, 保证光能的高利用率。图 2 为光伏发电的控制系统, 控制器外环采用

MPPT 算法得到最大功率点时内环控制器的电流指令值, 再由内环电流控制器实现对电流的跟踪控制。

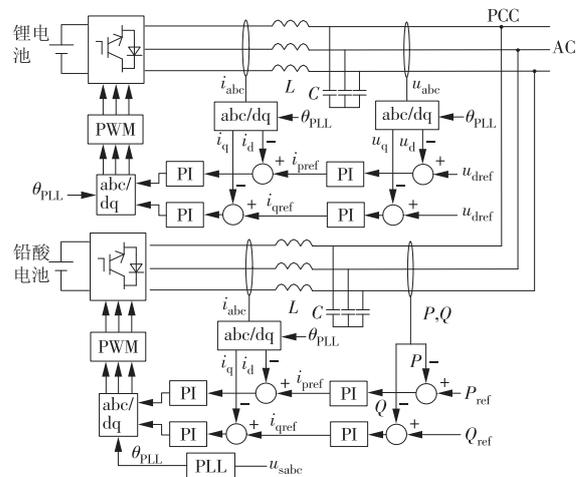


图 1 铅酸电池-锂电池混合储能系统

Fig. 1 The structure of an HESS within lead-acid batteries and lithium batteries

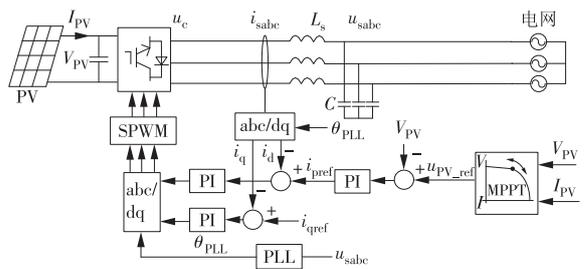


图 2 光伏发电的控制系统

Fig. 2 Photovoltaic generation control system

工程中应用较多的 MPPT 算法是扰动观测法(P&O), 其原理是在光伏工作电压上施加扰动, 实时采集光伏电压和电流的输出值, 对比扰动前后的功率变化, 动态调整光伏的工作电压, 使光伏阵列稳定工作在最大功率点附近。

扰动施加的步长很大程度上影响系统跟踪最大功率点的速率, 在最大功率点处不可避免地存在振荡状态。针对这一问题, 提出变步长和设定门限值的方式对传统的扰动观测法进行改进, 当系统工作点距离最大功率点较远时采用较大步长跟踪; 当系统工作点距离最大功率点较近时采用小步长跟踪; 当系统输出变化在门限值之内时停止施加扰动, 保证输出的稳定性。

图 3 为均匀光照下光伏电池的 P-U 特性曲线, M 点为最大功率点。

设输出功率相对于电压的变化率为  $\kappa, W/V$ :

$$\kappa = \frac{dP}{dU}, \tag{1}$$

由图 3 可知, 当外界条件不变的情况下, 最大功率点左侧的  $\kappa < 0$ , 最大功率点右侧的  $\kappa > 0$ , 只有在最大功

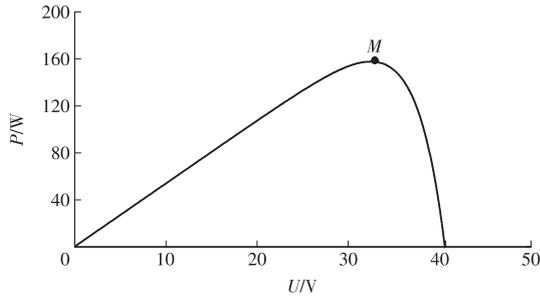


图3 均匀光照下光伏电池的P-U特性曲线

Fig. 3 P-U curve of PV cells under uniform illumination

率点处 $\kappa=0$ ,且越靠近M点 $\kappa$ 越接近0,越远离M点 $\kappa$ 越大,采用此特性,实现系统扰动步长的自适应调节。

设扰动步长为

$$\Delta t = \Delta t_{\text{int}} \times |\kappa| \quad |\kappa| \geq \kappa_{\text{min}}, \quad (2)$$

式中: $\Delta t_{\text{int}}$ 为步长初始值,s; $\kappa_{\text{min}}$ 为扰动动作的门限值。当 $|\kappa| < \kappa_{\text{min}}$ 时,系统停止施加扰动,设置 $\Delta t_{\text{int}}$ 为0.02 s, $\kappa_{\text{min}}$ 为0.017。

## 2 系统层控制策略

在实际微电网工程中,由于锂电池成本较大,配置大容量的锂电池储能会提高投资成本,在运行过程中,仅以锂电池作为黑启动电源,其容量低或出力不足,将会导致黑启动失败或系统失稳<sup>[19]</sup>。

在铅酸电池和锂电池 HESS 中,针对锂电池储能系统能量密度高、循环寿命长的特点,用于抑制小幅值高频的功率波动;针对铅酸电池循环寿命相对较短,但性价比高的特点,将其用于大幅值低频功率波动调节,避免铅酸电池频繁充放电,为 HESS 提供容量和功率支撑。

具体控制原理:光伏逆变器采用 MPPT 控制,锂电池采用 V/F 控制,铅酸电池储能通过对负荷功率和光伏出力的跟踪,动态调整铅酸电池储能的出力值。

微电网孤岛运行,由系统功率平衡原理可得表达式

$$P_{\text{Li}}(t) + P_{\text{Pb}}(t) + P_{\text{PV}}(t) = P_{\text{load}}(t), \quad (3)$$

式中: $P_{\text{Pb}}(t)$ 为铅酸电池储能系统的出力,kW; $P_{\text{Li}}(t)$ 为锂电池储能系统的出力,kW; $P_{\text{PV}}(t)$ 为光伏有功出力,kW; $P_{\text{load}}(t)$ 为系统的有功负荷需求,kW。

由系统功率平衡可知 HESS 的充放电功率表达式为

$$P_{\text{HESS}}(t) = P_{\text{PV}}(t) - P_{\text{load}}(t), \quad (4)$$

HESS 的充放电功率主要由铅酸电池子储能系统和锂电池子储能系统的出力组成,

$$P_{\text{HESS}}(t) = P_{\text{Pb}}(t) + P_{\text{Li}}(t). \quad (5)$$

将 HESS 充放电功率进行低通滤波器滤波,得到低频分量作为铅酸电池储能的功率指令值,本文以一阶低通滤波器为例,得铅酸电池储能的功率指令值与 HESS 充放电功率之间的关系为

$$P_{\text{Pb}}(s) = \frac{1}{1 + sT} P_{\text{HESS}}(s), \quad (6)$$

式中: $s$ 为微分算子; $T$ 为滤波时间常数,s。 $T$ 根据系统运行的状态通常设置为秒级或分钟级。

将式(6)中的 $s$ 用 $d/dt$ 表示,设 $\Delta T$ 为计算步长,s。进行差分后得到其离散型迭代形式

$$P_{\text{Pb}}(t) = \frac{T}{T + \Delta T} P_{\text{Pb}}(t - 1) + \frac{T}{T + \Delta T} P_{\text{HESS}}(t), \quad (7)$$

由式(7)可知, $P_{\text{Pb}}(t)$ 缓慢跟随 $P_{\text{HESS}}(t)$ 变化,呈低频波动,符合铅酸电池储能特性。

图4为铅酸电池出力控制流程图,Limit模块为最大充放电功率限制保护,当铅酸电池的充放电功率超过最大充放电功率限制时,则将其充放电功率限定为储能系统最大充放电功率限制值。图中LPF为低通滤波器。

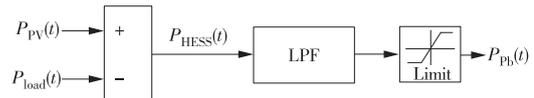


图4 铅酸电池出力控制流程

Fig. 4 Output control flow of a lead-acid battery

## 3 HESS 成本分析

储能的全寿命周期成本包括投资成本、运行成本、报废处理成本,以及回收残值等。本文主要考虑系统的投资成本和运行成本,对 HESS 的功率配置和容量配置进行经济性分析,不考虑回收残值等。

投资成本包括储能变流器的单位功率投资成本和电池本体单位容量投资成本,其模型表达式为

$$C_{\text{inv\_HESS}} = C_{\text{pinv\_Li}} P_{\text{rate\_Li}} + C_{\text{einv\_Li}} E_{\text{rate\_Li}} + C_{\text{pinv\_Pb}} P_{\text{rate\_Pb}} + C_{\text{einv\_Pb}} E_{\text{rate\_Pb}}, \quad (8)$$

式中: $C_{\text{pinv\_Pb}}$ 和 $C_{\text{pinv\_Li}}$ 分别为铅酸电池储能和锂电池储能单位功率投资成本,元/kW; $C_{\text{einv\_Pb}}$ 和 $C_{\text{einv\_Li}}$ 为铅酸电池储能系统和锂电池储能系统单位容量投资成本,元/(kW·h); $P_{\text{rate\_Pb}}$ 和 $P_{\text{rate\_Li}}$ 为铅酸电池储能和锂电池储能额定功率,kW; $E_{\text{rate\_Pb}}$ 和 $E_{\text{rate\_Li}}$ 为铅酸电池储能和锂电池储能额定容量,kW·h。

系统运行阶段系统的维护成本为

$$C_{\text{com\_HESS}} = C_{\text{com\_Pb}} W_{\text{ess\_Pb}} + C_{\text{com\_Li}} W_{\text{ess\_Li}}, \quad (9)$$

式中: $C_{\text{com\_Pb}}$ 和 $C_{\text{com\_Li}}$ 为铅酸电池储能和锂电池储能单位电量的运行维护成本,元/(kW·h); $W_{\text{ess\_Pb}}$ 和 $W_{\text{ess\_Li}}$ 为铅酸电池储能和锂电池储能的充放电容量,kW。

综上可得铅酸电池与锂电池 HESS 的成本表达式为

$$C_{\text{HESS}} = C_{\text{inv\_HESS}} + C_{\text{com\_HESS}}, \quad (10)$$

式中:  $C_{\text{inv\_HESS}}$  为投资成本, 元;  $C_{\text{com\_HESS}}$  为系统运行阶段系统的维护成本, 元。

## 4 算例分析

### 4.1 算例说明

为验证上述所提策略的有效性, 以某园区微电网为例, 在 PSCAD 软件上搭建微电网仿真系统。该微电网侧式系统拓扑如图 5 所示, 图中分布式光伏的装机容量为 260 kW, 锂电池储能的装机规模为 30 kW/20 kW·h, 铅酸电池储能的装机容量为 30 kW/120 kW·h。DC/AC 为变流器; PCC 为公共连接点。

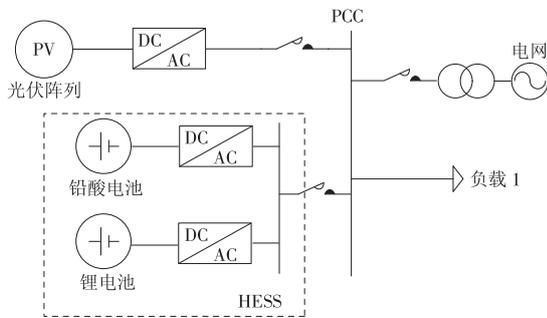


图 5 测试系统拓扑

Fig. 5 Test system topology

分别采用单一储能和混合储能的方式进行微电网孤岛运行试验, 对比 2 种策略下系统运行的稳定性和经济性。具体策略制定如下。

策略 1: 采用文献[20]提出的单一锂电池储能作为黑启动电源。

策略 2: 采用本文所提的铅酸电池-锂电池 HESS 作为黑启动电源, 滤波时间常数  $T$  为 1 s。

仿真运行周期设定为 30 s, 系统频率为 50 Hz, 环境温度恒定为 25 °C, 光伏发电系统采用 MPPT 控制, 输出功率随光照强度和环境温度变化, 光伏出力曲线和负荷曲线如图 6 所示。

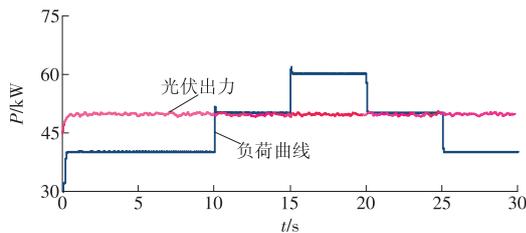


图 6 光伏出力曲线和负荷曲线

Fig. 6 The curve of relationship between PV output and load

### 4.2 可行性验证

策略 1 仅依靠单一锂电池储能进行功率平衡,

储能系统出力曲线如图 7 所示, 在该策略下, 当负荷发生大幅值变化或长时间运行在较大功率平衡差值状态时, 需要配置较大容量的锂电池来维持系统稳定运行; 策略 2 则是同时依靠铅酸电池和锂电池进行功率支撑, 储能系统出力曲线如图 8 所示, 当系统功率不平衡时, 锂电池储能快速响应, 平抑功率波动, 维持系统功率平衡, 铅酸电池储能系统功率缓慢响应, 同时锂电池功率逐渐下降到 0。稳态时铅酸电池提供全部的等效功率, 实现了动态功率分配。从而有效减少了锂电池出力, 降低对锂电池容量配置的需求。

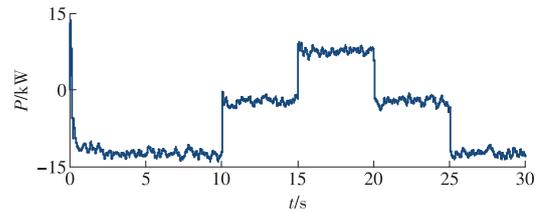


图 7 单一锂电池出力曲线

Fig. 7 Output curve of a single lithium battery

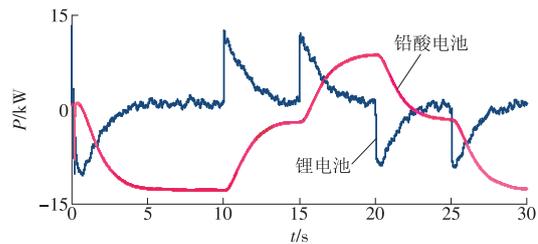


图 8 混合储能系统出力曲线

Fig. 8 Output curve of a hybrid energy storage system

HESS 中铅酸电池子储能系统出力和锂电池子储能系统出力的频率分布如图 9 所示。由图可知, 在系统功率平衡和调压调频的过程中, 锂电池主要承担频率较高的功率波动, 铅酸电池主要承担低频的功率波动, 满足协调控制算法的设计目标。

由于有锂电池的暂态功率支撑, 使得 HESS 充放电切换时铅酸电池的功率曲线变得平滑, 充分发挥了二者功率特性的互补优势。

### 4.3 经济性验证

铅酸电池储能系统和锂电池储能系统的经济性指标见表 1。

表 1 储能系统成本参数

Tab. 1 Cost parameters of an energy storage system

| 参数  | 铅酸电池    | 锂电池     |
|---|---------|---------|
| $C_{\text{pinv}}/(\text{元} \cdot \text{kW}^{-1})$                 | 2 300   | 2 500   |
| $C_{\text{em}}/[\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$  | 640     | 1 500   |
| $C_{\text{com}}/[\text{元} \cdot (\text{kW} \cdot \text{h})^{-1}]$ | 0.013 4 | 0.014 1 |

以 24 h 为 1 个运行周期为例, 系统稳定运行所需配置的额定容量  $E_{\text{rate}}$ 、额定功率  $P_{\text{rate}}$ 、充放电电量

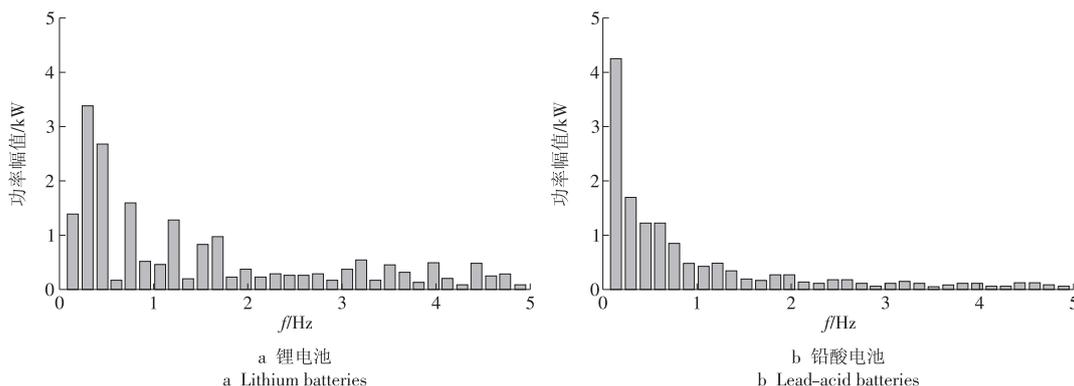


图 9 子储能系统出力频率分布

Fig. 9 Output and frequency distribution of an energy-storage subsystem

$W_{ess}$ ,以及储能系统的经济成本  $C_{inv}$ 见表 2。

表 2 2种策略下储能所需配置和成本

Tab. 2 Configurations and costs of energy storage with two strategies

| 项目                      | 策略 1    |         | 策略 2  |
|-------------------------|---------|---------|-------|
|                         | 锂电池     | 铅酸电池    | 锂电池   |
| $P_{rate}/kW$           | 14.22   | 12.75   | 12.15 |
| $E_{rate}/(kW \cdot h)$ | 135.07  | 120.96  | 16.42 |
| $W_{ess}/kW$            | 198.14  | 171.07  | 72.29 |
| $C_{inv}/元$             | 238 158 | 161 748 |       |

对比表 2 中数据可见:策略 1 所需的锂电池储能容量和充放电电量大于策略 2,主要原因是策略 2 通过控制铅酸电池出力,降低了对锂电池容量和额定功率的需求;策略 2 的储能成本低于策略 1,原因是相对于锂电池储能,铅酸电池储能性价比更高。

综上所述,在孤岛微电网的运行中,采用本文所提的 HESS 协调控制策略能有效降低系统运行过程对黑启动电源出力和容量的需求,进而提升系统的运行稳定性。同时,相比于单一储能系统,HESS 协调控制策略能降低微电网的经济成本,提升经济收益,证明了本文所提策略的可行性。

### 5 结论

本文详细阐述了铅酸电池-锂电池 HESS 的拓扑结构,以及装置层控制策略,改进了传统 P&O 的光伏发电系统的 MPPT 控制策略;并基于锂电池和铅酸电池 HESS 理论,提出了一种光储型微电网孤岛运行的协调控制方案,通过实际微电网数据仿真试验表明:

(1)运行稳定性高。相比单一储能的黑启动电源,所提 HESS 策略能有效降低微电网对黑启动电源的容量和出力的需求,提高微电网在黑启动和孤岛运行的稳定性。

(2)经济收益高。铅酸电池和锂电池 HESS 能有效降低微电网黑启动电源系统所需配置的容量和额定功率,减少锂电池储能的出力。有效降低微电网的投资成本和运行成本,提升微电网的经济收益。

### 参考文献:

[1]刘坤.基于分布式发电的微电网黑启动设计与实现[J].现代电子技术,2016,39(13):140-144.  
LIU Kun.Design and implementation of microgrid black start based on distributed generation [J]. Modern Electronics Technique,2016,39(13):140-144.

[2]米阳,纪宏澎,何星塘,等.多储能独立直流微电网自适应分级协调控制[J].中国电机工程学报,2018,38(7):1980-1989.  
MI Yang, JI Hongpeng, HE Xingtang, et al. Adaptive hierarchical coordinated control of multi-energy storage in isolated DC microgrid[J].Proceedings of the CSEE,2018,38(7):1980-1989.

[3]THALE S S, AGARWAL V.Controller area network assisted grid synchronization of a microgrid with renewable energy sources and storage[J].IEEE Transactions on Smart Grid,2015,7(3):1.

[4]YI Z, DONG W, ETEMADI A H. A unified control and power management scheme for PV - battery - based hybrid microgrids for both grid-connected and islanded modes [J]. Smart Grid IEEE Transactions on,2018,9(6):5975-5985.

[5]李新军,杨超,顾雪平,等.柴油发电机辅助的风电场黑启动过程及频率控制[J].电网技术,2018,42(6):1853-1859.  
LI Xinjun, YANG Chao, GU Xueping, et al.Study on black-start process and frequency control of wind farms assisted with diesel generator[J].Power System Technology,2018,42(6):1853-1859.

[6]刘力卿,杜平,万玉良,等.储能型风电场作为局域电网黑

- 启动电源的可行性探讨[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(21):210-216.
- LIU Liqing, DU Ping, WAN Yuliang, et al. Feasibility discussion on using storage-based wind farm as black-start power source in local power grid[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(21):210-216.
- [7] 周建宇, 闫林芳, 刘巨, 等. 基于一致性理论的直流微电网混合储能协同控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23):6837-6846.
- ZHOU Jianyu, YAN Linfang, LIU Ju, et al. A cooperative control strategy for DC microgrid based on consensus algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23):6837-6846.
- [8] 钟国彬, 吴涛, 曾杰, 等. 基于离散傅里叶变换的主动配电网混合储能容量优化配置[J]. 电力建设, 2018, 39(8):85-93.
- ZHONG Guobin, WU Tao, ZENG Jie, et al. Optimal capacity planning of hybrid energy storage system in active distribution network on the basis of discrete fourier transform [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(8):85-93.
- [9] 苏浩, 张建成, 冯冬涵, 等. 模块化混合储能系统及其能量管理策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(1):127-133, 140.
- SU Hao, ZHANG Jiancheng, FENG Donghan, et al. Modular hybrid energy storage system and its energy management strategy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(1):127-133, 140.
- [10] 马伟, 王玮, 吴学智, 等. 平抑光伏并网功率波动的混合储能系统优化调度策略[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(3):58-66.
- MA Wei, WANG Wei, WU Xuezhi, et al. Optimal dispatching strategy of hybrid energy storage system for smoothing power fluctuation caused by grid-connected photovoltaic [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(3):58-66.
- [11] 刘仲, 牟龙华, 许旭锋. 微电网黑启动中考虑负荷恢复优化的分布式电源恢复方案[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3):46-52.
- LIU Zhong, MU Longhua, XU Xufeng. Microgrid black-start considering DG startup sequence and load restoration optimization [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3):46-52.
- [12] LUJANO - ROJAS J M, DUFO - LÓPEZ R, ATENCIO - GUERRA J L, et al. Operating conditions of lead-acid batteries in the optimization of hybrid energy systems and microgrids[J]. Applied Energy, 2016, 179(10):590-600.
- [13] CHUNG S K. A phase tracking system for three phase utility interface inverters [J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2000, 15(3):431-438.
- [14] ZHANG X, DU X, YIN Y, et al. Lithium-ion batteries: Charged by triboelectric nanogenerators with pulsed output based on the enhanced cycling stability [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2018, 10(10):8676-8684.
- [15] 雷勇, 林晓冬. 超导磁储能-蓄电池混合储能系统在平抑风电场功率波动中的应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(3):983-992.
- LEI Yong, LIN Xiaodong. Application of hybrid energy storage system based on SMES and BESS in smoothing the power fluctuations of wind farms [J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(3):983-992.
- [16] 杨莘, 许志荣, 郑群儒, 等. 复杂拓扑结构光储型微电网黑启动策略[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15):142-149.
- YANG Ping, XU Zhirong, ZHENG Qunru, et al. Black start strategy of PV-ESS microgrid with complicated topology structure [J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15):142-149.
- [17] OLIVARES D E, CAÑIZARES C A, KAZERANI M. A centralized energy management system for isolated microgrids [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 5(4):1864-1875.
- [18] ZHANG Z, WANG J, WANG X. An improved charging/discharging strategy of lithium batteries considering depreciation cost in day-ahead microgrid scheduling [J]. Energy Conversion and Management, 2015, 105:675-684.
- [19] 王敏, 李想, 潘永春, 等. 微电网黑启动研究综述[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3):41-45, 59.
- WANG Ming, LI Xiang, PAN Yongchun. Overview of research on microgrid black-start [J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3):41-45, 59.
- [20] 牟龙华, 夏明栋, 刘仲. 孤立微网中微源的黑启动能力[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(12):1877-1882, 1887.
- MU Longhua, XIA Mingdong, LIU Zhong. Research on black-start capability of microsources in isolated microgrid [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(12):1877-1882, 1887.

(本文责编:张帆)

#### 作者简介:

王晗雯(1993—),女,江苏宿迁人,工学硕士,从事微电网、可再生能源发电等相关工作(E-mail:sheng-lu@sac-china.com)。

鲁胜(1992—),男,安徽芜湖人,工学硕士,从事微电网、主动配电网、可再生能源发电等相关工作。