DOI：10.13234/j.issn.2095-2805.2025.8.284 **中图分类号**：TM743 **文献标志码**：A

基于混合储能荷电状态监测的直流微网能量管理策略

张 帅(中国电源学会学生会员)，张继红，王庆宇，吴振奎，张自雷
(内蒙古自治区光热与风能发电重点实验室(内蒙古科技大学自动化与电气工程学院)，包头 014010)

摘要：针对单一储能系统在功率与能量需求上的不足及管理效率低、经济性差的问题，分析了储能滤波时间常数对工作效率的影响，重点研究了传统混合储能分频控制方法并提出1种基于荷电状态监测的多模式协调控制策略。通过动态调整滤波时间常数和划分储能不同工作区域，实现直流微网中储能功率分配的灵活性，提升工作效率；同时，根据源-荷功率差及储能荷电状态，设计4种运行模式，优化源-荷-储协调控制策略，减少电池充放电次数，提升系统经济性。实际微网测试结果表明，所提控制策略效率更高、经济性更好，具有工程推广应用价值。

关键词：直流微网；混合储能；荷电状态；功率动态调整分配；能量管理

DC Microgrid Energy Management Strategy Based on Hybrid Energy Storage State-of-charge Monitoring

ZHANG Shuai, *Student Member*, *CPSS*, ZHANG Jihong, WANG Qingyu, WU Zhenkui, ZHANG Zilei
(Inner Mongolia Key Laboratory of Solar Thermal and Wind Power, School of Automation and Electrical Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Aimed at the shortcomings of one single energy storage system in terms of power and energy demand, as well as the problems of low management efficiency and poor economy, the impact of energy storage filtering time constant on the working efficiency is analyzed, with a focus on the traditional hybrid energy storage crossover control method. In addition, a multi-mode coordinated control strategy based on the monitoring of state-of-charge (SOC) is put forward. By dynamically adjusting the filtering time constant and dividing the energy storage into different working areas, the flexibility of energy storage power allocation in DC microgrids is realized to improve the working efficiency. At the same time, according to the source-charge power difference and the SOC of energy storage, four operation modes are designed to optimize the source-charge-storage coordinated control strategy, so as to reduce the number of battery charging and discharging times and improve the system economy. The results of actual microgrid tests show that the proposed control strategy has a higher efficiency and better economy, indicating its value for engineering popularization and application.

Keywords: DC microgrid; hybrid energy storage; state-of-charge (SOC); dynamic adjustment of power allocation; energy management

收稿日期：2024-07-03；**修回日期**：2024-08-13，2024-09-10；**录用日期**：2024-09-29；**网络首发日期**：2024-10-14
基金项目：内蒙古自治区重点研发与成果转化资助项目(2022YFHH0019)；内蒙古自治区科技攻关大平台建设资助项目(2023PTXM001)；中央引导地方科技发展资金资助项目(2023ZY0020)
This work is supported by Inner Mongolia Autonomous Region Key R&D and Achievement Transformation Project under the grant 2022YFHH0019; Inner Mongolia Autonomous Region Science and Technology Tackling Large Platform Construction Project under the grant 2023PTXM001; Centralized Guidance of Local Science and Technology Development Funds Project under the grant 2023ZY0020

目前，气候变化对全人类生存与经济的快速发

展构成严峻挑战。我国是能源消费大国，也是碳排放大国，电力系统二氧化碳排放量大约占能源行业总量的 42%[1]。加快电力系统的低碳转型是解决日益增长的电力需求与环境污染矛盾的关键举措。其中，构建新型电力系统不仅可以持续增加绿色电力供应，而且对于确保电网的安全性、可靠性、灵活性具有较强的后备支撑功能。然而，绿色环保的新能源发电存在较大的随机性、波动性和不可预测性，目前的解决办法虽然较多，但学术界主流思想还是构建微电网和配置储能方案[2]。

针对光伏与混合储能组成的直流微网系统，不仅需要实现各微源间的协调控制和能量合理分配，而且需在平抑光伏功率波动的同时，考虑各储能设备的荷电状态 SOC(state-of-charge)，避免单个电池过充过放，使其更好地发挥混合储能系统的优势。目前，对于直流微网系统的研究主要集中于功率分配与荷电状态监控方面。文献[3]提出将微网中待平抑功率通过低通滤波器分解为 3 种(低、中、高)频段功率分量，以保证蓄电池减少充放次数；文献[4]提出在现有一阶分频的基础上，优化超级电容控制回路，增加电流补偿项，加快直流母线电压恢复速度；文献[5]提出划定储能系统不同的工况区域，依据系统功率切换直流微网的运行模式，提高源储利用效率；文献[6]提出下垂控制与 SOC 嵌套反正切函数结合，加快储能单元 SOC 均衡速度，避免系统稳定性受到影响；文献[7]提出基于自适应下垂控制的直流微网群协同策略，通过实时调整下垂系数，使各储能设备根据自身的 SOC 与容量合理分配功率；文献[8]提出双层设计，以混合储能能量管理策略优化上层模型，以智能算法合理配置混合储能系统，优化下层模型，确保微网稳定运行并达到最大化经济效益。

基于此，针对直流微网中光伏出力不稳定性和负荷随机投切所产生的功率波动问题，结合蓄电池与超级电容的优势，采用一阶滤波的方法将储能功率指令进行分解，实现对不同时间尺度功率波动的有效补偿。为防止超级电容 SOC 越限，需实时监测其 SOC 状态；为保证蓄电池的使用寿命，需尽可能地减少其充放电次数。因此，本文通过设置不同滤波常数以合理分配混合储能的出力；同时，为提升系统工作效率，结合光伏功率、负荷投切与混合储能 SOC 状态，设计了直流微网动态平衡的 4 种运行模式，避免出现单一储能的过充过放情况；最后通过工程实测数据检验了该策略的合理性。

1　微网系统建模与全寿命周期成本分析

1.1　微网系统建模

本文建立的光伏直流微网系统由分布式光伏阵列、蓄电池和超级电容组成的混合储能系统及直流负荷构成，母线电压为 600 V，系统结构如图 1 所示。图中：P_{pv} 为光伏阵列输出功率；P_{Load} 为负荷消耗功率；P_{hess} 为混合储能系统充放电功率，规定放电为正，反之为负。为提升发电效率，本文设计基于分步求导法的光伏最大功率跟踪 MPPT (maximum power point tracking)控制策略；协调控制系统重点对光伏单元、混合储能及负荷进行能量优化和分配。

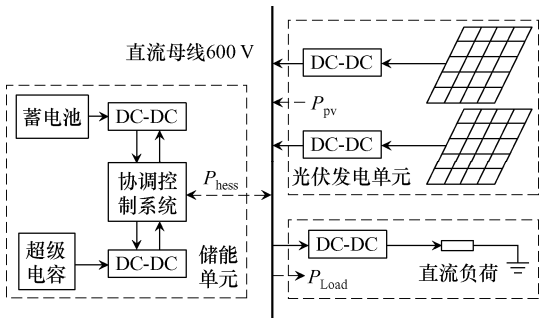


图 1　光伏直流微网系统结构

Fig. 1 Structure of PV DC microgrid system

在控制策略方面主要采用双层控制模式，即上层控制和下层控制。前者以稳定直流母线电压为主，并控制蓄电池和超级电容吸收和释放功率；后者主要实现光伏高效发电和蓄电池、超级电容器的优化配置，以满足能量管理需求为目标，对于光伏的控制，采取了 MPPT 和恒压 CV(constant voltage)2 种运行模式，根据实际需求进行无缝切换。

1.2 系统控制目标

系统孤岛运行时，为保障网内功率平衡，对混合储能功率进行约束，表达式为

$$P_{\text{hess}} = P_{\text{Load}} - P_{\text{pv}} \tag{1}$$

功率分配与平衡通过分频控制实现。其中，经低通滤波器 LPF(low pass filter)将混合储能系统充放电参考功率 $P_{\text{hess,ref}}$ 分为高频 $P_{\text{sc,ref}}$ 和低频 $P_{\text{bat,ref}}$，以适应不同储能元件特性，优化系统性能，即

$$\begin{cases} P_{\text{bat,ref}} = \dfrac{1}{Ts+1} P_{\text{hess,ref}} \\ P_{\text{sc,ref}} = P_{\text{hess,ref}} - P_{\text{bat,ref}} \end{cases} \tag{2}$$

式中：T 为低通滤波时间常数；s 为微分算子。

同时，提出基于超级电容的功率补偿环节，即应对功率波动时，若蓄电池响应速度不足，导致功率补偿滞后，I_{bat} 为蓄电池实际电流，则蓄电池系统的误差功率 $P_{\text{bat,err}}$ 为

$$P_{\text{bat,err}} = (I_{\text{bat,ref}} - I_{\text{bat}})U_{\text{bat}} \tag{3}$$

式中：$I_{\text{bat,ref}}$ 为蓄电池参考电流；U_{bat} 为蓄电池电压。

超级电容将主动补偿该缺失功率[3]和高频瞬态功率分量 $P_{\text{sc,ref}}$，则超级电容的参考电流 $I_{\text{sc,ref}}$ 为

$$I_{\text{sc,ref}} = \frac{P_{\text{sc,ref}}}{U_{\text{sc}}} + \frac{P_{\text{bat,err}}}{U_{\text{sc}}} = (I_{\text{dc,ref}} - I_{\text{bat,ref}}) + (I_{\text{bat,ref}} - I_{\text{bat}})\frac{U_{\text{bat}}}{U_{\text{sc}}} \tag{4}$$

式中：U_{sc} 为超级电容电压；$I_{\text{dc,ref}}$ 为母线电流参考值。

设计的控制系统结构如图 2 所示。

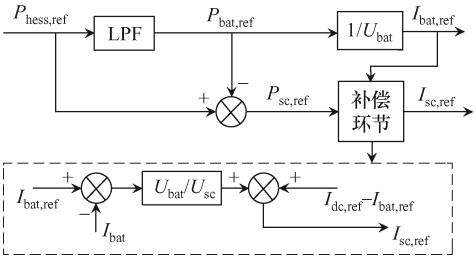


图 2 基于分频一次控制

Fig. 2 Primary control based on crossover

1.3 全寿命周期经济分析

因储能系统价格昂贵，所以光伏直流微网混合储能容量配置满足系统运行的同时，需考虑经济最优。根据 IEC 60300-3-3 标准，将目标函数设为最优全寿命周期成本费用。本文对全寿命周期费用的定义[9]为

$$\begin{cases} C = \min(C_{\text{G}} + C_{\text{C}} + C_{\text{W}}) \\ C_{\text{G}} = N_{\text{bat}} C_{\text{bat}} f_{\text{Gbat}} + N_{\text{sc}} C_{\text{sc}} f_{\text{Gsc}} \\ C_{\text{W}} = N_{\text{bat}} C_{\text{bat}} f_{\text{Wbat}} + N_{\text{sc}} C_{\text{sc}} f_{\text{Wsc}} \\ C_{\text{C}} = N_{\text{bat}} C_{\text{bat}} f_{\text{Cbat}} + N_{\text{sc}} C_{\text{sc}} f_{\text{Csc}} \end{cases} \tag{5}$$

式中：C_{G} 为初始投资成本；C_{C} 和 C_{W} 分别为系统运行和维护成本；N_{bat}、N_{sc} 分别为蓄电池和超级电容所需数量；C_{bat}、C_{sc} 为 2 类储能单价；f_{Gbat}、f_{Gsc} 为折旧因子；f_{Wbat}、f_{Wsc} 为维护系数；f_{Cbat}、f_{Csc} 为运行系数。

2 考虑超级电容 SOC 的能量管理策略

2.1 混合储能 SOC 功率约束

为保证混合储能系统安全高效运行，蓄电池和超级电容的 SOC 约束要求为其首要条件。因此，本文设计了 4 种工作区域的工作模式，见表 1。根据 P_{hess} 与储能单元 SOC 将蓄电池和超级电容划分为正常充电区、限制充电区、正常放电区与限制放电区。

表 1 蓄电池、超级电容工作区域

Tab. 1 Working areas of battery and supercapacitor

混合储能功率 P_{hess}	荷电状态 SOC_i	工作区域
$P_{\text{hess}}>0$	$0<\text{SOC}_i<\text{SOC}_{i,\min}$	限制放电区
	$\text{SOC}_{i,\min}\leqslant\text{SOC}_i\leqslant 1$	正常放电区
$P_{\text{hess}}<0$	$0<\text{SOC}_i<\text{SOC}_{i,\max}$	正常充电区
	$\text{SOC}_{i,\max}\leqslant\text{SOC}_i\leqslant 1$	限制充电区

实际上，仅考虑储能的 SOC 远远不够。因为超级电容能量密度较低，很容易达到其充电限值或放电限值，需对其制定合适的保护策略。另外，从分频控制的角度分析，滤波时间常数 T 决定滤波器对高频信号的抑制程度。T 减小，截止频率增大，通带范围增大，对高频信号抑制能力减弱，蓄电池需要承担的功率 P_{bat} 增大，超级电容需要承担的功率 P_{sc} 减小。因此，通过对滤波参数 T 的动态调整，可以更合理地管理储能系统的输出、输入功率，本文设计的动态调整功率分配结构如图 3 所示。

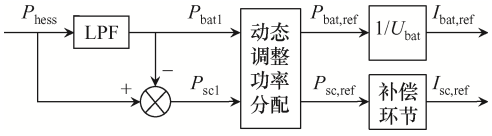


图 3　动态调整功率分配控制框图

Fig. 3 Control block diagram of dynamic adjustment of power allocation

基于超级电容的 SOC 状态，本文提出 1 种改进的能量管理策略，通过动态调整滤波时间常数 T 实现对超级电容和蓄电池的精细功率分配。T 被设定为 $T=T_0+\Delta T$，其中 T_0 为初始滤波时间常数，ΔT 为根据 SOC 状态调整的增量，T 的范围为$[T_0-\Delta T, T_0+\Delta T]$。通过图 4 所示的调整规则，按照超级电容的工作状态，划分为 5 个工作区域，每个区域具有特定的功率调整逻辑，对超级电容动态调整后的功率参考值 $P_{sc,ref}$进行调整。

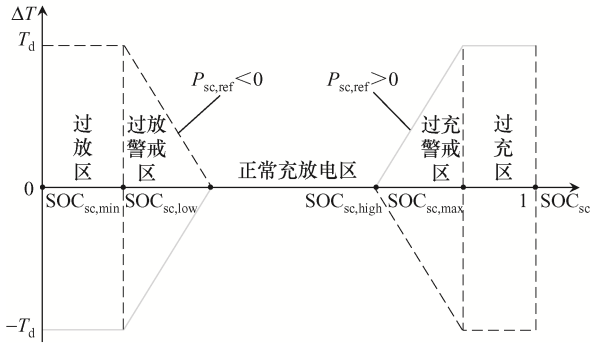


图 4　动态调整功率分配规则

Fig. 4 Rules for dynamic adjustment of power allocation

设定超级电容为负值时，处于充电阶段，其 SOC 接近充电上限，充电效率需降低，采用动态滤波常数 T 调整的方式，T 减小，超级电容充电功率 $P_{sc,ref}$减小，蓄电池充电功率 $P_{bat,ref}$增大；反之，超级电容的 SOC 接近放电下限，T 增大，超级电容充电功率 $P_{sc,ref}$增大，蓄电池充电功率 $P_{bat,ref}$减小；当储能单元均处于正常充放电区，$\Delta T=0$，$T=T_0$。从理论方面实现对超级电容的保护。

图 4 中：T_d为ΔT 的最大变化范围；$SOC_{sc,high}$、$SOC_{sc,low}$ 分别为超级电容器过度充、放电的限制值；$SOC_{sc,max}$为充电时超级电容器 SOC 的最大值；$SOC_{sc,min}$ 为放电时超级电容器 SOC 的最小值。$SOC_{sc,i}$代表 i 时刻的超级电容荷电状态，根据上述限制区，调整规则如下。

(1)过放保护区：当 $SOC_{sc,i}<SOC_{sc,min}$时，超级电容暂停放电，在允许的充电功率范围内，系统将采用 n 倍率充电策略来确保充电过程的稳定性。如果一次功率分配下超级电容参考值 $P_{sc1}>0$(P_{bat1} 为一次功率分配下蓄电池参考值)，则 $T=T_0-T_d$，此时

$$\begin{cases} P_{sc,ref}=0 \\ P_{bat,ref}=P_{hess,ref} \end{cases} \tag{6}$$

反之，$P_{sc1}<0$，$T=T_0+T_d$，则

$$\begin{cases} P_{sc,ref}=n\cdot P_{sc1} \\ P_{bat,ref}=P_{hess,ref}-P_{sc,ref} \end{cases} \tag{7}$$

(2)过放警戒区：当 $SOC_{sc,min}\leqslant SOC_{sc,i}\leqslant SOC_{sc,low}$时，需限制放电，但允许高倍率充电，使 $SOC_{sc,i}$快速恢复至正常充电区域。如果 $P_{sc1}<0$，则

$$\Delta T=\left(\frac{SOC_{sc,low}-SOC_{sc,i}}{SOC_{sc,low}-SOC_{sc,min}}\right)T_d \tag{8}$$

反之，$P_{sc1}>0$，则

$$\Delta T=-\left(\frac{SOC_{sc,low}-SOC_{sc,i}}{SOC_{sc,low}-SOC_{sc,min}}\right)T_d \tag{9}$$

(3)正常充放电区：滤波时间常数 T 无需改变，无需动态调整功率分配，则

$$\begin{cases} P_{sc1}=P_{sc,ref} \\ P_{bat1}=P_{bat,ref} \end{cases} \tag{10}$$

(4)过充警戒区：当 $SOC_{sc,high}\leqslant SOC_{sc,i}\leqslant SOC_{sc,max}$时，需限制充电，但允许 n 倍率放电，使 $SOC_{sc,i}$快速恢复至正常充电区域。如果 $P_{sc1}<0$，则

$$\Delta T=-\left(\frac{SOC_{sc,i}-SOC_{sc,high}}{SOC_{sc,max}-SOC_{sc,high}}\right)T_d \tag{11}$$

反之，$P_{sc1}>0$，则

$$\Delta T=\left(\frac{SOC_{sc,i}-SOC_{sc,high}}{SOC_{sc,max}-SOC_{sc,high}}\right)T_d \tag{12}$$

(5)过充保护区：当 $SOC_{sc,i}>SOC_{sc,max}$时，超级电容禁止充电，在允许的放电功率范围内，系统将采用 n 倍率放电策略来确保放电过程的稳定性。如果 $P_{sc1}<0$，$T=T_0-T_d$，则

$$\begin{cases} P_{\text{sc,ref}} = 0 \\ P_{\text{bat,ref}} = P_{\text{hess,ref}} \end{cases} \tag{13}$$

反之，$P_{\text{sc1}}>0$，$T=T_0+T_{\text{d}}$。

2.2 直流微网多模式运行策略

为优化光伏直流微网的运行稳定性和确保储能单元的长久耐用性，本文基于储能设备荷电状态设计4种运行模式，旨在确保光伏阵列在大多数情况下优先运行在 MPPT 模式，而在储能单元过充的情况下则切换到恒压模式，适度降低输出功率，以保护储能单元工作的稳定性，设计的控制规则如图 5 所示。

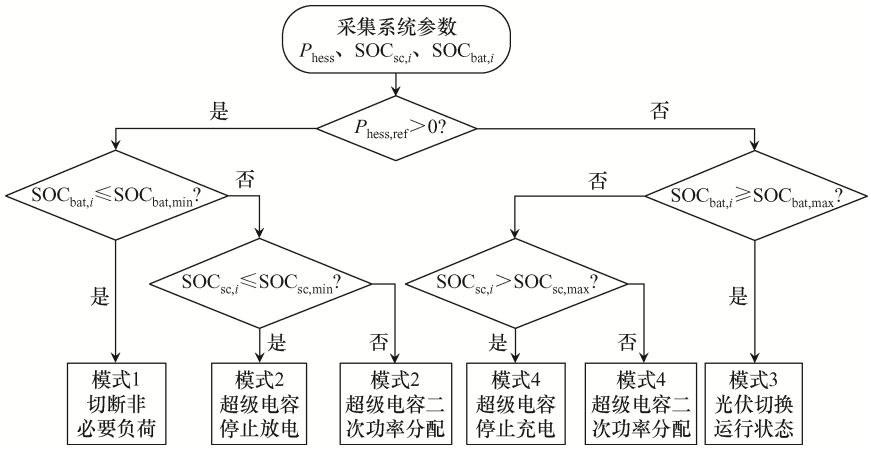


图 5 工作模式切换规则框图

Fig. 5 Block diagram of rules for operating mode switching

(1)放电阶段($P_{\text{hess}}>0$)，即系统能量不足。

模式 1：$\text{SOC}_{\text{bat},i}\leqslant\text{SOC}_{\text{bat,min}}$时，储能系统进入深度放电保护模式，蓄电池将停止放电保护自身，超级电容仅承担高频功率补偿的角色，但受限于其较小的能量密度，无法满足系统功率需求。此时，可引入外部电源以确保负载正常运行；或根据负载优先级，选择性地关闭非关键负载，以减少系统总需求，使光伏阵列的输出能够满足剩余负载的需求，并允许储能系统恢复 SOC。

模式 2：$\text{SOC}_{\text{bat},i}>\text{SOC}_{\text{bat,min}}$时，储能系统进入协调放电模式，蓄电池参与放电。同时，系统会监测超级电容 SOC。若 $\text{SOC}_{\text{sc},i}\leqslant\text{SOC}_{\text{sc,min}}$，超级电容将减少放电量或者停止放电，以保护其免受过度放电的影响；若 $\text{SOC}_{\text{sc},i}>\text{SOC}_{\text{sc,min}}$，混合储能系统将协调蓄电池和超级电容放电，根据各自的 SOC 和放电特性进行功率分配，以实现最佳的整体放电效率。

(2)充电阶段($P_{\text{hess}}<0$)，即系统能量过剩。

模式 3：$\text{SOC}_{\text{bat},i}\geqslant\text{SOC}_{\text{bat,max}}$时，为避免过度充电，混合储能系统会暂时停止工作。为确保系统稳定运行，光伏模块将切换到稳定电压模式，以维持直流母线电压的稳定。直至 $P_{\text{pv}}<P_{\text{Load}}$ 之后，混合储能系统将恢复放电操作，同时蓄电池 SOC 降至安全充电区间后，光伏系统将再次启用 MPPT 策略，提高工作效率。

模式 4：$\text{SOC}_{\text{bat},i}<\text{SOC}_{\text{bat,max}}$ 时，超级电容的 $\text{SOC}_{\text{sc},i}$ 也将被监测。若超级电容达到其电荷上限 $\text{SOC}_{\text{sc,max}}$，充电过程将自动中止以保护超级电容。在超级电容 SOC 保持在安全范围内时，混合储能系统工作状态不受影响，但需要根据超级电容的 SOC 灵活调整能量分配策略，以实现最优化的能量管理。

3 仿真验证

3.1 系统参数设定

基于上述理论，本文构建了光伏直流微网混合储能系统仿真模型，验证不同工况下系统各单元输出功率、储能设备 SOC 的变化情况。系统参数见表 2，电池与超级电容参数见表 3。某地区一季度内的光伏功率和负荷情况如图 6 所示。

表 2　仿真参数

Tab. 2 Simulation parameters

参数	数值
直流母线电压参考值 $U_{dc,ref}$/V	600
蓄电池电压 U_{bat}/V	260
蓄电池容量/(A·h)	4
超级电容电压 U_{sc}/V	320
超级电容容量/F	1
蓄电池 SOC 限值[$SOC_{bat,min}$, $SOC_{bat,max}$]	[0.1, 0.9]
超级电容 SOC 限值[$SOC_{sc,min}$, $SOC_{sc,low}$, $SOC_{sc,high}$, $SOC_{sc,max}$]	[0.1, 0.3, 0.7, 0.9]

表 3　储能单元具体参数

Tab. 3 Specific parameters of energy storage unit

储能单元	参数	数值
超级电容器	额定电压/V	2.7
	电容/F	2 400
	最小工作电压/V	0.8
	最大工作电流/A	1 500
	充放电效率	0.95
	循环寿命次数/次	100 000
	运行系数	0.075
	维护系数	0.08
	折旧系数	0.05
	单价/元	850
蓄电池	额定电压/V	2
	额定容量/(A·h)	320
	放电深度	0.5
	放电效率	0.95
	充电效率	0.95
	循环寿命次数/次	1 500
	运行系数	0.15
	维护系数	0.12
	折旧系数	0.18
	单价/元	450

3.2 工况分析

工况 1：蓄电池和超级电容的初始 SOC 均为 40%，均处于正常工作区，无需对功率分配进行动态调整。光伏电池的初始工作条件设置包括光照强度 *ir*=1 200 W/m²和温度 *T*=25 ℃，并运行于 MPPT 模式，此时其输出功率 P_{pv}=7.3 kW。随着系统运行，光照强度在 6 s 时减至 800 W/m²，导致 P_{pv} 相应减少至 4.7 kW；随后，在 12 s 时，光照强度回升至 1 200 W/m²，P_{pv} 也随之恢复。设定负荷消耗功率变化序列为[3, 5, 4, 3, 7] kW，对应的时间节点为[0, 3, 6, 9, 12] s，如图 7 所示。

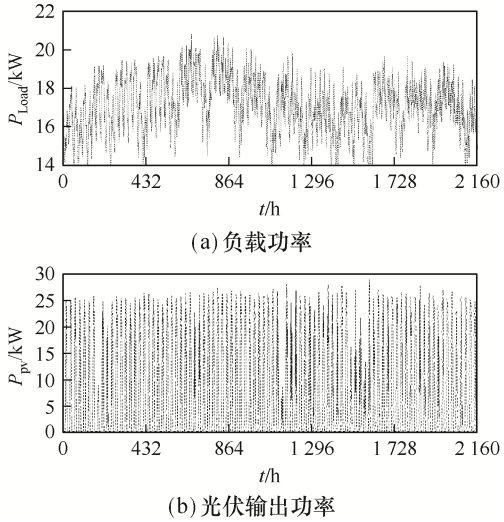


图 6　负载功率和光伏输出功率

Fig. 6 Load power and PV output power

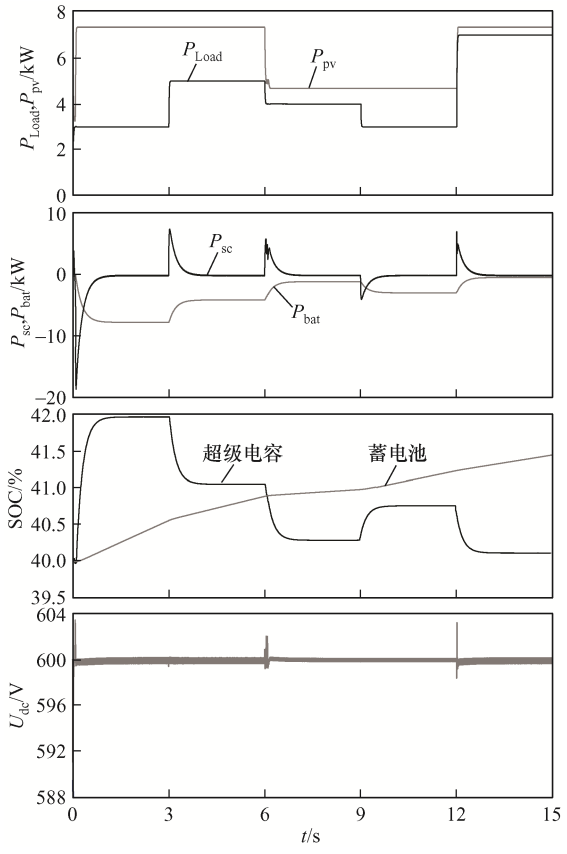


图 7　工况 1

Fig. 7 Working condition 1

图 7 分别给出了光伏产能、储能单元的功率输出、实时负载功率、直流母线电压的波动及储能单

元的荷电状态曲线。0~15 s，光伏输出高于负载需求，且储能单元 SOC 均在正常范围波动，运行模式为模式 4，该模式下，微网系统通过蓄电池和超级电容的协同作用，共同调节功率平衡。超级电容凭借快速充放电特性，在平衡高频功率波动中起主导作用，而蓄电池则以稳定的充电速率确保母线电压稳定在 600 V。当光照强度发生波动或负荷需求急剧变化时，超级电容迅速响应，补充功率缺额，抑制光伏和负荷波动引起的高频功率波动，维护系统稳定。

工况 2：根据工作模式 2，设置超级电容初始 SOC 为 30%，蓄电池 SOC 在正常放电区，设定负荷消耗功率变化序列为[6, 8, 10, 9, 7, 6] kW，对应的时间节点为[0, 2, 4, 7, 10, 13] s，令超级电容工作于过放警戒区。一次分频法和动态调整功率分配法的波形对比如图 8 所示。

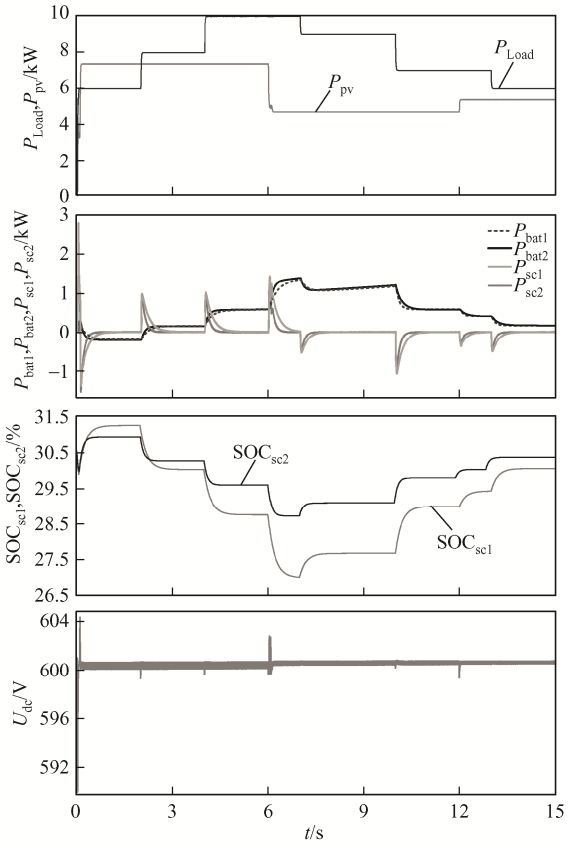


图 8 工况 2

Fig. 8 Working condition 2

由图 8 可见，在超级电容 SOC 临近过放区时，采用动态调整功率分配，该策略侧重于减少放电过程中的能量消耗，并相应增加充电阶段的能量补充，通过管理超级电容的能量流动，显著减缓 SOC 在放电阶段的下降速度。在充电阶段，通过优化分配策略，可提升充电速度，从而确保超级电容能够迅速回到适宜的工作区域。此外，该策略保证超级电容有充足的能量储备应对系统后续的高频功率需求。若忽略 SOC 的阈值管理，可能引发与低通滤波法类似的 SOC 越限问题，增加超级电容过充过放风险。

工况 3：根据工作模式 4，超级电容工作在过充警戒区，设置超级电容初始 SOC 为 88%，蓄电池 SOC 在正常充电区，设定光伏输出功率为[7.3, 6.0] kW，对应的时间为[0, 12] s，负荷消耗功率变化序列为[3, 4, 3, 4, 3] kW，对应的时间节点为[0, 3, 6, 9, 12] s，如图 9 所示。

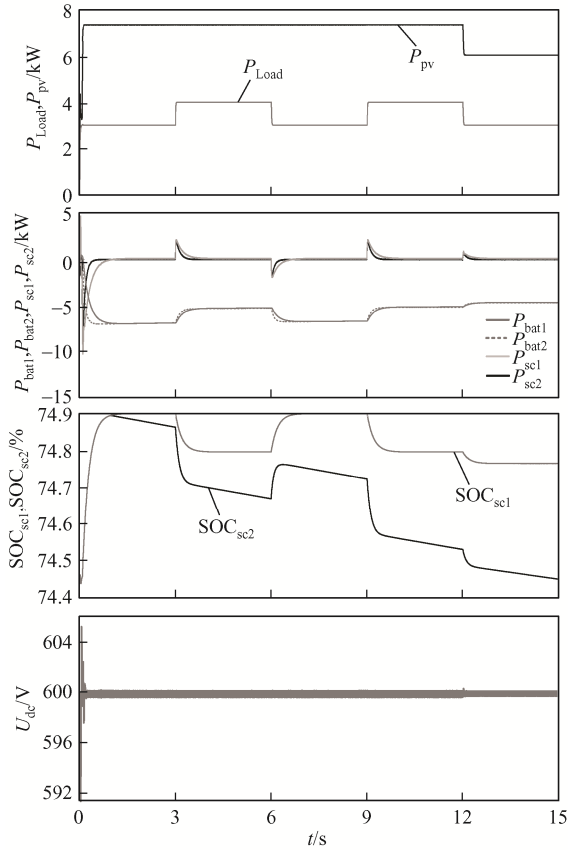


图 9 工况 3

Fig. 9 Working condition 3

由图 9 可见，在 0~15 s 内，因光伏输出超过负

荷需求，混合储能系统吸收剩余功率并对蓄电池进行充电，因超级电容接近过充区，采用“多放少充”的动态调整功率分配策略，防止过充。直至蓄电池 SOC 达到预设的充电上限阈值，混合储能系统进入待机模式，暂停充电过程。该模式的切换旨在避免超级电容因过充而受损，确保 SOC 在安全范围内波动。同时，若蓄电池 SOC 达到饱和状态，微网系统内部需快速切换运行模式 4，维持电压恒定和功率均衡。

3.3 容量配置验证

为进一步验证本文所提方法在功率分配上的有效性，将本文所提方法与原有方法进行对比，见表 4。以小时为运行步长，通过粒子群算法得出 2 种方法所需的容量配置，因粒子群算法已被广泛应用，此处不再赘述，可参考文献[10-11]。

表 4　容量配置对比

Tab. 4 Comparison of capacity configuration

优化方案	一次分频法	动态调整功率分配法
蓄电池数量/个	103	100
超级电容数量/个	185	24
最小费用/元	53 093.75	24 429.49
使用年限/年	13.69	13.69

通过对 3 种运行工况的仿真分析，本文控制策略的优势在于：首先，在光照或负荷出现突变时，系统中超级电容凭借其高功率密度特性，能快速调节高频功率波动，减少瞬态功率对系统的冲击，而蓄电池稳定母线电压，确保系统功率均衡，两者协调工作；其次，多个变换器具备高度灵活切换工作模式的能力，是该系统适应多变运行条件的关键；最后，结合蓄电池的稳定能量储存能力和超级电容的快速功率调节能力，并基于 SOC 阈值限制，设计 4 种工作模式，优化储能特性，避免过充、过放。在容量配置方面，采用动态调整功率分配策略后，超级电容配置容量可大为减少，节约相关费用 28 664 元，提高了微网的经济性能。

4　结语

本文从理论仿真分析、荷电状态监控、储能配置优化 3 个角度进行了微网能量协调管理。首先，针对不同特性的储能设备进行分类管理，并设计了 4 种工作模式的控制策略；其次，将滤波时间常数设定为可调整参数，解决了截止频率、通带范围等相关参数适配问题，高频抑制方面取得较好效果；在此基础上提出了基于超级电容 SOC 的动态调整功率分配策略，更容易发挥超级电容功率型储能优势，提高功率调节的灵活性；最后，基于粒子群算法得出超级电容和蓄电池的容量配置结果，使系统在满足性能需求的同时，实现成本最优目标，证明了本文策略的有效性。

参考文献：

[1] 凌禹. 双馈风力发电机故障穿越关键技术综述[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 141-151.
Ling Yu. Review of key technologies for fault ride through of DFIG-based wind turbine [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 141-151. (in Chinese)

[2] 周文, 苏灿, 胡雪凯, 等. 直流配电系统电能质量探析[J]. 电源学报, 2025, 23(5): 185-196.
Zhou Wen, Su Can, Hu Xuekai, et al. Analysis of power quality of DC distribution system [J]. Journal of Power Supply, 2025, 23(5): 185-196. (in Chinese)

[3] 杨悦强, 祝龙记. 微电网超级电容器混合储能系统控制策略[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2021, 39(2): 71-80.
Yang Yueqiang, Zhu Longji. Control strategy of microgrid super capacitor hybrid energy storage system [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2021, 39(2): 71-80. (in Chinese)

[4] 王毅泰, 王维庆, 王海云, 等. 基于源-荷-储的直流微电网系统协调控制[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(5): 1991-1996.
Wang Yitai, Wang Weiqing, Wang Haiyun, et al. Coordination control of DC microgrid system based on source-charge-storage [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(5): 1991-1996. (in Chinese)

[5] 张汀, 雷勇, 王小昔. 考虑 SOC 均衡的直流微网储能系统控制策略研究[J]. 电源技术, 2023, 47(8): 1099-1104.
Zhang Ting, Lei Yong, Wang Xiaoxi. Research on con-

trol strategy of DC microgrid energy storage system considering SOC equilibrium [J]. Chinese Journal of Power Sources, 2023, 47(8): 1099-1104. (in Chinese)

[6] Khan K A, Khalid M. Improving the transient response of hybrid energy storage system for voltage stability in DC microgrids using an autonomous control strategy [J]. IEEE Access, 2021, 9: 10460-10472.

[7] 任萱, 李桐歌, 马骏毅, 等. 考虑荷电状态的光伏微电网混合储能容量优化配置[J]. 电测与仪表, 2024, 61(2): 150-156.
Ren Xuan, Li Tongge, Ma Junyi, et al. Optimal allocation of hybrid energy storage capacity in PV micro-grid considering SOC [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(2): 150-156. (in Chinese)

[8] Dehghani M, Hubálovský Š, Trojovský P. Northern goshawk optimization: A new swarm-based algorithm for solving optimization problems [J]. IEEE Access, 2021, 9: 162059-162080.

[9] 韩东旭, 赵凯, 刘鑫, 等. 考虑超级电容器荷电状态的混合储能系统能量管理策略[J]. 电气工程学报, 2020, 15(3): 31-37.
Han Dongxu, Zhao Kai, Liu Xin, et al. Energy management strategy of hybrid energy storage system considering the state of charge of the supercapacitor [J]. Journal of Electrical Engineering, 2020, 15(3): 31-37. (in Chinese)

[10] 贠祥, 张鑫, 王超, 等. 基于联合参数辨识的粒子群优化扩展粒子滤波的锂电池荷电状态估计[J]. 电工技术学报, 2024, 39(2): 595-606.
Yun Xiang, Zhang Xin, Wang Chao, et al. State of charge estimation of Li-ion battery using particle swarm optimazation extended Kalman particle filter based on joint parameter identification [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024, 39(2): 595-606. (in Chinese)

[11] 周嗣理, 李国丽, 王群京, 等. 基于改进粒子群优化算法的永磁球形电机驱动策略研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(1): 166-176.
Zhou Sili, Li Guoli, Wang Qunjing, et al. Improved particle swarm optimization algorithm based driving strategy research for permanent magnet spherical motor [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(1): 166-176. (in Chinese)



张帅

作者简介：

张帅(1997—)，男，中国电源学会学生会员，硕士。研究方向：新能源发电。E-mail：1027033140@qq.com。

张继红(1975—)，男，通信作者，博士，教授。研究方向：新能源发电。E-mail：1831649636@qq.com。

王庆宇(1999—)，男，硕士。研究方向：混合储能及新能源发电技术。E-mail：13039572272@163.com。

吴振奎(1973—)，男，博士，教授。研究方向：可再生能源发电。E-mail：206353056@qq.com。

张自雷(1988—)，男，硕士，讲师。研究方向：微电网优化运行。E-mail：lizhaoze@stu.imust.edu.cn。

(责任编辑：耿越)