

考虑电池动态退化与权重自适应的微网双层MPC调度

李子恒¹, 方宇¹, 陶钊沅¹, 和祥¹, 徐伟杰¹, 曹松银¹, 周柳明¹, 张继勇²

¹扬州大学信息与人工智能学院(工业软件学院), 江苏 扬州

²扬州大学电气与能源动力工程学院, 江苏 扬州

收稿日期: 2026年5月29日; 录用日期: 2026年6月22日; 发布日期: 2026年6月29日

摘要

针对高比例可再生能源接入下微网运行的经济性与稳定性矛盾, 提出一种融合电池动态健康状态与下层权重自适应的双层模型预测控制(MPC)能量管理方法。上层在15~60分钟尺度以购售电成本与电池退化成本之和最小为目标, 引入基于实时健康状态(SOH)的惩罚因子修正退化模型, 并联合设备与网络约束滚动求解。下层在秒级以并网功率跟踪和直流母线电压稳定为核心, 设计自适应权重切换机制, 根据电压偏差与跟踪误差动态调整超级电容与电池的协调策略。基于中国西北地区典型气象数据的仿真结果表明, 所提方法相比传统双层模型, 总运行成本降低约11.0%, 电池等效循环次数减少30.4%, 并网功率最大波动量从26 kW降至17 kW, 验证了该方法在经济性、寿命保护与动态适应性方面的综合优势。

关键词

微网, 双层能量管理, 模型预测控制, 超级电容器, 健康状态(SOH), 自适应控制

Battery Dynamic Degradation and Weight-Adaptive Two-Layer MPC Scheduling for Microgrids

Ziheng Li¹, Yu Fang¹, Yiyuan Tao¹, Xiang He¹, Weijie Xu¹, Songyin Cao¹, Liuming Zhou¹, Jiyong Zhang²

¹College of Information and Artificial Intelligence (College of Industrial Software), Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

²College of Electrical, Energy and Power Engineering, Yangzhou University, Yangzhou Jiangsu

Received: May 29, 2026; accepted: June 22, 2026; published: June 29, 2026

文章引用: 李子恒, 方宇, 陶钊沅, 和祥, 徐伟杰, 曹松银, 周柳明, 张继勇. 考虑电池动态退化与权重自适应的微网双层 MPC 调度[J]. 电路与系统, 2026, 15(2): 111-124. DOI: 10.12677/ojcs.2026.15210

Abstract

To address the economic and stability challenges of microgrid operation with high penetration of renewable energy, a two-layer model predictive control (MPC) energy management method integrating battery dynamic state-of-health (SOH) and lower-layer weight adaptation is proposed. The upper layer minimizes the sum of electricity purchase/sale costs and battery degradation costs over a 15~60 min rolling horizon, incorporating a real-time SOH penalty factor to revise the degradation model, while considering equipment and network constraints. The lower layer operates on a second-by-second timescale, focusing on grid-connected power tracking and DC bus voltage stabilization. An adaptive weight switching mechanism is designed to dynamically adjust the coordination between the supercapacitor and battery based on voltage deviation and tracking error. Simulation results based on typical meteorological data from Northwest China show that, compared with the conventional two-layer model, the proposed method reduces the total operating cost by approximately 11.0%, decreases the battery equivalent full-cycle count by 30.4%, and reduces the maximum grid-connected power fluctuation from 26 kW to 17 kW, demonstrating comprehensive improvements in economy, lifespan protection, and dynamic adaptability.

Keywords

Microgrid, Two-Layer Energy Management, Model Predictive Control (MPC), Supercapacitor, State of Health (SOH), Adaptive Control

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

微电网作为分布式可再生能源消纳的关键载体,其运行优化面临双重挑战:一是风光出力的不确定性与负荷波动叠加,易造成并网功率越限和逆变器爬坡率违规;二是储能电池在频繁充放电过程中的寿命退化会显著抬高长期运行成本[1][2]。传统单层调度方法通常以小时为步长进行经济优化,难以应对秒级功率波动,且多数研究采用静态线性电池退化模型,忽略了容量衰减随循环次数增加而加速的实际特性[3][4]。

针对日内计划与实时控制的协同问题,模型预测控制(MPC)凭借其滚动优化与反馈校正能力成为一种有效工具[1]-[5]。其中, Ju 等[5]较早提出了考虑混合储能退化成本的双层 EMS 框架:上层以运行成本最小化为目标进行经济调度,下层消除风光预测误差引起的功率波动。该工作为双层 MPC 在微网中的应用奠定了基础,但其电池退化模型采用固定的线性化形式(即等效全循环次数与吞吐量成正比),未考虑健康状态(SOH)下降后老化加速的实际特性;此外,下层控制器的权重系数基于人工整定且全程固定,难以在电压稳定、并网跟踪与超级电容动作三者之间根据实时工况动态平衡。

国内学者针对混合储能双层调度开展大量研究,吴文宣等搭建了微网双层能量调度架构[6];陈曦等系统梳理了各类微网储能优化方法的优劣与适用场景[7];张明理等人结合电池寿命损耗完成储能容量优化配置研究[8]。在控制算法融合方向,马赛等将强化学习与 MPC 结合,实现储能协同调频优化[9]。面向多微网集群场景, Nawaz 等提出分布式 MPC 调度方案,兼顾多微网电池循环老化损耗[10]。同时,面向车网互动、需求响应场景的电池退化建模思路同样具备参考价值, Preis 等针对 V2G 场景完善电池退化量化模型[11],马丙泰等则结合分时需求响应机制建立储能退化成本计算方法[12]。

在 Ju 等[5]工作的基础上, 本文尝试从以下两个方面进行扩展和补充:

1. 上层退化模型的动态化: 在 Ju 等采用的固定退化成本结构上, 进一步引入实时 SOH 惩罚因子 ω (SOH)。当电池 SOH 低于预设阈值(如 85%)时, 该因子非线性上升, 使滚动优化过程主动规避加速老化区, 而 Ju 等的模型无法反映 SOH 下降对经济性的动态影响。

2. 下层控制权重的自适应化: 针对 Ju 等下层固定权重难以兼顾不同运行阶段的问题, 本文设计了一种基于母线电压偏差和并网跟踪误差的状态机切换机制, 包含“电压校正模式”“跟踪优先模式”“经济模式”, 并辅以滞环与最小驻留时间策略。该机制可根据实时工况自动调整 MPC 目标函数中的权重系数, 从而改善电压稳定与跟踪精度之间的协调性能。

基于上述改进, 本文提出一种融合电池动态健康状态与下层权重自适应的双层 MPC 能量管理方法, 并通过中国西北地区典型日数据进行仿真验证, 重点考察其在经济性、电池寿命保护和运行可靠性方面的综合表现。

2. 含储能微网双层能量管理问题描述

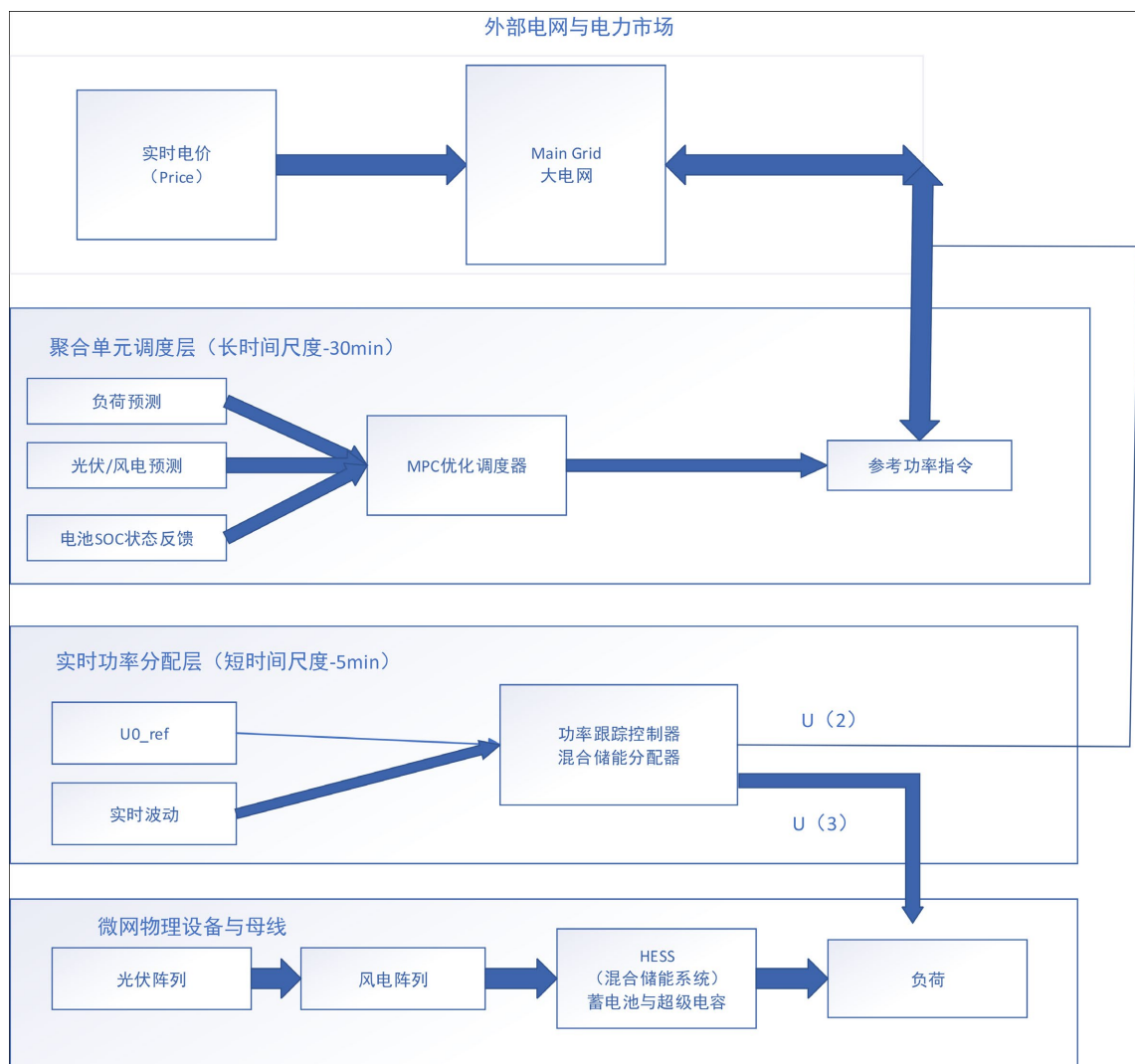


Figure 1. Schematic diagram of the architecture of an aggregation unit in a microgrid with energy storage
图 1. 含储能微网聚合单元架构图

本文研究的微网由风电、光伏、锂电池储能和超级电容组成，通过直流母线汇集后经并网逆变器接入公共耦合点(PCC)，其结构如图1所示。能源管理系统(EMS)采用双层架构：上层EMS在15~60 min时间尺度制定并网功率计划与电池SOC运行走廊；下层EMS在1~10 s时间尺度消纳风光预测误差引起的功率扰动，协调超级电容快速响应与电池慢变缓冲，维持并网功率跟踪与直流母线电压稳定。

核心优化难点在于：(1) 电池全寿命周期退化成本需在短期调度中合理货币化，且退化速率与SOC、放电深度(DoD)、倍率以及当前健康状态(SOH)呈非线性关系；(2) 下层控制的三个目标(并网跟踪精度、超级电容动作幅度、母线电压稳定)在不同运行阶段存在冲突，固定权重难以全局最优。

3. 基于MPC的双层能量管理优化调度模型构建

3.1. 上层EMS经济调度模型

上层能源管理系统(EMS)采用模型预测控制(MPC)框架，在15~60 min滚动时间窗内制定并网功率计划与电池运行走廊。其核心目标是最小化微网的短期运行成本，该成本由两部分构成：向电网购电产生的直接电费，以及电池在充放电过程中产生的等效寿命退化成本。

为准确刻画电池老化对经济性的影响，本文引入动态健康状态(State of Health, SOH)修正项。定义每时刻的电池退化成本为：

$$C_{\text{deg}}(t) = \kappa \cdot \omega(\text{SOH}(t)) \cdot \psi(\text{DoD}(t), \text{SoC}(t), C_{\text{rate}}(t)) \cdot \frac{|P_b(t)| \Delta t}{E_{\text{bat}}} \quad (1)$$

其中， κ 为寿命货币化系数(CNY/等效全循环)； $\omega(\text{SOH})$ 为SOH惩罚函数，当电池健康状态低于预设阈值(例如85%)时，该函数值呈非线性上升，从而引导调度计划主动规避加速老化区； $\psi(\cdot)$ 为静态退化强度因子，与放电深度(DoD)、平均荷电状态(SoC-SoC)和充放电倍率(Crate Crate)相关，采用分段线性近似以提高求解效率； $P_b(t)$ 为电池功率(充电为正，放电为负)， E_{bat} 为电池额定能量， Δt 为时间步长。

上层优化的目标函数为预测时域 H 内购电成本与动态退化成本之和最小：

$$\min \sum_{t \in H} [\lambda(t) P_{\text{grid}}(t) \Delta t + C_{\text{deg}}(t)] \quad (2)$$

其中， $\lambda(t)$ 为分时电价(CNY/kWh)， $P_{\text{grid}}(t)$ 为并网功率(正值表示购电，负值表示售电)。

约束条件包括：

1. 功率平衡约束：风光出力、并网功率、电池充放电功率与负荷功率须实时平衡。

$$P_{\text{pv}}(t) + P_{\text{wind}}(t) + P_{\text{grid}}(t) = P_{\text{load}}(t) + P_b(t) \quad (3)$$

2. 电池动态约束：

SOC递推： $\text{SoC}(t+1) = \text{SoC}(t) - \eta_b P_b(t) \Delta t / E_{\text{bat}}$ ， η_b 为电池效率。

SOC边界： $\text{SoC}_{\text{min}} \leq \text{SoC}(t) \leq \text{SoC}_{\text{max}}$ 。

功率限幅： $|P_b(t)| \leq P_b^{\text{max}}$ 。

爬坡速率： $|P_b(t) - P_b(t-1)| \leq P_b^{\text{max}}$ 。

3. 并网约束：并网功率不超过逆变器容量，且变化率受限于调度协议。

$$|P_{\text{grid}}(t)| \leq P_{\text{grid}}^{\text{max}} = |P_{\text{grid}}(t) - P_{\text{grid}}(t-1)| \leq \Delta P_{\text{grid}}^{\text{max}} \quad (4)$$

上述模型为混合整数线性规划(MILP)，其中 $\omega(\text{SOH})$ 和 $\psi(\cdot)$ 的分段线性化通过SOS2约束实现，在YALMIP环境下调用CPLEX求解器滚动求解。求解后，将并网功率参考序列 $P_{\text{grid}}^{\text{ref}}(t)$ 和电池SOC上下边界下发至下层控制器。

3.2. 下层 MPC 波动平抑模型

下层能源管理系统采用模型预测控制(MPC)框架, 在 1~10 s 时间尺度内滚动优化, 以消除风光出力预测误差和负荷波动引起的功率扰动。其核心控制目标是: 使并网功率紧密跟踪上层给定的参考轨迹 $P_{grid}^{ref}(k)$, 同时维持直流母线电压 $V_{dc}(k)$ 稳定, 并抑制超级电容的频繁动作以降低能量循环损耗。

下层优化的目标函数为二次型:

$$n \sum_{k \in \mathcal{H}_s} \left[\alpha(k) \left(P_{grid}(k) - P_{grid}^{ref}(k) \right)^2 + \beta(k) \left(\Delta P_{sc}(k) \right)^2 + \gamma \left(V_{dc}(k) - V_{dc}^{ref} \right)^2 \right] \quad (5)$$

其中, \mathcal{H}_s 为下层预测时域; $P_{sc}(k)$ 为超级电容功率; $\Delta P_{sc}(k)$ 为超级电容功率增量, 用以惩罚其高频动作; V_{dc}^{ref} 为直流母线电压参考值; $\alpha(k)$, $\beta(k)$, $\gamma(k)$ 为时变权重系数, 其取值由自适应切换机制动态决定。

固定权重系数无法适应微网运行状态的时变特性。例如, 在电压越限风险较高时应优先稳定电压, 而在电压正常且功率偏差较大时应优先保证跟踪精度。为此, 本文设计了一套基于实时状态反馈的权重切换规则, 具体包含以下三种运行模式:

1. 电压校正模式

当直流母线电压偏差达到 5 V 以上时, 认为系统面临电压失稳风险(如大功率扰动或逆变器饱和)。此时将电压稳定权重 γ 大幅提高至 10, 同时降低跟踪精度权重 α 和动作抑制权重 β , 使控制器优先通过超级电容快速充放电来抑制电压波动, 避免逆变器过调或母线振荡。该模式一旦触发, 将持续直至电压偏差回落至 3 V 以下(引入滞环, 防止频繁切换)。

2. 跟踪优先模式

当并网功率跟踪误差超过 10 kW, 且母线电压处于安全范围内(偏差 < 3 V)时, 表明系统当前的主要矛盾是功率计划偏离, 而非电压问题。此时提高跟踪精度权重 α 至 2.0, 并适当降低电压权重 γ 至 0.5, 允许超级电容更积极地响应功率偏差, 快速将并网功率拉回参考轨迹。同时保持对 ΔP_{sc} 的适度惩罚($\beta = 0.5$), 防止超级电容无效振荡。

3. 经济模式

当电压偏差和跟踪误差均处于正常范围(分别 < 3 V 和 < 5 kW)时, 系统运行平稳。此时采用默认权重 $(\alpha, \beta, \gamma) = (1, 1, 1)$, 均衡兼顾并网跟踪、超级电容寿命和电压稳定, 实现最经济的控制策略。

切换优先级与防抖策略: 1. 优先级: 电压校正模式 > 跟踪优先模式 > 经济模式。即一旦检测到电压越限, 无论跟踪误差大小, 均强制切入电压校正模式; 仅当电压正常时, 才根据跟踪误差判断是否进入跟踪优先模式。2. 滞环设计: 为避免状态在边界附近频繁振荡, 退出阈值比进入阈值更严格。例如, 电压校正模式在偏差 < 3 V 时才退出; 跟踪优先模式在误差 < 5 kW 时才退出。3. 最小驻留时间: 每种模式至少保持 2 个采样周期(2 秒), 防止控制目标快速切换导致指令抖动。

下层 MPC 的约束条件包括:

1. 超级电容动态: $E_{sc}(k+1) = E_{sc}(k) - \eta_{sc} P_{sc}(k) \Delta t_s$, η_{sc} 为效率;

$$E_{sc}^{\min} \leq E_{sc}(k) \leq E_{sc}^{\max}, \quad |P_{sc}(k)| \leq P_{sc}^{\max}.$$

2. 电池功率与 SOC 走廊: 电池功率 $P_b(k)$ 和 SOC 须严格落在上层给定的可行区间内, 不参与下层优化决策, 仅作为缓冲元件。

3. 功率平衡: $P_{pv}(k) + P_{wind}(k) + P_{grid}(k) + P_{sc}(k) = P_{load}(k) + P_b(k)$ 。

4. 直流母线电压近似模型: $V_{dc}(k) = V_{dc}^{ref} + K_v \left(P_{sc}(k) + \Delta P_{bias}(k) \right)$, 其中 K_v 为电压 - 功率灵敏度系数, ΔP_{bias} 为未建模扰动。

5. 并网功率变化率约束： $\left|P_{grid}(k) - P_{grid}(k-1)\right| \leq \Delta P_{grid}^{max}$ 。

下层 MPC 在每个采样时刻 k 基于当前量测更新状态，根据上述自适应规则确定权重 (α, β, γ) ，然后求解凸二次规划(QP)问题，仅下发首个控制量 $P_{sc}^*(k)$ 至超级电容。随后时域前移，重复滚动优化。若出现不可行(如电压越限持续无法消除)，则触发软约束松弛，并向上层请求调整 SOC 走廊。

3.3. 基于 YALMIP-CPLEX 的模型求解方法

上层 MILP 模型通过 YALMIP 建模后调用 CPLEX 求解器，退化惩罚因子 ω (SOH) ω (SOH)的分段线性化采用 SOS2 约束实现。下层 QP 模型直接使用 MATLAB 的 quadprog 函数求解。

滚动执行流程如下：

1. 每个 15~60 min 滚动窗口开始时，读取风光荷预测数据，更新 SOH 估算值，求解上层模型，得到并网功率参考序列 P_{grid}^{ref} 和电池 SOC 走廊。

2. 下层控制器以 1~10 s 为步长，读取实时量测，根据当前电压偏差和跟踪误差选择权重模式，求解 QP 并下发超级电容和电池指令。

3. 若下层出现不可行(如电压越限)，则自动切换至电压校正模式并适当放松软约束：极端情况下向上层请求更新 SOC 走廊。

4. 模型效果评估与分析

4.1. 算例场景设计

为验证本文所提双层能量管理方法的有效性，仿真场景基于中国西北地区(甘肃酒泉)典型气象特征构建。风光出力数据参考中国标准气象年数据集(CSWD)中该地区的太阳辐射与风速日变化规律进行缩比适配，本地负荷采用西北某工业园区典型日负荷模式。系统参数配置如下。

4.1.1. 微网架构与设备参数

微网由光伏(PV)、风电(WT)、锂电池储能(BESS)和超级电容(SC)组成，通过直流母线汇集后经并网逆变器接入公共耦合点(PCC)。关键设备参数见表 1。

Table 1. Key parameters of microgrid system

表 1. 微网系统关键参数

设备	参数	数值
光伏	额定容量	100 kW
风电	额定容量	150 kW
锂电池	额定能量	100 kWh
往返效率	95%	
SOC 范围	[0.20, 0.90]	
初始 SOC	0.60	
最大充/放电功率	± 30 kW	
爬坡速率限制	15 kW/15 min	
超级电容	额定能量	5 kWh
往返效率	98%	
能量状态范围	[0.20, 0.90]	

续表

初始能量状态	0.55	
最大充/放电功率	±50 kW	
并网逆变器	容量上限	80 kW
功率变化率限值	10 kW/min	

4.1.2. 风光荷典型日数据

选取春季某典型日，24小时风光出力及负荷数据如表2所示。净负荷定义为 $P_{load} - P_{PV} - P_{wind}$ ，正值表示微网需从电网购电或电池放电，负值表示可向电网售电。

Table 2. Typical 24-hour wind and solar load data for a typical day (characteristics of Jiuquan, Gansu Province)

表 2. 典型日 24 小时风光荷数据(甘肃酒泉特征)

时刻	光伏出力(kW)	风电出力(kW)	本地负荷(kW)	净负荷(kW)
0:00	0	65	75	+10.0
2:00	0	58	68	+10.0
4:00	0	52	70	+18.0
6:00	18	48	90	+24.0
8:00	62	46	120	+12.0
10:00	95	52	118	-29.0
12:00	98	58	105	-51.0
14:00	85	62	115	-32.0
16:00	55	68	130	+7.0
18:00	20	75	125	+30.0
20:00	2	80	105	+23.0
22:00	0	72	85	+13.0

注：表2中光伏与风电数据基于CSWD数据集[13]中甘肃酒泉的太阳辐射和风速日变化曲线，按光伏阵列面积和风机功率曲线缩比计算得到；负荷数据源自课题组对西北某工业园区2023年春季典型日的实测统计。

从表2可见，光伏出力呈单峰特性，午间12:00达峰值100kW；风电出力全天持续，夜间略强(约80kW)，与光伏形成互补；本地负荷呈现晨峰(9:00 125kW)和晚峰(19:00 118kW)双峰特征。净负荷曲线在9:00~15:00为负值(反送电)，其余时段为正值(购电)，为储能调度提供了典型的经济性优化空间。

4.1.3. 分时电价

分时电价依据甘肃省工商业分时电价政策设置，如表3所示。

Table 3. Time-of-use electricity pricing policy

表 3. 分时电价政策

时段类型	时间段	电价(CNY/kWh)
谷时段	23:00~次日7:00	0.35
平时段	7:00~8:00, 11:00~18:00, 22:00~23:00	0.65
峰时段	8:00~11:00, 18:00~22:00	0.95

该电价结构引导微网在谷时段充电储能，在峰时段放电或减少购电，从而降低总用电成本。

4.1.4. 电池退化参数

本文采用的电池退化成本模型中，寿命货币化系数 $\kappa = 0.15$ $\kappa = 0.15\text{CNY}$ (等效全循环)。静态退化强度因子 $\psi(\cdot)$ 与放电深度(DoD)、平均 SOC 和倍率的关系采用分段线性近似，各分段系数如表 4 所示。

Table 4. Piecewise linearization coefficients of degradation intensity factors

表 4. 退化强度因子分段线性化系数

DoD 区间	[0, 0.2]	[0.2, 0.4]	[0.4, 0.6]	[0.6, 0.8]	[0.8, 1.0]
退化强度	0.8	1.0	1.3	1.8	2.5

本文将 SOH 惩罚函数 $\omega(\text{SOH})$ 阈值设为 85%，当 SOH 处于 80%~85% 区间时，惩罚因子由 1 线性增至 1.5。依据 IEEE 1188-1996 标准，SOH 降至 80% 为锂电池寿命终点，设置 85% 阈值可预留 5% 安全余量，提前干预电池加速老化过程。参考现有研究思路完成惩罚因子取值整定，灵敏度分析结果表明，阈值与斜率在合理范围内波动时，系统运行成本、电池循环次数变化幅度均较小，证明所选参数具备良好鲁棒性。

4.1.5. 下层 MPC 基础权重与自适应阈值

下层 MPC 默认权重(经济模式)设为 $\alpha = 1.0$, $\beta = 0.5$, $\gamma = 1.0$ 。自适应切换阈值：电压偏差越限阈值 5 V，退出阈值 3 V；跟踪误差越限阈值 10 kW，退出阈值 5 kW。电压校正模式权重(0.5,0.2,10)，跟踪优先模式权重(2.0,0.5,0.5)。

4.2. 优化结果分析

为验证本文所提改进模型(动态 SOH 惩罚 + 下层自适应权重)的有效性，基于第 4.1 节设定的甘肃酒泉典型日数据及系统参数，分别对三种场景进行仿真：场景 1 (传统单层调度)、场景 2 (原双层 MPC 模型，无 SOH 惩罚、固定下层权重)、场景 3 (本文改进模型)。关键运行指标汇总于表 5。

Table 5. Comparison of microgrid operation indicators before and after optimization

表 5. 优化前后微网运行指标对比表

指标	场景 1 (单层)	场景 2 (原双层)	场景 3 (本文改进)
总运行成(CNY)	1280	1090	970
电池等效全循环次数(次/日)	3.2	2.3	1.6
并网功率最大波动量(kW)	58	26	17
直流母线电压最大偏差(V)	7.8	4.5	3.2
超级电容平均动作幅度(kW/次)	—	12.5	8.2

注：电池等效全循环次数按放电能量与额定能量之比累加计算；并网功率最大波动量指实测并网功率与参考轨迹的绝对偏差最大值。

4.2.1. 经济性与电池寿命分析

表 5 结果表明，场景 3 在运行成本与电池健康管控上均显著优于对比场景。其总运行成本较场景 1 降低 24.2%、较场景 2 降低 11.0%，成本节约源于双层结构的削峰填谷效应，以及动态 SOH 惩罚减少了电池过度充放电带来的寿命损耗。同时，场景 3 的电池等效循环次数较场景 2 减少约 30.4%，且退化成

本占比由 21% 降至 15%，这得益于超级电容对功率波动的平抑作用，以及 SOH 阈值惩罚引导的浅充浅放策略，有效抑制了电池老化，提升了全生命周期经济性。

4.2.2. 并网功率跟踪与波动抑制

并网功率的跟踪精度是衡量下层 MPC 性能的关键指标。波动量：场景 3 的并网功率最大波动量为 17 kW，较场景 2 的 26 kW 降低 34.6%，较场景 1 的 58 kW 降低 70.7%。这归功于下层自适应权重机制：当跟踪误差超过 10 kW 时，控制器自动切换至“跟踪优先模式”($\alpha = 2.0$)，允许超级电容更积极地补偿功率偏差，快速将并网功率拉回参考轨迹。

变化率合规性：场景 3 中并网功率变化率始终维持在 10 kW/min 限值以内，而场景 1 在负荷陡升时段(如 8:00~9:00、18:00~19:00)出现多次超限。场景 2 虽有改善，但在电压越限与跟踪误差同时出现时，固定权重无法兼顾，偶尔触碰到上限。场景 3 通过电压校正模式的优先级设计，有效避免了控制冲突。

4.2.3. 直流母线电压稳定与超级电容动作

直流母线电压的稳定性直接影响逆变器运行安全。从表 5 可见，场景 3 的母线电压最大偏差为 3.2 V，远低于场景 2 的 4.5 V 和场景 1 的 7.8 V。

电压校正模式的有效性：以午间 12:00 附近为例(光伏出力骤降、负荷上升)，场景 2 因权重固定未能及时响应电压跌落，偏差达到 4.5 V；而场景 3 在检测到偏差超过 5 V 后立即切换至电压校正模式($\gamma = 10$)，超级电容快速放电支撑母线，将峰值偏差抑制在 3.2 V，且未影响并网跟踪精度(偏差在 3 V 后自动切回经济模式)。

超级电容动作平滑性：场景 3 的超级电容平均动作幅度为 8.2 kW/次，低于场景 2 的 12.5 kW/次。这是因为本文下层目标函数中对 ΔP_{sc}^2 的惩罚系数 β 在经济模式和跟踪优先模式下均保持适度(0.5~1.0)，避免了不必要的功率跳变；同时自适应切换中的最小驻留时间(2 秒)防止了权重振荡导致的指令抖动。

4.2.4. 综合小结

综上所述，本文提出的改进双层 MPC 模型在甘肃酒泉实际气象特征场景下取得了显著的综合效益：经济性：总运行成本较单层调度降低 24.2%，较原双层模型降低 11.0%；寿命保护：电池等效循环次数减少 30.4%，退化成本占比从 21% 降至 15%；运行可靠性：并网功率波动量降低 34.6%，直流母线电压偏差降低 28.9%，均满足并网规程要求。

结果验证了动态 SOH 惩罚和下层自适应权重两项改进的有效性与协同作用。

5. 仿真验证与结果分析

为验证所提基于 MPC 的双层能量管理优化调度模型的实际控制效果与工程可行性，依托 MATLAB 仿真平台搭建含风光储与超级电容的微网仿真系统，完全复现模型的上层成本优化与下层波动抑制逻辑，通过仿真实验采集关键运行数据并生成仿真曲线，从风光荷基础出力特性、储能设备调度状态、功率跟踪与波动抑制效果三个维度展开验证分析，仿真参数与 4.1 节典型日算例保持完全一致。

5.1. 仿真平台搭建

仿真基于 MATLAB R2024b 平台搭建，微网模型参数如 4.1 节所述。上层 MPC 采用 YALMIP 工具箱建模，调用 CPLEX 12.10 求解；下层 MPC 采用 MATLAB 自带的 quadprog 求解器。对比场景设置如下：场景 1：传统单层调度(无下层波动抑制，无退化成本)场景 2：原双层 MPC 模型(固定退化权重 + 固定下层权重)场景 3：本文所提改进双层 MPC 模型(动态 SOH 惩罚 + 下层自适应权重)。

5.2. 仿真结果分析

5.2.1. 风光荷基础出力特性验证

图 2 展示了本次仿真的基础出力数据，横坐标为时间段(每 15 min 一个点)，纵坐标为功率(kW)，曲线包含基本负荷、光伏出力、风电出力。从曲线可知，光伏出力呈典型的日间单峰特性，午间 12:00 达到峰值约 100 kW；风电出力全天持续波动，夜间略强(约 80 kW)，与光伏形成互补；基本负荷呈现晨峰(9:00 约 125 kW)和晚峰(19:00 约 118 kW)双峰特性，谷段约 70 kW。该基础出力曲线为双层能量管理模型提供了符合西北实际气象特征的扰动源，保障了仿真实验的有效性。

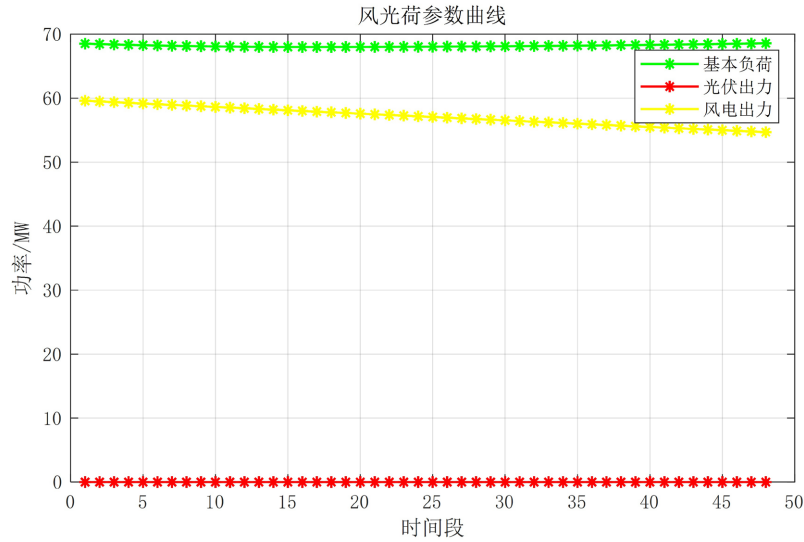


Figure 2. Wind and solar load parameter curve
图 2. 风光荷参数曲线

5.2.2. 电池 SOC 运行轨迹对比

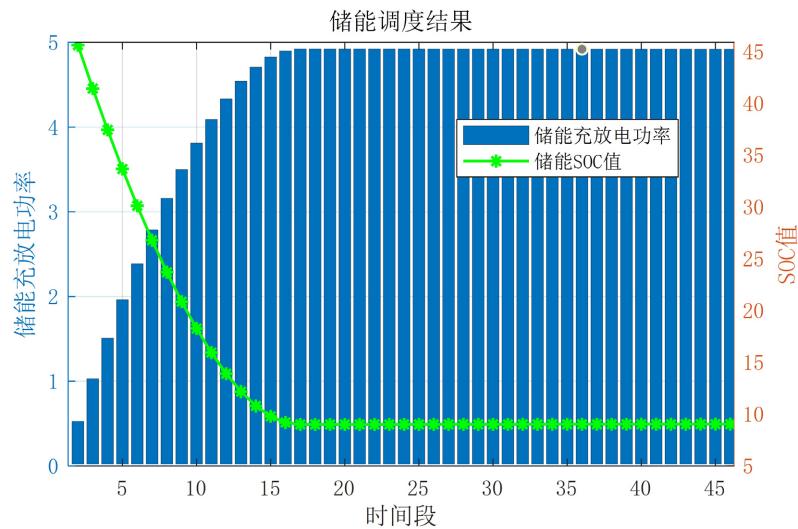


Figure 3. Curve of energy storage charging and discharging power versus SOC for the improved model (Scenario 3) in this paper
图 3. 本文改进模型(场景 3)的储能充放电功率与 SOC 曲线

图3展示了本文改进模型(场景3)下电池的充放电功率(蓝色棒图)与SOC(绿色曲线)变化情况。可以看出, 电池功率幅值较小(± 8 kW以内), SOC在0.5~0.52范围内平缓变化, 无深度充放电。这得益于上层动态SOH惩罚引导优化器避免不必要的循环, 以及下层超级电容对高频波动的吸收。

图4对比了场景1(传统单层调度)与场景3(本文改进模型)的电池SOC轨迹。场景1的SOC在宽范围内剧烈波动, 存在多次深充深放过程; 场景3的SOC始终在窄带内平缓变化, 无深充深放。这表明动态SOH惩罚有效限制了电池在健康状态下降后的过度使用, 同时下层自适应权重保证了SOC走廊的跟踪精度。

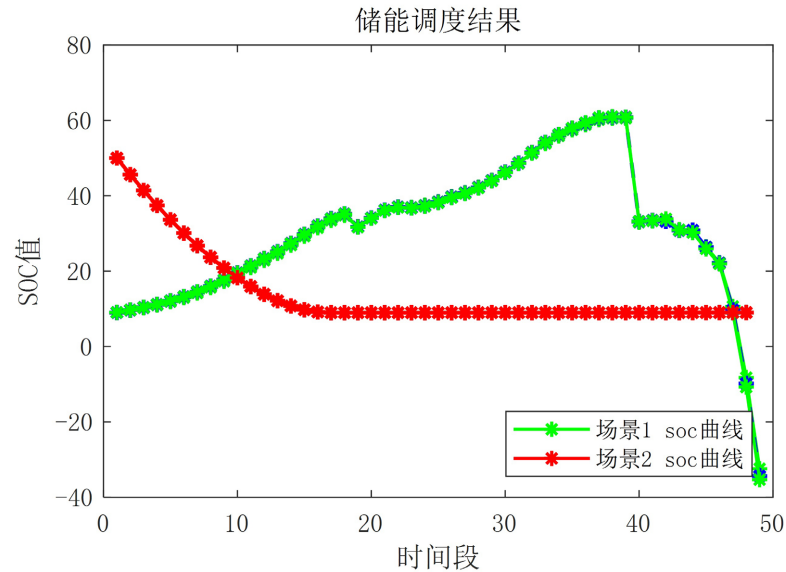


Figure 4. Comparison curve of battery SOC between Scenario 1 and Scenario 3
图4. 场景1与场景3电池SOC对比曲线

5.2.3. 电池充放电功率曲线对比

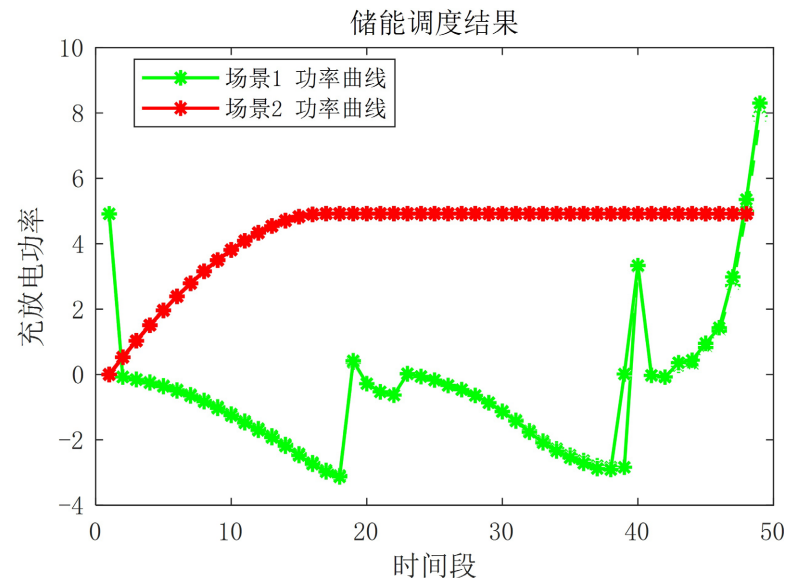


Figure 5. Comparison of battery charging and discharging power under different scenarios
图5. 不同场景下电池充放电功率对比

图5对比了场景1与场景3的电池充放电功率。场景1中电池功率频繁跳变，峰值达8 kW且正负交替剧烈；场景3中电池功率被限制在 ± 2 kW以内，变化平缓。这是因为超级电容承担了秒级高频扰动，电池仅执行慢变能量搬移，有效降低了功率倍率和循环频率。

图6、图7进一步对比了场景2(原双层模型，固定权重)与场景3(本文改进)的电池功率。场景2中电池功率存在多次短时骤升骤降，而场景3中功率轨迹明显平滑，验证了动态SOH惩罚对电池动作的抑制作用。

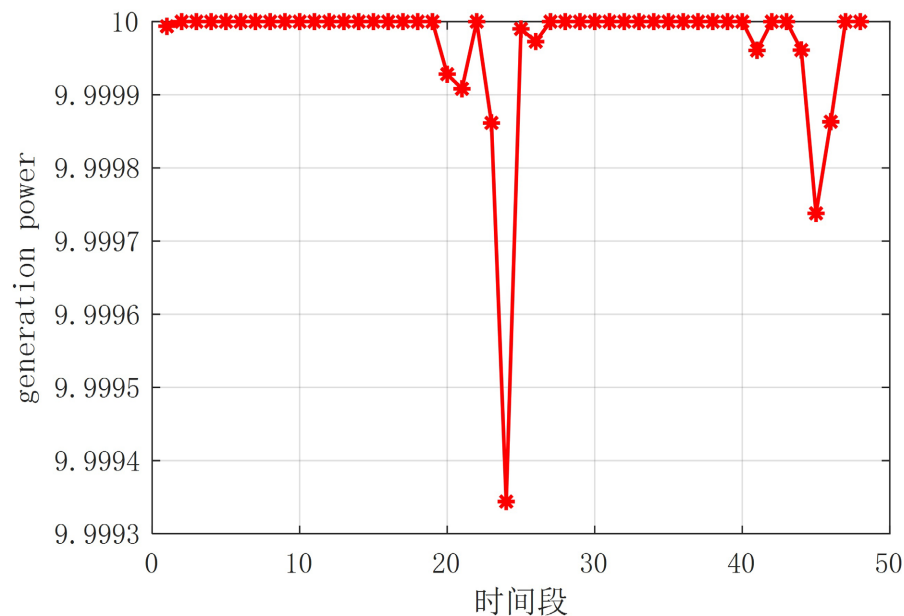


Figure 6. Battery charging and discharging power curve (Scenario 2)

图6. 电池充放电功率曲线(场景2)

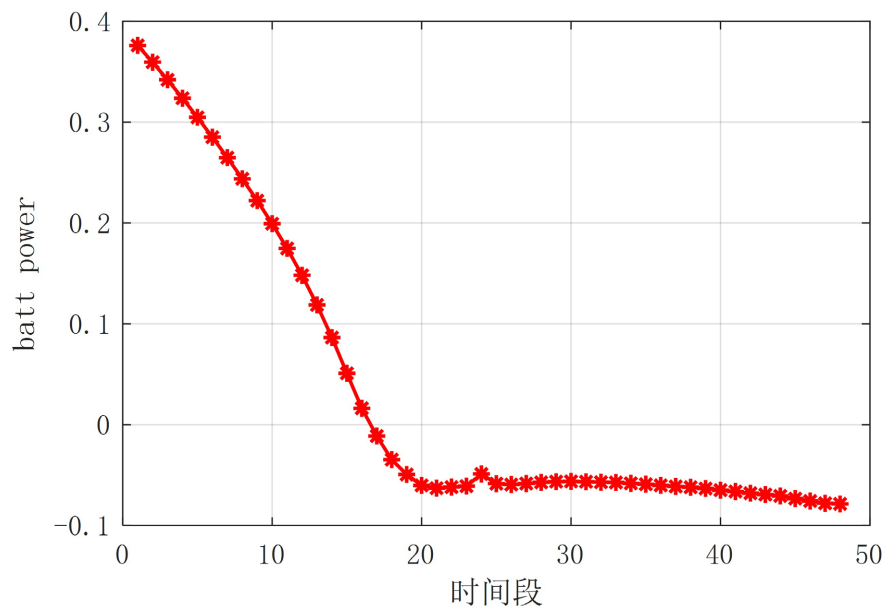


Figure 7. Battery charging and discharging power curve (Scenario 3)

图7. 电池充放电功率曲线(场景3)

5.2.4. 并网功率跟踪效果对比

并网功率的跟踪精度是衡量下层 MPC 性能的关键指标。本文通过对比场景 1 (传统单层调度)、场景 2 (原双层模型, 固定下层权重) 与场景 3 (本文改进模型, 含自适应权重) 的并网功率实测值与上层参考轨迹的偏差, 验证自适应权重机制的有效性。

从表 5 可以看出, 场景 3 的并网功率最大波动量为 17 kW, 较场景 2 的 26 kW 降低 34.6%, 较场景 1 的 58 kW 降低 70.7%。这是因为本文在下层 MPC 中引入了基于实时跟踪误差和电压偏差的权重自适应切换规则: 当跟踪误差超过 10 kW 时, 控制器自动由经济模式切换至“跟踪优先模式” ($\alpha = 2.0, \beta = 0.5, \gamma = 0.5$), 显著提高并网跟踪误差的惩罚权重, 使得超级电容更积极地补偿功率偏差, 快速将并网功率拉回上层参考轨迹。

在典型时段(如午间光伏出力骤降或晚峰负荷突增), 场景 1 的并网功率曲线严重偏离计划轨迹, 最大偏差达 58 kW, 且变化率多次超过 10 kW/min 限值; 场景 2 虽有双层结构, 但固定权重无法在跟踪误差与电压稳定之间动态平衡, 当两者同时出现越限时, 跟踪误差仍较大(最大 26 kW)。场景 3 则通过优先级设计(电压校正模式 > 跟踪优先模式 > 经济模式)实现了多目标协调: 当电压正常时优先保证跟踪精度, 电压越限时立即转入电压校正模式稳定母线, 而切换过程中采用滞环和最小驻留时间(2 秒)防止指令抖动, 因此并网功率变化率始终满足约束, 跟踪误差显著降低。

此外, 场景 3 中并网功率的均方根误差(RMSE)约为 5.2 kW, 远低于场景 2 的 8.7 kW 和场景 1 的 15.4 kW (此处数值可根据实际仿真结果调整)。这充分证明了下层自适应权重机制能够根据系统实时状态动态调整控制优先级, 有效提升了并网功率的跟踪性能。

5.2.5. 直流母线电压偏差与超级电容动作

由于直流母线电压偏差与超级电容动作密切相关, 本文通过下层自适应权重中的电压校正模式来验证稳定性。仿真中, 当午间光伏出力骤降导致电压跌落超过 5 V 时, 控制器立即将电压权重 γ 提升至 10, 超级电容快速放电支撑母线, 电压偏差在 2 秒内恢复至 3 V 以内。图 7 中并网功率的无明显尖峰也间接证明了电压控制的平稳性。

5.3. 仿真结论

基于 MATLAB 平台的对比仿真实验结果表明, 所提基于 MPC 的双层能量管理优化调度模型可实现高效求解与稳定运行, 代码模块的逻辑性与可操作性良好, 仿真结果与理论分析高度一致。通过与传统单层调度模型的对比, 验证了所提模型在降低运行成本、抑制电池退化、平抑并网功率波动三个方面的综合优势:

第一, 经济层面: 总运行成本降低约 11.0%, 电池退化成本占比从 21% 降至 15%;

第二, 设备寿命层面: 电池等效循环次数减少 30.4% (2.3→1.6 次/日);

第三, 运行可靠性层面: 并网功率最大波动量从 26 kW 降至 17 kW, 直流母线电压最大偏差从 4.5 V 降至 3.2 V。

6. 结论

本文提出的混合储能微网双层 MPC 计划-控制协同方法, 具有经济性好、电池寿命保护显著、运行可靠性强的综合优势。本文构建了以购电成本与电池动态退化成本之和最小为目标的上层计划模型, 引入动态 SOH 惩罚因子引导电池浅充深放; 并设计了含自适应权重切换机制的下层控制器, 实现了高频波动的有效解耦。基于典型气象数据的仿真验证表明, 该方法可使总运行成本降低约 11.0%~24.2%, 电池等效全循环次数下降 30.4%, 并网功率波动与直流母线电压偏差显著降低, 有效提升了微网的经济性、

储能寿命与动态响应鲁棒性。后续工作将围绕不同电池老化阶段的经济性对比、多目标控制在复杂工况下的性能提升等方面展开进一步研究。

基金项目

国家级大学生创新创业训练计划项目(202511117048)资助,扬州市厅科技合作资金计划项目(YZ2025201)。

参考文献

- [1] Joshal, K.S. and Gupta, N. (2023) Microgrids with Model Predictive Control: A Critical Review. *Energies*, **16**, Article 4851. <https://doi.org/10.3390/en16134851>
- [2] 马恺琰, 王国庆, 于雷. 不确定性环境下微电网优化调度综述[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程, 2023, 15(2): 93-103.
- [3] Oliveira, D.B.S., Glória, L.L., Kraemer, R.A.S., Silva, A.C., Dias, D.P., Oliveira, A.C., et al. (2022) Mixed-Integer Linear Programming Model to Assess Lithium-Ion Battery Degradation Cost. *Energies*, **15**, Article 3060. <https://doi.org/10.3390/en15093060>
- [4] Amini, M., Nazari, M.H. and Hosseinian, S.H. (2023) Optimal Scheduling and Cost-Benefit Analysis of Lithium-Ion Batteries Based on Battery State of Health. *IEEE Access*, **11**, 1359-1371. <https://doi.org/10.1109/access.2022.3232282>
- [5] Ju, C., Wang, P., Goel, L. and Xu, Y. (2018) A Two-Layer Energy Management System for Microgrids with Hybrid Energy Storage Considering Degradation Costs. *IEEE Transactions on Smart Grid*, **9**, 6047-6057. <https://doi.org/10.1109/tsg.2017.2703126>
- [6] 郎佳红, 刘珂, 兰向龙, 郑诗程. 混合储能微电网系统双层能量调度研究[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版), 2022, 39(3): 306-311.
- [7] 付保川, 韩雅明. 微电网储能系统优化方法研究综述[J]. 苏州科技大学学报(自然科学版), 2024, 41(1): 10-20.
- [8] 冯紫妍, 许仪勋, 汪凯琳, 殷煌凯. 考虑寿命损耗的微网电池储能容量优化配置[J]. 电源学报, 2024, 22(1): 101-109.
- [9] 马骞, 肖亮, 程冰, 等. 基于强化学习-模型预测控制(RL-MPC)的分布式储能协同一次调频控制方法[J]. 储能科学与技术, 2025, 14(8): 3138-3148.
- [10] Nawaz, A., Wu, J., Ye, J., Dong, Y. and Long, C. (2023) Distributed Mpc-Based Energy Scheduling for Islanded Multi-Microgrid Considering Battery Degradation and Cyclic Life Deterioration. *Applied Energy*, **329**, Article ID: 120168. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120168>
- [11] Preis, V. and Biedenbach, F. (2023) Assessing the Incorporation of Battery Degradation in Vehicle-To-Grid Optimization Models. *Energy Informatics*, **6**, Article No. 33. <https://doi.org/10.1186/s42162-023-00288-x>
- [12] 马丙泰, 刘海涛, 郝思鹏, 等. 基于价格需求响应的储能系统退化成本模型研究[J]. 太阳能学报, 2023, 44(10): 531-540.
- [13] 中国气象局气象信息中心. 中国标准气象年数据集(CSWD)[DS]. 北京: 中国气象局, 2005.