

基于动态时区划分的混合储能源荷协同优化调度方法

郭一帆¹, 欧阳森¹, 辛曦², 张杰宁¹, 张勇军¹

(1. 华南理工大学电力学院, 广州 510640; 2. 国网江西省电力有限公司培训中心, 南昌 330032)

摘要: 电力系统中混合储能系统的协调运行可以弥补单一储能在多时间尺度电力和电量调节中的不足, 但其经济性限制了其与源荷协同参与辅助电网调峰和提升新能源消纳中的应用潜力。为此, 提出了一种基于动态时区划分的混合储能源荷协同优化调度方法。首先, 基于源荷不平衡功率, 综合考虑新能源出力预测误差与需求侧响应设计了动态时区划分策略, 引导混合储能在日前-日内不同时间尺度下从电量与电力两个维度协同提升新能源消纳能力和辅助调峰效果。其次, 以系统日总运行成本最小为目标, 构建了系统日前-日内滚动优化调度模型, 其中能量型储能在日前尺度提供调峰电量支撑, 功率型储能在日内尺度平抑新能源波动, 并通过滚动优化减少系统源荷预测误差, 同时嵌入储能循环寿命模型, 使系统调度结果更贴近实际工况。最后, 通过算例验证了所提方法在经济性、新能源消纳及调峰效果方面的有效性和优越性。

关键词: 混合储能; 多时间尺度; 协同优化; 调峰服务; 动态时区划分

Collaborative Optimization Scheduling Method for Hybrid Energy Storage Source and Load Based on Dynamic Time Zone Division

GUO Yifan¹, OUYANG Sen¹, XIN Xi², ZHANG Jiening¹, ZHANG Yongjun¹

(1. School of Electric Power Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. Training Center of State Grid Jiangxi Electric Power Co., Ltd., Nanchang 330032, China)

Abstract: The coordinated operation of hybrid energy storage systems (HESS) in the power system can make up for the shortcomings of single energy storage in multiple time-scales power and electricity scheduling, but its economic limitations limit its potential to participate in auxiliary grid peak-shaving and enhance new energy consumption in coordination with source load. Therefore, a hybrid energy storage load collaborative optimization scheduling method is proposed based on dynamic time zone partitioning. Firstly, based on the power imbalance between the source and load, a dynamic time zone division strategy is designed by considering the prediction error of new energy output and the demand side response, which guides hybrid energy storage to synergistically enhance the new energy consumption capacity and auxiliary peak shaving effect from the perspectives of electricity quantity and power at different day-ahead-intraday time scales. Secondly, with the goal of minimizing the total daily operating cost of the system, a system day ahead day rolling optimization scheduling model is constructed. Energy based energy storage provides peak shaving power support at the day ahead scale, while power based energy storage smooths out new energy fluctuations at the intraday scale. Rolling optimization is used to reduce system source load prediction errors, and an energy storage cycle life model is embedded to make the system scheduling results closer to actual operating conditions. Finally, the effectiveness and superiority of the proposed method in terms of economy, new energy consumption, and peak shaving effect are verified through numerical examples.

Key words: hybrid energy storage; multiple time-scales; collaborative optimization; peak-shaving service; dynamic time zone division

0 引言

近年来,由于大规模新能源反调峰特性带来的“源-荷”时空不匹配问题导致了大量新能源弃电并加剧了电网的调峰需求。在此背景下,储能已成为解决该问题的重要手段^[1-3],但单一储能只能在单一时间维度下参与调峰,难以发挥经济与技术优势,而混合储能具有能量型与功率型互补特性,更易与“源荷”协同作用,对改善反调峰性能和提高新能源消纳水平具有重要意义。

目前,已有学者对混合储能源荷协同优化调度方法开展了大量研究。文献[4-5]采用改进的小波包法制定混合储能策略提高系统新能源消纳率。文献[6]提出了混合储能参与系统深度调峰的运行方法,通过源荷协同,提高新能源消纳率与系统经济性。文献[7]针对风电夜间大发导致弃电现象的场景制定了混合储能运行策略,但模型简单,不能表征混合储能实际运行效益。文献[8]提出了一种混合储能调峰双层优化配置方法,通过优化运行可有效缓解电网调峰压力,同时提高系统运行经济性与稳定性。但上述方法均为确定性优化,未考虑预测误差对结果的影响。为此,文献[9-12]通过日前-日内滚动优化减小风光出力和负荷不确定性的影响,提高了所优化结果的可信度,但模型未量化多时间尺度滚动出力对储能循环寿命的影响。因此,现有研究未考虑日前-日内滚动的混合储能多时间尺度运行策略,也未考虑储能循环寿命的影响以及源荷协同改善系统反调峰特性。

经济性不佳是限制储能发展的重要因素,文献[13-16]对混合储能调峰经济性进行了讨论,与单一储能相比,混合储能具有更好的调峰经济性,且可通过参与新能源消纳进一步提升调峰经济性。文献[17-20]基于储能与新能源联合调峰提高了储能参与调峰的经济性,可为混合储能运行提供一定的参考。也有学者对混合储能运行策略进行研究,通过发挥互补优势提升经济性,文献[21-22]基于充电状态(state of charge, SOC)分区调动混合储能出力,但是其分区边界条件复杂且受运行人员主观影响。文献[23-24]对峰谷功率划分时区,方案简单易实施,但单一时间尺度无法发挥混合储能电力优势。因此,混合储能仅以电量参

与调峰经济性仍然不高,且现有运行策略未从不同时间尺度划分运行时区,引导混合储能从电力与电量两个维度参与新能源消纳以提升调峰经济性。

为解决上述问题,本文提出了一种基于动态时区划分的混合储能源荷协同优化调度方法。首先,综合考虑需求侧响应(demand response, DR)与源荷不平衡功率,对日时间尺度动态时区进行划分,引导锂电池以电量支撑新能源消纳与辅助调峰,引导超级电容以电力参与平抑新能源波动。然后,建立系统日总成本最小为目标的日前-日内滚动调度优化调度模型,计及储能循环寿命对运行成本的影响,通过日内滚动提升预测精度。最后,使用MATLAB/Gurobi软件对该模型进行求解,结合实际算例验证了优化调度方法的有效性。

1 基本框架

在系统实际运行过程中风电调峰效应以反调峰为主^[25],其发生概率超过70%,为此本节对系统反调峰特性产生的不平衡功率进行计算,提出了动态时区划分运行策略,将日时间尺度划分为新能源消纳时区、辅助调峰时区和其他时区,并通过日前-日内滚动对时区划分进行动态修正,其中辅助调峰时区由电网发布。动态时区划分滚动优化框架如图1所示。

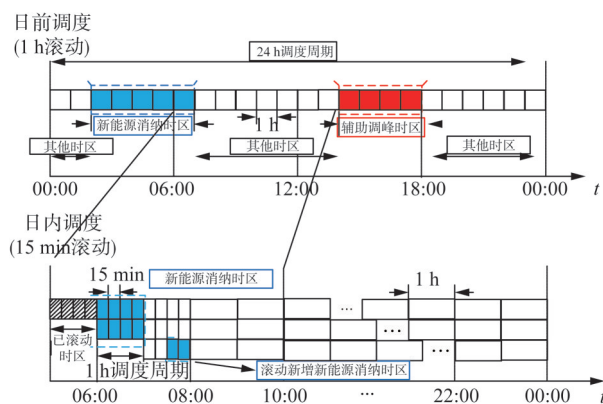


图1 动态时区划分的滚动优化基本框架

Fig. 1 Basic framework of rolling optimization for dynamic time zone division

图1将日前调度计划作为长时间尺度调度计划,以1h为分辨率,24h为调度周期,蓝色格为 $\Delta P_t > 0$ 的新能源消纳时区,红色格为 $\Delta P_t < 0$ 的辅

助调峰时区, ΔP_t 计算公式见式(1)。日内调度计划作为短时间尺度调度计划, 以 15 min 为分辨率, 1 h 为调度周期, 阴影格表示已滚动时区。

动态时区划分策略根据不平衡功率计算得到, 并每小时滚动更新, 不平衡功率 ΔP_t 计算如式(1)所示。

$$\Delta P_t = P_{w,t} + P_{p_v,t} + P_{g,\min} - P_{load,t}^{DR} \quad (1)$$

式中: ΔP_t 为 t 时刻系统不平衡功率; $P_{w,t}$ 、 $P_{p_v,t}$ 、 $P_{g,\min}$ 分别为 t 时刻风机、光伏的预测出力, 和火电机组安全约束最小出力; $P_{load,t}^{DR}$ 为负荷参与需求侧响应后的 t 时刻预测出力。本文参考文献[26]采用基于电价引导的 DR 模型求得 DR 响应量, 与负荷预测出力求和得到 $P_{load,t}^{DR}$ 。

1) 当 $\Delta P_t > 0$ 时为新能源消纳时区: 锂电池只充电, 参考文献[27], 此时区锂电池在较大时间分辨率下的日前尺度吸纳富余的新能源出力, 费用为 0。超级电容通过日内滚动, 在较小时间分辨率下的日内尺度承担新能源出力剧烈波动部分。

2) 当 $\Delta P_t < 0$ 时且为负荷高峰时刻, 此时区为辅助调峰时区, 混合储能参与辅助调峰市场交易, 锂电池只放电, 获得辅助调峰补贴; 超级电容在此过程中快充快放从而获得辅助调峰补贴。本文中负荷高峰时刻基于历史数据分析得到典型场景, 传递给电网规划部门发布负荷高峰时区。

3) 当 $\Delta P_t < 0$ 时且不为负荷高峰时刻, 此时区为其他时区, 锂电池不动作, 超级电容在短时间尺度无偿平抑新能源波动。

2 系统日前-日内滚动优化调度模型

为应对“源-荷”不确定问题, 本节基于前文中提出的动态时区划分策略, 并采用适用于不确定性的多场景随机规划方法建立了混合储能优化运行模型, 基于该模型生成了多个典型场景, 求解得到的优化决策变量能满足各场景下的约束条件, 最后选择综合性能最优的方案作为最终的调度计划^[28]。

2.1 日前优化调度模型

2.1.1 日前优化调度目标函数

本文系统日前优化调度采用了基于场景的随机规划模型, 目标函数为系统日总运行成本最小化函数 $C_{inv,DB}$, 日总运行成本包括火电机组运行成本 $c_{g,total}$ 、弃风弃光成本 $c_{dg,total}$ 、锂电池运行成本

$c_{opt,total}$ 、辅助调峰补贴成本 $c_{p,total}$ 。

$$\min C_{inv,DB} = c_{g,total} + c_{dg,total} + c_{opt,total} + c_{p,total} \quad (2)$$

$$\left\{ \begin{aligned} c_{g,total} &= \sum_{g=1}^{N_G} \sum_{t=1}^{N_{TD}} \left[\sum_{s=1}^{N_s} \pi_s (a_g + b_g P_{g,t,s} + c_g P_{g,t,s}^2) \Delta t + c_{st} x_{g,t} + c_{sh} y_{g,t} \right] \\ c_{dg,total} &= \sum_{W=1}^{N_W} \sum_{t=1}^{N_{TD}} \sum_{s=1}^{N_s} [\pi_s c_{W,cut,t,s} P_{W,cut,t,s} \Delta t] + \\ &\quad \sum_{V=1}^{N_{PV}} \sum_{t=1}^{N_{TD}} \sum_{s=1}^{N_s} [\pi_s c_{V,cut,t,s} P_{V,cut,t,s} \Delta t] \\ c_{opt,total} &= \sum_{t=1}^{N_{TD}} \left[\sum_{s=1}^{N_s} \pi_s (c_{char,t,s} P_{char,t,s}^{ESS} + c_{disc,t,s} P_{disc,t,s}^{ESS}) \Delta t \right] + \\ &\quad \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s (c_{E,ESS,s} E_s^{ESS} + C_{P,ESS,s} P_s^{ESS}) r_d \\ c_{p,total} &= \sum_{t=t_{start}}^{t_{end}} \left[\sum_{s=1}^{N_s} \pi_s (c_{p,disc,t,s} P_{disc,t,s}^{ESS}) \Delta t \right] \end{aligned} \right. \quad (3)$$

$$r_d = \frac{r(1+r)^Y}{(1+r)^Y - 1} / 365 \quad (4)$$

式中: N_G 为火电机组数量; N_{TD} 为日前调度时段数量; N_s 为场景数量; N_W 为风机数量; N_{PV} 为光伏系统数量; π_s 为第 s 种场景出现的概率; a_g 、 b_g 、 c_g 为第 g 台火电机组燃料成本函数系数; $P_{g,t,s}$ 为第 s 种场景下第 g 个火电机组在 t 时刻输出的功率; c_{st} 、 c_{sh} 分别为火电机组启动和停止成本; $x_{g,t}$ 、 $y_{g,t}$ 分别为第 g 台火电机组的在 t 时刻的开机和停机动作系数; $c_{W,cut,t,s}$ 为第 s 个场景下第 W 个风电场 t 时刻的弃风成本; $P_{W,cut,t,s}$ 为第 s 个场景下第 W 个风电场 t 时刻的弃风功率; $c_{V,cut,t,s}$ 为第 s 个场景下第 V 个光伏系统 t 时刻的弃光成本; $P_{V,cut,t,s}$ 为第 s 个场景下第 V 个光伏系统 t 时刻的弃光功率; E_s^{ESS} 、 P_s^{ESS} 分别为第 s 个场景下锂电池配置的容量和功率; $c_{char,t,s}$ 、 $c_{disc,t,s}$ 分别为第 s 个场景下 t 时刻锂电池充电成本和放电成本; $P_{char,t,s}^{ESS}$ 、 $P_{disc,t,s}^{ESS}$ 分别为第 s 个场景下锂电池 t 时刻的充电功率和放电功率; t_{start} 、 t_{end} 分别为调峰时区开始和结束时刻; $c_{p,disc,t,s}$ 为第 s 个场景下调峰时区锂电池合同规定调峰补偿电价; r_d 为日均等年值转换系数; r 为折现率, 本文取 5%; Y 为项目周期, 本文取 15 a; $c_{E,ESS,s}$ 、 $C_{P,ESS,s}$ 分别为第 s 个场景下锂电池固定单位电量成本和单位功率投资成本; Δt 为时间分辨率。

2.1.2 约束条件

1) 有功功率平衡约束

$$\begin{aligned} & \sum_{g=1}^{N_g} P_{g,t,s} + \sum_{W=1}^{N_W} (P_{W,t,s} - P_{W,\text{cut},t,s}) + \\ & \sum_{V=1}^{N_{PV}} (P_{V,t,s} - P_{V,\text{cut},t,s}) + P_{\text{disc},t,s}^{\text{ESS}} \\ & = P_{\text{load},t,s}^{\text{DR}} + P_{\text{char},t,s}^{\text{ESS}} \end{aligned} \quad (5)$$

式中: $P_{\text{load},t,s}^{\text{DR}}$ 为第 s 个场景下的负荷参与需求侧响应后的 t 时刻预测出力; $P_{W,t,s}$ 为第 s 种场景下第 W 个风电机组在 t 时刻输出的功率; $P_{V,t,s}$ 为第 s 个场景下第 V 个光伏机组在 t 时刻预测出力。

2) 新能源弃电约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{W,\text{cut},t,s} \leq P_{W,t,s} \\ 0 \leq P_{N_{PV},\text{cut},t,s} \leq P_{N_{PV},t,s} \end{cases} \quad (6)$$

3) 火电机组开停机状态约束

$$\begin{cases} x_{g,t} - y_{g,t} = u_{g,t} - u_{g,t-1} \\ x_{g,t} + y_{g,t} \leq 1 \end{cases} \quad (7)$$

式中: $x_{g,t}$ 、 $y_{g,t}$ 分别为第 g 台火电机组的开停机操作, 其中 $x_{g,t}$ 为 1 时表示有开机操作, 为 0 时无开机操作, $y_{g,t}$ 为 1 时表示有停机操作, 为 0 时无停机操作; $u_{g,t}$ 、 $u_{g,t-1}$ 分别为第 g 台火电机组在 t 时刻和 $(t-1)$ 时刻的开停机状态, 为 1 时表示机组处于开机状态, 为 0 时表示机组处于停机状态。

4) 火电机组出力上下限约束

$$u_{g,t} P_g^{\min} \leq P_{g,t,s} \leq u_{g,t} P_g^{\max} \quad (8)$$

式中 $P_g^{\min}$ 、 $P_g^{\max}$ 分别为第 g 台火电机组输出功率的最小值、最大值。

5) 火电机组爬坡约束

$$-D_g \Delta t \leq P_{g,t,s} - P_{g,t-1,s} \leq D_g \Delta t \quad (9)$$

式中 D_g 为第 g 个火电机组爬坡的功率限制。

6) 锂电池充放电功率约束

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{char},t,s}^{\text{ESS}} \leq \bar{P}_s^{\text{ESS}} \\ 0 \leq P_{\text{disc},t,s}^{\text{ESS}} \leq \bar{P}_s^{\text{ESS}} \end{cases} \quad (10)$$

式中 $\bar{P}_s^{\text{ESS}}$ 为第 s 个场景下储能配置的额定功率。

7) 锂电池电量约束

$$\begin{cases} \alpha_{\min}^{\text{ESS}} E_s^{\text{ESS}} \leq E_{\text{ESS},t,s} \leq \alpha_{\max}^{\text{ESS}} E_s^{\text{ESS}} \\ E_{\text{ESS},t,s} = E_{\text{ESS},t-1,s} + (\eta_{\text{char},s}^{\text{ESS}} P_{\text{char},t-1,s}^{\text{ESS}} - P_{\text{disc},t-1,s}^{\text{ESS}} / \eta_{\text{disc},s}^{\text{ESS}}) \Delta t \\ E_{\text{ESS},t=1,s} = E_{\text{ESS},t=N_{\text{TD}},s} \end{cases} \quad (11)$$

式中: $\alpha_{\min}^{\text{ESS}}$ 、 $\alpha_{\max}^{\text{ESS}}$ 分别为锂电池荷电状态的下限与上限; $E_{\text{ESS},t,s}$ 为第 s 个场景下锂电池 t 时刻的电量; $\eta_{\text{char},s}^{\text{ESS}}$ 、 $\eta_{\text{disc},s}^{\text{ESS}}$ 分别为第 s 个场景下锂电池的充电和放电功率; $E_{\text{ESS},t=1,s}$ 、 $E_{\text{ESS},t=N_{\text{TD}},s}$ 分别为第 s 个场景下锂电池初始时刻和结束时刻电量。

8) 需求侧响应约束

本文设置基于电价引导的 DR 嵌入锂电池日前优化调度模型中, 响应前后柔性负荷的功率与电价满足如下约束。

$$\begin{bmatrix} \Delta P_{\text{load},f} \\ \Delta P_{\text{load},g} \\ \Delta P_{\text{load},n} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_{\text{load},f,\text{ini}} & 0 & 0 \\ 0 & P_{\text{load},g,\text{ini}} & 0 \\ 0 & 0 & P_{\text{load},n,\text{ini}} \end{bmatrix} \mathbf{D} \begin{bmatrix} \Delta c_f \\ c_{f,\text{ini}} \\ \Delta c_g \\ c_{g,\text{ini}} \\ \Delta c_n \\ c_{n,\text{ini}} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} d_{ff} & d_{fg} & d_{fn} \\ d_{gf} & d_{gg} & d_{gn} \\ d_{nf} & d_{ng} & d_{nn} \end{bmatrix} \quad (13)$$

式中: $\Delta P_{\text{load},f}$ 、 $\Delta P_{\text{load},g}$ 、 $\Delta P_{\text{load},n}$ 分别为峰、谷、平时段响应前后的柔性负荷变化量; Δc_f 、 Δc_g 、 Δc_n 分别为峰、谷、平时段响应前后的电价变化量; $P_{\text{load},f,\text{ini}}$ 、 $P_{\text{load},g,\text{ini}}$ 、 $P_{\text{load},n,\text{ini}}$ 和 $c_{f,\text{ini}}$ 、 $c_{g,\text{ini}}$ 、 $c_{n,\text{ini}}$ 分别为日前预测峰、谷、平时段的负荷初始值与初始电价; $\mathbf{D}$ 为弹性系数矩阵, 矩阵主对角线为自弹性系数, 其他为互弹性系数。根据文献[28]自弹性系数区间为 $[-0.12, -0.18]$, 互弹性系数区间为 $[0.03, 0.10]$ 。

2.1.3 求解结果

本节采用商业优化软件 gurobi 对日前调度模型进行求解, 根据场景发生概率分布作为权重, 采用加权平均法对各个场景的调度结果进行整合, 生成一个全局优化的调度计划, 得到受日前预测数据误差影响较小的火电机组启停状态 $x_{g,t}$ 、 $y_{g,t}$ 和 DR 出力大小 $\Delta P_{\text{load},f}$ 、 $\Delta P_{\text{load},g}$ 、 $\Delta P_{\text{load},n}$ 作为已知变量带入超级电容日内优化调度模型, 火电机组和锂电池优化运行结果作为日内优化调度参考值, 进行滚动修正。

2.2 日内优化调度模型

2.2.1 日内优化调度目标函数

日内优化调度模型的目标函数为日总成本最小化函数 $C_{\text{inv},\text{DI}}$, 包括: 火电机组运行成本 $c_{g,\text{total}}$ 、弃风弃光成本 $c_{\text{dg},\text{total}}$ 、混合储能运行成本 $c_{\text{opt},\text{total}}$ 、辅助调峰补偿成本 $c_{p,\text{total}}$ 、旋转备用成本 $c_{d,\text{total}}$ 。由于超级

电容器寿命远高于锂电池,故本文不考虑超级电容电芯更换成本^[9]。

$$\min C_{\text{inv, DI}} = c_{g, \text{total}} + c_{dg, \text{total}} + c_{\text{opt, total}} + c_{p, \text{total}} + c_{d, \text{total}} \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} c_{g, \text{total}} = \sum_{g=1}^{N_G} \sum_{t=1}^{N_{Ti}} (a_g + b_g P_{g,t} + c_g P_{g,t}^2) \Delta t + c_{st} x_{g,t} + c_{sh} y_{g,t} \\ c_{dg, \text{total}} = \sum_{W=1}^{N_W} \sum_{t=1}^{N_{Ti}} (c_{W, \text{cut}, t} P_{W, \text{cut}, t} \Delta t) + \sum_{V=1}^{N_{PV}} \sum_{t=1}^{N_{Ti}} (c_{V, \text{cut}, t} P_{V, \text{cut}, t} \Delta t) \\ c_{\text{opt, total}} = \sum_{t=1}^{N_{Ti}} (c_{\text{char}, t} P_{\text{char}, t}^{\text{SC}} + c_{\text{disc}, t} P_{\text{disc}, t}^{\text{SC}}) \Delta t + \sum_{t=1}^{N_{Ti}} (c_{\text{char}, t} P_{\text{char}, t}^{\text{ESS}} + c_{\text{disc}, t} P_{\text{disc}, t}^{\text{ESS}}) \Delta t + (c_{E, \text{SC}} E^{\text{SC}} + c_{P, \text{SC}} P^{\text{SC}}) r_d \\ c_{p, \text{total}} = \sum_{t=t_{r, \text{st}}}^{t_{r, \text{end}}} [c_{p, \text{disc}, t} (P_{\text{disc}, t}^{\text{ESS}} + P_{\text{disc}, t}^{\text{SC}}) \Delta t] \\ c_{d, \text{total}} = \sum_{t=1}^{N_{Ti}} c_t^{\text{ESS}} (R_{\text{ESS}, t}^+ + R_{\text{ESS}, t}^-) \Delta t + \sum_{t=1}^{N_{Ti}} c_t^{\text{SC}} (R_{\text{SC}, t}^+ + R_{\text{SC}, t}^-) \Delta t \end{array} \right. \quad (15)$$

式中: N_{Ti} 为日内时段数量; $P_{\text{char}, t}^{\text{SC}}$ 、 $P_{\text{disc}, t}^{\text{SC}}$ 分别为超级电容 t 时刻的充电功率和放电功率; c_t^{ESS} 、 c_t^{SC} 分别为锂电池和超级电容在 t 时刻的旋转备用成本; $R_{\text{ESS}, t}^+$ 、 $R_{\text{ESS}, t}^-$ 、 $R_{\text{SC}, t}^+$ 、 $R_{\text{SC}, t}^-$ 分别为锂电池和超级电容在 t 时刻的正旋转、负旋转备用; $c_{E, \text{SC}}$ 、 $c_{P, \text{SC}}$ 分别为超级电容单位电量和单位功率投资成本; E^{SC} 、 P^{SC} 分别为超级电容的容量和功率。

2.2.2 约束条件

日内优化调度模型考虑的新能源弃电约束、火电机组开停机状态约束等约束与基于锂电池日前调度模型约束类似,本文不再赘述。其他约束如下所示。

1) 有功功率平衡约束

$$\sum_{g=1}^{N_G} P_{g,t} + \sum_{W=1}^{N_W} (P_{W,t} - P_{W, \text{cut}, t}) + \sum_{V=1}^{N_{PV}} (P_{V,t} - P_{V, \text{cut}, t}) + P_{\text{disc}, t}^{\text{ESS}} + P_{\text{disc}, t}^{\text{SC}} = P_{\text{load}, t} + P_{\text{char}, t}^{\text{ESS}} + P_{\text{char}, t}^{\text{SC}} \quad (16)$$

2) 超级电容充放电功率约束

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq P_{\text{char}, t, s}^{\text{SC}} \leq P_{\text{SC}, s} \\ 0 \leq P_{\text{disc}, t, s}^{\text{SC}} \leq P_{\text{SC}, s} \end{array} \right. \quad (17)$$

式中 $P_{\text{SC}, s}$ 为第 s 个场景下超级电容额定功率。

3) 超级电容电量约束

$$\left\{ \begin{array}{l} \alpha_{\min}^{\text{SC}} E^{\text{SC}} \leq E_{\text{SC}, t} \leq \alpha_{\max}^{\text{SC}} E^{\text{SC}} \\ E_{\text{SC}, t} = E_{\text{SC}, t-1} + (\eta_{\text{char}, s}^{\text{SC}} P_{\text{char}, t-1, s}^{\text{SC}} - P_{\text{disc}, t-1}^{\text{SC}} / \eta_{\text{disc}}^{\text{SC}}) \Delta t \\ E_{\text{SC}, t=1} = E_{\text{SC}, t=1T_0} = \dots = E_{\text{SC}, t=nT_0} \end{array} \right. \quad (18)$$

式中: $\alpha_{\min}^{\text{SC}}$ 、 $\alpha_{\max}^{\text{SC}}$ 分别为锂电池荷电状态的下限与上限; $E_{\text{SC}, t}$ 为超级电容 t 时刻的电量; $\eta_{\text{char}}^{\text{SC}}$ 、 $\eta_{\text{disc}}^{\text{SC}}$ 分别为超级电容的充电和放电功率; $E_{\text{SC}, t=1}$ 、 $E_{\text{SC}, t=nT_0}$ 分别为超级电容器开始时刻和第 n 次滚动优化结束时刻电量; T_0 为滚动优化时间。

4) 旋转备用约束

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq R_{\text{ESS}, t}^+ \leq P_{\text{ESS}} - P_{\text{disc}, t}^{\text{ESS}} + P_{\text{char}, t}^{\text{ESS}} \\ 0 \leq R_{\text{ESS}, t}^- \leq P_{\text{ESS}} - P_{\text{char}, t}^{\text{ESS}} + P_{\text{disc}, t}^{\text{ESS}} \\ R_{\text{ESS}, t}^+ + P_{\text{disc}, t}^{\text{ESS}} - P_{\text{char}, t}^{\text{ESS}} \leq E_{\text{ESS}, t-1} - \alpha_{\min}^{\text{ESS}} E_{\text{ESS}} / \Delta t \\ R_{\text{ESS}, t}^- + P_{\text{char}, t}^{\text{ESS}} - P_{\text{disc}, t}^{\text{ESS}} \leq \alpha_{\max}^{\text{ESS}} E_{\text{ESS}} - E_{\text{ESS}, t-1} / \Delta t \end{array} \right. \quad (19)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq R_{\text{SC}, t}^+ \leq P^{\text{SC}} - P_{\text{disc}, t}^{\text{SC}} + P_{\text{char}, t}^{\text{SC}} \\ 0 \leq R_{\text{SC}, t}^- \leq P^{\text{SC}} - P_{\text{char}, t}^{\text{SC}} + P_{\text{disc}, t}^{\text{SC}} \\ R_{\text{SC}, t}^+ + P_{\text{disc}, t}^{\text{SC}} - P_{\text{char}, t}^{\text{SC}} \leq \frac{E_{\text{SC}, t-1} - \alpha_{\min}^{\text{SC}} E^{\text{SC}}}{\Delta t} \\ R_{\text{SC}, t}^- + P_{\text{char}, t}^{\text{SC}} - P_{\text{disc}, t}^{\text{SC}} \leq \frac{\alpha_{\max}^{\text{SC}} E^{\text{SC}} - E_{\text{SC}, t-1}}{\Delta t} \end{array} \right. \quad (20)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} R_{\text{ESS}, t}^+ + R_{\text{SC}, t}^+ \geq \Phi^{-1}(\varepsilon) \sqrt{\delta_w^2} \\ R_{\text{ESS}, t}^- + R_{\text{SC}, t}^- \geq \Phi^{-1}(\varepsilon) \sqrt{\delta_w^2} \end{array} \right. \quad (21)$$

式中: ε 为日内预测的置信度; Φ^{-1} 为正态分布概率密度函数的反函数; δ_w^2 为风电的标准差。

5) 新能源波动量约束

为保证资金来源的合理性与可持续,超级电容需参与调节新能源出力的波动性,其约束如式(22)所示。

$$\begin{aligned} & \max_{t=4(n-1)+1, \dots, n} \sum_{W=1}^{N_W} P_{W,t} + \sum_{V=1}^{N_{PV}} P_{V,t} - P_{\text{char}, t}^{\text{SC}} + P_{\text{disc}, t}^{\text{SC}} - \\ & \min_{t=4(n-1)+1, \dots, 4n} \sum_{W=1}^{N_W} P_{W,t} + \sum_{V=1}^{N_{PV}} P_{V,t} - P_{\text{char}, t}^{\text{SC}} + P_{\text{disc}, t}^{\text{SC}} \leq \\ & \alpha_{\text{vol}} (S_W + S_{PV}) \end{aligned} \quad (22)$$

式中: n 为日内滚动周期数, $n=1, \dots, N_{TD}$; $P_{W,t}$ 、 $P_{V,t}$ 分别为风机和光伏日内 t 时刻出力; α_{vol} 为新能源出力波动率限制率; S_W 、 S_{PV} 分别为总风机和光伏装机容量。

2.2.3 求解结果

本节通过商业优化软件gurobi工具包对日内优化调度模型进行求解,由于日内滚动后求解结果精确度高,为便于混合储能投资决策,将以下变量作为求解输出。

- 1) 火电机组各时刻出力: $P_{g,t}$;
- 2) 锂电池各时刻出力: $P_{\text{char},t}^{\text{ESS}}, P_{\text{disc},t}^{\text{ESS}}$;
- 3) 超级电容器各时刻出力 $P_{\text{char},t}^{\text{SC}}, P_{\text{disc},t}^{\text{SC}}$ 。

3 考虑锂电池循环寿命模型的日前调度模型

3.1 锂电池循环寿命计算方法

锂电池循环寿命是影响混合储能总成本重要因素^[25],为量化混合储能运行策略对循环寿命的影响,本文基于锂电池放电深度建立循环寿命模型并将模型线性化处理。

首先通过锂电池相邻时间分辨率的充放电状态变化次数统计其荷电状态(state of charge, SOC)曲线上所有半循环的计数量,如式(23)所示。

$$x_t = (\gamma_t^{\text{char}} - \gamma_{t-1}^{\text{char}})^2 \quad (23)$$

式中 x_t 、 γ_t^{char} 为0-1变量, x_t 取值为1和0时表示锂电池充电状态发生/不发生变化, γ_t^{char} 取值为1和0表示锂电池处于/不处于充电状态。

进一步求得锂电池在同一充放电状态下的累计电量为 E_t^{acum} 。

$$E_t^{\text{acum}} = (1 - x_t)E_{t-1}^{\text{acum}} + (\eta_{\text{char}}^{\text{ESS}} P_{\text{char},t}^{\text{ESS}} + P_{\text{disc},t}^{\text{ESS}} / \eta_{\text{disc}}^{\text{ESS}}) \Delta t \quad (24)$$

$$d_t = E_t^{\text{acum}} / E^{\text{ESS}} \quad (25)$$

式中: $P_{\text{char},t}^{\text{ESS}}$ 、 $P_{\text{disc},t}^{\text{ESS}}$ 分别为锂电池 t 时刻的充电功率和放电功率; $\eta_{\text{char}}^{\text{ESS}}$ 、 $\eta_{\text{disc}}^{\text{ESS}}$ 分别为锂电池充放电效率; d_t 为锂电池放电深度; E^{ESS} 为锂电池额定容量。

采用雨流计数法所测的储能放电深度与循环次数拟合,得到三阶多项式为:

$$l(d_t) = -2083d_t^3 + 8750d_t^2 - 13170d_t + 11200 \quad (26)$$

为统计锂电池实际运行过程中不同放电深度对应的循环充放电次数,需要将 l 统一至100%放电深度尺度下。

$$l_t^{100} = l(d_t) d_t^{k_p} \quad (27)$$

$$l_{\text{day}}^{100} = \sum_{t=1}^T [l_t^{100} - (1 - x_t) l_{t-1}^{100}] \quad (28)$$

式中: l_t^{100} 为锂电池在第 t 时刻的放电深度100%时

的等效循环次数; k_p 为拟合常数,取决于储能的种类; T 为运行时间段。

可得锂电池循环寿命 T^{cycle} 与项目全寿命周期锂电池电芯更换次数 n_c 为:

$$T^{\text{cycle}} = L_{\text{max}}^{100} / l_{\text{day}}^{100} \quad (29)$$

$$n_c = \frac{365 \cdot Y}{T^{\text{cycle}}} \quad (30)$$

式中: L_{max}^{100} 为储能在100%放电深度时的充放电次数最大值; Y 为项目周期。

3.2 模型线性化

为提高模型运算速度,现采用等价数学转换法与大M法对锂电池混合寿命模型进行线性化处理。

对式(23)展开后出现二进制变量 y_t^{char} 乘积项,为此引入辅助变量 $\beta_t = \gamma_t^{\text{char}} \gamma_{t-1}^{\text{char}}$, 将式(23)等价转换为不等式约束。

$$\begin{cases} x_t = y_t^{\text{char}} + y_{t-1}^{\text{char}} - 2\beta_t \\ \beta_t \leq y_t^{\text{char}} \\ \beta_t \leq y_{t-1}^{\text{char}} \\ \beta_t \geq y_t^{\text{char}} + y_{t-1}^{\text{char}} - 1 \end{cases} \quad (31)$$

式(28)出现了二进制变量 x_t 与连续变量 l_{t-1}^{100} 乘积项,为此引入辅助变量 $\delta_t = l_{t-1}^{100} x_t$, 采用大M法对式(28)进行线性化处理。

$$\begin{cases} -Mx_t \leq \delta_t \leq Mx_t \\ -M(1 - x_t) + l_{t-1}^{100} \leq x_t \leq M(1 - x_t) + l_{t-1}^{100} \end{cases} \quad (32)$$

式中 M 为无穷大常数。

3.3 考虑锂电池循环寿命的混合储能优化调度模型

为使得混合储能优化运行结果更加符合实际工况,锂电池的运行成本应考虑锂电池循环寿命的影响。因此,锂电池运行成本 $c_{\text{opt, total}}$ 应包括考虑储能循环寿命^[26]的锂电池电芯日均更换成本 $c_{\text{ESS, cl}}$ 。

$$\begin{cases} c_{\text{ESS, total}} = c_{\text{opt, total}} + c_{\text{ESS, cl}} \\ c_{\text{ESS, cl}} = \sum_{s=1}^{N_s} \pi_s (n_{c,s} c_{\text{cell},s} E_s^{\text{ESS}}) r_d \end{cases} \quad (33)$$

式中: $c_{\text{cell},s}$ 为第 s 个场景下锂电池电芯更换成本; $n_{c,s}$ 为第 s 个场景下锂电池电芯更换次数,本文假设其循环次数为5000次。

$$\begin{cases} \min C'_{\text{inv, DB}} = c_{g, \text{total}} + c_{dg, \text{total}} + c_{\text{opt, total}} + c_{\text{ESS, total}} \\ \text{s.t. 式(3)—(13), 式(23)—(32)} \end{cases} \quad (34)$$

3.4 混合储能优化调度模型求解流程图

综上所述,本文提出的基于动态时区划分的混合储能优化调度模型求解流程图如图2所示,具体步骤如下。

- 1) 输入负荷、风机、光伏出力历史数据,火电机组参数,电价、锂电池、超级电容参数;
- 2) 基于k-means法场景缩减得到典型场景;
- 3) 嵌入DR模型和锂电池循环寿命模型,根据式(34)建立系统日前调度模型;
- 4) 根据式(1)进行动态时区划分,得到新能源消纳时区、辅助调峰时区和其他时区;
- 5) 采用商业优化软件gurobi对模型求解,得到火电机组启停状态和DR出力大小;
- 6) 根据式(14) — (22) 建立系统日内调度模型;
- 7) 根据日内负荷、新能源预测数据滚动修正动态时区划分;
- 8) 对模型求解,得到系统调度方案,包括火电机组出力、锂电池出力、超级电容出力;
- 9) 判断调度周期是否结束,若是则输出调度结果,否则返回步骤4)。

4 算例分析

4.1 算例介绍

本文以广州某一供电片区为例,该片区由5台火电机组、一个风电场、一个光伏电站构成。火电机组总装机容量为510 MW,风电场总功率为225 MW,光伏电站总功率为80 MW,同时有30 MWh/15 MW的锂电池和2 MWh/4 MW的超级电容的混合储能系统。其中,负荷和风电的预测均根据实测数据加上扰动生成,预测误差服从正态分布,负荷的日前、日内的预测误差分别为5%、3%,风电的日前、日内预测误差分别为15%、5%。负荷高峰时区为15:30—17:00。混合储能优化模型采用基于场景的随机规划,对风电场2021—2022年全年出力采用k-means法得到3类典型场景,其中场景1为正调峰场景,场景2、3为反调峰场景,各场景发生概率分布为0.170、0.375、0.455。

4.2 优化结果分析

4.2.1 动态时区划分结果分析

辅助调峰时区由电网给出,本文设为15:30—17:00,因此对各场景只需求不平衡功率 $\Delta P(t) > 0$

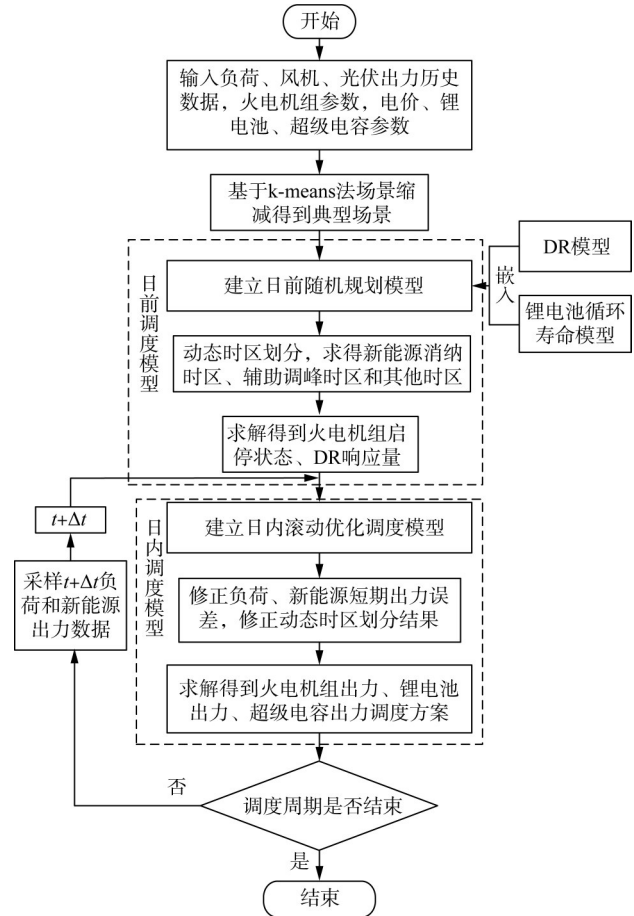


图2 混合储能优化调度模型求解流程图

Fig. 2 Flowchart of hybrid energy storage optimization scheduling model solution

的新能源消纳时区,各典型场景日前新能源消纳时区如图3—4所示。

由图3—4可知,场景1为正调峰特性时,夜晚风力出力较小,不存在新能源消纳时区;场景2、3风电出现反调峰特性,考虑负荷参与DR后,系统

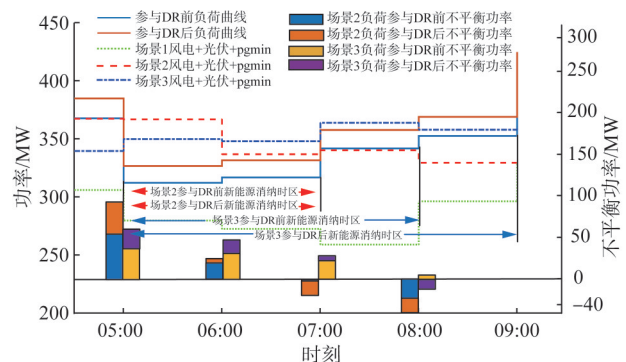


图3 日前预测新能源消纳时区

Fig. 3 Forecasting period for new energy integration in the day-ahead schedule

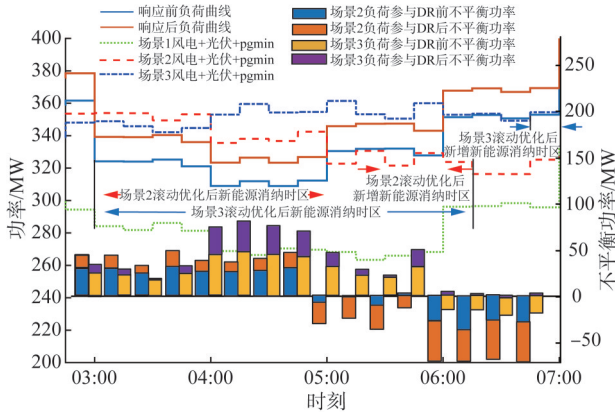


图4 日内预测新能源消纳时区

Fig. 4 Forecasting period for new energy integration in the intra-day schedule

不平衡功率变小, 场景2日前预测新能源消纳时区不变为03:00—05:00, 而场景3由于不平衡功率较大, 新能源消纳时区缩短了1 h, 由03:00—07:00变为03:00—06:00。通过滚动更新动态时区划分, 场景2、3在日内尺度分别新增了新能源消纳时区05:45—06:00和06:45—07:00。考虑负荷参与DR可以改善系统不平衡功率, 当反调峰特性越明显时能够减少新能源消纳时区时间, 并且随着预测精度增高滚动后日内新能源消纳时区增加或减少时区越少, 能提高动态时区划分的准确性, 避免了预测误差导致弃风的情况发生。

4.2.2 多时间滚动优化调度结果分析

本文对出现概率较大的场景3多时间尺度滚动优化结果进行分析, 优化结果如图5所示, 锂电池和超级电容充放电及SOC状态如图6—7所示。

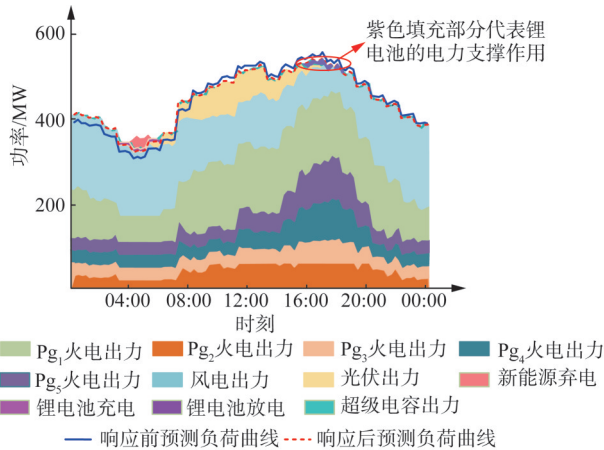


图5 场景3优化结果

Fig. 5 Optimization results for scenario 3

如图5所示, 03:00—06:00新能源消纳时区火力发电均处于下限, 需求侧响应后起到了一定“削峰填谷”作用。锂电池吸收部分富余的风光出力, 并在辅助调峰时区放电, 超级电容在其他时区平抑新能源波动, 优化结果充分发挥了混合储能优势互补的作用, 对于系统提高新能源消纳和辅助调峰具有重要意义。

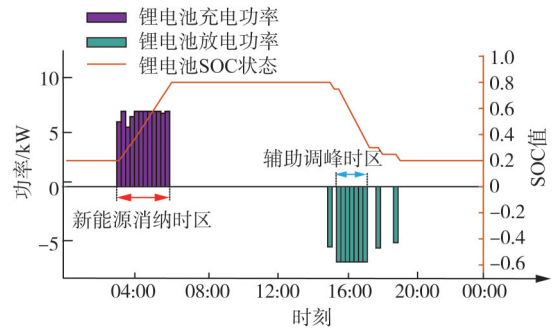


图6 锂电池充放电功率及SOC状态

Fig. 6 Charging and discharging powers as well as states of charge (SOC) for lithium-ion battery

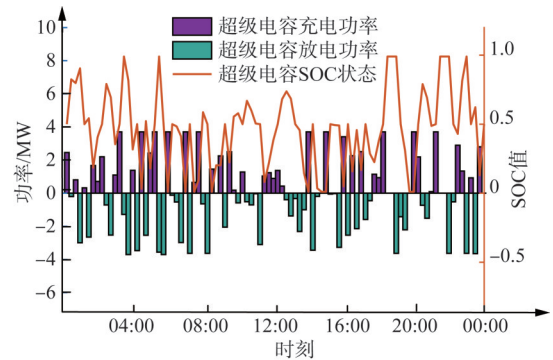


图7 超级电容充放电功率及SOC状态

Fig. 7 Charging and discharging powers as well as states of charge (SOC) for supercapacitor

由图6—7可知, 锂电池在新能源消纳时区持续充电, 并在辅助调峰时区放出该部分电量, 多余电量在“高峰电价”时区持续放至SOC值下限, 且锂电池SOC值始终在0.2~0.8之间, 有利于提高储能循环寿命; 超级电容在波动情况较大的时段SOC值快速变化, 通过快速充放电, 平抑新能源波动。

上述分析可知, 动态时区划分策略能够引导锂电池发挥“电量”支撑作用, 使得锂电池在新能源消纳时区和辅助调峰时区实现“一充一放”, 同时引导超级电容发挥“电力”调节作用, 通过快速充放电能力平抑新能源波动。

4.3 方案对比分析

为了体现本文提出的混合储能多时间尺度滚动优化调度方法的优势,基于场景3设置常规储能优化调度方案进行对比,设置指标包括:1)经济指标:日总成本、储能循环寿命;2)技术指标:新能源弃电率、峰谷差率。各优化调度方案如下。

方案1:不考虑需求侧响应,不参与动态时区划分策略的单一锂电池多时间尺度滚动优化调度。

方案2:不考虑需求侧响应,参与动态时区划分的单一锂电池多时间尺度滚动优化调度。

方案3:考虑需求侧响应,参与动态时区划分的单一锂电池多时间尺度滚动优化调度。

方案4:不考虑需求侧响应,不参与动态时区划分的混合储能多时间尺度滚动优化调度。

方案5:不考虑需求侧响应,参与动态时区划分的混合储能多时间尺度滚动优化调度。

方案6:考虑需求侧响应,参与动态时区划分的混合储能多时间尺度滚动优化调度。

由于锂电池在混合储能中承担容量支撑的作用,因此本节对各方案锂电池出力进行分析,不同方案求解结果如表1所示。

表1 各方案求解结果

Tab. 1 Solution results for various schemes

方案	经济性指标			技术性指标		
	总运行成本/(万元·d ⁻¹)	储能运行成本/(元·d ⁻¹)	调峰收益/(元·d ⁻¹)	锂电池循环寿命/a	新能源弃电率/%	峰谷差率/%
1	28.18	-2 617.45	-12 960	7.27	2.60	42.48
2	31.70	7 075.68	-6 000	4.28	2.57	44.38
3	30.03	461.74	-8 304	3.75	0.87	40.03
4	29.78	-6 181.49	-13 912	7.38	2.27	43.10
5	29.65	-6 259.27	-14 860	7.67	2.22	41.57
6	26.84	-6 259.27	-14 860	7.67	0.83	39.77

4.3.1 动态时区划分策略对优化调度结果影响分析

对比单一锂电池方案1、2和混合储能方案4、5,由表1可知:方案1锂电池在日内“两充两放”,为提高储能循环寿命,在调峰时段减少了放电深度,但储能运行成本仍小于0,能够盈利;方案2牺牲了部分容量平抑新能源波动,且循环寿命快速下降使得储能运行成本大于0且系统运行成本大于方案1。方案4与方案1相似,但由于超级电容配置

成本高,总运行成本高于单一锂电池;方案5混合储能参与动态时区划分后,在新能源消纳时区免费充电后参与辅助调峰,并且超级电容代替了锂电池平抑新能源波动,参与辅助调峰储能运行收益对比锂电池传统方案1提高了3 641.82元/d,并且新能源弃电率比方案4降低了0.05%,峰谷差率降低了1.53%。

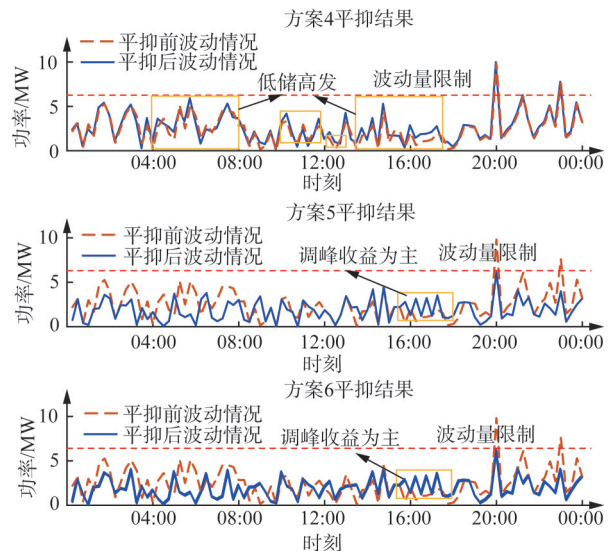


图8 方案4—6平抑结果

Fig. 8 Flattening results of scheme 4—6

对比混合储能方案4—6,由表1及图8可知:方案4超级电容仍以电量赚取调峰收益,而方案5—6参与动态时区划分策略后能有效发挥平抑新能源波动作用,且在辅助调峰时区快速充放电获得调峰补贴收益。

从以上分析可知:

1) 动态时区划分策略具有从电量和电力两个维度使混合储能参与新能源消纳提高调峰收益的优势,使混合储能日运行成本远低于单一锂电池;

2) 对系统来说,动态时区划分策略对于混合储能发挥电量与电力互补优势,提高系统新能源消纳率,降低峰谷差率和改善系统反调峰特性具有重要意义。

4.3.2 DR对优化调度结果影响分析

对比混合储能方案5—6,由表1可知:考虑需求侧响应后,虽然由4.2.1小节分析可知减少了新能源消纳时区持续时间长短,使得锂电池需要以更大的放电功率吸收新能源弃电,但是循环周期内放电深度不变,因此在调峰时放电量相同,储能寿命

和调峰计算收益结果也相同,但是考虑DR后新能源弃电率和峰谷差率分别降低了1.39%和1.80%,弃电成本下降,使得系统运行成本降低。可知,DR与混合储能协同改善系统反调峰特性,有利于提高系统新能源消纳率和减小系统峰谷差,降低系统运行成本。

5 结论

本文针对新能源反调峰特性导致电网调峰困难及新能源消纳率不高的问题,提出了一种基于动态时区划分的混合储能源荷协同优化调度方法,得出结论如下。

1) 本文提出的动态时区划分策略边界条件清晰易实行,考虑了新能源出力预测误差与需求侧响应对混合储能运行的影响,且通过日前-日内滚动后可信度高。

2) 动态时区划分策略能有效引导混合储能从电量与电力两个维度参与新能源消纳以提升混合储能调峰收益,充分发挥混合储能互补优势,使得系统优化运行结果具有良好的经济效益。

3) 本文提出的系统日前-日内滚动优化调度模型考虑了DR与锂电池循环寿命等约束,精细化反映了混合储能实际运行效益并能与源荷协同改善系统反调峰特性,提高了系统新能源的消纳率。

参考文献

- [1] 靳一奇,朱武,花赞昊,等.考虑风电反调峰特性的储能调峰优化策略[J].科学技术与工程,2021,21(20):8498-8503.
JIN Yiqi, ZHU Wu, HUA Yunhao, et al. Optimal strategy of peak-shaving for energy storage considering wind power characteristics peak regulation [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(20): 8498-8503.
- [2] 程菡,段瑶,吴亚雄,等.考虑等效循环放电深度约束的配电网储能规划[J].南方电网技术,2024,18(10):54-63.
CHENG Ran, DUAN Yao, WU Yaxiong, et al. Energy storage planning of distribution network considering equivalent cyclic discharge depth constraints [J]. Southern Power System Technology, 2024, 18(10): 54-63.
- [3] 郝文波,景菲,颜庆宇,等.数据驱动下基于风电场景的多时间尺度调峰调度研究[J].电力系统保护与控制,2023,51(16):115-126.
HAO Wenbo, JING Fei, YAN Qingyu, et al. A multi-time scale peak shaving scheduling strategy based on wind power scenario using a data-driven method [J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 115-126.
- [4] 袁铁江,郭建华,杨紫娟,等.平抑风电波动的电-氢混合储能容量优化配置[J].中国电机工程学报,2024,44(4):1397-1406.
YUAN Tiejiang, GUO Jianhua, YANG Zijuan, et al. Optimal allocation of power electric-hydrogen hybrid energy storage of stabilizing wind power fluctuation [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(4): 1397-1406.
- [5] 武鑫,李洋涛,马志勇,等.基于改进小波包分解的混合储能系统容量配置方法[J].太阳能学报,2023,44(8):23-29.
WU Xin, LI Yangtao, MA Zhiyong, et al. Capacity configuratuib method of hybrid energy storage system based on improved wavelet packet decomposition [J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2023, 44(8): 23-29.
- [6] 朱健宇,潘学萍,王正风,等.兼顾碳减排和新能源消纳的火电机组深度调峰与复合储能协调规划[J].电力自动化设备,2024,44(1):17-23.
ZHU Jianyu, PAN Xueping, WANG Zhengfeng, et al. Co-ordinated planning of thermal generator deep peak regulation and composite energy storage considering carbon emission reduction and new energy consumption [J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(1): 17-23.
- [7] 曹炜,沙海伟.考虑辅助调峰的储能-制氢混合系统容量配置研究[J].能源研究与利用,2022(5):47-52.
CAO Wei, SHA Weihai. Research on capacity configuration of energy storage hydrogen production hybrid system considering auxiliary peak shaving [J]. Energy Research & Utilization, 2022(5): 47-52.
- [8] 张开鹏,杨雪梅,张宏甜,等.考虑“光伏-储能”耦合参与调峰的配电网氢储能优化配置[J].电网与清洁能源,2023,39(10):95-103,112.
ZHANG Kaipeng, YANG Xuemei, ZHANG Hongtian, et al. A study on the optimal configuration of hydrogen energy storage in the distribution network considering "photovoltaic-energy storage" coupling participating and peak shaving [J]. Power System and Clean Energy, 2023, 39(10): 95-103, 112.
- [9] 吴永飞,包宇庆.电能型-功率型混合储能日前-日内协同滚动调度策略[J].电力系统自动化,2024,48(1):77-87.
WU Yongfei, BAO Yuqin. Coordinated day-ahead and intra-day rolling scheduling strategy for electricity-power hybrid energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(1): 77-87.
- [10] 陈飞雄,林炜晖,邵振国.含电转气和混合储能的微网双层滚动优化控制方法[J].电力自动化设备,2022,42(5):23-31.
CHEN Feixiong, LIN Weihui, SHAO Zhenguo. Two-layer receding horizon optimal control method for multi-energy microgrid with power-to-gas and hybrid energy storage [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(5): 23-31.
- [11] 鄂志君,王桂林,李振斌,等.提升新能源电网消纳水平的混合储能系统优化控制方法[J].电力系统及其自动化学报,2021,33(3):132-137.
E Zhijun, WANG Guilin, LI Zhenbin, et al. Optimization control method for hybrid energy storage system to enhance the renewable energy absorption level of power grid [J]. Proceedings of the CSU - EPSA, 2021, 33(3): 132-137.
- [12] 赵波,王文博,陈哲,等.计及长短周期混合储能的多能微网能量-功率分布鲁棒优化[J].电力系统自动化,2023,47(16):22-33.
ZHAO Bo, WANG Wenbo, CHEN Zhe, et al. Energy-power distributionally robust optimization for multi-energy microgrid considering long short-term hybrid energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(16): 22-33.

- [13] 乔亮波, 张晓虎, 孙现众, 等. 电池-超级电容器混合储能系统研究进展[J]. 储能科学与技术, 2022, 11(1): 98 – 106.
- QIAO Liangbo, ZHANG Xiaohu, SUN Xianzhong, et al. Advances in battery-supercapacitor hybrid energy storage system [J]. Energy Storage Science and Technology, 2022, 11(1): 98 – 106.
- [14] 朱宗耀, 王秀丽, 吴雄, 等. 复合储能参与电能量及辅助服务市场的运行策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(18): 80 – 90.
- ZHU Zongyao, WANG Xiuli, WU Xiong, et al. Operation strategy for composite energy storage participating in electric energy and ancillary service markets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(18): 80 – 90.
- [15] 廖涛, 张建飞, 赵志磊, 等. 独立储能电站经济效益方案分析[J]. 现代工业经济和信息化, 2023, 13(7): 214 – 216.
- LIAO Tao, ZHANG Jianfei, ZHAO Zhile, et al. Analysis on economic benefit scheme of independent energy storage power station [J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2023, 13(7): 214 – 216.
- [16] 杨萌, 施凯杰, 李虎军, 等. 考虑储能运营模式的时序生产模拟及新能源消纳评估[J]. 现代电力, 2024, 41(1): 124 – 133.
- YANG Meng, SHI Kaijie, LI Hujun, et al. Time Series production simulation and renewable energy accommodation evaluation considering energy storage operation mode [J]. Modern Electric Power, 2024, 41(1): 124 – 133.
- [17] 黎静华, 汪赛. 兼顾技术性和经济性的储能辅助调峰组合方案优化[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(9): 44 – 50, 150.
- LI Jinhua, WANG Sai. Optimal combined peak-shaving scheme using energy storage for auxiliary considering both technology and economy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(9): 44 – 50, 150.
- [18] 张勇军, 羿应棋, 李立涅, 等. 双碳目标驱动的新型低压配电系统技术展望[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 1 – 12.
- ZHANG Yongjun, YI Yingqi, LI Licheng, et al. Prospect of new low-voltage distribution system technology driven by carbon emission peak and carbon neutrality targets [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 1 – 12.
- [19] 陈碧云, 金洋, 徐旗, 等. 计及灾后恢复全过程储能应急响应能力的配电网韧性规划[J]. 电网技术, 2024, 48(5): 1855 – 1862.
- CHEN Biyun, JIN Yang, XU Qi, et al. Resilience planning of distribution network considering emergency response capability of energy storage throughout the entire process of post-disaster recovery [J]. Power System Technology, 2024, 48(5): 1855 – 1862.
- [20] NING Yan, BO Zhang, et al. Hybrid energy storage capacity allocation method for active distribution network considering demand side response [J]. IEEE Transactions on Applied Superconductivity, 2018, PP(2): 1 – 11.
- [21] 李军徽, 贾才齐, 朱星旭, 等. 降低火电调频损耗的混合储能系统容量优化配置双层模型[J]. 高电压技术, 2023, 49(9): 3965 – 3980.
- LI Junhui, JIA Caiqi, ZHU Xingxu, et al. Dual-layer model for capacity optimization of hybrid energy storage system to reduce thermal power frequency modulation loss. [J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(9): 3965 – 3980.
- [22] 李聪, 秦立军. 基于改进粒子群算法的混合储能独立调频的容量优化研究[J]. 太阳能学报, 2024, 48(5): 1855 – 1862.
- LI Cong, QIN Lijun. Sizing optimization for hybrid energy storage system independently participating in regulation market using improved particle swarm optimization. [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2024, 48(5): 1855 – 1862.
- [23] 孟贤, 郭启蒙, 李颖欢, 等. 考虑双向需求的混合储能容量多目标优化配置[J]. 太阳能学报, 2023, 44(8): 45 – 53.
- MENG Xian, GUO Qimeng, LI Yinghuan, et al. Multiobjective optimal configuration of hybrid energy storage capacity considering two-way demand. [J]. Acta Energiæ Solaris Sinica, 2023, 44(8): 45 – 53.
- [24] 张育维, 胡海涛, 耿安琪, 等. 考虑削峰填谷的电气化铁路混合储能系统容量优化配置[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(2): 44 – 50.
- ZHANG Yuwei, HU Haitao, GENG Anqi, et al. Capacity optimization configuration of hybrid energy storage system for electrified railway considering peak load shifting [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(2): 44 – 50.
- [25] 严干贵, 冯晓东, 李军徽, 等. 用于松弛调峰瓶颈的储能系统容量配置方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(28): 27 – 35, 22.
- YAN Gangui, FENG Xiaodong, LI Junhui, et al. Optimization of energy storage system capacity for relaxing peak load regulation bottlenecks [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(28): 27 – 35, 22.
- [26] 吴晗, 欧阳森, 梁炜焜. 计及储能循环寿命的柔性配电网优化运行及效益均衡策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(17): 99 – 109.
- WU Han, OUYANG Sen, LIANG Weikun. Optimal operation and benefit balance strategy for flexible distribution network considering cycle life of energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(17): 99 – 109.
- [27] 李翠萍, 东哲民, 李军徽, 等. 提升配电网新能源消纳能力的分布式储能集群优化控制策略[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(23): 76 – 83.
- LI Cuiping, DONG Zhemin, LI Junhui, et al. Optimal control strategy of distributed energy storage cluster for prompting renewable energy accommodation in distribution network [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(23): 76 – 83.
- [28] 王皓, 艾芊, 甘霖, 等. 基于多场景随机规划和MPC的冷热电联合系统协同优化[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 51 – 58.
- WANG Hao, AI Qin, GAN Lin, et al. Collaborative optimization of combined cooling heating and power system based on multi-scenario stochastic programming and model predictive control [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 51 – 58.
- [29] DOOSTIZADEH M, GHASEMI H. A day-ahead electricity pricing model based on smart metering and demand-side management [J]. Energy, 2012, 46(1): 221 – 230.

收稿日期: 2024-09-14; 网络首发日期: 2025-03-18

作者简介:

郭一帆(2000), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统规划与运行, egyf_edu@163.com;

欧阳森(1974), 男, 副研究员, 博士, 研究方向为电力系统规划与运行、电能质量分析控制;

辛曦(2000), 女, 硕士研究生, 研究方向为配电网规划与运行。