第 52 卷 第 3 期：1201-1213 高电压技术 Vol.52, No.3: 1201-1213
2026 年 3 月 31 日 High Voltage Engineering March 31, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250509

计及退化成本的储能参与能量及调频市场双层优化运行策略

沈 斌[1]，付 玉[1]，徐潇源[2]，蔡子龙[1]，王文浩[1]，翟苏巍[3]
（1. 昆明理工大学电力工程学院，昆明 650500；2. 上海交通大学电子信息与电气工程学院，上海 200240；
3. 云南电网有限责任公司电力科学研究院，昆明 650217）

摘 要：在电力市场化改革的背景下，储能作为独立主体参与能量及调频市场，可提升系统经济运行效率与频率调节质量。基于此，提出一种计及储能退化成本的能量及调频市场双层优化运行策略。首先，采用分段线性法处理储能放电深度曲线，构建储能退化成本模型。其次，将计及退化成本的储能作为市场的竞价主体，构建面向能量及调频市场的双层决策模型优化储能收益与寿命。此外，基于强对偶理论与卡罗需-库恩-塔克(Karush-Kuhn-Tucker，KKT)条件，将双层模型重构为混合整数规划问题求解。最后，通过算例求解火电机组和储能电站在能量及调频市场最优出清价格，验证所提模型在协调储能经济收益和寿命损耗方面的有效性。

关键词：能量及调频市场；退化成本；双层交易模型；储能；强对偶理论；KKT 条件

A Bi-level Optimal Operation Strategy for Energy Storage Participating in Energy and Frequency Regulation Markets Considering with Degradation Costs

SHEN Fu[1], FU Yu[1], XU Xiaoyuan[2], CAI Zilong[1], WANG Wenhao[1], ZHAI Suwei[3]
(1. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China;
2. School of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
3. Electric Power Research Institute, Yunnan Power Grid Co., Ltd., Kunming 650217, China)

Abstract: Energy storage participating as an independent entity in the frequency regulation market can enhance power system economic operation efficiency and frequency regulation performance in power market reform. A bi-level optimization strategy for energy and frequency regulation market operation considering energy storage degradation costs is proposed. First, a piecewise linearization method is employed to treat the depth-of-discharge curve of energy storage, and to establish a degradation cost model. Second, energy storage units incorporating degradation costs are treated as bidding entities in the market, and a bi-level optimization framework for joint energy and frequency regulation markets is developed to co-optimize energy storage revenue and lifespan. Additionally, based on the strong duality theory and the Karush-Kuhn-Tucker (KKT) conditions, the bi-level model is reconstructed into a mixed-integer programming problem for solution. Finally, case studies are conducted to determine the optimal clearing prices for thermal power units and energy storage power stations in the energy and frequency regulation markets, verifying the effectiveness of the proposed model in coordinating energy storage economic revenue and lifespan losses.

Key words: energy and frequency regulation markets; degradation costs; bi-level trading model; energy storage; strong duality theory; KKT conditions

0 引言

近年来，我国电力行业加速向绿色低碳转型，风电和光伏装机规模全球领先，能源结构优化和碳减排成效日益明显。中国电力企业联合发布的数据，截止 2024 年底，中国新能源发电装机容量达 14.5 亿 kW，首次超过火电装机规模。一方面，新能源发电的间歇性、波动性和不确定性导致电网惯量降低，频率调节能力下降，电力系统安全稳定运行面临严峻挑战。为保障系统稳定，调频问题成为亟待解决的关键技术难题[1-2]。另一方面，储能技术

基金资助项目：国家自然科学基金(62563016)；云南省兴滇英才支持计划项目(KKRD202204021)；云南省应用基础研究计划(202501AT070350)；昆明理工大学高层次人才平台建设项目(KKZ7202004004)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (62563016), Yunnan Revitalizing Talent Plan (KKRD202204021), Yunnan Fundamental Research Projects (202501AT070350), High-level Platform Construction Project of Kunming University of Science and Technology (KKZ7202004004).

可解决高比例新能源接入电力系统面临的系统惯量和频率稳定性下降等问题。在电力市场环境下，将储能系统纳入能量及调频市场可解决系统经济运行和频率稳定问题。

随着我国电力市场化改革的深化，我国的调频辅助服务市场(简称调频市场)建设正稳步推进。在美、英、澳大利亚等国市场中，储能已经是调频市场重要参与者。国外典型调频市场中储能参与市场机制的设计及演变，对于我国调频市场的建设提供了借鉴价值。已有部分文献研究国外储能参与调频市场的实践经验，为我国调频市场的发展提供了指导[3]。文献[4]介绍电网侧储能作为市场主体参与调频市场的准入条件、参与模式、价格机制。文献[5]阐述国内外储能参与市场的价值分析、框架体系与交易机制，为储能参与我国市场提出可行性建议。文献[6]结合国外的实践经验与我国情况，从市场结构、准入规则、报价出清、结算分摊 4 个方面提出建议，为虚拟电厂调频市场机制的构建提供参考。文献[7]总结了当前国内外典型市场出清协调机制，分析储能参与市场带来的经济效益及对出清结算的影响。

国内外调频市场实践经验表明，科学的市场机制可为储能电站规范参与调频辅助服务提供指导，并确保其获得相应经济收益。然而，在优化储能参与调频市场策略时，仅考虑机组市场收益而忽略储能退化成本会造成实际经济收益被高估。因此，准确量化退化成本是储能参与市场竞价决策的核心问题之一。

储能系统退化建模研究虽已取得一定进展，但在模型维度和工程适用性方面仍存在不足。现有研究多聚焦于放电深度(depth of discharge, DoD)进行研究，而实际上电池退化过程涉及多因素耦合作用，包括工作环境温度、荷电状态、充放电率及健康状态等复杂因素[8-9]。鉴于电池退化过程的高度非线性和参数强耦合特性，为平衡模型精度与实用性，当前主流研究仍倾向于采用基于 DoD 的简化建模方法[10]，并通过采用雨流计数法统计等效循环次数以评估寿命损耗[11-12]。此外，尽管数据驱动方法在剩余使用寿命预测和荷电状态估计方面展现出潜力[13-14]，但此类方法对数据依赖性强，且在不同应用场景中的泛化能力有限。针对退化建模在调度场景中的工程应用需求，有研究提出边际退化成本建模方法，通过构建退化成本函数以提升储能系统在复杂运行环境下的调度精度和运营效益评估能力[15-16]，采用分段线性退化成本函数的方法，在兼顾建模精度的同时提高了计算效率[16]。因此本文采用分段线性法构建储能退化成本模型，并将其整合至快速响应调频控制策略中，以提升储能系统在实际运行中的经济性评估与调度性能。

目前，国内外研究人员针对储能参与现货市场机制以及储能寿命对收益的影响展开了研究。文献[17]设计基于储能寿命的能量及调频市场自调度策略。文献[18]考虑储能使用寿命构建含风光储及可控机组的微电网经济调度模型。文献[19]构建考虑循环寿命折损的储能优化配置与运营两阶段模型。文献[20]针对风电汇集区域建设储能电站提出一种基于运营策略的储能容量配置方法。文献[21]基于循环信息评估储能老化模型提出一种功率分配策略降低异构储能系统的运行成本。文献[22]基于半经验锂离子电池退化模型评估储能在宾夕法尼亚-新泽西-马里兰(Pennsylvania-New Jersey-Maryland, PJM)市场中提供频率控制导致的退化。文献[23]基于电池退化方程建立退化模型和电力系统优化模型之间相应交互的框架。文献[24]计及储能退化成本将混合储能系统用于光伏输出功率稳定、参与市场交易和调峰。

综上所述，在现货市场中储能电站充放电策略对市场主体的出清结果和收益具有重要影响。然而，在储能参与能量及调频市场的竞价策略中，鲜有文献引入分段线性法实时量化储能调频过程中的退化成本。基于此，本文提出计及储能退化成本的能量及调频市场双层优化模型，上层模型以储能收益最大为目标函数，下层模型以系统市场申报成本最小为目标函数。求解各机组和电站在能量及调频市场中的最优中标功率，分析储能退化成本对能量及调频市场出清价格及中标功率的影响。

1 计及储能退化成本的能量及调频市场运营策略

1.1 储能参与能量及调频市场交易决策框架

储能参与能量及调频市场交易模式如图 1 所示。调度中心通过自动发电控制装置(automatic generation control, AGC)协调调频资源响应上级电网的区域控制偏差(area control error, ACE)，并将调频需求传递到能量及调频市场。其中，能量市场采用集中优化出清机制，发电侧单边报价，即参与联

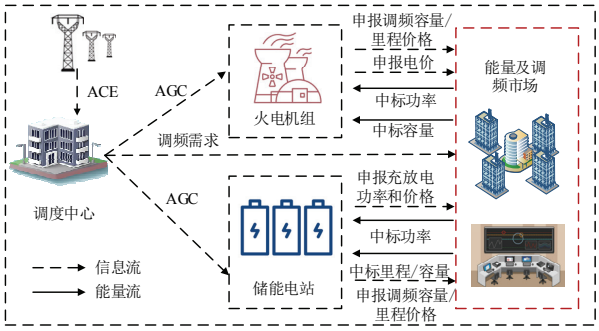


图 1　储能参与能量及调频市场交易模式示意图

Fig.1　Schematic diagram of energy frequency regulation market trading mode

合市场的火电机组申报运行日的电价及机组运行参数；储能电站申报充放电价格及其运行参数。在调频市场中，火电机组和储能电站申报相应的调频价格。基于运行日调频需求，结合机组能量约束及调频市场协同出清机制，同步优化火电机组、储能电站在能量及调频市场的中标结果，最终由各时段节点电价、调频电价及中标功率得到火电机组和储能电站的市场收益。

1.2　储能退化成本分段线性化建模

储能在调频过程中会频繁充放电，导致其寿命衰减和性能退化，储能循环寿命与 DoD 呈负相关的关系[25]。在一次完整的循环中，电池 DoD 与时间 t 的关系如式(1)所示。根据放电过程导致的电池老化增量记为 $B_{\mathrm{d}}(D_t)$，对电池放电功率 $P_{t,m}^{\mathrm{dis}}$ 求偏导，得到储能循环退化函数如式(2)所示[16]。

$$D_t=\frac{1}{\eta_m^{\mathrm{dis}}C_{\mathrm{cap}}}P_{t,m}^{\mathrm{dis}}\Delta t+D_{t-1} \tag{1}$$

$$\frac{\partial B_{\mathrm{d}}\left(D_t\right)}{\partial P_{t,m}^{\mathrm{dis}}}=\frac{\mathrm{d}B_{\mathrm{d}}\left(D_t\right)}{\mathrm{d}D_t}\frac{\partial D_t}{\partial P_{t,m}^{\mathrm{dis}}}=\frac{\Delta t}{\eta_m^{\mathrm{dis}}C_{\mathrm{cap}}}\frac{\mathrm{d}B_{\mathrm{d}}\left(D_t\right)}{\mathrm{d}D_t} \tag{2}$$

式中：D_t 为第 t 时段的 DoD；$P_{t,m}^{\mathrm{dis}}$ 为 t 时段储能电站 m 的放电功率；Δt 为时间间隔；η_m^{dis} 为放电效率；C_{cap} 为储能总容量；$B_{\mathrm{d}}\left(D_t\right)$ 表示 D_t 对储能老化的累积影响函数。

由式(2)可看出，储能退化成本是非线性的，采用分段线性法对储能放电深度 D_t 进行分段处理，通过将 D_t 离散为 N 段，可以简化储能退化成本的计算，同时保留退化过程的非线性特性，分段线性退化成本如式(3)所示。其中，当储能放电深度 D_t 落在第 n 段([(n−1)/N，n/N])时，构造退化成本分段线性段内的近似函数 c_n。按比例分配储能单元更换成本 C_{gh}，则储能退化成本如式(4)所示。

$$d\left(D_t\right)=\begin{cases}c_1, & D_t\in\left[0,\dfrac{1}{n}\right]\\ \vdots & \\ c_n, & D_t\in\left[\dfrac{n-1}{N},\dfrac{n}{N}\right]\\ \vdots & \\ c_N, & D_t\in\left[\dfrac{n-1}{N},1\right]\end{cases} \tag{3}$$

$$c_n=\frac{C_{\mathrm{gh}}}{\eta_k^{\mathrm{dis}}C_{\mathrm{cap}}}N\left(B_{\mathrm{d}}\left(\frac{n}{N}\right)-B_{\mathrm{d}}\left(\frac{n-1}{N}\right)\right) \tag{4}$$

式中：c_n 表示储能循环深度段 n 的边际老化成本；C_{gh} 表示储能单元的更换成本；$d\left(D_t\right)$ 表示在不同分段区间 D_t 下储能的退化成本。

将循环退化曲线划分为 N 段，每个 DoD 段内寿命损失可用近似线性关系表示，并将其代入式(4)，即可表示储能退化成本函数。为精确描述储能在不同 DoD 段内的退化成本，在每深度段 n 内引入充放电功率辅助变量 $P_{t,m,n}^{\mathrm{ch}}$、$P_{t,m,n}^{\mathrm{dis}}$，荷电状态辅助变量 $E_{t,m,n}$。储能电站退化成本为各循环深度段内退化成本之和，如式(5)所示。

$$C_{t,m}^{\mathrm{d}}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{N_{\mathrm{es}}}\sum_{n=1}^{N}c_nP_{t,m,n}^{\mathrm{dis}}\Delta t \tag{5}$$

式中：$C_{t,m}^{\mathrm{d}}$ 为储能电站退化成本；T 为总时段数；N_{es} 表示储能电站数量；$P_{t,m,n}^{\mathrm{dis}}$ 为时段 t 储能电站 m 在循环深度段 n 的放电功率。

2　计及退化成本的储能参与能量及调频市场双层优化模型

2.1　上层储能参与市场策略报价模型

上层模型为储能决策模型，其目标函数为最大化储能在能量及调频市场中获得总收益，且考虑储能的退化成本，如式(6)所示。

$$\begin{aligned}C_{\mathrm{H}}=\max&\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{N_{\mathrm{es}}}v_t\left(P_{t,m}^{\mathrm{dis}}-P_{t,m}^{\mathrm{ch}}\right)+\\&\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{N_{\mathrm{es}}}\left(v_t^{\mathrm{Ecap}}\cdot P_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}+v_t^{\mathrm{Emil}}\cdot P_{t,m}^{\mathrm{Emil}}\right)-\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{N_{\mathrm{es}}}C_{t,m}^{\mathrm{d}}\end{aligned} \tag{6}$$

式中：C_{H} 为储能电站市场总收益；v_t 表示 t 时段储能电站 m 能量市场出清电价；$P_{t,m}^{\mathrm{dis}}$、$P_{t,m}^{\mathrm{ch}}$、$P_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}$、$P_{t,m}^{\mathrm{Emil}}$ 分别表示 t 时段储能电站 m 能量及调频市场中标的放电功率、充电功率、调频容量及调频里程；v_t^{Ecap}、v_t^{Emil} 分别表示调频市场出清的调频容量价格和里程价格。

储能电站在能量及调频市场投标过程中需综合考虑申报价格和容量限制，以及在每个循环深度段内储能充放电功率、荷电状态等约束。

1）储能充放电约束

储能电站在能量及调频市场投标时，循环深度段 n 内的充、放电功率之和等于该时段储能电站的充、放电功率。

$$\begin{cases} P_{t,m}^{\mathrm{ch}}=\sum_{n=1}^{N}P_{t,m,n}^{\mathrm{ch}} \\ 0\le P_{t,m}^{\mathrm{ch}}\le \varepsilon_t^{\mathrm{ch}}P_{m,\max}^{\mathrm{ch}} \\ 0\le P_{t,m}^{\mathrm{dis}}\le \varepsilon_t^{\mathrm{dis}}P_{m,\max}^{\mathrm{dis}} \\ 0\le \varepsilon_t^{\mathrm{ch}}+\varepsilon_t^{\mathrm{dis}}\le 1 \\ P_{t,m}^{\mathrm{dis}}=\sum_{n=1}^{N}P_{t,m,n}^{\mathrm{dis}} \end{cases} \tag{7}$$

式中：$P_{m,\max}^{\mathrm{ch}}$、$P_{m,\max}^{\mathrm{dis}}$ 分别表示储能电站 m 最大充、放电功率；$\varepsilon_t^{\mathrm{ch}}$、$\varepsilon_t^{\mathrm{dis}}$ 分别为 t 时段储能电站 m 的充、放电状态；$P_{t,m,n}^{\mathrm{ch}}$ 为 t 时段储能电站 m 在循环深度段 n 的充电功率。

2）储能荷电状态约束

将储能循环 DoD 分段后，储能电站的荷电状态关系如式(8)所示。

$$\begin{cases} E_{t,m}=\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{N_{\mathrm{es}}}\sum_{n=1}^{N}E_{t,m,n} \\ 0\le E_{t,m,n}\le E_{t,m,n\max} \\ E_{t,m,\min}\le E_{t,m}\le E_{t,m,\max} \\ E_{t,m,n}=E_{t-1,m,n}+\eta_m^{\mathrm{ch}}P_{t,m,n}^{\mathrm{ch}}\Delta t-P_{t,m,n}^{\mathrm{dis}}\Delta t/\eta_m^{\mathrm{dis}} \\ E_{0,m}=E_{T,m} \\ E_{t,m,\min}=\min\{E_{0,m},E_{T,m}\} \end{cases} \tag{8}$$

式中：辅助变量 $E_{t,m,n}$ 为 t 时段储能电站 m 循环深度段 n 中储能荷电状态；$E_{t,m,n\max}$ 表示储能在循环深度段 n 中最大荷电状态；$E_{t,m}$ 表示申报过程中 t 时段储能电站 m 的荷电状态；$E_{t,m,\max}$、$E_{t,m,\min}$ 为 t 时段储能电站 m 允许荷电状态的上、下限；η_m^{ch} 表示储能电站 m 充电效率。

3）储能申报容量约束

$$\begin{cases} 0\le P_{t,m}^{\mathrm{ch}}+P_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}\le\left(\varepsilon_{t,m}^{\mathrm{ch}}+\varepsilon_{t,m}^{\mathrm{dis}}\right)P_{m,\max}^{\mathrm{ch}} \\ 0\le P_{t,m}^{\mathrm{dis}}+P_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}\le\left(\varepsilon_{t,m}^{\mathrm{ch}}+\varepsilon_{t,m}^{\mathrm{dis}}\right)P_{m,\max}^{\mathrm{dis}} \\ 0\le P_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}\le P_{m,\max}^{\mathrm{Ecap}} \\ 0\le P_{t,m}^{\mathrm{Emil}}\le P_{m,\max}^{\mathrm{Ecap}}\cdot\gamma_{t,m}^{\mathrm{mc}} \end{cases} \tag{9}$$

式中：$P_{m,\max}^{\mathrm{Ecap}}$ 为储能电站最大调频容量；$\gamma_{t,m}^{\mathrm{mc}}$ 表示里程容量比。

4）储能报价约束

$$\begin{cases} 0\le e_{t,m}^{\mathrm{dis}}\le e_{m,\max}^{\mathrm{dis}} \\ 0\le e_{t,m}^{\mathrm{ch}}\le e_{m,\max}^{\mathrm{ch}} \\ 0\le e_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}\le e_{m,\max}^{\mathrm{Ecap}} \\ 0\le e_{t,m}^{\mathrm{Emil}}\le e_{m,\max}^{\mathrm{Emil}} \end{cases} \tag{10}$$

式中：$e_{t,m}^{\mathrm{ch}}$、$e_{t,m}^{\mathrm{dis}}$、$e_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}$ 和 $e_{t,m}^{\mathrm{Emil}}$ 分别表示能量及调频市场中储能电站的充电、放电、容量及里程报价；$e_{m,\max}^{\mathrm{ch}}$、$e_{m,\max}^{\mathrm{dis}}$、$e_{m,\max}^{\mathrm{Ecap}}$、$e_{m,\max}^{\mathrm{Emil}}$ 分别表示储能电站的充电、放电、容量及里程报价最大值。

2.2 下层能量及调频市场出清模型

下层模型核心目标是通过市场出清优化各机组运行策略，合理分配市场中各机组出力，满足系统供需平衡及调频需求，最小化各机组申报成本，如式(11)所示。

$$C_{\mathrm{L}}=\min\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{G}}}\left(e_{t,i}^{\mathrm{G}}P_{t,i}^{\mathrm{G}}+e_{t,i}^{\mathrm{Gcap}}P_{t,i}^{\mathrm{Gcap}}+e_{t,i}^{\mathrm{Gmil}}P_{t,i}^{\mathrm{Gmil}}\right)+\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{N_{\mathrm{es}}}\left(e_{t,m}^{\mathrm{dis}}P_{t,m}^{\mathrm{dis}}-e_{t,m}^{\mathrm{ch}}P_{t,m}^{\mathrm{ch}}+e_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}P_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}+e_{t,m}^{\mathrm{Emil}}P_{t,m}^{\mathrm{Emil}}\right) \tag{11}$$

式中：C_{L} 为火电及储能机组市场申报成本；N_{G} 为火电机组的数量；$P_{t,i}^{G}$、$P_{t,i}^{G\mathrm{cap}}$、$P_{t,i}^{G\mathrm{mil}}$ 分别表示 t 时段火电机组 i 能量市场中标出力、调频市场中标容量及中标里程；$e_{t,i}^{G}$、$e_{t,i}^{G\mathrm{cap}}$、$e_{t,i}^{G\mathrm{mil}}$ 分别为 t 时段火电机组 i 市场发电报价、容量报价、里程报价。

机组在能量及调频市场出清需满足电力系统节点功率平衡、各线路传输容量约束、火电机组和储能机组市场规则等约束。

1）电力系统节点功率平衡约束

$$\sum_{i\in\Phi_{\mathrm{G}}(j)}P_{t,i}^{\mathrm{G}}+\sum_{m\in\Phi_{\mathrm{es}}(j)}\left(P_{t,m}^{\mathrm{dis}}-P_{t,m}^{\mathrm{ch}}\right)=\sum_{d\in\Phi_{\mathrm{L}}(j)}P_{t,d}^{\mathrm{L}}+\sum_{a\in\Phi(j)}B_{ja}\left(\theta_{t,j}-\theta_{t,a}\right):\lambda_{t,j} \tag{12}$$

式中：$\Phi_{\mathrm{G}}(j)$、$\Phi_{\mathrm{es}}(j)$、$\Phi_{\mathrm{L}}(j)$ 分别为节点 j 的火电、储能和负荷集合；$\Phi(j)$为与节点 j 相连的集合；$P_{t,d}^{\mathrm{L}}$ 为 t 时段节点 d 的负荷需求（总节点为 j，部分节点上有负荷需求，即为 d 节点，$d\in\Phi_{\mathrm{L}}(j)$）；B_{ja} 为节点 j、a 之间的导纳；$\theta_{t,j}$ 和 $\theta_{t,a}$ 分别 t 时段节点 j 和节点 a 的相角；对偶变量 $\lambda_{t,j}$ 为 t 时段节点 j 的出清价格。

2）各线路传输容量约束

$$P_{l,\min}\le B_{ja}(\theta_{t,j}-\theta_{t,a})\le P_{l,\max}:\pi_{t,l}^{\min},\pi_{t,l}^{\max};\forall j,\forall a \tag{13}$$

式中：$P_{l,\max}$、$P_{l,\min}$分别线路 l 的传输容量上、下限；$\pi_{t,l}^{\min}$、$\pi_{t,l}^{\max}$为相应约束的对偶变量。

3）火电和储能机组的调频容量及调频里程需求约束

$$\begin{cases}\sum_{i=1}^{N_G}P_{t,i}^{\mathrm{Gcap}}+\sum_{m=1}^{N_{es}}P_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}=P_t^{\mathrm{Dcap}}:\lambda_t^{\mathrm{cap}}\\ \sum_{i=1}^{N_G}P_{t,i}^{\mathrm{Gmil}}+\sum_{m=1}^{N_{es}}P_{t,m}^{\mathrm{Emil}}=P_t^{\mathrm{Dmil}}:\lambda_t^{\mathrm{mil}}\end{cases}\tag{14}$$

式中：P_t^{Dcap}、P_t^{Dmil}分别为系统调频容量、里程需求；λ_t^{cap}、λ_t^{mil}为 t 时段的调频容量、里程出清价格，为机组调频容量、里程需求的对偶变量。

4）火电机组市场出清规则约束

火电机组的中标容量约束、中标里程约束、火电机组出力限制如式(15)所示。

$$\begin{cases}P_{t,i}^{\mathrm{G}}\ge P_{i,\min}^{\mathrm{G}}+P_{t,i}^{\mathrm{Gcap}}:\beta_{t,i}^{\mathrm{g,min}}\\ P_{t,i}^{\mathrm{G}}\le P_{i,\max}^{\mathrm{G}}-P_{t,i}^{\mathrm{Gcap}}:\beta_{t,i}^{\mathrm{g,max}}\\ 0\le P_{t,i}^{\mathrm{Gcap}}\le P_{i,\max}^{\mathrm{Gcap}}:\alpha_{t,i}^{\mathrm{cap,min}},\alpha_{t,i}^{\mathrm{cap,max}}\\ 0\le P_{t,i}^{\mathrm{Gmil}}\le P_{i,\max}^{\mathrm{Gmil}}:\alpha_{t,i}^{\mathrm{mil,min}},\alpha_{t,i}^{\mathrm{mil,max}}\\ 0\le P_{t,i}^{\mathrm{Gmil}}\le\gamma_{t,i}^{\mathrm{mc}}P_{t,i}^{\mathrm{Gcap}}:\delta_{t,i}^{\mathrm{mc,min}},\delta_{t,i}^{\mathrm{mc,max}}\end{cases}\tag{15}$$

式中：$P_{i,\max}^{\mathrm{G}}$、$P_{i,\min}^{\mathrm{G}}$分别为火电机组 i 的有功出力最大值和最小值；$P_{i,\max}^{\mathrm{Gcap}}$、$P_{i,\max}^{\mathrm{Gmil}}$为火电机组 i 的调频容量和调频里程最大值；$\gamma_{t,i}^{\mathrm{mc}}$为火电机组 i 的调频里程-容量比；$\beta_{t,i}^{\min}$、$\beta_{t,i}^{\max}$、$\alpha_{t,i}^{\mathrm{cap,min}}$、$\alpha_{t,i}^{\mathrm{cap,max}}$、$\alpha_{t,i}^{\mathrm{mil,min}}$、$\alpha_{t,i}^{\mathrm{mil,max}}$、$\delta_{t,i}^{\mathrm{mc,min}}$、$\delta_{t,i}^{\mathrm{mc,max}}$均为火电机组相应约束的对偶变量。

5）储能电站市场出清规则约束

储能电站相关约束如式(16)所示。

$$\begin{cases}0\le P_{t,m}^{\mathrm{dis}}\le P_{m,\max}^{\mathrm{dis}}:\psi_{t,m}^{\mathrm{dis,min}},\psi_{t,m}^{\mathrm{dis,max}}\\ 0\le P_{t,m}^{\mathrm{ch}}\le P_{m,\max}^{\mathrm{ch}}:\psi_{t,m}^{\mathrm{ch,min}},\psi_{t,m}^{\mathrm{ch,max}}\\ P_{t,m}^{\mathrm{dis}}\le P_{m,\max}^{\mathrm{dis}}-P_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}:\mu_{t,m}^{\mathrm{dis,max}}\\ P_{t,m}^{\mathrm{ch}}\le P_{m,\max}^{\mathrm{ch}}-P_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}:\mu_{t,m}^{\mathrm{ch,max}}\\ 0\le P_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}\le P_{m,\max}^{\mathrm{Ecap}}:\omega_{t,m}^{\mathrm{cap,min}},\omega_{t,m}^{\mathrm{cap,max}}\\ 0\le P_{t,m}^{\mathrm{Emil}}\le P_{m,\max}^{\mathrm{Emil}}:\omega_{t,m}^{\mathrm{mil,min}},\omega_{t,m}^{\mathrm{mil,max}}\\ 0\le P_{t,m}^{\mathrm{Emil}}\le\gamma_{t,m}^{\mathrm{mc}}P_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}:\varphi_{t,m}^{\mathrm{mc,min}},\varphi_{t,m}^{\mathrm{mc,max}}\end{cases}\tag{16}$$

式中：$\psi_{t,m}^{\mathrm{dis,min}}$、$\psi_{t,m}^{\mathrm{dis,max}}$、$\psi_{t,m}^{\mathrm{ch,min}}$、$\psi_{t,m}^{\mathrm{ch,max}}$、$\mu_{t,m}^{\mathrm{dis,max}}$、$\mu_{t,m}^{\mathrm{ch,max}}$、$\omega_{t,m}^{\mathrm{cap,min}}$、$\omega_{t,m}^{\mathrm{cap,max}}$、$\omega_{t,m}^{\mathrm{mil,min}}$、$\omega_{t,m}^{\mathrm{mil,max}}$、$\varphi_{t,m}^{\mathrm{mc,min}}$、$\varphi_{t,m}^{\mathrm{mc,max}}$均为储能电站相应约束的对偶变量。

2.3　模型的转换与求解

本文构建的双层模型属于混合整数非线性问题，且上下层模型之间存在显著耦合关系，通过引入 KKT 条件，将双层转化为单层数学规划模型，再利用大 M 法及强对偶理论对单层模型作线性化处理为混合整数线性规划问题，利用求解器完成模型的求解。能量及调频市场双层出清模型线性化求解框架如附录图 A1 所示。

根据 2.1 节和 2.2 节建立的模型，构造下层模型的拉格朗日函数，如附录式(B1)所示，对所构造的拉格朗日函数求导得到下层模型 KKT 条件如附录式(B5)—(B34)所示。附录式(B13)—(B34)中，对偶变量与决策变量相乘生成非线性项，利用大 M 法引入布尔变量 κ 和正数 M 将其转化为线性不等式。

由于转化后的单层模型的目标函数包含非线性项，基于强对偶理论对重构后单层模型目标函数进行处理，将目标函数转化为对偶问题求解，如附录式(B35)所示。此外，利用 KKT 条件中的互补松弛条件化简附录式(B35)，得到化简后的单层模型目标函数如式(17)所示。

$$\begin{aligned}\min\sum_{t=1}^{T}\Bigg\{&\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{G}}}\left(e_{t,i}^{\mathrm{G}}P_{t,i}^{\mathrm{G}}+e_{t,i}^{\mathrm{Gcap}}P_{t,i}^{\mathrm{Gcap}}+e_{t,i}^{\mathrm{Gmil}}P_{t,i}^{\mathrm{Gmil}}\right)+\\ &\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{G}}}\left(\beta_{t,i}^{\max}P_{i,\max}^{\mathrm{G}}-\beta_{t,i}^{\min}P_{i,\min}^{\mathrm{G}}\right)+\\ &\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{G}}}\left(\alpha_{t,i}^{\mathrm{cap,max}}P_{t,i}^{\mathrm{Gcap}}+\alpha_{t,i}^{\mathrm{mil,max}}P_{t,i}^{\mathrm{Gmil}}\right)+\\ &\sum_{l=1}^{N_{\mathrm{L}}}((\pi_{t,l}^{\min}+\pi_{t,l}^{\max})P_{l,\max})+\sum_{m=1}^{N_{es}}C_{t,m}^{\mathrm{d}}\\ &\sum_{d\in\Phi_{\mathrm{L}}(j)}\lambda_{t,j}P_{t,d}^{\mathrm{L}}-\lambda_t^{\mathrm{cap}}P_t^{\mathrm{Dcap}}-\lambda_t^{\mathrm{mil}}P_t^{\mathrm{Dmil}}\Bigg\}\end{aligned}\tag{17}$$

式中：N_{L}表示系统线路数。

3　算例验证

3.1　参数设置

本文基于 IEEE-30 节点系统验证所提计及储能退化成本的能量及调频市场出清模型与求解方法的正确性。IEEE-30 节点系统的拓扑结构主要包含线路、负荷节点、火电机组和储能电站，系统日负荷变化趋势如附录图 A2 所示。市场出清模型通过调度机制激励机组按边际成本报价，并基于系统节点功率平衡约束计算节点电价[26]。通过参考文献[7]设置储能参数，在 IEEE-30 节点系统中增设两台 20 MW/60 MWh、10 MW/40 MWh 的储能，其充放电效率均为 0.9，最大、最小荷电状态为 0.9、0.1，储能报价详细参数见附录表 A1。各火电机组详细报

价信息如附录表 A2 所示[27]。

采用数值拟合的方式得到储能循环寿命损失与 DoD 的函数如式(18)所示，对储能的循环退化函数进行分段拟合测试，如附录图 A3 所示。使用 4 段划分即可实现对原始函数较为平滑的折线逼近。若分段过多，将显著增加模型计算的复杂度[28]。根据求解模型的规模和特点，在均衡模型精度和求解计算量后，选择线性化总分段数为 4 段，分段拟合不同 DoD 下电池循环寿命损失如附录图 A4 所示。

$$C_D = A\mathrm{e}^{-9.35D} + B\mathrm{e}^{-1.32D} \tag{18}$$

式中：C_D 为储能在循环深度为 D 时的循环寿命损失成本；D 为不同的 DoD；A、B 分别表示储能退化曲线的拟合系数。

为验证计及储能退化成本对能量及调频市场的影响，算例中设置两个场景：场景 1，不考虑储能退化成本的能量及调频市场出清；场景 2，考虑储能退化成本的能量及调频市场出清。

3.2 能量市场机组中标情况分析

研究对比了两种场景下能量市场 24 时段中标情况，场景 1 中，各火电机组和储能电站中标如图 2 所示；场景 2 中，各火电机组和储能电站中标如图 3 所示。

由图 2 和图 3 可以得出如下结论：

1）在能量市场中，6 台火电机组在每个时段的累计出力约占总发电量的 90%。由于 G1、G2、G4 发电报价相较于其它机组低，根据能量市场低价优先原则机组 G1、G2、G4 优先参与能量市场，在 24 时段接近满发。在负荷水平较高的 11—12 时段、17—19 时段，G1、G2、G4 满发的同时，由于 G6 发电报价低于 G3 和 G5，所以 G6 优先参与能量市场。此外，Es1 容量为 Es2 的 1.5 倍，在能量市场中进行低谷充电和高峰放电可获得更高利益，因此 Es1 的能量市场中标功率高于 Es2。

2）场景 1 中，在负荷水平较低的时段，储能机组会进行策略性充电的方式，利用市场中价格波动使机组收益最大化；场景 2 中，由于考虑储能退化成本，因此储能电站避免在不必要时段充电。通过对比场景 1 和场景 2 可以看出，不考虑退化成本时，储能电站的充放电次数频繁，主要基于电价差异来进行市场优化，不考虑储能退化的影响；考虑退化成本时，频繁的充放电会加速储能的退化，因此，限制了储能机组的充电的频率和深度。

3.3 调频市场机组中标情况分析

研究对比了两种场景下调频市场 24 时段调频容量中标情况，场景 1 中，各火电机组和储能电站中标如图 4 所示；场景 2 中，各火电机组和储能电站中标如图 5 所示。

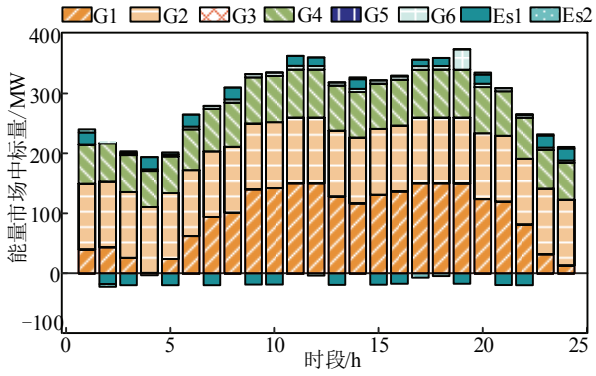


图 2 场景 1 能量市场机组中标情况

Fig.2 Scenario 1 bid winning situation of unit in the energy market

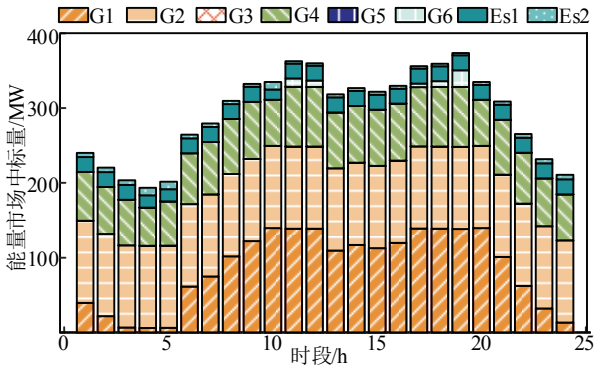


图 3 场景 2 能量市场机组中标情况

Fig.3 Scenario 2 bid winning situation of unit in the energy market

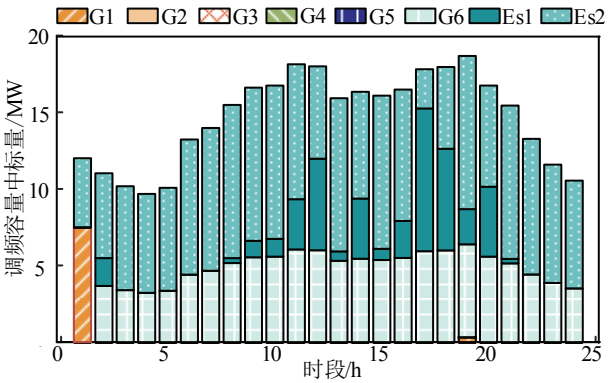


图 4 场景 1 机组调频容量中标情况

Fig.4 Scenario 1 frequency regulation capacity bidding results of units

由图 4 和图 5 可以得出如下结论：

1）在调频市场中，储能电站 Es1 和 Es2 调频容量中标约占总中标量的 65%左右。由于储能电站具有快速响应能力和较高的里程容量比，在调频容量裕度充足情况下，储能可比火电机组提供更多调频里程。因此，调频能力较强的储能电站在调频市场中会被优先调度。

2）火电机组 G2 和 G6 调频容量报价均为 12 元/MW，因 G2 在能量市场中优先调度，使得 G6 在调频市场中获得中标功率。可见，火电机组通过提供稳定的调频容量获得收益，反映其低边际成本优势。此外，火电机组受最小出力约束等条件制约，因此，在时段 1、4、11、19，火电机组 G1、G3、G4 小比例参与调频市场。

3）Es2 调频市场容量中标功率大于 Es1，主要原因为：一方面，Es1 和 Es2 的功率-容量比分别为 0.33、0.25，由于 Es2 的功率容量比低于 Es1，意味着 Es2 在单位能量下可提供更长时间的出力，荷电状态变化相对缓慢，可承担基础调频；另一方面，系统的调频容量需求为总负荷的 5%，Es2 可提供足够的功率满足基础调频，优先选择容量机组小的 Es2 更经济。

4）通过对比场景 1 和场景 2 可得储能退化成本对调频市场的影响。场景 1 调频市场中基础调频容量需求由 Es2 满足，高峰 10—20 时段增量需求由 Es1 补充调频，当负荷低谷时，Es1 在调频市场中无出力。在场景 2 中，额定容量较小的 Es2 导致单位充放电深度的退化成本高于 Es1，高峰时段系统优先调用 Es1 可降低储能单次循环的退化成本，因此，在高峰 11 和 19 时段，Es1 替代了 Es2 参与调频市场中标。

研究对比了两种场景下调频市场 24 时段调频里程中标情况，场景 1 中，各火电机组和储能电站中标如图 6 所示；场景 2 中，各火电机组和储能电站中标如图 7 所示。

由图 6 和图 7 可以得出如下结论：

1）在场景 1 调频市场中，Es2 调频里程中标量在 24 时段满发，而 Es1 仅在负荷高峰 8-20 时段参与调频市场出力。由于储能电站具有较高的响应性、较低的调频容量成本、较强的调频里程能力，在不考虑退化成本的市场机制下，Es2 具备在全时段参与调频服务的经济性与激励条件，因此 Es2 被激励以满发最大化调频收益。

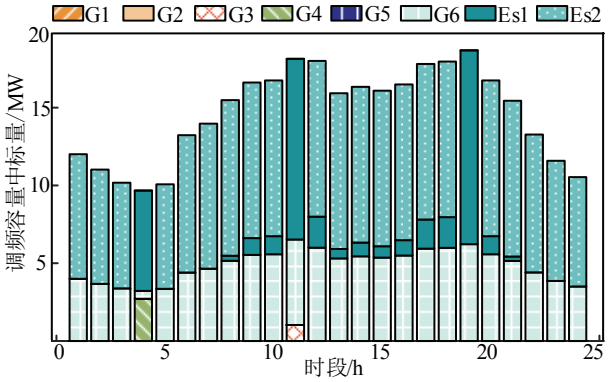


图 5　场景 2 机组调频容量中标情况

Fig.5　Scenario 2 frequency regulation capacity bidding results of units

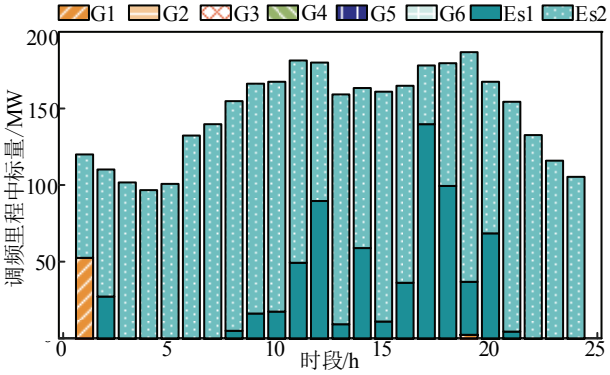


图 6　场景 1 机组调频里程中标情况

Fig.6　Scenario 1 frequency regulation mileage bidding results of units

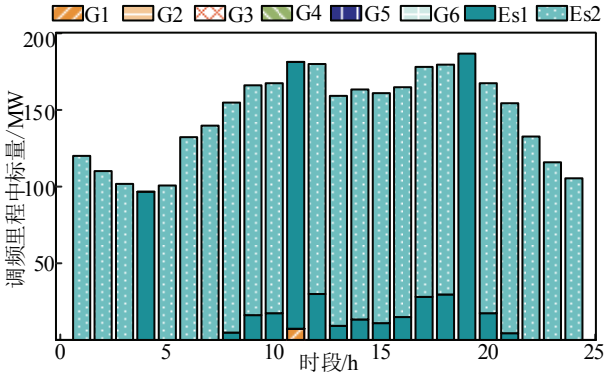


图 7　场景 2 机组调频里程中标情况

Fig.7　Scenario 2 frequency regulation mileage bidding results of units

2）通过对比场景 1 和场景 2 可得，在场景 2 中，Es2 在调频市场里程中标量约占总发电量的 85%，且在时段 4、11、19 出现 Es1 代替 Es2 的情况。考虑储能退化成本后改变了储能的市场参与策

略，Es2 其较小容量导致单位放电深度的退化成本更高，导致在频繁充放电条件下加速储能容量衰减。在负荷快速变化的转折 4、11、19 时段，Es1 大容量带来的低放电深度退化成本和更高功率响应裕度，成为更经济的调频资源。因此，在高峰时段储能 Es1 因综合成本更低而出现临时替代 Es2 中标的现象，提升系统整体经济性。

3.4 能量及调频市场出清价格分析

场景 1 中，各时段能量市场出清价格与节点的关系如图 8 所示；场景 2 中，各时段能量市场出清价格与节点的关系如图 9 所示。

由图 8 和图 9 可以得出以下结论：

1）在 24 时段中，能量市场出清价格与节点负荷呈正相关。在 10—14 时段、16—20 时段，系统负荷量突增推动节点电价骤升。在 11、19 时段，在负荷高峰期机组出力上升，电网中部分线路传输功率达到极限引发系统阻塞现象。此时，电网中的一部分线路无法承载更多的电流，系统出现电力传输瓶颈，导致节点电价激增，与其它时段的节点电价出现了很明显的差异。在其它时段无系统阻塞现象，所有节点的电价趋同。

2）通过对比场景 1 和场景 2 可以看出，储能退化成本的引入减少储能电站在高峰负荷段的参与，导致电价波动加剧，尤其在 10—14 时段和 16—20 时段。在两种场景下，出清电价虽有波动但都是维持在 190~200 元/MWh 的区间范围内。

场景 1 中，各时段调频市场出清价格与系统负荷变化趋势的关系如图 10 所示；场景 2 中，各时段调频市场出清价格与系统负荷变化趋势的关系如图 11 所示。

1）从图 10 和图 11 可得，场景 1 中调频市场出清电价在 12~18 元/MWh 区间内；场景 2 中调频市场出清电价在 12~14 元/MWh 区间内。由于负荷爬坡和负荷高峰时，调频需求曲线陡峭，微小容量短缺即可引发电价大幅度波动，因此，在负荷 4—5、10—12 及 18—20 时段，两个场景下的出清电价出现明显波动。

2）两个场景中，在负荷波动的 10—12 及 16—20 时段，系统调频容量充裕，使得边际出清资源的成本下降，导致调频容量电价下降；系统调用调频资源进行功率调节，导致调节里程增加，因此，调频里程电价上升。高峰负荷时段，系统频率波动加剧，对实际调频动作需求增强，此时机组在市场

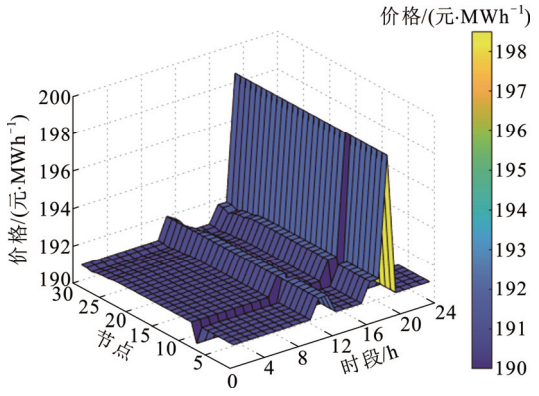


图 8 场景 1 能量市场出清电价

Fig.8 Clearing price of scenario 1 energy market

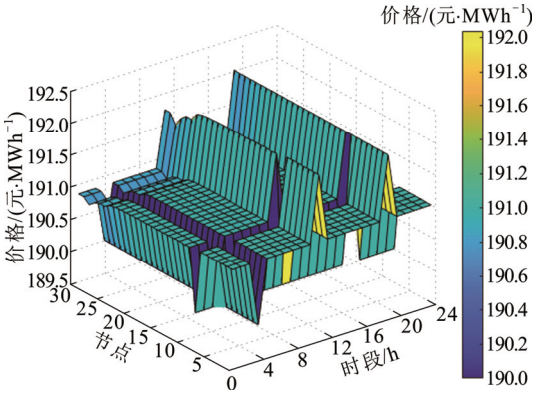


图 9 场景 2 能量市场出清电价

Fig.9 Clearing price of scenario 2 energy market

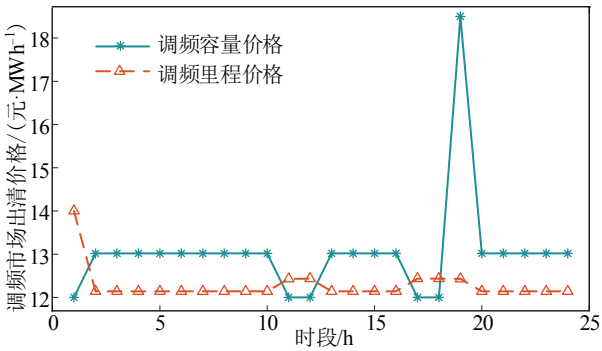


图 10 场景 1 调频市场出清电价

Fig.10 Clearing price of scenario 1 frequency regulation market

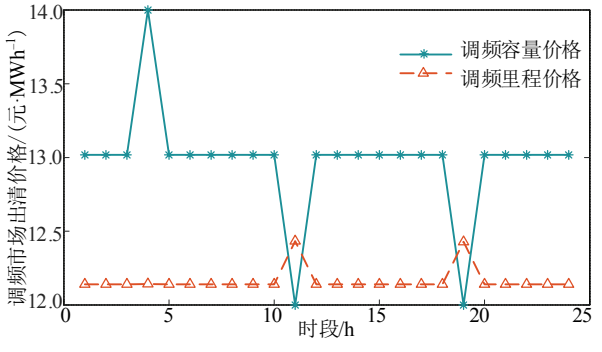


图 11 场景 2 调频市场出清电价

Fig.11 Clearing price of scenario 2 frequency regulation market

报价策略上更倾向于获得调频里程收益，同时里程优先策略导致调频容量电价走低。

3.5　能量及调频市场收益分析

两个场景中，各火电机组、储能电站在能量市场、调频市场及市场总收益如表 1 所示。

根据表 1 可得，场景 1 中，火电机组在能量及调频市场中占据主体地位，其机组出力占比高，因此火电机组的总收益高于储能机组。然而，火电机组在调频市场参与度有限，导致调频收益较低。储能电站在能量市场中出力较小，且未计及退化成本时，储能电站在能量市场充放电未能带来足够收益，导致收益为负。但储能在调频市场中具备调频优势，实现较高收益，表明储能电站主要依赖调频市场提供灵活服务以获取盈利。

进一步对比场景 1 与场景 2 的市场收益数据可以看出，储能退化成本对市场中机组的收益分配产生显著影响。考虑储能退化成本后，储能在优化调度过程中参与能量市场交易，并合理分配调频服务能力，从而提升能量及调频市场中的边际收益水平，最终使储能获得更高的综合收益，同时也带动整个系统的市场总收益提升。

4　结论

本文提出一种计及储能退化成本的能量及调频市场双层优化决策模型，上层模型目标函数为最大化储能收益及寿命，下层模型目标函数为最小化机组申报成本，优化能量及调频市场中各机组中标功率和出清价格，得到主要结论如下：

1）本文所提的能量及调频市场双层优化模型，充分考虑各机组在能量及调频市场申报价格与出清价格之间的耦合关系，平衡储能参与市场的收益与寿命，实现各机组在联合市场中的利益最大化。

2）基于本文所提的计及储能退化成本的能量调频市场双层优化决策模型，可协调储能电站与各机组的利益分配，得出储能电站及各机组在能量及调频市场中的最优中标功率。

3）本文考虑退化成本对储能在能量及调频市场中充放电策略具有重要影响，特别是在长期投标运行中，提供了平衡短期经济利益与长期储能设备寿命的参考模型。

当前能量及调频市场双层优化模型针对特定储能容量与市场规则设计，未来可通过引入储能技术类型、系统容量规模等作为变量参数，构建可扩展的通用化模型框架，使其适用于不同区域的电力市场规模。

表 1　各机组市场收益情况

Table 1　Market revenue status of each unit

机组市场收益	场景 1	场景 2
火电能量市场收益/元	1.28×10^6	1.22×10^6
火电调频市场收益/元	2.12×10^3	1.51×10^3
储能能量市场收益/元	-4.52×10^3	9.28×10^4
储能调频市场收益/元	4.55×10^4	4.58×10^4
市场总收益/元	1.32×10^6	1.37×10^6

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献　References

[1] 李祥涛，陈　磊，郝　玲，等. 基于两个细则的火储联合一次调频控制策略[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4163-4171.
LI Xiangtao, CHEN Lei, HAO Ling, et al. A joint primary frequency modulation control strategy for fire storage based on two detailed rules[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4163-4171.

[2] 魏林君，叶　华，迟永宁. 基于状态重构的构网型风机与储能系统联合频率支撑控制策略[J]. 高电压技术，2023，49(12)：5095-5104.
WEI Linjun, YE Hua, CHI Yongning. Frequency response coordinated control strategy between grid-forming wind turbine and energy storage based on state reconstruction[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 5095-5104.

[3] LI C, LI P, YU H, et al. Optimal planning of community integrated energy station considering frequency regulation service[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(2): 264-273.

[4] 张鸿宇，王　宇. 国外电网侧储能电站参与调频辅助服务市场的机制经验及对我国的启示[J]. 储能科学与技术，2021，10(2)：766-773.
ZHANG Hongyu, WANG Yu. Mechanism experience of foreign grid-side storage participating in frequency regulation auxiliary service market and its enlightenment to China[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(2): 766-773.

[5] 陈启鑫，房曦晨，郭鸿业，等. 储能参与电力市场机制：现状与展望[J]. 电力系统自动化，2021，45(16)：14-28.
CHEN Qixin, FANG Xichen, GUO Hongye, et al. Participation mechanism of energy storage in electricity market: status quo and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 14-28.

[6] 李嘉媚，艾　芊，殷爽睿. 虚拟电厂参与调峰调频服务的市场机制与国外经验借鉴[J]. 中国电机工程学报，2022，42(1)：37-55.
LI Jiamei, AI Qian, YIN Shuangrui. Market mechanism and foreign experience of virtual power plant participating in peak-regulation and frequency-regulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(1): 37-55.

[7] 肖云鹏，张　兰，张　轩，等. 包含独立储能的现货电能量与调频辅助服务市场出清协调机制[J]. 中国电机工程学报，2020，40(增刊 1)：167-180.
XIAO Yunpeng, ZHANG Lan, ZHANG Xuan, et al. The coordinated market clearing mechanism for spot electric energy and regulating ancillary service incorporating independent energy storage resources[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(Supplement 1): 167-180.

[8] 熊　庆，邸振国，汲胜昌. 锂离子电池健康状态估计及寿命预测研究进展综述[J]. 高电压技术，2024，50(3)：1182-1195.
XIONG Qing, DI Zhenguo, JI Shengchang. Review on health state estimation and life prediction of lithium-ion batteries[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1182-1195.

[9] ZHAO C Z, LI X P. Microgrid optimal energy scheduling considering

neural network based battery degradation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(1): 1594-1606.

[10] ABDULLA K, DE HOOG J, MUENZEL V, et al. Optimal operation of energy storage systems considering forecasts and battery degradation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2086-2096.

[11] 李相俊，马 锐，王上行，等. 考虑电池寿命的商业园区储能电站运行控制策略[J]. 高电压技术，2020，46(1)：62-70.
LI Xiangjun, MA Rui, WANG Shangxing, et al. Operation control strategy for energy storage station after considering battery life in commercial park[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(1): 62-70.

[12] 温可瑞，李卫东，韩 松，等. 考虑日历寿命的电池储能系统参与一次调频服务配置容量与控制参数协同优化[J]. 高电压技术，2019，45(7)：2185-2193.
WEN Kerui, LI Weidong, HAN Song, et al. Optimization of deployment with control for battery energy storage system participating in primary frequency regulation service considering its calendar life[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(7): 2185-2193.

[13] ZHANG C L, ZHAO S S, HE Y G. An integrated method of the future capacity and rul prediction for lithium-ion battery pack[J]. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 2022, 71(3): 2601-2613.

[14] 杨智鹏，宋政湘，孟锦豪，等. 基于单体到模组迁移的磷酸铁锂储能系统 SOH 评估方法[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4142-4149.
YANG Zhipeng, SONG Zhengxiang, MENG Jinhao, et al. SOH evaluation method for LFP energy storage system based on cell-to-module transfer[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4142-4149.

[15] SHI Y Y, XU B L, WANG D, et al. Using battery storage for peak shaving and frequency regulation: joint optimization for superlinear gains[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 2882-2894.

[16] XU B L, ZHAO J Y, ZHENG T X, et al. Factoring the cycle aging cost of batteries participating in electricity markets[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(2): 2248-2259.

[17] 陈泽宇，陈艳波. 计及循环寿命和电能量-调频市场出清的储能自调度策略[J]. 电力系统自动化，2024，48(14)：28-41.
CHEN Zeyu, CHEN Yanbo. Self-scheduling strategy of energy storage considering cycle life and clearing of electric power energy-frequency regulation market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(14): 28-41.

[18] 刘春阳，王秀丽，刘世民，等. 计及蓄电池使用寿命的微电网经济调度模型[J]. 电力自动化设备，2015，35(10)：29-36.
LIU Chunyang, WANG Xiuli, LIU Shimin, et al. Economic dispatch model considering battery lifetime for microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 29-36.

[19] 刘庆楷，刘明波，陆文甜. 考虑退化成本的电池储能参与调频辅助服务市场的控制方法[J]. 电网技术，2021，45(8)：3043-3051.
LIU Qingkai, LIU Mingbo, LU Wentian. Control method for battery energy storage participating in frequency regulation market considering degradation cost[J]. Power System Technology, 2021, 45(8): 3043-3051.

[20] 刘 凡，李凤婷，张高航，等. 计及循环寿命和运营策略的风电汇集区域储能电站优化配置[J]. 电力系统保护与控制，2023，51(8)：127-139.
LIU Fan, LI Fengting, ZHANG Gaohang, et al. Optimal configuration of storage power stations in a wind power gathering area considering cycle life and operation strategy[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(8): 127-139.

[21] 刁 锐，胡泽春，钱伟杰，等. 基于老化成本实时次梯度的异构储能系统功率分配策略[J]. 中国电机工程学报，2024，44(22)：8884-8896.
DIAO Rui, HU Zechun, QIAN Weijie, et al. Power allocation strategy for heterogeneous energy storage system based on real-time subgradients of aging cost function[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(22): 8884-8896.

[22] XU B L, OUDALOV A, ULBIG A, et al. Modeling of lithium-ion battery degradation for cell life assessment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1131-1140.

[23] YONG P, GUO F, YANG Z F. An age-dependent battery energy storage degradation model for power system operations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2025, 40(1): 1188-1191.

[24] WICKE M, BOCKLISCH T. Hierarchical energy management of hybrid battery storage systems for PV capacity firming and spot market trading considering degradation costs[J]. IEEE Access, 2024, 12: 52669-52686.

[25] 韩晓娟，程 成，籍天明，等. 计及电池使用寿命的混合储能系统容量优化模型[J]. 中国电机工程学报，2013，33(34)：91-97，16.
HAN Xiaojuan, CHENG Cheng, JI Tianming, et al. Capacity optimal modeling of hybrid energy storage systems considering battery life[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(34): 91-97, 16.

[26] 房欣欣，杨知方，余 娟，等. 节点电价的理论剖析与拓展[J]. 中国电机工程学报，2020，40(2)：379-389.
FANG Xinxin, YANG Zhifang, YU Juan, et al. Theoretical analysis and extension of locational marginal price[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(2): 379-389.

[27] 李国庆，闫克非，范高锋，等. 储能参与现货电能量-调频辅助服务市场的交易决策研究[J]. 电力系统保护与控制，2022，50(17)：45-54.
LI Guoqing, YAN Kefei, FAN Gaofeng, et al. Transaction decision-making of energy storage stations participating in the spotenergy and frequency modulation ancillary service market[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(17): 45-54.

[28] 胡 源，别朝红，李更丰，等. 天然气网络和电源、电网联合规划的方法研究[J]. 中国电机工程学报，2017，37(1)：45-53.
HU Yuan, BIE Zhaohong, LI Gengfeng, et al. Integrated planning of natural gas network and composite power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 45-53.



沈 赋
1988—，男，博士，副教授
主要从事新型电力系统建模、电网运行与调度等方面的研究工作
E-mail: shenfu@kust.edu.cn

SHEN Fu
Ph.D.
Associate professor



蔡子龙(通信作者)
1976-，男，博士，副教授，硕导
研究方向为电动汽车充电站规划、车网互动、信息技术在电力系统中的应用
E-mail: 20040142@kust.edu.cn

CAI Zilong
Ph.D.
Associate professor
Corresponding author

收稿日期 2025-04-14 在线出版日期 2025-07-16 编辑 陈 蔓

附录 A

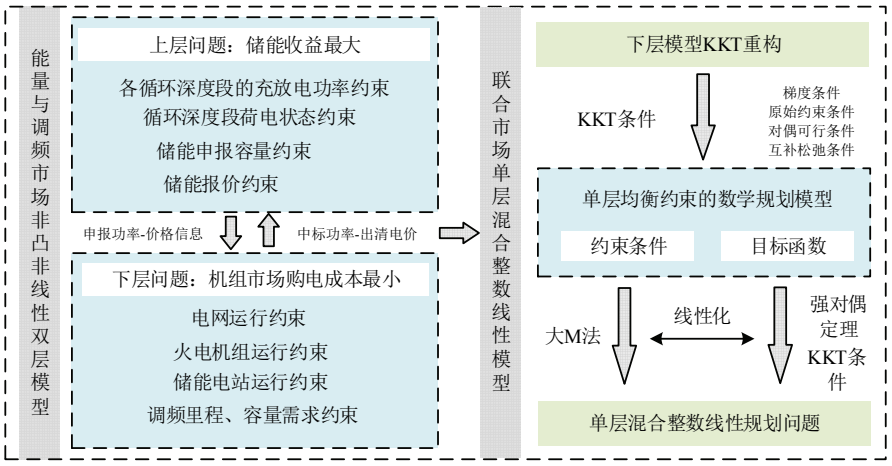


图 A1　双层模型线性化求解框架

Fig.A1　Bi-level model linearization solution framework

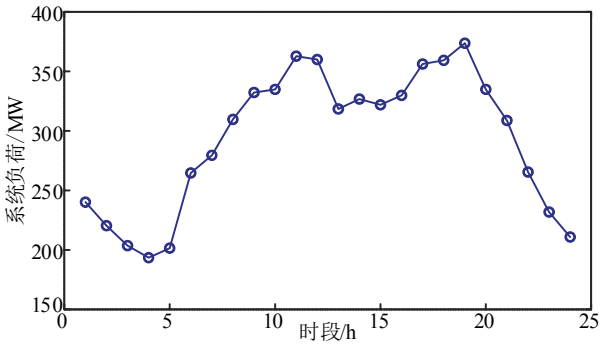


图 A2　系统日负荷变化趋势

Fig.A2　Trend of daily system load and electricity prices

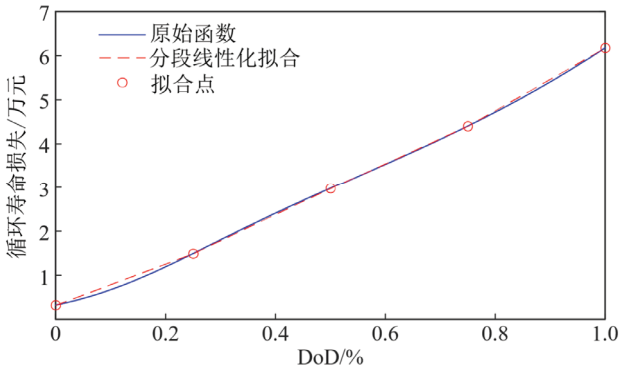


图 A3　不同分段数量下寿命损失线性化拟合

Fig.A3　Linearization fitting of life loss under different number of segments

表 A1　储能电站信息

Table A1　ES station information

储能电站	Es1	Es2
放电报价/(元·MWh^{-1})	220	220
充电报价/(元·MWh^{-1})	150	150
里程报价/(元·MW^{-1})	10	10
容量报价/(元·MW^{-1})	12	12
里程容量比	15	15

表 A2　火电机组信息

Table A2　Thermal power plant information

机组节点	火电机组	发电报价/(元·MWh^{-1})	容量报价/(元·MW^{-1})	里程报价/(元·MW^{-1})	里程容量比
1	G1	191	14	12	7
2	G2	183	12	15	12
5	G3	201	16	15	7
8	G4	190	14	18	9
11	G5	230	15	14	8
13	G6	192	12	16	12

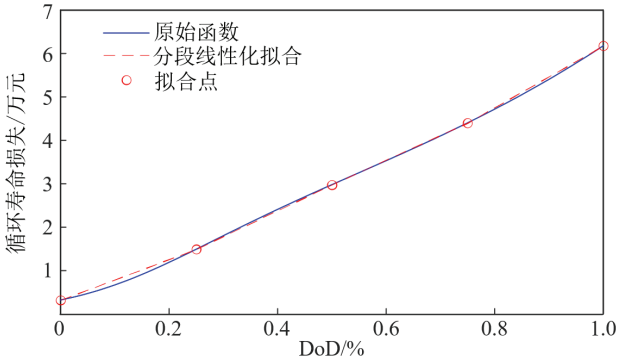


图 A4　分段拟合不同 DoD 下电池循环寿命损失曲线

Fig.A4　Segmented fitting of battery cycle life loss curves with different DoD

附录 B

1）双层模型线性化过程

根据 KKT 条件的基本原理，构造下层模型的拉格朗日函数如式(B1)所示，其中，式(B2)为原目标函数；式(B3)为等式约束函数；式(B4)为不等式约束函数。

$$L(X,\lambda,\mu)=f(X)+\sum_{i=1}^{a}\lambda_i h_i(X)+\sum_{j=1}^{b}\mu_j g_j(X) \tag{B1}$$

$$\begin{aligned} f(X)=&\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_G}\left(e_{t,i}^{G}P_{t,i}^{G}+e_{t,i}^{Gcap}P_{t,i}^{Gcap}+e_{t,i}^{Gmil}P_{t,i}^{Gmil}\right)+\\ &\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{N_{es}}\left(e_{t,m}^{dis}P_{t,m}^{dis}-e_{t,m}^{ch}P_{t,m}^{ch}+e_{t,m}^{Ecap}P_{t,m}^{Ecap}+e_{t,m}^{Emil}P_{t,m}^{Emil}\right)\end{aligned} \tag{B2}$$

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^{a}\lambda_i h_i(X)=&\lambda_{t,j}\left(\begin{array}{l}\sum\limits_{a\in\Phi(j)}B_{ja}(\theta_{t,j}-\theta_{t,a})-\sum\limits_{i\in\Phi_G(j)}P_{t,i}^{G}-\\ \sum\limits_{m\in\Phi_{es}(j)}(P_{t,m}^{dis}-P_{t,m}^{ch})-\sum\limits_{d\in\Phi_L(j)}P_{t,d}^{L}\end{array}\right)+\\ &\lambda_t^{cap}\left(P_t^{Dcap}-\left(\sum_{i=1}^{N_G}P_{t,i}^{Gcap}+\sum_{m=1}^{N_{es}}P_{t,m}^{Ecap}\right)\right)+\\ &\lambda_t^{mil}\left(P_t^{Dmil}-\left(\sum_{i=1}^{N_G}P_{t,i}^{Gmil}+\sum_{m=1}^{N_{es}}P_{t,m}^{Emil}\right)\right)\end{aligned} \tag{B3}$$

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{b}\mu_j g_j(X)=&\pi_{t,l}^{min}\left(P_{l,\min}-B_{ja}(\theta_{t,j}-\theta_{t,a})\right)P_{l,\min}+\\ &\pi_{t,l}^{max}\left(B_{ja}(\theta_{t,j}-\theta_{t,a})-P_{l,\max}\right)+\\ &\beta_{t,i}^{min}\left(P_{i,\min}^{G}+P_{t,i}^{Gcap}-P_{t,i}^{G}\right)+\\ &\beta_{t,i}^{max}\left(P_{t,i}^{G}-P_{i,\max}^{G}+P_{t,i}^{Gcap}\right)-\\ &\alpha_{t,i}^{cap,min}P_{t,i}^{Gcap}+\alpha_{t,i}^{cap,max}\left(P_{t,i}^{Gcap}-P_{i,\max}^{Gcap}\right)-\\ &\alpha_{t,i}^{mil,min}P_{t,i}^{Gmil}+\alpha_{t,i}^{mil,max}\left(P_{t,i}^{Gmil}-P_{i,\max}^{Gmil}\right)-\\ &\delta_{t,i}^{mc,min}P_{t,i}^{Gmil}+\delta_{t,i}^{mc,max}\left(P_{t,i}^{Gmil}-\gamma_{t,i}^{mc}P_{t,i}^{Gcap}\right)-\\ &\psi_{t,m}^{dis,min}P_{t,m}^{dis}+\psi_{t,m}^{dis,max}\left(P_{t,m}^{dis}-P_{m,\max}^{dis}\right)-\\ &\psi_{t,m}^{ch,min}P_{t,m}^{ch}+\psi_{t,m}^{ch,max}\left(P_{t,m}^{ch}-P_{m,\max}^{ch}\right)+\\ &\mu_{t,m}^{dis,max}\left(P_{t,m}^{dis}-P_{m,\max}^{dis}+P_{t,m}^{Ecap}\right)+\\ &\mu_{t,m}^{ch,max}\left(P_{t,m}^{ch}-P_{m,\max}^{ch}+P_{t,m}^{Ecap}\right)-\\ &\omega_{t,m}^{cap,min}P_{t,m}^{Ecap}+\omega_{t,m}^{cap,max}\left(P_{t,m}^{Ecap}-P_{m,\max}^{Ecap}\right)-\\ &\omega_{t,m}^{mil,min}P_{t,m}^{Emil}+\omega_{t,m}^{mil,max}\left(P_{t,m}^{Emil}-P_{m,\max}^{Emil}\right)-\\ &\varphi_{t,m}^{mc,min}P_{t,m}^{Emil}+\varphi_{t,m}^{mc,max}\left(P_{t,m}^{Emil}-\gamma_{t,m}^{mc}P_{t,m}^{Ecap}\right)\end{aligned} \tag{B4}$$

将式(B2)—(B4)代入式(B1)，并对式(B1)求导得到下层模型 KKT 条件如式(B5)—(B34)。

$$e_{t,i}^{G}+\lambda_{t,j}-\beta_{t,i}^{min}+\beta_{t,i}^{max}=0 \tag{B5}$$

$$\begin{aligned} &e_{t,i}^{Gcap}-\lambda_t^{cap}+\beta_{t,i}^{min}+\beta_{t,i}^{max}-\alpha_{t,i}^{cap,min}+\\ &\alpha_{t,i}^{cap,max}-\delta_{t,i}^{mc,max}\gamma_{t,i}^{mc}=0\end{aligned} \tag{B6}$$

$$e_{t,i}^{Gmil}-\lambda_t^{mil}-\alpha_{t,i}^{mil,min}+\alpha_{t,i}^{mil,max}-\delta_{t,i}^{mc,min}+\delta_{t,i}^{mc,max}=0 \tag{B7}$$

$$e_{t,m}^{dis}-\lambda_{t,j}-\psi_{t,m}^{dis,min}+\psi_{t,m}^{dis,max}+\mu_{t,m}^{dis,max}=0 \tag{B8}$$

$$-e_{t,m}^{ch}+\lambda_{t,j}-\psi_{t,m}^{ch,min}+\psi_{t,m}^{ch,max}+\mu_{t,m}^{ch,max}=0 \tag{B9}$$

$$\begin{aligned} &e_{t,m}^{Ecap}-\lambda_t^{cap}+\mu_{t,m}^{dis,max}+\mu_{t,m}^{ch,max}-\omega_{t,m}^{cap,min}+\\ &\omega_{t,m}^{cap,max}-\varphi_{t,m}^{mc,max}\gamma_{t,m}^{mc}=0\end{aligned} \tag{B10}$$

$$e_{t,m}^{Emil}-\lambda_t^{mil}+\omega_{t,m}^{mil,min}+\omega_{t,m}^{mil,max}-\varphi_{t,m}^{mc,min}+\varphi_{t,m}^{mc,max}=0 \tag{B11}$$

$$\begin{aligned} &\sum_{a\in\Phi(j)}B_{ja}(\lambda_{t,j}-\lambda_{t,a})+\sum_{j\in\Phi_1(j)}B_{ja}(\pi_{t,l}^{max}-\pi_{t,l}^{min})-\\ &\sum_{j\in\Phi_2(j)}B_{aj}(\pi_{t,l}^{max}-\pi_{t,l}^{min})=0\end{aligned} \tag{B12}$$

$$\pi_{t,l}^{min}\left(B_{ja}(\theta_{t,j}-\theta_{t,a})-P_{l,\min}\right)=0 \tag{B13}$$

$$\pi_{t,l}^{max}\left(P_{l,\max}-B_{ja}(\theta_{t,j}-\theta_{t,a})\right)=0 \tag{B14}$$

$$\beta_{t,i}^{min}\left(P_{t,i}^{G}-\left(P_{i,\min}^{G}+P_{t,i}^{Gcap}\right)\right)=0 \tag{B15}$$

$$\beta_{t,i}^{max}\left(P_{i,\max}^{G}-P_{t,i}^{Gcap}-P_{t,i}^{G}\right)=0 \tag{B16}$$

$$\alpha_{t,i}^{cap,min}P_{t,i}^{Gcap}=0 \tag{B17}$$

$$\alpha_{t,i}^{cap,max}\left(P_{i,\max}^{Gcap}-P_{t,i}^{Gcap}\right)=0 \tag{B18}$$

$$\alpha_{t,i}^{mil,min}P_{t,i}^{Gmil}=0 \tag{B19}$$

$$\alpha_{t,i}^{mil,max}\left(P_{i,\max}^{Gmil}-P_{t,i}^{Gmil}\right)=0 \tag{B20}$$

$$\delta_{t,i}^{mc,min}P_{t,i}^{Gmil}=0 \tag{B21}$$

$$\delta_{t,i}^{mc,max}\left(\gamma_{t,i}^{mc}P_{t,i}^{Gcap}-P_{t,i}^{Gmil}\right)=0 \tag{B22}$$

$$\psi_{t,m}^{dis,min}P_{t,m}^{dis}=0 \tag{B23}$$

$$\psi_{t,m}^{dis,max}\left(P_{m,\max}^{dis}-P_{t,m}^{dis}\right)=0 \tag{B24}$$

$$\psi_{t,m}^{ch,min}P_{t,m}^{ch}=0 \tag{B25}$$

$$\psi_{t,m}^{ch,max}\left(P_{m,\max}^{ch}-P_{t,m}^{ch}\right)=0 \tag{B26}$$

$$\mu_{t,m}^{dis,max}\left(P_{m,\max}^{dis}-P_{t,m}^{Ecap}-P_{t,m}^{dis}\right)=0 \tag{B27}$$

$$\mu_{t,m}^{ch,max}\left(P_{m,\max}^{ch}-P_{t,m}^{Ecap}-P_{t,m}^{ch}\right)=0 \tag{B28}$$

$$\omega_{t,m}^{cap,min}P_{t,m}^{Ecap}=0 \tag{B29}$$

$$\omega_{t,m}^{cap,max}\left(P_{m,\max}^{Ecap}-P_{t,m}^{Ecap}\right)=0 \tag{B30}$$

$$\omega_{t,m}^{mil,min}P_{t,m}^{Emil}=0 \tag{B31}$$

$$\omega_{t,m}^{mil,max}\left(P_{m,\max}^{Emil}-P_{t,m}^{Emil}\right)=0 \tag{B32}$$

$$\varphi_{t,m}^{mc,min}P_{t,m}^{Emil}=0 \tag{B33}$$

$$\varphi_{t,m}^{mc,max}\left(\gamma_{t,m}^{mc}P_{t,m}^{Ecap}-P_{t,m}^{Emil}\right)=0 \tag{B34}$$

对于目标函数中对偶变量与决策变量相乘所产生的非线性项，基于强对偶理论和 KKT 条件，可将目标函数转化为对偶问题进行求解。

根据强对偶定理将目标函数重新表示为式(B35)。

$$\begin{aligned}&\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{G}}}\left(e_{t,i}^{\mathrm{G}}P_{t,i}^{\mathrm{G}}+e_{t,i}^{\mathrm{Gcap}}P_{t,i}^{\mathrm{Gcap}}+e_{t,i}^{\mathrm{Gmil}}P_{t,i}^{\mathrm{Gmil}}\right)+\\&\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{N_{\mathrm{ESS}}}\left(e_{t,m}^{\mathrm{dis}}P_{t,m}^{\mathrm{dis}}-e_{t,m}^{\mathrm{ch}}P_{t,m}^{\mathrm{ch}}+e_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}P_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}+e_{t,m}^{\mathrm{Emil}}P_{t,m}^{\mathrm{Emil}}\right)=\\&\sum_{t=1}^{T}\sum_{m=1}^{N_{\mathrm{ESS}}}\left(\psi_{t,m}^{\mathrm{dis,max}}P_{t,m}^{\mathrm{dis}}+\psi_{t,m}^{\mathrm{ch,max}}P_{t,m}^{\mathrm{ch}}+\omega_{t,m}^{\mathrm{cap,max}}P_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}+\omega_{t,m}^{\mathrm{mil,max}}P_{t,m}^{\mathrm{Emil}}\right)+\\&\lambda_{t}^{\mathrm{cap}}P_{t}^{\mathrm{Dcap}}+\lambda_{t}^{\mathrm{mil}}P_{t}^{\mathrm{Dmil}}+\sum_{d\in\Phi_L(j)}\lambda_{t,j}P_{t,d}^{\mathrm{L}}+\sum_{l=1}^{N_l}\left(P_{l,\max}\left(\pi_{t,l}^{\min}+\pi_{t,l}^{\max}\right)\right)+\\&\sum_{t=1}^{T}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{G}}}\left(\beta_{t,i}^{\max}P_{t,i}^{\mathrm{G}}-\beta_{t,i}^{\min}P_{t,i}^{\mathrm{G}}+\alpha_{t,i}^{\mathrm{cap,max}}P_{t,i}^{\mathrm{Gcap}}+\alpha_{t,i}^{\mathrm{mil,max}}P_{t,i}^{\mathrm{Gmil}}\right)\end{aligned}\tag{B35}$$

根据式(B23)—(B34)可得，如式(B36)、(B37)、(B38)、(B39)所示。

$$\psi_{t,m}^{\mathrm{dis,max}}P_{m,\max}^{\mathrm{dis}}=\psi_{t,m}^{\mathrm{dis,max}}P_{t,m}^{\mathrm{dis}}\tag{B36}$$

$$\psi_{t,m}^{\mathrm{ch,max}}P_{m,\max}^{\mathrm{ch}}=\psi_{t,m}^{\mathrm{ch,max}}P_{t,m}^{\mathrm{ch}}\tag{B37}$$

$$\omega_{t,m}^{\mathrm{cap,max}}P_{m,\max}^{\mathrm{Ecap}}=\omega_{t,m}^{\mathrm{cap,max}}P_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}\tag{B38}$$

$$\omega_{t,m}^{\mathrm{mil,max}}P_{m,\max}^{\mathrm{Emil}}=\omega_{t,m}^{\mathrm{mil,max}}P_{t,m}^{\mathrm{Emil}}\tag{B39}$$

同时，根据式(B8)—(B11)可得，如式(B40)—(B43)所示：

$$\lambda_{t,j}P_{t,m}^{\mathrm{dis}}=\left(e_{t,m}^{\mathrm{dis}}-\psi_{t,m}^{\mathrm{dis,min}}+\psi_{t,m}^{\mathrm{dis,max}}+\mu_{t,m}^{\mathrm{dis,max}}\right)P_{t,m}^{\mathrm{dis}}\tag{B40}$$

$$\lambda_{t,j}P_{t,m}^{\mathrm{ch}}=\left(e_{t,m}^{\mathrm{ch}}+\psi_{t,m}^{\mathrm{ch,min}}-\psi_{t,m}^{\mathrm{ch,max}}-\mu_{t,m}^{\mathrm{ch,max}}\right)P_{t,m}^{\mathrm{ch}}\tag{B41}$$

$$\begin{aligned}\lambda_{t}^{\mathrm{cap}}P_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}=&\left(e_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}+\mu_{t,m}^{\mathrm{dis,max}}+\mu_{t,m}^{\mathrm{ch,max}}-\omega_{t,m}^{\mathrm{cap,min}}+\right.\\&\left.\omega_{t,m}^{\mathrm{cap,max}}-\varphi_{t,m}^{\mathrm{mc,max}}\gamma_{t,m}^{\mathrm{mc}}\right)P_{t,m}^{\mathrm{Ecap}}\end{aligned}\tag{B42}$$

$$\begin{aligned}\lambda_{t}^{\mathrm{mil}}P_{t,m}^{\mathrm{Emil}}=&\left(e_{t,m}^{\mathrm{Emil}}+\omega_{t,m}^{\mathrm{mil,min}}+\omega_{t,m}^{\mathrm{mil,max}}-\right.\\&\left.\varphi_{t,m}^{\mathrm{mc,min}}+\varphi_{t,m}^{\mathrm{mc,max}}\right)P_{t,m}^{\mathrm{Emil}}\end{aligned}\tag{B43}$$

根据 KKT 条件，化简式(B40)—(B43)，并将其代入式(B35)化简，得到化简后的单层模型目标函数如式(17)所示。