

电能量与备用联合优化的电力市场课程实验设计

吴巨爱^{1,2*}, 张海洋¹, 杜鹏¹

¹南京邮电大学 江苏南京

²南京新港产业创新研究院有限公司 江苏南京

【摘要】理论与实践的融合是掌握知识的有效手段,其中理论与实践的融合步骤更是高效学习的关键。本文以分布式资源参与电能量市场与备用市场联合优化的仿真实验为目标案例,提出“微实验入门→强基础赋能→高难度进阶”的知识学习流程,构建了从基础到复杂的渐进式学习框架。该框架强调“做中学”,首先在“微实验入门”阶段,通过封装好的微型代码案例,让学生理解并掌握优化求解的基本要素;进而在“强基础赋能”阶段,介绍线性规划、电能量市场与备用市场联合出清原理等基础理论,结合具体问题提高建模与分析能力;最后在“高难度进阶”阶段,引入电动汽车等分布式灵活资源参与电力市场交易,引导学生构建含复杂时空约束的电动汽车耦合优化模型。本文所提实验设计方法为电力市场课程教学提供了可操作、可复制的案例,对学习方法与人才培养具有重要参考价值。

【关键词】电力市场;教学设计;联合优化;电动汽车;教学仿真

【基金项目】江苏省自然科学基金资助项目(BK20230369)

【收稿日期】2026 年 5 月 15 日

【出刊日期】2026 年 6 月 20 日

【DOI】10.12208/j.jeea.20260010

Experiment design for electricity market course on joint optimization of electric energy and reserve

Ju'ai Wu^{1,2*}, Haiyang Zhang¹, Peng Du¹

¹Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu

²Nanjing Xingang Industrial Innovation Research Institute Co., Ltd., Nanjing, Jiangsu

【Abstract】The integration of theory and practice is an effective means of mastering knowledge, and the steps involved in this integration are crucial to efficient learning. This paper proposes a knowledge learning process structured as “micro-experiments for beginners → foundational skills for improvement → advanced challenges for progression,” establishes a progressive learning framework that escalates from foundational to complex concepts, and finally presents a simulation experiment on the joint optimization of distributed resources participating in electricity energy and reserve markets as a case study. This framework emphasizes “learning by doing.” First, in the “micro-experiments for beginners” phase, students gain an understanding of and mastery over the fundamental elements of optimization through encapsulated micro-code examples. Subsequently, in the “foundational skills for improvement” phase, foundational theories such as linear programming and the joint clearing mechanism of electricity energy markets and reserve markets are introduced. Through application to specific problems, students enhance their modeling and analytical skills. Finally, in the “advanced challenges for progression” phase, distributed flexible resources like electric vehicles are introduced into market transactions. Guide students in developing coupled optimization models for electric vehicles that incorporate complex spatiotemporal constraints. The experiment design methodology proposed in this paper offers a practical and replicable case study for teaching electricity market courses, providing significant reference value for learning approaches and talent training.

【Keywords】Electricity market; Instructional design; Joint optimization; Electric vehicle; Simulation instructional

引言

在电力市场化改革深入推进的背景下,电能量与

备用交易构成了电力市场的关键交易品种,二者相辅相成、缺一不可^[1]。电能量市场作为电力市场交易的核

*通讯作者: 吴巨爱(1989-)男,博士,副教授,研究方向为电力市场、电动汽车。

心品种, 聚焦于电能的有效供应, 通过市场化定价机制引导发电企业按需出力, 满足用户连续、稳定的电能使用需求, 是实现电力资源优化配置的基础平台。备用市场交易则针对电力供需的随机性、波动性风险, 通过组织旋转备用、冷备用等灵活调节资源, 确保系统在负荷突变、机组故障、新能源出力不确定等突发场景下仍能维持功率平衡, 是保障电力系统安全稳定运行的关键支撑^[2]。

由于新能源发电的大量接入, 电力系统对备用的需求激增, 分布式资源参与电力市场交易是大势所趋^[3], 新型电力系统构建背景下电力市场教学设计中应增加分布式资源参与市场交易的部分。电动汽车作为典型的分布式资源^[4], 为此, 本文设计了电动汽车同时参与电能量市场与备用市场联合优化的电力市场课程实验。

1 实验设计思路

1.1 从微实践到迭代创新的实验设计理念

如图 1 所示, 实验设计过程中需以“微实践启蒙→理论深耕→进阶提升”为核心逻辑。微实践聚焦简单微小的实验案例, 让学生在低成本、快反馈的操作中快速熟悉新领域核心内容, 同时在动手获得感中增强学习新知识的信心与主动性。完成微实验后, 引导学生结合实验中遇到的流程卡点、现象困惑等实际问题, 搭配自身思考深化相关基础知识学习, 实现“问题导向式”理论吸收。在此基础上逐步提高实验复杂程度, 让学生在理论支撑下突破简单操作局限, 既巩固知识应用能力, 又培养探究创新思维, 最终构建“微实验入门→强基础赋能→高难度进阶”的阶梯式实验教育模式, 让学生在实践与理论的螺旋上升中持续成长。

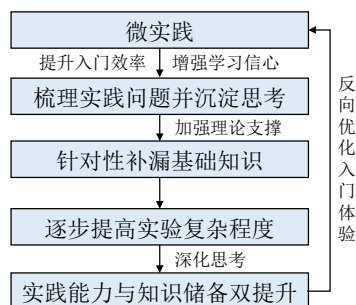


图 1 基于微实践的知识获取路径

1.2 电能量市场与备用市场的优化思路

当发电资源同时参与电能量市场与备用市场时, 存在三种优化思路: 单独排序优化、顺序优化与联合优化。

单独排序优化将电能量市场与备用市场视为相互独立的决策场景, 分别基于两类市场的价格信号或需

求曲线, 对发电资源进行排序与容量分配。例如, 在电能量市场中按边际成本由低到高排序确定中标机组及出力, 在备用市场中按备用报价由低到高排序确定备用容量提供者, 两类市场的决策过程无信息交互。该思路的优势在于计算复杂度低, 无需构建多市场耦合模型, 可快速生成出清结果。但其致命缺陷是忽视了发电资源的物理约束整体性, 即机组的总出力(电能量市场中标容量+备用市场中标容量)需严格不超过其最大技术出力, 而单独排序优化未纳入该约束, 可能导致“机组在两类市场中合计中标容量超出最大容量”的无效解^[5]。

顺序优化针对单独排序优化的约束违反问题进行改进, 设定两类市场的优化优先级, 先完成高优先级市场的出清, 再将高优先级市场占用的机组容量作为约束条件, 开展低优先级市场的优化。目前主流的优先级设定为“电能量市场优先于备用市场”, 即先通过电能量市场出清确定机组的基荷出力, 再计算机组的剩余可用容量(最大容量-基荷出力), 最后在备用市场中基于剩余可用容量进行排序与出清^[6]。该思路的关键优势是严格满足机组容量约束, 通过“先占用、后剩余”的逻辑确保机组总出力不超限, 保障了出清结果的可行性。但其局限性在于难以实现整体成本最优: 由于高优先级市场的决策未考虑低优先级市场的成本信息, 可能导致“高优先级市场占用低成本机组大量容量, 使得低优先级市场只能选择高成本机组”的情况, 最终推高两类市场的合计出清成本。

联合优化是当前公认的理论最优思路, 其核心逻辑是: 构建电能量市场与备用市场的耦合优化模型, 将两类市场的需求、机组容量约束和成本函数等要素纳入统一目标函数^[7], 通过多变量协同求解实现“两类市场合计出清成本最低”的目标。具体而言, 模型的决策变量包括“机组在电能量市场的中标容量”和“机组在备用市场的中标容量”, 约束条件涵盖“机组总容量不超限”“电能量市场供需平衡”和“备用市场容量满足系统需求”等, 目标函数为两类市场的总成本(电能量采购成本+备用采购成本)最小化^[8]。联合优化的优势主要体现在两方面: 一是约束满足性强, 通过统一建模直接纳入机组容量等核心约束, 从根本上避免无效解^[9]; 二是经济性最优, 通过多市场协同决策, 可在两类市场间灵活分配机组容量, 实现整体成本最小化。但其面临的核心挑战是模型复杂度高, 需处理两类市场的耦合约束、多目标平衡及海量数据(多机组、多时段的成本与容量参数等), 对算法的求解效率与稳定性要

求较高, 其工程化应用仍需突破计算效率瓶颈^[10]。

2 实验流程设计

2.1 仿真实验工具

仿真实验采用的软件工具为 MATLAB。在插件方面, MATLAB 本身自带 Optimization Toolbox (优化工具箱), 但针对复杂优化问题, 如整数规划、大规模线性规划、非凸优化等, 则需配合第三方建模语言或求解器, 常用的包括 YALMIP (面向 MATLAB 的优化建模工具箱, 支持多种数学规划问题求解) 和 lp_solve (Linear Programming solver, 一个开源的线性规划求解器) 等。

2.2 基于 MATLAB 优化的参考案例

参考案例为求目标函数式 (1) 的最小值, 其中约束条件如式 (2) 所示。

$$f(x_1, x_2, x_3) = 12x_1 + 30x_2 + 25x_3 \quad (1)$$

$$s.t. \begin{cases} x_1 - 2x_2 - x_3 \geq -19 \\ 3x_1 - x_2 + 2x_3 \leq 24 \\ x_1 + x_2 + x_3 = 15 \\ x_1 \geq 0, x_2 \geq 0, x_3 \geq 0 \end{cases} \quad (2)$$

在优化求解前, 首先需了解优化问题在 MATLAB 中的标准结构, 即:

$$[x, fval] = \text{linprog}(f, A, b, Aeq, beq, lb, ub) \quad (3)$$

其中, x 为决策变量; $fval$ 为目标函数的值; f 为目标函数; A 、 b 为不等式约束, 即 $Ax \leq b$; Aeq 、 beq 为等式约束; lb 、 ub 为 x 的取值范围, 即 $lb \leq x \leq ub$ 。

因此, 式 (1) - (2) 的求解代码如图 2 所示, 求解结果为 $x=[9.75, 5.25, 0]$, $fval=274.5$ 。

```

1 clear
2 f = [12, 30, 25];
3 A = [-1 2 1; 3 -1 2];
4 b = [19; 24];
5 Aeq = [1, 1, 1];
6 beq = 15;
7 lb = [0; 0; 0];
8 ub = [];
9 [x, fval] = linprog(f, A, b, Aeq, beq, lb, ub)
```

图 2 求解代码

2.3 传统发电机组的电能量与备用联合出清案例

2.3.1 优化建模

设电力系统中有 N 台发电机组, 第 i 台机组的成本特性为 $C_i(P_i) = b_i P_i$, C_i 为机组发电成本, b_i 为机组的边际成本, P_i 为机组出力; 系统的用电需求为 D , 备用需求为 R ; 机组 i 输出功率的上、下限为 $P_i^{\max}$ 和

$P_i^{\min}$, 机组 i 提供备用的上、下限为 $R_i^{\max}$ 和 $R_i^{\min}$ 。针对单时段的电能和备用联合交易, 可建立如下的线性规划模型。

(1) 目标函数

$$\min \sum_{i \in N} C_i(P_i) \quad (4)$$

(2) 约束条件

1) 功率平衡约束

$$\sum_{i \in N} P_i = D \quad (5)$$

2) 系统备用需求约束

$$\sum_{i \in N} R_i \geq R \quad (6)$$

3) 机组出力上、下限约束

$$P_i \geq P_i^{\min}, P_i + R_i \leq P_i^{\max} \quad i \in N \quad (7)$$

4) 备用可用容量约束

$$R_i^{\min} \leq R_i \leq R_i^{\max} \quad i \in N \quad (8)$$

通过求解上述优化模型, 可以在电力市场环境下进行发电机组提供电能和备用的联合优化, 使系统运行成本最小化。

2.3.2 案例分析

系统中有 3 台发电机组, 机组的特性参数见表 1, 忽略所有机组的最小技术输出功率限制, 即 $P_i^{\min}=0$; 各机组提供备用的响应能力不同, 机组 1 不允许提供备用, 机组 2 和机组 3 可以提供备用, 但有最大容量限制。系统的备用需求为 200MW, 当市场的负荷需求分别为 300MW 和 600MW 时, 考察周期 $\Delta t=1$ 小时, 求解系统最优的出力与备用配置。

表 1 机组的特性参数

机组	$b_i / (\text{元}/\text{MW} \cdot \text{h})$	$P_i^{\max} / \text{MW}$	$R_i^{\max} / \text{MW}$
1	200	300	0
2	250	250	120
3	300	350	150

优化求解过程如下所示。

设 3 个机组的输出功率分别为 P_1 、 P_2 和 P_3 , 提供的备用容量分别为 R_1 、 R_2 和 R_3 。

(1) 给出目标函数

$$\min 200P_1 + 250P_2 + 300P_3 \quad (9)$$

(2) 列出约束条件

$$P_1 + P_2 + P_3 = D \quad (10)$$

$$R_1 + R_2 + R_3 \geq 200\text{MW} \quad (11)$$

$$\begin{cases} P_1 + R_1 \leq 300\text{MW} \\ P_2 + R_2 \leq 250\text{MW} \\ P_3 + R_3 \leq 350\text{MW} \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} R_1 = 0 \\ R_2 \leq 120\text{MW} \\ R_3 \leq 150\text{MW} \end{cases} \quad (13)$$

(3) 求解分析

采用任一种线性规划算法可求得结果,如表2所示。从理论上讲,在确定备用配置时,应优先让边际成本较高的机组承担备用,以尽量释放低成本机组的发电能力。根据机组的边际成本排序可知:机组1最便宜,其次为机组2,机组3成本最高。因此在分配系统200MW的备用需求时,首先由机组3提供其可用备用容量150MW,剩余50MW由机组2承担,而机组1不提供备用。这样可以使机组1与机组2尽量用于承担负荷,满足整体的最低成本目标。在给定备用配置后,机组1、2、3可用于发电的最大能力分别为300、200、200MW,即系统的最大发电能力为700MW,因此两种负荷水平(300MW和600MW)均可满足。在此基础上,发电按照机组边际成本由低到高依次分配。当系统负荷为300MW时,仅需机组1全额出力即可满足供电需求。负荷提升至600MW时,机组1先满发300MW,随后机组2出力到200MW,剩余100MW由机组3承担。结果满足所有功率与备用约束,并使系统运行成本最小。

表2 不同负荷需求下的优化调度结果

D/MW	P ₁ /MW	R ₁ /MW	P ₂ /MW	R ₂ /MW	P ₃ /MW	R ₃ /MW	成本/元
300	300	0	0	50	0	150	60,000
600	300	0	200	50	100	150	140,000

2.4 电动汽车电能量与备用联合优化仿真实验

2.4.1 目标函数

构建以电动汽车收益最大化为目标的优化模型,如式(14)所示。

$$\max G = \pi_{cu} + \pi_{cd} - b_{grid} \quad (14)$$

其中, G 为电动汽车的总收益; π_{cu} 、 π_{cd} 分别为上备用容量收益、下备用容量收益; b_{grid} 为电动汽车参与发电市场的电量费支出。

对时间轴离散化,将一个调度周期 T 分割为 n 个长度为 Δt 的时段,冻结 Δt 内电动汽车功率的时变性,

则式(14)可分解为如下的式(15)。

$$\begin{aligned} \max G &= \sum_{k=1}^{T/\Delta t} v(k) (\pi_{cu}(k) + \pi_{cd}(k) - b_{grid}(k)) \\ &= \sum_{k=1}^{T/\Delta t} v(k) (P_{cu}(k) \lambda_{cu}(k) \\ &\quad + P_{cd}(k) \lambda_{cd}(k) - P(k) \lambda_e(k)) \Delta t \end{aligned} \quad (15)$$

其中, k 为第 k 个时段; $v(k)$ 表示第 k 个时段电动汽车是否接入电网的(0,1)整数变量, $v(k)=1$ 表示在线, $v(k)=0$ 表示离线; P_{cu} 、 P_{cd} 分别为上、下备用容量, λ_{cu} 、 λ_{cd} 分别为上、下备用容量价格; λ_e 为电量价格; P 为电动汽车的充/放电功率。

2.4.2 约束条件

(1) 充/放电功率约束

$$-P_{G,max} \leq P(k) \leq P_{L,max} \quad (16)$$

其中, $P_{L,max}$ 、 $P_{G,max}$ 分别为电动汽车的最大充电功率和最大放电功率。

(2) 电池容量约束

$$0 \leq E(k) \leq E_{max} \quad (17)$$

$$E(k) = E_{start} + \sum_{j=k_{start}}^k P(j) \Delta t \quad (18)$$

其中, $E(k)$ 为第 k 个时段起始点电动汽车的实时电量, $E(k)$ 关于 $P(j)$ 的时变函数如式(18)所示; E_{max} 为电动汽车的电池容量; E_{start} 为电动汽车的起始电量; k_{start} 为电动汽车入网的时刻。

(3) 充电需求约束

$$E(k) \geq E_{min}(k), \quad k_{start} < k \leq k_{end} \quad (19)$$

$$E_{min}(k) = \begin{cases} 0, & k_{start} \leq k < \left[k_{end} - (E_{exp}/P_{L,max}) \right] \\ E_{exp} - P_{L,max} \Delta t (k_{end} - k), & \left[k_{end} - (E_{exp}/P_{L,max}) \right] \leq k \leq k_{end} \end{cases} \quad (20)$$

其中, E_{min} 为电动汽车的最低电量约束; k_{end} 为离网时刻; E_{exp} 为电动汽车离网时的期望电量。

(4) 上、下备用容量约束

$$0 \leq P_{cu}(k) \leq P_{cu,max}(k) \quad (21)$$

$$0 \leq P_{cd}(k) \leq P_{cd,max}(k) \quad (22)$$

其中, $P_{cu,max}(k)$ 和 $P_{cd,max}(k)$ 分别为第 k 个时段电动汽车上备用容量和下备用容量的最大值,表达式如式(23)-(24)所示。

$$P_{cu,max}(k) = \begin{cases} v(k)(P_{G,max} + P(k)), & P_{G,max} + P(k) \leq \frac{E(k) - E_{min}(k+1)}{\Delta t} + P(k) \\ v(k) \left(\frac{E(k) - E_{min}(k+1)}{\Delta t} + P(k) \right), & P_{G,max} + P(k) > \frac{E(k) - E_{min}(k+1)}{\Delta t} + P(k) > 0 \\ 0, & \frac{E(k) - E_{min}(k+1)}{\Delta t} + P(k) \leq 0 \end{cases} \quad (23)$$

$$P_{cd,max}(k) = \begin{cases} v(k)(P_{L,max} - P(k)), & P_{L,max} - P(k) \leq \frac{E_{max} - E(k)}{\Delta t} - P(k) \\ v(k) \left(\frac{E_{max} - E(k)}{\Delta t} - P(k) \right), & P_{L,max} - P(k) > \frac{E_{max} - E(k)}{\Delta t} - P(k) > 0 \\ 0, & \frac{E_{max} - E(k)}{\Delta t} - P(k) \leq 0 \end{cases} \quad (24)$$

其中, $P_{G,max} + P(k)$ 为功率边界的影响; $E(k) - E_{min}(k+1)$ 为第 k 个时段内的最大可放电量, $(E(k) - E_{min}(k+1)) / \Delta t + P(k)$ 则为考虑当前工况下电动汽

车的可放电量潜力, 反映出电量边界的影响; $E_{min}(k)$ 为第 k 个时段起始点电池的最低电量约束。

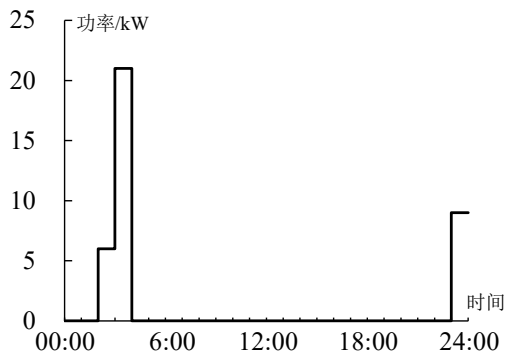
2.4.3 参数设置与仿真分析

仿真算例设置如下: 考察周期为 00:00~24:00, 电动汽车接入电网的时段为 21:00-次日 9:00; 电池容量 $E_{max}=60\text{kW}\cdot\text{h}$, 起始电池电量 $E_{start}=20\%E_{max}$, 期望电量 $E_{exp}=80\%E_{max}$; 最大充电功率 $P_{L,max}=21\text{kW}$, 最大放电功率 $P_{G,max}=21\text{kW}$; 时间尺度 $\Delta t=1$ 小时; 参考实际现货市场价格, 电量价格 λ_e 设置如表 3 所示, 上、下备用容量价格 $\lambda_{cu} = \lambda_{cd} = 10\% \lambda_e$ 。

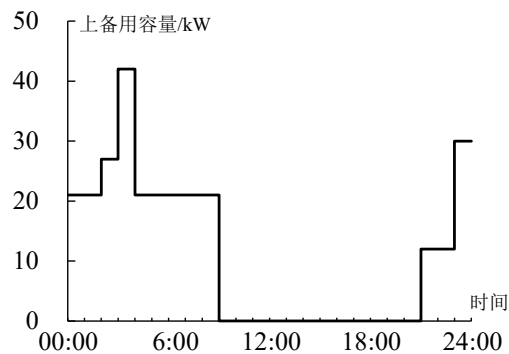
由前述优化模型可知, 电动汽车的充电功率与上、下备用容量受电能价格和备用容量价格联合影响, 电动汽车通过权衡备用服务收益与购电成本, 实现总收益最大化。具体而言, 当现货电价较低时, 电动汽车倾向于增加充电功率以降低购电成本; 当现货电价较高时, 电动汽车则倾向于减少充电功率, 同时提供备用并获得容量收益。图 3 展示了上述参数设置下电动汽车最优充电功率曲线与上、下备用容量曲线, 其结果与上述分析一致。

表 3 各时段的电量价格

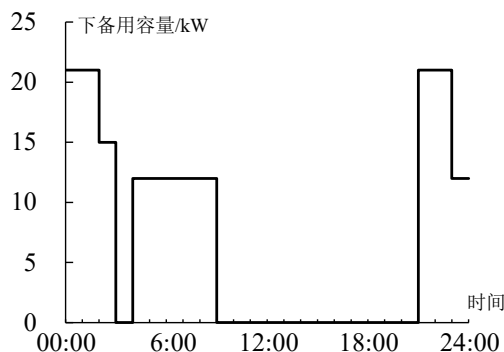
时间	00:00-1:00	1:00-2:00	2:00-3:00	3:00-4:00	4:00-5:00	5:00-6:00
λ_e (元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$)	0.569	0.360	0.299	0.283	0.388	0.473
时间	6:00-7:00	7:00-8:00	8:00-9:00	9:00-10:00	10:00-11:00	11:00-12:00
λ_e (元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$)	0.519	0.725	0.559	0.309	0.505	0.804
时间	12:00-13:00	13:00-14:00	14:00-15:00	15:00-16:00	16:00-17:00	17:00-18:00
λ_e (元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$)	0.627	0.901	0.835	0.876	0.745	0.926
时间	18:00-19:00	19:00-20:00	20:00-21:00	21:00-22:00	22:00-23:00	23:00-24:00
λ_e (元/ $\text{kW}\cdot\text{h}$)	1.074	0.774	0.541	0.601	0.471	0.358



(a) 充电功率曲线



(b) 上备用容量曲线



(c) 下备用容量曲线

图3 电动汽车充电功率与上、下备用容量仿真结果

3 结论

本文提出了一种从基础到复杂、实践与理论交互反哺的渐进式学习框架。针对电能量与备用联合优化的电力市场课程实验设计问题,建立了“微小问题分解→迭代增强→复杂系统”的三阶段能力培养路径。第一阶段,通过学习基础优化案例,培养学生解决简单优化问题的能力;第二阶段,以传统发电机组为对象,构建电能量与备用联合出清案例,进一步明确需要解决的问题;第三阶段,将研究对象拓展至电动汽车参与市场的场景,提升学生处理复杂问题的能力。

本实验设计不仅适用于参与电力市场的优化问题,更具备学习新内容和新知识点的普适性,对复合型人才培养具有重要的积极意义。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 周挺, 谭玉东, 孙晋, 等. 虚拟电厂参与能量与辅助服务市场的协同优化策略[J]. 中国电力, 2024, 57(01): 61-70.
- [3] 李政, 李伟起, 张忠伟, 等. “双碳”目标下我国电力系统灵活性资源发展策略研究[J]. 中国工程科学, 2024, 26(04): 108-120.
- [4] 吴巨爱, 薛禹胜, 谢东亮, 等. 电动汽车参与电量市场与备用市场的联合风险调度[J]. 电工技术学报, 2023,

38(23): 6407-6418.

- [5] Anthony P, Jacques C, Gilles B, et al. Implementation of scarcity pricing without co-optimization in European energy-only balancing markets[J]. Utilities Policy, 2023, 81.
- [6] Jiang Z, Xiao Y, Xu T, et al. Two - stage stochastic energy and reserve market clearing model considering real - time offering strategy of renewable energy[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2024, 18(22): 3713-3731.
- [7] 詹博淳, 冯昌森, 卢治霖, 等. 基于信息间隙决策的分布式产消者电-备用市场投标策略[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(09): 162-169.
- [8] 任景, 周鑫, 程松, 等. 源荷双边参与的高比例新能源电力系统能量与备用市场联合出清方法[J]. 电力建设, 2023, 44(01): 30-38.
- [9] 李舒佳, 谢敏, 李建钊, 等. 电能量—调频市场联合优化模式研究[J]. 南方能源建设, 2020, 7(03): 55-61.
- [10] Mo D, Chen M, Li Q, et al. Research on joint clearing of energy and ancillary service in the day-ahead market considering the weights of ancillary services[J]. Frontiers in Energy Research, 2025, 13.

版权声明: ©2026 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS