

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210992

计及需求侧储能事故备用风险与火电机组深度调峰的经济优化研究

魏文^{1,2}, 姜飞³, 戴双凤¹, 陈长青⁴, 陈磊³

(1. 长沙理工大学经济与管理学院, 湖南 长沙 410076; 2. 湖南理工学院经济与管理学院, 湖南 岳阳 414000;
3. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410076; 4. 湖南城市学院机械与
电气工程学院, 湖南 益阳 413000)

摘要: 针对电网调峰过程中需求侧储能(Energy Storage, ES)事故备用闲置时间过长, 以及传统火电机组深度调峰(Depth Peak Regulation, DPR)成本较高的问题, 提出了一种考虑需求侧储能事故备用风险与火电机组深度调峰的经济优化方法。首先, 通过分析天气状态、负载率水平以及故障风险类型等影响因素, 构建了考虑需求侧的 ES 风险量化模型、ES 事故备用调峰经济模型。其次, 结合火电机组进行深度调峰时对机组损伤及燃料需求分析, 构建了考虑火电机组投油成本的深度调峰经济模型。最后, 提出了一种基于需求侧风险量化的 ES 事故备用辅助火电机组 DPR 的经济优化模型, 采用粒子群优化算法在修正后的 IEEE30 节点系统中进行算例验证。结果表明 ES 事故备用参与 DPR 能有效提高电网调峰能力和 ES 事故备用利用率。

关键词: 储能; 调峰; 风险量化; 粒子群算法

Economic optimization of deep peak regulation of thermal power units taking into account the risk of emergency storage on the demand side

WEI Wen^{1,2}, JIANG Fei³, DAI Shuangfeng¹, CHEN Changqing⁴, CHEN Lei³

(1. School of Economics and Management, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;
2. School of Economics and Management, Hunan University of Science and Technology, Yueyang 414000, China;
3. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;
4. School of Mechanical and Electrical Engineering, Hunan City University, Yiyang 413000, China)

Abstract: There are problems of long idle time of demand-side energy storage accident backup and high cost of traditional thermal power units. Thus an economic optimization method considering standby risk of demand-side energy storage accident and thermal power unit deep peak shaving is proposed. First, a demand side ES risk quantification model and a standby peak adjustment economic model of ES accident are constructed by analyzing the weather state, load rate level and failure risk type. Secondly, the DPR economic model of fuel injection cost of a thermal power unit is built based on the analysis of unit damage and fuel demand during DPR. Finally, an economic optimization model of an ES accident standby auxiliary thermal power unit DPR based on demand side risk quantification is proposed. The particle swarm optimization algorithm is used to verify the calculation example in the modified IEEE 30-node system. The results show that the participation of ES accident standby in DPR can effectively improve the peak load adjustment capability and the utilization rate of ES accident standby.

This work is supported by the Youth Fund of National Natural Science Foundation of China (No. 51707014) "Research on Transient Characteristics and Fault Traverse of Voltage Source Converter Connected in Series to Power Grid".

Key words: energy storage; peak shaving; risk quantification; particle swarm optimization

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目资助(51707014)“串联接入电网的电压源型变流器暂态特性与故障穿越研究”; 湖南省社科基金基地项目资助“基于需求侧响应的绿色电力认购交易定价机制研究”(18JD02)

0 引言

传统机制中,通过按照一定负荷水平比预留调峰备用容量,来解决负荷高峰时段尖峰调峰压力以及负荷低谷时段的 DPR 问题^[1-2]。但这极大地浪费了电网资源、增加了设备闲置率^[3-4]。而且该方法通常受投资建设成本限制^[5]。尤其在风电系统中,风电出力的反调峰特性进一步加大了调峰难度^[6]。致使火电机组 DPR 成为了缓解该问题的主要手段。如文献[6]提出了一种考虑机组 DPR 时,寿命损耗经济补偿优化调度模型。文献[7]提出采用 K-means 聚类方法,对常规火电机组进行分类,分层参与调峰补偿,进而提高风电消纳。在文献[8]中,提出考虑风电随机特性的 DPR 调度策略,并构建 DPR 灵活性的多目标优化调度模型。但文献[9]指出 DPR 不仅增大火电机组磨损,而且会增加燃料运行成本。因此,如何在风电系统中平衡电网调峰能力与经济性成为电网调峰的热点问题^[10-12]。

近年来,随着大规模 ES 并网技术的不断发展,以及 ES 的快速响应能力,ES 已成为调峰的重要手段之一^[13-15]。文献[16]以缓解电网调峰为目的,利用遗传算法求解,最后得到投建成本与发电成本的最优解。文献[17]以容量最小为优化目标,并将随机变量优化问题转换成鲁棒线性优化问题求解,进而降低电网调峰压力。文献[18-19]借助调峰不足概率和费用指标来优化协调 ES 与其他调峰手段,实现电网调峰优化。在文献[20]中,提出一种 ES 与机组 DPR 的分层协调优化方案。但目前 ES 成本较高,随着新能源渗透率的不断提升,若配置特定 ES 来辅助火电机组调峰,将增大系统运行成本。因此,亟需利用新的调峰手段来缓解火电机组 DPR 问题。

近年来,随着大电网运行稳定性的不断提高,系统中配置的 ES 事故备用大多处于闲置状态,在很大程度上造成了资源的浪费。因此,针对 ES 事故备用参与电网辅助服务市场的研究得到了广泛关注。如文献[21-22]在风电系统可靠性和经济性博弈研究中引入条件风险价值理论,建立基于风险备用的优化模型。文献[23]提出一种对 AGC 备用和事故备用容量进行分时段动态分配的经济优化模型。文献[24]通过量化事故备用不足产生的风险,提出一种计及成本效益比的协调分配方法。文献[25]针对某电池生产园区综合能源系统,提出一种基于风险量化与需求侧响应的 ES 事故备用优化方法。该方法能有效提高 ES 事故备用利用率和系统调度经济性。

由上述分析可知,在承担一定风险的情况下,

ES 事故备用参与电网服务,能有效提高系统运行的经济性。但依然存在以下两个问题:(1)对系统所处区域不同状态(特别是天气状态、负载状态等)下事故风险量化考虑不足;(2)对不同天气下风电对系统调峰压力的影响考虑不足。因此,本文在不同天气下,兼顾负荷脱网风险与调峰收益,结合火电机组 DPR 特征,提出一种基于需求侧风险量化的 ES 事故备用容量辅助火电机组 DPR 的经济优化方法。该方法可在承担较小风险和不增设调峰设备的情况下,实现 ES 事故备用容量的最大利用化和缓解系统调峰压力,是一种持续发展的经济调峰方案。

1 基于风险量化的需求侧 ES 事故备用调峰经济模型

需求侧 ES 事故备用辅助火电机组调峰后,一方面产生调峰效益,提高新能源消纳。另一方面因其对容量的占用,在电网发生故障时,因备用不足而产生风险成本。

1.1 调峰风险成本模型

利用 ES 事故备用辅助火电机组调峰需承担一定风险。IEEE 标准 100-1992 将风险定义为非期望事件发生的概率和后果的乘积,如式(1)^[25]所示。

$$F = R \cdot V \quad (1)$$

式中: F 为事件的风险量化值; R 为事件发生的概率; V 为事故带来的损失。

V 可表示为式(2), τ 为脱网时刻,对于 $\forall \tau \in N$,有

$$V = \sum_{t=\tau}^{\tau+\Delta t^{\text{off}}} V_{t-\tau}^P (P_t^{\text{in}} - P_t^{\text{out}}) \Delta t^{\text{off}} \quad (2)$$

式中: Δt^{off} 为脱网时长; $V_{t-\tau}^P$ 为脱网后 t 时刻产生的损失单价; P_t^{in} 为脱网后 t 时刻需求功率; P_t^{out} 为脱网后 t 时刻输出功率。

同时,当 ES 参与调峰后,会增加运行成本。

$$C_t = P_{\text{price,M}} (P_{C,t} + P_{D,t}) \Delta t \quad (3)$$

式中: $P_{\text{price,M}}$ 为 ES 运行单价; $P_{C,t}$ 、 $P_{D,t}$ 分别为 ES 在 t 时刻的充放电功率; Δt 为计算时间步长。

综上,可得 ES 调峰成本为

$$C = F + C_t \quad (4)$$

而电网故障风险概率 R 不仅受负荷水平影响,而且受天气影响。因此,提出一种计及天气状态、负载率水平和故障后恢复时长的风险概率模型。

1) 负载率水平。根据工作时段将一天划分为 T_1 (23:00—07:00)、 T_3 (07:00—08:00/11:00—18:00)、 T_2 (08:00—11:00/18:00—23:00)3个时段,分别对

应低、中、高三种负载率水平。

2) 天气类型。根据天气类型对电网造成影响的严重程度, 将其划分为晴天(A)、阴雨天气(B)、灾害天气(C)三种。

3) 脱网类型。根据故障恢复时长, 可将非计划脱网故障分为三种类型: (a) 通过隔离开关直接切成故障(平均 15 min); (b) 通过隔离开关直接切成故障后, 再切换至备用回路(平均 45 min); (c) 元件故障类型(大于 2 h)。

根据风险因素划分, 可得风险概率计算公式如式(5)所示。

$$R_{s,w,i} = \frac{m_{s,w,i}}{M_{s,w}} \quad s \in \{1,2,3\}, w \in \{1,2,3\}, i \in \{1,2,3\} \quad (5)$$

式中: s 、 w 、 i 分别表示负荷时段、天气类型、故障类型; $R_{s,w,i}$ 为 T_s 时段 w 类型天气发生 i 类型脱网的概率; $m_{s,w,i}$ 为 T_s 时段 w 类型天气发生 i 类型脱网的段数; $M_{s,w}$ 为 T_s 时段 w 类型天气的总段数。

1.2 调峰经济效益模型

经济效益主要包括直接收益和间接收益。

1) 削峰填谷直接收益

$$B_1 = (\eta_D P_{D,t} - P_{C,t}) \Delta t P_{\text{price}} \quad (6)$$

式中: η_D 为 ES 系统放电效率; P_{price} 为电网实时峰谷电价差。

2) 调峰补偿直接收益

根据国家能源局 2016 年发布的《关于推动电储能参与“三北”地区调峰辅助服务工作的通知》的规定: 建设在发电端的 ES 设施, ES 与机组联合参与调峰或作为独立主体参与调峰辅助服务市场交易, 放电电量按照发电厂相关合同电价结算^[20]。其补偿收益按式(7)计算。

$$B_2 = e \sum_{i=1}^N E_i \quad (7)$$

式中: B_2 为全年调峰补偿收益; E_i 为第 i 天的调峰电量; e 为合同电价; N 为一年内调峰天数^[26]。

3) 等效减少火电机组排污成本间接收益

$$B_3 = \sum_{k=1}^K \eta_D P_{D,t} \alpha_k \Delta t P_{\text{price},k} \quad (8)$$

式中: K 为污染物总数; α_k 为第 k 种污染物排放密度; $P_{\text{price},k}$ 为第 k 种污染物的单位排放费用^[26]。

4) 等效减少火电机组燃料成本间接收益

ES 辅助火电机组调峰, 可减少火电机组调峰功率, 进而降低燃料成本, 其等效计算公式为

$$B_4 = \sum_{i=1}^N E_i P_{\text{fuel}} C_{\text{fuel}} \quad (9)$$

式中: P_{fuel} 为单位发电燃料量; C_{fuel} 为燃料单价。

2 火电机组 DPR 经济模型

2.1 火电机组调峰过程分析

火电机组调峰过程通常分为常规调峰、不投油 DPR 和投油 DPR, 如图 1 所示^[27]。图中 P_N 为机组额定功率, P_{max} 为常规调峰最大技术出力, P_{min} 为常规调峰最小技术出力, 一般为 50% P_N , 为无偿调峰, P_a 为机组不投油 DPR 最低稳燃出力, 一般为 40% P_N , 为有偿调峰, P_b 为机组投油 DPR 稳燃极限出力, 一般为 30% P_N , 该阶段因负荷太低, 须通过投油来助燃维持机组安全运行, 为有偿调峰^[27]。

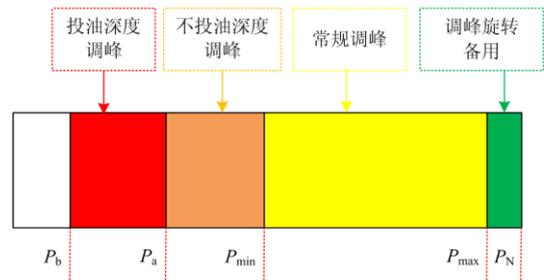


图 1 火电机组多级调峰过程

Fig. 1 Multi-stage peak regulation process for thermal power units

由图 1 可知, 机组处于不同调峰阶段, 调峰成本不同。处于常规调峰阶段, 成本(燃煤和碳排放)随着负荷的降低而降低; 处于不投油调峰阶段, 成本(燃煤、碳排放、机械磨损)随着负荷的降低而增加; 进入投油调峰阶段后, 机组炉膛出口烟温逐步降低, 脱销反应器入口烟温难以保证, 成本(燃煤、碳排放、机械磨损、投油)出现陡增现象, 如图 2^[27]所示。因此, 应针对不同机组运行性能, 以系统经济效益为优化目标, 对系统内调峰机组进行负荷优化分配。

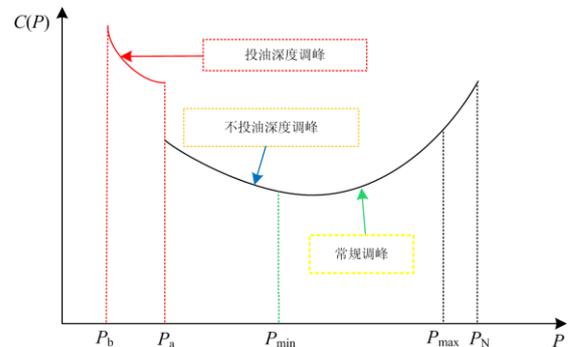


图 2 火电机组深度调峰能耗成本曲线

Fig. 2 Energy consumption cost curve of thermal power unit depth peak shaving

2.2 火电机组 DPR 经济模型

在火电机组运行过程中,影响其经济性的因素有电量收益、补偿收益以及能耗成本。

2.2.1 火电机组调峰运行成本

1) 火电机组煤耗和启停成本

$$f_2 = f_{mh} + f_{qt} = \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_G} (a_i P_{i,t}^2 + b_i P_{i,t} + c_i) + \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_G} S_{i,t} u_{i,t} (1 - u_{i(t-1)}) \quad (10)$$

式中: f_2 为常规调峰运行成本; f_{mh} 和 f_{qt} 分别为煤耗和启停成本; a_i 、 b_i 和 c_i 分别为火电机组 i 的耗量系数; $P_{i,t}$ 为输出功率。

2) DPR 损耗成本

当进行 DPR 时,运行状态将偏离最佳值,不仅降低发电效率,而且将产生损耗和投油成本^[26]。

$$f_{il} = \beta S_{i,unit} / 2N_{F,i,t} \quad (11)$$

式中: β 为运行损耗系数; $S_{i,unit}$ 为第 i 台火电机组的购机成本; $N_{F,i,t}$ 为第 i 台火电机组 t 时刻的转子致裂周次,该值与火电机组出力 $P_{G,i,t}$ 相关^[28],可表示为

$$N_{F,i,t} = 0.00577P^3 - 2.682P^2 + 484.8P - 8411 \quad (12)$$

3) DPR 机组稳燃投油成本。

在投油调峰阶段,投油助燃产生的附加投油调峰成本为^[26]

$$f_{iy} = Q_{oil,t} p_{oil} \quad (13)$$

式中: $Q_{oil,t}$ 为第 i 台机组 DPR 阶段投油量; p_{oil} 为当季油价。

综上,火电机组根据运行状态不同将运行成本分段表示为

$$f = \begin{cases} f_1, P_{i,min} < P_{i,t} < P_{i,max} \\ f_1 + \sum_{i=1}^{N_G} f_{il}, P_a < P_{i,t} \leq P_{i,min} \\ f_1 + \sum_{i=1}^{N_G} f_{il} + \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{i=1}^{N_G} f_{iy}, P_b < P_{i,t} \leq P_a \end{cases} \quad (14)$$

式中: $P_{i,min}$ 和 $P_{i,max}$ 分别为最小和最大出力; P_b 为机组投油 DPR 稳燃极限负荷值; P_a 为机组不投油 DPR 稳燃负荷值^[26]。

2.2.2 火电机组运行收益

1) 火电机组运行电量收益

$$I_{i,t}^{GZ} = (P_{G,i,t} \Delta t) P_{price,GZ} \quad (15)$$

式中, P_{price} 为火电上网电价。

2) 火电机组运行补偿收益

$$I_{i,t}^{GP} = [(\eta_{Li} P_{GR,i} - P_{G,i,t}) \Delta t] P_{price,GP} \quad (16)$$

式中: η_{Li} 为第 i 台火电机组常规调峰阶段最小负荷率; $P_{GR,i}$ 为机组额定容量; $P_{price,GP}$ 为 DPR 补偿单价^[26]。

2.3 风电经济模型

2.3.1 弃风成本

为减少系统弃风率,本文加入了弃风惩罚成本,其公式为

$$C_f = \theta (P_{wind,t} - P_{winds,t}) \Delta t \quad (17)$$

式中: θ 为弃风惩罚系数; $P_{wind,t}$ 为 t 时刻的风电功率; $P_{winds,t}$ 为 t 时刻风电上网功率^[26]。

2.3.2 风电上网收益

$$B_w = \sum_{t=1}^{N_T} p_s P_{winds,t} \quad (18)$$

式中, p_s 为风电上网电价。

3 需求侧 ES 事故备用辅助火电机组 DPR 经济优化模型

在日计划等效负荷曲线下,通过优化 ES 事故备用充放电功率,可提高负荷低谷时期火电机组调峰空间,减少负荷尖峰时段机组出力值。而实际的风电接纳量需根据火电机组的调峰能力和风电出力确定。因此,在接纳风电过程中,以 ES 事故备用风险成本、ES 和火电机组运行成本、深度调峰补偿收益以及弃风惩罚成本所组成的总调峰成本最小为目标。通过粒子群优化算法,得到各时刻的风电接纳量、ES 充放电功率和各火电机组出力值。

3.1 目标函数

根据建立的系统各项调峰成本函数和补偿收益函数,以总调峰成本最小为目标进行优化:

$$\min F_{CG} = C + f + C_f - (B_1 + B_2 + B_3 + B_4 + I_{i,t}^{GZ} + I_{i,t}^{GP} + B_w) \quad (19)$$

3.2 约束条件

在模型中,主要满足的约束为功率平衡约束、火电机组功率约束^[20]、ES 约束以及风电出力约束。

1) 功率平衡约束

$$P_{G,t} + g\eta_D P_{D,t} = P_{L,t} + k\eta_C P_{C,t} \quad (20)$$

式中: $P_{G,t}$ 为火电机组总出力; $P_{L,t}$ 为负荷功率; $P_{C,t}$ 为 ES 充电功率; $P_{D,t}$ 为 ES 放电功率; η_C 、 η_D 分别为 ES 系统充放电效率^[26]。

2) 火电机组功率约束

常规调峰机组:

$$P_{i,\min} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (21)$$

DPR 机组:

$$P_{i,b} \leq P_{i,t} \leq P_{i,\max} \quad (22)$$

机组爬坡约束:

$$-r_{i,\text{down}} \leq P_{i,t} - P_{i,(t-1)} \leq r_{i,\text{up}} \quad (23)$$

式中, $r_{i,\text{up}}$ 和 $r_{i,\text{down}}$ 分别为火电机组最大向上爬坡速率和最大向下爬坡速率^[20]。

3) ES 约束

$$SOC_t^{\text{ES}} = (1 - k_{\text{ES}})SOC_{t-1}^{\text{ES}} + \left(\frac{\eta_{\text{C}} P_{\text{C},t}}{P_{\text{ES}}} - \frac{P_{\text{D},t}}{\eta_{\text{D}} P_{\text{ES}}} \right) \Delta t \quad (24)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC_t \leq SOC_{\max} \quad (25)$$

$$0 \leq P_{\text{C},t} \leq P_{\text{ES}} \quad (26)$$

$$0 \leq P_{\text{D},t} \leq P_{\text{ES}} \quad (27)$$

$$P_{\text{C},t} P_{\text{D},t} = 0 \quad (28)$$

$$P_{\text{ES},t} = P_{\text{D},t} - P_{\text{C},t} \quad (29)$$

式中: t 为运行时段; SOC_t 为 ES 荷电值; k_{ES} 为能量自损耗率; P_{ES} 为 ES 额定容量; Δt 为调度周期; SOC_{\min} 、 SOC_{\max} 分别为储能荷电最小值和最大值; $P_{\text{ES},t}$ 为 t 时刻 ES 功率, 规定放能为正, 充能为负。

4) 风电出力约束

$$0 \leq P_{\text{wind},t} \leq P_{\text{wind},\max} \quad (30)$$

式中, $P_{\text{wind},\max}$ 为风电场 t 时刻最大出力。

3.3 模型求解

本文提出的考虑风险量化需求侧 ES 事故备用辅助火电机组参与调峰的优化模型, 基本求解思路如图 3 所示, 具体实现过程如下。

1) 风电和负荷预测值得出系统等效负荷波动曲线。

2) 利用基于天气的风险概率方法, 得出不同天气下 ES 事故备用的可用深度。

3) 利用粒子群算法, 以系统调峰成本最小为目标, 优化分配火电机组和 ES 调峰量。

粒子群求解流程如图 4 所示, 具体实现过程如下。

1) 粒子群算法参数初始化。

2) 基于天气状态, 得到等效负荷曲线和 ES 事故备用可用容量。

3) 根据目标函数式(19)及约束条件式(20)一式(30)进行迭代运算, 并判断迭代次数是否大于最大

迭代次数, 是, 则结束运算, 得出最优解; 否则, 跳至步骤 2), 继续运行。

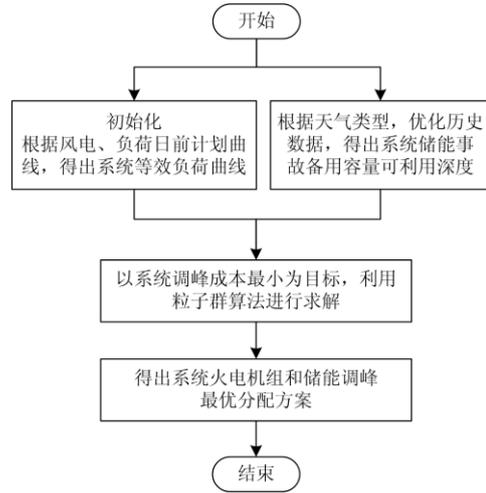


图 3 模型求解策略

Fig. 3 Model solution strategy

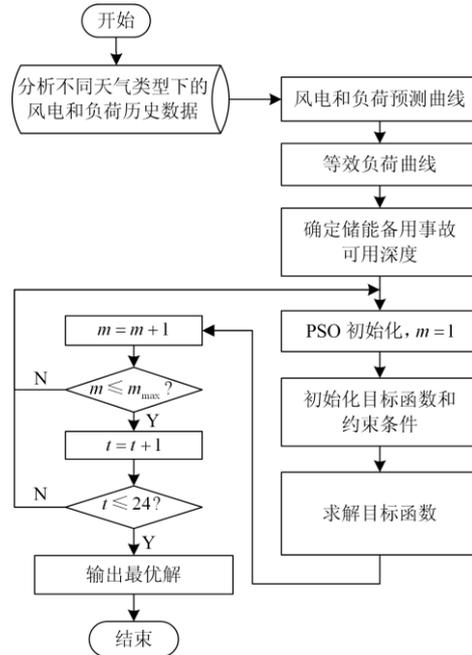


图 4 求解流程

Fig. 4 Solving process

3.4 调峰评价指标

为更好地定量衡量本文所提方法的调峰效果, 通过定义评价指标对其进行量化, 其调峰评估指标如下。

1) 绝对峰谷差

$$\Delta P = P_{\max} - P_{\min} \quad (31)$$

式中, P_{\max} 与 P_{\min} 分别为负荷的峰值与谷值, MW,

该指标数值越小说明在 24 h 时间尺度下负荷的绝对偏差值越小。

2) 峰谷系数

$$\alpha = \frac{P_{\min}}{P_{\max}} \times 100\% \quad (32)$$

该指标体现负荷的波动程度，数值越小说明波动程度越大。

3) 峰谷差率

$$\gamma = \frac{\Delta P}{P_{\max}} \times 100\% \quad (33)$$

该指标体现负荷的波动范围，数值越小说明波动范围越小。

4) 弃风率

$$\lambda = \frac{P'_{W\max}}{P_{W\max}} \times 100\% \quad (34)$$

式中： $P'_{W\max}$ 为弃风量； $P_{W\max}$ 为风电输出功率，该指标体现风电消纳能力。

4 仿真分析

4.1 仿真基础数据

本文采用改进的 IEEE30 节点算例进行仿真，该系统包括 5 台火电机组和一个 300 MW 的风电场，由磷酸铁锂电池组成。表 1 和表 2 分别给出了机组和 ES 运行参数，运行成本单价如表 3 所示。而 ES 系统收益主要通过该峰谷电价实现，其各时段的峰谷电价如表 4 所示。该地区焦煤价格为 685 元/吨^[20]。机组在投油深度调峰阶段的油耗量为 4.8 吨/小时，油价为 6 130 元/吨^[20]。 β 在不投油和投油调峰阶段分别取 1.2 和 1.5。不同天气下风电出力曲线如图 5 所示，负荷曲线如图 6 所示。而图 7 为不同天气下等效负荷曲线。

表 1 火电机组参数

Table 1 Thermal power unit parameters

机组 序号	$P_{\max}/$ MW	$P_{\min}/$ MW	爬坡率/ MWh	燃料成本系数		
				$a_i/[\text{元}/(\text{MW})^2]$	$b_i/(\text{元}/\text{MW})$	$c_i/\text{元}$
1	460	230	80	0.02	21.05	1313
2	300	150	80	0.07	23.9	471
3	243	121	60	0.08	21.62	480.3
4	120	60	45	0.05	23.23	639.4
5	130	65	45	0.06	16.51	502.7

表 2 ES 参数

Table 2 Energy storage parameters

SOC_{\max}	SOC_{\min}	n_c	n_D	环境收益/(元/MWh)
0.9	0.1	0.9	0.9	314

表 3 运行单价

Table 3 Operating unit price

类型	火电机组	风电上网	调峰补偿	弃风惩罚	ES
单价/(元/MWh)	375	570	500	500	50

表 4 分时电价

Table 4 Electricity price

时段	T_1	T_2	T_3
电价/(元/kWh)	0.4	1.2	0.8

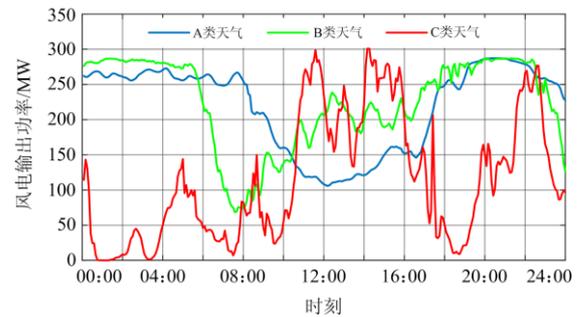


图 5 风电输出功率

Fig. 5 Wind power output

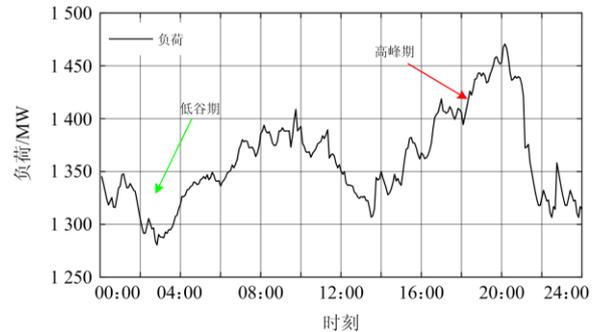


图 6 负荷曲线

Fig. 6 Load curve

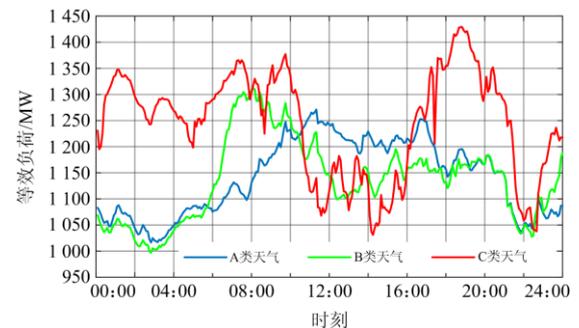


图 7 等效负荷曲线

Fig. 7 Equivalent load curve

4.2 仿真结果与分析

1) 风险量化分析

通过对某园区天气历史数据分析，利用本文所

提风险概率方法, 得出不同天气、不同时段下, 脱网风险概率分布如图 8 所示。从图 8 可知, 天气状况越好, 非计划脱网风险概率越小。对于 A、B 两类天气, 系统非计划脱网风险概率主要由负荷率水平决定, 负荷率水平越大, 脱网风险越大。但对于 C 类型天气, 脱网风险主要由天气决定。同时, 脱网风险概率越大, 则 ES 事故备用参与电网调峰的可用深度越小。图 9 为不同天气状态、不同负荷率水平下的 ES 备用可利用深度情况。

由图 9 可知(图中 A-A 表示全天都是 A 类型天气, A-B 表示 A/B 两类天气交替出现, 其他以此类推), 在 A-A 中, T_1 时段为负荷低水平阶段, 且为负荷低谷期, 将 ES 置于充电状态, 可利用空间最大。 T_3 时段为中等负荷率水平, 属于正常状态, ES 备用可利用深度达到 0.117, 而 T_2 时段为高负荷率水平, 但由于 A 类天气, 风险概率较低, ES 备用深度为 0.4。而对于 C-C 型, 由于脱网概率较大, 因此, T_3 时段, ES 备用利用深度只有 0.424, T_2 时段则为 0.622。其他类型天气, ES 备用利用介于 A、C 天气之间。由此可知, 利用 ES 事故备用容量参与系统调峰具有一定的可行性。

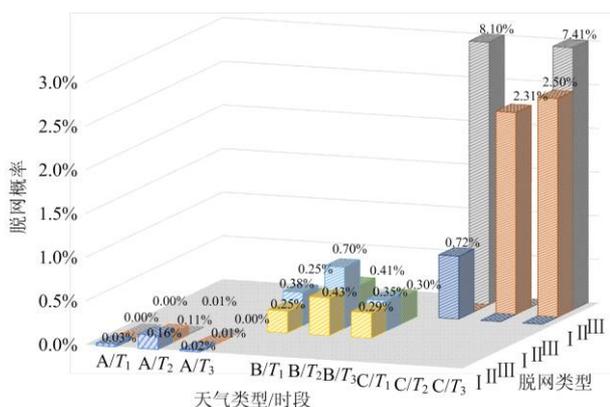


图 8 脱网风险概率分布图

Fig. 8 Probability distribution of off-grid

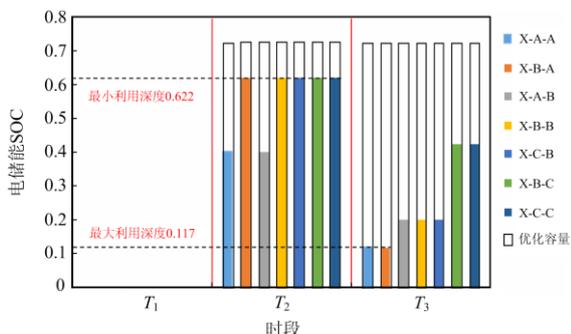


图 9 ES 备用可利用深度

Fig. 9 Reserve available depth of energy storage

2) 调峰效果分析

为验证不同天气下, ES 事故备用参与火电机组 DPR 对系统运行经济性及风电消纳的影响, 本文对 ES 事故备用是否参与调峰两种调度场景进行对比分析。场景 1: 仅火电机组调峰; 场景 2: ES 储能事故备用辅助火电机组调峰。图 10 和图 11 分别为两种场景下的调峰效果图, 由于该地区 A 和 B 两类天气风电波动不剧烈, 加入之后, 未恶化等效负荷。因此, 该处主要对比 C 类天气下的调峰效果。调峰效果参数对比如表 5 所示。

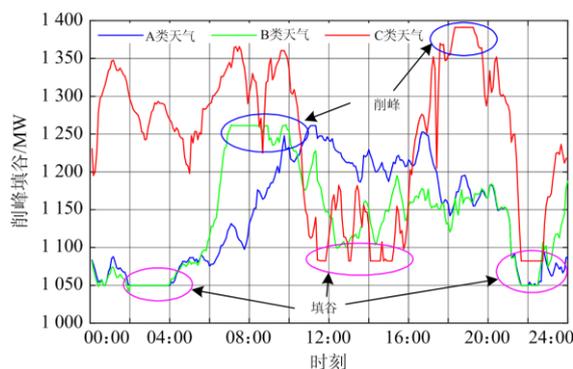


图 10 无 ES 调峰曲线

Fig. 10 Excluding ES peak regulation curve

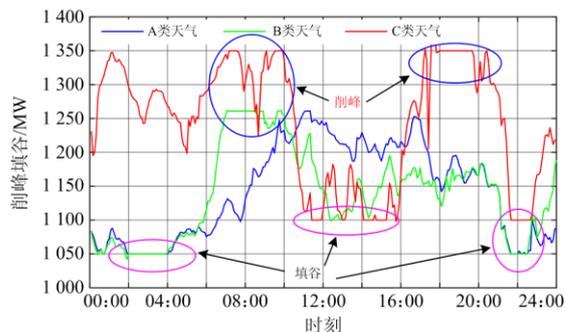


图 11 ES 调峰曲线

Fig. 11 Energy storage and peak regulation curve

表 5 调峰效果参数对比

Table 5 Comparison table of peaking effect parameters

场景	$\Delta P/MW$	$a/\%$	$r/\%$	$\lambda/\%$
含 ES	270	80.4	20	9.01
不含 ES	309	77.7	22.2	13.2

图 10 和图 11 对比可知, 考虑需求侧储能事故备用均可以较好地对接负荷曲线进行削峰填谷, 降低峰谷差。可在负荷高峰期释放电能, 缓解调峰压力。在负荷低谷期, ES 进入充电状态, 增加负荷需求, 进而提高风电消纳, 降低弃风量, 同时减少火电机

组调峰深度。尤其在 C 类天气中，由于风速的随机性，导致等效负荷波动较大，如图 7 所示，在不考虑 ES 事故备用参与调峰的情况下，峰谷差为 309 MW，而当考虑 ES 事故备用参与调峰后，峰谷差降低至 270 MW，峰谷差降低了 39 MW，如表 5 所示。可见，在 C 类天气中，尽管 ES 事故备用参与调峰的可用深度较小，但由于等效负荷波动较大，其削峰填谷效果非常明显。因此，通过对 ES 的合理充放电，可实现削峰填谷。

表 6 不同天气下调峰经济性对比

Table 6 Comparison of peak shaving economy under different weather conditions

天气	场景	总成本/元	火电运行成本/元	弃风成本/元	ES调峰收益/元	弃风率/%	火电调峰补偿/元	风电利润/元
A	1	4 064.8	10 466.3	63.8	0	1.1	183.1	6 282.2
	2	2 702.5	10 241.9	0	1 108	0	110.9	6 320.5
B	1	7 510.6	12 345.2	386.8	0	3.2	213.2	5 008.2
	2	4 429.3	11 243.5	89.7	1 643	1.3	143.1	5 117.8
C	1	17 098.2	17 561.6	1 276.7	0	13.2	278.2	1 461.9
	2	11 733.3	14 325.1	791.8	673	9.01	223.4	2 487.2

通过表 6 不难发现，ES 事故备用参与调峰，均能提高系统经济性，这主要是 ES 事故备用运行和风险成本低于火电的 DPR 成本。且当系统负荷处于低谷期时，ES 进入充电状态，可有效避免调峰机组进入投油阶段，进而降低火电机组调峰燃料成本和环境成本。而在负荷高峰时，ES 进入放电状态，间接降低了火电机组调峰压力和运行成本。同时，虽然 ES 事故备用参与调峰会增加系统运行风险成本，但通过“低谷充电，高峰放电”可赚取峰谷电价差，获得直接收益，以及通过降低火电机组的环境成本，从而获得间接收益，有效降低系统整体的调峰成本。

通过表 6 还可以发现，在 A 天气下，由于 ES 事故备用可用深度较大，充放电容量较多，削峰填谷能力较大，致使系统弃风率明显降低，风电上网利润明显增大，火电调峰降低。但由于等效负荷波动较小，峰谷差不大，因此，ES 整体调峰利润较低。而在 C 类天气下，虽然 ES 事故备用可利用率较低，但整体上，其削峰填谷作用较大。因此，能有效降低系统弃风量和火电调峰成本，增加风电上网利润和 ES 收益。

综上，从系统调峰角度而言，在承担一定风险的情况下，需求侧 ES 事故备用能有效辅助火电机组参与调峰，降低负荷峰谷差，缓解火电机组 DPR 压力和提高风电消纳量。从经济性角度分析，ES 事故备用参与调峰，能降低机组调峰成本和环境成本，自身从削峰填谷中赚取峰谷差价，有效改善系统调峰经济性。在 A 类天气下，可以降低 1.1%的弃风率，降低 33.5%的系统总调峰成本。在 C 类天

3) 调峰经济性分析

为体现本文所提需求侧 ES 事故备用能有效缓解系统调峰压力，并有效改善电网调峰经济效益。对比了 2 种不同场景在 3 类天气下的经济性和风电消纳能力，仿真结果如表 6 所示。

场景 1：以火电机组收益最大为目标，不考虑 ES，只有火电机组进行深度调峰。

场景 2：以火-储收益最大为目标，考虑需火-储同时进行深度调峰。

气下，可以降低 4.19%的弃风率，降低 31.4%的系统总调峰成本。且随着风电装机容量占比的增加，经济性改善越明显。

5 结论

针对电力系统中火电机组 DPR 问题，提出一种基于风险量化的需求侧 ES 事故备用辅助火电机组 DPR 的优化方法。该方法利用闲置 ES 事故备用参与调峰，在承担一定风险的情况下，构建了结合火电机组 DPR 手段和 ES 削峰填谷特性的调峰模型。通过仿真可得出如下结论。

1) 提出一种计及天气状态、负载率水平和故障后恢复时长的风险概率模型。该模型同时考虑多种因素，能够较为准确地对因 ES 事故备用不足而造成的风险进行量化。

2) 从调峰性能和经济性 2 个角度进行分析，得出 ES 事故备用参与 DPR。在 A 类天气下，可以降低 1.1%的弃风率，降低 33.5%的系统总调峰成本。在 C 类天气下，可以降低 4.19%的弃风率，降低 31.4%的系统总调峰成本。能实现提高电网调峰能力和 ES 事故备用利用率双层目的。尤其在 A 类天气占比较大的地区或 ES 事故备用配置充足的孤岛地区，该方法具有较强实用性。

参考文献

[1] 李军, 黄卫剑, 陈锦攀, 等. 一种适应新型电力系统深度调峰快速调频的工程最速控制器[J]. 广东电力, 2021, 34(8): 110-119.

- LI Jun, HUANG Weijian, CHEN Jinpan, et al. An engineering fastest controller adaptive to deep peak and fast frequency regulation for new power system[J]. *Guangdong Electric Power*, 2021, 34(8): 110-119.
- [2] 杨谦, 刘继春, 蒋万泉. 光伏不同渗透率下考虑源网荷储深度互动的电力系统调峰策略[J]. *电力建设*, 2021, 42(9): 74-84.
- YANG Qian, LIU Jichun, JIANG Wanxiao. Peak regulation strategy of power system considering the interaction of source-network-load-storage under different penetration rate of PV[J]. *Electric Power Construction*, 2021, 42(9): 74-84.
- [3] MORALES-ESPAÑA G, BALDICK R, GARCÍA-GONZÁLEZ J, et al. Power-capacity and ramp-capability reserves for wind integration in power-based UC[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2016, 7(2): 614-624.
- [4] CHIU W, HSIEH J, CHEN C. Pareto optimal demand response based on energy costs and load factor in smart grid[J]. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2020, 16(3): 1811-1822.
- [5] BABAJANI P, SHAFIIEE Q, BEVRANI H. Intelligent demand response contribution in frequency control of multi-area power systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(2): 1282-1291.
- [6] 刘新东, 陈焕远, 姚程. 计及大容量燃煤机组深度调峰和可中断负荷的风电场优化调度模型[J]. *电力自动化设备*, 2012, 32(2): 95-99.
- LIU Xindong, CHEN Huanyuan, YAO Cheng. Economic dispatch considering deep peak-regulation and interruptible loads for power system incorporated with wind farms[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2012, 32(2): 95-99.
- [7] 付亦殊, 陈红坤, 姜欣, 等. 促进大规模风电消纳的双层调峰补偿机制研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(4): 51-57.
- FU Yishu, CHEN Hongkun, JIANG Xin, et al. A bi-layer peak-regulation compensation mechanism for large-scale wind power integration[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(4): 51-57.
- [8] 应益强, 王正风, 吴旭, 等. 计及新能源随机特性的电网深度调峰多目标策略[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(6): 34-42.
- YING Yiqiang, WANG Zhengfeng, WU Xu, et al. Multi-objective strategy for deep peak shaving of power grid considering uncertainty of new energy[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(6): 34-42.
- [9] 林俐, 田欣雨. 基于火电机组分级深度调峰的电力系统经济调度及效益分析[J]. *电网技术*, 2017, 41(7): 2255-2263.
- LIN Li, TIAN Xinyu. Analysis of deep peak regulation and its benefit of thermal units in power system with large scale wind power integrated[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(7): 2255-2263.
- [10] 赵晋泉, 杨余华, 孙中昊, 等. 考虑虚拟电厂参与的深度调峰市场机制与出清模型[J]. *全球能源互联网*, 2020, 3(5): 469-476.
- ZHAO Jinquan, YANG Yuhua, SUN Zhonghao, et al. Deep peak regulation market mechanism and clearing model considering participation of virtual power plants[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2020, 3(5): 469-476.
- [11] 朱大锐, 赵晓妮, 段建东. 考虑系统调峰特性的风光消纳优化[J]. *电网与清洁能源*, 2021, 37(2): 139-146.
- ZHU Darui, ZHAO Xiaoni, DUAN Jiandong. Optimization of wind/photovoltaic power consumption considering peak regulation characteristics[J]. *Power System and Clean Energy*, 2021, 37(2): 139-146.
- [12] 高瑞, 郭红霞, 黄钰琪. 用户侧分布式储能运营平台设计[J]. *电测与仪表*, 2020, 57(22): 105-111.
- GAO Rui, GUO Hongxia, HUANG Yuqi. Architecture design of user-side distributed energy storage operation platform[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2020, 57(22): 105-111.
- [13] 李建林, 李雅欣, 周喜超, 等. 储能商业化应用政策解析[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(19): 168-178.
- LI Jianlin, LI Yaxin, ZHOU Xichao, et al. Analysis of energy storage policy in commercial application[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(19): 168-178.
- [14] 李相俊, 王上行, 惠东. 电池储能系统运行控制与应用方法综述及展望[J]. *电网技术*, 2017, 41(10): 3315.
- LI Xiangjun, WANG Shangxing, HUI Dong. Summary and prospect of operation control and application method for battery energy storage systems[J]. *Power System Technology*, 2017, 41(10): 3315-3325.
- [15] 寇凌峰, 张颖, 季宇, 等. 分布式储能的典型应用场景及运营模式分析[J]. *电力系统保护与控制*, 2020, 48(4): 177-187.
- KOU Lingfeng, ZHANG Ying, JI Yu, et al. Typical application scenario and operation mode analysis of distributed energy storage[J]. *Power System Protection and Control*, 2020, 48(4): 177-187.
- [16] 张晓晨. 储能在电力系统调频调峰中的应用[D]. 北京: 北京交通大学, 2018.
- ZHANG Xiaochen. Application of energy storage in frequency modulation and peak regulation of power system[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2018.

- [17] 韩杏宁. 大区电力系统新能源电源规划及储能配置方法研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
HAN Xingning. Variable renewable generation expansion planning and energy storage allocation in large-scale power systems[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.
- [18] 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 Jinghua, 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.
- [19] MURTY V, KUMAR A. Multi-objective energy management in microgrids with hybrid energy sources and battery energy storage systems[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 1-20.
- [20] 李军徽, 张嘉辉, 穆钢, 等. 储能辅助火电机组深度调峰的分层优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(11): 3961-3969.
LI Junhui, ZHANG Jiahui, MU Gang, et al. Hierarchical optimization scheduling of deep peak shaving for energy-storage auxiliary thermal power generating units[J]. Power System Technology, 2019, 43(11): 3961-3969.
- [21] WANG M, WANG J, BAI H, et al. A generation-reserve co-optimization dispatching model for wind power integrated power system based on risk reserve constraints[C] // International Conference on Renewable Power Generation (RPG 2015), October 17-18, 2015, Beijing, China.
- [22] CHEN H, KONG Y, LI G, et al. Conditional value-at-risk-based optimal spinning reserve for wind integrated power system[J]. International Transactions on Electrical Energy Systems, 2016, 26(8): 1799-1809.
- [23] 罗超, 杨军, 孙元章, 等. 考虑备用容量优化分配的含风电电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6109-6118.
LUO Chao, YANG Jun, SUN Yuanzhang, et al. Dynamic economic dispatch of wind integrated power system considering optimal scheduling of reserve capacity[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6109-6118.
- [24] 周霞, 李威, 唐静, 等. 基于风险量化的事故备用容量协调分配方法[J]. 电网技术, 2015, 39(7): 1927-1932.
ZHOU Xia, LI Wei, TANG Jing, et al. Risk quantification based coordinative allocation of emergency reserve[J]. Power System Technology, 2015, 39(7): 1927-1932.
- [25] 刘小龙, 李欣然, 刘志谱, 等. 基于风险量化与需求侧响应的综合能源系统储能事故备用优化利用[J]. 电工技术学报, 2021, 36(9): 1901-1913.
LIU Xiaolong, LI Xinran, LIU Zhipu, et al. Optimal utilization of energy storage emergency reserve in comprehensive energy system based on risk quantification and demand side response[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(9): 1901-1913.
- [26] 胡健, 秦玉杰, 焦提操, 等. 泛在电力物联网环境下考虑碳排放权约束的VPP理性调峰模型[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 49-57.
HU Jian, QIN Yujie, JIAO Ticao, et al. Rational peak shaving model of VPP considering carbon emission rights constraints in ubiquitous power internet of things environment[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 49-57.
- [27] 廖金龙, 陈波, 丁宁, 等. 考虑一次调频能力的火电机组负荷优化分配[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(增刊): 168-174.
LIAO Jinlong, CHEN Bo, DING Ning, et al. Load optimal distribution of thermal units considering primary frequency control ability[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(S1): 168-174.
- [28] 李铁, 李正文, 杨俊友, 等. 计及调峰主动性的风光水火储多能系统互补协调优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3623-3630.
LI Tie, LI Zhengwen, YANG Junyou, et al. Coordination and optimal scheduling of multi-energy complementary system considering peak regulation initiative[J]. Power System Technology, 2020, 44(10): 3623-3630.

收稿日期: 2021-07-31; 修回日期: 2021-09-06

作者简介:

魏文(1987—), 男, 博士研究生, 研究方向为电力价格、电力市场; E-mail: 285964995@qq.com

姜飞(1985—), 男, 博士, 副教授, 研究生导师, 研究方向为电力系统运行与控制、电力电子在电力系统应用; E-mail: jiang85521@126.com

戴双凤(1983—), 女, 博士研究生, 研究方向为电力市场。E-mail: 289147681@qq.com

(编辑 许威)