

DOI:10.20033/j.1003-7241.(2026)06-0065-07

# 基于主从博弈的配电网分布式储能配置-运行优化方法

夏泰宝<sup>1</sup>, 周磊<sup>1</sup>, 毛王清<sup>1</sup>, 李晓亮<sup>2</sup>, 庄俊<sup>2</sup>, 范存刚<sup>2</sup>

(1. 国网江苏省电力有限公司宿迁供电分公司, 江苏 宿迁 223834; 2. 国网上海能源互联网研究院有限公司, 上海 200131)

**摘要:**随着可再生能源技术飞速发展,高比例分布式电源的接入给配电网的规划运行带来了新的挑战,而储能系统运行优化的合理配置对于提升配电网运行安全性与经济性有着重要作用。鉴于配电网追求的安全稳定运行目标与储能系统追求的经济性目标之间存在对立关系,为此提出一种基于主从博弈推演的配电网分布式储能配置-运行优化方法。该方法通过构建配电网运营商作为领导者、分布式储能运营商作为跟随者的主从博弈框架,并引入多目标粒子群算法结合内点法的混合求解策略,求出博弈双方策略互动下的最优均衡解。通过算例分析表明,该方法可有效模拟配电网与储能运营商之间的策略博弈过程,还能显著提升配电网电压运行安全,同时实现了储能系统运行成本的有效控制。

**关键词:**配电网;分布式储能;主从博弈推演;分布式电源;多目标粒子群算法;电压调节

中图分类号: TP391; TM714.2

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2026)06-0065-07

## Configuration-operation optimization method of distributed energy storage in distribution network based on stackelberg game deduction

Xia Taibao<sup>1</sup>, Zhou Lei<sup>1</sup>, Mao Wangqing<sup>1</sup>, Li Xiaoliang<sup>2</sup>, Zhuang Jun<sup>2</sup>, Fan Cungang<sup>2</sup>

(1. State Grid Jiangsu Electric Power Company Limited Suqian Power Supply Branch, Suqian 210023, Jiangsu, China;

2. State Grid Shanghai Energy Internet Research Institute Company Limited, Shanghai 200120, China)

**Abstract:** With the rapid development of renewable energy technologies, the integration of high-penetration distributed generation poses new challenges to the planning and operation of distribution networks. Meanwhile, the rational allocation and optimized operation of distributed energy storage (DES) are of great significance in enhancing the safe and economy of distribution networks. Since the contradictory relationship between the safe and stable operation goals for the distributed network and the economic goals for DES, the thesis focus on a new method of configuration-operation optimization on for distributed DES based on Stackelberg game theory. This method contracts a framework with distributed network as a leader and DES operators as followers. Also, a mixed solution strategy of multi-objective particle swarm optimization algorithm combined with interior point method to obtain the optimal equilibrium solution is introduced in the paper. Case study shows that the proposed approach can effectively simulate the strategic game process between the distribution network and energy storage operators, significantly improve the voltage operation safety of the distribution network, and achieve effective control of DES's operation cost.

**Keywords:** distribution network; distributed energy storage; stackelberg game deduction; distributed power generation; PSO; voltage regulation

随着可再生能源发电技术的飞速发展,分布式电源在电力系统中的渗透率不断攀升,形成了高比例分布式电源接入新格局<sup>[1-2]</sup>。然而,高比例分布式电源的接入虽然增强了电力系统的可再生能源比例,但也带来了电压波动、谐波污染、反向潮流等新的复杂问题,对配电网规划与运行控制提出了更高要求<sup>[3-4]</sup>。尤其在负荷高峰时段或极端天气条件下,分布式电源出力不确定性可能导致供需失衡,影响系统的稳定运行。因此,确保配电网在高比例分布式电源接入下的安全运行,成为当前电力行业亟需解决的重要方向。在此背景下,配电网分布式储能的引入就显

得尤为重要。分布式储能系统能够灵活调节电网中的有功和无功功率,有效平抑分布式电源出力的波动性,提高配电网电压的稳定性<sup>[5-6]</sup>。通过储能配置、运行策略优化,对于改善配电网潮流分布,提升配电网稳定运行与经济效益具有重要意义<sup>[7-8]</sup>。

现阶段,针对分布式储能的配置运行优化的研究已有大量成果。文献[9]以净负荷波动最小为目标,在保证配电网潮流的运营稳定性的同时,充分考虑了储能寿命对管理运维成本的影响,提供了一个兼顾容量响应和储能寿命预测的配储协调设计的方法。文献[10]则以电熔镁设备

收稿日期:2025-04-23;录用日期:2025-05-21

基金项目:国网江苏省电力有限公司科技项目(J2024069)

作者简介:夏泰宝(1990—),男,高级工程师,研究方向:配电网运行规划。

通信作者:李晓亮(1996—),男,初级工程师,研究方向:人工智能算法在电网规划运行中的应用。

引用本文:夏泰宝,周磊,毛王清,等. 基于主从博弈的配电网分布式储能配置-运行优化方法[J]. 自动化技术与应用, 2026, 45(6):65-71. (Xia Taibao, Zhou Lei, Mao Wangqing, et al. Configuration-operation optimization method of distributed energy storage in distribution network based on stackelberg game deduction[J]. Techniques of Automation and Applications, 2026, 45(6):65-71.)

作为调度中心,通过配置储能设备和火力发电机组实现联动调峰,在不同的时间尺度提高了储能设备的经济效益。文献[11]以储能调节成本最低为目标,重点考虑储能动态特性,构建了基于多储能系统协同控制的承载力优化模型,实现了高渗透率光伏场景下的时空功率平衡优化。文献[12]构建了配电网混合储能系统优化配置模型,旨在通过优化储能系统的配置策略来提升配电网应对分布式电源出力不确定性能力,进而增强整体供电的稳健性与可靠性。基于上述研究,关于配电网储能配置优化研究多是从配电网安全、经济运行等层面展开,其研究对象包含单一层面或者综合考虑两个层面<sup>[13]</sup>。然而,对于仅考虑单一层面的研究无法兼顾系统安全性和经济性,但对于综合考虑两个层面的已有研究忽略了安全性和经济性隶属不同物理属性且两者具有对立特质,导致工程实践中无法同时兼顾达到最优。鉴于此,可通过引入主从博弈来解决对立主体的策略制定问题<sup>[14-15]</sup>。例如,文献[16]以多能园区运营商和用户作为对立主体构建了主从博弈模型;文献[17]在考虑电价对博弈过程影响基础上提出了供需互动主从博弈建模方法;而文献[18]以多微网系统和用户最大化各自利润为目标建立了一主多从的优化调度策略。然而,上述关于主从博弈研究仅从经济性视角对不同主体进行决策建模,决策依据过于单一。在面向电力系统实际工程场景中,系统运行安全是首要考虑的因素,其次才是经济性。为此,本文将配电网安全运行与分布式储能经济运行视为对立主体,对储能节点及容量配置与储能充放电策略的制定进行主从博弈推演,从而制定出均衡策略以达到在保证配电网运行安全前提下实现运行经济性。本文研究工作是在国网江苏省电力有限公司科技项目(J2024069):配电网移动柔性调压关键技术研究及应用资助下顺利开展,该项目中所涉及的“分布式储能配置”研究内容为本文提供了研究思路,项目中所收集的配电网电压运行数据为本文提供了数据支撑。

本文各部分研究内容安排如下:首先,阐述配电网运营商与分布式储能运营商之间主从博弈框架;其次,分别构建配电网运营商主模型与分布式储能运营商从模型,并对所构建的主从博弈推演模型进行求解;最后,通过算例仿真验证所提方法的有效性。

## 1 配电网-储能主从博弈框架

为了有助于推动配电网安全运行稳定性提升的同时降低分布式储能运维成本,需要在分布式储能选址定容之前进行最优配置策略制定。为此,本文提出一种面向配电网运营商与储能运营商的主从博弈推演方法<sup>[18]</sup>,以实现分布式储能最优配置,研究框架如图1所示。

在所提主从博弈框架下,配电网运营商处于博弈领导者地位,主要从配电网安全稳定运行层面考虑如何对分布式储能在配电网中的节点位置及其容量进行配置以提升系统稳定性;而分布式储能运营商处于跟随者地位,在配

电网制定节点位置及所需容量配置策略之后,主要从分布式储能运维成本层面考虑如何优化储能充放电策略,从而在保证满足配电网运行安全的前提下实现自身利益最大化。由于配电网运营商对分布式储能所在节点位置及其容量需求的策略会影响分布式储能运营商充放电策略优化,而储能运营商所制定策略又会影响配电网运行指标。鉴于此,两个运营商之间策略存在策略的动态交互,通过主从博弈模型的不间断推演,当两者之间策略不断推演迭代达到均衡后,可实现配电网安全稳定运行与分布式储能运维成本之间的均衡状态。

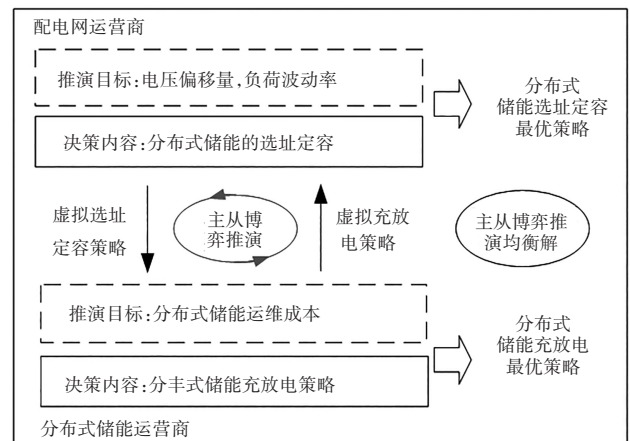


图1 配电网与分布式储能主从博弈框架

Fig. 1 Stackelberg game framework for distribution network and DES

## 2 配电网-储能主从博弈模型

### 2.1 配电网博弈主模型

#### 2.1.1 目标函数

配电网运营商作为博弈主导者,考虑分布式储能在配电网中的安装节点以及容量配置优化。因而,配电网运营商博弈主模型配电网脆弱性和负荷波动程度作为优化目标来建目标函数。

$$\begin{cases} \min(f_1, f_2) \\ \text{s. t } g(X) \leq 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中, $f_1$ 表示配电网脆弱性大小; $f_2$ 表示配电网的负荷波动率; $g(X)$ 为优化目标约束条件; $X$ 为决策变量。

#### 1) 配电网脆弱性指标

配电网脆弱性表示系统受外界因素影响的抗干扰能力,本质上是源于功率平衡被外界因素打破后的系统抗干扰能力不足<sup>[19-20]</sup>。在线路电阻较大的配电网端,各节点电压直接受线路中无功功率、有功功率影响,有功、无功潮流势必会影响节点电压变化。因此,电压偏离标准电压的大小可用于表征系统受功率平衡扰动后抗干扰能力强弱。鉴于此,本节以配电网中各个节点电压为研究对象,通过对配电网各节点偏离标准电压的大小来构建配电网脆弱性指标。配电网任意节点*i*在*t*时刻的电压偏差率可以表示为

$$l(t,i) = \frac{|U_i/U_{ref} - 1|}{C} \quad (2)$$

式中,  $U_i$  表示  $t$  时刻第  $i$  节点的电压值,  $U_{ref}$  为  $i$  节点处的额定电压;  $C$  为 10 kV 系统下所规定的最大电压偏移量。

通常,对于规模较大的配电网,单个节点在某一时刻的脆弱值并不能准确判定整个系统的脆弱性。为此,需要分别从配电网平均脆弱性和节点脆弱性的均衡性来考虑,其中,平均脆弱性指标为整个系统总节点脆弱值的平均值,节点脆弱性的均衡性采用均衡指数,确保整个系统的电压在正常范围内波动,分别采用以下模型衡量。

$$BV(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N l(t,i) \quad (3)$$

$$J(t) = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^N \lambda_{t,i} \log_2(1/\lambda_{t,i})}{\log_2 N} \right]^{2\pi} \quad (4)$$

式中,  $BV(t)$  为配电网平均脆弱性;  $0 < J(t) < 1$  为节点脆弱性的均衡指数,值越大,均衡度越低。 $N$  为系统的总节点数;  $l(t,i)$  为任意节点  $i$  在  $t$  时刻的电压偏差率;  $\lambda_{t,i}$  为节点  $i$  在  $t$  时刻的脆弱值占当前配电网总脆弱性之比,即

$$\lambda_{t,i} = \frac{l(t,i)}{\sum_{i=1}^N l(t,i)} \quad (5)$$

进一步,配电网  $t$  时刻的电压脆弱值定义为

$$f_1 = \frac{1}{24} \sum_{t=1}^{24} \left( \frac{BV(t)}{2} + \frac{J(t)}{2} \right) \quad (6)$$

式中,  $f_1$  的范围为 0~1,其值越大,脆弱性越高,配电网运行可靠性越差;值越小,脆弱性越低,配电网能够稳定、可靠地运行。

### 2) 配电网负荷波动率

$$f_2 = \sum_{i=1}^T [P_{load}(t) - \bar{P}]^2 \quad (7)$$

式中,  $P_{load}(t)$  为  $t$  时刻负荷功率,  $\bar{P}$  表示一定时间内的负荷均值;  $f_2$  越小,代表负荷波动率越小,配电网运行更稳定。

### 2.1.2 约束条件

配电网运营商在进行分布式储能优化配置时,需考虑的约束主要涉及配置位置约束,储能功率及容量约束,以及节点电压上下限约束。具体约束条件如下。

#### 1) 储能接入点约束

针对中低压配电网,分布式储能通常可以接入除平衡节点以外的任意节点(平衡节点除外),但储能安装节点的节点编号不能大于配电网系统最大节点数,即

$$2 \leq b \leq N \quad (8)$$

式中,  $b$  表示分布式储能所接入的节点编号;  $N$  为配电网节点总数。此处假设节点 1 为平衡节点。

#### 2) 储能功率及容量约束

$$P_{ess}^{\min} \leq P_{ess} \leq P_{ess}^{\max} \quad (9)$$

$$E_{ess}^{\min} \leq E_{ess} \leq E_{ess}^{\max} \quad (10)$$

式中,  $P_{ess}$ 、 $E_{ess}$  分别为储能功率、容量;  $P_{ess}^{\min}$ 、 $P_{ess}^{\max}$  分别为储

能最小、最大功率;  $E_{ess}^{\min}$ 、 $E_{ess}^{\max}$  表示储能最小、最大容量。

#### 3) 节点电压约束

$$U_{\min} \leq U_{ij} \leq U_{\max} \quad (11)$$

式中,  $U_{ij}$  为节点电压,  $U_{\min}$ 、 $U_{\max}$  分别为  $t$  时刻配网的最小、最大的节点电压。

## 2.2 分布式储能博弈从模型

### 2.2.1 目标函数

分布式储能运营商作为跟随者,根据配电网运营商储能节点及容量配置结果,通过优化分布式储能充放电策略来降低自身运营成本。分布式储能运营商博弈从模型可构建为以下形式,即

$$\begin{cases} \min f = f_{esset} + f_r + f_{fix} - f_{pv} - f_{nl} + f_{dr} \\ \text{s. t. } h(Y) \leq 0 \end{cases} \quad (12)$$

式中,  $f$  指分布式储能运营商日运行成本,主要由储能安装成本  $f_{esset}$ 、储能运行成本  $f_r$ 、维护成本  $f_{fix}$ 、峰谷套利收益  $f_{pv}$ 、降低网损收益  $f_{nl}$ 、需求响应奖励  $f_{dr}$  构成;  $h(Y)$  为优化目标约束条件,  $Y$  为决策变量。

#### 1) 初始安装成本

$$f_{esset} = \frac{1}{365} \cdot \frac{r \cdot (1+r)^{\text{year}}}{(1+r)^{\text{year}} - 1} \cdot \sum_{Nb=1}^B \text{cess} \cdot \text{cap}_{ess,Nb} \quad (13)$$

式中,  $r$  为贴现率,  $\text{year}$  为储能的使用寿命;  $\text{cess}$  为单位容量储能安装成本,  $\text{cap}_{ess,Nb}$  为第  $Nb$  个储能安装的额定容量,  $B$  表示储能安装数量。

#### 2) 运行成本

$$f_r = \text{cessy} \cdot \sum_{Nb=1}^B \sum_{t=1}^T P_{ess,Nb}(t) \Delta t \quad (14)$$

式中,  $\text{cessy}$  指单位功率储能运行成本,  $P_{ess,Nb}(t)$  指单位时间内储能充放电功率。

#### 3) 维护成本

分布式储能维护成本主要分为固定运维成本  $f_{fix1}$  和可变运维成本  $f_{fix2}$ 。其中,固定成本包括电站管理和检修费用,一般为储能初始安装成本的 2%;可变运维成本  $f_{fix2}$  与储能电池寿命与衰减相关,包括电池板的清理与部件的更换。

$$f_{fix} = f_{fix1} + f_{fix2} \quad (15)$$

$$f_{fix1} = c_1 \cdot \sum_{Nb=1}^B P_{ess,Nb} \quad (16)$$

$$f_{fix2} = c_2 \cdot \sum_{Nb=1}^B \sum_{t=1}^T P_{ess,Nb}(t) \Delta t \quad (17)$$

式中,  $P_{ess,Nb}$  为第  $Nb$  个储能的额定功率;  $c_1$ 、 $c_2$  为维护成本参数。

#### 4) 峰谷套利收益

在采用分时电价时,储能系统通过在电价较低时充电,在电价较高时放电进行套利,能够有效减少系统峰谷差从而达到削峰填谷的功能,同时也带来经济收益<sup>[21-22]</sup>。

$$f_{pv} = c_{essf} \sum_{t=1}^T (P_{load,b}(t) - P_{load}(t)) \Delta t \quad (18)$$

式中,  $P_{load,b}(t)$ 、 $P_{load}(t)$  为储能接入前、后在  $t$  时刻的配电网负荷;  $c_{essf}$  为  $t$  时刻的分时电价。

## 5) 网损收益

储能出力能够满足部分负荷需求,减少网络损耗,其收益可表示为

$$f_{nl} = c_{gd} \sum_{t=1}^T (P_{load}(t) + P_{loss}(t) + \sum_{Nb=1}^B P_{ess,Nb}(t) - P_{pv}(t)) \cdot \Delta t \quad (19)$$

式中,  $c_{gd}$  为储能运营商购电电价;  $P_{loss}(t)$ 、 $P_{pv}(t)$  为配电网网损、储能运营商配置的光伏功率。

6) 需求响应奖励<sup>[23]</sup>

$$f_{dr} = C_{reward} \cdot N_{dr} \quad (20)$$

式中,  $C_{reward}$  为需求响应奖励;  $N_{dr}$  为需求总次数。

## 2.2.2 约束条件

分布式储能运营商在进行储能充放电策略优化时,需考虑的约束主要涉及功率平衡约束、充放电约束配置位置约束。具体约束条件如下。

## 1) 系统功率平衡约束

$$P_{gd}(t) + P_{pv}(t) = P_{load}(t) + P_{loss}(t) + P_{ess}(t) \quad (21)$$

式中,  $P_{gd}(t)$  为配电网在  $t$  时刻外接电源出力。

## 2) 储能充放电约束

$$P_{ess,Nb}^{min} \leq P_{ess,Nb} \leq P_{ess,Nb}^{max} \quad (22)$$

$$0 \leq Soc_{ess,Nb} \leq E_{ess,Nb} \quad (23)$$

$$0 \leq |I_{ess,Nb}| \leq I_{ess,Nb}^{max} \quad (24)$$

式中,  $I_{ess,Nb}^{max}$  为第  $Nb$  个储能最大充放电电流;  $P_{ess,Nb}^{min}$ 、 $P_{ess,Nb}^{max}$  分别储能最小、最大功率;  $Soc_{ess,Nb}$  为储能荷电状态;  $E_{ess,Nb}$  为第  $Nb$  个储能容量。

## 3 主从博弈模型求解

## 3.1 主从博弈推演过程

配电网运营商与分布式储能运营商为了实现各自目标,在策略选择方面会按照主、从地位不断地进行动态交互,其博弈推演过程如下。

1) 配电网运营商初始化分布式储能安装节点及其容量,同时下发给分布式储能运营商。该步骤中,配电网运营商并未向分布式储能运营商发布实际的配置,而是通过虚拟信号的形式与储能运营商交互,以观察储能运营商调度策略是否有利于自身目标实现。

2) 分布式储能运营商以运营成本最低为目标,优化各时段充放电策略,并将最优虚拟策略反馈给配电网运营商。该步骤中,分布式储能运营商主要用于模拟分布式储能对配电网运营商配置策略的行为反馈。

3) 配电网运营商根据分布式储能运营商上报的充放电策略,以提升配电网安全稳定运行为原则,优化分布式储能安装节点及容量配置策略,同时下发给分布式储能运营商。

4) 重复步骤(2)~(3),当任意一方策略不再发生改变时,即达到了主从博弈推演的纳什均衡解。此时,配电网、分布式储能运营商按照该均衡策略进行配置-运行时,配电网系统将会在保证安全、经济方面达到均衡。

## 3.2 主从博弈均衡解求解

针对配电网运营商所涉及的多目标优化问题,考虑到多目标粒子群优化算法具有原理简单、搜索速度快等优点,因而采用该算法优化配电网运营商策略<sup>[24]</sup>。针对分布式储能运营商策略,采用内点法求解。综上,为能较好地模拟配电网运营商与分布式储能运营商之间决策的动态交互过程,采用多目标粒子群-内点法相结合的分布式算法来求解分布式储能配置-运行优化策略。主从博弈均衡解求解过程具体如图2所示。

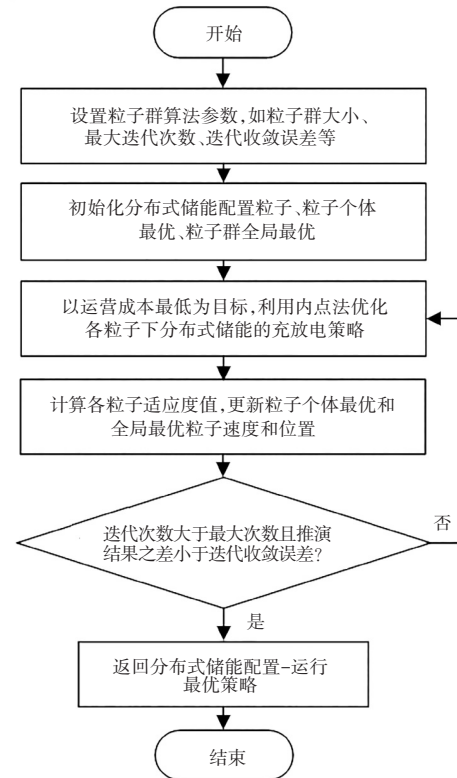


图2 配电网-分布式储能主从博弈求解流程

Fig. 2 Solving process of Stackelberg game for distribution network and DES

## 4 算例分析

## 4.1 算例假设

为验证所提主从博弈推演模型有效性,本算例基于图3所示 IEEE 标准 33 节点配电网台区进行分析。假设在节点 9、节点 14、节点 20、节点 30 分别接入分布式光伏系统,光伏额定容量为 250 kW。

此外,分时电价如表 1 所示,峰电价时段是 8:00—20:59,平电价时段分别是 0:00—7:59 和 21:00—23:59<sup>[25]</sup>。储能基本参数如表 2 所示,通过优化随机安装在节点 2~33 中任意两个节点,安装容量均不超过 3 MWh。

表 1 分时电价

Tab. 1 Time-of-use price

分段时间	价格/(元·kWh <sup>-1</sup> )
0:00—7:59	0.358
8:00—20:59	0.558
21:00—23:59	0.358

### 4.2 优化结果

分布式储能选址定容方案如表 3 所示。最佳选址方案是节点 13 和节点 24, 储能最佳接入容量分别为 1.59 MWh 和 1 MWh。储能系统的日充放电功率和 SOC

状态分别如图 4 所示。通过主从博弈模型的优化, 储能几乎全时段运行, 且在用电高峰时放电, 低谷时储存电能, 减少了配电网的调峰压力, 缓解配电网各节点电压波动程度, 提升配电网运行经济性、可靠性。

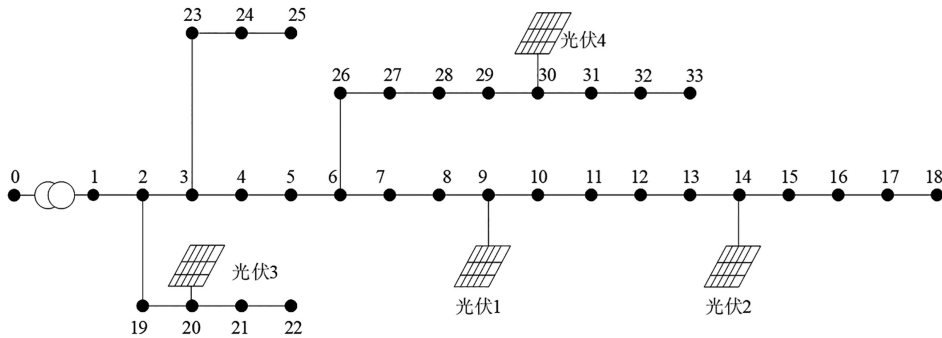


图 3 IEEE 33 节点配电网

Fig. 3 IEEE 33-node distribution network

表 2 分布式储能参数

Tab. 2 Parameters of DES

参数	荷电范围 (SOC)	贴现率 $r$	充放电效率	储能标准使用时限/a	储能参与调峰服务补偿/(元·kW <sup>-1</sup> )	储能需求响应奖励/(元·kW <sup>-1</sup> )	单位功率储能运行成本/(元·kW <sup>-1</sup> )	单位容量储能安装成本/(元·kW <sup>-1</sup> )
取值	10%~90%	0.08	0.9	10	0.5	0.5	0.05	8 000

表 3 算例优化结果

Tab. 3 Optimization results of case

储能	接入位置	接入容量/MWh	电压波动/p. u.	负荷波动/p. u.	储能收益/元
1	13	1.59	0.301 5	0.069 0	2 015. 61
2	24	1	0.301 5	0.069 0	2 015. 61

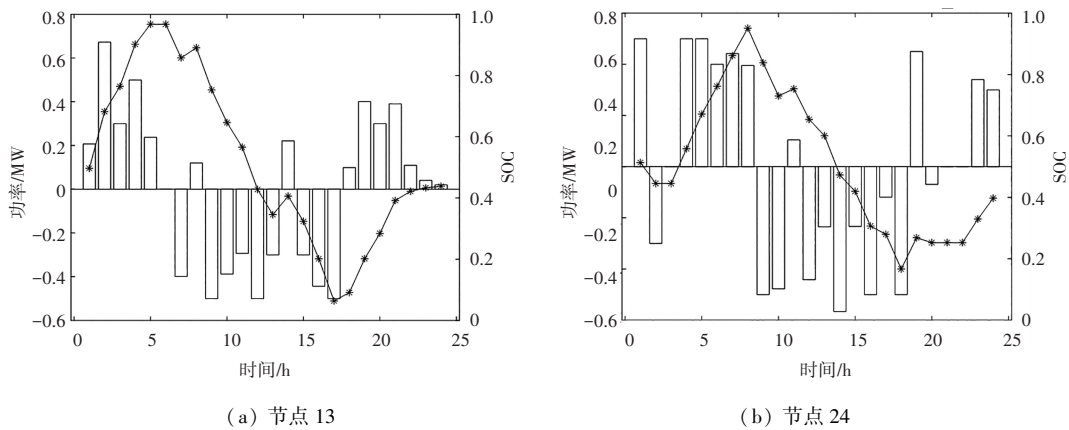


图 4 分布式储能充放电功率

Fig. 4 Charging and discharging power of DES

### 4.3 对比分析

为验证本文主从博弈模型对于配电网稳定可靠运行以及储能运营的经济性和有效性, 设置不同环境条件, 采用不同优化算法, 构建 3 种情景进行对比分析。

**场景 1** 接入 4 个分布式光伏系统, 不接储能系统。

**场景 2** 接入 4 个分布式光伏系统, 采用常规优化方法进行优化。

**场景 3** 接入 4 个分布式光伏系统, 采用主从博弈模型进行优化。

表格 4 是配电网接入储能后, 采用不同的优化算法得到的均衡结果, 和场景 2 相比, 场景 3 的分布式储能接入容量更小, 电压波动与负荷波动都更低, 储能日收益增加有效验证了主从博弈模型的有效性。

表 4 不同场景对比结果

Tab. 4 Comparison results of different scenarios

场景	储能	接入位置	接入容量/MWh	电压波动/p. u.	负荷波动/p. u.	储能收益/元
2	1	4	2.34	0.454	2.390	1 841.99
	2	9	1.9	0.454	2.390	1 841.99
3	1	13	1.59	0.301 5	0.069	2 015.61
	2	24	1	0.301 5	0.069	2 015.61

4.3.1 电网脆弱性分析

图 5 所示为从时间尺度上分析以上 3 种场景储能接入前后配电网的脆弱性,即节点电压平均偏差率,脆弱值越小,配电网运行越稳定。

和场景 1 只接入光伏系统相比,场景 2 和场景 3 的脆弱都有降低,但部分节点脆弱性不降反增,这是由于储能优化时,在保证配电网不崩溃的前提下,根据分时电价优先考虑了配电网运行的经济性。

图 6 所示为各场景下一天内节点电压的变化,与场景 1 相比,场景 2 和场景 3 在储能接入后,节点电压降低较为明显,储能系统能够平抑光伏发电输出功率的波动和节点电压的偏移,提升电能质量,提高系统运行的可靠性。和场景 2 相比,场景 3 波动范围更小,节点电压偏移量较小,说明如果缺乏有效的优化策略,储能系统的单纯接入可能难以充分发挥其对电网的积极作用。而主从博弈模型能够有效解决高渗透率分布式光伏导致的电压抬升问

题,提高配电网运行可靠性。

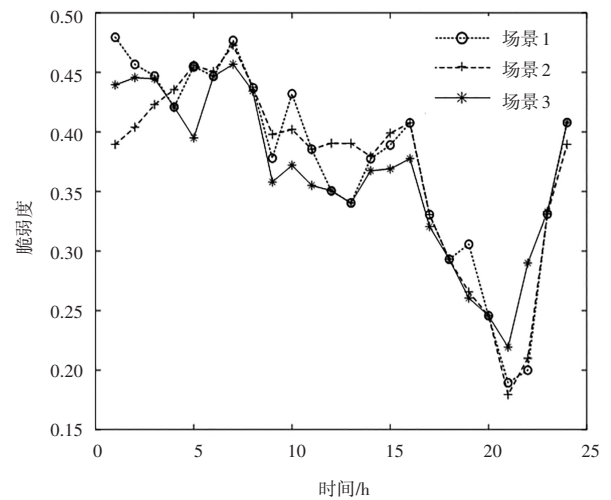


图 5 不同场景下节点脆弱度

Fig. 5 Node vulnerability under different scenarios

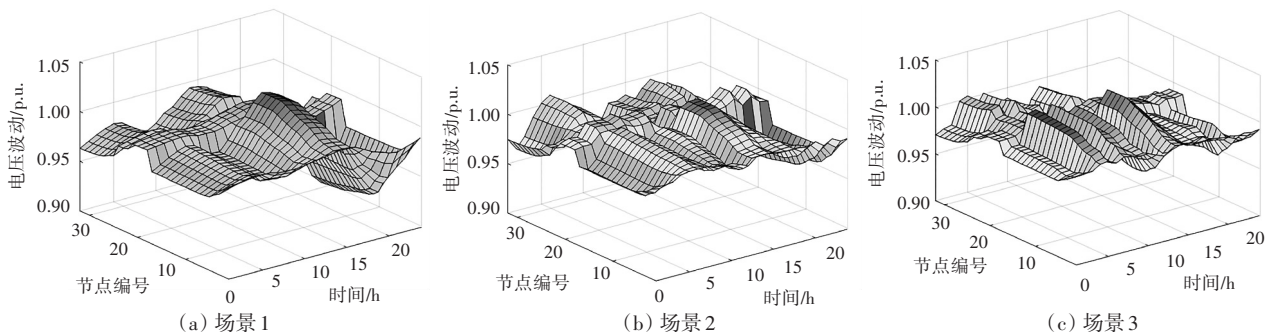


图 6 不同场景下节点电压波动曲线

Fig. 6 Voltage fluctuation of nodes under different scenarios

4.3.2 储能削峰填谷分析

由于高渗透率分布式光伏的接入,其出力不确定性和波动性导致配电网负荷波动加剧,而分布式储能系统具有较强的能量存储和及时输出能力,能够在负荷需求较大时释放电能,在负荷需求低谷时储存电能,有效减小负荷波动,从而实现削峰填谷的作用。从图 7 可以看出,场景 1 在只接入 5 个分布式光伏时,负荷波动的峰谷差较大,差值达到 0.12 p. u.,波动加剧,这是由于分布式光伏的出力曲线呈现倒 U 型,在白天时出力较大,入夜则快速消失。

场景 2 的负荷曲线波动程度较场景 1 有所降低,但仍存在明显的波动。和场景 2 的优化相比,场景 3 架构了主从模型进行储能优化,负荷峰谷差减小,负荷波动更为平缓,尖峰更加平滑,储能削峰填谷、平滑波动的能力更强,

进一步证明了主从博弈模型能够有效地协调储能系统的运行,充分发挥其对负荷波动的平抑作用,提高电网的稳定性和可靠性。

4.3.3 储能经济性分析

表 5 所示为不同场景下储能运营成本。相较于场景 2,场景 3 的储能安装成本更便宜,通过削峰填谷和参与需求响应获得的收益都更高,说明该场景下,储能的安装位置与充放电策略更加合理。通过对以上 3 个场景的分析,可以看出主从博弈模型在优化储能经济性方面具有显著优势,可以根据实时的电价波动和电网需求,灵活调整储能的充放电策略,以实现最大的经济收益。为配电网中储能系统的合理规划和运行提供了有力的决策支持。

表5 分布式储能运行成本

Tab. 5 Operation cost of DES

元

情景	安装成本	运行成本	维护成本	峰谷套利	网损收益	需求响应收益	储能运行成本
场景2	1.38E+01	6.54E+01	1.34E+02	7.30E+02	6.70E+02	6.54E+02	-1.84E+03
场景3	8.46E+00	2.94E+01	8.73E+01	8.02E+02	6.83E+02	6.55E+02	-2.02E+03

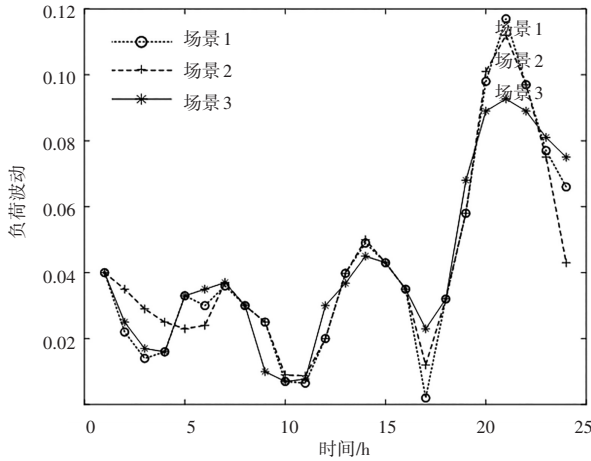


图7 不同场景下负荷波动

Fig. 7 Load fluctuation under different scenarios

### 5 结论

本文主要从配电网运营商与分布式储能运营商之间的安全经济运行出发,将配电网与分布式储能决策制定视为对立主体,通过建立主从博弈推演模型,以获取储能节点及容量配置与储能充放电博弈均衡策略,从而达到配电网安全性与分布式储能经济性均衡状态。研究表明,所建立的主从博弈推演方法可模拟出配电网运营商和分布式储能运营商之间的策略互动,并在策略不断迭代过程中达到均衡状态,且均衡状态下的配电网安全性与分布式储能的经济性均能够得到有效提升。

### 参考文献

[1]周孝信,赵强,张玉琼,等. “双碳”目标下我国能源电力系统发展趋势分析:绿电替代与绿氢替代[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(17):6707-6721.

[2]李令宇,程浩忠,张衡,等. 含高比例新能源电力系统的低碳电源规划方法[J]. 电测与仪表, 2025, 62(7):30-37.

[3]韦明杰,王聪博,余越,等. 适用高比例分布式光伏接入的配电网多级保护优化配置方案[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22):55-65.

[4]和敬涵,王语然,李猛,等. 基于电流波形畸变特征的高比例光伏配电网故障方向判别原理[J]. 电网技术, 2023, 47(12):4856-4867.

[5]刘军会,龚健,佟炳坤,等. 基于分布式储能与光伏的虚拟电厂与配电网协同优化方法[J]. 中国电力, 2025, 58(6):1-9.

[6]郭卓辰,刘继春,杨知方,等. 供电短缺下微网客户与移动储能端对端交易模式及调度策略[J]. 电网技术, 2022, 46(12):4873-4886.

[7]彭婧,柴宜,田云飞,等. 多目标蝗虫算法在分布式储能优化配置的工程应用研究[J]. 自动化与仪器仪表, 2025(3):288-294.

[8]杨耀. 考虑新能源发电不确定性的新型输电网自动化规划模型设计[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(2):176-180.

[9]陈艳波,武超,焦洋,等. 考虑需求响应与储能寿命模型的火储协调优化运行策略[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(2):16-24.

[10]刘闯,孙傲,王艺博,等. 计及电熔镁负荷与储能联合调峰的电力系统日前-日内联合经济调度方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(2):8-15.

[11]周文俊,徐艺敏,曹毅,等. 基于多点分布式储能协调控制的配电网时序承载力优化仿真研究[J]. 自动化技术与应用, 2025, 44(5):103-107.

[12]赵宇,李谦,张云晓,等. 含分布式能源配电网中考虑供电可靠性的混合储能优化配置[J]. 智慧电力, 2024, 52(8):25-32,49.

[13]张钰,吴瑞,童薇,等. 考虑高比例新能源发电接入的配电网分布式储能优化配置[J]. 电气技术, 2025, 26(12):16-23.

[14]王世谦,韩丁,王楠,等. 基于双层主从博弈的主动配电网协同调度[J]. 中国电力, 2025, 58(9):105-114.

[15]严干贵,陈佰会,王佳琪,等. 计及综合需求响应的综合能源系统主从博弈优化调度策略[J]. 东北电力大学学报, 2024, 44(4):46-55,85.

[16]董军,方琳怡,姚文璐,等. 基于主从博弈的综合能源系统多能定价及调度优化[J]. 浙江电力, 2024, 43(9):19-28.

[17]Ma L, Jiang S, Qian R, et al. Multi-energy microgrid operation optimization strategy on stackelberg game considering energy service price[C]//2023 3rd International Conference on Intelligent Power and Systems (ICIPS). Shenzhen:IEEE, 2023:287-296.

[18]李鹏,吴迪凡,李雨薇,等. 基于综合需求响应和主从博弈的多微网综合能源系统优化调度策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(4):1307-1321.

[19]史文超,李晓明,王孝琳,等. 配电网脆弱性评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12):125-131.

[20]李红,王浩,董海鹰,等. 考虑配电网脆弱性与经济性的储能优化配置[J]. 南方电网技术, 2025, 19(11):132-140.

[21]黄牧涛,张静姝,陈兴邦,等. 计及CVaR和需求侧响应的新型电力系统储能分层优化调峰[J]. 水电能源科学, 2025, 43(5):215-220.

[22]李军徽,张嘉辉,李翠萍,等. 参与调峰的储能系统配置方案及经济性分析[J]. 电工技术学报, 2021, 36(19):4148-4160.

[23]文星,蔺红. 考虑DR的配电网电压有功无功协同优化[J]. 控制工程, 2024, 31(11):1992-1999.

[24]叶倩琳,王万良,王铮. 多目标粒子群优化算法及其应用研究综述[J]. 浙江大学学报(工学版), 2024, 58(6):1107-1120,1232.

[25]龚正朋. 光储系统两阶段优化调度策略及分时电价优化研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2021.