

# 多微电网共享储能的优化配置及其成本分摊

李咸善,解仕杰,方子健,李飞,程杉

(三峡大学 梯级水电站运行与控制湖北省重点实验室,湖北 宜昌 443002)

**摘要:**为解决多微电网中共享储能优化配置及其成本的公平分摊问题,提出多微电网共享储能的多目标优化配置及其成本的改进Shapley值法公平分摊方法。该方法包括2个阶段:在阶段1,提出多微电网共享储能多目标优化配置模型,将共享储能用于平抑多微电网净负荷功率波动,以共享储能成本最小和多微电网净负荷方差最小为目标建立优化模型,利用非支配排序遗传算法(NSGA-II)求出其Pareto前沿面,再利用模糊隶属度函数筛选Pareto前沿面的最优折中解,获得共享储能优化充放电功率和对应的优化配置容量及其成本;在阶段2,提出基于线路功率损耗的改进Shapley值法,并采用该方法在多微电网之间分摊共享储能配置所产生的节省成本。算例结果验证了所提方法的有效性。

**关键词:**多微电网;共享储能;NSGA-II;Pareto前沿面;Shapley值法

**中图分类号:**TM 721

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202110019

## 0 引言

随着我国“双碳”战略的实施,风电、光伏等新能源将迎来更快速发展,微电网中新能源的渗透率将不断提高<sup>[1]</sup>,这将会加大新能源功率波动对微电网及其接入系统安全稳定的影响和运行调度的难度<sup>[2]</sup>。储能可以弥补新能源在随机波动性方面的先天缺陷,从根本上解决高比例新能源消纳的难题,微电网可利用储能的充放电特性平抑系统功率波动,提高新能源消纳能力,减小微电网对其接入系统的功率波动冲击频度,实现微电网的友好并网。微电网的建设与发展对储能资源及其相关服务的需求会明显提高<sup>[3]</sup>。

储能是高成本资源,这使得其在高比例新能源微电网中的规模化应用受到限制。对于多个新能源微电网,通过建设共享储能(SSES(Shared Energy Storage)),可促进储能资源高效应用以及提高系统综合效益,因此需要研究多微电网的储能需求、共享储能的配置及其成本公平分摊方法。

用于平抑微电网功率波动的储能需求与微电网功率波动状况有关,可通过净负荷(负荷减去新能源出力)均方差反映微电网功率波动的平抑状况,以净负荷均方差最小和储能成本最小为目标,可进行微电网储能的优化配置及其成本计算。

当多个微电网接入同一配电网时,若各微电网独立配置储能,各微电网中的储能充放电行为会呈现无序性,导致储能资源浪费、运行效益低下,而组建微电网联盟,建设共享储能,可促进储能资源高效应用,提高系统综合效益,但这需要解决共享储能的优化配置及其成本的公平分摊等关键问题。

当多微电网联合运行配置共享储能时,每个微

电网共享其新能源和负荷预测信息,微电网联盟可直接利用该信息进行多微电网共享储能的配置。在该场景下,可将多个微电网看成一个等效微电网,将每个微电网的新能源出力预测曲线加总成为等效微电网的新能源出力预测曲线,在加总的过程中就实现了对微电网新能源出力的互补效应,从而减小了总的新能源出力预测曲线的波动,这也就减少了平抑功率波动所需要配置的储能;此外,可将每个微电网的负荷预测曲线加总成为等效微电网的负荷预测曲线,在加总的过程中总负荷预测曲线得到了平滑,这也同样减少了平抑功率波动所需要配置的储能。综合上述2个因素,进一步针对平抑总的净负荷曲线(总负荷预测曲线减去总新能源出力预测曲线)的功率波动所需要的储能进行配置,即配置共享储能,这也将节省所需配置的储能。

目前,对于微电网储能配置的研究主要集中在微电网混合储能的配置方面<sup>[4-7]</sup>,同时兼有含电动汽车的微电网储能配置<sup>[8-10]</sup>和考虑源荷波动性的分布式储能配置<sup>[11-12]</sup>。文献[4]通过建立孤岛型微电网混合储能优化配置模型,实现了离散傅里叶变换分段点和混合储能容量的统一优化。文献[5]提出一种由全钒液流电池和先进绝热压缩空气储能组成的混合储能系统。文献[6]针对混合储能在风电平抑中的配置问题,提出一种基于元模型优化算法的混合储能双层优化配置方法。文献[7]提出一种含氢储能和蓄电池的混合储能系统,降低了微电网总净现值成本和平均能源成本。文献[8]提出电动汽车分布式储能的控制策略,提高了可再生能源的可调度性,同时减少了电动汽车充放电切换次数。文献[9]在电动汽车直流快充站的场景下,提出计及源-储-荷功率特性的飞轮储能系统容量配置方法。文献[10]建立微电网净现值模型和用户侧技术接受度

模型,实现了减少光伏弃电量和提高微电网规划周期净现值的目标。文献[11]在考虑分布式发电不确定性的情况下,提出以储能配置容量最小为目标的储能容量优化配置方法。文献[12]基于非合作博弈理论优化各微电网的储能容量配置和购能策略,实现了各微电网的经济调度,有效降低了系统的运行费用。

在共享储能建设和运营方面,文献[13]分析我国储能产业发展现状,提出面向可再生能源消纳的共享储能商业运营模式。文献[14]提出基于组合双向拍卖的共享储能机制,建立以社会福利最大化为目标的混合整数非线性规划模型。文献[15]以社区综合能源系统为研究对象,提出包含共享储能、热电联供以及光伏电源等设备的用户协同优化模型。文献[3]提出云储能这种新的储能共享模式,分析其运行机制和商业模式。文献[16]分析云储能的投资、规划与运行以及服务定价等关键问题。文献[17]研究可再生能源和单一共享储能的多个用户的能源管理问题。文献[18]介绍共享储能系统的原理及运行机制,并对共享储能的发展进行展望。文献[19]提出共享储能分布式优化策略,降低了整个电网的总能源运行成本和峰谷差率。

综上所述,目前针对多微电网系统的共享储能配置及其成本分摊方法尚欠缺深入研究。为此,本文提出多微电网共享储能的多目标优化配置及其成本分摊方法。主要工作及解决的关键问题如下。

1)多微电网的共享储能多目标优化配置。建立多微电网的共享储能成本最小和储能平抑功率波动之后的净负荷均方差最小的多目标优化模型,利用带有精英保留策略的快速非支配排序遗传算法(NSGA-II)求出其Pareto前沿面,再利用模糊隶属度函数筛选Pareto前沿面的最优折中解,获得共享储能优化充放电功率和对应的优化配置容量及其成本。

2)多微电网共享储能配置成本的公平分摊。采用上述多目标优化模型计算各微电网单独配置储能所需要的虚拟成本;将各微电网单独配置储能的虚拟成本加总减去多微电网共享储能配置成本,获得共享储能的节省成本;提出基于线路功率损耗的改进Shapley值法,并采用该方法在多微电网之间分摊共享储能配置所产生的节省成本;以各微电网独立配置储能的虚拟成本减去Shapley值法所分摊的节省成本,得到各微电网应分摊的共享储能配置成本。

3)通过算例定量分析共享储能优化配置结果及其效益和影响因素,验证本文方法的有效性。

## 1 多微电网共享储能系统框架

图1为多微电网共享储能系统框架,图中 $MG_1$ 、

$MG_2$ 、 $\dots$ 、 $MG_n$ 为在配电网不同地点分散接入的 $n$ 个微电网。多微电网能量产消信息共享组成微电网联盟,微电网联盟配置共享储能用于平抑联盟的净负荷波动,通过多微电网之间能量产消的互补特性,提升储能资源的利用率。

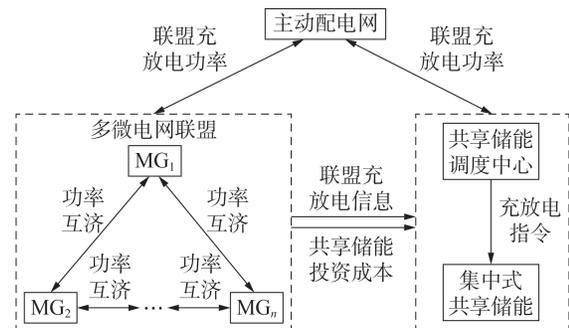


图1 多微电网共享储能系统框架

Fig.1 Framework of multi-microgrid system with SES

配置的集中式共享储能在配电网的某一节点通过双向DC/AC变流器实现并网。多微电网之间的互济功率以及多微电网联盟的充放电功率均通过配电网进行传输。

## 2 多微电网共享储能配置多目标优化模型

本文不考虑储能利用电网分时电价差套利,仅将储能用于平抑功率波动,每个微电网有其基本储能容量需求。由于储能装置成本较高,若要平抑微电网中的大部分功率波动,则需要投入大量资金购入储能设备,有失经济性;若只平抑较大部分的功率波动,虽然保证了经济性,但微电网中的净负荷均方差会较大,影响微电网的电能质量及微电网的友好并网。因此,微电网的储能配置成本和平抑功率波动之后的净负荷均方差是一对矛盾体。为此,本文提出微电网储能配置的多目标优化模型,以储能的成本最小为经济性目标,以微电网使用储能后的净负荷均方差最小为功率波动性平抑目标进行多目标优化。

当多个属于不同利益主体的微电网联合运行时,可将多个微电网联合视作同一微电网,对各微电网净负荷进行加总,以此来配置集中式共享储能,利用各微电网净负荷之间的互补性以最小的储能成本满足多个微电网平抑功率波动的储能需求。

需要说明的是,当将多个微电网联合视作同一微电网时,各微电网净负荷之间的互补性表现为微电网之间的互济交互功率,互济交互功率的费用可在实际调度运行时计及,这并不会影响多微电网集中式共享储能的配置,因此此处不考虑互济交互功率的费用。

根据上述思想建立多微电网共享储能配置的多目标优化模型如下。

## 2.1 目标函数

本文考虑的目标函数主要有2个,分别为集中式共享储能投资成本最小和多微电网的净负荷均方差最小。

1) 目标函数1: 储能投资成本最小。

$$J_1 = C_{SES} = C_{SES\_INV} + C_{SES\_OM} \quad (1)$$

式中:  $J_1$  为储能成本函数;  $C_{SES}$  为集中式共享储能建设运行成本;  $C_{SES\_INV}$  和  $C_{SES\_OM}$  分别为集中式共享储能的建设和运行维护成本, 分别如式(2)、(3)所示。

$$C_{SES\_INV} = \frac{r(1+r)^y}{365[(1+r)^y - 1]} (\alpha E_{SES}^{Cap} + \beta P_{SES}^{Cap}) \quad (2)$$

$$C_{SES\_OM} = \gamma \sum_{t=1}^T (D_{SES\_C}^t P_{SES\_C}^t + D_{SES\_D}^t P_{SES\_D}^t) \quad (3)$$

式中:  $r$  为折现率;  $y$  为储能的使用年限;  $E_{SES}^{Cap}$  和  $P_{SES}^{Cap}$  分别为集中式共享储能的能量容量和功率容量;  $\alpha$  和  $\beta$  分别为单位能量容量成本和单位功率容量成本;  $\gamma$  为储能充放电单位成本;  $T$  为一天所分的调度时段数量, 本文取值  $T=24$ ;  $D_{SES\_C}^t$  和  $D_{SES\_D}^t$  为二进制0-1变量, 其值取1时分别表示集中式共享储能在  $t$  时段进行充电和放电操作, 当  $D_{SES\_C}^t=1$  时,  $D_{SES\_D}^t=0$ , 反之亦然;  $P_{SES\_C}^t$  和  $P_{SES\_D}^t$  分别为集中式共享储能在  $t$  时段的充电和放电功率。

2) 目标函数2: 净负荷均方差最小。

$$J_2 = \sum_{t=1}^T \frac{(P_{Load}^t - P_{New}^t + P_{SES\_C}^t - P_{SES\_D}^t - P_{ave})^2}{T} \quad (4)$$

$$P_{ave} = \frac{\sum_{t=1}^T (P_{Load}^t - P_{New}^t + P_{SES\_C}^t - P_{SES\_D}^t)}{T} \quad (5)$$

式中:  $J_2$  为净负荷均方差函数;  $P_{Load}^t$  为多微电网在  $t$  时段的负荷功率总和;  $P_{New}^t$  为多微电网在  $t$  时段的新能源功率总和;  $P_{ave}$  为多微电网的等效负荷平均值。

## 2.2 约束条件

1) 储能充放电约束。

$$0 \leq P_{SES\_C}^t, P_{SES\_D}^t \leq P_{SES}^{Cap} \quad (6)$$

$$D_{SES\_C}^t D_{SES\_D}^t = 0 \quad (7)$$

式(7)表示集中式共享储能不可同时进行充电和放电操作。

2) 储能电量上下界约束。

$$S_{SOC}^{\min} E_{SES}^{Cap} \leq E_{SES}^t \leq S_{SOC}^{\max} E_{SES}^{Cap} \quad (8)$$

式中:  $S_{SOC}^{\min}$ 、 $S_{SOC}^{\max}$  和  $E_{SES}^t$  分别为集中式共享储能的最小、最大荷电状态和在  $t$  时段的电量。

3) 储能相邻两时段的电量关系。

$$E_{SES}^t = E_{SES}^{t-1} + \Delta t (\eta_{SES}^c P_{SES\_C}^t - P_{SES\_D}^t / \eta_{SES}^d) \quad (9)$$

式中:  $\Delta t$  为储能相邻两时段的时间间隔, 本文取值  $\Delta t=1$  h;  $\eta_{SES}^c$  和  $\eta_{SES}^d$  分别为集中式共享储能的充电和放电效率。

4) 储能一天始、末电量相等约束。

$$E_{SES}^0 = E_{SES}^T \quad (10)$$

式中:  $E_{SES}^0$  为一个调度周期中储能的初始电量。

## 3 多微电网共享储能配置成本分摊

### 3.1 共享储能配置成本分摊方案

由于各微电网属于不同的利益主体, 其能量产销特性各异, 对共享储能的使用需求度不尽相同。当各微电网作为共享储能的投资主体共同投资建设共享储能时, 需要解决共享储能配置成本在多微电网之间的分摊问题。

多微电网共同投资建设共享储能的成本要少于每个微电网单独建设自身储能的成本之和, 后者减去前者即为多微电网配置共享储能所产生的节省成本。本文将基于改进 Shapley 值法在多微电网之间分摊共享储能所产生的节省成本, 每个微电网自身建设储能的成本减去改进 Shapley 值法所分摊的节省成本, 即为该微电网应分摊的共享储能配置成本。

### 3.2 共享储能节省成本的常规 Shapley 值法分摊

Shapley 值法可以有效解决多个局中人在合作过程中因利益分摊而产生矛盾的问题, 其目标是构造一种综合考虑冲突各方要求的折中的效用分摊方案, 从而保证分摊的公平性。多微电网共同投资使用共享储能所产生的节省成本, 可看作多微电网共同投资共享储能所产生的利益, 因此可利用 Shapley 值法对该节省成本在多微电网之间进行分摊。

微电网  $MG_i$  在参与联盟  $S$  时共有  $(|S|-1)!$  种排序, 其中  $|S|$  为联盟  $S$  所包含的微电网数量, 而剩余  $n-|S|$  个微电网的排序有  $(n-|S|)!$  种, 微电网  $MG_i$  参与的不同排序组合除以  $n$  个微电网的随机排序组合就是微电网  $MG_i$  在整个联盟中所应分得利益的权重, 即  $\frac{(|S|-1)!(n-|S|)!}{n!}$ 。

微电网  $MG_i$  参与不同联盟  $S$  为自身和联盟创造的边际贡献记为  $v(S) - v(S \setminus \{i\})$ , 则可以计算得到微电网  $MG_i$  从总体利益 (即建设共享储能所产生的节省成本) 中所分得的利益  $\varphi_i(v)$  如式(11)所示。

$$\varphi_i(v) = \sum_{SCN} \frac{(|S|-1)!(n-|S|)!}{n!} (v(S) - v(S \setminus \{i\})) \quad (11)$$

式中:  $N=\{1, 2, \dots, n\}$ ;  $v(S)$  为  $MG_i$  参与联盟  $S$  时整个联盟  $S$  所产生的利益;  $v(S \setminus \{i\})$  为除去微电网  $MG_i$  时联盟  $S$  所产生的利益。

### 3.3 考虑线路功率损耗的改进 Shapley 值法

对称性是 Shapley 值法的重要性质之一, 常规 Shapley 值法将每个参与者理想地归为同一类别, 并没有考虑到每个参与者自身在某些方面的独特性。在本文的场景下, 采用3.2节的常规 Shapley 值法对共享储能的节省成本进行分摊, 本质上是将  $n$  个微

电网的分摊权重均设置为  $1/n$ ,这是一种较为理想的分摊思想。该方法只考虑了参与者对联盟的边际贡献,而忽略了每个参与者的个体差异性。对于每个微电网而言,由于地理位置存在差异,各微电网向共享储能进行充放电时,利用配电网线路传输电能的损耗各不相同,因此在节省成本的分摊中应考虑线路损耗的相关因素。

各微电网与共享储能安装地点之间转移阻抗(电气距离)的大小能够反映功率传输损耗的大小。对于转移阻抗大的微电网而言,在其对共享储能进行充放电时,所产生的电能损耗较大,为了使其参与多微电网联盟共同投资共享储能,应对其进行鼓励,因此,对联盟中转移阻抗大的微电网可以适量增加其节省成本的分摊量。设微电网  $MG_i$  的新权重  $R_i$  为:

$$R_i = \frac{Z_{MG_i\_SES}}{\sum_{i \in S} Z_{MG_i\_SES}} \quad (12)$$

式中:  $Z_{MG_i\_SES}$  为微电网  $MG_i$  与集中式共享储能之间的转移阻抗。所有的权重满足  $\sum_{i=1}^n R_i = 1$ , 可以得出微电网  $MG_i$  的新权重与旧权重之差  $\Delta R_i$  为:

$$\Delta R_i = R_i - 1/n \quad (13)$$

对于所有微电网的权重之差,有  $\sum_{i=1}^n \Delta R_i = 0$ 。利用  $\Delta R_i$  可以对常规 Shapley 值法的分摊结果进行微调,微增量  $\Delta \varphi_{-i}(v)$  为:

$$\Delta \varphi_{-i}(v) = \Delta R_i v(S) \quad (14)$$

则微电网  $MG_i$  新的分摊结果为:

$$\varphi_{-i}^*(v) = \varphi_{-i}(v) - \Delta \varphi_{-i}(v) \quad (15)$$

式中:  $\varphi_{-i}^*(v)$  为考虑改进 Shapley 值法后微电网  $MG_i$  所分摊的共享储能节省成本。

#### 4 优化模型的求解步骤及方法

本文优化模型的求解步骤分为如下 2 个阶段,求解流程图如图 2 所示。

1)阶段 1。采集各微电网历史典型日的负荷与新能源数据,对其加总,将所有微电网视为 1 个微电网,根据第 2 节所述多目标优化模型,利用 NSGA-II 在迭代次数  $u$  达到最大值时得到均匀分布的 Pareto 最优解及其所形成的 Pareto 前沿面,然后利用模糊隶属度函数筛选得到其中的最优折中解,进而得到集中式共享储能容量、充放电策略以及建设运行成本。

2)阶段 2。首先计算各种排序情况下微电网联盟共享储能配置的节省成本;然后利用改进 Shapley 值法分摊多微电网建设运行共享储能产生的节省成本;最后将各微电网单独配置储能的虚拟成本减去各微电网所分摊的节省成本,以此计算各微电网分摊到的集中式共享储能的成本。其中,基于 Shapley 值法的各种微电网排序情况下的储能配置及其成本

计算均采用第 2 节中的多目标优化模型。

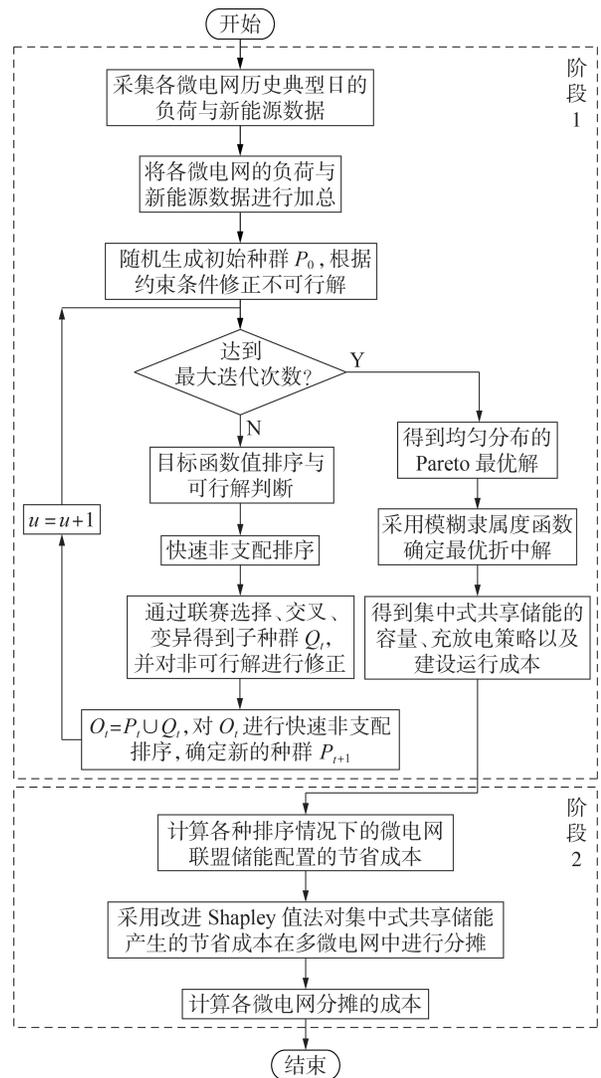


图 2 模型求解流程

Fig.2 Flowchart of model solution

2 个阶段均涉及多目标优化模型的求解,本文采用 NSGA-II 进行求解。本文多目标函数为储能建设运行成本和净负荷均方差最小。2 个目标函数的单位和量级均不同,因此采用文献[20]所述的偏小型模糊集决策理论构建模糊隶属度函数,函数值越大则满意程度越高。在 NSGA-II 求得的 Pareto 前沿面上各最优解的模糊隶属度函数取值为决策满意程度,在所有 Pareto 最优解中取满意程度最高的解作为多目标优化问题的最优折中解。其中模糊隶属度函数为:

$$\xi_m = \begin{cases} 1 & J_m \leq J_m^{\min} \\ \frac{J_m^{\max} - J_m}{J_m^{\max} - J_m^{\min}} & J_m^{\min} < J_m < J_m^{\max} \\ 0 & J_m \geq J_m^{\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中:  $\xi_m$  为标准化条件下第  $m$  个目标函数的满意程度值;  $J_m$  为第  $m$  个目标函数值;  $J_m^{\max}$  和  $J_m^{\min}$  分别为第  $m$

个目标函数的最大值和最小值。以满意度为评价指标,则标准化最优计算如式(17)所示。

$$\xi^k = \frac{\sum_{m=1}^M \xi_m^k}{\sum_{l=1}^K \sum_{m=1}^M \xi_m^l} \quad (17)$$

式中: $\xi^k$ 为标准化条件下第 $k$ 个最优解的满意程度值; $M$ 为目标函数的数量; $K$ 为Pareto前沿面上的最优解数量。

## 5 算例分析

### 5.1 算例参数

采用某地3个微电网的相关数据进行研究,各微电网在典型日的负荷曲线和新能源出力曲线见附录A图A1—A3。算例以IEEE 14节点系统为基础进行仿真计算,系统结构见附录A图A4。系统中,节点6、11、13各接入1个微电网,共享储能设置在节点12,与3个微电网构成含共享储能的多微电网系统。参数为: $\eta_{SES}^C = \eta_{SES}^D = 95\%$ ,  $\alpha = 1000$ 元/(kW·h),  $\beta = 3500$ 元/kW,  $\gamma = 0.1542$ 元/kW,  $r = 8\%$ ,储能使用年限为10a。

### 5.2 多微电网共享储能的配置及其成本分摊结果

利用本文所提多目标优化模型,针对2个场景进行微电网储能的优化配置,并比较分析多微电网配置共享储能的优势:场景1,微电网MG<sub>1</sub>—MG<sub>3</sub>单独配置自身储能;场景2,微电网MG<sub>1</sub>—MG<sub>3</sub>共同投资配置集中式共享储能。

场景1下MG<sub>1</sub>—MG<sub>3</sub>的多目标优化模型的Pareto前沿面如附录B图B1—B3所示。图3为场景2下集中式共享储能多目标优化模型的Pareto前沿面。表1为场景1下Pareto前沿面的最优折中解,包括各微电网单独配置的储能容量(能量容量 $E_i^{Cap}$ 和功率容量 $P_i^{Cap}$ )及储能配置成本 $C_{ESS,i}$ 。由表可见,3个微电网独立配置储能的总投资成本为8514.58元。在场景2下采用同样的方法得到3个微电网配置的共享储能容量(其中能量容量 $E_{SES}^{Cap} = 4465$  kW·h,功率容量 $P_{SES}^{Cap} = 985$  kW)和共享储能配置成本( $C_{SES} = 4613.37$ 元,小于场景1下的储能总投资成本)。比较配置共享储能前、后多微电网净负荷均方差的大小发现,配置共享储能后多微电网净负荷均方差被

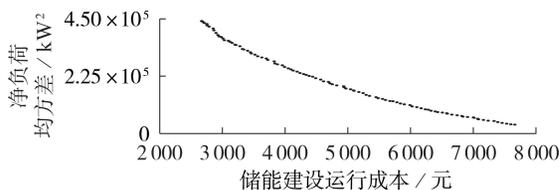


图3 场景2下集中式共享储能配置的Pareto前沿面

Fig.3 Pareto front of centralized SES configuration under Scenario 2

表1 场景1下单个微电网储能多目标优化配置结果

Table 1 Multi-objective optimal configuration results of single microgrid under Scenario 1

微电网	$E_i^{Cap}$ / (kW·h)	$P_i^{Cap}$ / kW	$C_{ESS,i}$ / 元
MG <sub>1</sub>	4011	508	3354.00
MG <sub>2</sub>	1988	472	2099.97
MG <sub>3</sub>	3546	493	3060.61
加总	9545	1473	8514.58

平抑的比例为75.32%,净负荷均方差明显减小。

图4为场景2下Pareto前沿面的最优解所对应的集中式共享储能充放电功率及储能电量。图5为多微电网初始净负荷和使用集中式共享储能后的净负荷对比。由图5可见,多微电网使用共享储能后的净负荷波动性明显降低,较初始净负荷有明显改善。

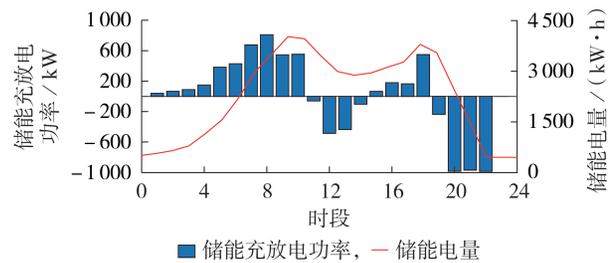


图4 场景2下集中式共享储能的充放电功率及储能电量  
Fig.4 Charging and discharging power and energy of centralized SES under Scenario 2

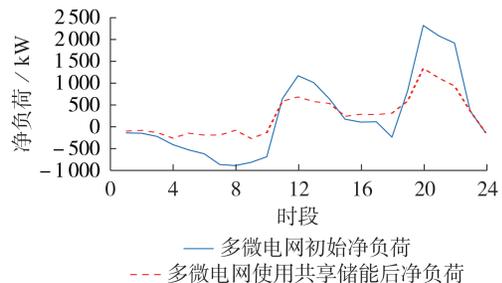


图5 多微电网使用共享储能前、后净负荷对比  
Fig.5 Comparison of net load between before and after multi-microgrid using SES

表2为场景2下基于Shapley值法的各种排序的微电网联盟配置共享储能的节省成本。表3为基于常规与改进Shapley值法的共享储能成本分摊结果。在考虑各微电网与共享储能之间的转移阻抗因素之后,由于微电网MG<sub>2</sub>与共享储能之间的转移阻抗比微电网MG<sub>1</sub>和MG<sub>3</sub>的大,为了鼓励其加入多微电网联盟共同投资共享储能,基于转移阻抗这一因素,提高其分摊权重,降低微电网MG<sub>1</sub>和MG<sub>3</sub>的分摊权重。微电网MG<sub>2</sub>的分摊权重提高0.13098,微电网MG<sub>1</sub>、MG<sub>3</sub>的分摊权重分别降低0.07198和0.05900。由表3可以看出,相较于常规Shapley值法,改进Shapley值法下微电网MG<sub>1</sub>和MG<sub>3</sub>所分摊的节省成本

表2 场景2下各种排序的微电网联盟配置共享储能的节省成本

Table 2 Cost saving of microgrid alliance configured with SES for various sequences under Scenario 2

序号	联盟形式	节省成本 / 元
1	{MG <sub>1</sub> }	0
2	{MG <sub>2</sub> }	0
3	{MG <sub>3</sub> }	0
4	{MG <sub>1</sub> , MG <sub>2</sub> }	1452.82
5	{MG <sub>1</sub> , MG <sub>3</sub> }	3063.08
6	{MG <sub>2</sub> , MG <sub>3</sub> }	979.76
7	{MG <sub>1</sub> , MG <sub>2</sub> , MG <sub>3</sub> }	3901.21

表3 基于常规与改进 Shapley 值法的共享储能成本分摊结果

Table 3 Allocation results of SES cost based on conventional and improved Shapley value methods

微电网	C <sub>ESS,i</sub> / 元		节省成本 / 元		SES 分摊成本 / 元	
	常规 Shapley 值法	改进 Shapley 值法	常规 Shapley 值法	改进 Shapley 值法	常规 Shapley 值法	改进 Shapley 值法
MG <sub>1</sub>	3354.00	3354.00	1726.47	1445.66	1627.53	1908.34
MG <sub>2</sub>	2099.97	2099.97	684.81	1195.79	1415.16	904.18
MG <sub>3</sub>	3060.61	3060.61	1489.97	1259.80	1570.64	1800.81

有所下降,微电网MG<sub>2</sub>所分摊的节省成本有所上升,这表明改进 Shapley 值法能够有效修正各微电网因共享储能而产生的线路功率损耗对成本分摊结果的影响。场景1下微电网MG<sub>1</sub>—MG<sub>3</sub>的储能充放电功率及储能电量分别见附录B图B4—B6。上述结果一方面体现了采用本文方法可实现多微电网共享储能的优化配置及其成本分摊,另一方面也体现了采用共享储能具有更好的投资效益。

### 5.3 共享储能成本与多微电网错峰效应之间的关系

为了分析多微电网之间净负荷的错峰效应对共享储能容量配置的影响,本文提出一种多微电网净负荷互补度的计算方法,如式(18)所示。

$$\tau = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T \frac{\left| \sum_{i=1}^n (P_{Load,i}^t - P_{New,i}^t) \right|}{\sum_{i=1}^n |P_{Load,i}^t - P_{New,i}^t|} \quad (18)$$

式中:τ为多微电网的净负荷互补度,且0≤τ≤1。当

τ=0时,表明多微电网之间的净负荷完全互补,此时错峰效应最明显;当τ=1时,表明多微电网之间的净负荷之间没有互补性,此时各微电网之间没有明显的错峰效应。由于各微电网的负荷基值不同,因此将多微电网之间的错峰效应和共享储能节省成本的关系按百分比对照分析。

理论上,可以预计各微电网之间错峰效应越明显,配置共享储能的运行成本将会节省得越多。为了验证该结论,再增设场景3和场景4,通过对场景2—4进行仿真来研究错峰效应与集中式共享储能配置成本之间的关系。其中,场景3为微电网MG<sub>1</sub>、MG<sub>3</sub>、MG<sub>4</sub>共同投资一个集中式共享储能;场景4为微电网MG<sub>1</sub>、MG<sub>4</sub>、MG<sub>5</sub>共同投资一个集中式共享储能。

微电网MG<sub>4</sub>和MG<sub>5</sub>在典型日的负荷曲线以及新能源出力曲线分别如附录A图A5和图A6所示。表4为场景3和场景4下多微电网共享储能优化配置结果。

表4 场景3和场景4下多微电网共享储能优化配置结果

Table 4 Optimal configuration results of SES for multi-microgrid under Scenario 3 and 4

场景	E <sub>SES</sub> <sup>Cap</sup> / (kW·h)	P <sub>SES</sub> <sup>Cap</sup> / kW	C <sub>SES</sub> / 元
3	3481	814	3544.94
4	7081	847	5849.95

表5为采用本文方法所得场景2—4下错峰效应与共享储能成本的关系。由表5可见,多微电网错峰效应越明显(即τ越小),建设共享储能成本节省比例越高,多微电网建设运行共享储能时的投资相较于各微电网自身建设运行储能时的成本节省比例也越高,这也验证了上述理论预计。

微电网MG<sub>4</sub>和MG<sub>5</sub>单独配置储能时的多目标 Pareto 前沿面及场景3和场景4下共享储能的 Pareto 前沿面分别见附录B图B7—B10。微电网MG<sub>4</sub>和MG<sub>5</sub>单独配置储能时的储能充放电功率及储能电量分别见附录B图B11、B12。场景3和场景4下 Pareto 前沿面的最优解所对应的共享储能充放电功率及储能电量分别见附录B图B13、B14。

表5 场景2—4下错峰效应与共享储能成本的关系

Table 5 Relationship between crosspeak effect and SES cost under Scenario 2 to 4

τ	场景	微电网	C <sub>ESS,i</sub> / 元	虚拟总成本 / 元	C <sub>SES</sub> / 元	建设共享储能成本节省比例 / %
0.5384	2	MG <sub>1</sub>	3354.00	8514.58	4613.37	45.82
		MG <sub>2</sub>	2099.97			
		MG <sub>3</sub>	3060.61			
0.4305	3	MG <sub>1</sub>	3354.00	7862.11	3544.94	54.91
		MG <sub>3</sub>	3060.61			
		MG <sub>4</sub>	1447.50			
0.9247	4	MG <sub>1</sub>	3354.00	7078.15	5849.95	17.35
		MG <sub>4</sub>	1447.50			
		MG <sub>5</sub>	2276.65			

## 6 结论

1) 提出多微电网共享储能多目标优化配置策略, 兼顾多微电网的功率波动平抑和储能配置成本建立多目标优化模型, 利用 NSGA-II 求出优化模型的多目标 Pareto 前沿面, 并利用模糊隶属度函数筛选 Pareto 前沿面的最优折中解, 获得共享储能优化配置容量及其投资成本。

2) 利用改进 Shapley 值法在考虑各微电网与共享储能之间的转移阻抗因素下, 对各微电网的分摊权重进行调整, 得到多微电网间分摊共享储能的节省成本, 并计算得到最终各微电网应分摊的共享储能成本, 体现了成本分摊的公平性。

3) 提出一种多微电网之间净负荷错峰效应的计算方法, 探究多微电网集中式共享储能成本与错峰效应之间的关系, 仿真结果表明, 错峰效应越明显 (互补度计算值越小), 建设共享储能成本节省比例越高。

附录见本刊网络版 (<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 陈丽丽, 牟龙华, 许旭锋, 等. 储能装置运行策略及运行特性对微电网可靠性的影响[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(7): 70-76.  
CHEN Lili, MU Longhua, XU Xufeng, et al. Influences of energy storage operational strategy and characteristic on microgrid reliability[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(7): 70-76.
- [2] 窦晓波, 袁简, 吴在军, 等. 并网型风光储微电网容量改进优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 26-32.  
DOU Xiaobo, YUAN Jian, WU Zaijun, et al. Improved configuration optimization of PV-wind-storage capacities for grid-connected microgrid[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 26-32.
- [3] 刘静琨, 张宁, 康重庆. 电力系统云储能研究框架与基础模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(12): 3361-3371, 3663.  
LIU Jingkun, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Research framework and basic models for cloud energy storage in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(12): 3361-3371, 3663.
- [4] 李龙云, 胡博, 谢开贵, 等. 基于离散傅里叶变换的孤岛型微电网混合储能优化配置[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(12): 108-116.  
LI Longyun, HU Bo, XIE Kaigui, et al. Capacity optimization of hybrid energy storage systems in isolated microgrids based on discrete Fourier transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(12): 108-116.
- [5] 齐晓光, 姚福星, 朱天瞳, 等. 考虑大规模风电接入的电力系统混合储能容量优化配置[J/OL]. 电力自动化设备. [2021-08-06]. <https://doi.org/10.16081/j.epae.202107032>.
- [6] 何俊强, 师长立, 马明, 等. 基于元模型优化算法的混合储能系统双层优化配置方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(7): 157-167.  
HE Junqiang, SHI Changli, MA Ming, et al. Bi-level optimal configuration method of hybrid energy storage system based on meta model optimization algorithm[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(7): 157-167.
- [7] 李彦哲, 郭小嘉, 董海鹰, 等. 风/光/储微电网混合储能系统容量优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2020, 32(6): 123-128.  
LI Yanzhe, GUO Xiaojia, DONG Haiying, et al. Optimal capacity configuration of wind/PV/storage hybrid energy storage system in microgrid[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(6): 123-128.
- [8] 李志伟, 赵书强, 刘应梅. 电动汽车分布式储能控制策略及应用[J]. 电网技术, 2016, 40(2): 442-450.  
LI Zhiwei, ZHAO Shuqiang, LIU Yingmei. Control strategy and application of distributed electric vehicle energy storage[J]. Power System Technology, 2016, 40(2): 442-450.
- [9] 王育飞, 王成龙, 薛花, 等. 计及源-储-荷功率特性的飞轮储能系统容量配置方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(1): 119-124, 132.  
WANG Yufei, WANG Chenglong, XUE Hua, et al. Capacity configuration method of flywheel energy storage system considering power characteristics of generation-energy storage-load[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 119-124, 132.
- [10] 杨丽君, 杨博, 安立明, 等. 考虑电动汽车响应的光储微电网储能优化配置[J]. 太阳能学报, 2020, 41(4): 340-347.  
YANG Lijun, YANG Bo, AN Liming, et al. Optimal configuration of grid-connected pv-and-storage microgrid considering EVs' demand response[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2020, 41(4): 340-347.
- [11] 刘舒, 李正力, 王翼, 等. 含分布式发电的微电网中储能装置容量优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(3): 78-84.  
LIU Shu, LI Zhengli, WANG Yi, et al. Optimal capacity allocation of energy storage in micro-grid with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(3): 78-84.
- [12] 张富平, 李志宏, 常好晶, 等. 计及分布式电源不确定性的微网储能容量博弈优化[J]. 可再生能源, 2019, 37(7): 1042-1048.  
ZHANG Fuping, LI Zhihong, CHANG Haojing, et al. Game-based optimization of energy storage capacity for micro-grid considering uncertainty of distributed generation[J]. Renewable Energy Resources, 2019, 37(7): 1042-1048.
- [13] 董凌, 年珩, 范越, 等. 能源互联网背景下共享储能的商业模式探索与实践[J]. 电力建设, 2020, 41(4): 38-44.  
DONG Ling, NIAN Heng, FAN Yue, et al. Exploration and practice of business model of shared energy storage in energy Internet[J]. Electric Power Construction, 2020, 41(4): 38-44.
- [14] 孙偲, 郑天文, 陈来军, 等. 基于组合双向拍卖的共享储能机制研究[J]. 电网技术, 2020, 44(5): 1732-1739.  
SUN Cai, ZHENG Tianwen, CHEN Laijun, et al. Energy storage sharing mechanism based on combinatorial double auction[J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1732-1739.
- [15] 王仕俊, 平常, 薛国斌. 考虑共享储能的社区综合能源系统协同优化研究[J]. 中国电力, 2018, 51(8): 77-84.  
WANG Shijun, PING Chang, XUE Guobin. Synergic optimization of community energy Internet considering the shared energy storage[J]. Electric Power, 2018, 51(8): 77-84.
- [16] 康重庆, 刘静琨, 张宁. 未来电力系统储能的新形态: 云储能[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(21): 2-8, 16.  
KANG Chongqing, LIU Jingkun, ZHANG Ning. A new form of energy storage in future power system: cloud energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(21): 2-8, 16.
- [17] RAHBAR K, VEDADY MOGHADAM M R, PANDA S K, et al. Shared energy storage management for renewable energy integration in smart grid[C]//2016 IEEE Power & Energy

Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT). Minneapolis, MN, USA: IEEE, 2016: 1-5.

- [18] DAI R, ESMAELBEIGI R, CHARKHGARD H. The utilization of shared energy storage in energy systems: a comprehensive review [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12 (4): 3163-3174.
- [19] JO J, PARK J. Demand-side management with shared energy storage system in smart grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11 (5): 4466-4476.
- [20] 邵振, 邹晓松, 袁旭峰, 等. 基于改进多目标粒子群优化算法的配电网削峰填谷优化 [J]. 科学技术与工程, 2020, 20(10): 3984-3989.
- SHAO Zhen, ZOU Xiaosong, YUAN Xufeng, et al. Optimization of peak load shifting in distribution network based on improved MOPSO algorithm [J]. Science Technology and Engineering, 2020, 20(10): 3984-3989.

#### 作者简介:



李咸善

李咸善(1964—),男,湖北安陆人,教授,博士研究生导师,博士,从事微电网运行与控制、电力系统运行与控制、水电站仿真与控制等方面的研究工作(E-mail: lixianshan@ctgu.edu.cn);

解仕杰(1995—),男,湖北黄石人,硕士研究生,通信作者,主要研究方向为电力系统运行与控制、微电网优化调度(E-mail: 873425294@qq.com);

方子健(1997—),男,湖北宜昌人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统运行与控制、微电网优化调度(E-mail: 906702924@qq.com)。

(编辑 王锦秀)

## Optimal configuration of shared energy storage for multi-microgrid and its cost allocation

LI Xianshan, XIE Shijie, FANG Zijian, LI Fei, CHENG Shan

(Hubei Provincial Key Laboratory for Operation and Control of Cascaded Hydropower Station, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** In order to solve the problems of optimal configuration of shared energy storage and fair allocation of its cost in multi-microgrid, a method of multi-objective optimal configuration of shared energy storage and fair allocation of its cost with an improved Shapley value method in multi-microgrid is proposed, which includes two stages. In Stage 1, a multi-objective optimal configuration model for shared energy storage in multi-microgrid is proposed, the shared energy storage is used to suppress the power fluctuation of net load in multi-microgrid, an optimal model with the minimum cost of shared energy storage and minimum variance of net load in multi-microgrid as its objectives is built, its Pareto front is calculated by NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II), then fuzzy membership function is used to select the optimal compromise solution of Pareto front, so as to obtain the optimal charging and discharging power of shared energy storage, together with its corresponding optimal configuration capacity and cost. In Stage 2, an improved Shapley value method based on line power loss is proposed, which is used to allocate the cost saving caused by shared energy storage configuration among multi-microgrid. Case results verify the effectiveness of the proposed method.

**Key words:** multi-microgrid; shared energy storage; NSGA-II; Pareto front; Shapley value method

附录 A:

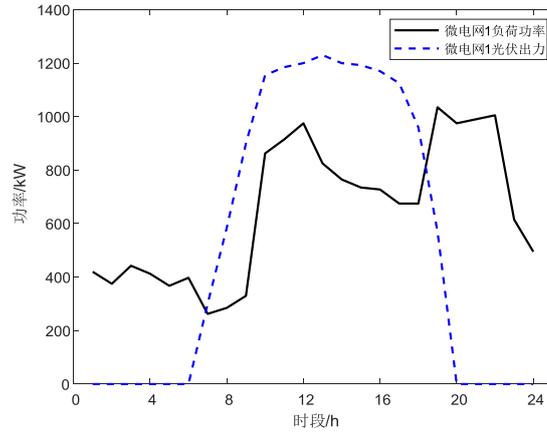


图 A1 MG<sub>1</sub> 的负荷及新能源曲线  
Fig.A1 Load and renewable energy curves of MG<sub>1</sub>

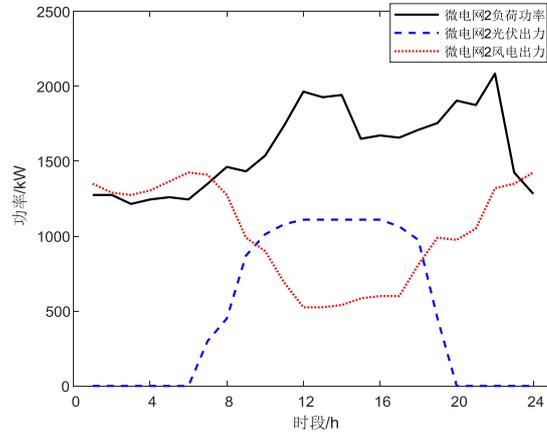


图 A2 MG<sub>2</sub> 的负荷及新能源曲线  
Fig.A2 Load and renewable energy curves of MG<sub>2</sub>

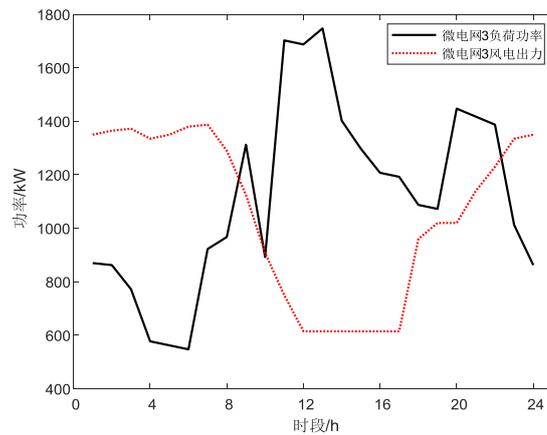


图 A3 MG<sub>3</sub> 的负荷及新能源曲线  
Fig.A3 Load and renewable energy curves of MG<sub>3</sub>

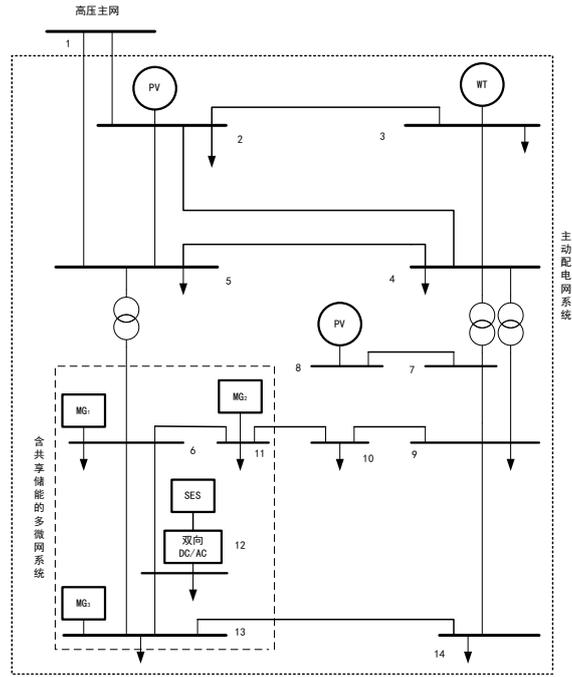


图 A4 含共享储能的多微电网系统结构

Fig.A4 Structure of multi-microgrid system with SES

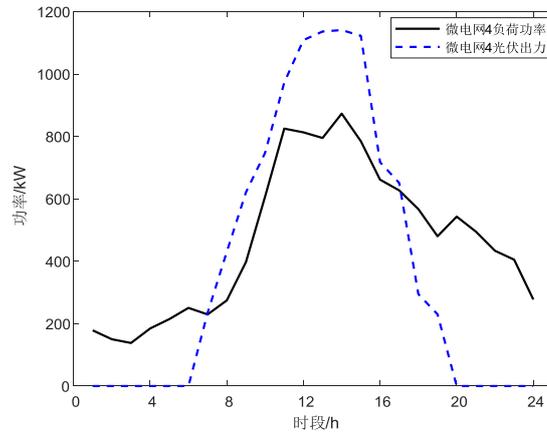


图 A5 MG<sub>4</sub> 的负荷及新能源曲线

Fig.A5 Load and renewable energy curves of MG<sub>4</sub>

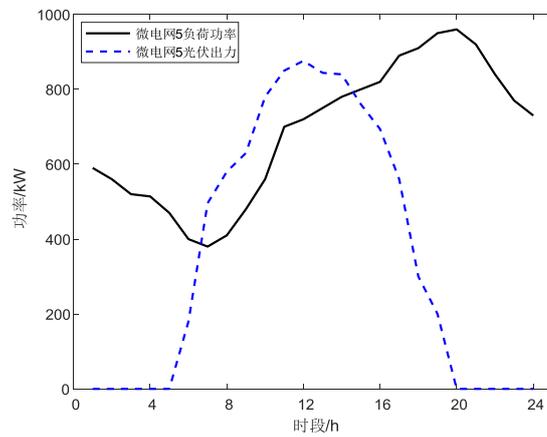


图 A6 MG<sub>5</sub> 的负荷及新能源曲线

Fig.A6 Load and renewable energy curves of MG<sub>5</sub>

附录 B:

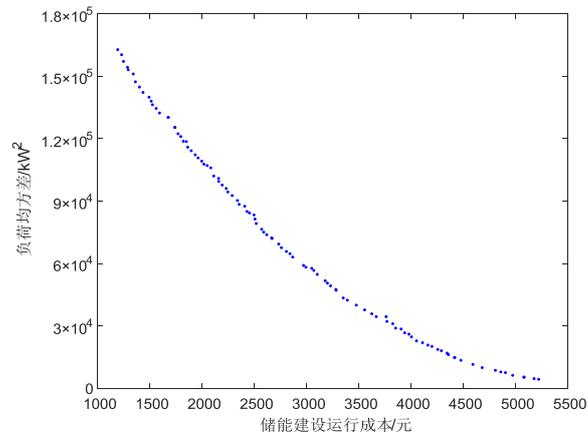


图 B1 场景 1 下 MG<sub>1</sub> 储能配置的 Pareto 前沿面

Fig.B1 Pareto front of energy storage configuration for MG<sub>1</sub> under Scenario 1

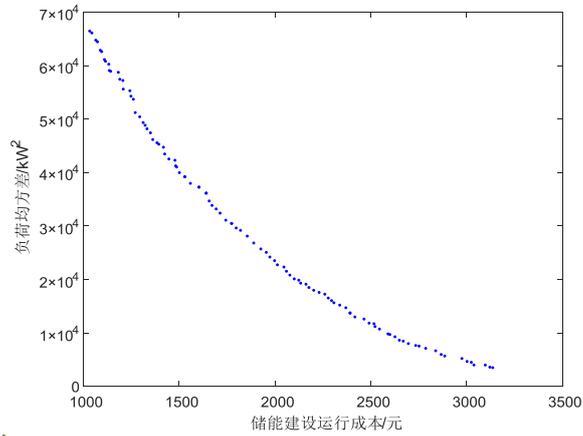


图 B2 场景 1 下 MG<sub>2</sub> 储能配置的 Pareto 前沿面

Fig.B2 Pareto front of energy storage configuration for MG<sub>2</sub> under Scenario 1

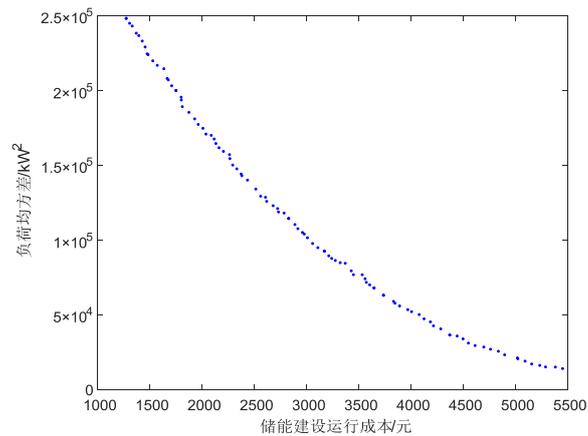


图 B3 场景 1 下 MG<sub>3</sub> 储能配置的 Pareto 前沿面

Fig.B3 Pareto front of energy storage configuration for MG<sub>3</sub> under Scenario 1

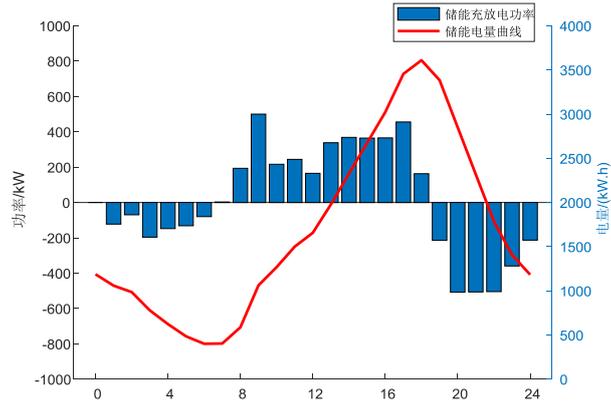


图 B4 场景 1 下 MG<sub>1</sub> 储能的充放电功率及储能电量

Fig.B4 Charging and discharging power and energy storage of MG<sub>1</sub> under Scenario 1

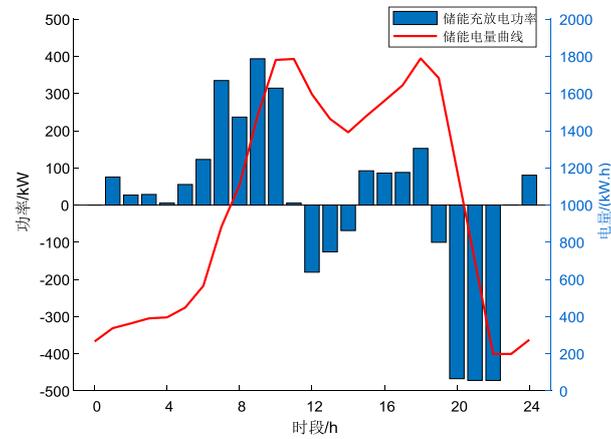


图 B5 场景 1 下 MG<sub>2</sub> 储能的充放电功率及储能电量

Fig.B5 Charging and discharging power and energy storage of MG<sub>2</sub> under Scenario 1

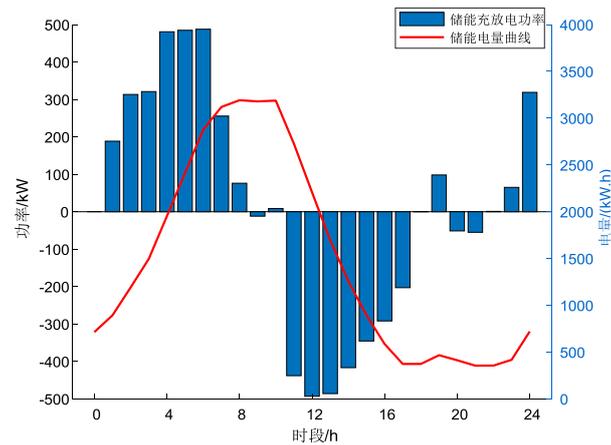


图 B6 场景 1 下 MG<sub>3</sub> 储能的充放电功率及储能电量

Fig.B6 Charging and discharging power and energy storage of MG<sub>3</sub> under Scenario 1

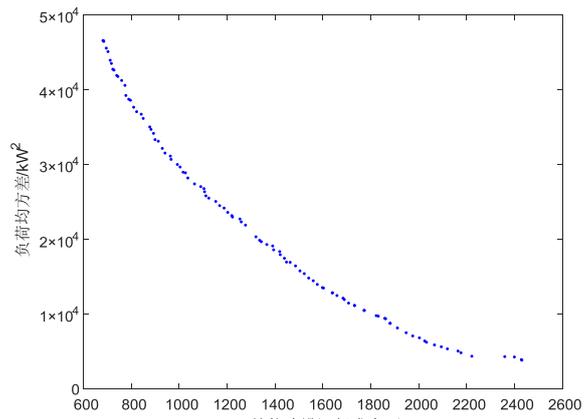


图 B7 MG<sub>4</sub> 的 Pareto 前沿面  
Fig.B7 Pareto front of MG<sub>4</sub>

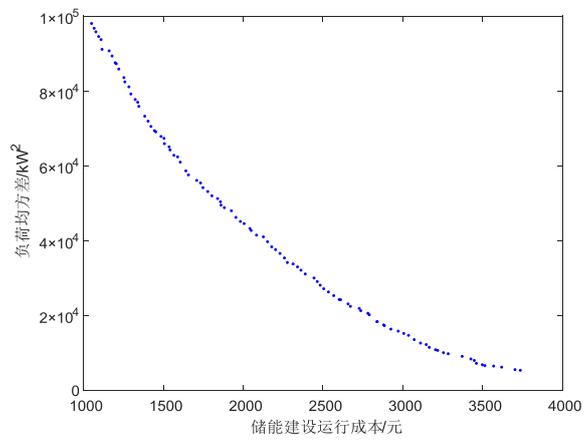


图 B8 MG<sub>5</sub> 的 Pareto 前沿面  
Fig.B8 Pareto front of MG<sub>5</sub>

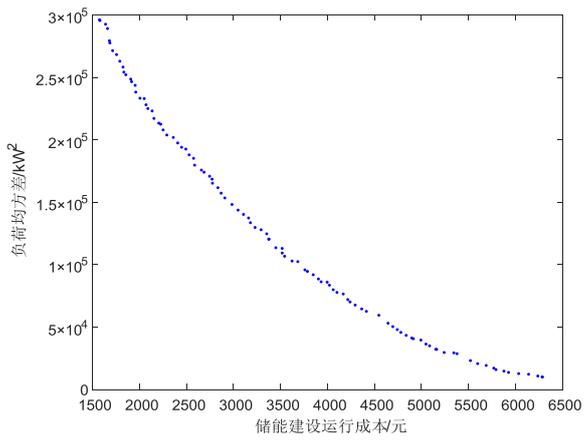


图 B9 场景 3 下集中式共享储能配置的 Pareto 前沿面  
Fig.B9 Pareto front of centralized SES configuration under Scenario 3

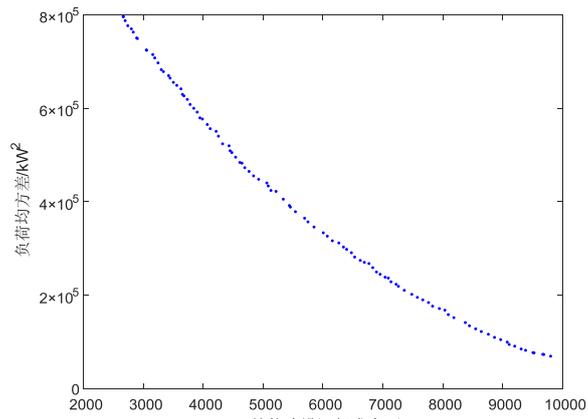


图 B10 场景 4 下集中式共享储能配置的 Pareto 前沿面  
Fig.B10 Pareto front of centralized SES configuration under Scenario 4

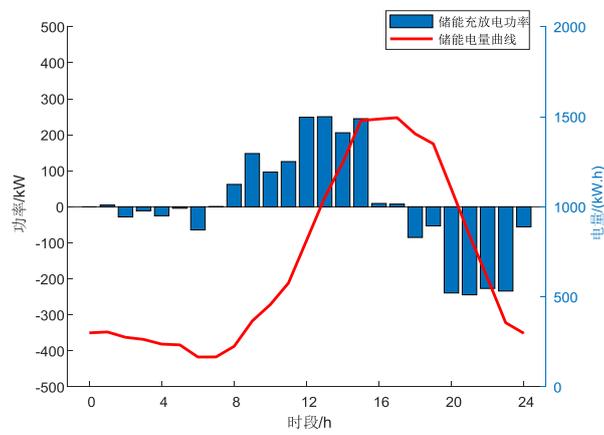


图 B11 MG<sub>4</sub> 储能的充放电功率及储能电量  
Fig.B11 Charging and discharging power and energy storage of MG<sub>4</sub>

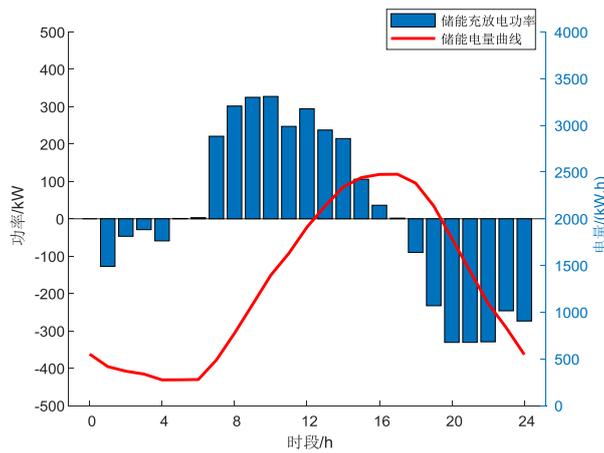


图 B12 MG<sub>5</sub> 储能的充放电功率及储能电量  
Fig.B12 Charging and discharging power and energy storage of MG<sub>5</sub>

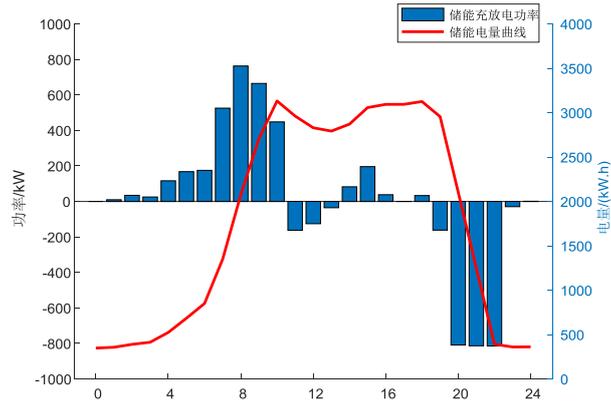


图 B13 场景 3 下集中式共享储能的充放电功率及储能电量

Fig.B13 Charging and discharging power and energy storage of centralized shared storage under Scenario 3

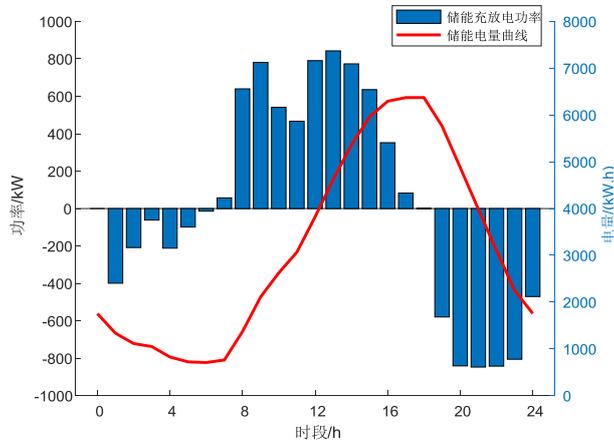


图 B14 场景 4 下集中式共享储能的充放电功率及储能电量

Fig.B14 Charging and discharging power and energy storage of centralized shared storage under Scenario 4