

# 面向微电网群的云储能经济-低碳-可靠多目标优化配置方法

张世旭<sup>1</sup>, 李姚旺<sup>1</sup>, 刘伟生<sup>2</sup>, 孙树敏<sup>2</sup>, 于 芃<sup>2</sup>, 张 宁<sup>1</sup>

(1. 清华四川能源互联网研究院, 四川省成都市 610213; 2. 国网山东省电力公司, 山东省济南市 250001)

**摘要:** 微电网群技术通过多微电网间的协同互补,促进了分布式可再生能源在微电网间的协同消纳,被认为是未来新型电力系统中分布式电源接入电网的重要方式之一。考虑微电网群中多微电网协同互济的特性,提出了一种面向微电网群的“集中共享、分散复用”云储能运营架构。其中,集中式储能面向微电网群中的所有微电网进行共享,以合作共建、容量共享的方式为所有微电网提供服务,旨在降低各微电网的储能使用成本;分布式储能主要服务于微电网群中的各个微电网,以保障各微电网自身的可靠性为主要目标,同时兼顾协同互济的储能复用需求。在此基础上,构建了经济、低碳及可靠多目标驱动的云储能双层优化配置模型,并基于第二代非支配遗传算法实现模型求解。然后,建立了微电网群云储能系统商业模式,基于Shapley值法及系统运行模拟实现云储能系统投资、运营成本及效益的合理分摊,提出云储能初始投资成本的分配方法。最后,基于IEEE 33节点系统搭建微电网群系统并开展算例分析,结果显示所提方法可提出面向不同投资偏好的云储能配置方案解集,并验证了云储能模式提升系统投资运营效益的有效性。

**关键词:** 云储能; 微电网群; 优化配置; 多目标优化; 商业模式

## 0 引言

在高比例可再生能源接入的新型电力系统构建进程中,微电网技术作为促进可再生能源分布式并网消纳的重要手段受到了广泛关注<sup>[1-2]</sup>。然而,单一微电网的系统容量及抗扰动能力有限,难以有效适应可再生能源渗透率的持续提升<sup>[3]</sup>。为进一步提升微电网可再生能源消纳能力,促进微电网可靠、高效运行,微电网群技术应运而生<sup>[4]</sup>。其通过不同微电网间的互联互济,促进分布式可再生能源协同消纳,综合提升微电网群的运行灵活性、可靠性<sup>[5]</sup>。

微电网群内负荷及新能源出力呈现复杂随机不确定性,仅通过网间功率交互实现微电网群的多时间尺度功率平衡,仍存在电能频繁传输损耗高、动态响应性能不足等问题。储能装置具备灵活的功率调节与电能时移能力,为支撑微电网群的灵活功率调节提供了有效解决方案<sup>[6]</sup>。目前,已有学者针对面向微电网群的储能配置及运行方法开展了一系列研究工作。文献[7]提出了面向100%绿色能源供电目标的微电网群储能容量优化配置方法。文献[8]计及微电网群负荷分阶段增长及增长量不确定性,

提出了基于主从博弈的微电网群多阶段鲁棒优化规划策略。文献[9]提出了促进分布式光伏高效消纳的光储联合微电网群优化规划方法。上述研究提出了基于各子微电网独立配置储能的微电网群储能优化配置方案,但由于目前储能装置的投资成本依旧高昂,各微电网独立投资储能依然存在储能容量定制困难、储能利用效率较低,以及储能装置的投资回收路径不清晰等问题<sup>[10]</sup>。

“共享经济”模式的出现为微电网群中的储能运营模式提供了新的借鉴思路<sup>[11]</sup>。文献[12]将共享经济模式和储能技术结合,提出了云储能技术的概念,其通过储能资源聚合复用及储能用户需求互补,提升储能资源的利用率,降低储能使用成本<sup>[13]</sup>。不同微电网的能源产销行为各异,各微电网的储能应用需求在充放电时间、充放电状态等维度呈现出一定的互补性<sup>[14]</sup>。因此,云储能技术在微电网群中具备良好的应用前景。目前,云储能在用户电费削减<sup>[15]</sup>、风光机组调频<sup>[16]</sup>、多类型辅助服务供应<sup>[17]</sup>等场景的应用效益已得到了较为广泛的研究,但面向微电网群的云储能应用研究仍然较少。文献[18]以共享储能系统成本最小及多微电网净负荷方差最小为目标,建立多微电网共享储能优化配置模型。文献[14]提出了一种基于两阶段优化及主从博弈的多微电网共享储能调度策略,考虑用户储能租赁需求

收稿日期: 2023-06-15; 修回日期: 2023-11-02。

上网日期: 2023-12-08。

国家电网公司科技项目(4000-202216059A-1-1-ZN)。

互补优化制定储能装置充放电策略。上述研究仅考虑微电网群集中式储能共享,重点关注云储能模式的经济效益,而难以满足各微电网在故障离网等紧急场景下的电能备用等可靠性支撑需求,也未考虑微电网群的低碳性能优化。实际上,在集中式储能共享应用的基础上,为各微电网配置一定容量分布式储能,不仅能通过网间功率互济进一步提升微电网群经济性,还能在应急场景下为各微电网提供备用容量支撑,增强微电网运行可靠性。因此,有必要计及经济、低碳、可靠多类型优化目标耦合,考虑集中式储能与分布式储能的协同共享与复用,创新微电网群云储能系统的优化配置方法。

为此,本文提出一种面向微电网群的云储能经济-低碳-可靠多目标优化配置方法。首先,提出“集中共享、分散复用”的微电网群云储能系统框架。其次,建立计及经济、低碳及可靠性多目标优化的云储能双层优化配置模型,并基于非支配遗传算法实现模型求解。在此基础上,提出云储能系统商业模式,基于运行模拟量化分析微电网对储能充放电导致的收益与成本明细,并基于 Shapley 值法量化评估各微电网对云储能系统的盈利贡献度,为确定云储能系统初始投资成本在各用户间的分配方案提供支撑。最后,基于 IEEE 33 节点系统构建微电网群系统并开展算例分析,验证所提方法的有效性。

## 1 微电网群云储能系统框架

受产业结构、资源禀赋、产销行为、运行条件等因素影响,不同微电网的源荷功率曲线存在差异,储能充放电需求及净负荷波动特性在时间尺度呈现互补性。在此情况下,微电网集群以联盟形式共同投资运营云储能装置,有望统筹多微电网充放电需求互补性,发挥集中投资规模效应,提升储能资源利用率,降低储能服务使用成本。多个微电网共同投资、运营集中式及分布式储能装置,形成“集中共享、分散复用”的云储能应用模式,如图1所示。

具体而言,云储能运营商聚合各微电网的充放电需求,以微电网群全局投资及运行成本最低为目标,统一制定储能装置的投资方案以及充放电计划。其中,集中式储能经由配电网为参与云储能系统的各微电网同时提供充放电服务;分布式储能经由网间功率互济参与储能共享,同时支撑紧急场景下其所属微电网的孤岛运行备用需求,提升各微电网运行可靠性。

云储能系统由微电网群统一投资运营,系统运营收益将基于各微电网在云储能投资运营中的贡献水平进行合理分配。需要注意,由于投资主体是微

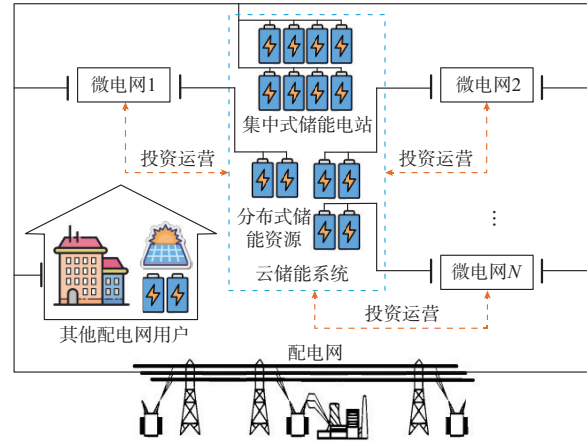


图1 微电网群云储能框架  
Fig. 1 Cloud energy storage framework of microgrid cluster

电网集群而非配电网,云储能装置将针对性地为各微电网提供支撑,而不为配电网其他用户提供服务。同时,若云储能服务导致了系统拥塞及相应的拥塞治理成本,云储能系统也需要向配电网支付惩罚成本。

## 2 经济-低碳-可靠多目标驱动的云储能优化配置方法

### 2.1 模型框架

本文所建立的微电网群优化配置模型由规划层模型与调度层模型两部分组成。其中,规划层模型以系统年度经济性、低碳性、可靠性综合最优为目标,进行储能配置方案寻优,并向运行层模型传递储能配置方案作为输入参数和边界条件;运行层模型面向系统日运行成本最低为目标,求解系统优化运行方案,并向规划层传递各典型日下系统的运行成本、碳排放量及重要负荷支撑系数,作为规划层解集适应度函数计算依据。

### 2.2 规划层模型

规划层模型的目标函数主要计及规划方案经济性目标及环保性目标函数,其中经济性目标函数为:

$$\max F = \max (B_{\text{ele}} - C_{\text{ins}} - C_{\text{rep}} - C_{\text{om}} - C_{\text{con}}) \quad (1)$$

式中: $F$ 为系统年度投资运维成本; $B_{\text{ele}}$ 为储能装置的电量电费削减收益; $C_{\text{ins}}$ 为储能装置初始投资成本; $C_{\text{rep}}$ 为储能装置替换成本; $C_{\text{om}}$ 为储能装置运维成本; $C_{\text{con}}$ 为云储能服务导致的潮流拥塞惩罚成本。

各项利润或成本项的具体计算方式如下:

$$B_{\text{ele}} = \sum_{\tau=1}^{T^{\text{mo}}} \frac{1}{(1+r)^{\tau}} DS_{\text{ele}} \quad (2)$$

$$S_{\text{ele}} = \sum_{t=1}^T \left[ (-P_{\text{ESS},C,t}^{\text{cen}} + P_{\text{ESS},G,t}^{\text{cen}}) + \sum_{m=1}^M (-P_{\text{ESS},C,m,t}^{\text{dis}} + P_{\text{ESS},G,m,t}^{\text{dis}}) \right] \Delta t f_{\text{grid},t} + S_{\text{pv}} \quad (3)$$

式中:  $\tau$  为储能工程运行年度;  $T^{\text{pro}}$  为储能系统的工程寿命;  $r$  为折现率;  $D$  为云储能的年运行天数, 去除维护时间, 取  $D=345$  d;  $S_{\text{ele}}$  和  $S_{\text{pv}}$  分别为微电网群单日的电量电费削减收益和弃光削减收益;  $T$  为单日调度时长, 取时段间隔为 1 h (即  $\Delta t=1$  h);  $M$  为群内微电网个数;  $P_{\text{ESS},C,t}^{\text{cen}}$ 、 $P_{\text{ESS},G,t}^{\text{cen}}$  分别为  $t$  时段云储能系统中集中式储能电站的充、放电功率;  $P_{\text{ESS},C,m,t}^{\text{dis}}$ 、 $P_{\text{ESS},G,m,t}^{\text{dis}}$  分别为  $t$  时段第  $m$  个微电网的分散式储能电站的充、放电功率;  $f_{\text{grid},t}$  为  $t$  时段的分时电价。

$$S_{\text{pv}} = \sum_{t=1}^T \left[ \sum_{m \in \Omega_m} (P_{\text{pv},\text{pro},m,t} - P_{\text{pv},\text{ben},m,t}) \right] \Delta t f_{\text{grid},t} \quad (4)$$

式中:  $\Omega_m$  为微电网群集合;  $P_{\text{pv},\text{pro},m,t}$  和  $P_{\text{pv},\text{ben},m,t}$  分别为云储能场景和无储能场景下第  $m$  个微电网内的分布式光伏电站在  $t$  时段输出的有功功率。

$$C_{\text{ins}} = (c_{\text{ESS},E} E_{\text{ESS},r}^{\text{cen}} + c_{\text{ESS},P} P_{\text{ESS},r}^{\text{cen}}) + \sum_{m=1}^M (c_{\text{ESS},E} E_{\text{ESS},m,r}^{\text{dis}} + c_{\text{ESS},P} P_{\text{ESS},m,r}^{\text{dis}}) \quad (5)$$

式中:  $c_{\text{ESS},E}$ 、 $c_{\text{ESS},P}$  分别为储能单位容量和功率投资成本;  $E_{\text{ESS},r}^{\text{cen}}$ 、 $P_{\text{ESS},r}^{\text{cen}}$  分别为集中式储能电站的额定容量和额定功率;  $E_{\text{ESS},m,r}^{\text{dis}}$ 、 $P_{\text{ESS},m,r}^{\text{dis}}$  分别为第  $m$  个微电网中分散式储能电站的额定容量和额定功率。

$$C_{\text{rep}} = \sum_{a=1}^{\rho} \frac{1}{(1+r)^{aT^{\text{ESS}}}} C_{\text{ins}} \quad (6)$$

式中:  $\rho$  为储能设备需要进行置换的次数;  $T^{\text{ESS}}$  为储能设备寿命;  $a$  为储能设备运行年数。

$$C_{\text{om}} = \sum_{\tau=1}^{T^{\text{pro}}} \frac{1}{(1+r)^{\tau}} C_{\text{om},y} \quad (7)$$

$$C_{\text{om},y} = c_{\text{ESS},\text{OM},\text{fix}} \left( P_{\text{ESS},r}^{\text{cen}} + \sum_{m=1}^M P_{\text{ESS},m,r}^{\text{dis}} \right) + D c_{\text{ESS},\text{OM},\text{var}} \cdot \sum_{t=1}^T \left[ (P_{\text{ESS},C,t}^{\text{cen}} + P_{\text{ESS},G,t}^{\text{cen}}) + \sum_{m=1}^M (P_{\text{ESS},C,m,t}^{\text{dis}} + P_{\text{ESS},G,m,t}^{\text{dis}}) \right] \quad (8)$$

式中:  $C_{\text{om},y}$  为储能年运行维护成本;  $c_{\text{ESS},\text{OM},\text{fix}}$  和  $c_{\text{ESS},\text{OM},\text{var}}$  分别为储能设备的单位固定运维成本和单位可变运维成本。

$$C_{\text{con}} = \sum_{\tau=1}^{T^{\text{pro}}} \frac{1}{(1+r)^{\tau}} D (C_{\text{pro},\text{con}} - C_{\text{ben},\text{con}}) \quad (9)$$

式中:  $C_{\text{pro},\text{con}}$  和  $C_{\text{ben},\text{con}}$  分别为投资云储能后及未投资云储能时配电网系统的拥塞惩罚成本。

为避免云储能服务的额外潮流导致系统潮流阻塞或越限, 设置潮流拥塞惩罚成本, 优化配备云储能后的系统潮流分布情况。潮流拥塞成本可表示为:

$$\begin{cases} C_{\text{ben},\text{con}} = C_{\text{pline},\text{con}} + C_{\text{node},\text{con}} \\ C_{\text{pline},\text{con}} = \begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^L (P_{t,i}^{\text{line}} - P_{n,i}^{\text{line}}) f_{\text{line}} & P_{t,i}^{\text{line}} \geq 1.05 P_{n,i}^{\text{line}} \\ 0 & P_{t,i}^{\text{line}} < 1.05 P_{n,i}^{\text{line}} \end{cases} \\ C_{\text{node},\text{con}} = \begin{cases} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N |U_{t,i}^{\text{node}*} - 1| f_{\text{node}} & U_{t,i}^{\text{node}*} \geq 1.1 \\ 0 & 0.9 < U_{t,i}^{\text{node}*} < 1.1 \end{cases} \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $C_{\text{pline},\text{con}}$  和  $C_{\text{node},\text{con}}$  分别为联络线功率拥塞惩罚成本和配电网节点电压越限惩罚成本;  $L$  为联络线条数;  $N$  为节点个数;  $P_{t,i}^{\text{line}}$  为  $t$  时段第  $i$  条线路的有功功率;  $P_{n,i}^{\text{line}}$  为第  $i$  条联络线的额定有功功率;  $U_{t,i}^{\text{node}*}$  为  $t$  时段第  $i$  个节点电压的标幺值;  $f_{\text{line}}$  和  $f_{\text{node}}$  分别为单位线路功率越限惩罚成本和单位节点电压越限惩罚成本。

以系统年碳排放总量最小为环保性目标函数:

$$\min E = \min \left( 365 \sum_{t=1}^T c_{\text{emi}} P_{\text{grid},\text{MG},t} \Delta t \right) \quad (11)$$

式中:  $E$  为系统年碳排放量;  $c_{\text{emi}}$  为网供电平均碳排放因子;  $P_{\text{grid},\text{MG},t}$  为  $t$  时段微电网群向上级电网的购电功率。

通过微电网负荷容量缺失率描述微电网供电可靠性, 保证微电网孤岛运行等应急场景下可通过内部分布式储能为重要负荷提供紧急电力支撑。

$$\max R = \frac{R_{\text{ESS},m}^{\text{dis}}}{L_{\text{imp},m}} \geq 0.1 \quad (12)$$

式中:  $R$  为重要负荷支撑系数;  $R_{\text{ESS},m}^{\text{dis}}$  为第  $m$  个微电网的紧急负荷备用;  $L_{\text{imp},m}$  为第  $m$  个微电网的重要负荷量。

考虑实际场地和经济成本限值, 设定储能系统功率、容量上下限约束, 对储能系统的投资决策约束如下:

$$\begin{cases} N_{\text{ESS},\text{cen}}^{\min} \leq N_{\text{ESS},\text{cen}} \leq N_{\text{ESS},\text{cen}}^{\max} \\ N_{\text{ESS},\text{dis},m}^{\min} \leq N_{\text{ESS},\text{dis},m} \leq N_{\text{ESS},\text{dis},m}^{\max} \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $N_{\text{ESS},\text{cen}}$ 、 $N_{\text{ESS},\text{cen}}^{\max}$  和  $N_{\text{ESS},\text{cen}}^{\min}$  分别为集中式储能规划台数及其上、下限;  $N_{\text{ESS},\text{dis},m}$ 、 $N_{\text{ESS},\text{dis},m}^{\max}$  和  $N_{\text{ESS},\text{dis},m}^{\min}$  分别为第  $m$  个微电网中分散式储能规划台数及其上、下限。

### 2.3 调度层模型

调度层模型实现系统最优运行方案制定, 并向规划层模型传递日前调度结果, 作为规划层多维目



标函数计算的依据。调度层模型的目标函数如下:

$$\max F_d = \min (S_{\text{ele}} - (C_{\text{pro, con}} - C_{\text{ben, con}})) \quad (14)$$

式中:  $F_d$  为微电网群的日运行收益。

本文采用线性化的配电网潮流模型约束系统潮流,忽略系统网损,相关约束详见文献[19-20]。云储能设施由微电网群共同投建,其服务对象仅为各微电网。本文设置如下功率平衡约束,以保证云储能设施仅为微电网提供储能服务。

$$\begin{cases} P_{\text{grid}, t} = P_{\text{grid}, \text{DN}, t} + P_{\text{grid}, \text{MG}, t} \\ P_{\text{grid}, \text{MG}, t} + (-P_{\text{ESS}, \text{C}, t}^{\text{cen}} + P_{\text{ESS}, \text{G}, t}^{\text{cen}}) + \sum_{m=1}^M (-P_{\text{ESS}, \text{C}, m, t}^{\text{dis}} + P_{\text{ESS}, \text{G}, m, t}^{\text{dis}}) + \sum_{m \in \Omega_m} P_{\text{pv}, m, t} = P_{\text{Mload}, t} \\ P_{\text{grid}, \text{DN}, t} = P_{\text{Dload}, t} \end{cases} \quad (15)$$

式中:  $P_{\text{grid}, t}$  为  $t$  时段上级电网的供电功率;  $P_{\text{grid}, \text{DN}, t}$  为  $t$  时段配电网负荷向上级电网的购电功率;  $P_{\text{pv}, m, t}$  为第  $m$  个微电网中分布式光伏系统在  $t$  时段的实际发电上网功率;  $P_{\text{Mload}, t}$ 、 $P_{\text{Dload}, t}$  分别为  $t$  时段微电网群负荷和配电网负荷。

为提升分布式可再生能源的就地消纳率,对配电网向上级电网的潮流反送进行约束:

$$P_{\text{grid}, t} \geq 0 \quad (16)$$

系统内的储能装置包括集中式储能电站和分布式储能两类,其运行约束基本一致,计及储能电站充放电功率上下限约束、储能电站运行状态约束、储能电站荷电状态约束,具体相关约束详见文献[21]。

为促进分布式光伏的就地高效应用,对各微电网内分布式光伏的消纳率进行约束:

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{pv}, m, t} \leq P_{\text{IPV}, m, t} \\ \frac{P_{\text{pv}, m, t}}{P_{\text{IPV}, m, t}} \geq \zeta_{\text{PV}} \end{cases} \quad (17)$$

式中:  $P_{\text{IPV}, m, t}$  为第  $m$  个微电网中分布式光伏系统在  $t$  时段的总发电功率;  $\zeta_{\text{PV}}$  为光伏就地消纳率下限。

此外,本文考虑利用分布式储能装置就地为各微电网提供紧急功率支撑,提升各微电网在孤岛运行等应急运行场景下的运行可靠性。因此,本文计及微电网内部备用容量约束如下:

$$\begin{cases} P_{\text{ESS}, \text{C}, m, t}^{\text{dis}} - R_{\text{ESS}, \text{C}, m, t} \geq P_{\text{ESS}, \text{C}, m, \min}^{\text{dis}} \\ P_{\text{ESS}, \text{G}, m, t}^{\text{dis}} + R_{\text{ESS}, \text{G}, m, t} \leq P_{\text{ESS}, \text{G}, m, \max}^{\text{dis}} \\ P_{\text{ESS}, \text{G}, m, t}^{\text{dis}} + R_{\text{ESS}, \text{G}, m, t} \leq P_{\text{ESS}, m, r}^{\text{dis}, \text{SOC}_{\min}} \\ R_{\text{ESS}, \text{C}, m, t} + R_{\text{ESS}, \text{G}, m, t} = R_{\text{ESS}, m, t} \geq \epsilon_m^{\text{up}} L_{\text{MGrid}, m, t}^{\text{dis}} \end{cases} \quad (18)$$

式中:  $P_{\text{ESS}, \text{C}, m, \min}^{\text{dis}}$  为第  $m$  个微电网中分布式储能的充电功率最小值;  $P_{\text{ESS}, \text{G}, m, \max}^{\text{dis}}$  为第  $m$  个微电网中分布式

储能的放电功率最大值。考虑到微电网的紧急备用一般在离网运行、事故停电的应急场景中获得实际应用,因此微电网内部备用主要为向上备用,其中,  $R_{\text{ESS}, m, t}$  为第  $m$  个微电网中分布式储能能在  $t$  时段的备用容量;  $R_{\text{ESS}, \text{C}, m, t}$  为第  $m$  个微电网中分布式储能能在  $t$  时段处于充电状态的备用容量;  $R_{\text{ESS}, \text{G}, m, t}$  为第  $m$  个微电网中分布式储能能在  $t$  时段处于放电状态的备用容量;  $P_{\text{ESS}, m, r}^{\text{dis}, \text{SOC}_{\min}}$  为第  $m$  个微电网中分布式储能的荷电状态下限;  $\epsilon_m^{\text{up}}$  为第  $m$  个微电网中重要负荷比例系数;  $L_{\text{MGrid}, m, t}^{\text{dis}}$  为  $t$  时段第  $m$  个微电网的本地负荷量。

## 2.4 模型求解方法

本文采用第二代非支配遗传算法(non-dominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)进行多目标优化模型求解[22]。本文所提微电网群云储能多目标优化配置模型的求解流程如附录A图A1所示,求解流程可概括如下:

步骤1:输入系统拓扑、各典型日系统光伏出力、负荷预测曲线等参数。

步骤2:调用配置层模型,随机初始化决策变量种群  $P$ ,即生成集中式及分布式储能容量初始值。

步骤3:调用调度层模型,计算初始种群个体的适应度函数,开展非支配排序和拥挤度计算。

步骤4:从父代种群  $P$  中通过选择、交叉及变异操作产生子代种群。

步骤5:校验是否达到计算终止条件,若是,进入步骤6,若没有,返回步骤2。

步骤6:输出 Pareto 最优解集。

步骤7:调用博弈层模型,量化各微电网在云储能系统中的收益贡献,实现各微电网利润分配。

## 3 微电网群云储能系统商业模式

在投资规划阶段,如何预先评估各微电网在储能投资、运营过程中造成的储能建设、运维及更换费用,并评估各微电网群基于云储能装置产生的运营收益,进而实现各微电网对云储能装置初始投资成本的科学分摊,是构建微电网群云储能商业模式、指导云储能系统规划建设的关键。

### 3.1 云储能系统成本、效益组成

$$R_{\text{net}} = R' - C_{\text{fix}} - C_{\text{var}} \quad (19)$$

式中:  $R_{\text{net}}$  和  $R'$  分别为云储能系统投资运营的净利润和纯利润;  $C_{\text{fix}}$  和  $C_{\text{var}}$  分别为云储能系统的固定投资成本与可变成本。

$R_{\text{net}}$  为云储能系统工程寿命期内的运营收益之和,如式(20)所示,其中  $N_{\text{an}}$  为云储能系统在工程寿命期内的运营天数;  $C_{\text{fix}}$  为储能装置的等年值投资成本,为一固定值;  $C_{\text{var}}$  为储能装置替换、运维及潮流

拥塞成本之和,如式(21)所示,与用户对储能装置的充放电情况有关。

$$R_{\text{net}} = \sum_{d=1}^{N_m} F_d \quad (20)$$

$$C_{\text{var}} = C_{\text{rep}} + C_{\text{om}} + C_{\text{con}} \quad (21)$$

### 3.2 云储能系统利润与成本分摊方法

#### 3.2.1 运营净利润分摊方法

如何量化评估不同微电网参与云储能系统,对储能需求互补聚合、储能投资规模效应等云储能模式的技术、经济效益所创造的贡献,是实现云储能系统运营利润公平分配的前提。本文基于Shapley值法量化不同微电网在云储能系统投资运行过程中的贡献并进行系统运营利润分配<sup>[23]</sup>。

计微电网群包含 $m$ 个微电网,其集合为 $W = \{G_1, G_2, \dots, G_m\}$ , $s$ 为 $W$ 的一个子集且 $s \subseteq W$ ,并用 $v(s)$ 表示子集 $s$ 所应获取的利润,则集合 $W$ 中各微电网所应分得的利润为:

$$\rho_m = \sum_{s \in S_m} \omega(|s|) [v(s) - v(s/\{G_m\})] \quad (22)$$

式中: $\rho_m$ 为微电网 $m$ 所应获得的利润; $S_m$ 为所有包含微电网 $m$ 的用户子集; $v(s/\{G_m\})$ 为子集 $s$ 去除微电网 $m$ 后所应获得的利润; $v(s) - v(s/\{G_m\})$ 表示微电网 $m$ 在子集 $s$ 中所占据的利润额; $\omega(|s|)$ 表示子集 $s$ 的概率权重,其计算方式如式(23)所示。

$$\omega(|s|) = \frac{(|s|-1)!(m-|s|)!}{m!} \quad (23)$$

Shapley值法用于评估微电网参与云储能系统产生的综合效益,其将被用于进行系统净利润 $R_{\text{net}}$ 的分配。

#### 3.2.2 运营纯利润分摊方法

由式(1)及式(14)可知,云储能系统的运营利润主要来自系统的电量电费削减。由式(2)~式(4)可知,基于各典型日运行模拟结果,提取投资云储能前后各微电网的电量电费支出情况,则投资云储能装置为各微电网带来的运营纯利润可由下式计算:

$$S_{\text{ele},m} = \sum_{t=1}^T (P_{\text{ESS},G,m,t}^{\text{CES}} - P_{\text{ESS},C,m,t}^{\text{CES}} + P_{\text{PV},m,t}^{\text{CES}}) f_{\text{grid},t} \quad (24)$$

式中: $S_{\text{ele},m}$ 为第 $m$ 个微电网单日的运营纯利润; $P_{\text{ESS},G,m,t}^{\text{CES}}$ 、 $P_{\text{ESS},C,m,t}^{\text{CES}}$ 分别为第 $m$ 个微电网在 $t$ 时段对云储能装置的充、放电情况; $P_{\text{PV},m,t}^{\text{CES}}$ 为归属第 $m$ 个微电网的光伏发电系统在投建云储能后的弃光削减量。

#### 3.2.3 可变成本分摊方法

储能装置的使用寿命折损与其充放电深度、充放电循环次数密切相关,不同微电网应按照其对储能装置的实际调用情况承担由于储能寿命折损导致的装

置运维与更换成本 $C_{\text{var}}$ :

$$C_{\text{var},m} = \frac{L_{\text{loss},m}^{\text{an}}}{\sum_{m=1}^M L_{\text{loss},m}^{\text{an}}} C_{\text{var}} \quad (25)$$

式中: $C_{\text{var},m}$ 为第 $m$ 个微电网所分摊的年度储能运维、更换可变成本; $L_{\text{loss},m}^{\text{an}}$ 为基于云储能系统运行模拟结果计算的年度内第 $m$ 个微电网充放电行为导致的储能寿命折损,计算方法参见文献<sup>[24]</sup>。

#### 3.2.4 固定投资成本分摊方法

第 $m$ 个微电网承担的投资成本 $C_{\text{fix},m}$ 计算如下:

$$C_{\text{fix},m} = R_{\text{net},m} - R_m - C_{\text{var},m} \quad (26)$$

式中: $R_{\text{net},m}$ 、 $R_m$ 分别为第 $m$ 个微电网所分摊的年度运营净利润和纯利润。

## 4 算例分析

### 4.1 算例系统

如图2所示,本文基于改进的IEEE 33节点配电网系统搭建微电网群云储能算例系统<sup>[25]</sup>。系统19~22号节点聚合为微电网I,12~18号节点聚合为微电网II,26~33号节点聚合为微电网III,各微电网中均包含分布式光伏发电系统(PV1至PV3)及一定比例需保障供电可靠性的重要负荷(用红色三角形表示)。各微电网配备分布式储能系统(DE1至DE3),在促进分布式光伏就地消纳的同时,充当应急场景下重要负荷的不间断电源。集中式储能装置(CE)位于6号节点。

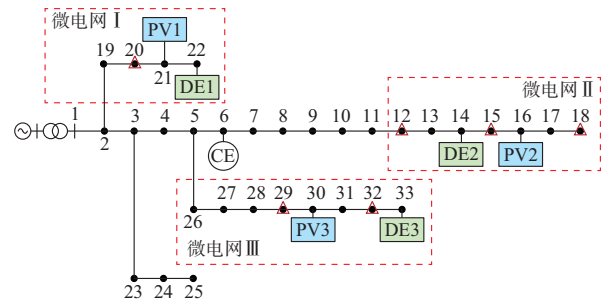


图2 基于IEEE 33节点系统的微电网群云储能系统  
Fig. 2 A cloud energy storage system for microgrid cluster based on modified IEEE 33-bus system

算例设置春秋季节、夏季、冬季3个典型日,各微电网的光伏出力及负荷需求曲线分别见附录A图A2和图A3,各节点负荷比例与IEEE 33节点系统保持一致。储能系统工程寿命取为20年;光伏阵列、蓄电池组的相关参数分别如附录A表A1和表A2所示;峰谷电价曲线与储能投资成本规模效应曲线如附录A图A4和图A5所示;折现率 $r$ 为8%,重要负荷占各微电网负荷总量的5%,微电网解列运行等应急场景下重要负荷持续供电不低于2h,各微

电网分布式消纳率下限为85%;线路潮流及节点电压单位节点电压越限惩罚成本分别为0.3元/kW和30元/kV<sup>[26]</sup>。

4.2 优化配置结果分析

4.2.1 优化配置解集经济-低碳-可靠性能分析

云储能系统容量优化配置结果的解集曲面如图3所示。分别选取经济、低碳及可靠性优化目标最大的配置方案为方案1~3,它们的优化配置方案及优化目标参数如表1所示。

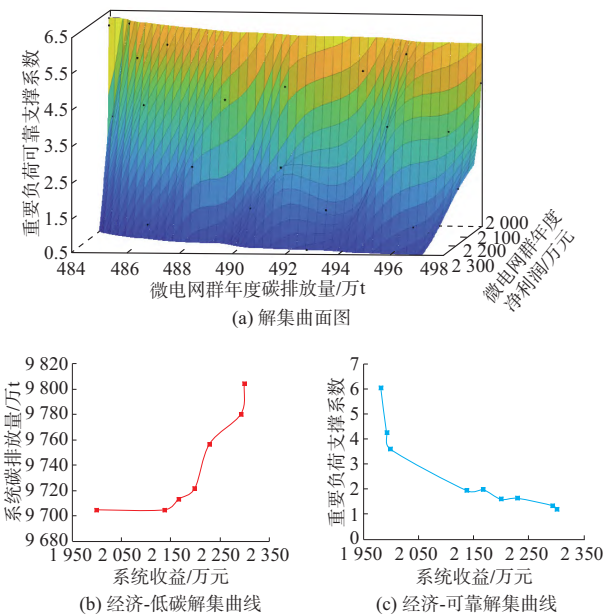


图3 云储能容量优化配置结果  
Fig. 3 Optimization configuration results of cloud energy storage capacity

对比方案1~3,由方案1可知,为最大化云储能系统的经济效益,须集中配备大容量的共享储能装置。集中投资的规模效应可有效降低储能的单位投资成本。同时,更大容量的储能装置有利于面向峰谷电价的套利,进一步降低系统运行成本。

算例系统中微电网的主要碳排放为向上级电网购电结算的间接碳排放。由方案2可知,为最优化系统低碳性能指标,优化配置策略及运行模拟策略将倾向于在最大化系统光伏消纳的同时降低从上级电网的购电量,从而最小化由于采购外部电量导致

的用电碳排放。此外,由于储能充放电存在能量损耗,面向低碳性能优化的储能配置及云储能运行策略将倾向于减少储能充放点,这虽然降低了储能的投资需求与成本,但同样也削弱了储能面向峰谷电价套利、削减电量电费的效益。本文算例采用固定的平均碳排放因子进行碳排放计量,若进一步考虑具备时空差异性的动态碳排放因子,将有望通过云储能装置的低碳响应与调控进一步降低系统碳排放。

由方案3可知,微电网的可靠性支撑主要由本地灵活性资源提供。为了提升微电网在紧急场景下为重要负荷持续供电的能力,各微电网需提升其内部分布式储能容量。在集群调控与协调的多微电网中,云储能技术将能够同时聚合集中式及分布式储能资源,合理配比集中式储能及分布式储能将有利于微电网群运行经济性及可靠性的有效平衡。

由图3(b)可知,配置方案经济与低碳优化目标呈现一定程度的正相关性。实际上,随着储能配置容量的提升,微电网群的日均运营收益持续上升并趋于稳定;与此同时,微电网群的日均碳排放量将先下降后上升,最后趋于稳定。总体而言,光伏消纳产生减碳效益,而从上级电网购电套利会导致系统间接碳排放增长,二者共同影响配置方案下系统的运行经济与低碳性能。由图3(c)可知,配置方案经济与可靠优化目标呈现一定程度的负相关性。分析可知,系统可靠性的增强主要依赖各微电网内部分布式储能容量的提升。受经济性优化目标约束,分布式储能配置容量越高,集中式储能配置容量越低,投资方案从集中投资规模效应中享受的效益越低。

4.2.2 经济-低碳-可靠性能最优配置方案系统运行方案

以春秋典型日结果为例,各方案下系统运行策略出力情况如图4所示。由图4可知,方案1配备了最大容量的集中式储能装置,主要通过集中式储能消纳富余光伏,并面向峰谷电价在高电价、高负荷、光伏低出力时段放电,进一步削减微电网群运行成本。

表1 云储能系统解集边界优化方案优化结果											
Table 1 Optimization results of solution set boundary optimization scheme for cloud energy storage system											
方案编号	微电网群年度经济利润/万元	微电网群年度碳排放量/t	重要负荷支撑系数	微电网群年度储能费用/万元	等年值储能投资成本/万元	年度储能更新成本/万元	年度储能运维成本/万元	集中式储能配置容量/kW	各微电网分布式储能配置容量/kW	光伏总出力/(MW·h)·d <sup>-1</sup>	向上级电网购电量/(MW·h)·d <sup>-1</sup>
1	2 322.89	4 985.40	1.28	1 056.35	634.53	293.91	127.90	4 400	{80,360,80}	35.34	24.00
2	2 050.68	4 839.22	3.04	872.12	520.91	241.28	110.53	2 800	{720,80,200}	35.34	23.22
3	2 200.31	5 104.40	8.08	1 304.80	794.31	367.92	142.56	3 080	{880,880,880}	35.34	24.68



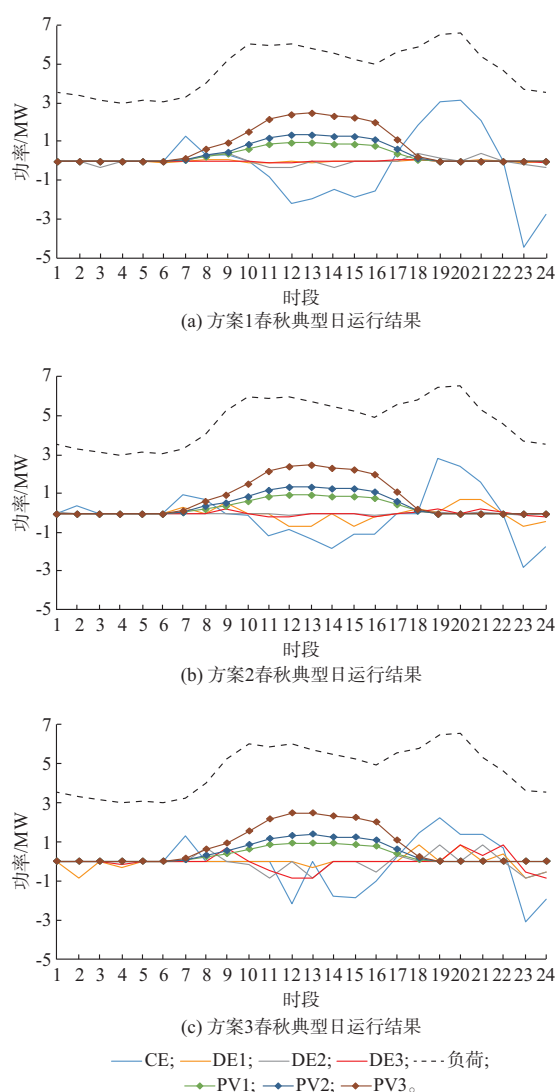


图4 方案1至方案3系统春秋典型日运行策略  
Fig. 4 System operation strategies on typical days in spring and autumn for scheme 1 to 3

表2 方案1与微电网独立投资模式期望盈利情况对比

Table 2 Expected profitability comparison between scheme 1 and independent investment mode of each microgrid

微电网序号	方案1(云储能)					独立投资模式				云储能模式利润增量/万元	云储能模式投建总容量削减/kW	云储能模式储能成本削减/万元
	年度利润/万元	年度储能投资运维成本/万元	集中式储能投资容量/kW	分布式储能投资容量/kW	储能投资容量合计/kW	年度利润/万元	年度储能投资运维成本/万元	分布式储能投资容量/kW	储能投资容量合计/kW			
I	508.44			80		437.1	244.84	1 000		71.34		
II	669.58	1 056.35	4 400	360	4 920	636.2	330.35	1 420	5 020	33.38	100	80.71
III	1 144.87			80		1 127.8	561.87	2 600		17.07		

如图5所示,考虑微电网I、II、III所有可能的联盟场景进行以经济性最优为目标的云储能系统优化配置,并基于本文所提方法进行收益分配,获取不同联盟条件下微电网群的盈利情况。其中,I/II/III表示微电网I、II、III合作投资云储能系统的场景,其他场景以此类推。

方案2中系统在充分消纳光伏发电后并未进一步进行大规模的谷时段充电,牺牲了部分“低储高放”的套利收益,减少了由于充放电电能损耗导致的额外电能消耗,从而减少了从上级电网购电量及由此导致的间接碳排放。方案3中各微电网分布式储能配备容量提升,与集中式储能同步进行充放电,构成云储能系统,支撑系统经济运行。在方案1~3中,各微电网内的分布式储能均保持较低的出力及一定的剩余电量,为潜在的紧急运行场景提供备用。

以春秋典型日运行结果为例,各微电网独立投资储能模式下,系统潮流分布情况与云储能模式方案1~3的对比情况如附录A图A6所示。可知相较独立投资储能模式,方案1~3在投资云储能装置后,系统更多的线路在更多时段呈现轻载。

#### 4.3 云储能模式经济效益及收益分配结果分析

如表2所示,对比了云储能模式方案1(经济性最优配置方案)与独立投资模式下微电网群及各微电网的盈利情况。可见,基于所提收益分配方法,相较独立配置储能模式,云储能模式下各微电网均能获得更高的盈利水平,微电网I、II、III的年度盈利分别提升了71.34、33.38、17.07万元。在云储能模式下,微电网集群投建的储能总容量为4 920 kW/19 680 kW·h,相较独立投资时各微电网投建储能容量总和减少了100 kW/400 kW·h,全系统储能装置等年值投资成本降低了80.71万元。云储能模式实现了不同储能用户的充放电需求互补,提升了储能装置的利用率,以更小容量的储能装置满足了云储能用户的充放电需求,并提升了微电网整体以及各用户的综合运营利润。此外,更低的投资成本及更高的盈利水平意味着更短的投资回收周期,有利于微电网群的投资风险管控。

由图5可知,在所有可能的联盟场景下,参与云储能系统的微电网均可获得相较独立投资场景更高的年度运营利润;特别地,I/II、I/III、II/III 3种联盟场景下,微电网个体及微电网群收益均相较独立投资模式有所提升,而I/II/III联盟场景下,微电网个体及微电网群收益均相较微电网两两联盟场景

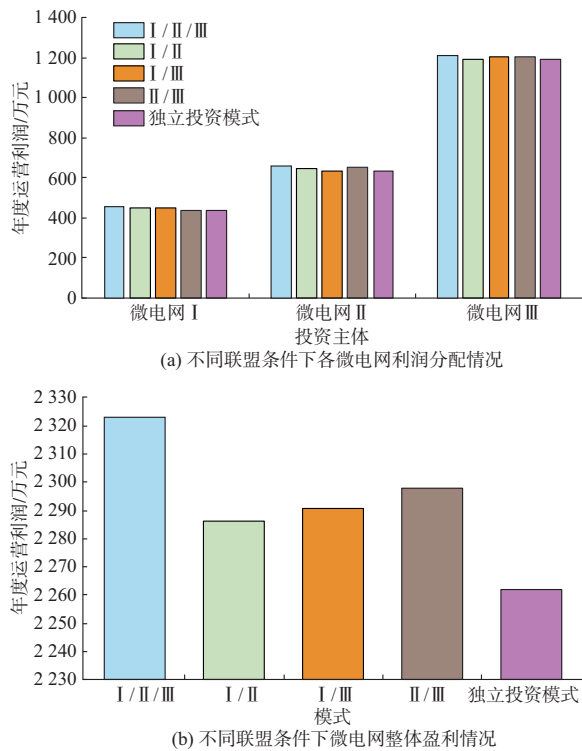


图5 不同联盟条件下微电网群盈利及利润分配  
Fig. 5 Profitability and profit allocation under different alliance conditions

有所提升。因此,本文所提云储能优化配置方法及收益分配方法同时满足微电网合作博弈的集体理性与个体理性,云储能投资合作联盟具有稳定性。此外,由图5(b)可知,系统规模最大的微电网Ⅲ与其他微电网联盟时导致的效益提升更明显,且Ⅰ/Ⅱ/Ⅲ联盟模式具备最优的经济性。可见,参与储能合作投资的用户数量越多、规模越大、储能需求越高、充放电互补效益越明显,云储能模式带来的经济效益越强。

云储能模式下群内各微电网的投资运营利润与成本分摊情况如表3所示,其中各类成本及利润参数基于式(19)一式(26)获得。结合表1、表3及图4可知,各微电网的储能使用需求越高,其通过云储能系统获得的运营利润越高,应承担的储能运营成本及储能初始投资成本也越高。

表3 云储能模式下微电网利润与成本分摊情况  
Table 3 Profit and cost allocation of different microgrids with cloud energy storage model

微电网序号	方案1				方案2				方案3			
	年度净利润/万元	年度纯利润/万元	年度储能可变运维成本分摊/万元	年度储能初始投资成本分摊/万元	年度净利润/万元	年度纯利润/万元	年度储能可变运维成本分摊/万元	年度储能初始投资成本分摊/万元	年度净利润/万元	年度纯利润/万元	年度储能可变运维成本分摊/万元	年度储能固定投资成本分摊/万元
I	508.44	679.62	84.83	86.35	448.86	587.83	70.76	68.21	481.61	704.94	102.67	120.66
II	669.58	962.80	120.18	173.04	591.11	832.75	100.24	141.40	634.25	998.66	145.44	218.97
III	1 144.87	1 736.81	216.80	375.14	1 010.71	1 502.22	180.82	310.70	1 084.45	1 801.51	262.37	454.68

基于所提出的储能固定投资成本分摊,可为云储能装置初始投资成本在用户间的科学分配提供指导。为进一步研究影响云储能商业模式盈利水平的关键因素,设置不同的储能投资规模效应曲线,对比不同规模效应下云储能模式与独立投资模式微电网群年度盈利情况,如附录A图A7及图A8所示。可见,规模效应越强,相对而言集中配置大容量的蓄电池组单价更低,则共享储能模式下微电网群的盈利水平相较传统独立投资储能模式提升程度也将增大。

## 5 结语

本文基于云储能思想,面向微电网群场景,研究了一种“集中共享、分散复用”的储能应用新模式,提出了计及经济、低碳、可靠多目标协调的微电网群云储能优化配置方法,并得出以下结论:

1)所提多目标驱动的配置模型能够有效平衡储能配置方案的经济、低碳及可靠性能,给出考虑多目标均衡的Pareto解集,为考虑经济、低碳及可靠偏向的微电网群储能投资方案制定提供了参考;

2)“集中共享、分散复用”的云储能模式有效提升了微电网群的储能利用率、降低了储能投资成本,在有效提升微电网群运行经济、低碳性的同时,兼顾了紧急场景的备用需求,增强了系统可靠性;

3)所提基于运行模拟及Shapley值法的系统收益、成本分配方法能够基于各微电网对云储能系统的调用情况及盈利贡献水平公平分配成本与收益,各微电网在参与云储能系统后,年度净利润均获得一定程度提升。

此外,本文假设各微电网可实现无管理与信息壁垒的统一协调调控,但实际上不同微电网可能由不同主体运营管理,各微电网及其持有的储能资源运行策略的集中优化存在困难。为解决上述问题,将区块链等分布式网络信息技术与云储能技术结合,提出基于分布式优化的云储能技术,将是后续研究的重要方向。



本文研究得到华中科技大学电气学院苗世洪教授和王佳旭的支持,特此感谢!

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 参考文献

- [1] 康重庆,杜尔顺,李姚旺,等.新型电力系统的“碳视角”:科学问题与研究框架[J].电网技术,2022,46(3):821-833.  
KANG Chongqing, DU Ershun, LI Yaowang, et al. Key scientific problems and research framework for carbon perspective research of new power systems[J]. Power System Technology, 2022, 46(3): 821-833.
- [2] 国家能源局.国家能源局关于推进新能源微电网示范项目建设的指导意见[EB/OL].[2022-11-22].[http://www.nea.gov.cn/2015-07/23/c\\_134440478.htm](http://www.nea.gov.cn/2015-07/23/c_134440478.htm).  
National Energy Administration. Guideline from National Energy Administration on promoting the construction of new energy microgrid demonstration projects [EB/OL]. [2022-11-22]. [http://www.nea.gov.cn/2015-07/23/c\\_134440478.htm](http://www.nea.gov.cn/2015-07/23/c_134440478.htm).
- [3] 芮涛,李国丽,胡存刚,等.考虑电价机制的微电网群主从博弈优化方法[J].中国电机工程学报,2020,40(8):2535-2546.  
RUI Tao, LI Guoli, HU Cungang, et al. Stackelberg game optimization method for microgrid cluster considering electricity price mechanism[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(8): 2535-2546.
- [4] 颜宁,李相俊,张博,等.基于电池健康度的微电网群梯次利用储能系统容量配置方法[J].电网技术,2020,44(5):1630-1638.  
YAN Ning, LI Xiangjun, ZHANG Bo, et al. Energy storage capacity allocation method with cascade utilization based on battery health in microgrids [J]. Power System Technology, 2020, 44(5): 1630-1638.
- [5] 桑博,张涛,刘亚杰,等.多微电网能量管理系统研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(10):3077-3093.  
SANG Bo, ZHANG Tao, LIU Yajie, et al. Energy management system research of multi-microgrid: a review [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(10): 3077-3093.
- [6] 刘畅,卓建坤,赵东明,等.利用储能系统实现可再生能源微电网灵活安全运行的研究综述[J].中国电机工程学报,2020,40(1):1-18.  
LIU Chang, ZHUO Jiankun, ZHAO Dongming, et al. A review on the utilization of energy storage system for the flexible and safe operation of renewable energy microgrids [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(1): 1-18.
- [7] 赵波,李得民,吴在军,等.基于100%绿色能源供电目标的海岛微电网群容量优化配置[J].中国电机工程学报,2021,41(3):932-946.  
ZHAO Bo, LI Demin, WU Zaijun, et al. Capacity optimal sizing of island microgrid clusters based on the target of 100% green energy power supply [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 932-946.
- [8] 符杨,邢馨月,李振坤,等.基于主从博弈的微电网群多阶段鲁棒优化规划[J].电力自动化设备,2022,42(4):1-8.  
FU Yang, XING Xinyue, LI Zhenkun, et al. Multi-stage robust optimization planning of microgrid clusters based on master-slave game [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(4): 1-8.
- [9] 田培根,肖曦,丁若星,等.自治型微电网群多元复合储能系统容量配置方法[J].电力系统自动化,2013,37(1):168-173.  
TIAN Peigen, XIAO Xi, DING Ruoxing, et al. A capacity configuring method of composite energy storage system in autonomous multi-microgrid [J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(1): 168-173.
- [10] ZHANG N, JIANG H Y, LI Y W, et al. Aggregating distributed energy storage: cloud-based flexibility services from China [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2021, 19(4): 63-73.
- [11] 闫东翔,陈玥.共享储能商业模式和定价机制研究综述[J].电力系统自动化,2022,46(23):178-191.  
YAN Dongxiang, CHEN Yue. Review on business model and pricing mechanism for shared energy storage [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(23): 178-191.
- [12] 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.  
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.
- [13] 李姚旺,张宁,张世旭,等.面向电力系统的多能源云储能模式:基本概念与研究展望[J].中国电机工程学报,2023,43(6):2179-2190.  
LI Yaowang, ZHANG Ning, ZHANG Shixu, et al. Multi-energy cloud energy storage for power systems: basic concepts and research prospects [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(6): 2179-2190.
- [14] 李咸善,方子健,李飞,等.含多微电网租赁共享储能的配电网博弈优化调度[J].中国电机工程学报,2022,42(18):6611-6625.  
LI Xianshan, FANG Zijian, LI Fei, et al. Game-based optimal dispatching strategy for distribution network with multiple microgrids leasing shared energy storage [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(18): 6611-6625.
- [15] LIU J K, ZHANG N, KANG C Q, et al. Cloud energy storage for residential and small commercial consumers: a business case study [J]. Applied Energy, 2017, 188: 226-236.
- [16] 马显欣,胡泽春,刁锐.新能源场站共享储能提供调频服务的日前优化策略[J].电网技术,2022,46(10):3857-3868.  
MA Yuxin, HU Zechun, DIAO Rui. Day-ahead optimization strategy for shared energy storage of renewable energy power stations to provide frequency regulation service [J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 3857-3868.
- [17] JI C D, HAJIESMAILI M, GAYME D F, et al. Coordinating distribution system resources for co-optimized participation in energy and ancillary service transmission system markets [C]// 2019 American Control Conference (ACC), July 10-12, 2019, Philadelphia, USA: 1315-1322.
- [18] 李咸善,解仕杰,方子健,等.多微电网共享储能的优化配置及其成本分摊[J].电力自动化设备,2021,41(10):44-51.  
LI Xianshan, XIE Shijie, FANG Zijian, et al. Optimal configuration of shared energy storage for multi-microgrid and its cost allocation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(10): 44-51.
- [19] 陈池瑶,苗世洪,姚福星,等.基于多智能体算法的多微电网-配电网分层协同调度策略[J].电力系统自动化,2023,47(10):57-65.  
CHEN Chiyao, MIAO Shihong, YAO Fuxing, et al. Hierarchical cooperative dispatching strategy of multi-microgrid and distribution networks based on multi-agent algorithm [J].

- Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(10): 57-65.
- [20] 张世旭, 苗世洪, 杨炜晨, 等. 基于自适应步长 ADMM 的配电网分布式鲁棒优化调度策略[J]. 高电压技术, 2021, 47(1): 81-93.
- ZHANG Shixu, MIAO Shihong, YANG Weichen, et al. Distributed robust optimal dispatch for active distribution networks based on alternative direction method of multipliers with dynamic step size[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 81-93.
- [21] 李姚旺, 苗世洪, 刘君瑶, 等. 考虑需求响应不确定性的光伏微电网储能系统优化配置[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(20): 69-77.
- LI Yaowang, MIAO Shihong, LIU Junyao, et al. Optimal allocation of energy storage system in PV micro grid considering uncertainty of demand response[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(20): 69-77.
- [22] 郭力, 刘文建, 焦冰琦, 等. 独立微电网系统的多目标优化规划设计方法[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(4): 524-536.
- GUO Li, LIU Wenjian, JIAO Bingqi, et al. Multi-objective optimal planning design method for stand-alone microgrid system[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4): 524-536.
- [23] LI Y W, XUE J J, BIAN J Y, et al. Cloud energy storage in multi energy systems: optimal scheduling and profit-sharing approaches [C]// 2021 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), July 26-29, 2021, Washington, USA: 1-5.
- [24] 王荔妍, 陈启鑫, 何冠楠, 等. 考虑电池储能寿命模型的发电计划优化[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(8): 93-100.
- WANG Liyan, CHEN Qixin, HE Guannan, et al. Optimization of generation scheduling considering battery energy storage life model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(8): 93-100.
- [25] 杨炜晨, 苗世洪, 张世旭, 等. 交直流混合微电网分布式自治经济控制策略[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(3): 857-868.
- YANG Weichen, MIAO Shihong, ZHANG Shixu, et al. Distributed autonomous economic control strategy for AC/DC hybrid microgrid cluster[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(3): 857-868.
- [26] 胡俊杰, 刘雪涛, 王程. 考虑网络约束的能量枢纽灵活性价值评估[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(5): 1799-1813.
- HU Junjie, LIU Xuetao, WANG Cheng. Value evaluation of energy hub flexibility considering network constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(5): 1799-1813.

张世旭(1996—), 男, 硕士, 主要研究方向: 云储能技术、低碳电力技术。E-mail: zhangshixu@tsinghua-eiri.org

李姚旺(1993—), 通信作者, 男, 博士, 主要研究方向: 云储能技术、低碳电力技术。E-mail: yaowang\_li@126.com

刘伟生(1970—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向: 电网调度运行、通信及自动化技术。E-mail: liuweisheng@sd.sgcc.com.cn

(编辑 鲁尔姣)

### Economic, Low-carbon and Reliable Multi-objective Optimal Configuration Method of Cloud Energy Storage for Microgrid Clusters

ZHANG Shixu<sup>1</sup>, LI Yaowang<sup>1</sup>, LIU Weisheng<sup>2</sup>, SUN Shumin<sup>2</sup>, YU Peng<sup>2</sup>, ZHANG Ning<sup>1</sup>

(1. Sichuan Energy Internet Research Institute, Tsinghua University, Chengdu 610213, China;

2. State Grid Shandong Electric Power Company, Jinan 250001, China)

**Abstract:** Microgrid cluster technology promotes the collaborative consumption of distributed renewable energy among microgrids through the coordination and complementarity among multiple microgrids, and is considered as an important means for distributed generators to access the grid in the future new power system. Considering the coordination and mutual assistance characteristics of the microgrid cluster, a cloud energy storage operation architecture for the microgrid cluster which realizes the shared use of both centralized and distributed energy storage facilities is proposed. Specifically speaking, centralized energy storage is shared among all microgrids in the microgrid cluster, providing services to all microgrids through collaborative construction and capacity sharing, aiming to reduce the energy storage usage costs of each microgrid. Meanwhile, the distributed energy storage mainly serves various microgrids in the microgrid cluster, with the main goal of ensuring the reliability of each microgrid itself, while also taking into account the demand of coordination and mutual assistance for energy storage reuse. On this basis, a multi-objective two-level optimal configuration model of cloud energy storage driven by economy, low-carbon and reliability is constructed, and the model solution based on the non-dominated sorting genetic algorithm II is realized. After that, a business mode for cloud energy storage system in microgrid clusters is established. Based on the Shapley value method and operation simulation, a reasonable allocation of investment, operation costs, and benefits for cloud energy storage systems is achieved, and a method for allocating the initial investment cost of the cloud energy storage is proposed. Finally, based on the IEEE 33-bus system, a microgrid cluster system is built and case studies are carried out. The results show that the proposed method can provide a solution set of cloud energy storage configuration schemes for different investment preferences, and verify the effectiveness of cloud energy storage mode to improve the investment and operation benefits of the system.

This work is supported by State Grid Corporation of China (No. 4000-202216059A-1-1-ZN).

**Key words:** cloud energy storage; microgrid cluster; optimal configuration; multi-objective optimization; business mode

