

考虑储能资源聚合参与的电网优化运行与韧性提升策略

赖业宁¹, 孙仲卿¹, 陆志平², 刘沁²

(1. 国网电力科学研究院有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 国网江苏省电力有限公司, 江苏 南京 210000)

摘 要: 极端天气给新型电力系统的建设与运行带来诸多挑战, 电力系统灵活性资源的不断丰富给了电网应对极端天气的新思路。考虑极端条件下储能等资源聚合参与电网负荷恢复的场景, 研究了资源聚合参与电网韧性提升的策略方法。首先, 基于储能等资源自身的运行状态, 提出了资源剩余调节能力模型。然后, 构建了计及资源剩余调节能力的资源聚合调控模型, 并通过“域”刻画资源聚合体的剩余调节能力与运行功率的关联关系, 进一步构建了面向“灾前-灾中-灾后”全阶段的电网优化运行与韧性提升模型。最后, 通过算例分析, 验证了该策略对电网韧性的提升效果。

关键词: 储能; 资源聚合; 剩余调节能力; 韧性提升

DOI: 10.11930/j.issn.1004-9649.202402073

0 引言

随着“双碳”目标的不断推进, 配电网的韧性提升成为新型电力系统建设中的研究重点之一^[1-2]。同时, 伴随着电网“源-网-荷-储”形态的不断演变, 配电网中的储能资源种类与数量逐渐增加, 应用价值也逐渐增大^[3-4]。挖掘其调控潜力可以实现电网的重要调节任务, 提升电网的灵活性运行水平^[5-6]。通过对储能资源的合理调控, 降低极端天气对电网的影响, 提升电网韧性^[7-8]。

然而, 配电网中部分储能资源面临容量较低等问题, 单一个体储能不能较好地参与电网调节任务, 须通过聚合增加其可调能力^[9]。储能聚合形成资源聚合体, 可进一步通过在资源聚合体中配置分布式电源, 增强资源聚合体的长时间调节能力^[10]。文献^[11]通过主从博弈, 实现了储能聚合参与电网运行交易, 有效提升了配电网分布式储能的利用率与效益。文献^[12]基于“云-边”协同技术, 提出了储能等资源聚合参与电网优化运行的策略, 提升了储能等资源响应电网运行需求

的能力。文献^[13]提出储能等资源聚合形成虚拟电厂的调控能力评估模型, 通过可行域投影这一概念给出功率运行边界, 形成了资源聚合参与电网调控的应用范例, 但其对极端场景下电网韧性方面的应用方法有待进一步挖掘。

在当前研究中, 储能参与下资源聚合体提升电网韧性的形式与策略多样^[14-15]。文献^[16]构建考虑电动汽车等资源的功率聚合模型, 使其参与电网调节以提升电网对抗自然灾害的能力。文献^[17]提出一种考虑热惯性的热电联产虚拟电厂, 并构建以功率为基础的系统运行成本最优模型, 实现虚拟电厂参与下的电网韧性提升。文献^[18]提出一种基于需求响应的配电网韧性提升策略, 通过对储能等资源的协调控制, 有效降低了极端场景下电网运行的风险。上述基于资源聚合体的电网韧性提升研究, 均能有效实现储能参与下的电网韧性提升。但大部分研究仅计及调控时刻的资源聚合功率特征模型, 对资源聚合体的调控能力模型构建有待完善。

储能资源为时序关联资源, 单一时间尺度下的对外输出功率特性无法较好刻画其调节能力^[19]。文献^[20]构建虚拟电厂的时序关联域以体现其时序关联特性, 但在电网调控的应用方式上有待进一步研究。文献^[21]构建了灵活性资源聚合体的

收稿日期: 2024-02-29; 修回日期: 2024-04-18。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5100-2022 40026A-1-1-ZN)。

模型输出量化指标体系，其中构建资源集群等效爬坡模型可行域投影具有较高的应用价值，可较好地体现资源的时序属性。电网韧性提升与负荷恢复等均涉及多时间节点。为明确配电网在韧性提升上的差异化属性，文献[22]提出了配电网向上送电外特性以及配电网向上支撑外特性模型，充分考虑各类资源出力在差异化时序上的支撑特性。

本文首先基于储能等资源自身的运行状态，提出响应资源剩余调节能力（remaining regulation ability, RRA）的模型构建方法；其次构建计及资源剩余调节能力的资源聚合体调控模型，并基于“域”的概念，使用顶点枚举法对资源聚合体的剩余调节能力与运行功率进行刻画；然后构建了面向电网运行与韧性提升的优化模型；最后通过算例分析，验证了本文方法对电网韧性的提升效果。

1 基于域的灵活性资源聚合体响应能力评估模型

1.1 资源聚合模型构建

资源聚合体包括电源资源与储能资源 2 类[21]。本文考虑电源资源主要包括微型燃气轮机（micro turbine, MT）等。

MT 的约束条件主要包括功率限制约束、功率因数限制约束、爬坡约束等[3]，具体为

$$P_{i,\min}^G \leq P_{i,t}^G \leq P_{i,\max}^G \quad (1)$$

$$P_{i,t}^G \tan \phi_{G,i}^{\min} \leq Q_{i,t}^G \leq P_{i,t}^G \tan \phi_{G,i}^{\max} \quad (2)$$

$$P_{C,i,t}^{G,\min} \leq P_{i,t+1}^G - P_{i,t}^G \leq P_{C,i,t}^{G,\max} \quad (3)$$

式中： $P_{i,t}^G$ 、 $Q_{i,t}^G$ 分别为 t 时刻第 i 个 MT 的有功、无功出力； $P_{i,\min}^G$ 、 $P_{i,\max}^G$ 分别为第 i 个 MT 的最小、最大有功出力； $P_{C,i,t}^{G,\max}$ 、 $P_{C,i,t}^{G,\min}$ 分别为第 i 个 MT 的爬坡上、下限； $\phi_{G,i}^{\min}$ 、 $\phi_{G,i}^{\max}$ 分别为第 i 个 MT 的最小、最大功率因数角。

储能系统（energy storage system, ESS）的约束条件主要包括功率限制约束、荷电状态（state of charge, SOC）约束等[6]，具体为

$$0 \leq P_{i,t}^{\text{dis}} \leq M_{i,t}^E \bar{P}_i^E \quad (4)$$

$$(M_{i,t}^E - 1) \bar{P}_i^E \leq P_{i,t}^{\text{ch}} \leq 0 \quad (5)$$

$$S_{\text{OC},i,t+1}^E = S_{\text{OC},i,t}^E - \frac{1}{E_i^E} \left(\eta_i^E P_{i,t}^{\text{ch}} + \frac{1}{\eta_i^E} P_{i,t}^{\text{dis}} \right) \Delta t \quad (6)$$

$$\underline{S}_{\text{OC},i}^E \leq S_{\text{OC},i,t}^E \leq \bar{S}_{\text{OC},i}^E \quad (7)$$

式中： $P_{i,t}^{\text{dis}}$ 、 $P_{i,t}^{\text{ch}}$ 分别为 t 时刻第 i 个 ESS 的放电、充电功率； $M_{i,t}^E$ 为 t 时刻第 i 个 ESS 的充放电状态，1 为放电，0 为充电； $\bar{P}_i^E$ 为第 i 个 ESS 的最大充放电功率； $S_{\text{OC},i,t}^E$ 为 t 时刻第 i 个 ESS 的 SOC； η_i^E 为第 i 个 ESS 的充放电效率； E_i^E 为第 i 个 ESS 的容量； Δt 为 ESS 调控间隔，本文选取 15 min； $\bar{S}_{\text{OC},i}^E$ 、 $\underline{S}_{\text{OC},i}^E$ 分别为第 i 个 ESS 的 SOC 上、下限。

考虑电网的网络潮流约束[23] 模型为

$$P_{ij,t}^{\text{LN}} = g_{ij} \frac{U_{i,t} - U_{j,t}}{2} - b_{ij}(\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \quad (8)$$

$$Q_{ij,t}^{\text{LN}} = -b_{ij} \frac{U_{i,t} - U_{j,t}}{2} - g_{ij}(\theta_{i,t} - \theta_{j,t}) \quad (9)$$

$$P_{j,t}^{\text{N}} = \sum_{l=1}^{L_g} P_{j,l,t}^{\text{G}} + \sum_{l=1}^{L_E} (P_{j,l,t}^{\text{dis}} - P_{j,l,t}^{\text{ch}}) = \sum_{ji \in \Lambda_j^{\text{LN}}} P_{ji,t}^{\text{LN}} \quad (10)$$

$$Q_{j,t}^{\text{N}} = \sum_{l=1}^{L_g} Q_{j,l,t}^{\text{G}} = \sum_{ji \in \Lambda_j^{\text{LN}}} Q_{ji,t}^{\text{LN}} \quad (11)$$

$$\underline{U}_i \leq U_{i,t} \leq \bar{U}_i \quad (12)$$

$$P_t^{\text{O}} = - \sum_{ij \in \Lambda_O^{\text{LN}}} P_{ij,t}^{\text{LN}} \quad (13)$$

$$P_{ij,t}^{\text{LN}} \cos \frac{2k\pi}{N} + Q_{ij,t}^{\text{LN}} \sin \frac{2k\pi}{N} \leq \bar{S}_{ij}^{\text{LN}} \cos \frac{\pi}{N}, \quad k \in [1, N] \quad (14)$$

式中： $P_{ij,t}^{\text{LN}}$ 、 $Q_{ij,t}^{\text{LN}}$ 分别为 t 时刻线路 ij 的有功、无功功率； g_{ij} 、 b_{ij} 分别为线路 ij 的电导、电纳； $\theta_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 的相角； L_g 和 L_E 分别为节点 j 处 MT 和 ESS 的数量； $U_{i,t}$ 为 t 时刻节点 i 电压的平方值； $\bar{U}_i$ 、 $\underline{U}_i$ 分别为电压平方的上、下限； $P_{j,t}^{\text{N}}$ 、 $Q_{j,t}^{\text{N}}$ 分别为 t 时刻节点 j 的有功、无功功率； $P_{j,l,t}^{\text{G}}$ 、 $Q_{j,l,t}^{\text{G}}$ 分别为 t 时刻节点 j 处第 l 个 MT 的有功、无功出力； $P_{j,l,t}^{\text{dis}}$ 、 $P_{j,l,t}^{\text{ch}}$ 分别为 t 时刻节点 j 处第 l 个 ESS 的放电、充电功率； Λ_j^{LN} 、 Λ_O^{LN} 分别为节点 j 、 O 连接的支路集合； P_t^{O} 分别为 t 时刻 PCC 输出的有功功率； $\bar{S}_{ij}^{\text{LN}}$ 为线路容量限制； k 为近似分支编号； N 为近似分支容量最大值的割线数。

1.2 资源剩余调节能力模型构建方法

针对各类资源与资源聚合体分别构建其 RRA 模型，以实现资源聚合体参与下的电网韧性提升目标。

RRA 主要通过判断当前系统运行状态，给出下一时刻的剩余调节能力评估，并构建当前系统决策、系统状态与剩余调节能力模型的关联模型。

对于 MT 而言，其 RRA 模型需综合考虑当前系统决策以及爬坡能力限制，分别为

$$0 \leq R_{i,t}^{G,+} \leq \min \{P_{C,i,t}^{G,\max}, P_{i,\max}^G - P_{i,t}^G\} \quad (15)$$

$$\max \{P_{C,i,t}^{G,\min}, P_{i,\min}^G - P_{i,t}^G\} \leq R_{i,t}^{G,-} \leq 0 \quad (16)$$

式中： $R_{i,t}^{G,+}$ 为 t 时刻第 i 个 MT 的正向调节能力； $R_{i,t}^{G,-}$ 为 t 时刻第 i 个 MT 的负向调节能力。

对于 ESS 而言，其 RRA 模型主要通过当前 ESS 的 SOC 与功率运行状态综合判断。以 ESS 放电状态为例，RRA 可通过当前 SOC 与 SOC 最小限值之间的差来进行计算，同时 RRA 也受到 ESS 自身的功率限值约束以及当前放电功率的共同限制。进一步通过设置布尔变量的方式，对 ESS 正向调节与负向调节能力同时进行表征。当 ESS 放电时，其 RRA 模型可表示为

$$\alpha_{i,t} R_{i,t}^{E,+} + (1 - \alpha_{i,t}) R_{i,t}^{E,-} \leq \min \left\{ \frac{(S_{OC,i,t}^E - S_{OC,i}^E) E_i^E}{\Delta t} - \frac{1}{\eta_i^E} P_{i,t}^{\text{dis}}, \bar{P}_i^E - P_{i,t}^{\text{dis}} \right\} \quad (17)$$

$$0 \leq R_{i,t}^{E,+} \leq \alpha_{i,t} (\bar{P}_i^E - P_{i,t}^{\text{dis}}) \quad (18)$$

$$-P_{i,t}^{\text{dis}} - \bar{P}_i^E \leq R_{i,t}^{E,-} \leq 0 \quad (19)$$

式中： $R_{i,t}^{E,+}$ 为 t 时刻第 i 个 ESS 的正向调节能力； $R_{i,t}^{E,-}$ 为 t 时刻第 i 个 ESS 的负向调节能力； $\alpha_{i,t}$ 为 t 时刻第 i 个 ESS 的放电时的正/负向调节能力标识，是布尔变量。

ESS 充电时的 RRA 设置规则与 ESS 放电时的设定规则相似。在定义 RRA 模型时，由于 ESS 的充电行为本质是转移电网的电能到 ESS 内部，本文考虑 RRA 模型为资源自身的 RRA，同时还须兼顾模型在资源聚合体的 RRA 表征时的通用性。对此，对 ESS 充电时的 RRA 模型参考方向设置为与 ESS 放电时相同的参考方向，均按照 ESS 充放电功率实际值的增减设定调节方向。这一正方向的设定只是为了便于后续的计算，并不影响 RRA

的评价。因此，对于 ESS 的充电行为而言，使用 $R_{i,t}^{E,+}$ 表示 ESS 充电时剩余放电能力的大小， $R_{i,t}^{E,-}$ 表示 ESS 充电时剩余充电能力的大小。总的来说，与 ESS 充电时的表征思路一样，当 ESS 充电时，其剩余调节能力模型可表示为

$$\beta_{i,t} R_{i,t}^{E,+} + (1 - \beta_{i,t}) R_{i,t}^{E,-} \geq \max \left\{ \eta_i^E P_{i,t}^{\text{ch}} - \frac{(S_{OC,i,t}^E - S_{OC,i}^E) E_i^E}{\Delta t}, -\bar{P}_i^E - P_{i,t}^{\text{ch}} \right\} \quad (20)$$

$$0 \leq R_{i,t}^{E,+} \leq -P_{i,t}^{\text{ch}} + \bar{P}_i^E \quad (21)$$

$$(1 - \beta_{i,t})(-P_{i,t}^{\text{ch}} - \bar{P}_i^E) \leq R_{i,t}^{E,-} \leq 0 \quad (22)$$

式中： $\beta_{i,t}$ 为 t 时刻第 i 个 ESS 放电时的正/负向调节能力标识，是布尔变量。

至此，本文构建了 MT 与 ESS 的剩余调节能力模型。对于资源聚合体而言，资源个体的 RRA 也应当进行聚合，RRA 与资源聚合体中各资源的有功功率聚合形式一致，具体聚合表征方式为

$$\begin{cases} R_{j,t}^{N,+} = \sum_{l=1}^{L_g} R_{j,l,t}^{G,+} + \sum_{l=1}^{L_E} R_{j,l,t}^{E,+} = \sum_{ji \in \Lambda_j^{LN}} R_{ji,t}^{LN,+} \\ R_{j,t}^{N,-} = \sum_{l=1}^{L_g} R_{j,l,t}^{G,-} + \sum_{l=1}^{L_E} R_{j,l,t}^{E,-} = \sum_{ji \in \Lambda_j^{LN}} R_{ji,t}^{LN,-} \end{cases} \quad (23)$$

$$\begin{cases} R_t^{O,+} = - \sum_{ij \in \Lambda_O^{LN}} R_{ij,t}^{LN,+} \\ R_t^{O,-} = - \sum_{ij \in \Lambda_O^{LN}} R_{ij,t}^{LN,-} \end{cases} \quad (24)$$

式中： $R_{j,t}^{N,+}$ 和 $R_{j,t}^{N,-}$ 分别为 t 时刻节点 j 的正向和负向调节能力； $R_{ji,t}^{LN,+}$ 和 $R_{ji,t}^{LN,-}$ 分别为线路 ij 传输的正向调节能力和负向调节能力； $R_t^{O,+}$ 和 $R_t^{O,-}$ 分别为资源聚合体端口的正向和负向调节能力。

1.3 基于域的资源聚合模型构建

对于资源聚合体的电网韧性提升问题，主要通过极端场景下资源聚合体提供的功率支撑来实现负荷恢复的供应需求。而 RRA 所表征的资源剩余调节能力为功率调节能力，因此有必要表征资源聚合体的 RRA 与运行功率的关联关系，从而使 RRA 能够应用于资源聚合体的调控。

对此，本文基于域的概念构建有功功率与剩余调节能力 RRA 之前的关联关系，形成资源聚合体与电网公共耦合节点（point of common coupling，

PCC) 处的资源聚合体 P-RRA 运行域 (resource aggregate domain of P-RRA, RDPR)。

下面使用顶点枚举法计算 RDPR, 其求解思路为通过求解一系列具有不同目标函数的优化问题^[24], 得到 RDPR 的各个顶点, 形成 RDPR。

1) 优化问题构建。针对 $R_t^{O,+}$ 和 $R_t^{O,-}$ 构建求解顶点的目标函数分别为

$$\max_z \{\mu_m^T z_{m,+}, z_{m,+} = (P_t^O, R_t^{O,+}) \in \Omega^+ \quad (25)$$

$$\max_z \{\mu_m^T z_{m,-}, z_{m,-} = (P_t^O, R_t^{O,-}) \in \Omega^- \quad (26)$$

式中: μ_m^T 为枚举新顶点的单位方向向量; $z_{m,+}$ 和 $z_{m,-}$ 分别为域 Ω^+ 和域 Ω^- 内的点。

针对 $R_t^{O,+}$ 与 $R_t^{O,-}$, 分别设定优化问题 M1 与优化问题 M2。优化问题 M1: 目标函数为式 (25), 约束条件为式 (1) ~ (24); 优化问题 M2: 目标函数为式 (26), 约束条件为式 (1) ~ (24)。

2) 终止条件设定。选用豪斯多夫距离小于某特定值作为 RDPR 顶点枚举的终止条件, 即新枚举所得顶点到与之对应原直线的相对位移小于某特定值^[6]。该相对位移 h 为

$$h = \frac{\mu_m^T(z_{2,t} - z_{0,t})}{\|\mu_m\|_2} \leq h_\delta \quad (27)$$

式中: $z_{0,t}$ 为 t 时刻生成的新顶点; $z_{2,t}$ 为生成的新顶点顺时针侧的顶点; $\|\mu_m\|_2$ 为方向向量 2 范数; h_δ 为终止条件。

3) 算法流程具体如下。

①初始化顶点枚举的方向向量 μ_m^T 。

②依次求取分属不同枚举方向向量 μ_m^T 的优化问题 M1 与 M2, 分别得到最优解 $z_{m,+}$ 和 $z_{m,-}$, 并分别存入各自的顶点集合。

③分别计算 2 个顶点集合内所有相邻顶点间直线的单位外法向量, 作为下一轮迭代的枚举方向向量, 同时更新方向向量集合 F 。

④分别计算 2 个顶点集合内每个顶点对应的 h , 若某顶点处的 h 小于 h_δ 时, 停止该顶点与相邻顶点所确定的外法向量枚举环节; 若大于, 则重复执行②-④环节, 直到所有顶点的 h 均小于 h_δ 为止。

⑤分别求解 2 个顶点集合内各顶点形成得到当前时刻的 RDPR。

⑥求解 2 个多边形交集得资源聚合体的 RDPR。

2 考虑资源剩余调节能力的电网运行与韧性提升优化模型

考虑资源聚合体的电网韧性提升需要计及资源当前决策下的 RRA, 以便实现全过程的电网韧性提升。不计及 RRA 的电网韧性提升模型对于资源的时序差异特征响应能力不足, 可能导致资源功率供应与负荷恢复需求的供需匹配时序差异问题。同时, 随着配电网中储能类资源种类与数量增加, 资源聚合体虽然能够给电网提供更好的灵活性支撑, 但是存在负荷供应缺口最大时电网无资源可用的风险, 使得负荷恢复需求无法得到满足^[2,25]。因此, 有必要建立考虑 RRA 的电网运行与韧性提升优化模型。

本文建立了计及 RRA 的电网正常运行与极端场景下一体化优化运行模型, 以实现不同阶段的经济性最优目标与韧性提升目标。

按照电网受灾时间进程, 可将故障处理过程划分为灾前、灾中和灾后 3 个阶段。在极端事件发生前, 电网处于正常运行状态, 调度模型以经济性最优为目标; 发生极端事件后, 电网处于故障状态运行, 调度模型以负荷恢复量最大为目标; 在灾后阶段, 电网又重新恢复到正常状态, 调度模型以经济性最优为目标。

2.1 目标函数

常规运行与极端场景的统一优化运行模型目标函数包含常规运行场景下电网各资源的运行成本、资源聚合体的固定成本以及极端场景下电网负荷恢复量^[26], 具体表示为

$$\min \left\{ \gamma_t \left(\alpha_t^B P_t^B + \sum_{i=1}^{O_d} \alpha_i^O P_{i,t}^O \right) - \sum_{t=t_b}^{t_b+1} \left[(1 - \gamma_t) \sum_{i=1}^{L_d} \lambda_{i,t} P_{i,t}^L \right] \right\} \quad (28)$$

式中: γ_t 为表征配电网状态的布尔变量, 0 表示极端场景, 1 表示正常运行; α_t^B 为 t 时刻配电网购电成本系数; P_t^B 为 t 时刻配电网购电量; α_i^O 为资源聚合体 i 的成本系数; $P_{i,t}^O$ 为 t 时刻资源聚合体 i 的功率提供; O_d 为资源聚合体的个数; $\lambda_{i,t}$ 为表征 t 时刻负荷 i 的供电状态的布尔变量, 0 表示完全停电, 1 表示正常供电; $P_{i,t}^L$ 为 t 时刻负荷 i 的功率; t_b 为优化初始时段; L_d 为配电网中负荷的数量。

2.2 约束条件

1) 电网模型。此处设定的电网运行约束与式 (8)~(12)、式 (14) 相同。

2) 可再生能源机组的出力模型为

$$0 \leq P_{i,t}^g \leq \bar{P}_{i,t}^g \quad (29)$$

$$P_{i,t}^g \tan \phi_{g,i}^{\min} \leq Q_{i,t}^g \leq P_{i,t}^g \tan \phi_{g,i}^{\max} \quad (30)$$

式中： $\bar{P}_{i,t}^g$ 为 t 时刻机组 i 的预测有功功率； $P_{i,t}^g$ 为 t 时刻机组 i 的实际有功功率； $Q_{i,t}^g$ 为 t 时刻机组 i 的无功功率； $\phi_{g,i}^{\max}$ 、 $\phi_{g,i}^{\min}$ 为机组 i 的最小、最大功率因数角。

3) 负荷恢复模型。极端场景下可恢复的负荷约束限制^[26]为

$$(1 - \gamma_t) P_{i,t}^L \leq (1 - \lambda_{i,t}) P_{i,t}^{LD} \quad (31)$$

式中： $P_{i,t}^{LD}$ 为极端场景下 t 时刻负荷 i 可恢复的负荷量上限，即 t 时刻负荷 i 的原始负荷量。

4) RDPR 模型。通过线性不等式描述 RDPR 模型，进一步形成线性不等式组为

$$AP_{i,t}^O + BR_{i,t}^O + C \leq 0 \quad (32)$$

$$P_{i,t+1}^O = P_{i,t}^O + R_{i,t}^O \quad (33)$$

式中： A 、 B 和 C 均为线性不等式组的系数矩阵； $P_{i,t}^O$ 和 $R_{i,t}^O$ 分别为 t 时刻资源聚合体 i 的有功功率和 RRA。

3 算例分析

3.1 算例配置

系统采用 IEEE-141 节点系统配电网，资源聚合体基于 IEEE-33 节点网络拓扑进行资源配置，电网拓扑结构如图 1 和图 2 所示。资源聚合体内的电源与储能配置如表 1 和表 2 所示，配电网内电源配置如表 3 所示，分散式风电最大出力如图 3

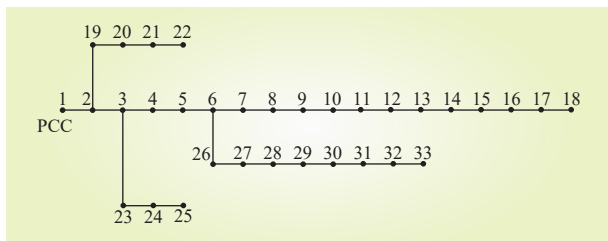


图 1 IEEE-33 节点系统拓扑结构

Fig. 1 Topology of IEEE-33 system

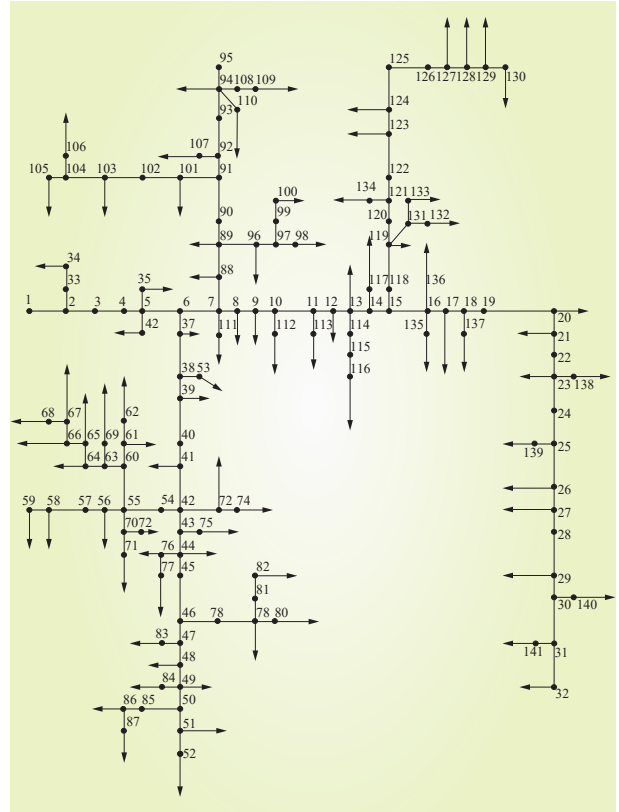


图 2 IEEE-141 节点系统

Fig. 2 IEEE-141 system

表 1 资源聚合体内的 MT 配置
Table 1 MT configuration within resource aggregate

编号	节点	$P_{\min}/\text{MW}$	$P_{\max}/\text{MW}$	$P_C/(\text{MW} \cdot 15 \text{ min}^{-1})$	功率因数
R_1	13	0.1	0.5	0.2	-0.95~0.95
	28	0.1	0.5	0.2	-0.95~0.95
R_2	8	0.1	0.5	0.2	-0.95~0.95
	13	0.1	0.5	0.2	-0.95~0.95
	19	0.1	0.5	0.2	-0.95~0.95
	24	0.1	0.5	0.2	-0.95~0.95
	28	0.1	0.5	0.2	-0.95~0.95
	28	0.1	0.5	0.2	-0.95~0.95

所示。以 15 min 为最小调控时间间隔，同时假设配电网在第 27 时刻遭遇极端情况与上级电网断开，直到第 89 时刻恢复与主网供电。即 1—27 时段为灾前阶段，28—89 为灾中阶段，89—96 为灾后阶段。

本文所有算例测试均基于 Matlab-2022a 平台，CPU 为 Intel(R) Core(TM) i5-12400，求解器为商用求解器 Cplex-12.10.0。

电网在灾害发生后负荷恢复量的增加是电网韧性提升的直观体现。因此，制定合理高效的负

表 2 资源聚合体内的 ESS 配置
Table 2 ESS configuration within resource aggregate

编号	节点	$P_{\max}/\text{MW}$	$E/(\text{MW}\cdot\text{h})$	效率/%	SOC范围/%
R_1	10	0.5	1	85	20~80
	14	1.0	2	85	20~80
	25	0.2	1	85	20~80
	27	0.5	1	85	20~80
R_2	25	0.2	1	85	20~80
	27	0.5	1	85	20~80
R_3	5	0.2	1	85	20~80
	10	0.5	1	85	20~80
	14	0.5	2	85	20~80
	20	0.5	1	85	20~80
	25	0.2	1	85	20~80
	27	0.5	1	85	20~80
	32	0.2	0.8	85	20~80

表 3 配电网内可再生能源配置
Table 3 Renewable energy configuration in distribution network

类型	节点	$P_{\max}/\text{MW}$	功率因数
分散式风电	20	1.5	-0.95~0.95
	54	1.5	-0.95~0.95
	90	1.5	-0.95~0.95

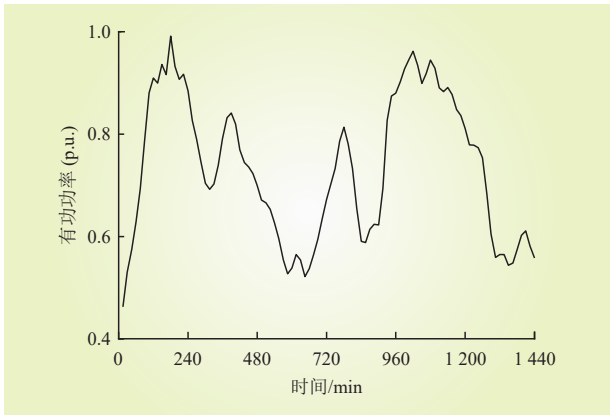


图 3 风电出力
Fig. 3 Wind power output

荷恢复策略有助于减少电网的负荷削减量，从而提升电网韧性。为了进一步描述电网韧性提升策略对电网韧性的影响，引入表征电网韧性与负荷实际恢复量之间的关系式，通过明确采取电网韧性提升策略下负荷恢复量的占比降低程度来体现策略对电网韧性的提升效果。电网韧性评估指

标 M 为

$$M = \frac{1}{T} \sum_{t=1}^T \frac{P_{i,t}^L - P_{i,t}^R}{P_{i,t}^{LD} - P_{i,t}^R} \quad (34)$$

式中： T 为极端场景下系统运行时段数。 M 值越大，电网韧性提升效果越明显^[27]。

为验证本文所提计及灵活性资源聚合体的电网韧性提升策略可行性，设定如下算例场景。

算例 E1：仅考虑配电网原始电源，不考虑资源聚合体；算例 E2：考虑资源聚合体，但资源聚合体不计及 RRA；算例 E3：考虑资源聚合体，同时资源聚合体计及 RRA。

3.2 算例分析

配电网内配置基于前述资源聚合体的配置方案以及设定的资源初始运行状态，求解 3 个资源聚合体的 RDPR，计算结果如图 4 所示。

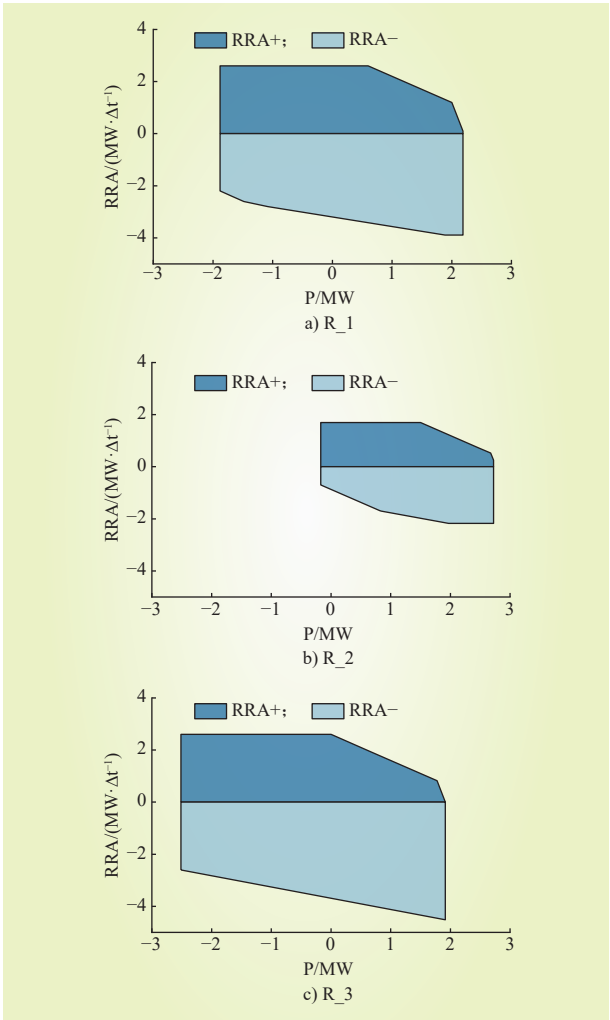


图 4 基于域的 RDPR 表征
Fig. 4 Domain-based characterization of the RDPR

基于 RDPR 的点集模型，求解式 (32) 所示的线性不等式组。进一步根据不同的算例配置，求解电网负荷削减模型，得到负荷状态变化对比如图 5 所示。

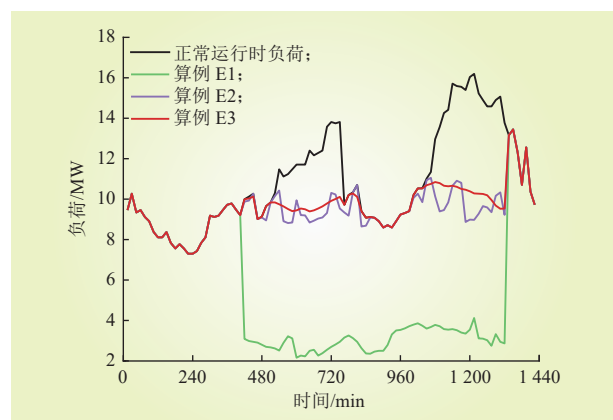


图 5 不同算例下负荷状态变化对比

Fig. 5 Comparison of load status changes under different calculation examples

图 5 给出了电网原始负荷和 3 个算例下的负荷状态变化情况。从第 27 时刻开始，配电网遭遇极端情况与上级电网断开。在 27—35 时段，由于配电网内可再生能源与资源聚合体供应能力充足，算例 E2 与算例 E3 基本都能够较好地实现负荷供应。在第 35 时刻，算例 E2 以当前时刻的韧性提升为目标，对资源进行调动，能够实现更好的负荷恢复，但由于其未考虑 RRA，导致 RRA 不足，使得在后续负荷需求更大时，负荷恢复效果较差。算例 E3 在第 35 和 36 时刻的负荷恢复效果虽然低于算例 E2，但由于本文方法计及 RRA，当系统负荷需求增大时，仍然能够提供相对较高的稳定功率供应。同时，该情况还出现在第 40、48、49、54、70、71、77、78、86 和 87 等时刻。本文策略通过对资源聚合体的功率时移，实现了电网韧性提升目标。同时，该策略计及 RRA，相较于算例 E2，负荷供应更加平稳，避免了由于储能容量限制造成的长时供电能力短缺等问题。

通过式 (35)，得到算例 E2 的 M 值为 0.786，算例 E3 的 M 值为 0.822。算例 E3 相较于算例 E2 而言，提升了 4.45%。这说明本文计及 RRA 的资源聚合体有效提高了电网的负荷恢复量，提升了电网的韧性水平。

4 结语

本文通过构建基于响应资源剩余调节能力的资源聚合体模型，实现了资源聚合体参与下电网韧性的进一步提升。依据电网内储能等资源自身的运行状态，构建了各类资源的剩余调节能力模型，并进一步建立计及资源剩余调节能力的资源聚合体调控模型。基于“域”的概念，求解了资源聚合体的剩余调节能力与运行功率可行域投影。通过构建面向电网韧性提升目标的电网最大负荷恢复量模型，证明了本文策略的电网韧性提升效果。

参考文献：

- [1] 罗欣儿, 杜进桥, 田杰, 等. 基于深度强化学习的主动配电网高恢复力决策方法 [J]. 南方电网技术, 2022, 16(1): 67–74.
LUO Xiner, DU Jinqiao, TIAN Jie, *et al.* High resilience decision-making method of active distribution network based on deep reinforcement learning[J]. Southern Power System Technology, 2022, 16(1): 67–74.
- [2] 宋梦, 周佳妮, 高赐威, 等. CPSS 视角下城市建筑与配电网高韧性协调运行: 研究述评与展望 [J]. 电力系统自动化, 2023, 47(23): 105–121.
SONG Meng, ZHOU Jiani, GAO Ciwei, *et al.* High-resilience coordinated operation of urban buildings and distribution networks from cyber-physical-social system perspective: research review and prospect[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(23): 105–121.
- [3] 许泽凯, 刘翌, 和敬涵, 等. 新型配电网多虚拟电厂分布式资源聚合与聚合体优化运行方法 [J]. 高电压技术, 2024, 50(1): 105–116.
XU Zekai, LIU Zhao, HE Jinghan, *et al.* Distributed resource aggregation and aggregate optimization operation method of multi-virtual power plant in new power distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 105–116.
- [4] 宋天琦, 吕志鹏, 宋振浩, 等. 虚拟电厂规模化灵活资源聚合调控框架研究与思考 [J]. 中国电力, 2024, 57(1): 2–8.
SONG Tianqi, LV Zhipeng, SONG Zhenhao, *et al.* Research and thinking on the aggregation and dispatching control framework of virtual power plant's large scale flexible resources[J]. Electric Power, 2024, 57(1): 2–8.
- [5] 周海浪, 刘一畔, 陈雨果, 等. 考虑灵活性收益的需求侧资源可行域

- 聚合方法[J]. 中国电力, 2022, 55(9): 56–63, 155.
- ZHOU Hailang, LIU Yipan, CHEN Yuguo, *et al.* Demand side feasible region aggregation considering flexibility revenue[J]. Electric Power, 2022, 55(9): 56–63, 155.
- [6] 许泽凯, 和敬涵, 刘翌, 等. 基于耦合约束解耦的虚拟电厂动态可行域求解方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(9): 3440–3452.
- XU Zekai, HE Jinghan, LIU Zhao, *et al.* Solution method of virtual power plant dynamic feasible region based on decoupling of coupling constraints[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3440–3452.
- [7] 孙科, 陈文钢, 陈佳佳, 等. 基于电动汽车的极端场景多微电网韧性提升策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(24): 53–65.
- SUN Ke, CHEN Wengang, CHEN Jiajia, *et al.* A resilience enhancement strategy for multi-microgrid in extreme scenarios based on electric vehicles[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(24): 53–65.
- [8] 孙为民, 孙华东, 何剑, 等. 面向严重自然灾害的电力系统韧性评估技术综述[J]. 电网技术, 2024, 48(1): 129–139.
- SUN Weimin, SUN Huadong, HE Jian, *et al.* Review of power system resilience assessment techniques for severe natural disasters[J]. Power System Technology, 2024, 48(1): 129–139.
- [9] 苏娟, 李拓, 刘峻玮, 等. 综合能源系统下虚拟储能建模方法与应用场景研究综述及展望[J/OL]. 中国电力, 2024: 1–15. (2024-04-07). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20240403.1840.004.html>.
- SU Juan, LI Tuo, LIU Junwei, *et al.* Review and prospect of modeling method and application scenario of virtual energy storage under integrated energy system[J/OL]. Electric Power, 2024: 1–15. (2024-04-07). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.3265.TM.20240403.1840.004.html>.
- [10] 王文悦, 刘海涛, 季宇. 虚拟电厂可调空间统一建模及其参与调峰市场的优化运行策略[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(18): 74–82.
- WANG Wenyue, LIU Haitao, JI Yu. Unified modeling for adjustable space of virtual power plant and its optimal operation strategy for participating in peak-shaving market[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(18): 74–82.
- [11] 周天娇, 周任军, 黄婧杰, 等. 储能聚合商自营共享模式下电能交易方法[J]. 电力自动化设备, 2023, 43(5): 171–176.
- ZHOU Tianjiao, ZHOU Renjun, HUANG Jingjie, *et al.* Energy trading method of energy storage aggregators under self-operating and sharing mode[J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(5): 171–176.
- [12] 汪锋, 刘智强, 张克勇, 等. 基于分时电价与储能充放电策略的台区可调控资源聚合及调度[J]. 储能科学与技术, 2023, 12(4): 1204–1214.
- WANG Feng, LIU Zhiqiang, ZHANG Keyong, *et al.* Adjustable resource aggregation and scheduling in distribution transformer station areas based on time-of-use price and charge-discharge strategy of energy storage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2023, 12(4): 1204–1214.
- [13] TAN Z F, ZHONG H W, WANG X Y, *et al.* An efficient method for estimating capability curve of virtual power plant[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2022, 8(3): 780–788.
- [14] MAURICETTE L, DONG Z H, ZHANG L N, *et al.* Resilience enhancement of urban energy systems via coordinated vehicle-to-grid control strategies[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 9(2): 433–443.
- [15] TAO R, ZHAO D M, XU C Y, *et al.* Resilience enhancement of integrated electricity-gas-heat urban energy system with data centres considering waste heat reuse[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2023, 14(1): 183–198.
- [16] PILTAN G, PIROUZI S, AZARHOOSHANG A, *et al.* Storage-integrated virtual power plants for resiliency enhancement of smart distribution systems[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105563.
- [17] 于松源, 张峻松, 元志伟, 等. 计及热惯性的热电联产虚拟电厂韧性提升策略[J]. 发电技术, 2023, 44(6): 758–768.
- YU Songyuan, ZHANG Junsong, YUAN Zhiwei, *et al.* Resilience enhancement strategy of combined heat and power-virtual power plant considering thermal inertia[J]. Power Generation Technology, 2023, 44(6): 758–768.
- [18] 勇蔚柯, 李扬, 曹阳. 基于需求响应的配电网韧性提升技术研究[J]. 电力需求侧管理, 2022, 24(2): 20–26.
- YONG Weike, LI Yang, CAO Yang. Research on improvement technology of distribution network resilience based on demand response[J]. Power Demand Side Management, 2022, 24(2): 20–26.
- [19] ZHANG S D, GE S Y, LIU H, *et al.* Region-based flexibility quantification in distribution systems: an analytical approach considering spatio-temporal coupling[J]. Applied Energy, 2024, 355: 122175.
- [20] ZHANG T C, WANG J X, LI G Y, *et al.* Characterizing temporal-coupled feasible region of active distribution networks[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2022, 58(5): 5687–5696.
- [21] 王思远, 吴文传. 灵活性资源聚合参考模型与量化指标体系[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(3): 1–9.

- WANG Siyuan, WU Wenchuan. Aggregation reference model and quantitative metric system of flexible energy resources[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2024, 48(3): 1–9.
- [22] 王伟歆, 王小君, 许寅, 等. 考虑输配协同的电网并行恢复分区及机组启动次序统一优化决策方法 [J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 859–872.
- WANG Weixin, WANG Xiaojun, XU Yin, *et al.* A synthetic optimal decision-making method for parallel restoration sectionalizing and generator start-up sequence of power grids considering transmission and distribution system coordination[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2024, 44(3): 859–872.
- [23] TAN Z F, ZHONG H W, XIA Q, *et al.* Estimating the robust P-Q capability of a technical virtual power plant under uncertainties[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2020, 35(6): 4285–4296.
- [24] TAN Z F, YAN Z, ZHONG H W, *et al.* Non-iterative solution for coordinated optimal dispatch via equivalent projection: Part II: method and applications[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2024, 39(1): 899–908.
- [25] 张海春, 陈望达, 沈浚, 等. 计及灵活性资源的配电网韧性研究评述 [J]. 电力建设, 2023, 44(12): 66–84.
- ZHANG Haichun, CHEN Wangda, SHEN Jun, *et al.* Review of power distribution network resilience studies considering flexibility resources[J]. *Electric Power Construction*, 2023, 44(12): 66–84.
- [26] 马继洋, 蔡永翔, 唐巍, 等. 考虑电动汽车参与韧性提升的配电网状态平滑切换控制策略 [J]. 电力建设, 2024, 45(5): 29–36.
- MA Jiyang, CAI Yongxiang, TANG Wei, *et al.* Enhancing distribution network resilience: electric vehicle integration in seamless state switching strategy[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(5): 29–36.
- [27] 王志伟, 王伟, 李德鑫, 等. 冰灾天气下考虑输配协同的电-热联合系统韧性提升策略 [J]. 电力建设, 2024, 45(5): 9–18.
- WANG Zhiwei, WANG Wei, LI Dexin, *et al.* Enhancing resilience in electric-heat combined system: coordinated approach for transmission and distribution network during ice disasters[J]. *Electric Power Construction*, 2024, 45(5): 9–18.

作者简介:

赖业宁 (1975—), 男, 博士, 高级工程师, 从事电力安全稳定分析与控制、新能源并网稳控分析及控制技术研究, E-mail: laiyening@sgepri.sgcc.com.cn;

孙仲卿 (1992—), 男, 通信作者, 硕士, 工程师, 从事电力系统分析及优化控制研究, E-mail: SZQ20240@163.com。

(责任编辑 于静茹)

Power Grid Optimization Operation and Resilience Improvement Strategy Considering the Participation of Energy Storage Resource Aggregation

LAI Yening¹, SUN Zhongqing¹, LU Zhiping², LIU Qin²

(1. State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China; 2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210000, China)

Abstract: Extreme weather brings many challenges to the construction and operation of new power system, and the continuous enrichment of the flexible resources of power system provides the power grid new ideas to deal with extreme weathers. Considering the scenarios of energy storage and other resources aggregation participating in power grid load recovery under extreme conditions, a study is made on the strategy and method for resource aggregation participating in power grid resilience improvement. Firstly, based on the operation status of energy storage resources, a resource surplus adjustment ability model is proposed. And then, a resource aggregation regulation model is established considering the resource surplus adjustment ability, and through "domain" characterization of the correlation between the surplus adjustment ability of resource aggregate and operation power, a power grid optimization operation and resilience improvement model is further built. Finally, the effectiveness of the proposed strategy for power grid resilience improvement is verified through case study.

This work is supported by Science and Technology Project of SGCC (No.5100-202240026A-1-1-ZN).

Keywords: energy storage; resource aggregation; residual regulation capacity; resilience improvement