文章编号：1000-3673（2026）01-0014-14 中图分类号：TM 721 文献标志码：A 学科代码：470·40

基于压缩空气储能的电-热综合能源系统两阶段弹性提升策略

刘权[1]，钟剑[2]，陈晨[1,2]，别朝红[1,2]
（1．西安交通大学国家储能技术产教融合创新平台(中心)，陕西省 西安市 710049；
2．西安交通大学电气工程学院，陕西省 西安市 710049）

Two-stage Resilience Enhancement Strategy for Integrated Electricity-heat Energy System Based on Compressed Air Energy Storage

LIU Quan[1], ZHONG Jian[2], CHEN Chen[1,2], BIE Zhaohong[1,2]
(1. National Innovation Platform (Center) for Industry-education Integration of Energy Storage Technology, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China;
2. School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: In recent years, extreme events have frequently caused power outages in distribution systems. Due to network interconnectivity, the power failure could further disrupt the stability of energy networks that have been integrated with distribution systems, such as heat networks. Considering this, this paper proposes a two-stage (pre-disaster and post-disaster) resilience enhancement strategy that incorporates compressed air energy storage (CAES) and a mobile energy storage system (MESS) for a CAES-integrated electricity-heat energy system. An advanced adiabatic CAES utilizing air storage tanks offers technical advantages, including combined heat and power capabilities and independence from geographical constraints. This system can be flexibly deployed and integrated into electricity-heat coupled energy systems. Considering scenarios where typhoons damage power lines, the core target of the proposed strategy is to maximize the total value of restored electrical and thermal loads. The first stage of this strategy focuses on deploying CAES by initially solving a bi-level optimization model to obtain a set of superior solutions and further considering network characteristics to select the best solution. The second stage involves collaborative scheduling of CAES and MESS to form microgrids through network reconfiguration, ensuring load supply. Finally, a case study is conducted on an integrated energy system composed of a 51-node power distribution network and an 8-node heat network, validating the superiority of the CAES-integrated electricity-heat energy system and the advantages of CAES and MESS cooperation in load restoration.

KEY WORDS: compressed air energy storage; integrated electricity-heat energy system; distribution network resilience; multi-type energy storage coordination; mobile energy storage system

摘要：近年来，极端事件导致的配电网停电事故频频发生，在网络互联的大背景下，电力断供还可能进一步影响与配电网耦合的热力网等能源网络的稳定运行。基于此，该文针对电-热综合能源系统，提出压缩空气储能(compressed air energy storage，CAES)与移动储能(mobile energy storage system，MESS)协同参与的灾前-灾后两阶段弹性提升策略。采用储气罐的先进绝热压缩空气储能系统具备热电联供、不受地理条件限制等技术优势，可被灵活部署并用于构建电-热综合能源系统。考虑台风对配电网线路造成破坏的场景，该策略以恢复的电、热负荷总价值最大为目标。灾前阶段旨在部署 CAES 的位置，通过求解双层优化模型获得“较优解”集合，进一步考虑网络特征筛选出最优解。灾后阶段协同调度 CAES 与 MESS，通过网络重构构建微电网实现负荷保供。最后，使用 51 节点配电网和 8 节点热网构成的综合能源系统进行算例分析，验证了 CAES 耦合的电-热综合能源系统的优越性，以及 CAES 与 MESS 协同恢复方案的优势。

关键词：压缩空气储能；电-热综合能源系统；配电网弹性；多类型储能协同；移动储能

DOI：10.13335/j.1000-3673.pst.2025.0010

0 引言

近年来，小概率-高损失极端事件对配电网的安全稳定运行能力构成极大威胁。随着极端事件的发生频率逐渐增长，提升配电网弹性(Resilience，也可称为“韧性”)成为保障电力稳定供应的重要举措[1]。城市配电网作为与负荷直接连接的电力设施，

基金项目：国家自然科学基金项目(52377122，U23B6006)。
Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52377122, U23B6006).

在极端事件下尤其脆弱，因此其负荷保供问题成为一项关键的研究课题[2]。

根据措施实施时间的不同，配电网弹性提升策略可以分为灾前防御、灾中响应和灾后恢复 3 类[3]。灾前防御策略包括线路加固[4]、灵活资源(如移动储能)预部署[5]等，通过预先对系统进行调整、改造从而更好地应对突发事故。灾中响应策略包括对可控负荷[6]、分布式发电资源[4]以及储能系统[7]的调节和对远动开关[8]的控制以减少失负荷损失。灾后恢复策略主要是调配检修和运行人员修复故障元件[9]，实现完全的供电恢复。考虑上述不同恢复措施对配电网弹性提升的差异化效果[10]，部分研究提出了多阶段配电网恢复策略，实现更长时间尺度上的弹性提升[11-12]。

储能作为一种具备时间转移灵活性的资源在弹性提升策略中被广泛使用[13]，现有的研究大多关注本质为化学电池的移动储能系统(mobile energy storage system，MESS)。文献[7]通过规划 MESS 的位置和容量并对其进行调派，实现了配电网在常规场景下的经济运行和灾害场景下的弹性提升。文献[14]考虑冰灾对配电网和交通网的破坏，选择最优行驶路径进行 MESS 的调派，实现了配电网灾后失负荷损失最小。但是，MESS 的空间灵活性同时限制了其装设容量，在本地机组突然中断时可发挥短时间支撑作用[15]，但在严重灾害造成大范围停电的场景下“独木难支”。

压缩空气储能(compressed air energy storage，CAES)系统具备大容量、低成本、清洁环保的技术优势[16]，能够弥补 MESS 在容量方面的不足。在技术推动下，CAES 可以通过储气罐的形式存储高压气体，从而摆脱传统 CAES 方法使用盐穴和人工硐室储气造成的地理限制[17]。例如，2021 年我国实现并网的张家口兆瓦级先进压缩空气储能国家示范项目即采用储气罐[18]。相较于抽水蓄能等其他大容量固定式储能技术，采用储气罐的压缩空气储能系统具有更高的部署自由度，可根据需求灵活选址。CAES 在日常场景下可为配电网提供削峰填谷、频率调节等服务。在面对极端灾害时，将具有容量优势的 CAES 与具有空间灵活性的 MESS 协同配合，能够满足配电网多类型灾害场景下的负荷恢复需求，有效提升配电网弹性。然而，在相关领域缺乏相应的研究工作。

随着智慧城市的快速发展，各种能源网络与配电网的耦合应用日益普遍。这种耦合特性有利于多能互补，但也会增加耦合网络的脆弱性。在遭受极端灾害破坏时，耦合能源网络中的局部故障往往会影响全系统的稳定运行[19]。为解决上述问题，相关学者在综合能源系统的弹性提升领域开展了广泛的研究工作。文献[20]通过灾前利用建筑物热惯性存储热能与灾后故障抢修的联合措施，实现了热-电耦合网络面向极端冰雪灾害场景的弹性提升；文献[21]利用地下天然气管道在灾害中的高可靠性，使用其替代部分输电线路进行能量传输，有效提升了电-气耦合系统的综合弹性。但上述研究未考虑综合能源系统中关键耦合设备在提升弹性中的作用，且针对电-热综合能源系统弹性提升的研究相对较少。先进绝热压缩空气储能系统在运行时存在电能与热能的相互转化，但其耦合不同能源网络的潜能未得到充分挖掘。此外，利用储能等灵活资源进行混合网络弹性提升领域的研究较少。

针对上述问题，本文针对先进绝热压缩空气储能所耦合的电-热综合能源系统，提出基于 CAES 和 MESS 协同的两阶段弹性提升策略。首先，将先进绝热压缩空气储能系统作为配电网和热网的耦合枢纽，搭建了电-热综合能源系统。本文进一步考虑了台风灾害破坏场景，建立了基于 CAES 和 MESS 协同规划调派的灾前-灾后两阶段弹性提升模型。该模型以恢复负荷价值最大为目标，在灾前阶段使用双层优化建模方法，并综合考虑网络结构中的物理特征对 CAES 的最优工作位置进行选择；在灾后阶段，通过对 CAES 与 MESS 的协同调度以及对配电网的拓扑控制，构建多个微电网以恢复负荷电力供应，并利用热泵和储热系统共同实现热力保障。最后使用综合能源系统算例，对本文提出的弹性提升模型进行仿真分析和验证，论证了两种储能设施协同配合恢复方法的优越性。本文的主要贡献如下：

1）提出了基于压缩空气储能的电-热综合能源系统架构，充分发挥了新型 CAES 不受地理条件限制、容量大、热电联供的技术优势，因此 CAES 可自由选址，且灾后能够兼顾配电网和热网的负荷应急 保供。

2）提出了基于 CAES 选址的灾前电-热综合能源系统弹性提升策略，采用双层优化模型输出“较优解”集合，进而结合配电网物理特征全面分析，充分减弱了优化模型的求解场景对选址结果的影响，实现 CAES 综合最优部署。

3）提出了面向灾后负荷保供的 CAES 与 MESS 协同控制与调派方案，充分融合了 CAES 的大容量储能特性和 MESS 的空间灵活特性，通过两种储能

设施的协调配合，实现了电、热负荷的有效恢复。

1 基于 CAES 的电-热综合能源系统

台风等极端事件会造成电力网络大面积断线，电-热综合能源系统中的电力负荷及依赖电力供应的热负荷将损失严重。移动储能虽具有空间转移特性，但仅可实现短时间功率支撑[15]，在大面积停电且故障持续存在的场景中，移动储能难以实现长时间独立供电。固定式储能在面对严重事故时具备更强的功率和容量支撑能力[22]，通过二者的协调配合，可以有效提升综合能源系统面对极端事件的弹性。

1.1 大容量储能特性对比

当前适配于电力系统的大容量固定式储能主要有抽水蓄能、压缩空气储能和电池储能[23]，此外氢储能也是一种新兴大容量储能技术。

针对极端事件后综合能源系统的负荷应急恢复，储能设施在规划时除了考虑容量特征外，还需要具备较好的经济性和安全性，能够耦合热网以提高热负荷的供应灵活性，且部署位置限制较少，从而可根据配电网特征实现优化选址。

附录表 E1 从度电成本、安全性、电热耦合应用、部署自由度等多个角度对比分析了上述大容量储能技术的特征。在此意义上，压缩空气储能是大容量储能技术中更为合适的选择。

1.2 电-热综合能源系统架构

压缩空气储能技术通过电动机和压缩机将过剩的电力转化成高压空气以势能形式储存，当电力不足时由高压空气带动汽轮机和发电机对外输出电能。为了提升空气压缩和膨胀过程的效率，减小对设备的损伤[24]，工程上常采用多级压缩、中间冷却和多级膨胀、中间再热的措施，而级间冷却和级间再热均需要热量交换。

在此意义上，先进绝热压缩空气储能是一种更为清洁环保的 CAES 技术[25]，它通过引入储热系统实现压缩和膨胀过程中热量的互济，从而避免采用化石能源辅助供热。同时，储热系统的存在使得 CAES 具备热电联产的能力。本文即采用先进绝热压缩空气储能系统对配电网和热网进行耦合(如图 1 所示)，后续统称为压缩空气储能或 CAES。

在图 1 所示的系统中，配电网的负荷由发电机节点供应，各个节点需要满足电力潮流平衡；热网的负荷由热源节点供应，热水经供水管道流向负荷，释放热量后经回水管道流回热源节点。热泵具有将电能转化为热能的作用，压缩空气储能系统可实现电与热的双向转化，二者共同作为能量枢纽，

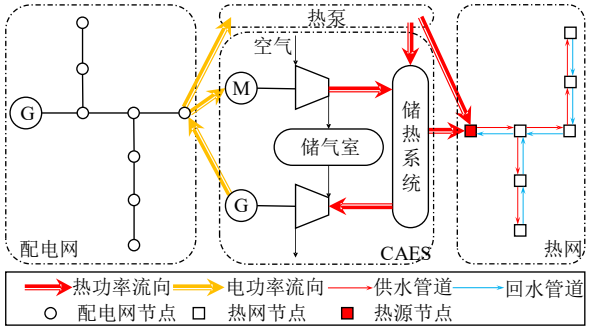


图 1 电-热综合能源系统结构

Fig. 1 Integrated electricity-heat energy system structure

将配电网和热网耦合起来。

为了提高综合能源系统在灾后的恢复能力，本文引入 MESS 实现能量时空调度。CAES 与 MESS 实现灾后联合恢复的原理如下：在配电网因受灾而发生线路故障后，发电机节点仅能供应部分负荷。此时，CAES 进行应急响应，储气室中的空气从储热系统吸收热量升温升压，进而驱动汽轮机和发电机运转，向配电网输出电能。CAES 充当临时电源，通过在局部构建微电网向其附近的受灾负荷供电。与此同时，MESS 将被灵活部署在发电机和 CAES 供电区域以外的位置，通过网络重构形成若干微电网，从而提高灾后负荷的供应量。此外，热泵和 CAES 中的储热系统共同供应热网负荷。考虑灾后电负荷与热负荷存在同时保供需求，当 CAES 处于发电模式时，储热系统凭借热余量，一方面供应热负荷，另一方面加热高压空气做功发电，必要时热泵还可以为储热系统提供热能以满足 CAES 的发电需求。当线路逐渐恢复、离网节点逐渐减少时，CAES 从配电网吸收电能，电动机和压缩机工作，储气室压强和储热系统热量增加。MESS 充电，进入待命状态。

2 基于 CAES 和 MESS 的弹性提升模型

在配电网受灾后 CAES 和 MESS 将被协同调度以恢复负荷，二者的区别在于，CAES 属于固定式储能系统，应在灾前完成选址建设，而 MESS 在灾后进行调派，且不同时段可在不同节点处发挥作用，二者的出力状态均在灾后根据系统需要协同优化。因此，本文的弹性提升策略分为灾前-灾后两个阶段：灾前模型旨在选择 CAES 的最优工作节点，以便灾后最大化其恢复效果；灾后模型旨在协同优化 CAES 和 MESS 的出力行为，从而使得恢复负荷的总价值达到最大。

需要说明的是，当前 CAES 主要应用于日常场景，为电网提供电压与频率支撑、削峰填谷、黑启

动等服务[26]，也可对热网提供热能支撑。本文仅针对极端场景对 CAES 部署设施，用于灾后负荷的应急保供。该服务旨在发掘 CAES 的潜力，优化设施利用率，提升其经济效益。此外，由于储能部署位置对日常场景下的服务效果影响较小，而极端场景中的负荷恢复效果与部署位置息息相关[22]，因此本文在部署 CAES 时不考虑日常场景服务。

本节首先设定配电网受灾场景，然后依次建立两个阶段的弹性提升模型。需要说明的是，模型中上标带有“min”或“max”的变量表示相应物理量的最小值或最大值，后续不再逐一解释。

2.1　台风灾害场景生成方法

在台风灾害中，断线是导致配电网发生停电事故的主要原因之一。配电网线路是否发生故障是一个随机事件，其概率与台风强度紧密相关。文献[27]基于英国电力公司收集在 NaFIRS 数据库中约 12000 起配电网故障的数据，拟合了台风灾害中配电网线路的脆弱性曲线(Fragility Curve)。该曲线描述了电力线路 ij 的故障概率 P_{ij} 和台风风速 v 以及线路长度 L_{ij} 的关系，数学表达式如下所示：

$$P_{ij}=aL_{ij}v^{b} \tag{1}$$

式中：a 和 b 是常数，在城市配电网中一般取值为 2×10^{-17} 和 9.91[28]。

基于式(1)，使用蒙特卡罗(Monte Carlo)模拟方法生成台风灾害场景的算法流程如附录图 A1 所示。首先设定场景总数 N，对于每一个场景，根据式(1)对配电网中所有线路进行蒙特卡罗模拟，从而获得每条线路的故障结果。对于故障线路，在研究时间窗口 T 内生成一个随机数，表示该线路的修复时间(time to repair，TTR)。所有线路是否故障以及故障持续时间的模拟结果构成一个受灾场景。如此循环，直至生成 N 个场景。

2.2　考虑网络特征的灾前部署模型

灾前阶段模型的任务是预先部署 CAES 的安装位置，通过选择综合效果最佳的部署方案，实现不同受灾场景下 CAES 对负荷的保供。

建立并求解优化模型是处理该类问题的经典方法[29-30]。考虑到台风对配电网线路的破坏场景的随机性，CAES 部署模型的第一部分使用鲁棒优化方法，对不同台风场景的恶劣程度进行量化评估，在最恶劣的场景下求解双层优化模型，通过划定“较优”标准获得“较优解”集合，实现 CAES 的预选址。相比于一般场景，最恶劣的场景中暴露出更多的脆弱线路，所获得的“较优解”在其他场景中同样有较好的效果，这将使得预选址的结果更具有综合性和代表性。

但是，单一场景下优化模型的求解结果不完全具备普适性和针对性，为了获得适应多场景和特定网络的选址位置，CAES 部署模型的第二部分将考虑配电网的物理特征，对“较优解”集合进一步筛选，从而确定 CAES 的最终部署位置。

2.2.1　双层鲁棒优化模型

1）台风场景恶劣程度评估。

定义一个描述场景 n 恶劣程度的参数 χ_n，由下式决定：

$$\chi_n=\sum_{ij}T_{ij} \tag{2}$$

式中：T_{ij} 是线路 ij 的故障时间。

显然，配电网的故障线路数量越多，故障时间越长，则离网负荷越多，该场景越恶劣。

如附录图 A1 所示，在产生第 $n(n\le N)$个台风场景后，计算相应的参数 χ_n。最后比较该参数值，筛选出 N 个场景中最恶劣的台风场景，获得该场景下所有配电网线路的故障状态与修复时间。

2）模型约束条件。

①CAES 运行约束。

当 CAES 系统运行时，空气的压强、温度和流量是 3 个关键控制参数。在恒温-恒压模式下，通过调节空气的质量流量进而控制 CAES 的运行状态，可以形成 CAES 的线性模型[31]。该模式下 CAES 的运行约束如式(3)—(13)所示[32]：

$$p_{u,t}^{\mathrm{c}}=c_{\mathrm{p}}m_t^{\mathrm{c}}\tau_{u,t}^{\mathrm{c,in}}(\beta_u^{\kappa/(\kappa-1)}-1)/\eta_u^{\mathrm{c}} \tag{3}$$

$$u_t^{\mathrm{c}}p_u^{\mathrm{c,min}}\le p_{u,t}^{\mathrm{c}}\le u_t^{\mathrm{c}}p_u^{\mathrm{c,max}} \tag{4}$$

$$p_{v,t}^{\mathrm{g}}=c_{\mathrm{p}}m_t^{\mathrm{g}}\tau_{v,t}^{\mathrm{g,in}}(1-\gamma_v^{\kappa/(\kappa-1)})\eta_v^{\mathrm{g}} \tag{5}$$

$$u_t^{\mathrm{g}}p_v^{\mathrm{g,min}}\le p_{v,t}^{\mathrm{g}}\le u_t^{\mathrm{g}}p_v^{\mathrm{g,max}} \tag{6}$$

$$u_t^{\mathrm{c}}+u_t^{\mathrm{g}}\le 1 \tag{7}$$

$$f_{t+1}=f_{\mathrm{r},t}+R_g\tau^{\mathrm{AST}}(m_t^{\mathrm{c}}-m_t^{\mathrm{g}})\Delta t/V \tag{8}$$

$$f^{\min}\le f_t\le f^{\max} \tag{9}$$

$$h_{u,t}^{\mathrm{c}}=c^{\mathrm{air}}m_t^{\mathrm{c}}(\tau_{u,t}^{\mathrm{c,out}}-\tau_{u+1,t}^{\mathrm{c,in}}) \tag{10}$$

$$h_{v,t}^{\mathrm{g}}=c^{\mathrm{air}}m_t^{\mathrm{g}}(\tau_{v,t}^{\mathrm{g,in}}-\tau_{v-1,t}^{\mathrm{g,out}}) \tag{11}$$

$$H_t^{\mathrm{HSS}}=H_{t-1}^{\mathrm{HSS}}+\sum_u h_{u,t}^{\mathrm{c}}\Delta t-\sum_v h_{v,t}^{\mathrm{g}}\Delta t-h_t^{\mathrm{CAES}}\Delta t \tag{12}$$

$$H_t^{\mathrm{HSS,min}}\le H_t^{\mathrm{HSS}}\le H_t^{\mathrm{HSS,max}} \tag{13}$$

式中：u 和 v 分别是压缩过程和膨胀过程的级数序号，β_u 和 γ_v 分别是第 u 级压缩机的压缩比和第 v 级汽轮机的膨胀比；c_{p} 和 κ 分别是空气的定压比热容和绝热指数；η_u^{c} 和 η_v^{g} 分别表示第 u 级压缩机和第 v 级汽轮机的效率；$p_{u,t}^{\mathrm{c}}$ 和 $p_{v,t}^{\mathrm{g}}$ 是 t 时刻第 u 级压缩机的输入功率和第 v 级汽轮机的输出功率；$h_{u,t}^{\mathrm{c}}$ 和

$h_{v,t}^{\mathrm{g}}$是t时刻空气经第u级压缩机后释放热量和进入第v级汽轮机之前吸收热量的功率；m_t^{c}和m_t^{g}分别是t时刻压缩机和膨胀机中的空气质量流量；$\tau_{u,t}^{\mathrm{c,in}}$和$\tau_{u,t}^{\mathrm{c,out}}$表示$t$时刻第$u$级压缩机入口和出口处的空气温度；$\tau_{v,t}^{\mathrm{g,in}}$和$\tau_{v,t}^{\mathrm{g,out}}$表示$t$时刻第$v$级汽轮机入口和出口处的空气温度；$c^{\mathrm{air}}$为空气的比热容；$u_t^{\mathrm{c}}$和$u_t^{\mathrm{g}}$为0/1变量，分别表示$t$时刻压缩机和汽轮机的运行状态，反映了CAES在该时段的工作模式(储能/发电)；f_t表示t时刻储气室的压强；H_t^{HSS}表示t时刻储热系统的储热量，h_t^{CAES}表示t时刻储热系统提供给热网的热功率；Δt是时间步长。

式(3)(4)和式(5)(6)分别为压缩机和汽轮机的运行约束；由于CAES的储能特性限制，式(7)表示压缩机和汽轮机不同时工作；式(8)(9)为储气室的运行约束；式(10)—(13)表示储热系统的运行约束。

②热网运行约束。

热网可用图$G_1=(N^{\mathrm{H}},E^{\mathrm{H}})$来描述，其中$N^{\mathrm{H}}$为节点集合，$E^{\mathrm{H}}$为节点连接关系集合。热力管道中水的流量、温度和压强相互影响，这使得热力网的运行策略有多种。为了形成线性的热网模型便于后续求解，本文采用流量恒定、温度变化的运行方式[33]，此时压强固定，模型中可不计入与其相关的方程。

该运行策略下热网的约束如式(14)—(23)所示[33]：

$$h_t^{\mathrm{HP}}=\gamma p_t^{\mathrm{HP}} \tag{14}$$

$$h_{i,t}^{\mathrm{HP}}+h_t^{\mathrm{CAES}}=c^{\mathrm{water}}m_i^{\mathrm{n}}(\tau_{i,t}^{\mathrm{s}}-\tau_{i,t}^{\mathrm{r}}) \tag{15}$$

$$h_{i,t}^{\mathrm{load}}=c^{\mathrm{water}}m_i^{\mathrm{n}}(\tau_{i,t}^{\mathrm{s}}-\tau_{i,t}^{\mathrm{r}}) \tag{16}$$

$$0\le h_{i,t}^{\mathrm{load}}\le h_{i,t}^{\mathrm{load,max}} \tag{17}$$

$$\tau_{j,t}^{\mathrm{s,in}}=\tau_{i,t}^{\mathrm{s}},j\in F(i) \tag{18}$$

$$\sum_{k\in T(i)}(\tau_{k,t}^{\mathrm{s,out}}m_k^{\mathrm{p}})=\tau_{i,t}^{\mathrm{s}}\sum_{k\in T(i)}m_k^{\mathrm{p}} \tag{19}$$

$$\tau_{j,t}^{\mathrm{r,in}}=\tau_{i,t}^{\mathrm{r}},j\in F(i) \tag{20}$$

$$\sum_{k\in T(i)}(\tau_{k,t}^{\mathrm{r,out}}m_k^{\mathrm{p}})=\tau_{i,t}^{r}\sum_{k\in T(i)}m_k^{\mathrm{p}} \tag{21}$$

$$\tau_{j,t}^{\mathrm{s,out}}=(\tau_{j,t}^{\mathrm{s,in}}-\tau^{\mathrm{a}})e^{-\frac{\lambda_jL_j}{c^{\mathrm{water}}m_j^{\mathrm{p}}}}+\tau^{\mathrm{a}} \tag{22}$$

$$\tau_{j,t}^{\mathrm{r,out}}=(\tau_{j,t}^{\mathrm{r,in}}-\tau^{\mathrm{a}})e^{-\frac{\lambda_jL_j}{c^{\mathrm{water}}m_j^{\mathrm{p}}}}+\tau^{\mathrm{a}} \tag{23}$$

式中：γ是热泵的性能系数，描述了热泵将输入的电能转化为热能的能力；p_t^{HP}是t时刻热泵所需要的电功率；$h_{i,t}^{\mathrm{HP}}$为t时刻热网节点i处热泵的热功率；$h_{i,t}^{\mathrm{load}}$为t时刻节点i处热负荷实际消耗的热功率；m_i^{n}表示节点i处水的质量流量；$\tau_{i,t}^{\mathrm{s}}$和$\tau_{i,t}^{\mathrm{r}}$分别表示t时刻节点i的供水水温和回水水温；$\tau_{j,t}^{\mathrm{s,out}}$、$\tau_{j,t}^{\mathrm{s,in}}$表示$t$时刻供水管道$j$的出、入口水温；$\tau_{j,t}^{\mathrm{r,out}}$、$\tau_{j,t}^{\mathrm{r,in}}$表示$t$时刻回水管道$j$的出、入口水温；$F(i)$和$T(i)$分别表示起点、终点为节点$i$的管道集合；$m_k^{\mathrm{p}}$表示管道$k$中水的质量流量；$\lambda_j$和$L_j$分别为管道$j$的温度损失系数和长度；$\tau^{\mathrm{a}}$为环境温度；$c^{\mathrm{water}}$为水的比热容。

式(14)描述了热泵中电功率与热功率的转换关系；式(15)为热源节点的热功率平衡约束；式(16)为热负荷节点的功率平衡约束；式(17)表示热用户实际消耗的热功率不超过其最大需求；式(18)—(23)为热网的网络约束，包括热网节点的温度平衡约束(式(18)—(21))和热网管道的温度损失约束(式(22)(23))。

③配电网运行约束。

配电网可用图$G_2=(N^{\mathrm{D}},E^{\mathrm{D}})$来描述，其中$N^{\mathrm{D}}$为节点集合，$E^{\mathrm{D}}$为节点连接关系集合。配电网的潮流约束中，支路潮流模型(branch flow model)对于辐射状网络的数值计算结果比节点注入模型(bus injection model)更稳定[34]。因此，本文采用线性化的支路潮流模型对配电网建模，其约束如式(24)—(32)所示：

$$\begin{cases}P_{j,t}^{\mathrm{gen}}+\sum\limits_{i\in M(j)}P_{ij,t}=\sum\limits_{k\in N(j)}P_{jk,t}+p_{j,t}^{\mathrm{load}},j\in X\\ \sum\limits_{v}p_{v,t}^{\mathrm{g}}+\sum\limits_{i\in M(j)}P_{ij,t}=\sum\limits_{k\in N(j)}P_{jk,t}+p_{j,t}^{\mathrm{load}}+\sum\limits_{u}p_{u,t}^{\mathrm{c}}+\\ \qquad\qquad p_t^{\mathrm{HP}},\ j\in Y\\ \sum\limits_{i\in M(j)}P_{ij,t}=\sum\limits_{k\in N(j)}P_{jk,t}+p_{j,t}^{\mathrm{load}},j\notin X\bigcup Y\end{cases} \tag{24}$$

$$\begin{cases}Q_{j,t}^{\mathrm{gen}}+\sum\limits_{i\in M(j)}Q_{ij,t}=\sum\limits_{k\in N(j)}Q_{jk,t}+q_{j,t}^{\mathrm{load}},j\in X\\ \sum\limits_{i\in M(j)}Q_{ij,t}=\sum\limits_{k\in N(j)}Q_{jk,t}+q_{j,t}^{\mathrm{load}},j\notin X\end{cases} \tag{25}$$

$$-\alpha_{ij,t}P_{ij}^{\max}\le P_{ij,t}\le\alpha_{ij,t}P_{ij}^{\max} \tag{26}$$

$$-\alpha_{ij,t}Q_{ij}^{\max}\le Q_{ij,t}\le\alpha_{ij,t}Q_{ij}^{\max} \tag{27}$$

$$\begin{aligned}&(r_{ij}P_{ij,t}+x_{ij}Q_{ij,t})/U_0-(1-\alpha_{ij,t})M\le U_{i,t}-U_{j,t}\le\\ &(r_{ij}P_{ij,t}+x_{ij}Q_{ij,t})/U_0+(1-\alpha_{ij,t})M,i\in M(j)\end{aligned} \tag{28}$$

$$0\le p_{i,t}^{\mathrm{load}}\le p_{i,t}^{\mathrm{load,max}} \tag{29}$$

$$0\le q_{i,t}^{\mathrm{load}}\le q_{i,t}^{\mathrm{load,max}} \tag{30}$$

$$\begin{cases}U_{i,t}=1,i\in X\\ U_i^{\min}\le U_{i,t}\le U_i^{\max},i\notin X\end{cases} \tag{31}$$

$$1-(1-u_t^{\mathrm{g}})M\le U_{i,t}\le 1+(1-u_t^{\mathrm{g}})M,i\in Y \tag{32}$$

式中：X是发电机节点集合；Y表示配电网中连接CAES的节点集合；$M(j)$和$N(j)$分别表示向节点j注入功率和从节点j流出功率的相邻节点集合；$P_{j,t}^{\mathrm{gen}}$和$Q_{j,t}^{\mathrm{gen}}$是位于节点j的发电机在t时刻的有功、无功功率；$P_{ij,t}$和$Q_{ij,t}$是t时刻流经线路ij的有功、

无功功率；$p_{j,t}^{\mathrm{load}}$ 和 $q_{j,t}^{\mathrm{load}}$ 是 t 时刻节点 j 的负荷实际消耗的有功、无功功率；$\alpha_{ij,t}$ 为 0/1 变量，表示 t 时刻线路 ij 的连接状态；r_{ij} 和 x_{ij} 表示线路 ij 的电阻和电抗；$U_{i,t}$ 是 t 时刻节点 i 电压幅值的平方；M 是一个较大的数。

式(24)(25)是节点有功和无功潮流平衡约束，在安装有 CAES 的节点，需要另外考虑压缩机、汽轮机以及热泵和配电网交互的有功功率；式(26)(27)分别为 t 时刻线路 ij 传输的有功、无功功率安全约束；式(28)为相邻节点 i、j 之间的电压关系约束，且只有当线路 ij 处于连接状态时才存在此约束关系；式(29)(30)分别表示负荷消耗的有功、无功功率不超过其需求；式(31)(32)为节点电压上、下限约束。值得注意的是，当 CAES 工作在发电模式时，说明它独立供应一个微电网，将其所在的节点设定为参考节点，电压的标幺值为 1。

④配电网拓扑约束。

当配电网的部分线路因台风而发生故障后，通过对线路的控制分合形成多个以分布式电源为中心的微电网，以恢复负荷电力供应。配电网一般为辐射状拓扑结构，使用以下方法构建[35]：a）带电线路数量等于带电节点数量减去微电网数量；b）每个微电网均为连通网络，使用单商品流方法(single-commodity flow method)描述。其数学表达式如(33)—(37)所示：

$$\sum_{ij}\alpha_{ij,t}=\sum_{k}\beta_{k,t}-(N^{\mathrm{g}}+u_t^{\mathrm{g}}) \tag{33}$$

$$\begin{cases} G_{j,t}+\sum\limits_{i\in M(j)}F_{ij,t}=\sum\limits_{k\in N(j)}F_{jk,t},j\in X \\ C_{j,t}+\sum\limits_{i\in M(j)}F_{ij,t}=\sum\limits_{k\in N(j)}F_{jk,t}+\beta_{j,t},j\in Y \\ \sum\limits_{i\in M(j)}F_{ij,t}=\sum\limits_{k\in N(j)}F_{jk,t}+\beta_{j,t},j\notin X\bigcup Y \end{cases} \tag{34}$$

$$\alpha_{ij,t}(-M)\le F_{ij,t}\le\alpha_{ij,t}M \tag{35}$$

$$G_{i,t}\ge 1,i\in X \tag{36}$$

$$u_t^{\mathrm{g}}\cdot 1\le C_{i,t}\le u_t^{\mathrm{g}}M,i\in Y \tag{37}$$

式中：$\beta_{k,t}$ 是 0/1 变量，取值为 0 时表示 t 时刻节点 k 未参与构建配电网，取值为 1 的意义相反；N^{g} 为发电机节点的数量；$F_{ij,t}$ 是 t 时刻流过线路 ij 的虚拟潮流，$G_{j,t}$ 是 t 时刻发电机注入母线节点 j 的虚拟潮流，$C_{j,t}$ 是 t 时刻部署在节点 j 的 CAES 注入该节点的虚拟潮流。

式(33)为上述方法 a）的数学表达形式，本文假设每个微电网中只配备一个电源(发电机或处于发电状态的 CAES)，则微电网数量为发电机节点数量与 CAES 的发电状态变量之和；式(34)—(37)为上述方法 b）的数学形式：式(34)为节点的虚拟潮流平衡约束，假定注入每个带电节点的虚拟潮流为 1；式(35)—(37)为虚拟潮流的上下限约束，线路上的虚拟潮流与线路带电状态有关，发电机注入母线节点的虚拟潮流须不少于 1，CAES 处于发电状态时其注入相应节点的虚拟潮流不少于 1，而处于储能状态时虚拟潮流取值为 0。

3）目标函数与优化模型。

对 CAES 进行预部署的目标是便于其在最优的位置形成有效的微电网从而恢复负荷，本文将其建模为以下双层优化模型：

$$\begin{cases} \max\limits_{(i_1,i_2\ldots i_n)\in O^n} V_{i_1,i_2\ldots i_n}^{\max} \\ \text{s.t.}\begin{cases} \max V_{i_1,i_2\ldots i_n}=\omega_1\sum\limits_t c_t\sum\limits_{j\in \mathrm{N^D}}p_{j,t}^{\mathrm{load}}\Delta t+ \\ \qquad\qquad \omega_2\sum\limits_t d_t\sum\limits_{k\in \mathrm{N^H}}h_{k,t}^{\mathrm{load}}\Delta t \\ \text{s.t.式(3)—(37)} \end{cases} \end{cases} \tag{38}$$

式中：i_n 表示第 n 个 CAES 的部署位置；O 为可部署 CAES 的节点集合，O^n 为集合 O 形成的 n 维空间，表示部署 n 个 CAES 的可行域；ω_1 和 ω_2 分别是电负荷和热负荷的权重，用以衡量二者的重要程度；c_t 和 d_t 表示 t 时刻电负荷和热负荷的价值，用来评估负荷在不同时刻的恢复优先级；$V_{i_1,i_2\ldots i_n}$ 表示当 n 个 CAES 被分别安装在 $(i_1,i_2\ldots i_n)$ 时系统恢复的负荷总价值；$V_{i_1,i_2\ldots i_n}^{\max}$ 表示 $V_{i_1,i_2\ldots i_n}$ 经下层优化后的最大值。

上述双层模型适用于多个 CAES 的联合部署问题。虽然 CAES 能提高电-热耦合系统的弹性，但在同一系统中部署多台 CAES 将大幅度增加建设、维护等成本和控制复杂度，而部署一台 CAES 并调节其容量，有利于减弱 CAES 带来的负面效果。因此本文后续仅针对一台 CAES 进行优化选址，更加贴合工程实际。此时上、下层目标函数可表示为 $V_i^{\max}$ 和 V_i。

4）“较优解”的选取原则。

上述双层优化模型通过寻找 $V_i^{\max}(i\in O)$ 的最大值从而直接确定 CAES 的最优部署节点。由于优化模型是在特定场景下求解的，为了使得部署结果不完全依赖该场景，从 $V_i^{\max}(i\in O)$ 中挑选出一系列“较大值”，并将其对应的节点作为备选部署位置，定义为“较优解”集合 O_1。此时，寻找分割“较大值”和其他值的临界值是确定 O_1 的关键。

在统计学中，利用均值和标准差的组合可筛选一组数据的离群值，即可以用来选取“较大值”。在此定义临界点V_{critical}，由下式决定：

$$\begin{cases} V_{\text{critical}} = \bar{V} + k \cdot S \\ \bar{V} = \dfrac{1}{|O|}\sum_{i\in O} V_i^{\max} \\ S = \sqrt{\dfrac{1}{|O|}\sum_{i\in O}(V_i^{\max} - \bar{V})^2} \end{cases} \tag{39}$$

其中：$|O|$表示集合O中元素的数量；$\bar{V}$是均值；S是标准差；k是常数，其值根据需要选定。

“较优解”集合O_1可根据下式确定：

$$O_1 = \{i \in O \,|\, V_i^{\max} \geq V_{\text{critical}}\} \tag{40}$$

2.2.2 影响 CAES 选址的网络特征分析

求解双层优化模型获得的集合O_1是在最恶劣场景下部署 CAES 的“较优解”集合，为了获得适用于多场景和特定网络的选址位置，本文结合以下配电网网络特征对 CAES 部署位置进一步筛选。

1）节点可恢复负荷价值期望。

定义参数θ_i表示节点i的可恢复负荷价值期望，由下式决定：

$$\theta_i = (1-P_i)\sum_t(\omega_1 c_t p_{i,t}^{\text{load,max}} + \omega_2 d_t \sum_{j\in N^{\text{H}}} h_{j,t}^{\text{load,max}}) \tag{41}$$

式中：$P_i = aL_i v^b$，与式(1)中线路故障概率模型的形式相同；L_i是节点i所关联线路的平均长度，P_i可解释为节点i脱离网络的概率。

定义θ_i的原因是该参数的物理含义与优化目标有直接的关联，且由网络特征决定，因此更便于解释相应的网络特征对 CAES 部署位置的影响。

本文假设每个节点的热网负荷相同，因此本质上影响θ_i的因素只有两个：电负荷$p_{i,t}^{\text{load,max}}$和节点所关联线路的平均长度$L_i$。当节点$i$处的电负荷越大，CAES 部署在该位置时恢复的负荷价值就越大；节点i所关联线路的平均长度越小，周围线路在台风中出现故障的概率就越小，意味着该处的线路更加坚强，那么 CAES 在该位置时有更大的概率形成辐射性更强的微电网。

综合考虑上述两个因素，θ_i越大的节点，CAES 部署在此可恢复负荷价值期望越大。值得注意的是，这是一个局部概念，对全局最优解有影响但没有决定性意义。

2）相对于发电机节点的距离。

在灾后恢复中，CAES 需要配合配电网中原有的发电机节点，二者分别形成的微电网需要覆盖尽可能多的节点。显然，CAES 的部署位置与发电机节点保持一定距离时更易于实现该效果。

3）关联线路数量(度)。

度越大的节点具备更强的网络连通性，因此可作为枢纽节点优先用于部署 CAES 设施。

对于从双层优化模型获取的“较优解”集合，评估其中各节点处以上 3 个参数的情况，基于上述分析的原则评价节点的优劣程度，进而筛选出最适合 CAES 部署的位置。

2.3 多种储能协同的灾后调度优化模型

灾后 CAES 的部署位置固定，此时调度的任务是根据线路状态调整网络结构，控制 CAES 的出力方式、MESS 的部署位置和出力方式从而最大化恢复负荷的总价值。本文使用优化模型对该问题进行建模。

2.3.1 约束条件

1）MESS 运行约束。

MESS 运行约束如式(42)—(52)所示：

$$S_{m,t+1} = S_{m,t} + (P_{m,t}^{\text{ch}}\eta_m^{\text{ch}} - P_{m,t}^{\text{dis}}/\eta_m^{\text{dis}})\Delta t / E_m \tag{42}$$

$$S_m^{\min} \leq S_{m,t} \leq S_m^{\max} \tag{43}$$

$$0 \leq P_{m,t}^{\text{ch}} \leq \lambda_{m,t} P_m^{\text{ch,max}} \tag{44}$$

$$0 \leq P_{m,t}^{\text{dis}} \leq \mu_{m,t} P_m^{\text{dis,max}} \tag{45}$$

$$0 \leq Q_{m,t} \leq (\lambda_{m,t} + \mu_{m,t}) Q_m^{\max} \tag{46}$$

$$\lambda_{m,t} + \mu_{m,t} \leq 1 \tag{47}$$

$$\lambda_{m,t} = \sum_i \theta_{m,i,t}^{\text{ch}} \tag{48}$$

$$\mu_{m,t} = \sum_i \theta_{m,i,t}^{\text{dis}} \tag{49}$$

$$\sum_m \theta_{m,i,t}^{\text{dis}} \leq 1 \tag{50}$$

$$P_{i,t}^{\text{MESS}} = \sum_m (\theta_{m,i,t}^{\text{dis}} P_{m,t}^{\text{dis}} - \theta_{m,i,t}^{\text{ch}} P_{m,t}^{\text{ch}}) \tag{51}$$

$$Q_{i,t}^{\text{MESS}} = \sum_m (\theta_{m,i,t}^{\text{dis}} + \theta_{m,i,t}^{\text{ch}}) Q_{m,t} \tag{52}$$

式中：$S_{m,t}$是t时刻第m台 MESS 的荷电状态(state of charge，SOC)；E_m为第m台 MESS 的容量；$P_{m,t}^{\text{ch}}$和$P_{m,t}^{\text{dis}}$分别表示t时刻第m台 MESS 在电网侧视角下的充、放电有功功率，$Q_{m,t}$是相应的无功功率；$\lambda_{m,t}$和$\mu_{m,t}$是 0/1 变量，分别表示t时刻第m台 MESS 的充电状态和放电状态，取值为 1 代表处于相应状态，取值为 0 的含义相反；$\theta_{m,i,t}^{\text{ch}}$和$\theta_{m,i,t}^{\text{dis}}$均为 0/1 变量，分别表示$t$时刻第$m$台 MESS 是否在节点$i$充电和放电，取值为 1 代表在该节点充/放电，取值为 0 的含义相反；$P_{i,t}^{\text{MESS}}$和$Q_{i,t}^{\text{MESS}}$分别表示t时刻节点i处 MESS 的总有功和无功出力。

式(42)表示 MESS 荷电状态变化与其充、放电功率的关系；式(43)描述了荷电状态的上、下限约束；式(44)—(46)表示 MESS 的充电功率、放电功

率、无功功率均受充、放电状态变量以及相应功率限值的约束；式(47)表示 MESS 不能同时处于充电和放电状态；式(48)(49)描述了 MESS 的充电状态、放电状态与其在各个节点的充、放电状态的关系，同时限制 MESS 最多同时在一个节点处充电或放电；式(50)表示每个节点至多接入一个处于放电状态的 MESS；由于各 MESS 的出力状态和工作位置不同，式(51)(52)对所有 MESS 的有功、无功功率分别求和，将其视为电源，获得了各个节点处 MESS 的净有功、净无功输出功率。

其中式(51)(52)是非线性约束，为了便于后续求解，将其转化为线性约束，具体过程和简化结果详见附录 B。

2）其他约束修正。

灾后调度中 CAES、热网和配电网的运行约束，以及配电网的拓扑约束仍然是必需的，但由于 MESS 的加入，配电网的相关约束需要修正。具体修正过程和结果详见附录 C。

2.3.2　目标函数与优化模型

在以上约束条件的限制下，灾后调度模型以恢复的电、热负荷总价值最大为目标，其数学形式如下：

$$\max\left(\omega_1\sum_t c_t\sum_{j\in N^D} p_{j,t}^{load}\Delta t+\omega_2\sum_t d_t\sum_{k\in N^H} h_{k,t}^{load}\Delta t\right)$$

s.t.式(3)—(23),(26)—(32),(35)—(37),(42)—(52), (53)

(B1)—(B8),(C1)—(C6)

式中变量在上文中已有解释，不再赘述。

在 CAES 的最优部署位置选定后，灾后模型的主要决策变量包括各时段 CAES 的储能/发电状态和输入/输出功率，MESS 的工作位置、充/放电状态和输入/输出功率，配电网线路的开/关状态，以及热网的热供应功率。灾后通过调节各时段线路开关通断以改变配电网拓扑，并协同控制 CAES 和 MESS 的工作状态以构建微电网，从而使得恢复的负荷总价值达到最大。

3　求解算法

考虑到两阶段优化模型的求解复杂度，本文将两个阶段的模型解耦，分别独立求解。

第一阶段的灾前部署模型为考虑网络特征的双层鲁棒优化模型，求解过程分为以下两个步骤：第一步，通过对台风场景的恶劣程度进行量化评估，根据附录图 A1 获得用于求解该模型的最恶劣场景，从而将不确定性的鲁棒优化问题转化为确定性问题。对于式(38)中的双层优化模型，上层目标函数中决策变量的可行域是离散的，且下层模型已构建为混合整数线性规划(mixed integer linear programming，MILP)问题，因此可以在上层决策变量的可行域内逐个求解下层的 MILP 问题，根据式(39)和(40)确定双层优化模型的“较优解”集合。第二步，考虑配电网的网络特征，对“较优解”集合中的部署位置进一步筛选，获得 CAES 在所研究的网络结构中的最优部署位置。

第二阶段的 CAES 与 MESS 协同调度问题被构建为经典的 MILP 模型，根据附录图 A1 生成随机场景，得到配电网线路的故障状态和故障时间，使用商用求解器求解模型(53)，从而获得灾后对 CAES 和 MESS 的最优调度方式。

4　仿真分析与验证

为了验证本文所提出的恢复策略的有效性和实用性，基于 IEEE-51 节点算例构建电-热综合能源系统进行仿真分析。

系统拓扑如附录图 D1 所示。其中配电网部分对 IEEE-51 节点算例进行了修改，添加了#15-#47、#19-#35、#27-#41 等 3 条备用线路，并假定备用线路进行了加固从而能够抵抗台风灾害，以满足普通线路受损时的网络重构需求。此外，考虑新能源接入电网的工程实际，节点#13、#25、#35、#48 处安装了风力发电设备。热网拓扑及其初始运行参数详见文献[36]。CAES 将被部署在配电网的某个节点并耦合热网，其初始运行参数详见文献[32]。系统负荷和风电出力数据如附录图 D2 所示。

根据文献[37]，采用能源价格评估停电损失，目标函数中 c_t 和 d_t 分别取值为 2024 年 5 月北京市工商业峰-谷-平电价和 2024 年北京市城六区非居民供热价格。c_t 的取值详见附录表 E2，d_t 为 0.36 元/kWh。考虑电负荷与热负荷重要性相当，ω_1 和 ω_2 均取为 1。

在场景生成方法中，台风风速取值为 40m/s。另外，IEEE 标准算例中没有提供线路长度，仅给出了线路的电阻和电抗。由于一定距离内线路的电抗与长度成正比，因此本文按照 0.2Ω/km 的比例由电抗参数换算得到线路长度。

本文的仿真计算在 CPU 为 2.10 GHz、RAM 为 16.0 GB 的 64 位 PC 机上完成，编程和模型求解在 MATLAB R2023a 环境中，使用了 yalmip 工具箱和 gurobi 求解器。

4.1　灾前部署结果分析

按照附录图 A1 的流程图，取 N 为 1000，从中筛选出最恶劣的场景，相应的配电网线路初始状态

如图 2 所示。

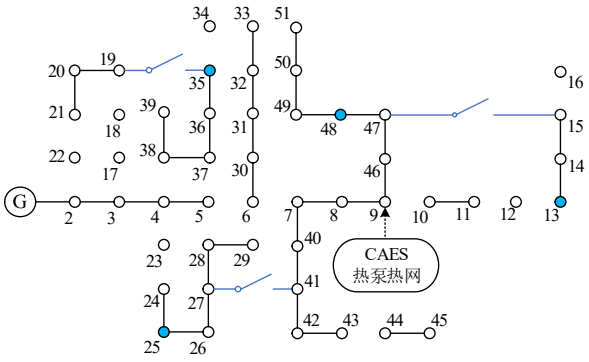


图 2　用于 CAES 部署的最恶劣场景

Fig. 2　Worst scenario for CAES deployment

在第一阶段的双层优化模型中，上层决策变量为 CAES 的部署位置。配电网节点#1 为发电机节点，不作为 CAES 的备选部署位置，因此可行域为 O={#2—#51}。将 CAES 安装在 O 内的各个节点处并分别求解下层模型，目标函数结果如图 3 中蓝色方柱所示。

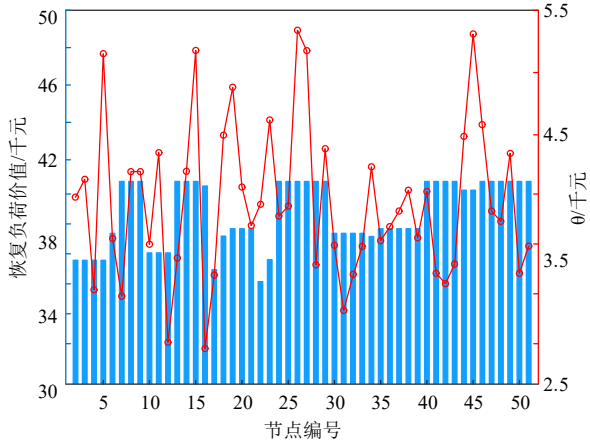


图 3　CAES 部署在不同节点恢复的负荷价值

Fig. 3　Restored load value for different nodes hosting CAES

根据式(39)，取 k 为 0.5，计算临界值 V_{critical} 为 39.83 千元，根据式(40)确定集合 O_1 为{#7—#9，#13—#16，#24—#29，#40—#51}。

在集合 O_1 内，考虑该算例中网络的物理特征对部署位置进一步筛选：

1）节点可恢复负荷价值期望 θ_i。

不同节点的 θ_i 在图 3 中以红色曲线示出。下面根据已有结果验证 θ_i 对实际恢复负荷价值的影响。

首先，对比#10 和#27 说明节点所关联线路平均长度的影响。由附录表 E3 可知，#10 所关联线路的平均长度远大于#27，这使得在图 2 的场景中与#10 相连的一条线路出现故障，最终导致当 CAES 安装在#10 所恢复的负荷价值更小。

其次，对比#36 和#15 说明电负荷的影响。由附录表 E3 可知，#15 关联线路的平均长度比#36 更大，这使得与#15 相连的一条线路出现故障。但由于该节点处负荷有功功率优势非常明显，因此 CAES 部署在此能够恢复的负荷价值更大。

至此分别验证了节点所关联线路的平均长度和电负荷对 CAES 部署位置的影响。基于此，对优化模型的获得的集合 O_1 进一步进行筛选。由于这两个物理因素并非唯一且绝对地影响 CAES 的部署位置，因此不直接选择 θ_i 最大的节点作为部署位置，而是筛选出所关联线路平均长度不超过 2km 且电负荷相对值大于 0.0155 的节点，构成集合 O_2={#14，#26，#29，#45，#46，#47}。

2）相对于发电机节点的距离和关联线路数量。

观察附录图 D1，集合 O_2 中的节点#26 和#29 位于区域 A1，节点#45 位于区域 A2，其余 3 个节点集中在区域 A3。A1 距离发电机节点更近，CAES 部署在此将使得电源对网络的辐射范围偏小，因此选择区域 A2 和 A3 内的节点更合理。

A2 区域内的#45 为末端节点，仅关联一条线路。在 A3 区域内，节点#47 比其余两个节点多关联一条备用线路，在台风破坏下脱离主网的可能性更小。

至此，基于优化模型的结果并结合配电网网络特征，选定节点#47 作为 CAES 的部署位置，后续在灾后模型仿真中将对其合理性进行验证。

4.2　灾后调度结果分析

按照附录图 A1 的流程图，取 N 为 1，获得一个随机场景(如图 4 所示)。此时 CAES 的部署位置已确定，通过求解 CAES 与 MESS 协同参与的灾后调度模型，对台风后综合能源系统的应急恢复过程进行仿真。

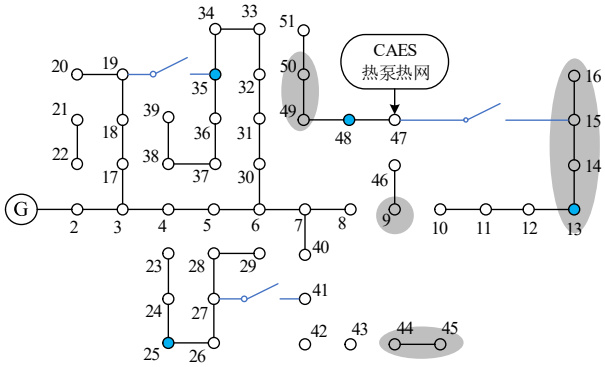


图 4　用于灾后调度的随机场景

Fig. 4　A random scenario for post-disaster dispatch

4.2.1　恢复过程分析

1）储能作用分析。

图 5 展示了恢复过程中 MESS(1 台)和 CAES

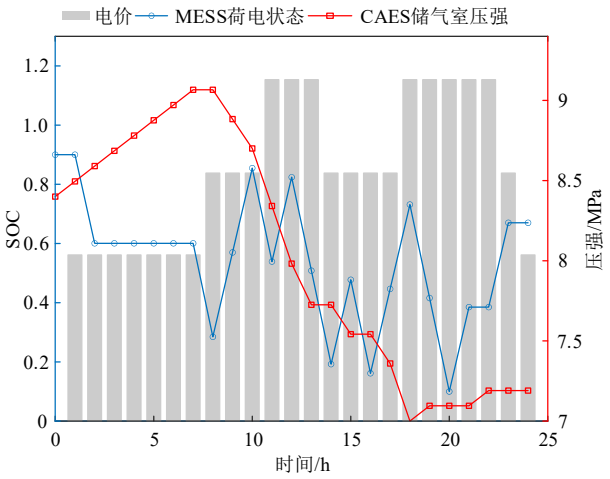


图 5　恢复过程中 CAES 与 MESS 的储能状态

Fig. 5　Energy state of CAES and MESS during restoring process

的储能状态，分别用电池 SOC 和储气室压强来表征。

灾后初期，尽管线路故障比较严重，但负荷价值相对较低，因此 MESS 几乎未工作，荷电状态不变，CAES 运行在储能模式，储气室压强上升。

灾后中期，尽管一部分故障线路被修复，但负荷价值较高，此时 CAES 工作在发电状态，储气室压强不断下降，尤其在 11~13h 的负荷高峰期，储气室压强下降幅度较大，说明 CAES 输出功率较大。在此期间，MESS 作为分布式电源为微电网供应负荷。考虑 MESS 的容量限制，其持续电力供应能力不足，需依靠在不同节点处充、放电实现电能跨节点余缺互济，离网节点在缺失发电机供电路径时仍然得到了 MESS 的临时电力供应。这充分发挥 MESS 的可移动性，但也从侧面说明小容量 MESS 在长时应急恢复中的劣势。

灾后后期，线路故障基本完成恢复，原有的发电机节点几乎可以供应所有负荷，MESS 和 CAES 不再承担发电任务，二者均处于充电状态。

附录图 D3 展示了 3 个典型时段的微电网拓扑和功率流向。

当 t=2h 时，配电网线路故障比较严重，位于#1 的发电机和移动到#16 的 MESS 作为电源形成 2 个微电网供应负荷。由于此时负荷价值相对较小，CAES 并未参与微电网的构建，而是工作在储能模式，等待更重要的时段释放能量。

当 t=13h 时，配电网部分线路恢复运行，但此时负荷价值较高，系统调配所有电源参与负荷保供。原有的发电机、位于#47 的 CAES 和移动至#9 的 MESS 共形成 3 个微电网，仅有 4 个节点未被覆盖。

当 t=21h 时，线路故障基本得到修复，发电机能够供应所有节点的负荷，CAES 和 MESS 均处于充电状态，系统已经基本完成恢复。

上述恢复过程表明，储能等灵活资源的调度需要同时考虑线路受灾情况和负荷价值两个因素：只有在配电网线路故障比较严重且负荷价值比较高的时段，所有储能资源会不遗余力地参与负荷恢复；而在其他时段，储能需要充电以积蓄能量。

此外，两种储能设施的特点各异：CAES 作为大中型储能有显著的容量优势，能够较长时间处于发电模式并持续发挥应急保障作用；而 MESS 的空间灵活性使其实现了电能跨节点余缺互济。

2）MESS 出力位置分析。

图 4 中阴影部分表示整个恢复周期内 MESS 作为电源时的工作节点集合，可以发现其出力位置比较集中。由于线路#8-#9 和#9-#10 的故障时间分别长达 18h 和 5h，图 4 中右上 1/4 区的节点脱离主网，因此大部分时间 MESS 在此区域的各个节点处构建微电网供应负荷。此外，线路#41-#42 的故障时间长达 20h，因此在第 18h 和 20h 时 MESS 分别移动至节点#44 和#45 处供应局部负荷。而此区域内受故障线路影响的节点相对较少，因此在大部分时间 MESS 优先供应图 4 中右上 1/4 区众多节点处的负荷。

这说明 MESS 会优先移动至受线路故障影响更大且其他电源无法辐射到的区域供电，从而在全局意义上实现负荷价值的最大恢复。

3）热负荷供应分析。

由图 6 可见，灾后恢复过程中热负荷得到了持续而稳定的供应，且在 11~13、18、21~23h 完全由储热系统提供热功率，这意味着当热网所在节点出现故障导致热泵无法正常工作时，CAES 的储热系统可以临时保障热负荷的供应。若在系统中移除

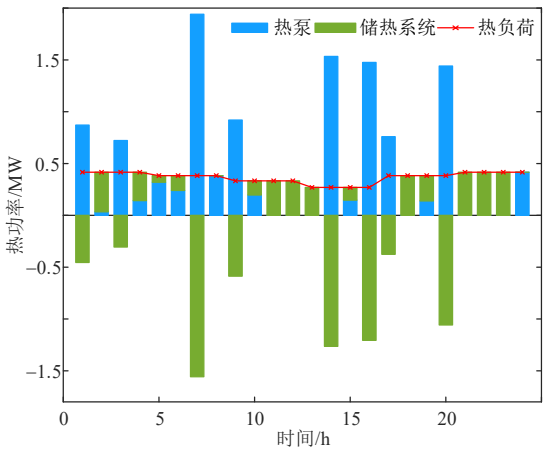


图 6　灾后热负荷供应情况

Fig. 6　Thermal loads supply after the disaster

CAES，在同样的场景下仿真计算，结果表明热负荷的供应率下降了 26.2%，其中有 7 个时段节点#47 离网，热负荷完全被搁置。因此，CAES 与热网的耦合提高了热负荷供应的灵活性，在灾害导致电网节点发生故障时，热负荷的可靠供应有更好的保障。

此外，图 6 中部分时段储热系统的热功率为负值，表明热泵向储热系统传递热量，目的是使储热系统获得足够的热能，一方面用于适时供给热负荷，另一方面增加燃气轮机入口处高压空气的温度。因此，当 CAES 处于发电模式时，热网向储热系统提供足够热能，用以加热储气室中的高压空气，这可以提高高压气体的做功能力，进而提升 CAES 系统的综合效能。

4.2.2 CAES 部署位置验证

为了验证前述部署 CAES 的方法和结果的合理性，分别在以下 4 个典型情景中对 CAES 和 MESS 进行灾后调度：

情景 1：CAES 部署在#47，1 台 MESS；

情景 2：CAES 部署在#31，1 台 MESS；

情景 3：CAES 部署在#27，1 台 MESS；

情景 4：CAES 部署在#29，1 台 MESS。

其中，#31 是双层优化模型输出的“较优解”集合之外的节点，#27 和#29 是考虑网络特征对“较优解”集合筛选时被过滤的节点。

上述 4 种情景下系统恢复负荷价值情况如图 7 所示。在大多数时段(尤其是电价较高的时段)情景 1 中恢复的负荷价值呈现出显著的优势，且整体上情景 1 中系统恢复的负荷总价值更大，达到 74.9 千元，比其他 3 个情景高 4.61%~5.34%。这说明在本文算例中的网络架构下将 CAES 部署在#47 是合理的，同时验证了综合考虑网络特征对 CAES 选址策略的有效性。

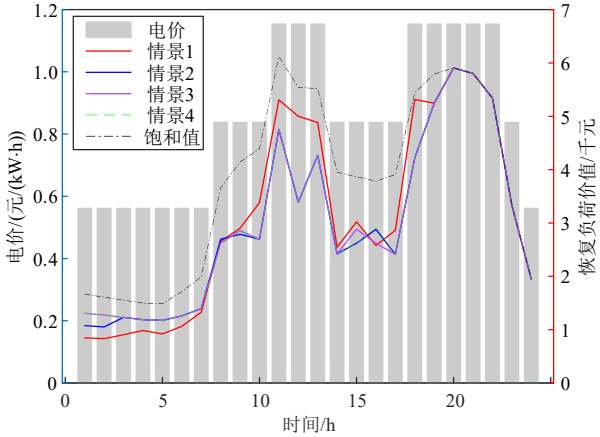


图 7 CAES 部署在不同节点处的恢复效果

Fig. 7 Restoring effects when CAES is deployed at different nodes

4.2.3 多储能协同的优势分析

为考察 CAES 与 MESS 的引入对负荷恢复的作用，设定以下 4 个情景进行对比说明：

情景 5：#47 安装 CAES，1 台 MESS；

情景 6：#47 安装 CAES，无 MESS；

情景 7：无 CAES，1 台 MESS；

情景 8：无 CAES，无 MESS。

上述 4 个情景的本质区别在于可调配储能资源的差异。由图 8 可得，相较于其他 3 个情景，当同时存在 CAES 和 MESS(情景 5)时，系统恢复的负荷价值在绝大多数时段呈现出明显的优势。这是因为当资源充足时系统能够在重要时段构建形成有效的微电网，支撑更多节点的负荷恢复。而在 1~6h 情景 5 的恢复效果不如情景 6 或情景 7，此时电价相对较低，负荷价值不高，情景 5 中 CAES 处于储能状态，待负荷高峰时段发电，从而在全周期意义上实现最优恢复效果(见表 1)。

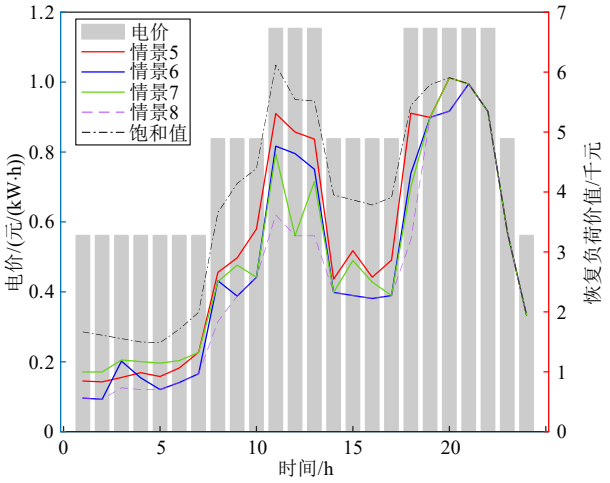


图 8 不同储能资源下的恢复效果对比

Fig. 8 Restoring effect comparison under different energy storage resources

对比情景 6 和情景 7，由表 1 可得，MESS 对负荷的整体恢复效果更好，相较于 CAES 其具备可移动性优势：在线路故障恢复的不同阶段，MESS 可以按照系统需求移动到不同的节点构建微电网。然而，由于 MESS 设施存在较高的购置、派遣和行驶成本，以及较小的储能容量，经济性成为其主要限制因素。在恢复效果和成本投入的权衡上，需要

表 1 不同储能资源下恢复负荷总价值对比

Table 1 Comparison of restored load value under different energy storage resources

情景 i	恢复负荷总价值/千元	情景 5 相较于情景 i 的增幅/%
情景 5	74.9	0
情景 6	67.2	11.5
情景 7	69.6	7.61
情景 8	61.2	22.4

更深入地研究。

4.2.4　MESS 数量的影响

为了探究 MESS 的数量对恢复过程的影响，将 CAES 安装在节点#47，设定不同数量的 MESS 参与灾后恢复，仿真结果如附录表 E4 所示。以台风场景 1 为例，MESS 数量越多，恢复负荷的总价值越多，恢复效果越好。但 MESS 数量的增加使模型更加复杂，求解时间呈现出指数级增长的趋势。此外，MESS 数量增加到一定程度，恢复效果的提升会逐渐变慢，也就是说，增加 1 台 MESS 带来的效益无法抵消费用增加和求解时间变长的代价。而这个临界点，也就是 MESS 数量的最优解，需要定量分析和深入研究。

观察不同台风场景中 MESS 的恢复效果可以给其最优数量的决策提供一些启发。表 E4 中台风场景 2 更恶劣，增加 1 台 MESS 对恢复效果的提升更明显，即越恶劣的场景中 MESS 的最优数量越大。相关研究可以为应急部门预部署 MESS 时的决策提供帮助。

5　结论

针对电-热综合能源系统在台风灾害后的负荷恢复问题，本文提出了考虑 CAES 和 MESS 协同参与的灾前-灾后两阶段弹性提升策略。通过在构建的混合网络拓扑中进行仿真分析，验证了所提方法的优越性。主要结论如下：

先进绝热压缩空气储能存在电能和热能的相互转化从而能够耦合配电网和热网，形成的综合能源系统实现了三方“共赢”的效果：CAES 对电能的时间转移特性使其提升了配电网弹性，其储热特性提高了热网中负荷供应的灵活性，同时强化了高压空气对外做功发电的能力，进而提升了全系统的效能。

针对 CAES 的位置部署问题，提出了求解优化模型与分析配电网物理特征相结合的全新策略，兼顾了矛盾的普遍性和特殊性。按照此方法对 CAES 进行部署，可获得更具针对性的唯一部署方案，灾后负荷恢复效果可提升 5%左右。

在灾后负荷保供时，CAES 与 MESS 的工作模式和出力特性会同时兼顾线路故障情况和各时段负荷价值。CAES 作为大中型储能具有长时间尺度下的应急恢复能力，而 MESS 的优势体现为空间移动性。相比于仅 CAES 或 MESS 工作的情况，二者协同配合可将负荷恢复效果分别提升 11.5%和 7.61%。

在后续工作中，本文将进一步研究 CAES 在日常场景和极端场景中的综合服务能力，从而提高设施利用率。另外，本文将探索 CAES 与 MESS 的联合部署问题，考虑电网、储能运营商等多方主体的利益，为应急决策部门在权衡经济性和恢复效果方面提供理论支持。

附录见本刊网络版(http://www.dwjs.com.cn/CN/1000-3673/current.shtml)。

参考文献

[1] 别朝红，林超凡，李更丰，等．能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]．中国电机工程学报，2020，40(9)：2735-2744．
BIE Zhaohong，LIN Chaofan，LI Gengfeng，et al．Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition [J]．Proceedings of the CSEE，2020，40(9)：2735-2744(in Chinese)．

[2] 住房和城乡建设部，国家发展改革委．“十四五”全国城市基础设施建设规划[EB/OL]．(2022-07-07)[2024-08-20]．https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2022-07/31/5703690/files/d4ebd608827e41138701d06fe6133cdb.pdf．

[3] 张亚超，丁志龙，谢仕炜，等．面向能源互联网的配电网韧性提升研究综述及展望[J]．电网技术，2023，47(5)：2054-2068．
ZHANG Yachao，DING Zhilong，XIE Shiwei，et al．Review and prospect of power distribution network resilience enhancement for energy internet[J]．Power System Technology，2023，47(5)：2054-2068(in Chinese)．

[4] WANG Xu，SHAHIDEHPOUR M，JIANG Chuanwen，et al．Resilience enhancement strategies for power distribution network coupled with urban transportation system[J]．IEEE Transactions on Smart Grid，2019，10(4)：4068-4079．

[5] 王钰山，邓晖，王旭，等．考虑台风时空演变的配电网移动储能优化配置与运行策略[J]．电力系统自动化，2022，46(9)：42-51．
WANG Yushan，DENG Hui，WANG Xu，et al．Optimal configuration and operation strategy of mobile energy storage in distribution network considering spatial-temporal evolution of typhoon[J]．Automation of Electric Power Systems，2022，46(9)：42-51(in Chinese)．

[6] 程杉，冉涛，喻磊，等．考虑配电网全过程韧性提升的多类型韧性资源分布鲁棒机会约束规划[J]．电网技术，2025，49(1)：157-166．
CHENG Shan，RAN Tao，YU Lei，et al．Distributionally robust joint chance constraint planning for multi-type resilience resources considering full process resilience enhancement in distribution network[J]．Power System Technology，2025，49(1)：157-166(in Chinese)．

[7] CHEN Hongzhou，XIONG Xiaofu，ZHU Jizhong，et al．A two-stage stochastic programming model for resilience enhancement of active distribution networks with mobile energy storage systems[J]．IEEE Transactions on Power Delivery，2024，39(4)：2001-2014．

[8] 卞艺衡，别朝红．面向弹性提升的智能配电网远动开关优化配置模型[J]．电力系统自动化，2021，45(3)：33-39．
BIAN Yiheng，BIE Zhaohong．Resilience-enhanced optimal placement model of remote-controlled switch for smart distribution network[J]．Automation of Electric Power Systems，2021，45(3)：33-39(in Chinese)．

[9] 张亚超，谢仕炜．面向配电网弹性提升的多时间尺度恢复策略协调优化框架[J]．电力系统自动化，2021，45(18)：28-34．
ZHANG Yachao，XIE Shiwei．Coordinated optimization framework of multi-timescale restoration strategies for resilience enhancement of distribution networks[J]．Automation of Electric Power Systems，2021，

45(18)：28-34(in Chinese).

[10] 肖娟霞，李勇，韩宇，等．计及台风时空特性和灵活性资源协同优化的配电网弹性提升策略[J]．电工技术学报，2024，39(23)：7430-7446.
XIAO Juanxia，LI Yong，HAN Yu，et al．Resilience enhancement strategy for distribution networks considering the spatiotemporal characteristics of typhoon and the collaborative optimization of flexible resources[J]．Transactions of China Electrotechnical Society，2024，39(23)：7430-7446(in Chinese).

[11] 王月汉，刘文霞，姚齐，等．面向配电网韧性提升的移动储能预布局与动态调度策略[J]．电力系统自动化，2022，46(15)：37-45.
WANG Yuehan，LIU Wenxia，YAO Qi，et al．Pre-layout and dynamic scheduling strategy of mobile energy storage for resilience enhancement of distribution network[J]．Automation of Electric Power Systems，2022，46(15)：37-45(in Chinese).

[12] 刘玉玲，张峰，张刚，等．考虑分布式电源的配电网灾中-灾后两阶段协同韧性恢复决策[J]．电力系统自动化，2024，48(2)：48-59.
LIU Yuling，ZHANG Feng，ZHANG Gang，et al．In-and post-disaster two-stage coordinated resilience recovery decision of distribution network considering distributed generators[J]．Automation of Electric Power Systems，2024，48(2)：48-59(in Chinese).

[13] 马静，徐宏璐，马瑞辰，等．能源交通融合下的弹性公路能源系统发展技术要点及展望[J]．电网技术，2023，47(3)：885-895.
MA Jing，XU Honglu，MA Ruichen，et al．A Review on the Development of Resilient Highway Energy System Under the Integration of Energy and Transportation[J]．Power System Technology，2023，47(3)：885-895(in Chinese).

[14] TAO Ran，ZHAO Dongmei，WANG Haoxiang，et al．Multi-stage defender-attacker-defender model for distribution system resilience enhancement in ice storms with line hardening, mobile device and repair crew dispatching[J]．CSEE Journal of Power and Energy Systems，2023，9(3)：1103-1118.

[15] 廖怀庆，刘东，黄玉辉，等．基于大规模储能系统的智能电网兼容性研究[J]．电力系统自动化，2010，34(2)：15-19.
LIAO Huaiqing，LIU Dong，HUANG Yuhui，et al．A study on compatibility of smart grid based on large-scale energy storage system [J]．Automation of Electric Power Systems，2023，9(3)：15-19(in Chinese).

[16] 刘笑驰，梅生伟，丁若晨，等．压缩空气储能工程现状、发展趋势及应用展望[J]．电力自动化设备，2023，43(10)：38-47，102.
LIU Xiaochi，MEI Shengwei，DING Ruochen，et al．Current situation，development trend and application prospect of compressed air energy storage engineering projects[J]．Electric Power Automation Equipment，2023，43(10)：38-47，102(in Chinese).

[17] 李建林，邸文峰，李雅欣，等．长时储能技术及典型案例分析[J]．热力发电，2023，52(11)：85-94.
LI Jianlin，DI Wenfeng，LI Yaxin，et al．Analysis of long-term energy storage technologies and typical case studies[J]．Thermal Power Generation，2023，52(11)：85-94(in Chinese).

[18] 尹斌鑫，苗世洪，李姚旺，等．集中-分布式混合压缩空气储能电站优化规划策略[J]．电力系统自动化，2023，47(5)：53-64.
YIN Binxin，MIAO Shihong，LI Yaowang，et al．Modeling and planning strategy for centralized-distributed hybrid compressed air energy storage station[J]．Automation of Electric Power Systems，2023，47(5)：53-64(in Chinese).

[19] 任洪波，张宇晨，吴琼，等．面向韧性提升的综合能源系统规划与运行调度研究综述[J/OL]．电力系统自动化，2024：1-16[2024-08-25]．http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240604.1438.010.html.
REN Hongbo，ZHANG Yuchen，WU Qiong，et al．Research review on planning and operation dispatch of integrated energy system for resilience enhancement[J/OL]．Automation of Electric Power Systems，2024：1-16[2024-08-25]．http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1180.TP.20240604.1438.010.html(in Chinese).

[20] 唐坤霆，周永智，李宝聚，等．考虑热惯性的极端冰雪灾害下综合能源系统韧性提升[J]．电力系统自动化，2024，48(21)：129-137.
TANG Kunting，ZHOU Yongzhi，LI Baoju，et al．Resilience enhancement of integrated energy systems under extreme ice and snow disasters considering thermal inertia[J]．Automation of Electric Power Systems，2024，48(21)：129-137(in Chinese).

[21] SHAO Chengcheng，SHAHIDEHPOUR M，WANG Xifan，et al．Integrated planning of electricity and natural gas transportation systems for enhancing the power grid resilience[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2017，32(6)：4418-4429.

[22] 孙少华，李更丰，邹文秋，等.兼顾常规场景经济性与极端场景弹性的多类型储能设备配置策略[J/OL]．高电压技术，2025：1-14 [2025-03-31]．https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250023.
SUN Shaohua，LI Gengfeng，ZOU Wenqiu，et al．Multi-type energy storage equipment configuration strategy balancing economy in conventional scenarios and resilience in extreme scenarios [J/OL]．High Voltage Engineering，2025：1-14[2025-03-31].https://doi.org/10.13336/j.1003-6520.hve.20250023(in Chinese).

[23] 徐国栋，程浩忠，马紫峰，等．用于缓解电网调峰压力的储能系统规划方法综述[J]．电力自动化设备，2017，37(8)：3-11.
XU Guodong，CHENG Haozhong，MA Zifeng，et al．Overview of ESS planning methods for alleviating peak-shaving pressure of grid[J]．Electric Power Automation Equipment，2017，37(8)：3-11(in Chinese).

[24] GRAZZINI G，MILAZZO A．A thermodynamic analysis of multistage adiabatic CAES[J]．Proceedings of the IEEE，2012，100(2)：461-472.

[25] 薛小代，陈晓弢，梅生伟，等．采用熔融盐蓄热的非补燃压缩空气储能发电系统性能[J]．电工技术学报，2016，31(14)：11-20.
XUE Xiaodai，CHEN Xiaotao，MEI Shengwei，et al．Performance of non-supplementary fired compressed air energy storage with molten salt heat storage[J]．Transactions of China Electrotechnical Society，2016，31(14)：11-20(in Chinese).

[26] 梅生伟，李瑞，陈来军，等．先进绝热压缩空气储能技术研究进展及展望[J]．中国电机工程学报，2018，38(10)：2893-2907.
MEI Shengwei，LI Rui，CHEN Laijun，et al．An overview and outlook on advanced adiabatic compressed air energy storage technique[J]．Proceedings of the CSEE，2018，38(10)：2893-2907 (in Chinese).

[27] DUNN S，WILKINSON S，ALDERSON D，et al．Fragility curves for assessing the resilience of electricity networks constructed from an extensive fault database[J]．Natural Hazards Review，2018，19(1)：04017019.

[28] 时珊珊，张琪祁，魏新迟，等．面向极限生存能力提升的城市配电网反脆弱规划方法[J]．电力建设，2024，45(1)：56-67.
SHI Shanshan，ZHANG Qiqi，WEI Xinchi，et al．Anti-Fragile planning of urban distribution network for survivability improvement [J]．Electric Power Construction，2024，45(1)：56-67(in Chinese).

[29] 郭毅娜，廖凯，杨健维，等．兼顾配电网韧性提升的电动汽车换电站容量优化配置方法[J]．电网技术，2025，49(2)：470-480.
GUO Yina，LIAO Kai，YANG Jianwei，et al．Optimal Capacity Allocation Method of Battery Swapping Station Considering Distribution System Resilience Enhancement[J]．Power System Technology，2025，49(2)：470-480(in Chinese).

[30] 江昌旭，卢玥君，袁羽娟，等．考虑里程焦虑的高速公路充电站及配电网扩展规划[J]．电网技术，2025，49(9)：3881-3890.
JIANG Changxu，LU Yuejun，YUAN Yujuan，et al．Highway Charging Station and Distribution Network Expansion Planning Considering Range Anxiety[J]．Power System Technology，2025，

49(9)：3881-3890(in Chinese).

[31] MEI Shengwei，WANG Junjie，TIAN Fang，et al．Design and engineering implementation of non-supplementary fired compressed air energy storage system：TICC-500[J]．Science China Technological Sciences，2015，58(4)：600-611．

[32] LI Rui，CHEN Laijun，YUAN Tiejiang，et al．Optimal dispatch of zero-carbon-emission micro energy internet integrated with non-supplementary fired compressed air energy storage system[J]．Journal of Modern Power Systems and Clean Energy，2016，4(4)：566-580．

[33] BUDT M，WOLF D，SPAN R，et al．A review on compressed air energy storage：basic principles，past milestones and recent developments[J]．Applied Energy，2016，170：250-268．

[34] MOHAN G N V，BHENDE C N．Resiliency improvement of cyber-dependent distribution network using mobile energy storage systems [C]//2023 IEEE International Conference on Energy Technologies for Future Grids (ETFG)．Wollongong：IEEE，2023：1-6．

[35] DING Tao，LIN Yanling，LI Gengfeng，et al．A new model for resilient distribution systems by microgrids formation[J]．IEEE Transactions on Power Systems，2017，32(5)：4145-4147．

[36] PIROUTI M，BAGDANAVICIUS A，EKANAYAKE J，et al．Energy consumption and economic analyses of a district heating network[J]．Energy，2013，57：149-159．

[37] 金凡凡，郭瑞鹏，林振智，等．考虑配电网供电可靠性与经济性的 FTU 优化配置[J]．电力自动化设备，2024，44(12)：132-139．JIN Fanfan，GUO Ruipeng，LIN Zhenzhi，et al．Optimal placement of FTUs considering power supply reliability and economy of distribution network[J]．Electric Power Automation Equipment，2024，44(12)：132-139(in Chinese)．



刘权

在线出版日期：2025-05-09。

收稿日期：2025-01-06。

作者简介：

刘权(2001)，男，硕士研究生，研究方向为电力系统弹性，E-mail：liquid2001@163.com；

陈晨(1983)，男，通信作者，教授，博士生导师，研究方向为弹性电力系统、电力系统优化运行，E-mail：morningchen@xjtu.edu.cn。

（责任编辑　赵梓含）

附录 A

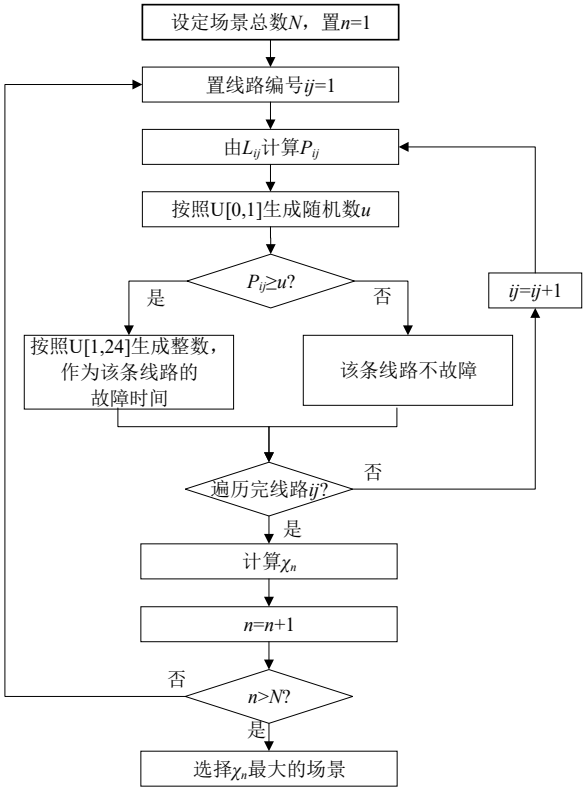


图 A1　受灾场景生成算法流程图

Fig. A1　Flowchart of disaster scenario generation algorithm

附录 B

式(51)和(52)中均含有二元变量和连续变量的相乘项，导致非线性约束的形成。通过引入辅助变量并结合“大 M”法，可以将非线性项替换并转化为线性项。由式(44)—(46)可知，$P_{m,t}^{\mathrm{ch}}$、$P_{m,t}^{\mathrm{dis}}$ 和 $Q_{m,t}$ 均为非负变量，且存在上界，因此可分别用其上界替代“大 M”，形成更为紧凑的线性约束，如式(B1)—(B8)所示：

$$P_{i,t}^{\mathrm{MESS}}=\sum_{m}(P_{m,i,t}^{\mathrm{dis,node}}-P_{m,i,t}^{\mathrm{ch,node}}) \tag{B1}$$

$$0\le P_{m,i,t}^{\mathrm{dis,node}}\le\theta_{m,i,t}^{\mathrm{dis}}P_{m}^{\mathrm{dis,max}} \tag{B2}$$

$$P_{m,t}^{\mathrm{dis}}-(1-\theta_{m,i,t}^{\mathrm{dis}})P_{m}^{\mathrm{dis,max}}\le P_{m,i,t}^{\mathrm{dis,node}}\le P_{m,t}^{\mathrm{dis}} \tag{B3}$$

$$0\le P_{m,i,t}^{\mathrm{ch,node}}\le\theta_{m,i,t}^{\mathrm{ch}}P_{m}^{\mathrm{ch,max}} \tag{B4}$$

$$P_{m,t}^{\mathrm{ch}}-(1-\theta_{m,i,t}^{\mathrm{ch}})P_{m}^{\mathrm{ch,max}}\le P_{m,i,t}^{\mathrm{ch,node}}\le P_{m,t}^{\mathrm{ch}} \tag{B5}$$

$$Q_{i,t}^{\mathrm{MESS}}=\sum_{m}Q_{m,i,t}^{\mathrm{node}} \tag{B6}$$

$$0\le Q_{m,i,t}^{\mathrm{node}}\le(\theta_{m,i,t}^{\mathrm{dis}}+\theta_{m,i,t}^{\mathrm{ch}})Q_{m}^{\max} \tag{B7}$$

$$Q_{m,t}-(1-\theta_{m,i,t}^{\mathrm{dis}}-\theta_{m,i,t}^{\mathrm{ch}})Q_{m}^{\max}\le Q_{m,i,t}^{\mathrm{node}}\le Q_{m,t} \tag{B8}$$

式中：引入的变量 $P_{m,i,t}^{\mathrm{ch,node}}$、$P_{m,i,t}^{\mathrm{dis,node}}$ 和 $Q_{m,i,t}^{\mathrm{node}}$ 可解释为 t 时刻第 m 个 MESS 在节点 i 的实际充电有功功率、放电有功功率和无功功率。

式(B1)—(B5)为式(51)的线性化形式，式(B6)—(B8)为式(52)的线性化形式。

附录 C

配电网运行约束修正

MESS 可作为电源构建微电网供应负荷，因此配电网各节点的有功功率和无功功率平衡约束以及节点电压上、下限约束均需要修正，则式(24)和(25)分别替换为式(C1)和(C2)，并增加式(C3)：

$$P_{j,t}^{\mathrm{gen}}+P_{j,t}^{\mathrm{MESS}}+\sum_{i\in M(j)}P_{ij,t}=\sum_{k\in N(j)}P_{jk,t}+p_{j,t}^{\mathrm{load}},\quad j\in X$$

$$\sum_{v}p_{v,t}^{\mathrm{g}}+P_{j,t}^{\mathrm{MESS}}+\sum_{i\in M(j)}P_{ij,t}=\sum_{k\in N(j)}P_{jk,t}+p_{j,t}^{\mathrm{load}}+\sum_{u}p_{u,t}^{\mathrm{c}}+p_{t}^{\mathrm{HP}},\ j\in Y \tag{C1}$$

$$P_{j,t}^{\mathrm{MESS}}+\sum_{i\in M(j)}P_{ij,t}=\sum_{k\in N(j)}P_{jk,t}+p_{j,t}^{\mathrm{load}},\ j\notin X\bigcup Y$$

$$Q_{j,t}^{\mathrm{gen}}+Q_{j,t}^{\mathrm{MESS}}+\sum_{i\in M(j)}Q_{ij,t}=\sum_{k\in N(j)}Q_{jk,t}+q_{j,t}^{\mathrm{load}},\quad j\in X$$

$$Q_{j,t}^{\mathrm{MESS}}+\sum_{i\in M(j)}Q_{ij,t}=\sum_{k\in N(j)}Q_{jk,t}+q_{j,t}^{\mathrm{load}},\ j\notin X \tag{C2}$$

$$1-(1-\sum_{m}\theta_{m,i,t}^{\mathrm{dis}})M\le U_{i,t}\le 1+(1-\sum_{m}\theta_{m,i,t}^{\mathrm{dis}})M,\quad i\notin X \tag{C3}$$

式(C1)和(C2)为考虑 MESS 出力的节点有功、无功功率平衡约束；式(C3)为考虑 MESS 作为电源构建微电网时的节点电压上、下限约束，当 MESS 处于发电状态时，其所在节点为微电网参考节点，电压标幺值取为 1。

配电网拓扑约束修正

MESS 的参与对灾后微电网的数量和电源结构将产生影响，则式(33)和(34)修正为式(C4)和(C5)，并增加式(C6)：

$$\sum_{ij}\alpha_{ij,t}=\sum_{k}\beta_{k,t}-(N^{\mathrm{g}}+u_{t}^{\mathrm{g}}+\sum_{m}\mu_{m,t}) \tag{C4}$$

$$G_{j,t}+\sum_{i\in M(j)}F_{ij,t}=\sum_{k\in N(j)}F_{jk,t},j\in X$$

$$C_{j,t}+\sum_{i\in M(j)}F_{ij,t}=\sum_{k\in N(j)}F_{jk,t}+\beta_{j,t},j\in Y$$

$$\sum_{m}M_{m,j,t}+\sum_{i\in M(j)}F_{ij,t}=\sum_{k\in N(j)}F_{jk,t}+\beta_{j,t},\quad j\notin X\bigcup Y \tag{C5}$$

$$\theta_{m,i,t}^{\mathrm{dis}}*1\le M_{m,i,t}\le\theta_{m,i,t}^{\mathrm{dis}}M,i\notin X\bigcup Y \tag{C6}$$

式中：$M_{m,i,t}$为 t 时刻第 m 个 MESS 注入节点 i 的虚拟潮流。

式(C4)中，微电网的数量需要考虑 MESS 作为电源时的情况；式(C5)表示 MESS 可作为电源向部分节点中注入虚拟潮流；式(C6)为 MESS 注入配电网节点的虚拟潮流约束，当其在该节点处于发电状态时，虚拟潮流不少于 1，否则取值为 0。

附录 D

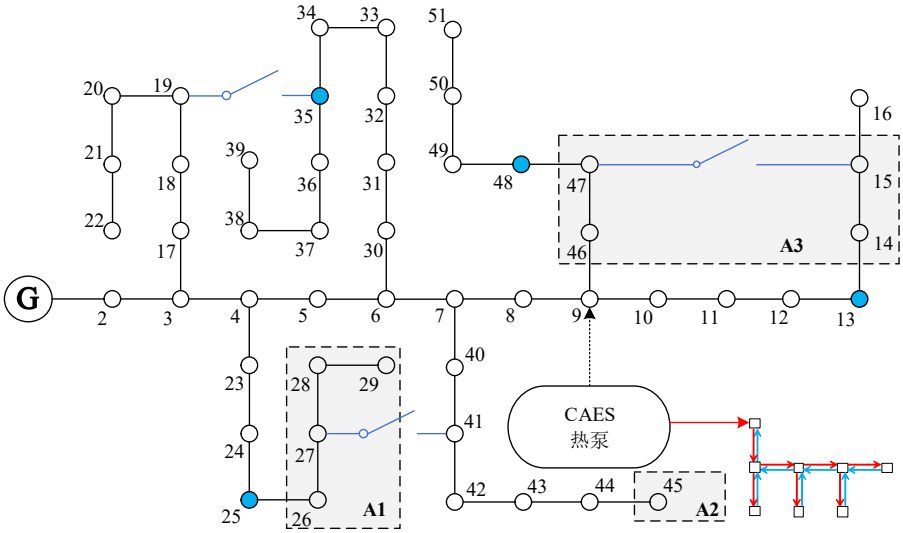


图 D1　电-热综合能源系统的网络结构

Fig. D1　Network structure of integrated electricity-heat energy system

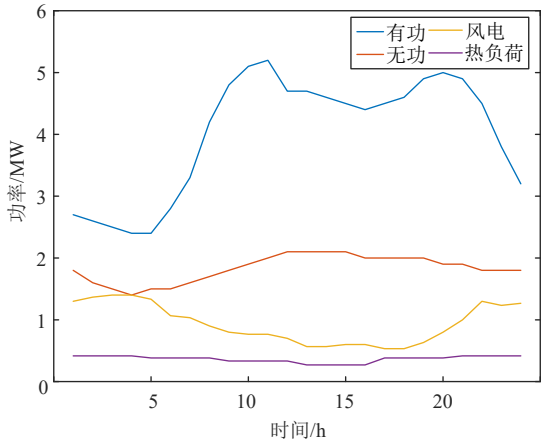
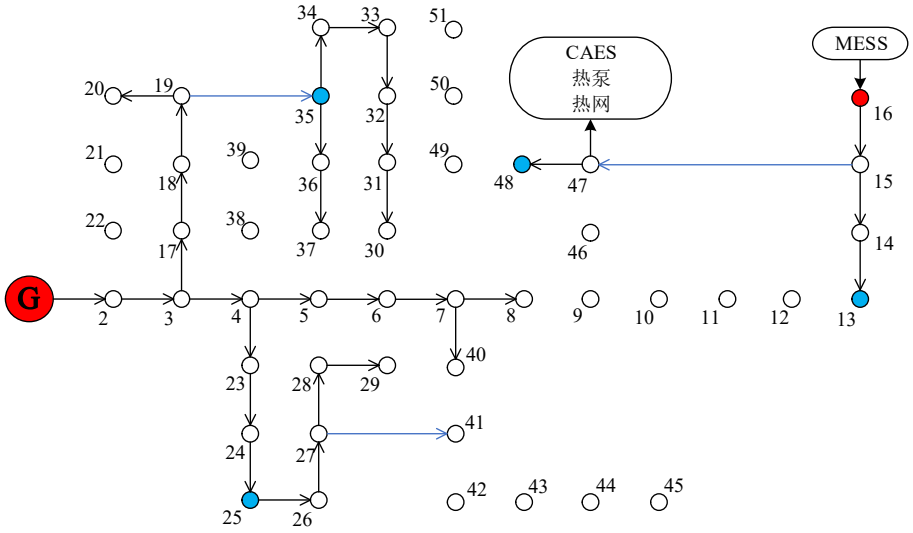
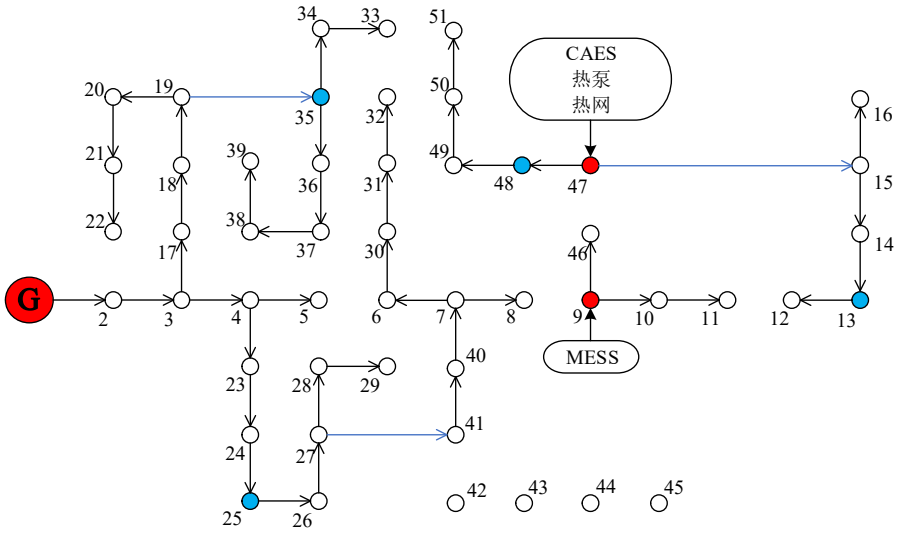


图 D2　电、热负荷和风电出力曲线

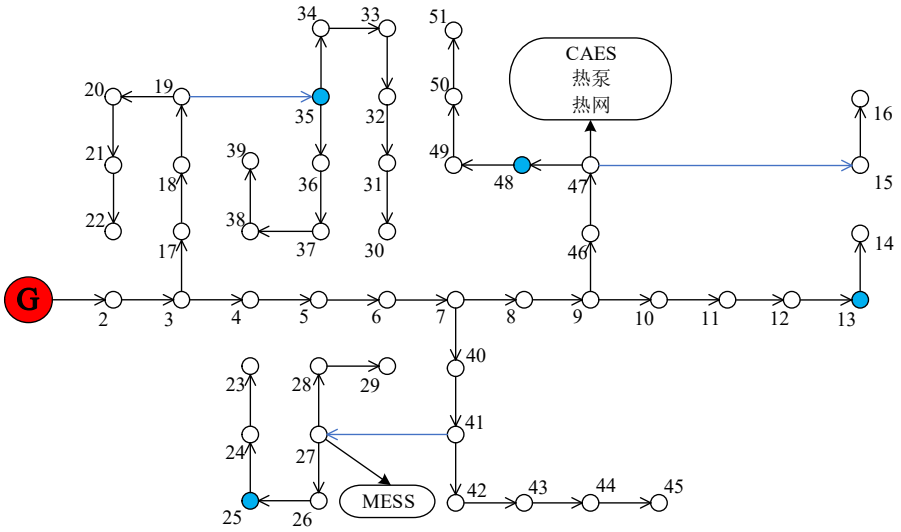
Fig. D2　Curves of electrical load, thermal load and wind power output



t=2h，微网数目为2



t=13h，微网数目为3



t=21h，微网数目为1

图 D3　灾后恢复过程中 3 个典型时段的微电网拓扑和功率流向

Fig. D3　Microgrid topology and power flow directions during three typical periods in post-disaster recovery

附录 E

表 E1　大容量储能技术特性对比

Table E1　Comparison of technical characteristics of large-scale energy storage technologies

指标	度电成本	安全性	电热耦合应用	部署自由度
抽水蓄能	低	高	少	地理条件限制
压缩空气储能	低	高	基于储热系统	采用储气罐则无限制
电池储能	较高	电池起火与燃烧	少	无限制
氢储能	高	氢气泄露与燃烧	基于燃料电池	可再生能源位置限制

表 E2　2024 年 5 月北京市工商业峰-谷-平电价

Table E2　Peak-valley-flat electricity prices for industrial and commercial users in Beijing, May 2024

类别	时段/h	电价/(元/kWh)
峰	{11~13，18~22}	1.1536
平	{8~10，14~17，23}	0.8378
谷	{1~7，24}	0.5614

表 E3　部分节点的物理特征对比

Table E3　Comparison of physical characteristics of selected nodes

节点	关联线路平均长度/km	负荷有功功率相对值	θ_i	恢复负荷价值/千元
#10	3.41	0.0244	3.66	36.07
#27	1.17	0.0065	3.34	40.84
#36	1.40	0.0134	3.79	37.69
#15	3.21	0.0487	5.25	40.84

表 E4　两种台风场景中不同数量 MESS 参与灾后恢复的效果对比

Table E4　Comparison of the effects of different numbers of MESS in disaster recovery across two typhoon scenarios

MESS 数量	台风场景 1：χ_n=114		台风场景 2：χ_n=239	
	恢复负荷总价值/千元	求解时间/s	恢复负荷总价值/千元	求解时间/s
0	67.2	1.03	40.8	0.54
1	74.9	116.23	51.4	110.35
2	79.6	999.33	58.4	871.91
3	82.7	>3800	63.1	>3200