第 51 卷 第 10 期：5053-5066 高电压技术 Vol.51, No.10: 5053-5066
2025 年 10 月 31 日 High Voltage Engineering October 31, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250277

考虑电动汽车换电池参与的配电网多类型应急资源优化配置策略

姚福星[1,2]，苗世洪[1,2]，王廷涛[1,2]，王　杰[1,2]，王佰盛[1,2]，王佳旭[1,2]
（1. 强电磁技术全国重点实验室(华中科技大学)，武汉 430074;
2. 华中科技大学电气与电子工程学院，武汉 430074）

摘　要：近年来，日益频发的极端事件对配电网的安全稳定运行造成了严重威胁，亟需采取有效手段改善其韧性。与此同时，电动汽车及储能装置的广泛接入，为增强配电网应急支撑保障能力提供了新思路。基于此，首先分析了电动汽车换电技术的成熟度和优越性，提出了一种电动汽车换电池用作灾后紧急电源的供电方案；其次，基于该方案，建立了考虑线路加固、移动式储能及电动汽车换电池的配电网多类型应急资源双层优化配置模型，其中，上层模型以规划期内总体经济投入最小为原则，决策 3 种应急资源的数目及容量，下层模型以最小化灾害场景下系统运行成本为目标，决策上述应急资源以及配电网已有燃气轮机、分布式电源和固定式储能的调度计划；最后，基于改进的 IEEE 33 节点系统进行了算例分析。结果表明：所提策略能够充分发挥多类型资源的互补优势，在尽可能降低经济投入的前提下，切实提高配电网韧性。

关键词：配电网韧性；应急资源；电动汽车换电池；线路加固；移动式储能

Multi-type Emergency Resource Optimization Strategy for Distribution Networks Considering the Involvement of Electric Vehicle Replaceable Batteries

YAO Fuxing[1,2], MIAO Shihong[1,2], WANG Tingtao[1,2], WANG Jie[1,2], WANG Baisheng[1,2], WANG Jiaxu[1,2]
(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Technology (Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract：In recent years, the increasing occurrence of extreme events has posed a serious threat to the safe and stable operation of distribution networks (DNs), an urgent need to take effective measures to improve the resilience is on the way. Meanwhile, the wide access of electric vehicles (EVs) and energy storage devices has provided new ideas for enhancing the emergency support and safeguard capability of DNs. For this reason, the maturity and superiority of EV battery swapping technology are analyzed firstly in this paper, and a post-disaster power supply scheme using EV replaceable batteries as emergency sources is proposed. Secondly, a two-layer optimal configuration model of DN multi-type emergency resources considering line reinforcement, mobile energy storage systems and EV replaceable batteries is developed, in which the upper-layer model decides the number and capacity of the three emergency resources targeting at minimizing overall investment during the programming period, and the lower-layer model determines the scheduling plan of the above-mentioned emergency resources, as well as the gas turbines, distributed generators, and stationary energy storage systems that are already available in the DN, with the goal of minimizing the operation costs of the system under disaster scenarios. Finally, a case study based on the improved IEEE 33-node system is carried out. The results show that the proposed strategy can fully utilize the complementary advantages of multi-type resources, and truly improve the DN resilience while minimizing the financial investment.

Key words：distribution network resilience; emergency resources; electric vehicle replaceable batteries; line reinforcement; mobile energy storage systems

基金资助项目：国家重点研发计划(2023YFB2406500)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2023YFB2406500).

0 引言

随着国民经济的快速发展和人民生活水平的逐步提高，保障供电可靠性、提升电力服务质量已成为配电网(distribution networks，DNs)新时代发展的必然要求[1]。然而，由于 DNs 大多直接暴露在野外，且拓扑结构较为简单，因此极易受外部环境的影响而发生停电事故[2]。另一方面，极端天气、网络攻击等风险因素的交织涌现，更是雪上加霜，给 DNs 的安全稳定运行带来了严峻挑战。在此背景下，构建具有高抗扰性、强恢复力的韧性 DNs 已成为学术界和工业界的重要议题[3-4]。

目前，国内外学者已针对 DNs 韧性提升措施开展了大量研究，其中，线路加固作为一种传统但有效的手段备受瞩目。文献[5]借助线路加固和扩容两种措施改善系统韧性，并建立了电网公司和用户之间的成本分摊机制，在减少停电损失的同时，还能保证投资成本的公平分配；文献[6]构建了一种考虑线路加固和固定式储能(stationary energy storage systems，SESSs)的 DNs 两阶段鲁棒优化模型，有效保障了系统韧性并降低了投资成本；文献[7]提出了一种采用线路加固和分布式储能的区域 DNs 应急资源协调配置策略，能够减少系统在极端灾害下的失负荷量，并促进其正常阶段的经济低碳运行。上述文献充分肯定了线路加固在电网韧性提升方面的作用，但大多仅从该手段本身或者其与 SESSs 的配合方面进行探究，并未考虑移动式资源的参与。由于灾害具有突发性和不确定性，即使采用线路加固和 SESSs，仍有可能面临 DNs 断线、分区运行等情况，此时 SESSs 仅能降低接入节点附近的失负荷量，难以保障全网供电可靠性，亟需与移动式资源相配合，以有效提升 DNs 韧性。

近年来，移动式储能(mobile energy storage systems，MESSs)、移动式发电机等灵活性资源以其位置分散、接入便捷等特征，能够更好地适应灾后 DNs 的运行要求，受到了学者们的广泛关注。文献[8]考虑 SESSs 和 MESSs 对供电可靠性的影响，建立了一种 DNs 网架与储能协调规划模型，实现了规划决策与可靠性评估的同步进行；文献[9]提出了一种 DNs 韧性曲线分析方法，并进一步建立了移动式发电机数目及容量优化规划模型，可根据电网受灾程度和已有资源给出最优配置结果；文献[10]建立了面向电力系统黑启动场景的 SESSs 和 MESSs 混合优化配置模型，能够有效应对新能源出力的随机性，并提升系统整体恢复速度。上述文献表明，MESSs 在保障供电可靠性、提供紧急功率支撑以及作为黑启动源等方面具有较大优势，是 DNs 韧性提升的强有力措施。然而，受限于经济因素，其可接入节点有限，目前尚且无法实现全网范围的即插即用[11]，在灾后保供电方面仍然需要其余应急资源的配合。

另一方面，电动汽车(electric vehicles，EVs)技术发展迅猛，车向电网供电(vehicle to grid，V2G)、车向负荷供电(vehicle to load，V2L)等措施逐渐在韧性提升领域占据一席之地，EVs 有望在灾害发生后为小范围内的负荷提供电力支撑，促进电网的公平、有序恢复[12]。目前，已有较多文献对 EVs 的移动充放电特性进行了分析，该功能类似于 MESSs，可在事故后作为电能的“搬运工”，为电网故障区域负荷供能[13-14]。与此同时，EVs 的换电技术也日趋成熟，换电站可作为 SESSs 参与电力系统优化运行，而配备了可更换电池(replaceable batteries，RBs)的 EVs 能够在极端场景下用作 MESSs，降低电网的停电损失，极大地提高了系统的灵活运行能力[15-16]，但 EVs 及 RBs 的优越性能尚且不止于此，仍有待进一步挖掘。由于 EVs 更靠近用户侧，能够作为应急电源在负荷失电后提供紧急功率支撑，从而有效弥补 MESSs 接入节点有限及需要移动时间等不足[17]，因此，如果在 EVs 大型停车场放置 RBs，可以在灾害发生后通过 EVs 和 RBs 的有机结合，作为分布式储能实现类似于 MESSs 的接入，充分提高 DNs 韧性[18-19]。但目前相关研究还鲜见报道。

为此，本文首先基于上述思想，提出了一种 EV-RBs 用作灾后紧急电源的供电方案；然后，面向 DNs 韧性提升需求，建立了考虑线路加固、MESSs 及 EV-RBs 的多类型应急资源双层优化配置模型；最后，基于改进的 IEEE 33 节点系统进行了算例分析，验证了所提方案及模型的有效性。相较于已有文献，本文的主要创新点在于：1）在分析 EVs 换电技术成熟度和优越性的基础上，建立了一种用作灾后紧急电源的 EV-RBs 供电模型；2）提出了一种面向 DNs 韧性提升的多类型应急资源优化配置策略，能够充分发挥线路加固、MESSs、EV-RBs 3 种应急资源的互补优势，以及已有燃气轮机、分布式电源(distributed generators，DGs)、SESSs 的供电性能，有效降低灾害场景下 DNs 的失负荷量。

1 EV-RBs 用作紧急电源方案及建模

1.1 可行性及优越性分析

据统计，2024 年 10 月我国新能源汽车销量占总销量的 51.0%，已连续 3 个月突破半数，汽车行业迎来了“电比油多”的时代[20]。EVs 产业的蓬勃发展，不仅方便了人民的日常出行、推动了国民经济的快速增长，也为技术融合和创新变革提供了重要机遇。对于 DNs 而言，EVs 既可以是充电设备，也可以是放电装置，因此其广泛接入在为电力系统调度运行注入活力的同时，也提出了新的挑战。如何充分挖掘其调节特性，提升系统整体运行效益，已成为现阶段学者们的研究重点。我国政府也在加快出台支持车网互动的利好政策[21]。在此背景下，EVs 用作储能装置的调控潜能得到了有效挖掘，其不仅在削峰填谷、促进可再生能源消纳等场景下表现出了良好性能，也为电网的灾后紧急功率支撑和黑启动恢复提供了新思路[22-23]。需要特别说明的是，上述功能类似于 MESSs，本文对此不作过多讨论，在后续章节将发挥该功能的 EVs 从模型上划分为 MESSs。

与此同时，随着动力电池成本的不断降低以及行业标准的逐步统一，EVs 换电技术也愈发成熟。例如，蔚来能源现已在全国建成 3 000 座换电站，旗下的 EVs 可在 3 min 内完成全自动电池更换，极大地提高了汽车的续航能力[24]。2024 年 12 月，宁德时代更是推出了两种标准化“巧克力”RBs，并宣布与多个汽车公司合作，构建“巧克力换电生态”。可以预见，在不久的将来，RBs 将成为继家用充电桩和公用充电桩后 EVs 的又一重要补能方式[25]。RBs 的出现，除助力 EVs 用作 MESSs 外，也为提供灾后紧急供电、发挥分布式储能系统的优势创造了可能。如图 1 所示，若在 EVs 大型停车场、商业中心或负荷密集区预置 RBs，在 DNs 发生停电事故后，可就近通过 RBs 和 EVs 的有机结合，发挥 V2G 或 V2L 功能，为重要负荷提供功率支撑，降低系统整体的失负荷量。需要注意的是，EV-RBs 必须借助周围闲置的汽车及充电桩才能构成供电回路，但一般而言，灾害发生后的上述区域必然存在暂无出行需求的 EVs 及相应的充电基础设施，因此本文所提 EV-RBs 用作紧急电源的方案具备一定可行性。

EV-RBs 紧急电源的性能及其与 SESSs、MESSs 的对比情况如表 1 所示[26]。由表可知，EV-RBs 用作紧急电源时，其容量直接取决于预置电池块的数目，而额定功率则由现场可用的电动汽车及充电桩数量决定，二者完全解耦且能够按需调整。此外，由于可直接借助汽车或充电桩的双向转换功能，EV-RBs 省去了逆变器成本，因此相较于 SESSs(或电池构成的不间断电源)，其建设成本更低；由于更靠近用户侧且换电迅速，EV-RBs 在停电后可立即投运并为负荷提供功率支撑，省去了交通成本和移动时间，因此相较于 MESSs 更为便捷；由于其具有“一车一桩一电池块”的独特供电结构，EV-RBs 的发热及燃爆风险更低，且灭火更为容易。由此可见，EV-RBs 在使用便捷性、空间灵活性、经济性和安全性等方面均具有较大优势，用作灾后紧急电源具备一定的优越性。

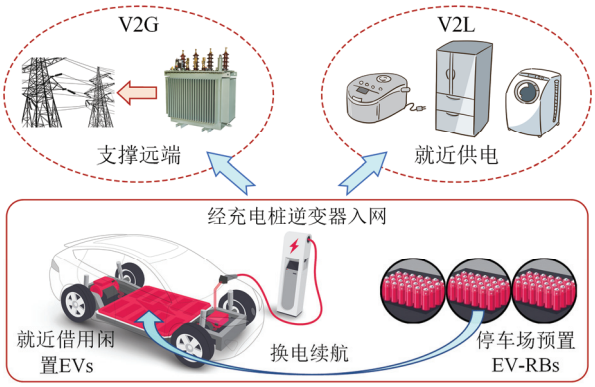


图 1 EV-RBs 用作紧急电源示意图

Fig.1 Scheme of EV-RBs used as emergency sources

表 1 EV-RBs 紧急电源与 SESSs、MESSs 性能对比

Table 1 Performance comparison between EV-RBs emergency sources, SESSs and MESSs

性能	EV-RBs 紧急电源	SESSs	MESSs
额定容量	单体小但总量大	单站大	单车较小
额定功率	可按需调整	固定	固定
功率和容量解耦	是	否	否
投资成本	较低	较低	较高
空间灵活性	固定但可按需接入	固定且不可调整	可按需动态调整
安全性	电池分散，燃爆风险低，灭火难度低	电池量大且聚集，燃爆风险高	电池量大且聚集，燃爆风险高

1.2 EV-RBs 紧急电源模型

EV-RBs 用作灾后紧急电源时，除相应的安装成本和日常维护成本外，在实际运行过程中，还将因借用附近的 EVs 而产生租赁成本，因雇佣换电人员而产生服务费用，此外还需考虑其运行过程中的损耗成本。由于汽车租赁费和人员服务费相对固定，

为简化建模过程，本文近似将其纳入维护成本当中：

$$C_{\text{om}}^{\text{RB}} = C_{\text{om}}^{\text{RB,f}} + C_{\text{rent}}^{\text{EV}} + C_{\text{staff}} \tag{1}$$

式中：$C_{\text{om}}^{\text{RB,f}}$ 和 $C_{\text{om}}^{\text{RB}}$ 分别为折算前后 EV-RBs 的维护成本；$C_{\text{rent}}^{\text{EV}}$ 为紧急情况下 EVs 的租赁成本；C_{staff} 为支付给换电人员的服务费。

运行损耗则与 EV-RBs 充放电功率直接相关，需要在具体的调度过程中进行计算：

$$C_{\text{op},t}^{\text{RB}} = \sum_{b\in B} w_b (P_{b,t}^{\text{c}} + P_{b,t}^{\text{d}}) \tag{2}$$

式中：$C_{\text{op},t}^{\text{RB}}$ 为 t 时段 EV-RBs 的运行损耗成本；B 为 EV-RBs 的集合；w_b 为 EV-RB b 的损耗成本系数；$P_{b,t}^{\text{c}}$ 和 $P_{b,t}^{\text{d}}$ 分别 t 时段 EV-RB b 的充放电功率。

如前所述，EV-RBs 紧急电源的容量及额定功率分别由现场预置电池块数目、可用汽车及充电桩的数目决定(EVs 自带电池是否参与紧急功率支撑取决于车主的个人意愿，难以事先确定，为保障后续模型的鲁棒性，本文近似对其做忽略处理)，因此可参照常规的储能装置，得出 EV-RBs 紧急电源的运行约束为：

$$\begin{cases} 0 \le P_{b,t}^{\text{c}} \le \xi_{b,t}^{\text{c}} \min(\Omega_b^{\text{CP}}, \Omega_b^{\text{EV}}) \min(P_b^{\text{CP,max}}, P_b^{\text{EV,max}}) \\ 0 \le P_{b,t}^{\text{d}} \le \xi_{b,t}^{\text{d}} \min(\Omega_b^{\text{CP}}, \Omega_b^{\text{EV}}) \min(P_b^{\text{CP,max}}, P_b^{\text{EV,max}}) \\ \xi_{b,t}^{\text{c}} + \xi_{b,t}^{\text{d}} = 1,\ 0 \le \left|Q_{b,t}\right| \le \min(\Omega_b^{\text{CP}}, \Omega_b^{\text{EV}}) Q_b^{\text{CP,max}} \\ E_{b,t+1} = E_{b,t} + \eta_{\text{B}} \cdot P_{b,t}^{\text{c}} \Delta t - P_{b,t}^{\text{d}} \Delta t / \eta_{\text{B}} \\ S_{\min}^{\text{BP}} \Omega_b^{\text{BP}} E_b^{\text{BP,rate}} \le E_{b,t} \le S_{\max}^{\text{BP}} \Omega_b^{\text{BP}} E_b^{\text{BP,rate}} \end{cases} \tag{3}$$

式中：$\xi_{b,t}^{\text{c}}$ 和 $\xi_{b,t}^{\text{d}}$ 分别为 t 时段 EV-RB b 的充放电状态变量；Ω_b^{CP}、Ω_b^{EV} 和 Ω_b^{BP} 分别为 EV-RB b 处的充电桩数目、可借用汽车数目及预置电池块数目；$P_b^{\text{CP,max}}$ 和 $Q_b^{\text{CP,max}}$ 分别为 EV-RB b 处的充电桩有功、无功功率反送上限；$P_b^{\text{EV,max}}$ 为 EV-RB b 处可借用汽车能够输出的有功功率上限(一般而言，$P_b^{\text{EV,max}}$ 要远大于 $P_b^{\text{CP,max}}$)；$Q_{b,t}$ 和 $E_{b,t}$ 分别为 t 时段 EV-RB b 输出的无功功率及内部所含的能量；η_{B} 为 EV-RBs 的充放电效率；Δt 为单位调度时长，本文取为 1 h；$S_{\max}^{\text{BP}}$ 和 $S_{\min}^{\text{BP}}$ 分别为电池块的荷电状态(state of charge，SOC)上下限；$E_b^{\text{BP,rate}}$ 为 EV-RB b 处电池块的单位容量。

此外，由于逆变器在提供无功时，其内部电流会引发损耗，为保障 EV-RBs 紧急电源的高效运行，将其功率因数限制在一定范围内：

$$\left|Q_{b,t}\right| \le (P_{b,t}^{\text{c}} + P_{b,t}^{\text{d}}) \tan\varphi \tag{4}$$

式中：φ 为逆变器的功率因数角。

2 DNs 多类型应急资源双层优化配置模型

2.1 模型框架

结合上章所述 EV-RBs 用作灾后紧急电源方案，本文进一步建立了面向 DNs 韧性提升的多类型应急资源双层优化配置模型，其结构如图 2 所示。其中，上层模型以规划期内系统总体经济投入最小为目标函数，决策线路加固的数目及位置、建设 MESSs 的数目及容量、重点区域预置 EV-RBs 紧急电源的数目及容量；下层模型基于上层给定的配置方案和生成的典型源荷出力及灾害破坏场景，以系统运行成本最低为目标函数，决策网络重构状态、上述 3 种应急资源的调度策略和 DNs 已有燃气轮机、DGs、SESSs 的出力计划，并将相应的运行成本反馈给上层。此时，上层模型将下层传递的成本结果纳入自身目标函数，计算系统总体经济投入并进行对比优化，探索新的应急资源配置方案。上、下两层模型反复迭代，直至在满足约束条件的前提下，获得线路加固、MESSs 及 EV-RBs 紧急电源的最优配置结果。

2.2 上层应急资源决策模型

2.2.1 目标函数

上层应急资源决策模型的目标函数为规划期内系统总体经济投入最小，具体包括 3 种应急资源的安装成本、置换成本、残值回收结果、年维护成本和灾害场景下 DNs 的年运行成本，如式(5)所示。

$$\min\left(\frac{\zeta(1+\zeta)^{T_{\text{LR}}}}{(1+\zeta)^{T_{\text{LR}}}-1}(C_{\text{ins}} + C_{\text{rep}} - C_{\text{rec}}) + C_{\text{om}} + C_{\text{op}}\right) \tag{5}$$

$$\begin{cases} C_{\text{ins}} = C_{\text{ins}}^{\text{LR}} \Omega_{\text{LR}} + \sum_{a\in A} C_{\text{ins},a}^{\text{MESS}} \Omega_a^{\text{MESS}} + \sum_{k\in K} C_{\text{ins},k}^{\text{RB}} \Omega_k^{\text{RB}} \\ C_{\text{rep}} = \sum_{r_{\text{MESS}}=1}^{\rho_{\text{MESS}}} \sum_{a\in A} \frac{1}{(1+\zeta)^{r_{\text{MESS}} T_{\text{MESS}}}} C_{\text{ins},a}^{\text{MESS}} \Omega_a^{\text{MESS}} + \\ \qquad \sum_{r_{\text{RB}}=1}^{\rho_{\text{RB}}} \sum_{k\in K} \frac{1}{(1+\zeta)^{r_{\text{RB}} T_{\text{RB}}}} C_{\text{ins},k}^{\text{RB}} \Omega_k^{\text{RB}} \\ C_{\text{rec}} = \frac{((\rho_{\text{MESS}}+1)T_{\text{MESS}} - T_{\text{LR}})}{T_{\text{MESS}}(1+\zeta)^{T_{\text{MESS}}}} \sum_{a\in A} C_{\text{ins},a}^{\text{MESS}} \Omega_a^{\text{MESS}} + \\ \qquad \frac{((\rho_{\text{RB}}+1)T_{\text{RB}} - T_{\text{LR}})}{T_{\text{RB}}(1+\zeta)^{T_{\text{RB}}}} \sum_{k\in K} C_{\text{ins},k}^{\text{RB}} \Omega_k^{\text{RB}} \\ C_{\text{om}} = C_{\text{om}}^{\text{LR}} \Omega_{\text{LR}} + C_{\text{om}}^{\text{MESS}} \sum_{a\in A} \Omega_a^{\text{MESS}} + C_{\text{om}}^{\text{RB}} \sum_{k\in K} \Omega_k^{\text{RB}} \end{cases} \tag{6}$$

$$\begin{cases} \rho_{\text{MESS}} = \left\lceil \frac{T_{\text{LR}}}{T_{\text{MESS}}} \right\rceil - 1 \\ \rho_{\text{RB}} = \left\lceil \frac{T_{\text{LR}}}{T_{\text{RB}}} \right\rceil - 1 \end{cases} \tag{7}$$

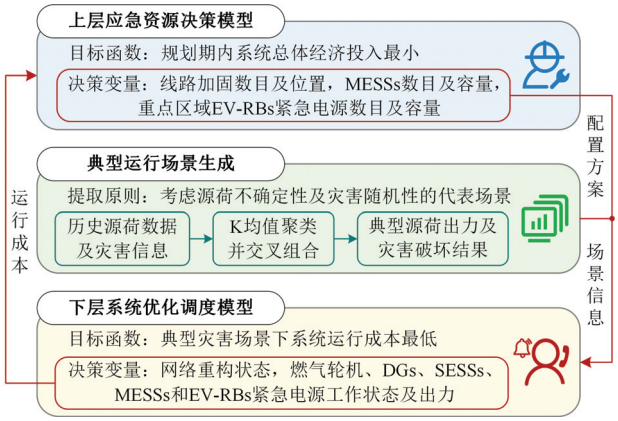


图 2 双层模型结构

Fig.2 Structure of the bi-layer model

式中：ζ 为贴现率，本文取为 0.08；T_{LR}、T_{MESS} 和 T_{RB} 分别为被加固线路、MESSs 和 EV-RBs 的寿命周期；C_{ins}、C_{rep}、C_{rec} 和 C_{om} 分别为应急资源的安装成本、置换成本、残值回收结果和年维护成本；C_{op} 为灾害场景下 DNs 的年运行成本，由下层模型反馈获得；$C_{\mathrm{ins}}^{\mathrm{LR}}$ 为单条线路加固成本；Ω_{LR} 为线路加固的数目；A 和 K 分别为可供选择的 MESSs 及 EV-RBs 类别集合；$C_{\mathrm{ins},a}^{\mathrm{MESS}}$ 和 Ω_a^{MESS} 分别为第 a 类 MESS 的单台安装成本及安装数目，类似地，$C_{\mathrm{ins},k}^{\mathrm{RB}}$ 和 Ω_k^{RB} 分别为第 k 类 EV-RB 的单台安装成本及安装数量；$C_{\mathrm{om}}^{\mathrm{LR}}$ 和 $C_{\mathrm{om}}^{\mathrm{MESS}}$ 分别为被加固线路及 MESSs 的单位维护成本；$\lceil\bullet\rceil$ 表示向上取整。

2.2.2 约束条件

为避免灾害场景下系统出现应急资源短缺或闲置问题，设定以下安装数目约束：

$$\begin{cases} \Omega_{\mathrm{LR}}^{\min} \le \Omega_{\mathrm{LR}} \le \Omega_{\mathrm{LR}}^{\max} \\ \Omega_{\mathrm{MESS}}^{\min} \le \sum\limits_{a\in A} \Omega_a^{\mathrm{MESS}} \le \Omega_{\mathrm{MESS}}^{\max} \\ \Omega_{\mathrm{RB}}^{\min} \le \sum\limits_{k\in K} \Omega_k^{\mathrm{RB}} \le \Omega_{\mathrm{RB}}^{\max} \\ \Omega_a^{\mathrm{MESS,min}} \le \Omega_a^{\mathrm{MESS}} \le \Omega_a^{\mathrm{MESS,max}} \\ \Omega_k^{\mathrm{RB,min}} \le \Omega_k^{\mathrm{RB}} \le \Omega_k^{\mathrm{RB,max}} \end{cases} \tag{8}$$

式中：$\Omega_{\mathrm{LR}}^{\max}$、$\Omega_{\mathrm{LR}}^{\min}$、$\Omega_{\mathrm{MESS}}^{\max}$、$\Omega_{\mathrm{MESS}}^{\min}$、$\Omega_{\mathrm{RB}}^{\max}$ 和 $\Omega_{\mathrm{RB}}^{\min}$ 分别为线路加固、MESSs 及 EV-RBs 的总体安装数目上下限；$\Omega_a^{\mathrm{MESS,max}}$、$\Omega_a^{\mathrm{MESS,min}}$、$\Omega_k^{\mathrm{RB,max}}$ 和 $\Omega_k^{\mathrm{RB,min}}$ 分别为 MESSs 及 EV-RBs 的分类安装数目上下限。

2.3 下层系统优化调度模型

2.3.1 目标函数

下层系统优化调度模型的目标函数如式(9)所示，具体包括失负荷惩罚成本、DGs 弃电惩罚成本、向上级电网购电成本、燃气轮机燃料成本、EV-RBs 损耗成本、储能装置运行成本以及网损成本。

$$C_{\mathrm{op}} = \min \sum_{z\in Z} \kappa_z \sum_{t\in T} \left(\begin{array}{l} \sum\limits_{n\in N} \delta_n P_{n,t}^{\mathrm{shed}} + \sum\limits_{j\in J} \chi (P_{j,t}^{\mathrm{G,f}} - P_{j,t}^{\mathrm{G}}) + \\ \lambda_t^{\mathrm{grid}} P_t^{\mathrm{grid}} + \sum\limits_{i\in I} \alpha_i P_{i,t}^{\mathrm{G}} + C_{\mathrm{op},t}^{\mathrm{RB}} + \\ \sum\limits_{m\in M} (w_{\mathrm{m}} (P_{m,t}^{\mathrm{c}} + P_{m,t}^{\mathrm{d}}) + \gamma v_{m,t}) + \\ \sum\limits_{s\in S} w_{\mathrm{s}} (P_{s,t}^{\mathrm{c}} + P_{s,t}^{\mathrm{d}}) + \beta \sum\limits_{l\in L} \left| P_{l,t} \right| \end{array} \right) \tag{9}$$

式中：Z、T、N、J、I、M、S 和 L 分别为典型灾害场景、紧急调度时段、网络节点、DGs、燃气轮机、MESSs、SESSs 和线路对应的集合；κ_z 为第 z 个典型灾害场景出现的概率；δ_n 为节点 n 的停电惩罚成本系数，考虑到灾害场景下应当以负荷保供为主，经济调度为辅，因此该系数的取值较大，从而和后续电网运行成本进行区分；$P_{n,t}^{\mathrm{shed}}$ 为 t 时段节点 n 的有功失负荷量；χ 为 DGs 弃电惩罚成本系数；$P_{j,t}^{\mathrm{G,f}}$ 和 $P_{j,t}^{\mathrm{G}}$ 分别为 t 时段 DG j 的预测功率及实际调度功率；$\lambda_t^{\mathrm{grid}}$ 为 t 时段的电价；P_t^{grid} 为 t 时段 DNs 向上级电网的购电功率；α_i 为燃气轮机 i 的燃料成本系数；$P_{i,t}^{\mathrm{G}}$ 为 t 时段燃气轮机 i 的有功出力；w_{m} 和 w_{s} 分别为 MESSs 和 SESSs 的充放电成本系数；$P_{m,t}^{\mathrm{c}}$、$P_{m,t}^{\mathrm{d}}$、$P_{s,t}^{\mathrm{c}}$ 和 $P_{s,t}^{\mathrm{d}}$ 分别为 t 时段 MESS m 和 SESS s 的充放电功率；γ 为 MESSs 的移动成本系数；$v_{m,t}$ 为 t 时段 MESS m 的移动标志变量；β 为网损成本系数；$P_{l,t}$ 为 t 时段线路 l 上的有功功率。

2.3.2 约束条件

1）潮流约束

本文参考文献[27]，采用线性化的交流潮流：

$$\begin{cases} P_{l,t} = G_l (V_{n|E(n)=l,t} - V_{n|I(n)=l,t}) - \\ \qquad B_l (\theta_{n|E(n)=l,t} - \theta_{n|I(n)=l,t}) \\ Q_{l,t} = -B_l (V_{n|E(n)=l,t} - V_{n|I(n)=l,t}) - \\ \qquad G_l (\theta_{n|E(n)=l,t} - \theta_{n|I(n)=l,t}) \end{cases} \tag{10}$$

$$\begin{cases} -u_{l,t} P_l^{\max} \le P_{l,t} \le u_{l,t} P_l^{\max} \\ -u_{l,t} Q_l^{\max} \le Q_{l,t} \le u_{l,t} Q_l^{\max} \end{cases} \tag{11}$$

式中：$Q_{l,t}$ 为 t 时段线路 l 上的无功功率；G_l 和 B_l 分别为线路 l 的电导和电纳；$V_{n,t}$ 和 $\theta_{n,t}$ 分别为 t 时段节点 n 的电压幅值和相角；$I(n)$ 和 $E(n)$ 分别为节点 n 的进、出线；$u_{l,t}$ 为 t 时段线路 l 的健康状态变量，

与各典型场景下的灾害破坏结果有关，需要特别说明的是，本文参考文献[5]，认为被灾害破坏的线路在整个调度过程中保持为受损状态(即 $u_{l,t}=0$)，而已加固的线路则不受灾害影响，始终处于健康运行状态(即 $u_{l,t}=1$)；$P_l^{\max}$ 和 $Q_l^{\max}$ 分别为线路 l 的有功和无功功率上限。

2）储能装置运行约束

$$\begin{cases} 0\le P_{m,t}^{\mathrm{c}}\le \xi_{m,t}^{\mathrm{c}}P_m^{\max},\ 0\le P_{m,t}^{\mathrm{d}}\le \xi_{m,t}^{\mathrm{d}}P_m^{\max} \\ \xi_{m,t}^{\mathrm{c}}+\xi_{m,t}^{\mathrm{d}}=1,\ 0\le \left|Q_{m,t}\right|\le Q_m^{\max} \\ E_{m,t+1}=E_{m,t}+\eta_{\mathrm{M}}\cdot P_{m,t}^{\mathrm{c}}\Delta t-P_{m,t}^{\mathrm{d}}\Delta t/\eta_{\mathrm{M}} \\ S_{\min}E_m^{\mathrm{rate}}\le E_{m,t}\le S_{\max}E_m^{\mathrm{rate}} \\ \sum\limits_{n\in N_{\mathrm{CM}}}\left|u_{m,n,t}-u_{m,n,t-1}\right|/2=v_{m,t} \\ \sum\limits_{t\in T}v_{m,t}\le \Omega_{\mathrm{trans}}^{\max},\ \sum\limits_{n\in N_{\mathrm{CM}}}u_{m,n,t}=1,\ \sum\limits_{m\in M}u_{m,n,t}\le 1 \end{cases} \tag{12}$$

$$\begin{cases} 0\le P_{s,t}^{\mathrm{c}}\le \xi_{s,t}^{\mathrm{c}}P_s^{\max},\ 0\le P_{s,t}^{\mathrm{d}}\le \xi_{s,t}^{\mathrm{d}}P_s^{\max} \\ \xi_{s,t}^{\mathrm{c}}+\xi_{s,t}^{\mathrm{d}}=1,\ 0\le \left|Q_{s,t}\right|\le Q_s^{\max} \\ E_{s,t+1}=E_{s,t}+\eta_{\mathrm{S}}\cdot P_{s,t}^{\mathrm{c}}\Delta t-P_{s,t}^{\mathrm{d}}\Delta t/\eta_{\mathrm{S}} \\ S_{\min}E_s^{\mathrm{rate}}\le E_{s,t}\le S_{\max}E_s^{\mathrm{rate}} \end{cases} \tag{13}$$

式中：$\xi_{m,t}^{\mathrm{c}}$、$\xi_{m,t}^{\mathrm{d}}$、$\xi_{s,t}^{\mathrm{c}}$ 和 $\xi_{s,t}^{\mathrm{d}}$ 分别为 t 时段 M_m^{ESS}、SESS s 的充放电状态变量；$P_m^{\max}$、$Q_m^{\max}$、$P_s^{\max}$ 和 $Q_s^{\max}$ 分别为 M_m^{ESS}、S_s^{ESS} 的有功、无功出力上限；$Q_{m,t}$ 和 $Q_{s,t}$ 分别为 t 时段 MESS m、SESS s 的无功出力；$E_{m,t}$ 和 $E_{s,t}$ 分别为 t 时段 M_m^{ESS}、S_s^{ESS} 所含的能量；η_{M} 和 η_{S} 分别为 MESSs 和 SESSs 的充放电效率；$S_{\max}$ 和 $S_{\min}$ 分别为储能装置的 SOC 上下限；E_m^{rate} 和 E_s^{rate} 分别为 MESS m、SESS s 的额定容量；N_{CM} 为 MESSs 可接入节点集合；$u_{m,n,t}$ 为 t 时段 MESS m 与节点 n 的连接状态变量；$\Omega_{\mathrm{trans}}^{\max}$ 为 MESSs 的移动次数上限。一般而言，DNs 供电半径不超过 10 km，因此任意两个可接入节点间 MESSs 的移动时长不会超过 20 min(按移动速度 40 km/h、拆卸时间 2 min 计算)，即便考虑灾害造成的道路拥堵，移动时间通常也在 30 min 左右[28]，小于设定的单位调度时长，且本文研究应急资源的优化配置问题，可对调度过程作适当简化，因此式(12)中近似忽略了 MESSs 的移动时间[11]。

3）其余系统运行约束

其余系统运行约束主要包括：燃气轮机运行约束、DGs 运行约束、功率平衡约束、电压约束、失负荷量约束、DNs 辐射状拓扑约束等，可参见文献[5]和[12]，在此不再赘述。此外，还需要计及式(3)、(4)所示的 EV-RBs 运行约束。

2.4 求解方法

粒子群优化(particle swarm optimization，PSO)是一种根据鸟群捕食行为开发的概率型算法，具有操作简单、鲁棒性强、收敛速度快等优点，已被广泛应用于电力系统复杂问题的求解过程当中，展现出了较好的全局搜索能力和并行处理能力，因此本文采用改进的权重递减 PSO 算法求解上层模型。在上层模型生成应急资源配置方案后，下层模型将转变为混合整数线性规划问题，可借助 YALMIP 调用 Gurobi 9.0.1 进行求解。详细的求解流程如附图 A1 所示。

此外，本文根据 DNs 历史源荷数据和灾害信息，借助 K 均值聚类算法生成典型运行场景，用于求解下层模型，获取灾害发生情况下 DNs 的年运行成本。为得出一种基本适用于所有极端灾害的应急资源储备方案，在此过程中，本文并未区分具体的灾害类型，也没有对灾害的破坏过程做过多考量，而是仅从破坏结果出发，开展有关典型场景的生成工作。由文献[29]可知，因极端事件导致 DNs 出现 5 条以上线路受损的概率极低，为保障模型的鲁棒性同时简化计算过程，本文仅分析 5 条线路退出运行的情况，更高阶的极端事件可类似进行建模，不再赘述。

3 算例分析

3.1 参数设置

上层模型所采用的应急资源寿命周期、功率容量、成本系数及安装限值等如附表 A1 所示，其中线路加固相关参数取自文献[30]，MESSs 相关参数来源于文献[8]和[31]，EV-RBs 相关参数则由比亚迪、蔚来等公司官网发布的数据综合而定。此外，表中线路加固和 MESSs 的安装数目上下限是针对系统整体而言的，不区分节点，而 EV-RBs 的安装数目限值面向的则是单位节点。

下层模型基于改进的 IEEE 33 节点系统进行仿真分析，其拓扑结构如附图 A2 所示。网络中共包含 6 台燃气轮机、8 台 DGs 和两个 SESSs，其参数分别如附表 A2—A4 所示。节点 4、8、12、15、18、29、31 和 32 处接有重要负荷，为保障其供电可靠性，在上述节点处都设有 MESSs 充放电接口或 EV-RBs 紧急电源预置场所，并将其停电惩罚成本设为 1 000 元/kW，是普通负荷停电惩罚成本的 50

倍；此外，节点 22 和 23 处设有大型停车场，同样具备 EV-RBs 紧急电源预置能力。在不失一般性的前提下，假定灾害发生后各 EV-RBs 预置节点处可借用的汽车数目分别为 5、6、5、7、4，且其输出能力均正常(远大于充电桩的功率返送上限)，而充电桩的数目相对充足且额定有功、无功功率返送能力统一为 25 kW 和 20 kvar。线路的有功、无功功率限值设为 5 000 kW 和 4 500 kvar，各节点电压上下限取为 1.1 和 0.9 倍的标幺值。所有储能装置的 SOC 初始值和上下限均设为 0.5、0.9 和 0.1，充放电效率取为 90%；考虑到 EV-RBs 紧急电源一般处于满电备用状态，且其出厂标准相对较高，具有一定的深度充放电能力，将其上述 4 者对应的值分别取为 0.95、0.98、0.02 和 90%。同时，将 EV-RBs 的损耗成本系数取为 0.04 元/kWh，SESSs 和 MESSs 的充放电成本系数分别设为 0.04 和 0.06 元/kWh，MESSs 的移动成本系数为 4 元/次，移动次数上限为 4，网损成本系数为 0.005 元/kWh，DGs 弃电惩罚成本系数则为 10 元/kWh。各时段 DNs 购电电价参见附表 A5。

以 2019 年我国某实际配电网 8 台 DGs 出力及全网负荷数据为例，进行 K 均值聚类，并借助 CH(+) 指标确定最优聚类个数，最终得到两种典型 DG 出力场景及两条典型负荷需求曲线，分别如附图 A3 和 A4 所示。类似地，将该电网历史受灾信息按照地理位置映射到所用改进的 IEEE 33 节点系统中，并进行统计和聚类，可获得 5 种典型灾害破坏结果，如附表 A6 所示。为保障最终应急资源配置策略的合理性，将所得源荷曲线和灾害破坏结果进行交叉组合，共计获得 20 种典型场景，用于下层模型的求解过程。假定各场景的年度发生概率均一致，为 0.05%。

3.2 结果分析

3.2.1 不同配置方法对比分析

为验证所提策略的优越性，设定了以下 4 种配置方法进行对比：方法 1，同时进行线路加固、MESSs 和 EV-RBs 3 种应急资源优化配置，即本文所研究的方法；方法 2，不采取线路加固措施，仅进行 MESSs 和 EV-RBs 紧急电源的优化配置；方法 3，不考虑 MESSs 参与，仅进行线路加固和 EV-RBs 紧急电源优化配置；方法 4，不考虑 EV-RBs 紧急电源的参与，仅进行线路加固和 MESSs 优化配置。各方法对应的应急资源配置结果如表 2 所示，其中，被加固线路给出的是首、末节点编号，MESSs 给出的是分类别的配置数目，而 EV-RBs 则给出的是分类别分节点的预置结果，例如，方法 2 中配置的 3 类 MESSs 分别为 1、2 和 1 台，节点 8、15、22、23 和 31 处预置的第 2 类 EV-RBs 的数目依次为 0、3、0、1、4 台。表 3 列举了各方法对应的系统成本情况，需要特别说明的是，由于 3 种应急资源的寿命周期可进行整数倍对齐，因此各方法下的残值回收结果均为 0，表中并未对该项进行展示。

由表 2 可知，在方法 1、3、4 中，系统的选择较为相似，总是倾向于加固线路 1-2、27-28 和 30-31。这主要是因为在资源有限的前提下，必须对故障最为频繁或地位最为重要的线路进行处理，才能最大限度地提升 DNs 的抗灾能力。在附表 A6 所示的典型灾害破坏结果当中，线路 1-2、15-16 和 30-31 的故障频次最高，构成了待加固线路的初步候选集合。其中，线路 1-2 位于 DNs 与上级电网的连接处，一旦故障将导致系统整体转入孤岛运行，失去主要的电力来源，因而重要性较高，必须进行加固处理。而线路 15-16 和 30-31 两者之间存在联络线 18-33，任何一者退出运行后，DNs 都可通过另一者和该联络线实现负荷转供，因此只需加固其中之一即可，最终系统选择对故障更为频繁的线路 30-31 进行处理。在此背景下，最后一个加固额度顺延至故障频次稍低的线路 3-23、25-29、27-28 和 29-30 当中，由于线路 27-28 受损时导致的失负荷量最高，因此

表 2 各方法对应的应急资源配置结果

Table 2 Emergency resource allocation results by method

资源	类别	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
线路加固	—	1-2, 27-28, 30-31	—	1-2, 27-28, 30-31	1-2, 27-28, 30-31
MESSs	1	0	1	—	1
	2	2	2	—	2
	3	1	1	—	1
EV-RBs	1	0, 0, 0, 0, 6	6, 6, 6, 6, 6	0, 0, 0, 0, 6	—
	2	0, 0, 0, 0, 4	0, 3, 0, 1, 4	0, 0, 0, 0, 4	—

表 3 各方法对应的系统成本对比

Table 3 Comparison of system costs by different methods

成本类别	方法 1	方法 2	方法 3	方法 4
安装成本/元	$5.200\,0\times10^6$	$8.200\,0\times10^6$	$2.600\,0\times10^6$	$4.440\,0\times10^6$
置换成本/元	$2.203\,5\times10^6$	$3.759\,5\times10^6$	$4.413\,4\times10^5$	$2.195\,9\times10^6$
年维护成本/元	$2.600\,0\times10^4$	$8.200\,0\times10^4$	$2.150\,0\times10^4$	$7.500\,0\times10^3$
年运行成本/元	$3.060\,1\times10^6$	$1.449\,1\times10^7$	$6.587\,4\times10^6$	$3.306\,3\times10^6$
综合成本/元	$3.743\,7\times10^6$	$1.563\,6\times10^7$	$6.879\,0\times10^6$	$3.903\,2\times10^6$

系统的决策结果为加固线路 1-2、27-28 和 30-31，从而有效提升灾害场景下的韧性水平。

此外，还可以发现，在方法 1 中，仅节点 31 进行了大量的 EV-RBs 紧急电源配置。这主要是因为通过线路加固手段，系统可以有效保障节点 4、8、12、15 和 29 处重要负荷的供电，而节点 18、31 和 32 在部分典型灾害破坏结果下会陷入孤岛运行。此时，虽然孤岛中存在两个 MESSs 接口以供使用，但只能就近保全节点 18 和 32 处的负荷，无法进一步为节点 31 提供支援；在此背景下，即便借助周围的燃气轮机和 SESSs，节点 31 也存在部分功率缺额无法满足，因此必须进行 EV-RBs 紧急电源配置。类似地，在方法 3 中，MESSs 进一步退出运行，孤岛中的重要负荷功率缺额更大，但由于节点 31 处的 EV-RBs 配置数目已达上限，而远端的其余节点又无法提供功率支撑，受限于成本因素不会安装 EV-RBs，因此其最终配置结果和方法 1 类似。

由表 3 可知，方法 2 对应的系统综合成本最高，这是因为不采取线路加固措施时，灾害场景下 DNs 受损严重，功率缺额较大，同时受 MESSs 安装数目和 EV-RBs 成本因素限制，系统难以配置足够的应急资源以提供紧急功率支撑，因此失负荷量较大，从而导致年运行成本处于较高水平，综合成本也最高。类似地，方法 3 下系统的总体经济投入也较大，这是因为不考虑 MESSs 参与时，DNs 失去了具有灵活移动能力的“电能搬运工”，在灾害导致的断线场景下，无法实现电力富集区和负荷密集区之间的功率传输，只能借助 SESSs 和 EV-RBs 进行负荷保供及 DGs 就地消纳；但受成本因素和节点限制，系统仅会配置少量的 EV-RBs，仍不足以弥补大部分的电力缺额，因此年运行成本较高，总体经济投入也相应较高。相比之下，方法 4 的综合成本有所下降，这是因为该方法不考虑 EV-RBs 紧急电源的参与，避免了该资源较为高昂的安装成本及置换成本，同时最大限度地进行了线路加固和 MESSs 配置，在灾害发生时可以有效降低系统的受损程度，并实现负荷保供；但由于 MESSs 可接入节点有限，无法实现全网范围的紧急功率支撑，仍然会出现部分失负荷，致使该方法下的年运行成本稍高。整体而言，方法 1 的综合成本最低，这是因为它能够充分利用线路加固以提升 DNs 的灾害防御能力，并发挥 MESSs 的移动性能和 EV-RBs 紧急电源的备用性能，实现负荷的灾后恢复；通过 3 者的优势互补，有效避免了冗余的资源配置，降低了系统总体经济投入，同时切实改善了 DNs 韧性。

3.2.2 最优配置结果性能分析

为体现所得最优配置结果的有效性，本节首先统计分析了不同典型场景下 DNs 的负荷恢复情况，如图 3 所示。由图可知，通过 3 类应急资源的优化配置和有效协作，所有典型场景下系统的重要负荷均得到了充分恢复，普通负荷的恢复率也达到了 50%以上。其中，部分场景下的负荷恢复比例较低，主要与网络受损情况、DGs 出力能力及负荷需求量有关。

进一步地，以失负荷最为严重的 6 号典型场景为例，分析 DNs 多类型资源的运行情况。该场景下系统的源荷曲线分别取附图 A3(a)及附图 A4(a)，破坏结果取附表 A6 编号 2，拓扑结构如附图 A5 所示。从图中可以看出，此时 DNs 受损较为严重，形成了两个孤岛运行的区域电网，而其余部分仍与上游变电站保持连接，可以正常运行。为凸显多类型资源的紧急功率支撑能力，图 4 重点对两个孤岛电网的调度计划进行了展示。由图可知，灾害发生后，系统将充分利用燃气轮机和 DGs 进行发电，但仍会出现部分功率缺额，此时储能装置和 EV-RBs 发挥了较大作用，帮助孤岛电网进一步恢复了 23.62%的负荷，避免了高昂的惩罚成本，同时在早、晚高峰时期有效提升了系统的供电能力。

图 5 还给出了该典型场景下 MESSs 的节点连接情况。由图可知，3 台 MESSs 交替在 4 号和 12 号节点进行充电，充满后将前往 18、29 和 32 号节点进行释放，从而实现正常运行区域和孤岛电网之间的能量传输，降低系统整体失负荷量。此外，综合图 4、图 5 和附图 A5 可知，节点 31 处不存在 MESSs 接口，因此无法利用 MESSs 进行功率支撑；同时，其余节点接入的 MESSs 在供应本地负荷后，

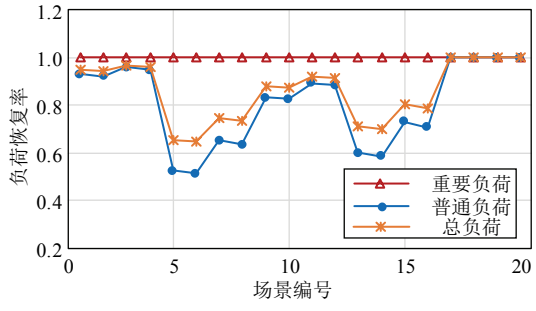


图 3 各典型场景下的负荷恢复比例

Fig.3 The load restoration ratio of each typical scenario

出力所剩无几，难以进一步为节点 31 提供援助。此时体现了 EV-RBs 紧急电源的重要性，通过在节点 31 预置 EV-RBs，可以在灾害发生后有效保障该处重要负荷的电力供应，从而避免较高的惩罚成本，提升系统的韧性水平。

3.2.3　可用 EVs(或充电桩)数目敏感性分析

考虑到 EV-RBs 用作紧急电源时，需要借助周围闲置的 EVs 及充电桩才能构成供电回路，因此本节进一步分析可用 EVs(或充电桩)数目对资源配置结果的影响。

由式(3)可知，EV-RBs 紧急电源的出力能力存在“短板效应”，受可用 EVs 或充电桩中数量较小者的限制。为保障算例内容的连贯性，本节采用控制变量法，仅以不同可用 EVs 数目为例进行敏感性分析(同时假定充电桩的数量相对充足)，充电桩数量不足的情况可类似进行建模及研究，不再赘述。设定了以下 3 种情景进行对比：情景 1，可用的 EVs 数目分别为 5、6、5、7、4，即本文所研究的情景(与方法 1 一致)；情景 2，受限于汽车型号问题，各节点处可用 EVs 数目有所减少或出现不足，变更为 1、3、2、3、1；情景 3，各节点处可用 EVs 数目较充足，分别为 8、9、7、10、10。上述 3 种情景除对照条件外，其余参数均保持一致。

最终所得 3 种情景下的线路加固和 MESSs 配置结果均与方法 1 一致，因此表 4 仅对 EV-RBs 的配置容量和系统成本情况进行了展示。对比情景 1、2 可知，可用 EVs 数目减少后，EV-RBs 紧急电源的出力能力受限，灾害场景下难以充分释放内部存储的能量以提供支撑，此时系统只能降低其配置容量以提升经济性，但随之而来的是，系统的失负荷量增加，年运行成本有所上升，综合成本也因此不降反增。另一方面，可用 EVs 数目增加后，EV-RBs 紧急电源的调节性能更加优越，但受限于其高昂的成本因素，系统并未提升其配置容量，因此相较于情景 1，情景 3 中仅年运行成本发生了轻微下降，综合成本也随之有所降低，但变化并不显著。

整体而言，虽然 EV-RBs 紧急电源的出力受可用 EVs 及充电桩的数目限制，但对系统应急资源的配置结果影响较小。在可以预见的未来，国民 EVs 保有量和充电桩覆盖率将稳步提升，该限制会逐步解除；与此同时，电池块的成本会不断下降、充电桩的功率返送上限也会不断提高，EV-RBs 将有望作为紧急电源，强力赋能韧性 DNs 建设。

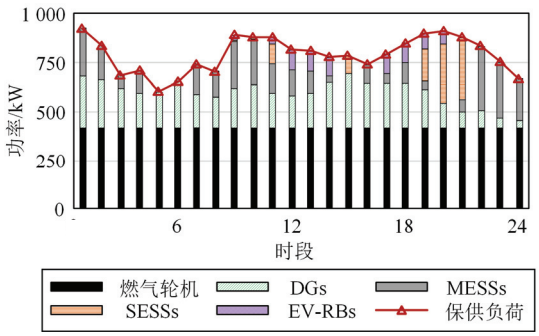


图 4　两个孤岛电网的整体资源调度结果

Fig.4　Overall resource scheduling results for the two islanded grids

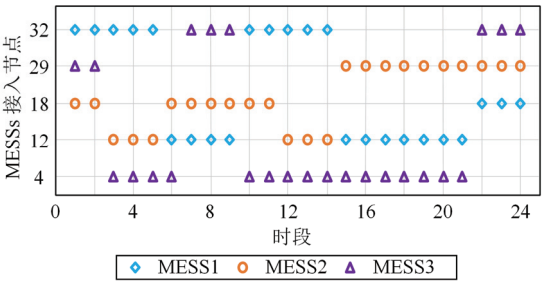


图 5　6 号典型场景下 MESSs 的节点连接情况

Fig.5　Connections of MESSs under typical scenario 6

表 4　可用 EVs 数目的影响

Table 4　Impact of the number of available EVs

参数	情景 1	情景 2	情景 3
EV-RBs 容量/kWh	850	750	850
安装成本/元	$5.200\,0\times10^6$	$5.030\,0\times10^6$	$5.200\,0\times10^6$
置换成本/元	$2.203\,5\times10^6$	$2.149\,9\times10^6$	$2.203\,5\times10^6$
年维护成本/元	$2.600\,0\times10^4$	$2.400\,0\times10^4$	$2.600\,0\times10^4$
年运行成本/元	$3.060\,1\times10^6$	$3.157\,9\times10^6$	$3.059\,9\times10^6$
综合成本/元	$3.743\,7\times10^6$	$3.819\,6\times10^6$	$3.743\,5\times10^6$

4　结论

本文提出了一种 EV-RBs 用作灾后紧急电源的新思路，并进一步建立了面向 DNs 韧性提升的多类型应急资源双层优化配置模型，通过算例分析，得出了以下结论：

1）在停电事故发生后，EV-RBs 可借助周围闲置的汽车及充电桩构成供电回路，作为分布式储能发挥 V2G 或 V2L 功能，为重要负荷提供紧急功率支撑，降低系统的失负荷量。

2）综合考虑线路加固、MESSs 和 EV-RBs 紧急电源 3 者的互补优势，进行多类型应急资源优化配置，能够在降低系统总体经济投入的同时，切实改善 DNs 韧性。

3）EV-RBs 用作紧急电源时，其出力受可用 EVs 及充电桩的数目限制，但对资源配置结果的影响较小。在可预见的未来，国民 EVs 保有量和充电桩覆盖率将稳步提升，该限制会逐步解除，从而强力赋能韧性 DNs 建设。

后续将研究 DNs 灾前防御性调度策略、灾后紧急协调调度策略和黑启动策略，从灾害全周期角度提升电力系统韧性。

附录见本刊网络版(http://hve.epri.sgcc.com.cn)。

参考文献 References

[1] 李 鹏，赵亚汝，范须露，等. 适用于规划-运行两阶段的配电网可靠性等级划分及评估方法[J]. 高电压技术，2024，50(5)：2042-2051.
LI Peng, ZHAO Yaru, FAN Xulu, et al. Reliability classification and evaluation method of distribution network suitable for planning-operation two stages[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(5): 2042-2051.

[2] 徐 岩，郭佳睿，马天祥. 考虑韧性提升的配电网故障恢复与抢修协调优化[J]. 高电压技术，2024，50(12)：5516-5528.
XU Yan, GUO Jiarui, MA Tianxiang. Coordinated optimization of fault recovery and emergency repair for distribution network considering resilience improvement[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5516-5528.

[3] 杨祺铭，李更丰，别朝红，等. 计及间歇性新能源的弹性城市电网输配电协同供电恢复方法[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2764-2774.
YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Coordinated power supply restoration method of resilient urban transmission and distribution networks considering intermittent new energy[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2764-2774.

[4] 杨 涛，周 洪，魏 凤，等. 新型电力系统下的电网安全挑战与对策研究[J]. 电力信息与通信技术，2024，22(8)：18-26.
YANG Tao, ZHOU Hong, WEI Feng, et al. Challenges and countermeasures of grid security towards a new type of power system[J]. Electric Power Information and Communication Technology, 2024, 22(8): 18-26.

[5] QU Y, XIAO Y P, WANG X L, et al. An economic incentive mechanism for resilient hardening and expansion based on the Nash bargaining theory[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(3): 5244-5258.

[6] 周士超，刘晓林，熊 展，等. 考虑韧性提升的交直流配电网线路加固和储能配置策略[J]. 上海交通大学学报，2021，55(12)：1619-1630.
ZHOU Shichao, LIU Xiaolin, XIONG Zhan, et al. Line hardening and energy storage system configuration strategies for resilience enhancement of a hybrid AC-DC distribution system[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2021, 55(12): 1619-1630.

[7] 唐雅洁，李俊豪，林 达，等. 考虑分布式光伏高效消纳与负荷损失最小的区域配电网应急资源协同配置策略[J]. 电力自动化设备，2024，44(7)：78-85.
TANG Yajie, LI Junhao, LIN Da, et al. Coordinated allocation strategy of emergency resource for regional distribution network considering distributed photovoltaic efficient absorption and minimum load loss[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 78-85.

[8] 巨云涛，周伟鹏，于宗民. 考虑移动储能车提升系统供电可靠性的配电网规划方法[J]. 电力系统保护与控制，2024，52(17)：128-138.
JU Yuntao, ZHOU Weipeng, YU Zongmin. A distribution network planning approach considering mobile energy storage vehicles to enhance system power supply reliability[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(17): 128-138.

[9] ALONSO R F, ZAMBRONI DE SOUZA A C. Resilience of active networks with optimal mobile energy storage systems management[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 217: 109152.

[10] 王睿琪，薛熙臻，张艺涵，等. 黑启动中考虑新能源不确定性的移动-固定式混合储能优化配置方法[J]. 电网技术，2024，48(10)：4031-4040.
WANG Ruiqi, XUE Xizhen, ZHANG Yihan, et al. Optimal configuration of mobile-stationary hybrid energy storage considering the uncertainty of new energy in black-start[J]. Power System Technology, 2024, 48(10): 4031-4040.

[11] SHI Q X, WAN H Y, LIU W X, et al. Preventive allocation and post-disaster cooperative dispatch of emergency mobile resources for improved distribution system resilience[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2023, 152: 109238.

[12] 李明昊，杨祺铭，李更丰，等. 台风场景下基于多种分布式资源协同的弹性配电网两阶段供电恢复策略[J]. 高电压技术，2024，50(1)：93-104.
LI Minghao, YANG Qiming, LI Gengfeng, et al. Two-stage power supply restoration strategy of resilient distribution network based on coordination of multiple distributed resources in typhoon scenario[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(1): 93-104.

[13] AHMADI S E, MARZBAND M, IKPEHAI A, et al. Optimal stochastic scheduling of plug-in electric vehicles as mobile energy storage systems for resilience enhancement of multi-agent multi-energy networked microgrids[J]. Journal of Energy Storage, 2022, 55: 105566.

[14] ERENOĞLU A K, ERDINÇ O. Real-time allocation of multi-mobile resources in integrated distribution and transportation systems for resilient electrical grid[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023, 38(2): 1108-1119.

[15] 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.

[16] 卢志刚，王文涛，张 丹，等. 基于配电网可靠性的分布式电源与充换电站协同规划[J]. 太阳能学报，2020，41(4)：348-356.
LU Zhigang, WANG Wentao, ZHANG Dan, et al. DG and EVCS collaborative planning based on distribution network reliability[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2020, 41(4): 348-356.

[17] 梁振锋，祁芙蓉，王德意，等. 考虑应急电源功能的光储充放电站配置方法研究[J]. 电网技术，2023，47(8)：3376-3384.
LIANG Zhenfeng, QI Furong, WANG Deyi, et al. Configuration of optical storage & charging and discharging power station considering emergency power function[J]. Power System Technology, 2023, 47(8): 3376-3384.

[18] HUSSAIN A, MUSILEK P. Resilience enhancement strategies for and through electric vehicles[J]. Sustainable Cities and Society, 2022, 80: 103788.

[19] EBBRECHT G, CHEN J T. Enhancing equitable resilience of urban energy systems via strategic planning of EV charging infrastructure[J]. The Electricity Journal, 2023, 36(5): 107275.

[20] 中国汽车流通协会乘用车市场信息联席分会. 【新能源】2024 年 10 月新能源汽车行业月报[EB/OL]. (2024-12-09)[2025-02-28].

http://www.cpcaauto.com/newslist. php?types=bgzl&id=1358.
China Automobile Dealers Association Passenger Vehicle Market Information Joint Branch. New energy vehicle industry monthly report for October 2024[EB/OL]. (2024-12-09)[2025-02-28]. http: //www. cpcaauto. com/newslist. php?types=bgzl&id=1358.

[21] 国家发展改革委办公厅，国家能源局综合司，工业和信息化部办公厅，等. 国家发展改革委办公厅等关于推动车网互动规模化应用试点工作的通知[EB/OL]. (2024-08-23)[2025-02-28]. https://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/202409/content_6973459. htm.
National Development and Reform Commission, National Energy Administration, Ministry of Industry and Information Technology, et al. Notice on promoting the pilot work of scale application of vehicle-network interaction[EB/OL]. (2024-08-23)[2025-02-28]. https: //www. gov. cn/zhengce/zhengceku/ 202409/content_6973459. htm.

[22] 张家美，孙 凯，李洪涛，等. 考虑光-车-氢接入的新型城市配电网规划研究综述与展望[J]. 高电压技术，2024，50(3)：1067-1079.
ZHANG Jiamei, SUN Kai, LI Hongtao, et al. Review and prospect of future city distribution networks considering the integration of PV-EV-hydrogen[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(3): 1067-1079.

[23] BABAEI M H, WONG S D. Electric vehicles in emergencies and evacuations: a review of resilience and future research directions[J]. Transportation Letters, 2025, 17(6): 1101-1113.

[24] 有驾. 3 分钟满血复活！蔚来换电服务革新传统，颠覆你的认知[EB/OL]. (2024-07-14)[2025-02-28]. https://www.yoojia.com/article/9083147109704945879. html.
Yoojia. 3 minutes to revitalize your car! The battery swapping service of NIO revolutionizes the tradition and turns your perception upside down[EB/OL]. (2024-07-14)[2025-02-28]. https: //www. yoojia. com/article/9083147109704945879. html.

[25] 北极星储能网. 宁德时代加码，换电储能东风已至[EB/OL]. (2024-12-23)[2025-02-28]. https://news.bjx.com.cn/html/20241223/1418308. shtml.
Beijixing Energy Storage Network. CATL raises the stakes, the east wind of battery swapping and energy storage has arrived[EB/OL]. (2024-12-23)[2025-02-28]. https://news.bjx.com.cn/html/20241223/1418308. shtml.

[26] 李亚伦，欧阳明高，赵争鸣. 电动汽车车能互动的充电机理、系统构型与推广路径[J]. 中国电机工程学报，2024，44(17)：6920-6939.
LI Yalun, OUYANG Minggao, ZHAO Zhengming. Charging mechanism, system configuration and promotion pathway of vehicle to grid for electric vehicles[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(17): 6920-6939.

[27] 向明旭，杨知方，余 娟，等. 配电网线性潮流模型通式及误差分析[J]. 中国电机工程学报，2021，41(6)：2053-2063.
XIANG Mingxu, YANG Zhifang, YU Juan, et al. Linear power flow model in distribution network: unified expression and error analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(6): 2053-2063.

[28] 李婧祺，王 丹，樊 华，等. 含移动式储能的主动配电网分层优化控制方法[J]. 电力系统自动化，2022，46(10)：189-198.
LI Jingqi, WANG Dan, FAN Hua, et al. Hierarchical optimal control method for active distribution network with mobile energy storage[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(10): 189-198.

[29] SHI Q X, LI F X, OLAMA M, et al. Network reconfiguration and distributed energy resource scheduling for improved distribution system resilience[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2021, 124: 106355.

[30] ZHANG H B, MA S T, DING T, et al. Multi-stage multi-zone defender-attacker-defender model for optimal resilience strategy with distribution line hardening and energy storage system deployment[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1194-1205.

[31] AHMED H M A, SINDI H F, AZZOUZ M A, et al. Stochastic multi-benefit planning of mobile energy storage in reconfigurable active distribution systems[J]. Sustainable Energy, Grids and Networks, 2023, 36: 101190.



姚福星
1998—，男，博士生
主要从事配电网优化运行、储能优化规划及运行等方面的研究工作
E-mail: yaofuxing@hust.edu.cn

YAO Fuxing
Ph.D. candidate



苗世洪(通信作者)
1963—，男，博士，教授，博导
主要从事配电网及微电网新技术、电网智能调度与自动化技术、压缩空气储能建模及应用、电力系统保护与控制等方面的研究工作
E-mail: shmiao@hust.edu.cn

MIAO Shihong
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2025-03-04 修回日期 2025-06-10 编辑 陈 蔓

附录 A

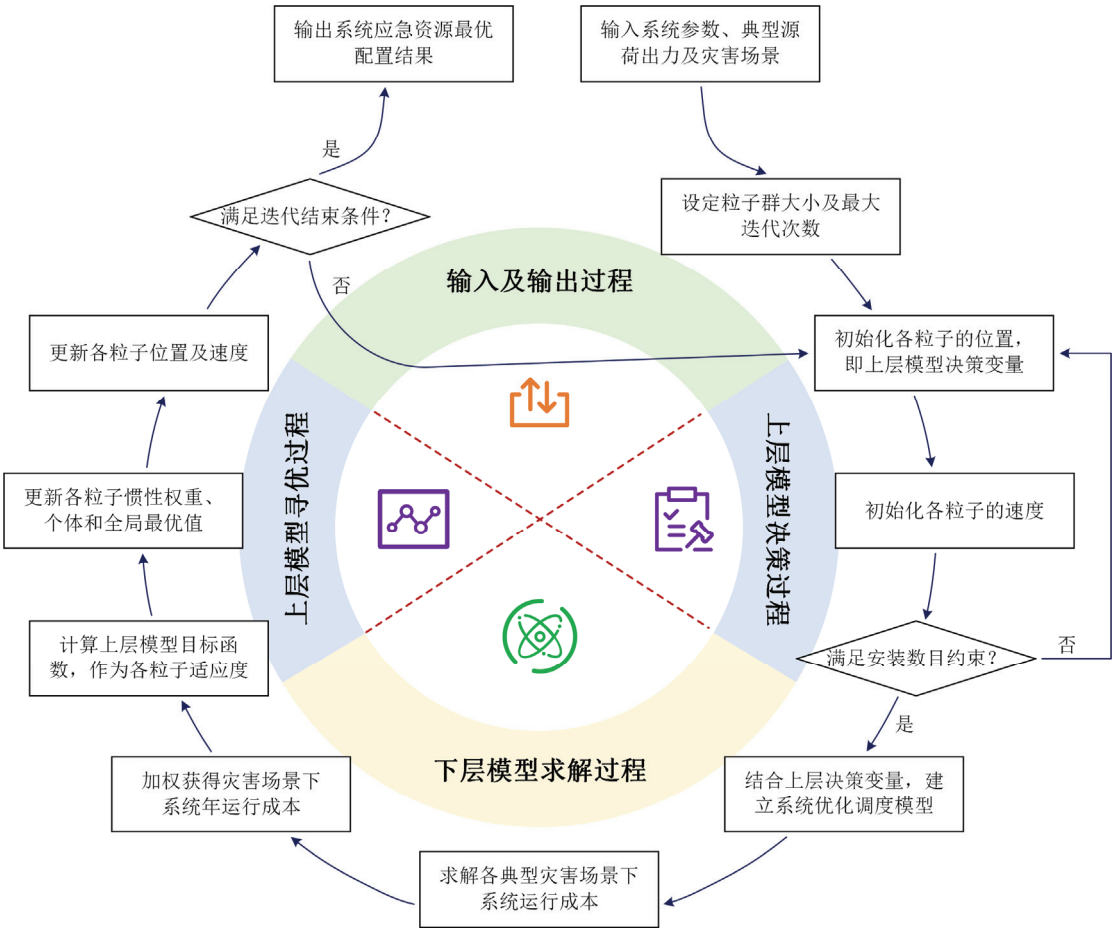


图 A1　模型求解流程

Fig.A1　Diagram of the model solving process

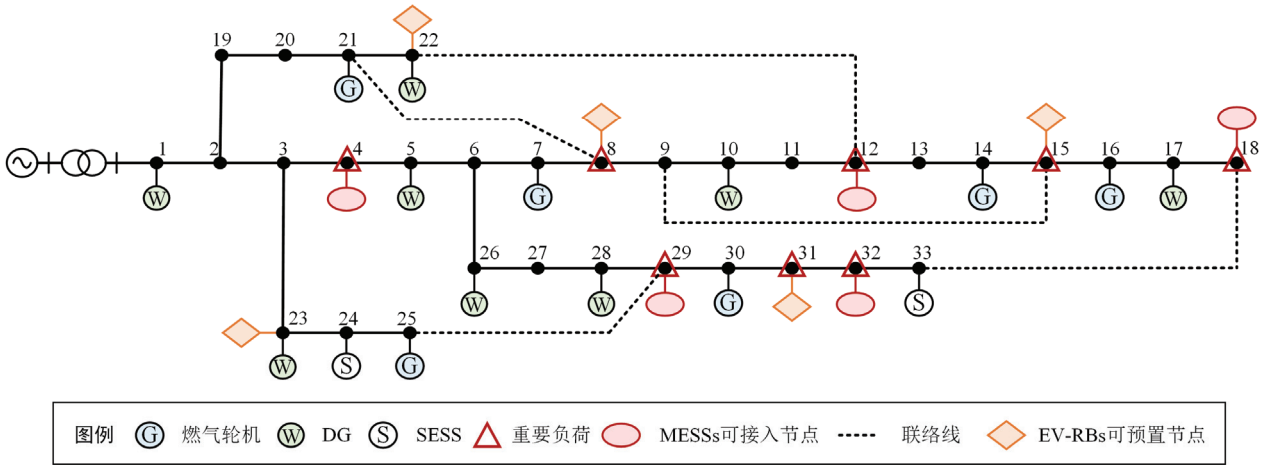


图 A2　改进的 IEEE 33 节点系统拓扑图

Fig.A2　Topology of the improved IEEE 33-node system

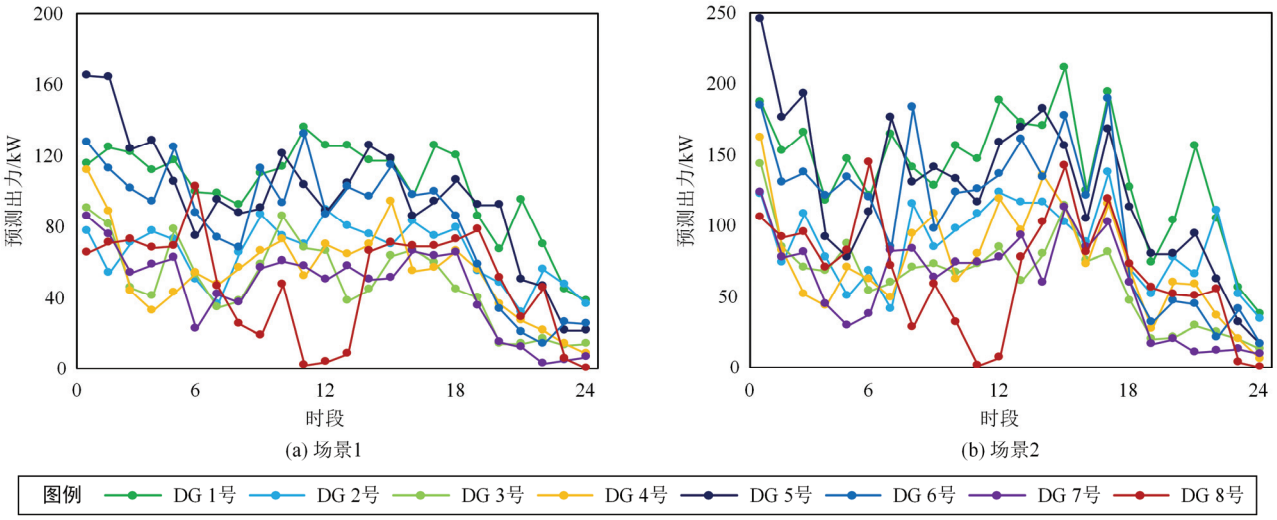


图 A3　典型 DG 出力预测曲线

Fig.A3　Typical curves of DG power prediction

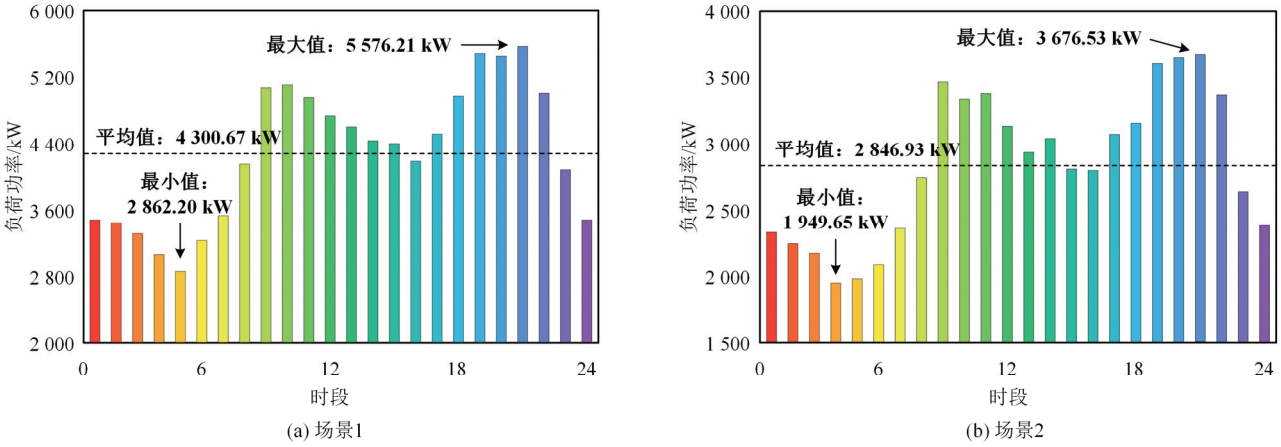


图 A4　典型负荷功率预测曲线

Fig.A4　Typical curves of load power prediction

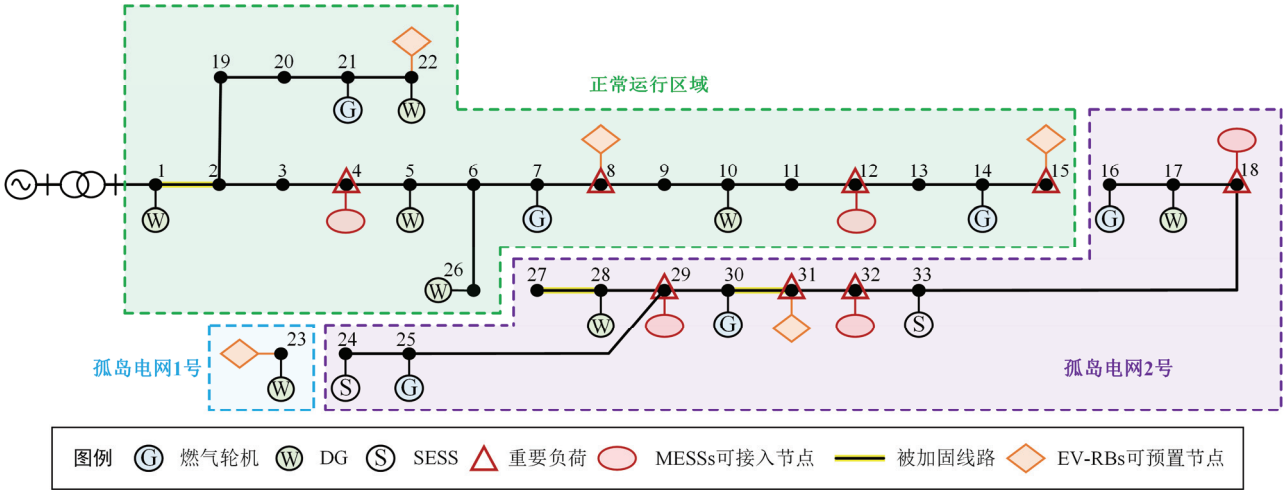


图 A5　6 号典型场景下的系统拓扑

Fig.A5　Topology of the system under Typical Scenario 6

表 A1　上层模型所需参数

Table A1　Parameters required for the upper-layer model

资源	类别	额定有功功率/kW	额定无功功率/kvar	额定容量/kWh	单位安装成本/元	单位维护成本/元	寿命周期/年	分类安装数目上下限	总体安装数目上下限
线路加固	—	—	—	—	4×10^5	500	30	—	[1, 3]
MESSs	1	120	100	400	6.4×10^5	1 500	10	[0, 3]	[1, 4]
	2	150	120	500	8×10^5			[0, 2]	
	3	180	150	650	1×10^6			[0, 1]	
EV-RBs	1	—	—	75	1.2×10^5	2 000	15	[0, 6]	[0, 10]
	2	—	—	100	1.7×10^5			[0, 4]	

表 A2　燃气轮机参数

Table A2　Parameters of gas turbines

编号	连接节点	有功上限/kW	无功上限/kvar	成本系数/(元·kWh^{-1})	编号	连接节点	有功上限/kW	无功上限/kvar	成本系数/(元·kWh^{-1})
1	7	192	150	0.68	2	14	120	90	0.6
3	16	96	70	0.66	4	21	72	60	0.7
5	25	192	120	0.72	6	30	132	100	0.64

表 A3　DG 参数

Table A3　Parameters of DGs

编号	连接节点	有功上限/kW	无功上限/kvar	编号	连接节点	有功上限/kW	无功上限/kvar
1	1	300	250	2	5	200	150
3	10	220	160	4	17	250	180
5	22	350	300	6	23	300	220
7	26	200	160	8	28	230	150

表 A4　SESS 参数

Table A4　Parameters of SESSs

编号	连接节点	有功上限/ kW	无功上限/kvar	额定容量/kWh
1	24	300	180	1 700
2	33	250	150	1 020

表 A5　分时电价

Table A5　Time share tariff

类别	时段	电价/(元·kWh^{-1})
峰	08:00—12:00, 17:00—21:00	1.2
平	12:00—17:00, 21:00—00:00	0.8
谷	00:00—08:00	0.3

表 A6　典型灾害破坏结果

Table A6　Typical disaster damage results

编号	被破坏线路
1	15-16, 2-19, 30-31, 8-21, 12-22
2	15-16, 3-23, 23-24, 26-27, 30-31
3	1-2, 16-17, 27-28, 29-30, 30-31
4	1-2, 15-16, 3-23, 29-30, 25-29
5	1-2, 17-18, 27-28, 30-31, 25-29