第 50 卷 第 1 期：93-107 高电压技术 Vol.50, No.1: 93-107
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20231091

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

李明昊[1]，杨祺铭[1]，李更丰[1]，刘达夫[1]，季陈林[2]，别朝红[1]
（1. 西安交通大学电工材料电气绝缘全国重点实验室，西安 710049;
2. 国网江苏省电力有限公司无锡供电分公司，无锡 214061）

摘　要：近年来频发的自然灾害极大威胁配电网安全运行，统筹考虑不同分布式资源特点，发挥分布式资源互补互济优势，有助于解决灾后配电网部分线路损坏、电力供应不足问题，实现电网灾后快速恢复。在电网中分布式资源种类不断丰富的背景下，本文提出一种台风场景下基于多种分布式资源协同的弹性配电网灾前及灾后两阶段供电恢复策略。首先，考虑配电网和交通网耦合的影响，灾前阶段在考虑电动汽车调度的同时，以加权失电量期望最小为目标建立移动储能和抢修队应急仓库选址模型；其次，根据以上 3 种分布式资源以及柔性负荷的灾后响应特征，将灾后阶段分为紧急功率支撑和负荷快速恢复两个过程，搭建了配电网灾后多时段恢复优化模型；然后，通过深入研究多种分布式资源的优缺点，设计了配电网两阶段供电恢复框架；最后，设计了多组算例，验证了所提方法的有效性和可行性。

关键词：极端灾害；线路抢修；移动储能；电动汽车 V2G；灾前预部署；电力系统弹性；多源协同

Two-stage Power Supply Restoration Strategy of Resilient Distribution Network Based on Coordination of Multiple Distributed Resources in Typhoon Scenario

LI Minghao[1], YANG Qiming[1], LI Gengfeng[1], LIU Dafu[1], JI Chenlin[2], BIE Zhaohong[1]
(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;
2. Wuxi Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Wuxi 214061, China)

Abstract: In recent years, frequent natural disasters have greatly threatened the safe operation of distribution network. Considering the characteristics of different distributed resources and giving full play to the complementary advantages of distributed resources are helpful to solve the problems of partial line damage and insufficient power supply in post-disaster distribution network and to realize the rapid recovery of power grid after disaster. Under the background of the continuous enrichment of distributed resources in the power grid, this paper proposes a two-stage power supply recovery strategy for resilient distribution network based on the coordination of multiple distributed resources before and after the disaster of typhoon. Firstly, the influence of the coupling of distribution network and transportation network is taken into consideration, and the location model of mobile energy storage system and repair crew emergency warehouse is established with the goal of minimizing the weighted loss of power expectation while considering the scheduling of electric vehicles in the pre-disaster stage. Secondly, according to the post-disaster response characteristics of the above three distributed resources and flexible loads, the post-disaster stage is divided into two processes, namely, emergency power support and rapid load recovery, and a multi-period post-disaster recovery optimization model of distribution network is built. Then, through in-depth study of the advantages and disadvantages of various distributed resources, a two-stage power supply recovery framework for distribution network is designed. Finally, several sets of cases are designed to verify the effectiveness and feasibility of the proposed method.

Key words: extreme disaster; first-aid repair of transmission line; mobile energy storage; electric vehicle V2G; pre-disaster deployment; power system resilience; multi-source cooperation

基金资助项目：国家自然科学基金(52222705；51977168)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China (52222705, 51977168).

0 引言

频发的自然灾害给城市配电网运行带来极大挑战，严重危害到城市能源安全和社会发展。传统配电网多以可靠性作为建设运维标准，难以应对自然灾害给系统网架、运行状态造成的冲击。提高城市配电网弹性、增强系统灾前预部署和灾后快速恢复的能力势在必行[1]。同时，随着电动汽车(electric vehicle, EV)群体迅猛发展以及系统中移动储能(mobile energy storage system, MESS)、应急抢修等技术的落地应用，分布式资源对配电网安全稳定运行的影响日益显著。因此，要深挖电力负荷侧灵活性，整合电网中各类可响应的电力资源，强化系统运行控制和抗风险能力[2]。利用 EV、MESS 和抢修队等分布式资源可加强电网应对台风等极端事件的能力，进而有效提高系统快速恢复水平。

目前，已有部分学者对多种分布式资源协同参与灾后恢复问题展开研究。文献[3-6]分别从 MESS 和车辆并网(vehicle to grid, V2G)配合参与城市电网供电恢复、MESS 和抢修队协同参与供电恢复、多网融合下考虑移动资源的配电网弹性提升和多种固定储能协同参与供电恢复等方面，探究了不同种类分布式资源配合在配电网弹性提升方面的效果。多种分布式资源的协同展现了分布广、功能丰富等特点，可满足系统快速恢复、保障重要用户供电、网架修复等需求。文献[7-10]运用 MESS、抢修队和分布式新能源等分布式资源配合配电网中动态微网、智能软开关、柔性负荷管理和电压控制等运行控制技术，可完成系统快速恢复和网架修复工作。从上述文献中可看出，多种分布式资源协同可以有效提升配电网恢复能力，同时配电网运行控制技术可按照恢复需求和网架连通性及时调整网架拓扑。然而，现有文献多是将不同种类的分布式资源简单结合，根据分布式资源和潮流约束直接求解得到协同调度方案，而较少对比不同分布式资源的优点和缺点，深入分析其在恢复中的互补作用，针对性设计多种分布式资源的配电网弹性提升方案[11]。

除了灾后恢复阶段外，灾前预部署阶段也应受到重视[12]。文献[13]设计一种移动应急发电机灾前预定位和灾中实时调整的两阶段调度框架。文献[14]考虑灾前 EV 调度及 EV 用户响应问题，设计灾后恢复策略。文献[15]计及台风时空演变对线路的影响，利用鲁棒优化模型得到 MESS 配置方案。文献[16]考虑光伏对系统弹性的影响，建立考虑 MEG 及抢修队的灾前两阶段随机规划模型。因此，现有研究考虑灾前应急仓库对灾后供电协同恢复的作用较少，且大多针对单一分布式资源进行决策。

在实际中台风对系统运行的主要影响有两个方面：一是当风力超过线路或杆塔标准时，会影响杆塔的基础，容易引发倒塔断线事故；二是台风容易引发主网对配电网电能供给不足的问题，给灾后恢复带来了一定困难[17]。因此当台风发生时，如何快速恢复负荷和网架，降低对受灾城市用电的负面影响是该背景下的迫切需求。

针对上述不足和现状，本文提出一种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。根据不同分布式资源特点，设计灾前和灾后两阶段调度配置方案。本文主要贡献包括：1）考虑线路修复和 EV、MESS 时空尺度互补特征的灾前预部署和灾后恢复方法，实现分布式资源真正协同；2）灾前预部署阶段，设计了一种考虑 EV 灾前调度和 MESS、抢修队应急仓库选址的预部署策略，以加快灾后分布式资源响应进程；3）灾后恢复阶段，根据不同分布式资源响应特征，提出一种含紧急功率支撑和负荷快速恢复的多时段优化模型，为灾后分布式资源提供调度方案。

1 问题陈述

当自然灾害导致系统故障断线、主网对配电网电能供给不足时，如何充分利用配电网中的分布式资源，实现配电网灾后恢复是亟需解决的问题。灾害发生前后进行针对性部署和调度，可提高配电网应对自然灾害的能力。本文聚焦于台风灾害场景，从灾前预部署和灾后恢复两阶段对分布式资源进行配置，可以充分发挥多种分布式资源自身特点，利用灾前配电网中有限资源助力提高配电网弹性水平。

本文从电力-交通融合系统的视角研究台风场景下配电网供电恢复问题，如图 1 所示。主要考虑的分布式资源包括集群电动汽车、MESS 和抢修队，相关设施包括 V2G 站和应急仓库。灾前阶段(预知台风灾害即将到来时)，一方面在交通网节点提前设置临时应急仓库，并在其中预部署 MESS 和抢修队，等待灾后调度指令；另一方面，引导交通网上正在行驶的 EV 进入就近的 V2G 站进行避难，参与灾后 V2G 反向输电，并统计各 V2G 站可反送的最大功率。灾后阶段，调度平台根据配电网线路故障断线

情况，考虑 V2G 站反充、柔性负荷管理和网络重构等问题，进行紧急功率支撑(灾后 t=0 至 t=15 min)，保证重要负荷不断电，尽量降低系统中失电量；同时，根据灾后配电网情况，优化得到 MESS 和抢修队的调度位置需求，并派遣 MESS 填补配电网功率缺口、抢修队清除线路故障，实现配电网负荷快速恢复和网架完全修复(灾后 t=15 min 以后)。需要注意的是，紧急功率支撑中参与的元素(电动汽车 V2G、柔性负荷及拓扑重构)也会影响到负荷快速恢复过程，但本文考虑到不同响应速率的元素对系统负荷的起始作用时间不同，因此在后续表述中：紧急功率支撑主要针对电动汽车 V2G、柔性负荷管理和网络重构；负荷快速恢复主要针对 MESS 和抢修队调度。

2 灾前阶段预部署模型

灾前阶段对 EV 的调度行为和 MESS 及抢修队应急仓库选址进行建模，为灾后系统快速恢复做准备。为保证灾后抢修队和 MESS 第一时间前往故障位置和重要节点，本章首先通过线路故障概率和配电网参数信息确定应急仓库预部署位置。此外，采用出行链和实时状态模型刻画 EV 运行特性，并引入出行意愿系数描述参与响应的 EV 用户占比，从而合理估计 EV 在灾后向电网反送的最大功率。

2.1 配电网线路故障概率模型

由于本文聚焦于台风灾害场景，而电缆埋在地下不易受到此类灾害的影响，因此本文设置电缆线路的故障概率近似为 0。以台风天气为例，生成灾后配电网故障场景。台风灾害对配电网架空线路故障概率的影响通常可以由导线和杆塔两个部件的承受应力 σ_{g} 和 M_{T} 来刻画：

$$\begin{cases} p_l^{\mathrm{fw}} = \displaystyle\int_0^{\sigma_{\mathrm{g}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_{\mathrm{w}}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma_{\mathrm{w}}-\mu_{\mathrm{w}}}{\delta_{\mathrm{w}}}\right)^2\right) \mathrm{d}\sigma_{\mathrm{w}} \\ p_{a,l}^{\mathrm{fy}} = \displaystyle\int_0^{M_{\mathrm{T}}} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta_{\mathrm{y}}} \exp\left(-\frac{1}{2}\left(\frac{M_{\mathrm{y}}-\mu_{\mathrm{y}}}{\delta_{\mathrm{y}}}\right)^2\right) \mathrm{d}M_{\mathrm{y}} \end{cases} \tag{1}$$

式中：p_l^{fw} 是第 l 条线路导线的故障概率；$p_{a,l}^{\mathrm{fy}}$ 是第 l 条线路上第 a 个杆塔的故障概率；μ_{w} 和 μ_{y} 分别为导线和电线杆强度的均值；δ_{w} 和 δ_{y} 分别为导线和电线杆强度的方差。本文方差及均值参数采用见文献[18]。

要使第 l 条线路能够正常运行，该线路上的导线和杆塔均需正常运行，因此台风作用后配网线路

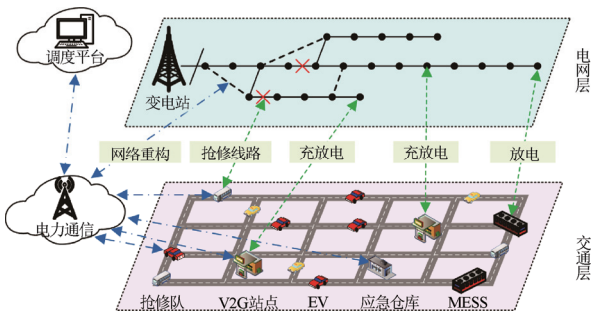


图 1 电力-交通融合系统

Fig.1 Electricity-transportation integration system

故障概率可通过线路部件串联关系得到：

$$P_l^{\mathrm{f}} = 1-(1-p_l^{\mathrm{fw}})\cdot\prod_{a=1}^{m_l}(1-p_{a,l}^{\mathrm{fy}}) \tag{2}$$

式中：P_l^{f} 是第 l 条线路的故障概率；m_l 是第 l 条线路上杆塔的总数。

2.2 应急仓库选址模型

以加权失电量期望最小为目标，综合考虑了线路故障概率、负荷重要程度、节点下负荷量大小以及分布式资源赶往故障线路所需时间 4 个因素，将应急仓库设立在周边容易断线并且能够对大负荷、重要负荷造成较大影响的节点附近。通过优化得到 MESS 和抢修队应急仓库最佳部署位置，使其能够以最快时间到达故障点，加快灾后恢复进程。

$$\min f = \sum_{l=1}^{N_{\mathrm{L}}} P_l^{\mathrm{f}} \cdot \sum_{i=1}^{N_l^{\mathrm{B}}} \omega_i \cdot \Delta p_{li} \cdot t_{li} \tag{3}$$

式中：N_{L} 是配电网故障线路总数；N_l^{B} 表示第 l 条线路故障导致失电的负荷节点总数；Δp_{li} 是第 l 条线路故障导致第 i 个失电节点产生的单位失电量；t_{li} 是线路 l 故障导致第 i 个节点负荷故障的抢修等待时间，即从应急仓库到达故障线路 l 所需时间；ω_i 是第 i 个节点负荷的权重。

2.3 EV 灾前调度模型

EV 灾前调度开始于警戒提醒发布时刻，即台风入境前 1~3 h[19]。EV 在交通网中的调度模型可采用出行链理论进行刻画[20]。结合 EV 用户的出行特征，可以模拟出调度周期内 EV 在交通网中的分布状态及荷电状态。当灾害发生时根据 EV 用户的意愿引导 EV 驶入所在位置最近的 V2G 站点，获取每个 V2G 站点下的 EV 数据，得到灾后阶段 V2G 站能够为电网提供的功率上限。

1）交通网模型

交通网的拓扑结构可以建模为由交通网节点

集合V_{R}和连接节点E_{R}的边集合表示的无向图G_{R}：

$$G_{\mathrm{R}}=(V_{\mathrm{R}},E_{\mathrm{R}}) \tag{4}$$

2）EV用户出行链模型

根据用户的日常出行特点，将交通网络分为居民区、工作区、商业区，对应交通网节点集合分别为R_{B}、W_{B}和C_{B}。出行链由复杂链和简单链组成，其中复杂链由3个节点组成，简单链由2个节点组成。

$$L=\left\{B_0,B_{\mathrm{f}},W_{0\mathrm{f}},L_{0\mathrm{f}},T_0,T_{\mathrm{f}},T_{0\mathrm{f}},T_{\mathrm{p}}\right\} \tag{5}$$

式中：L是出行链集合；集合元素为出行链起点B_0、出行链终点B_{f}、出行路径$W_{0\mathrm{f}}$、路径对应的行驶距离$L_{0\mathrm{f}}$、出发时刻T_0、到达时刻T_{f}、行驶时间$T_{0\mathrm{f}}$和停驻时间T_{p}。

第n段路程的行驶时间$T_{0\mathrm{f},n}$、到达时刻$T_{\mathrm{f},n}$和下一段路程出发时刻$T_{0,n+1}$可以表示为：

$$T_{0\mathrm{f},n}=\frac{d_n}{v'} \tag{6}$$

$$T_{\mathrm{f},n}=T_{0,n}+T_{0\mathrm{f},n} \tag{7}$$

$$T_{0,n+1}=T_{\mathrm{f},n}+T_{\mathrm{p},n} \tag{8}$$

式中：d_n是第n段路程的行驶距离；v'是EV行驶的平均速度；$T_{\mathrm{p},n}$是第n段路程的停驻时间。

3）EV实时状态模型

$$E_t^{\mathrm{status}}=\{C_t^{\mathrm{rem}},w_t,O_t\} \tag{9}$$

式中：E_t^{status}表征时刻t下每辆EV实时信息的集合，包含当前EV剩余电量C_t^{rem}、行驶状态w_t和离所在位置最近的V2G站编号O_t。

4）EV出行意愿模型

台风灾害会对电动汽车用户的出行意愿产生影响，进而对电动汽车的出行行为产生影响。在灾前EV调度阶段，通常引入出行意愿系数ρ来量化灾前参与响应的EV数量[21]。

$$N_{\mathrm{res}}=\rho N_{\mathrm{all}} \tag{10}$$

式中：N_{res}为参与调度响应的EV数量；N_{all}为EV总量。

5）交通网与电网耦合模型

在描述EV用户的出行特征后，参与调度相应的EV会通过电力-交通网耦合节点上的V2G站与系统进行电能传输。

$$\psi=\{L_{\mathrm{cou}}\in B_{\mathrm{ele}}\times B_{\mathrm{tra}}\} \tag{11}$$

$$\lambda_{ir}^{\mathrm{cou}}=\begin{cases}1 & \{x_i^{\mathrm{ele}},x_r^{\mathrm{tra}}\}\in\psi\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{12}$$

式中：ψ是交通网与电网耦合边的集合；L_{cou}是集合ψ中的元素；B_{ele}是电网节点集合；B_{tra}是交通网节点集合；x_i^{ele}是电网中的第i个节点；x_r^{tra}是交通网中的第r个节点；$\lambda_{ir}^{\mathrm{cou}}$是0-1变量，表示电网节点$i$与交通网节点$r$是否耦合，若$\lambda_{ir}^{\mathrm{cou}}=1$，则表示两节点耦合，交通网上的V2G站可直接与电网对应节点传输电能。

3 灾后多时段优化模型

灾后阶段是在台风灾害强度下降到对配电网不再有破坏能力的时间点后，依据分布式资源响应特性将此阶段划分为紧急功率支撑和负荷快速恢复过程，在保障关键负荷不停电的同时快速恢复其它负荷。由于灾前EV已经安置在各V2G站点，具备和电网实时交互能力，可以利用V2G技术、网络重构技术和柔性负荷管理技术实现短期内系统关键节点的紧急支撑，再通过对MESS和抢修队的派遣有序恢复其它负荷和网架结构[22]。

3.1 目标函数

灾后阶段恢复的目标是在恢复周期内系统加权切负荷量最小，目标函数如下:

$$\min\sum_{t=1}^{T_{\mathrm{all}}}\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{B}}}\omega_i\cdot p_{i,t}^{\mathrm{shed}} \tag{13}$$

式中：T_{all}是恢复全周期所包含的总时段数；N_{B}为配电网节点数量；$p_{i,t}^{\mathrm{shed}}$是第t个时段中节点i的切负荷量。

3.2 紧急功率支撑过程

此过程重点研究灾后阶段响应速率较快(灾后t=0~15 min内动作)的分布式资源及运行控制技术，包括电动汽车 V2G、柔性负荷管理及网络重构技术，保证重要负荷供电。

1）V2G反充出力约束

$$p_h^{\mathrm{V2G,min}}\le p_{h,t}^{\mathrm{V2G}}\le p_h^{\mathrm{V2G,max}},\forall h\in V_{\mathrm{G}},t\in T \tag{14}$$

式中：$p_h^{\mathrm{V2G,max}}$及$p_h^{\mathrm{V2G,min}}$分别为第h个V2G站出力的功率最大值和最小值；$p_{h,t}^{\mathrm{V2G}}$为第h个V2G站在时段t出力的实际功率；V_{G}代表V2G站的集合；T为调度全周期的时段集合。

2）柔性负荷模型

本文将柔性负荷分为可中断负荷和可削减负荷。其中，可中断负荷可以根据系统调度需求进行动态调整。

$$0\le p_{i,t}^{\mathrm{load1}}\le P_{i,t}^{\mathrm{load1,max}},\forall i\in B,t\in T \tag{15}$$

式中：$p_{i,t}^{\mathrm{load1}}$第t个时段第i个节点可中断负荷实际

供给功率；$P_{i,t}^{\mathrm{load1,max}}$ 是时段 t 下第 i 个节点下可中断负荷总量；B 是配电网节点集合。

对于可削减负荷，灾后根据负荷重要程度、用户舒适度及分布式资源调度情况，可适当调整和削减某些节点下的用电负荷[23]。

$$P_{i,t}^{\mathrm{load2,min}}=\mu_{i,t}^{\mathrm{load2}}P_{i,t}^{\mathrm{load2,max}},\forall i\in B,t\in T \tag{16}$$

$$\mu_{i,t}^{\mathrm{load2}}=\begin{cases}\alpha_2,t<t_{\mathrm{s}}\\ \alpha_2+\left(\dfrac{\beta_2-\alpha_2}{t_{\mathrm{e}}-t_{\mathrm{s}}}\right)\cdot\left(t-t_{\mathrm{s}}\right),t_{\mathrm{s}}\le t\le t_{\mathrm{e}}\\ \beta_2,t>t_{\mathrm{e}}\end{cases} \tag{17}$$

$$P_{i,t}^{\mathrm{load2,min}}\le p_{i,t}^{\mathrm{load2}}\le P_{i,t}^{\mathrm{load2,max}},\forall i\in B,t\in T \tag{18}$$

$$0\le p_{i,t}^{\mathrm{load2,shed}}\le P_{i,t}^{\mathrm{load2,max}}-P_{i,t}^{\mathrm{load2,min}},\forall i\in B,t\in T \tag{19}$$

式中：$P_{i,t}^{\mathrm{load2,min}}$ 是时段 t 下第 i 个节点的可削减负荷最低需求；$P_{i,t}^{\mathrm{load2,max}}$ 是时段 t 下第 i 个节点下可削减负荷总量；$\mu_{i,t}^{\mathrm{load2}}$ 是时段 t 下第 i 个节点可削减负荷的调整系数；$p_{i,t}^{\mathrm{load2}}$ 时段 t 下第 i 个节点可削减负荷实际供给功率；变量 $p_{i,t}^{\mathrm{load2,shed}}$ 表示第 i 个节点可削减负荷在时段 t 下的削减量；t_{s} 和 t_{e} 分别是灾害开始和结束时段；α_2 和 β_2 是反映可削减负荷对外界因素敏感程度的参数。

3）网络辐射状约束

$$0\le z_{ij,t}^{\mathrm{f}}+z_{ij,t}^{\mathrm{t}}\le 1,\quad \forall(i,j)\in E,t\in T \tag{20}$$

$$z_{ij,t}=z_{ij,t}^{\mathrm{f}}+z_{ij,t}^{\mathrm{t}},\quad \forall(i,j)\in E,t\in T \tag{21}$$

$$f\cdot z_{ij,t}^{\mathrm{f}}+\tau\cdot z_{ij,t}^{\mathrm{t}}=0,\quad \forall(i,j)\in E^{\mathrm{bal}},t\in T \tag{22}$$

式中：$z_{ij,t}^{\mathrm{f}}$ 和 $z_{ij,t}^{\mathrm{t}}$ 是表示时段 t 下支路 (i,j) 功率实际流向的 0-1 变量，当 $z_{ij,t}^{\mathrm{f}}=1$ 代表功率实际流向与参考方向一致，当 $z_{ij,t}^{\mathrm{t}}=1$ 代表功率实际流向与参考方向相反；$z_{ij,t}$ 表征线路 (i,j) 的状态，若线路故障则取 0，反之取 1；f 和 τ 用来表示支路潮流参考方向，f=1 且 τ=0 时代表潮流正方向为节点 i 到 j；E 是配电网支路集合；E^{bal} 是包含平衡节点的支路集合。

3.3 负荷快速恢复过程

本过程重点刻画受交通网影响导致响应速率较慢的分布式资源，包括 MESS 和抢修队。由于城市交通网络比较发达，道路被破坏以后在小规模城区范围内不会对节点间连通性和距离造成较大影响。此外，台风过境前 24 h 左右居民会收到灾害预警信息并有序应对[19]，因此本文忽略台风对各资源调度路径和时间的影响。

1）MESS 约束

MESS 数量约束：

$$0\le\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{B}}}\sum_{b=1}^{N_{\mathrm{MESS}}}L_{i,b,t}\le N_{\mathrm{MESS}},\forall t\in T \tag{23}$$

式中：N_{MESS} 指 MESS 配置总数；$L_{i,b,t}$ 是 0-1 变量，反映节点 i 在 t 时段下是否安置了第 b 台 MESS。

MESS 出力约束为：

$$0\le p_{i,b,t}^{\mathrm{MESS}}\le L_{i,b,t}p^{\mathrm{MESS,max}},\forall b\in M,i\in B,t\in T \tag{24}$$

式中：$p_{i,b,t}^{\mathrm{MESS}}$ 表示 t 时段下第 b 台 MESS 在节点 i 的出力情况，如果第 b 台 MESS 不在节点 i，则该节点没有第 b 台 MESS 的功率注入；$p^{\mathrm{MESS,max}}$ 指 MESS 的出力上限；M 是参与调度的 MESS 集合。

MESS 调度约束：

$$0\le\sum_{i=1}^{N_{\mathrm{B}}}L_{i,b,t}\le 1,\forall b\in M,t\in T \tag{25}$$

$$\sum_{t=1}^{T_i^{\mathrm{tra}}}L_{i,b,t}=0,\forall b\in M,i\in B \tag{26}$$

$$\sum_{t=T_i^{\mathrm{tra}}+1}^{T_{\mathrm{all}}}L_{i,b,t}=(T_{\mathrm{all}}-T_i^{\mathrm{tra}})L_{i,b,T_i^{\mathrm{tra}}},\forall b\in M,i\in B \tag{27}$$

式中：T_i^{tra} 指 MESS 从应急仓库赶到节点 i 所花费的时间。

式(25)表明 MESS 每个时段最多只能接入一个节点；式(26)说明 MESS 在接入节点 i 之后才能为节点 i 提供功率；式(27)表征 MESS 接入一个节点后不再变换位置，即由于调度的经济性和恢复紧急性的影响，不考虑 MESS 再调度问题。

2）抢修队约束

抢修队空间约束：

$$\sum_{m\in F\cup R\setminus\{k\}}x_{k,m,c}-\sum_{m\in F\cup S\setminus\{k\}}x_{m,k,c}=0,\quad \forall c\in C,k\in F \tag{28}$$

$$\begin{cases}\displaystyle\sum_{m\in F\cup R}x_{k,m,c}=1,\ \forall c\in C,k\in S\\ \displaystyle\sum_{k\in F\cup S}x_{k,m,c}=1,\ \forall c\in C,m\in R\\ \displaystyle\sum_{m\in F\cup S}x_{k,m,c}=0,\ \forall c\in C,k\in R\\ \displaystyle\sum_{k\in F\cup R}x_{k,m,c}=0,\ \forall c\in C,m\in S\end{cases} \tag{29}$$

$$x_{k,k,c}=0,\ \forall c\in C,k\in F\cup S\cup R \tag{30}$$

$$y_{k,c}=\sum_{m\in F\cup R}x_{k,m,c},\ \forall c\in C,\ k\in F \tag{31}$$

$$\sum_{c\in C}y_{k,c}\le 1,\ \forall k\in F \tag{32}$$

式中：$x_{k,m,c}$ 是 0-1 变量，若抢修队 c 的路径包含从故障线路 k 到 m，则变量值取 1，否则为 0；$y_{k,c}$ 是

0-1 变量，若故障线路 k 被抢修队 c 修复，则变量值取 1，否则为 0；C 为参与调度的抢修队集合；F 表示故障线路集合；S 及 R 分别表示抢修队的起点集及终点集。

抢修资源约束：

$$\sum_{k\in F} M_k y_{k,c} \le M_c^{\text{all}},\ \forall c \in C \tag{33}$$

式中：M_k 是修复故障线路 k 所需要的物资量；M_c^{all} 是抢修队 c 所携带物资总量。

抢修路径时间约束：

$$\begin{gathered} t_{k,c}^{\text{arr}} + t_{k,c}^{\text{rep}} y_{k,c} + t_{km,c}^{\text{tra}} - t_{m,c}^{\text{arr}} \le (1 - x_{k,m,c})H, \\ \forall k \in F \bigcup S, m \in F \bigcup R, c \in C \end{gathered} \tag{34}$$

$$\begin{cases} \sum_{t=1}^{T_{\text{all}}} t f_{k,t} \ge \sum_{c\in C} (t_{k,c}^{\text{arr}} + t_{k,c}^{\text{rep}} y_{k,c}),\ \forall k \in F \\ \sum_{t=1}^{T_{\text{all}}} t f_{k,t} < \sum_{c\in C} (t_{k,c}^{\text{arr}} + t_{k,c}^{\text{rep}} y_{k,c}) + 1,\ \forall k \in F \end{cases} \tag{35}$$

式中：$t_{k,c}^{\text{arr}}$ 是抢修队 c 在抵达故障线路 k 的时刻；$t_{k,c}^{\text{rep}}$ 是抢修队 c 修复故障线路 k 所需时间；$t_{km,c}^{\text{tra}}$ 是抢修队 c 从故障线路 k 赶到故障线路 m 的通行时间；$f_{k,t}$ 为 0-1 变量，若故障线路 k 在第 t 个时段内完成修复，则取 1，反之取 0；H 为很大的正实数。

3.4 系统运行约束

灾后整个恢复过程中还需要满足系统的实际运行要求，主要约束如下：

1）功率平衡约束

$$\begin{cases} p_{j,t} = \sum_{d\in\delta(j)} p_{jd,t} - \sum_{i\in\pi(j)} (p_{ij,t} - \tilde{I}_{ij,t} r_{ij}), \\ \forall j \in B, t \in T \\ q_{j,t} = \sum_{d\in\delta(j)} q_{jd,t} - \sum_{i\in\pi(j)} (q_{ij,t} - \tilde{I}_{ij,t} x_{ij}), \\ \forall j \in B, t \in T \end{cases} \tag{36}$$

$$\begin{cases} p_{j,t} = p_{j,t}^{\text{G}} + p_{j,t}^{\text{V2G}} + \sum_{b\in M} p_{j,b,t}^{\text{MESS}} - p_{j,t}^{\text{L}}, \\ \forall j \in B, t \in T \\ q_{j,t} = q_{j,t}^{\text{G}} - q_{j,t}^{\text{L}}, \\ \forall j \in B, t \in T \end{cases} \tag{37}$$

式中：$p_{j,t}$ 和 $q_{j,t}$ 分别是时段 t 下第 j 个节点的有功注入功率和无功注入功率；$\delta(j)$ 和 $\pi(j)$ 分别是第 j 个节点的子节点和父节点的集合；$p_{ij,t}$ 和 $q_{ij,t}$ 分别是时段 t 下支路 (i,j) 传输的有功功率和无功功率；r_{ij} 和 x_{ij} 是支路 (i,j) 的电阻和电抗；$\tilde{I}_{ij,t}$ 是时段 t 下支路 (i,j) 电流模值的平方；$p_{j,t}^{\text{G}}$ 和 $q_{j,t}^{\text{G}}$ 分别是时段 t 下第 j 个节点发电机有功出力和无功出力；$p_{j,t}^{\text{L}}$ 和 $q_{j,t}^{\text{L}}$ 分别是时段 t 下第 j 个节点实际接入的有功负荷和无功负荷。

2）节点及支路两端电压约束

$$\underline{V}_i^2 \le \tilde{V}_{i,t} \le \overline{V}_i^2, \forall i \in B, t \in T \tag{38}$$

$$\begin{gathered} \begin{cases} \tilde{V}_{j,t} \le \tilde{V}_{i,t} - 2\left(p_{ij,t} r_{ij} + q_{ij,t} x_{ij}\right) + \left(r_{ij}^2 + x_{ij}^2\right)\tilde{I}_{ij,t} + \left(1 - z_{ij,t}\right)H \\ \tilde{V}_{j,t} \ge \tilde{V}_{i,t} - 2\left(p_{ij,t} r_{ij} + q_{ij,t} x_{ij}\right) + \left(r_{ij}^2 + x_{ij}^2\right)\tilde{I}_{ij,t} - \left(1 - z_{ij,t}\right)H' \end{cases} \\ \forall (i,j) \in E \end{gathered} \tag{39}$$

式中：$\underline{V}_i^2$ 和 $\overline{V}_i^2$ 分别是第 i 个节点电压模值的下限和上限的平方；$\tilde{V}_{i,t}$ 是时段 t 下第 i 个节点电压模值的平方。

3）支路电流约束

$$\underline{I}_{ij}^2 \le \tilde{I}_{ij,t} \le \overline{I}_{ij}^2, \forall (i,j) \in E, t \in T \tag{40}$$

式中：$\underline{I}_{ij}^2$ 和 $\overline{I}_{ij}^2$ 分别是支路 (i,j) 传输电流模值的下限和上限的平方。

4）二阶锥约束

$$\left\| \begin{matrix} 2p_{ij,t} \\ 2q_{ij,t} \\ \tilde{I}_{ij,t} - \tilde{V}_{j,t} \end{matrix} \right\|_2 \le \tilde{I}_{ij,t} + \tilde{V}_{j,t}, \forall (i,j) \in E \tag{41}$$

本文在灾后阶段建立了多时段优化恢复模型，实际上是每个时段下的配电网最优潮流问题的叠加，其二阶锥凸松弛的准确性和可行性已得到验证。因此，灾后阶段优化问题可利用现有商业求解器进行求解，且能够保证解的最优性和求解效率[24]。

4 配电网两阶段供电恢复框架

分布式资源具有分布范围广、种类丰富等特点，在响应规模、行为特征、功能作用和服务价值等众多层面都存在明显差异。表 1 中对比分析了本文所研究各类分布式资源参与灾后恢复过程的典型特征(以某典型城市分布式资源配置情况为例[25])。

通过对上表分析，可以看出：1）电动汽车：个体数量多，总响应功率大，且响应迅速，可以为电网提供大量可靠的功率支撑，但由于其依赖固定的 V2G 站与电网交互，灾后供能位置受到限制；2）移动储能：个体响应功率大，能够在灾后场景下灵活转移，可以有针对性地为关键负荷节点供电，但其个体数量较少，可提供能量的时长有限，且移动过程需要一定的时间；3）抢修队：可以前往各个故障点，彻底修复系统故障，缺点是故障修复耗时长且数量有限；4）柔性负荷：可响应潜力大，响应迅速，但实际可参与调整的功率大小受天气、温度等客观因素影响较为明显[26]。

表 1 各类分布式资源属性及灾后典型特征

Table 1 Attributes and post-disaster typical characteristics of various distributed resources

资源	个体数量	响应功率	响应容量	响应速率	移动特性	持续作用时间	不确定性(大小，来源)
电动汽车	很多，200~2000 辆	小，7~ 50 kW	小，30~100 kW·h	即时响应，2~5 min	不可移动	较短，2~6 h	大，时空特性、用户参与意愿
移动储能	少，3~15 辆	大，50~500 kW	大，1000~4000 kW·h	延时响应，0.5~1 h	可以移动	长，8~30 h	—
抢修队	少，3~15 支	—	—	延时响应，0.5~1 h	可以移动	长，至完全恢复	较大，故障修复时间
柔性负荷	多，500~2000 个	—	—	即时响应，2~5 min	不可移动	较短，2~6 h	较大，环境因素

经过上述分析，可以看出，各类分布式资源在供电恢复能力方面有特点和缺陷，依靠单一种类分布式资源灾后实现系统快速恢复较为困难。而刚性负荷停电将造成重大损失，需要保证其不间断供电；部分柔性负荷可容忍短暂停电，等待逐步恢复供电。然而，现有应急方案较少考虑不同类型负荷的供电需求，也缺乏合理协同各类分布式资源进行抢修和供电恢复[27]。为有效提升配电网应对台风等极端灾害的能力，应发挥各类分布式资源自身的优势，实现不同分布式资源在时空维度的互补互济，最大限度增加配电网供电恢复水平。

为此，本文设计了考虑多种分布式资源协同、包括紧急功率支撑和负荷快速恢复在内的配电网两阶段供电恢复框架，如图 2 所示。图中 3 个维度分别代表供电恢复流程、两网调控技术以及分布式资源行为与功能。灾后恢复分为紧急功率支撑和负荷快速恢复两个阶段，从恢复决策层面满足系统需求；两网调控包含网架重构、柔性负荷管理和电力-交通协同，从技术理论层面保证灾后系统自适应调整和分布式资源响应；不同分布式资源灾后行为特征存在差异，实现的功能也不同，从物理层面确保恢复策略的可行性。

根据表 1 中各分布式资源特点，在紧急功率支撑阶段，EV 和柔性负荷能够即时响应，为重要负荷提供快速有效的功率支撑；在负荷快速恢复阶段，利用 MESS 和抢修队的移动特性实现系统和网架的快速恢复。该框架中所包含的分布式资源和调控操作在以下几点呈现协同互补作用及优势：

1）交通网调控措施可以保证 EV、MESS 和抢修队进行有效的空间转移，进而参与电网能量响应，如图 2 中①②③所示。

2）EV 可弥补 MESS 数量少、响应时间较长、个体服务成本较高等问题。电动汽车群体数量大，

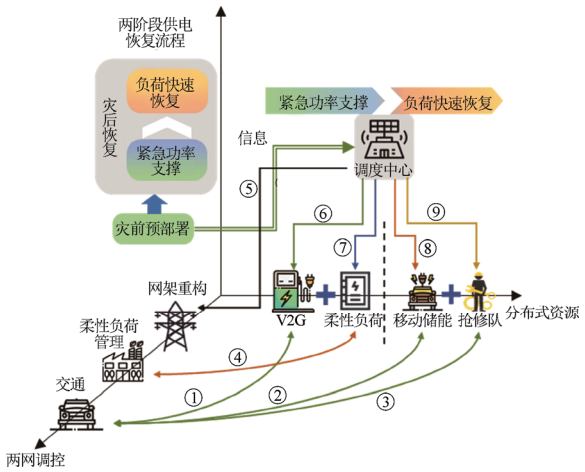


图 2 配电网两阶段供电恢复框架

Fig.2 A restoration framework of two-stage power supply in distribution network

分布广，利用 EV 借助 V2G 站反充参与供电恢复的模式具有恢复能力较强、经济性较好等优点。

3）MESS 可缓解 EV 时空特性导致的 V2G 反充功率分布不均的问题。MESS 可按照系统需求派遣至任意节点，因此可前往 V2G 反充功率较小、重要负荷失电量较大的区域，接入相应节点，提高重要负荷供电比例。

4）网架重构、柔性负荷管理等调控操作可从网侧和荷侧主动优化拓扑连通性、降低负荷功率需求，配合 EV 在灾后及时响应，进一步实现紧急功率支撑，保证重要负荷不断电，如图 2 中④⑤所示。

5）抢修队可实现系统拓扑连通性能提升，在恢复网架结构的同时进一步助力灾后恢复。

由此，可根据上述分布式资源和调控操作的特点及协同互补效果，设计相应的灾后恢复调度运行和派遣顺序规则：

1）灾后阶段，调度中心收集系统线路故障、各 V2G 站点可反充最大功率和柔性负荷等实时信

息展开优化决策，灾后恢复进入紧急功率支撑时段。

2）紧急功率支撑时段：按照调度中心指令，各 V2G 站向系统供电，各节点切相应功率的柔性负荷，系统中相应远动开关进行倒闸操作，如图 2 中⑤⑥⑦所示。

3）紧急功率支撑时段结束，进入负荷快速恢复时段。

4）负荷快速恢复时段：MESS 和抢修队根据调度中心指令分别前往各自目的地节点，如图 2 中⑧⑨所示。到达后，MESS 立即接入节点进行供电，抢修队立即开始线路修复。

5）每次修复完成后，抢修队按照调度中心指令前往下一目的地节点进行线路修复。若无需修复任务，则抢修队不再调度。

6）当负荷供电比例达到 100%，即所有负荷已恢复正常供电时，负荷快速恢复时段结束；当所有线路均恢复正常时，系统实现完全修复。

5 算例分析

本文采用改进的 IEEE 33 节点配电网和 30 节点交通网组成的耦合系统进行算例分析。配电网拓扑与交通网节点的对应关系以及节点数据参考文献[28]。配电网及交通网拓扑结构分别如附录 A 图 A1 和图 A2 所示，图 A1 中标出了系统 5 条电缆线路(虚线表示的支路)以及 V2G 站所在节点和功能区划分。负荷重要程度及种类划分参见附录 A 表 A1 和表 A2。参与调度的 EV 参数详见文献[14]，EV 用户出行意愿系数取 $\rho=0.8$。每个 V2G 站点共有 15 台充电桩，充电桩充放电功率为 7 kW。MESS 参数见附录 A 表 A3。

首先分析灾前预部署阶段中应急仓库的配置位置。通过考虑系统负荷数据、线路故障概率和交通网信息，得到应急仓库应设在配电网节点 24 附近，记作仓库位置 A。若不考虑预部署，则将应急仓库设立在电源节点附近，记作仓库位置 B，以分析不同仓库位置对整体调度方案和恢复效果的影响。假设台风导致系统线路 14-15、8-9、6-7、2-19 和 28-29 出现故障，节点 1 下主电源所能提供的最大电力缩减为正常情况下的 30%。在此场景下，整理出故障线路与应急仓库和故障线路之间的近似交通距离，如附录 A 表 A4 所示。附录 A 表 A5 列出了各条故障线路所需要的抢修时间和修复资源。

5.1 基于多种分布式资源协同的供电恢复分析

为说明各类部署资源在时间维度、空间维度和调度机制上的互补互济优势，分别从 MESS、电动汽车 V2G 和应急仓库选址 3 个角度对比负荷恢复效果，设计方案如下：

1）方案 1：应急仓库设在位置 A，设计考虑 MESS、电动汽车 V2G 和抢修队 3 种分布式资源协同调度方案；

2）方案 2：应急仓库设在位置 A，设计考虑电动汽车 V2G 和抢修队两种分布式资源协同调度方案；

3）方案 3：应急仓库设在位置 A，设计考虑 MESS 和抢修队两种分布式资源协同调度方案；

4）方案 4：应急仓库设在位置 B，设计考虑 MESS、电动汽车 V2G 和抢修队三种分布式资源协同调度方案。

取灾害发生时刻为 00:00，EV 数量为 300、MESS 台数为 4、抢修队数量为 3。

5.1.1 各方案恢复效果对比

本小节对上述 4 种方案进行对比，以分析灾前预部署和不同种类分布式资源对恢复效果的影响。图 3 中，通过对比方案 1、方案 2 和方案 3 的负荷恢复曲线，可得电动汽车 V2G 在灾后 t=0 时刻支撑 20.84%的总负荷，而 MESS 在全部接入以后(灾后 t=60 min 时刻)支撑 10.73%的总负荷，能够看出 MESS 和电动汽车 V2G 在整个恢复过程中功率支撑作用明显，且相比于 MESS，电动汽车 V2G 的支撑作用对恢复的影响更大，体现 EV 能够弥补 MESS 数量和响应速率上的缺陷。同时，电动汽车 V2G 配合网络重构和柔性负荷管理，在灾后 t=0 时刻及时响应，可对系统进行紧急功率支撑。

附录 B 表 B1 和表 B2 分别列出了四个方案的调度情况和时序恢复效果。对比方案 1 和方案 4，方案 4 负荷完全恢复所需时间增加了 8.33%，说明灾前预部署能够影响 MESS 和抢修队的响应速率，因此灾前应急仓库的选址能够有效缩短两种资源在交通网中的路程，加快灾后恢复进程。另外，综合 4 种方案结果可明显看出，方案 1 灾后恢复效果优于其他 3 种方案，灾后 3 h 内累计失电量最小，负荷供电比例恢复到 100%所需时间最短，负荷恢复总体效果最好。

5.1.2 方案 1 恢复效果

本小节对方案 1 的各资源调度情况和系统恢复情况进行展示。由图 4 可知，在 00:00 时，电动汽

车大部分集中在居民区，主要为所在区域提供功率支撑；而 4 辆 MESS 中有 3 辆被调度到非居民区，为位于节点 24 和周边区域的一级和二级负荷进行供电。MESS 灾后可自由调度、派遣至功率缺失区域，并以负荷重要度为依据，接入相应节点供电。因此，MESS 可按照电动汽车 V2G 输出功率的分布情况，选择满足系统负荷恢复需求的接入位置。

附录 B 图 B1 给出了方案 1 各类负荷和总负荷的恢复曲线，展示了恢复过程中应用柔性负荷管理对负荷的影响。有两点现象值得注意：

1）刚性负荷在 t=0 时刻并未出现切负荷情况，并在整个恢复过程中始终保持 100%供电。电动汽车 V2G、MESS、网络重构和柔性负荷管理保证了重要负荷不断电，体现了所提恢复框架中紧急功率支撑过程的重要作用。

2）可削减负荷供电比例在灾后 t=0 时刻有 18.75%的比例削减，在灾后 t=0~15 min 短时间内快速恢复；可中断负荷切负荷比例较大，t=0 时刻达到 68.71%，供电比例随着恢复进程逐渐回升。这是因为可削减负荷受用户舒适度等用户因素的影响限制，而可中断负荷可在灾后恢复过程中完全按照系统需求进行切负荷。

由此可看出，方案 1 可在满足不同种类负荷供电需求的同时，实现灾后快速恢复。

5.2 EV 数量与时空分布对恢复效果的影响

取 MESS 台数为 4、抢修队数量为 3，观察不同 EV 数量和灾害发生时刻对调度方案和恢复效果的影响。

5.2.1 EV 数量对恢复的影响

表 2 列出了当灾害发生时刻为 00:00，改变恢复方案中 EV 数量后相应的调度方案和恢复效果。当 EV 数量小于 400 时，灾后 t=0 h 切负荷量和灾后 3 h 内累计失电量随着 EV 数量增加均明显降低。但当 EV 数量达到 400 以后，恢复效果基本不再变化。

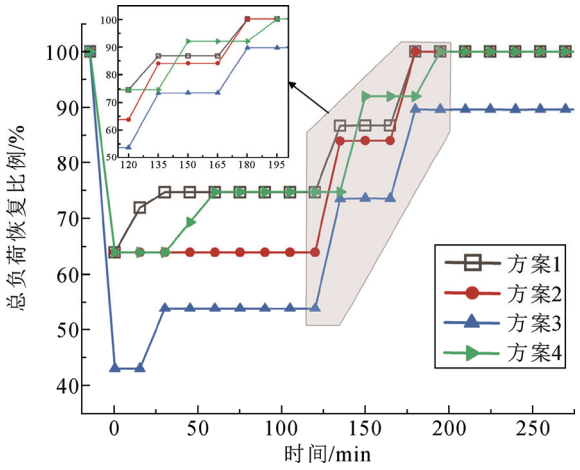


图 3 4 种方案负荷恢复曲线

Fig.3 Load recovery curves of four schemes

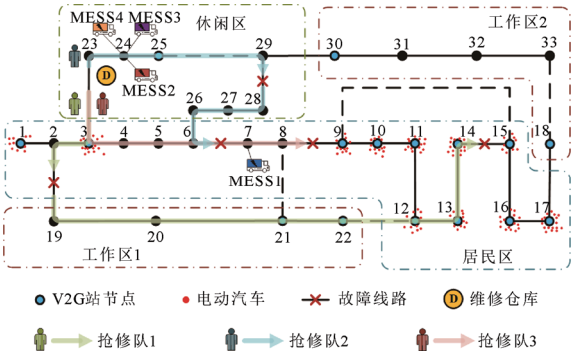


图 4 方案 1 分布式资源调度图

Fig.4 Graph of distributed resource scheduling in scheme 1

表 2 改变 EV 数量时调度方案及恢复效果对比

Table 2 Comparison of scheduling scheme and recovery effect with changing the number of EVs

EV 数量	V2G 站返送总功率/MW	MESS 接入节点				抢修队修复顺序			灾后 t=0 h 切负荷量/MW	灾后 3 h 内累计失电量/(MW·h)
		第 1 辆	第 2 辆	第 3 辆	第 4 辆	第 1 队	第 2 队	第 3 队		
100	0.3850	24	7	18	7	28-29 14-15	8-9 —	2-19 6-7	1.7727	3.8124
200	0.7210	24	18	7	24	2-19 —	28-29 6-7	8-9 14-15	1.5356	3.1527
300	0.9520	7	24	24	24	2-19 14-15	28-29 6-7	8-9 —	1.3420	2.6172
400	1.1340	7	24	24	24	2-19 —	28-29 14-15	8-9 6-7	1.2034	2.2044
500	1.1550	7	24	24	24	28-29 6-7	2-19 —	8-9 14-15	1.2034	2.2043

由此可见，EV 数量的增加会有效提高电动汽车 V2G 在恢复过程中的功率支撑能力，进而提升整体恢复效果。但由于 V2G 站充电桩数量上的限制，EV 达到一定数量以后，无法再提升系统恢复效果。此外，随着 EV 数量从 100 增加到 300，MESS 接入 7 和 18 节点数量减少，接入 24 节点数量增加，说明 MESS 派遣位置在向非居民区靠拢；而 EV 数量到达 300 之后接入点不再改变。因此 MESS 的派遣位置也会在一定程度上受 EV 数量的影响，支援电动汽车 V2G 功率支撑不足的区域。

5.2.2 EV 时空分布对恢复的影响

取灾害发生时刻分别为 06:00、14:00、20:00，并设置 EV 数量为 300，研究 EV 时空分布对调度结果及系统恢复的影响。

结合图 5 和附录 B 表 B3 可知，当灾害发生时刻为 06:00 和 20:00 时，EV 的空间分布基本一致，约 71%集中在居民区，4 辆 MESS 中有 3 辆被调度到非居民区，整体恢复效果区别不大[14]。而当灾害发生于 14:00 时刻，约 78%EV 集中在工作区，工作区的供电有了更多保障，但居民区负荷供应能力下降，因此 4 辆中有 2 辆 MESS 接入到节点 18，为周边居民区节点提供功率支撑。不同时刻的调度结果说明 MESS 能够缓解电动汽车 V2G 时空特性导致反充功率分布不均的问题。结合 5.1.1 中关于电动汽车 V2G 和 MESS 的结论，可总结出，电动汽车 V2G 和 MESS 在功率支撑大小、功率支撑时空分布和重要负荷支撑的针对性等方面具有功能互补效果。

5.3 抢修队数量对恢复效果的影响

取灾害发生时刻为 00:00，设置 MESS 台数为 4、EV 数量为 300，研究抢修队数量变化对调度结果和恢复效果的影响。根据故障线路数量，设置抢修队数量分别为 1、2、3、5，共 4 种方案。

表 3 和附录 B 图 B2 分别展示了以上 4 种情况下负荷时序恢复过程和调度方案。由表 3 可知，随着抢修队数量的增加，MESS 派遣位置没有变化，故障线路总抢修时间大幅缩减；失电量在抢修队数量从 1 增加到 2 时下降 11.41%，而在后续方案失电量基本保持不变，因此抢修队数量达到阈值(该场景下为 2)后对失电量影响较为有限。另外结合附录 B 图 B2，当抢修队数量为 2 时，负荷恢复在后期出现两次跃升，说明有 2 条线路先后被修好，分别是线路 28-29 和 2-19。因此本文所提方法可优化出故障场景下抢修队需要修复的重要线路。

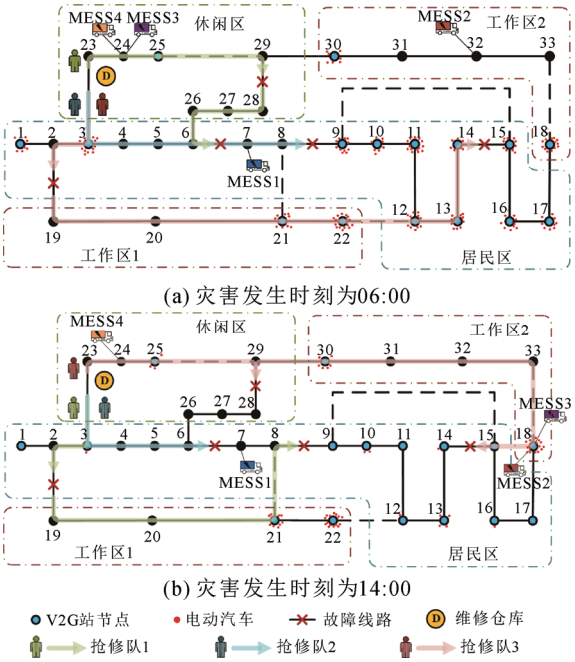


图 5 不同灾害发生时刻下分布式资源调度图

Fig.5 Graph of distributed resource scheduling under different disaster occurrence time

综上，仅提升单个元素支撑或恢复能力对整体供电恢复效果影响有限，更多地需要不同资源间的相互配合，发挥互补互济潜能；同时，本文所提方法能够优化得到抢修队数量的最佳配置，实现用最少资源得到最佳恢复效果的目标。

6 结语

本文提出一种台风场景下考虑多种分布式资源协同的两阶段配电网供电恢复方法。首先，根据灾前预部署模型得到 MESS 和抢修队的应急仓库部署位置，并模拟灾前 EV 调度获取灾前 EV 时空分布和各 V2G 站最大出力；建立包括电动汽车 V2G、MESS、抢修队、网络重构和柔性负荷管理的时序恢复模型，并设计了考虑紧急功率支撑和负荷快速恢复在内的灾后分布式资源协同参与配电网恢复的应用框架。最后，运用多组算例验证了所提方法的可行性和有效性，体现了不同种类分布式资源对供电恢复的影响以及相互之间的协同作用。得出主要结论如下：

1）所提两阶段供电恢复方法及框架可根据不同种类分布式资源功能互补特点，实现多种分布式资源协同，助力配电网弹性提升。

2）灾前预部署可提高分布式资源灾后响应及调度速率，加快灾后恢复进程。

表 3　改变抢修队数量调度方案及恢复效果对比

Table 3　Scheduling scheme and recovery effect comparison with changing the number of repair crews

抢修队数量/个	MESS 接入点				抢修队修复顺序					线路总抢修时间/h	灾后 3 h 累计失电量/MW·h
	第 1 辆	第 2 辆	第 3 辆	第 4 辆	第 1 队	第 2 队	第 3 队	第 4 队	第 5 队		
1	24	24	24	7	2-19 28-29 14-15 8-9 6-7					16	2.9549
2	7	24	24	24	2-19 14-15 —	28-29 6-7 8-9				9.25	2.6178
3	7	24	24	24	2-19 14-15	28-29 6-7	8-9 —			7	2.6172
5	24	24	7	24	14-15	8-9	2-19	28-29	6-7	3.75	2.6170

3）电动汽车 V2G 可在灾后快速响应，为系统提供较大功率出力，并配合网络重构和柔性负荷管理，实现紧急功率支撑，保证重要负荷供电。

后续研究将进一步将本文所提理论拓展至规划层面，探索考虑多种分布式资源协同的弹性配电网规划方法。

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

参考文献　References

[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.

[2] 国家能源局综合司. 国家能源局综合司关于公开征求《关于加强新型电力系统稳定工作的指导意见(征求意见稿)》意见的通知[EB/OL]. (2023-04-24)[2023-05-22]. http://www. nea. gov. cn/2023-04/24/c_1310713405. htm.
Comprehensive Department of National Energy Administration. Notice of the General Department of the National Energy Administration on publicly soliciting opinions on “Guiding Opinions on Strengthening the Stability of New Power Systems(Draft)”[EB/OL]. (2023-04-24)[2023-05-22]. http://www.nea.gov.cn/2023-04/24/c_1310713405.htm.

[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] CHEN B, YE Z G, CHEN C, et al. Toward a synthetic model for distribution system restoration and crew dispatch[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2228-2239.

[5] 朱晓荣，司　羽. 考虑物理-信息-交通网耦合的配电网多时段动态供电恢复策略[J]. 电工技术学报，2023，38(12)：3306-3320.
ZHU Xiaorong, SI Yu. Multi-period dynamic power supply restoration strategy considering physical-cyber-traffic network coupling[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(12): 3306-3320.

[6] 王　颖，祝士焱，许　寅，等. 考虑多类型储能协同的重要负荷恢复方法[J]. 电力自动化设备，2022，42(1)：72-78.
WANG Ying, ZHU Shiyan, XU Yin, et al. Critical load restoration method considering coordination of multiple types of energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 72-78.

[7] KIM J, DVORKIN Y. Enhancing distribution system resilience with mobile energy storage and microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 4996-5006.

[8] DING T, WANG Z K, JIA W H, et al. Multiperiod distribution system restoration with routing repair crews, mobile electric vehicles, and soft-open-point networked microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4795-4808.

[9] 刘　方，张　浩，杨　秀，等. 配电网多类型分布式资源辅助主网关键节点黑启动方案与实时调度策略[J]. 电网技术，2023，47(11)：4416-4427.
LIU Fang, ZHANG Hao, YANG Xiu, et al. Black start scheme and real-time scheduling strategy for key nodes of the main network assisted by multi-type distributed resources of the distribution network[J]. Power System Technology, 2023, 47(11): 4416-4427.

[10] LIU F, CHEN C, LIN C F, et al. Utilizing aggregated distributed renewable energy sources with control coordination for resilient distribution system restoration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2023, 14(2): 1043-1056.

[11] 李雨佳，殷文倩，龙覃飞，等. 多元不确定性环境下含海量资源电力系统的弹性提升技术[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3484-3496.
LI Yujia, YIN Wenqian, LONG Qinfei, et al. Review on resilience enhancement strategies for power systems with massive resources under multi-source uncertainties[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3484-3496.

[12] 俞拙非，刘　菲，刘瑞环，等. 面向配电网弹性提升的源网荷灵活资源优化研究综述及展望[J]. 中国电力，2022，55(4)：132-144.
YU Zhuofei, LIU Fei, LIU Ruihuan, et al. Resilience-oriented optimization of source-grid-load flexible resources in distribution systems: review and prospect[J]. Electric Power, 2022, 55(4): 132-144.

[13] LEI S B, WANG J H, CHEN C, et al. Mobile emergency generator pre-positioning and real-time allocation for resilient response to natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 2030-2041.

[14] 杨祺铭，李更丰，别朝红，等. 台风灾害下基于 V2G 的城市配电网弹性提升策略[J]. 电力系统自动化，2022，46(12)：130-139.
YANG Qiming, LI Gengfeng, BIE Zhaohong, et al. Vehicle-to-grid

based resilience promotion strategy for urban distribution network under typhoon disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(12): 130-139.

[15] 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.

[16] ZHANG Q Z, WANG Z Y, MA S S, et al. Stochastic pre-event preparation for enhancing resilience of distribution systems[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2021, 152: 111636.

[17] 何 俊，张博凯，甘德树，等. 计及台风的含高渗透率风电大电网多时间尺度防御调度策略[J]. 高电压技术，2023，49(4)：1724-1734.
HE Jun, ZHANG Bokai, GAN Deshu, et al. Multi-time scale defensive scheduling strategy for high wind power penetration grids under typhoon[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1724-1734.

[18] 周晓敏，葛少云，李 腾，等. 极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报，2018，38(2)：505-513.
ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(2): 505-513.

[19] 杭州市人民政府. 关于加强极端天气风险防范应对工作若干措施的意见[EB/OL]. (2022-01-13)[2023-07-11]. https://www.hangzhou.gov. cn/art/2022/1/13/art_1229285513_59047978. html.
Hangzhou People's Government. Opinions on strengthening the prevention and response of extreme weather risks[EB/OL]. (2022-01-13)[2023-07-11]. https://www.hangzhou.gov.cn/art/2022/1/13/art_1229285513_59047978.html.

[20] 蒋卓臻，向 月，刘俊勇，等. 集成电动汽车全轨迹空间的充电负荷建模及对配电网可靠性的影响[J]. 电网技术，2019，43(10)：3789-3799.
JIANG Zhuozhen, XIANG Yue, LIU Junyong, et al. Charging load modeling integrated with electric vehicle whole trajectory space and its impact on distribution network reliability[J]. Power System Technology, 2019, 43(10): 3789-3799.

[21] 孙 典. 基于公众风险感知的台风预警信息排程研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工程大学，2018.
SUN Dian. Research on typhoon disaster warning scheduling based on public risk perception[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2018.

[22] 杨祺铭，季陈林，刘友波，等. 多条公交线路的光储充电站日内滚动优化策略[J]. 智慧电力，2020，48(8)：44-50，90.
YANG Qiming, JI Chenlin, LIU Youbo, et al. Day-rolling optimization strategy for photovoltaic-energy storage charging station with multiple electric bus lines[J]. Smart Power, 2020, 48(8): 44-50, 90.

[23] 刘文彬，刘永刚，文祥宇，等. 基于需求响应的居民侧柔性负荷多目标优化研究[J]. 山东电力技术，2022，49(8)：42-49.
LIU Wenbin, LIU Yonggang, WEN Xiangyu, et al. Research on multi objective optimization of residential flexible loads based on demand response[J]. Shandong Electric Power, 2022, 49(8): 42-49.

[24] 刘一兵，吴文传，张伯明，等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报，2014，34(16)：2575-2583.
LIU Yibing, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575-2583.

[25] The International Council on Clean Transportation. Leading new energy vehicle city markets in China: a 2021 update[EB/OL]. (2022-11-14)[2023-05-22]. https://theicct.org/publication/ev-china-city-markets-2021-update-nov22/.

[26] 刘永梅，王金丽，杨红磊，等. 计及柔性负荷调节能力的有源配电网动态优化方法[J]. 高电压技术，2021，47(1)：73-80.
LIU Yongmei, WANG Jinli, YANG Honglei, et al. Dynamic optimal method of distribution network in consideration of flexible load adjustment capability[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(1): 73-80.

[27] 林 佳，陈 浩，寇伟宏，等. 极端天气下保底电网骨干网架优化及弹性提升方法[J]. 高电压技术，2023，49(4)：1591-1599.
LIN Jia, CHEN Hao, KOU Weihong, et al. Optimization and resilience enhancement method of core backbone network framework under extreme weather[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(4): 1591-1599.

[28] XIANG Y, JIANG Z Z, GU C H, et al. Electric vehicle charging in smart grid: a spatial-temporal simulation method[J]. Energy, 2019, 189: 116221.



李明昊
2000—，男，博士生
主要研究方向为电力系统规划与运行
E-mail: liminghao@stu.xjtu.edu.cn

LI Minghao
Ph.D. candidate



杨祺铭
1999—，男，硕士生
主要研究方向为电力系统恢复力、V2G 技术及其应用
E-mail: yangqiming13@gmail.com

YANG Qiming



李更丰(通信作者)
1984—，男，博士，教授，博导
主要研究方向为电力系统恢复力、综合能源系统可靠性评估
E-mail: gengfengli@xjtu.edu.cn

LI Gengfeng
Ph.D., Professor
Corresponding author



别朝红
1970—，女，博士，长江学者特聘教授，博导
主要研究方向为电力系统恢复力、能源互联网、电力系统规划与市场
E-mail: zhbie@mail.xjtu.edu.cn

BIE Zhaohong
Ph.D., Professor

收稿日期 2023-06-15 修回日期 2023-08-21 编辑 余洋洋

附录 A

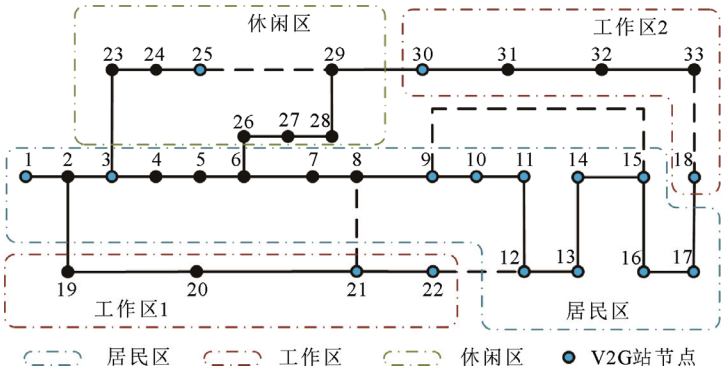


图 A1　改进 IEEE 33 节点系统示意图

Fig.A1　Schematic diagram of improved IEEE 33-node system

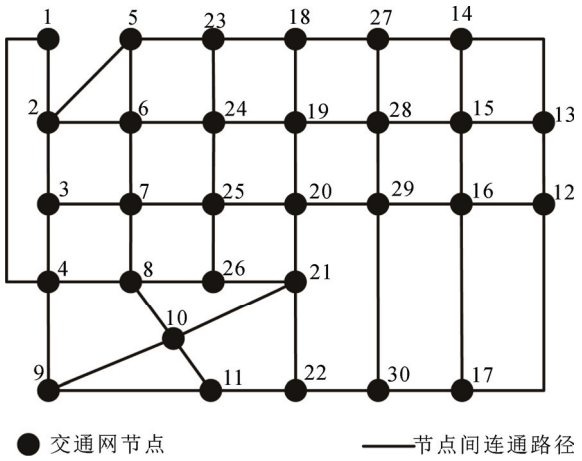


图 A2　30 节点交通网示意图

Fig.A2　Schematic diagram of 30-node transportation system

表 A1　负荷等级划分

Table A1　Classification of loads

负荷等级	节点编号
一级负荷	3、4、5、11、14、24、31
二级负荷	2、6、7、10、15、23、29、32、33
三级负荷	其他

表 A2　负荷类型比例分配

Table A2　Proportional distribution of load type

负荷等级	刚性负荷占比/%	柔性负荷占比/%	
		可中断负荷占比/%	可削减负荷占比/%
一级负荷	100	0	0
二级负荷	10	50	40
三级负荷	0	70	30

表 A3　MESS 参数配置

Table A3　Parameter configuration of MESS

参与调度数量/台	最大输出功率/kW	电源容量/(kW·h)
4	100	1000

表 A4　故障线路和应急仓库之间的交通距离(km)

Table A4　Traveling distance among damaged lines and emergency warehouse (km)

故障线路和应急仓库		故障线路					仓库位置 A	仓库位置 B
		28-29	6-7	2-19	14-15	8-9		
故障线路	28-29	0	7.75	7.55	4.9	11	6.25	13.45
	6-7	7.75	0	4.8	12.25	6.75	3.7	6
	2-19	7.55	4.8	0	9.05	8.25	3.7	5.9
	14-15	4.9	12.25	9.05	0	15.5	8.75	14.95
	8-9	11	6.75	8.25	15.5	0	9.6	5.25
应急仓库 A		6.25	3.7	3.7	8.75	9.6	0	—
应急仓库 B		13.45	6	5.9	14.95	5.25	—	0

表 A5　故障线路修复时间和修复所需资源

Table A5　Repair time and repair resources for damaged lines

花费需求	故障线路				
	28-29	6-7	2-19	14-15	8-9
修复时间/h	2	3.5	3	3.25	2.25
消耗资源	4	4	4	4	4

附录 B

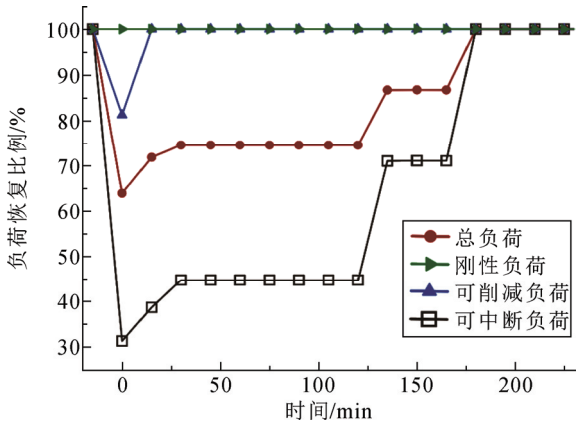


图 B1　方案 1 各类负荷恢复曲线

Fig.B1　Different sorts of load recovery curves in scheme 1

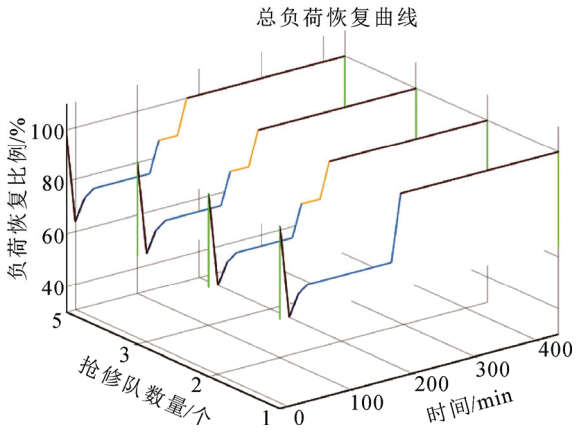


图 B2　不同抢修队数量下负荷恢复曲线

Fig.B2　Load recovery curves under different numbers of repair crews

表 B1　各方案调度策略

Table B1　Scheduling strategy of each scheme

方案编号	V2G 站返送总功率/MW	MESS 接入节点				抢修队修复顺序			应急仓库选址节点	灾后 3 h 内累计失电量/(MW·h)
		第 1 辆	第 2 辆	第 3 辆	第 4 辆	第 1 队	第 2 队	第 3 队		
1	0.9520	7	24	24	24	2-19 14-15	28-29 6-7	8-9 —	24	2.6172
2	0.9520	—	—	—	—	2-19 —	28-29 6-7	8-9 14-15	24	3.4651
3	0	7	18	18	18	2-19 —	28-29 6-7	8-9 14-15	24	4.8046
4	0.9520	32	25	32	18	8-9 —	2-19 14-15	28-29 6-7	1	2.8525

表 B2　各方案供电恢复对比

Table B2　Comparison of power supply recovery in each scheme

方案编号	各故障时段负荷恢复比例/%								负荷完全恢复所需时间/h	线路总抢修时间/h
	时刻 1		时刻 2		时刻 3		时刻 4			
	可削减	可中断	可削减	可中断	可削减	可中断	可削减	可中断		
1	81.2541	31.2865	100.000	44.681	100.000	71.1260	100.000	100.000	3.00	7.00
2	81.2541	31.2865	81.2541	31.2865	100.000	65.2050	100.000	100.000	3.00	7.25
3	31.6567	12.0821	59.5842	20.8183	94.1106	45.3959	100.000	77.3798	—	7.25
4	81.2541	31.2865	100.000	44.6810	100.000	82.5967	100.000	100.000	3.25	7.25

注：时刻 1：灾后 t=0 h，体现电动汽车 V2G 的紧急功率支撑效果；时刻 2：灾后 t=1 h，体现 MESS 全部接入节点以后的功率支撑效果；时刻 3：灾后 t=2.5 h，抢修队修好第一条故障线路；时刻 4：灾后 t=3.25 h，抢修队修好第二条故障线路。

表 B3　不同灾害发生时刻下恢复方案及指标

Table B3　Recovery scheme and index under different disaster occurrence time

灾害发生时刻	MESS 接入点				抢修队修复顺序			灾后 t=0 h 切负荷量/MW	灾后 3 h 内累计失电量/(MW·h)
	第 1 辆	第 2 辆	第 3 辆	第 4 辆	第 1 队	第 2 队	第 3 队		
06:00	7	32	24	24	28-29 6-7	8-9 —	2-19 14-15	1.3056	2.4813
14:00	7	18	18	24	2-19 8-9	6-7 —	28-29 14-15	1.8879	4.1722
20:00	7	7	24	24	2-19 14-15	28-29 —	8-9 6-7	1.2922	2.4463