第 52 卷 第 4 期：1724-1741 高电压技术 Vol.52, No.4: 1724-1741
2026 年 4 月 30 日 High Voltage Engineering April 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250642

“车-商-网”模式下面向配网弹性提升的分布式车网协同应急供电策略

周 政[1]，杨祺铭[2]，卞艺衡[1]，李明昊[1]，李更丰[1]，别朝红[1]
（1. 西安交通大学电气工程学院，西安 710049；2. 国网上海市电力公司浦东供电公司，上海 200122）

摘 要：台风等极端的自然灾害会对配网造成严重的破坏，给配网电力供应供带来挑战。而随着电动汽车(electric vehicle， EV)行业的发展、充放电网络运营商与 EV 用户联系的逐渐紧密，在灾后通过运营商引导 EV 可以使本不能直接与电网联系的 EV 参与到配网的应急供电中进而解决灾后电力供应不足的问题。该文提出了一种“车-商-网”模式下的车网分布式协同应急供电策略。首先，考虑 EV 用户、运营商和电网各主体间的交互机制，构建了“车-商-网”三层框架。其次，在此框架下，在灾前考虑 EV 的出行特性构建运营商对 EV 的预部署模型，并基于应急供电的模式以及不同 EV 用户群体的心理特性构建 EV 对应急供电的响应模型。在灾后考虑配网运行约束、拓扑约束以及 EV 参与应急供电的约束构建车网协同应急供电模型。然后，考虑电网与各个运营商间的独立性以及信息隐私，采用交替向量乘子法(alternating direction method of multipliers，ADMM)算法将车网协同应急供电模型解耦，构建电网与运营商的分布式优化模型。同时提出一种改进的 ADMM 算法来解决 01 变量造成算法难以收敛的问题。最后，通过算例证明该文提出的方法可以在保证各主体独立性的前提下实现多个运营商引导 EV 与配网协同应急供电，提升配网弹性。

关键词：电动汽车 V2G；弹性配电网；配网重构；交替向量乘子法；分布式控制策略

Distributed Vehicle-grid Collaborative Emergency Power Supply Strategy for Distribution Network Resilience Enhancement Under Vehicle-operator-grid Framework

ZHOU Zheng[1], YANG Qiming[2], BIAN Yiheng[1], LI Minghao[1], LI Gengfeng[1], BIE Zhaohong[1]
(1. School of Electrical Engineering, Xi’an Jiaotong University, Xi’an 710049, China;
2. State Grid Shanghai Pudong Electric Power Supply Company, Shanghai 200122, China)

Abstract：Extreme natural disasters such as typhoons can cause severe damages to distribution networks, posing significant challenges to power supply. With the development of the electric vehicle (EV) industry and the increasingly close connection between charging/discharging network operators and EV users, operators can guide EVs that would not be able to directly interact with the grid to participate in emergency power supply, thereby addressing power shortages. This paper proposes a distributed vehicle-grid collaborative emergency power supply strategy under the “Vehicle-operator-grid” framework. First, by considering the interaction mechanisms among EV users, operators, and the grid, a three-layer “Vehicle-operator-grid” framework is established. Second, in this framework, a pre-disaster EV deployment model for operators is constructed considering EV travel patterns. And an emergency power supply response model for EVs is constructed based on the emergency power supply mode and the psychological characteristics of different EV user groups. After disasters, the operational constraints of the distribution network, topological constraints, and constraints on EV participation in emergency power supply are taken into consideration, and a vehicle-grid collaborative emergency power supply model is constructed. Then, considering the independence and data privacy between the grid and operators, we use the alternating direction method of multipliers (ADMM) algorithm to decouple the vehicle-grid collaborative emergency power supply model and construct a distributed optimization model for the grid and operators. An improved ADMM algorithm is also proposed to address convergence difficulties caused by binary variables. Finally, case studies demonstrate that the proposed method enables multiple operators to guide EVs in coordinated emergency power supply with the distribution network while preserving the autonomy of all parties, thereby enhancing the resilience of the distribution network.

基金资助项目：国家自然科学基金(52407141；52222705；U23B60006)。
Project supported by National Natural Science Foundation of China(52407141, 52222705, U23B60006).

Key words: electric vehicle V2G; resilient distribution network; distribution network reconfiguration; ADMM; distributed control strategy

0　引言

台风等极端自然灾害会对配电网造成严重的破坏，进而影响城市的电力供给，给社会造成重大的经济损失[1]。采取相应的措施来增强电力系统抵御、适应和有效恢复这类极端事件的能力，提升电力系统的弹性十分关键[2-3]。

要加强极端情况下应急供电体系建设，尤需建立健全的政府、行业和社会协同参与的大面积停电应急机制。已有电动汽车企业与政府签订应急供电协议，在自然灾害发生时利用其销售点内的纯电动汽车为重要设施提供紧急电力支撑。近年来随着电动汽车(electric vehicle, EV)行业的发展，EV 的数量迅速增长，比亚迪、蔚来等各种电动汽车企业作为充放电网络的运营商与 EV 用户的结合更加紧密，互动也更加便捷。在上述的背景下，研究 EV 在充放电运营商的引导下与配电网协同应急供电以提升配电网的弹性十分必要。

EV 作为应急供电资源可以通过车辆并网(vehicle to grid, V2G)的形式与配电网进行车网互动，同时与电网中的灵活资源相配合参与到配电网灾后的供电恢复之中。这被视为提升配电网的弹性的有效手段[4-5]，当前学者已经进对上述问题展开较多的研究。文献[6-8]具体介绍了通过配电网中的分布式发电机，远动开关等资源重构网络恢复负荷的方法。文献[9-14]中提出在灾后通过引导电动汽车反向供电并配合灵活资源，可以进一步提升配电网的恢复能力。文献[9]考虑 EV 用户的出行特性以及对激励的响应引导 EV 参与配网供电，设计了基于 V2G 的配网弹性提升策略。文献[10]提出了一种综合考虑 EV 的调度以及配电网重构的恢复方法。文献[11]将电动汽车与抢修队、移动储能等综合考虑，提出了多分布式资源协同的恢复策略。文献[12-14]则聚焦于电动汽车在车网互动中的调控方式，分别采用二次调度、灾前部署和换电式调度的方式调控 EV 参与配网供电，以实现更好的恢复效果。

上述的研究中把 EV 视作一种属于配电网的灵活资源采用集中式控制的方法调控。然而 EV 的调控是由运营商完成的，不同运营商之间、运营商与电网之间是独立的主体。它们各自的行为逻辑独立，信息无法共享。同时，V2G 网络中的 EV 面临着隐私和安全威胁[15-16]，运营商也不可以将 EV 用户的车辆信息数据外泄。因此，这种电网全知全能模式下的集中式控制方法并不合适。

分布式控制方法在解决车网互动问题中已经有较为广泛的应用。文献[17-18]从通讯压力和隐私保护的角度考虑，将每个电动汽车视为主体采用分布式优化策略解决电动汽车充电调度问题。文献[19]考虑到 EV 用户侧与微网侧的博弈，采用分布式充电控制方法对 EV 的充电行为进行有效的优化和管理。文献[20]从充放电运营商的层面提出了一种基于电动汽车群的分布式 EV 充电控制方法,在满足 EV 用户需求的同时平滑负荷曲线。文献[21]则提出了兼顾 EV 用户，电网以及运营商各个主体利益的分布式优化模型。然而上述的研究仅考虑到了日常情况的 EV 调控，并未考虑到极端场景中运营商引导下的车网协同应急供电问题。同时，车网互动的模型中包含开关开通闭合、车辆停动等大量的 01 变量。这些 01 变量会造成问题非凸，进而使得分布式算法求解难以保证收敛。文献[22-23]提出一种循环迭代的交替向量乘子法（iterative loop method based on alternating direction method of multipliers，ILM-ADMM）算法，采用松弛-固定 01 变量-优化的流程求解非凸问题。但是这种方法求解某些问题时松弛阶段获取的边界变量的值在固定 01 变量阶段可能会违反子问题的约束，并不能保证可行性。文献[24]提出了一种同时提出了一种基于双层交替迭代(bi-level alternating iteration，BLAI)的自适应 ADMM 算法，设计外层迭代获取可行且较优的边界变量。然而此方法虽能保证算法收敛，但由于获取边界变量的过程没有完全协调全局，若不调参无法保证解的质量。

针对上述的问题，本文在台风灾害场景下充分考虑电动汽车、充放电网络运营商和供电公司之间的关系，提出了一种“车-商-网”模式下的分布式车网协同应急供电策略。本文的贡献主要包括：(1)构建了一个“车-商-网”三层框架，并创新性地采用分布式策略解决灾后多个运营商引导 EV 与配电网协同应急供电的问题，在符合各主体独立性的客观事实的同时也保护了 EV 用户的数据隐私；(2)考

虑不同 EV 用户在响应意愿、行为等方面的差异性，设计了不同的应急供电方案供 EV 用户选择，进而充分发掘了 EV 的供电潜力以满足配电网的供电需求；(3)本文提出了一种改进的交替向量乘子法(alternating direction method of multipliers，ADMM)算法求解车网协同供电的耦合模型，解决了大量 01 变量造成 ADMM 算法难以收敛的问题，并得到了十分接近理想的集中式算法的负荷恢复效果。

1 问题陈述

台风等极端的自然灾害会对主网和配网中的架空线造成多处破坏从而严重影响电力供应。在充放电网络高度市场化的背景下，电网可以与充放电网络运营商签订协议，进而利用运营商引导 EV 参与应急供电并与配网中的灵活资源协同恢复配网的负荷。因此研究这种“车-商-网”模式下的车网协同应急供电问题对配网弹性的提升十分必要。

本文构建了一个“车-商-网”框架，并在此基础上提出了一种车网协同分布式应急供电策略。“车-商-网”之间的交互机制如图 1 所示。在路网层面，通过智能终端，EV 用户可以与运营商进行便捷的信息交互。每个运营商可以掌握其服务 EV 用户的车辆数据信息，每个 EV 也可以接收运营商相应的调控指令；在运营商层面，运营商为其服务的 EV 用户提供简单、灵活两种应急供电方案，并对响应的 EV 用户进行相应调控。同时，运营商在保护 EV 用户的数据隐私的前提下与电网进行有限信息交互；在电网层面，电力系统调度中心一方面调控电网中的分布式电源、远动开关等灵活资源，一方面与每个运营商进行有限的信息交互，协调各个运营商引导 EV 参与应急供电。

在台风灾害发生前，供电公司向运营商传达应急供电的需求以及具体的补偿标准。每个运营商为其服务的 EV 提供应急供电方案，响应应急供电的 EV 在运营商的引导下预部署在相应的 V2G 站以及集中停放点处。在台风灾害发生后，配电网与多个运营商调控下的 EV 进行分布式车网协同应急供电：一方面在电网侧，配电网利用自身的分布式电源、远动开关等进行配电网重构，形成由分布式电源配合新能源供电的多个微电网。另一方面在 EV 侧，响应简单供电方案的 EV 在其所预部署的 V2G 站以固定的功率持续向配电网进行反向供电；响应灵活供电方案的 EV 则从集中停放点出发，在其运营商的调控下以多个车队的形式前往指定的 V2G 站进行电力供应，并在后续的时间段按照指令在不同 V2G 站间灵活调度。各个运营商与配电网之间通过每个 V2G 站处的边界信息交互进行分布式独立优化求解，并在多次迭代后得出最优恢复方案。

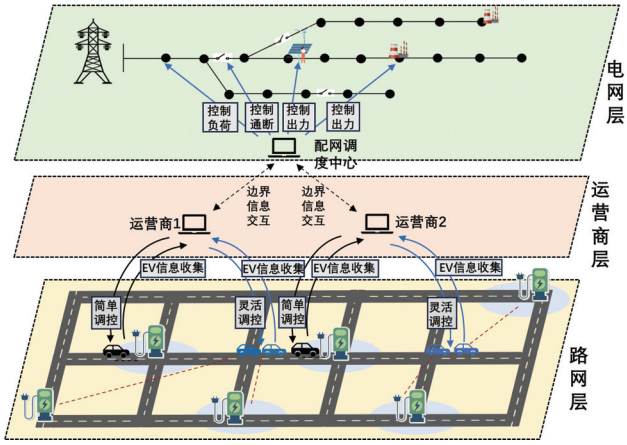


图 1 “车-商-网”之间的交互机制

Fig.1 Interaction mechanism of the “vehicle-operator-grid” framework

在此说明，考虑到城市交通网络节点间路径和关键通信链路的冗余性，台风对交通和通讯的影响是有限的。因此在本文的研究中忽略台风灾害对道路交通和信息通讯系统的影响。

2 灾前阶段“EV-运营商-电网”各主体交互行为建模

在台风灾害发生之前需对 EV 进行预先调度部署以此为灾后阶段的应急供电做准备。首先，电网对运营商发布具体的补偿标准；之后，运营商对 EV 进行预调度，EV 基于补偿力度对运营商的调度做出响应。其中具体的价格补偿模型、对 EV 的预调度模型和 EV 的响应模型如下。

2.1 电网对运营商及 EV 价格补偿

整个应急供电的过程中运营商以及电动汽车的行为是为了配电网的负荷能够有更好的恢复效果，因此供电公司需要对与其签订协议的运营商以及参与应急供电的 EV 用户进行相应的补偿。供电公司的总补偿可以表示如下：

$$C_{\text{sum}} = \sum_r C_{1r} + \sum_r C_{2r} \tag{1}$$

$$C_{2r} = \sum_j C_{2r}^j + \sum_j X_{2r}^j \tag{2}$$

式中：C_{1r} 表示每个与供电公司签订协议参与应急供电的运营商 r 的服务费；C_{2r} 表示对运营商 r 下响

应应急供电的所有 EV 用户进行的总补偿，其中对每个用户的补偿由一次性补偿与电量补偿构成；C_{2r}^{j} 指对响应运营商 r 的EV用户 j 进行的一次性补偿。C_{2r}^{j} 的大小由供电公司确定，其会影响到 EV 用户对应急供电的响应意愿。对参与不同应急供电模式(简单应急供电与灵活应急供电)的 EV 用户，C_{2r}^{j} 的大小不同；X_{2r}^{j} 指对响应运营商 r 的 EV 用户 j 的电量补偿，即对 EV 用户在灾后应急供电阶段向配电网反向供应的电量按照充电电价补偿给 EV 用户。

假设供电公司对参与两种应急供电模式 EV 用户的一次性补偿标准在灾害发生之前已经确定，即 C_{2r}^{j} 为固定的值。最终补偿会由供电公司在灾后发放给各个运营商，并由运营商分发给参与应急供电的 EV 用户。

2.2　运营商对 EV 灾前预调度

灾前阶段，每个运营商会为响应应急供电的EV提供简单、灵活的两种供电方案。在运营商的指引下，选择简单供电方案的 EV 前往距离其位置最近的 V2G 站等待反向供电，而选择灵活供电模式的 EV 则按指令前往相应运营商的集中停放点待命。

2.2.1　路网建模

首先对路网进行建模。城市的路网多以环形网络为主，结构复杂且具备较高的连通性。可以将路网的拓扑结构建模为路网节点集合 N_{R} 与连接路网节点的边的集合 C_{R} 构成的无向图 G_{R}：

$$G_{\mathrm{R}}=(N_{\mathrm{R}},C_{\mathrm{R}}) \tag{3}$$

进行路网建模时，保证所有电网中 V2G 站的节点在路网模型中都有与其相对应的路网节点即可，并不需要每一个电网节点都与路网节点存在映射关系。同时为了方便后续 EV 调度的建模，对路网的边 C_{R} 进行等长处理，即使路网模型中所有边的长度是相同的。对于实际中连接两个路网节点的边长短不同的情况，可以根据道路长短情况在两个路网节点之间插入一至多个虚拟路网节点 N'_{R}，最终构成新的路网无向图：

$$G'_{\mathrm{R}}=(N'_{\mathrm{R}},C'_{\mathrm{R}}) \tag{4}$$

2.2.2　路网中 EV 灾前状态建模

通过文章[25-26]中出行链的方法对路网中 EV 灾前的运动特性进行刻画，由此模拟得出灾前 EV 在路网中的位置信息以及电量信息。

将路网分区为居住区、商业区和工作区，并将所有路网节点划分到相应的分区中。进一步，构造居住区-工作区-商业区的复杂链和居住区-工作区的简单链。每条出行链 L 表示如下：

$$L=\{T_{\mathrm{start}},T_{\mathrm{end}},t_{\mathrm{stay}},t_{0\mathrm{f}},L_{\mathrm{start}},L_{\mathrm{end}},L_{\mathrm{path}},l_{\mathrm{lenth}}\} \tag{5}$$

式中：T_{start}、T_{end}、t_{stay}、$t_{0\mathrm{f}}$、l_{lenth} 分别指出行链中每一段路的出发时刻、到达时刻、停驻时长、行驶时长和该段路的长度；L_{start}、L_{end}、L_{path} 分别指整条出行链的起点、终点和行驶路径。其中在起点与终点确定后，两点间行驶路径用 Floyd 最短路径算法确定。对于行驶路径中的每一段路，有：

$$T_{\mathrm{end},x}=T_{\mathrm{start},x}+t_{0\mathrm{f},x} \tag{6}$$

$$T_{\mathrm{start},x+1}=T_{\mathrm{end},x}+T_{\mathrm{stay},x} \tag{7}$$

$$C_{\mathrm{rem},T_{\mathrm{start},x}}=(C_{\mathrm{rem},T_{\mathrm{end},x}}-l_{\mathrm{lenth},x}\cdot p) \tag{8}$$

$$C_{\mathrm{rem},T_{\mathrm{end},x}}=C_{\mathrm{rem},T_{\mathrm{start},x+1}} \tag{9}$$

式中：下标 x 表示一条出行链中的第 x 段路。式(6)和式(7)表示每一段路的到达时刻等于出发的时刻加行驶花费的时间，出发的时刻等于上一段路的到达时刻加停留时间。由于在路网模型中每条边长相同，在假设所有车速相同的前提下，所有路段的行驶时间也相同。式(8)表示 EV 在每段路终点的电量等于其起点的电量减路程所消耗的电量。式(9)表示车辆停留后电量保持不变。每辆 EV 的实时状态模型可以表示为：

$$E_{\mathrm{Vstate}}=\{C_{\mathrm{rem},t},S_t\} \tag{10}$$

式中：$C_{\mathrm{rem},t}$ 为 t 时刻 EV 剩余的电量；S_t 为 t 时刻 EV 的位置。根据美国国家公路安全管理局公布的用户出行统计结论，EV 的出发时间符合正态分布。在进行出行链模拟的过程中，每辆 EV 的出发时间从遵循如下正态分布的出行时间样本中随机抽样生成：

$$f(t_n)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left(-\frac{(t_n-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \tag{11}$$

式中：μ、σ^2 分别为统计结论中 EV 出发时刻的平均值与方差；t_n 为模拟得出的第 n 辆 EV 的出行时间。通过式(5)—(11)可以刻画出电动汽车灾前在路网中的行驶状态，并在灾前通过出行链模拟得到EV在路网中的位置与剩余电量。

2.2.3　EV 灾前预备模型

为保证应急供电的效果，每辆响应应急供电的电动汽车需要经过电量筛选。只有剩余电量允许在配网恢复供电的过程中持续反向充电的 EV 才可以参与应急供电，即：

$$\begin{cases} E_{n,1}^{r} = C_{n,\mathrm{rem}} \\ E_{n,1}^{r} \geq E^{\min} \end{cases} \tag{12}$$

式中：$E_{n,1}^{r}$为响应运营商r的第n辆 EV 初始时刻剩余的电量；$C_{n,\mathrm{rem}}$为出行链模拟得到的第n辆 EV 的剩余电量；$E^{\min}$为满足电量筛选要求 EV 的最低电量。经过电量筛选后，EV 用户自主选择响应简单或灵活的应急供电模式，并在运营商的引导下分别前往距离其当前位置最近的 V2G 站或指定的集中停放点处。这样，响应应急供电的 EV 便在灾前部署在相应位置并等待下一步的调度。

2.3 EV 对应急供电模式的响应

EV 用户对应急供电的响应情况与一次性补偿力度的大小关系密切[27]。下面引入基于消费心理学的激励-放电响应过程模型[9,28]来刻画一次性补偿力度大小对 EV 用户响应配电网应急供电概率的影响。每辆车一次性补偿的定价X_n与该 EV 响应应急供电的概率ρ_n之间的关系可表示为：

$$\rho_n = f_{\mathrm{m}}(X_n) \tag{13}$$

$$f_{\mathrm{m}}(X_n)^{\mathrm{down}} \leq f_{\mathrm{m}}(X_n) \leq f_{\mathrm{m}}(X_n)^{\mathrm{up}} \tag{14}$$

$$\begin{cases} f_{\mathrm{m}}(X_n)^{\mathrm{down}} = (X_n - X_{\mathrm{down}}^{\min}) / (X^{\max} - X_{\mathrm{down}}^{\min}) \\ f_{\mathrm{m}}(X_n)^{\mathrm{up}} = (X_n - X_{\mathrm{up}}^{\min}) / (X^{\max} - X_{\mathrm{up}}^{\min}) \end{cases} \tag{15}$$

式中：f_{m}为 EV 响应应急供电的概率函数；$X_{\mathrm{down}}^{\min}$、$X_{\mathrm{up}}^{\min}$分别指 EV 响应应急供电概率的下边界与上边界大于 0 时，一次性补偿定价的最小值；$X^{\max}$指 EV 响应应急供电的概率达到 1 时，一次性补偿定价的最小值。

式(13)表示在X_n补偿水平下电动汽车n响应应急供电的概率为ρ_n；式(14)表示每辆 EV 响应应急供电的概率会在$f_{\mathrm{m}}(X_n)^{\mathrm{down}}$到$f_{\mathrm{m}}(X_n)^{\mathrm{up}}$之间波动；$f_{\mathrm{m}}(X_n)^{\mathrm{down}}$与$f_{\mathrm{m}}(X_n)^{\mathrm{up}}$可以用式(15)中的线性模型描述，其中$f_{\mathrm{m}}$与 EV 用户群体的类型以及应急供电的模式有关。

道路中 EV 用户群体可分为两类：以盈利为目的的网约车、出租车 EV 用户以及非盈利目的的私家车 EV 用户。为刻画两种用户群体对不同应急供电方案响应的差异性，本文做出如下假设：(1)网约车、出租车用户对同种类型应急供电的响应会比私家车用户积极；(2) 在同等激励水平下，EV 用户会更倾向于选择简单应急供电方案。以此为依据确定两种 EV 用户群体对不同应急供电方案响应概率函数f_{m}的具体参数。在经济激励水平给定的条件下，便可确定两种电动汽车群体对不同应急供电模式的响应概率的波动范围，如图 2 所示。

在图中的经济激励水平下，网约车 EV 用户响应简单供电模式的概率会在短点线与左边的虚线相交的区域内上下波动，响应复杂供电模式的概率会在实线与左边的虚线相交的区域内上下波动。私家车 EV 用户同理。对于每一个 EV 用户，其最终响应概率为两种供电模式下较大的响应概率，响应的模式为响应概率更大的模式。采用上述模型，最终可以得知每个运营商下 EV 用户对简单供电模式与灵活供电模式的响应情况。

3 灾后阶段车网协同应急供电模型

灾后阶段指台风灾害强度下降至不再对配电网具有破坏能力的时间之后。此阶段基于配电网线路具体破坏情况进行车网协同应急供电，以此恢复失电负荷。其中车网协同应急供电模型具体包括运营商引导下的 EV 应急供电模型和配电网的重构恢复模型。

3.1 运营商引导下的 EV 参与应急供电模型

与电网签订应急供电协议的运营商不只一个，每个运营商下都有响应简单供电模式的 EV 和响应灵活供电模式的 EV。灾后阶段，每个运营商调控两种模式下的 EV 参与应急供电的模型如下。

3.1.1 简单供电模式下 EV 应急供电模型

响应简单供电模式的 EV 灾前部署在相应的 V2G 站处。在灾后应急供电阶段开始后，便在运营商的引导下持续向 V2G 站以额定的功率反向供电。

$$N_{k,r,t}^{\mathrm{v2g1}} = N_{k,r,0}^{\mathrm{v2g1}} \tag{16}$$

$$P_{r,k,t}^{\mathrm{v2g1}} = \sum_{n \in N_{k,r,t}^{\mathrm{v2g1}}} P_n^{\mathrm{EV}} \tag{17}$$

式中：$N_{k,r,0}^{\mathrm{v2g1}}$指电量筛选后响应运营商$r$的简单应急

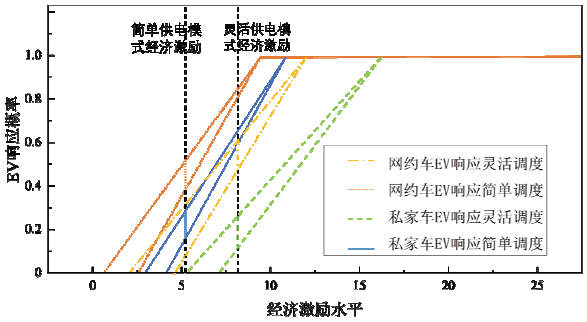


图 2 EV 用户对应急供电的响应概率

Fig.2 Response probability of EV users to emergency power supply

供电模式并前往路网节点k处V2G站的EV数量；$N_{k,r,t}^{\mathrm{v2gl}}$指灾后$t$时间在路网节点$k$处V2G站中响应运营商$r$简单应急供电模式的EV数量；$P_{k,r,t}^{\mathrm{v2gl}}$指$t$时间路网节点$k$处V2G站中响应运营商$r$简单供电模式的EV反向充电的总功率；$P_n^{\mathrm{EV}}$指电动汽车$n$反向充电的额定功率。式(16)指响应简单供电模式的EV在应急供电期间一直停留在预部署的V2G站处；式(17)是简单供电模式下电动汽车参与配电网反向充电的约束，每辆电动汽车以额定功率持续向电网进行反向供电。

3.1.2　灵活供电模式下EV应急供电模型

运营商可以实时获取每辆EV的车辆信息，并通过信息平台向电动汽车传递调度指令。因此在灾后应急供电阶段对每个运营商下响应灵活供电模式的EV，采用如下集中灵活的调控方式。

$$\sum_{k\in N_{\mathrm{R}}^r} S_{k,n,t}^r + \sum_{l\in C_{\mathrm{R}}^r} M_{l,n,t}^r = 1 \tag{18}$$

$$S_{k,n,t}^r + \sum_{l\in\eta(k)} M_{l,n,t}^r = S_{k,n,t+1}^r + \sum_{l\in\gamma(k)} M_{l,n,t+1}^r \tag{19}$$

$$\varphi_{k,n,t}^r \le S_{k,n,t}^r, \forall n, \forall t, \forall r, \forall k \tag{20}$$

$$0 \le P_{k,n,t}^r \le \varphi_{k,n,t}^r \cdot \theta(k) \cdot P_n^{\mathrm{EV}} \tag{21}$$

$$\begin{cases} \sum\limits_{n\in N_{k,r,t}^{\mathrm{v2g2}}} \varphi_{k,n,t}^r = N_{k,r,t}^{\mathrm{v2g2}} \\ N_{k,r,t}^{\mathrm{v2g2}} + N_{k,r,t}^{\mathrm{v2gl}} \le N_{k,r}^{\max} \end{cases} \tag{22}$$

$$E_{n,t+1}^r = E_{n,t}^r - \sum_{k\in N_{R'}} P_{k,n,t}^r - \sum_{l\in C_{R'}} M_{l,n,t}^r \cdot P_{\mathrm{move}} \tag{23}$$

$$P_{r,k,t}^{\mathrm{v2g2}} = \sum_n P_{k,n,t}^r, \forall t, \forall r, \forall k \tag{24}$$

式中：$S_{k,n,t}^r$，$M_{l,n,t}^r$分别指t时间响应运营商r灵活供电模式的第n辆电动汽车在节点k停驻与道路l上移动的状态；$\eta(k)$指以节点k为末端的路径l的集合；$\gamma(k)$指以节点k为始端的路径l的集合；$\varphi_{k,n,t}^r$指第n辆EV在t时间的反向充电状态；$P_{k,n,t}^r$指第n辆EV在t时间向节点k充电的功率；$\theta(k)$指路网节点k上是否安装了V2G站；$N_{k,r,t}^{\mathrm{v2g2}}$指$t$时间在节点$k$处的V2G站同时充电的响应运营商$r$灵活供电模式的EV数量；$N_{k,r}^{\max}$指每个V2G站处允许运营商$r$下EV同时充电的数量；$E_{n,t}^r$指第$n$辆EV在$t$时间段开始时剩余的电量；$P_{\mathrm{move}}$指EV行驶每一段路的耗电量；$P_{r,k,t}^{\mathrm{v2g2}}$指$t$时间运营商$r$下所有响应灵活供电模式的EV对路网节点$k$处V2G站反向充电的总功率。

式(18)限制每辆车同一时间段只能在一条路段上行驶或在一个路网节点上停留；式(19)限制一辆车在相邻的时间段之间，从一个节出发只能在与该节点相连的道路上移动或继续停留在该节点，从一条道路上移动只能在该道路的终点停留或继续在以该条道路终点作为起点的道路上移动；式(20)和式(21)限制电动汽车只有在某一节点处停留且该节点安装了V2G站时才能向该节点供电；在此说明，式(21)中灵活供电模式下的EV在某一时间段内的充电功率可以小于额定功率，实现方式为EV仅在该时间段内的一部分时间以P_n^{EV}反向充电。式(22)限制每个运营商下的EV在k节点处的V2G站中同时充电的最大数量；式(23)表示电动汽车移动和反向充电会造成其电量变化；式(24)表示灵活供电模式下的EV在V2G站处反向充电的功率全部输送给配电网。

在上述约束条件下，每个运营商根据EV在路网中的实时情况引导其前往相应的V2G站点进行反向充电，并在不同V2G站之间进行调度以满足上层配电网供电恢复的需求。

3.2　配电网重构恢复模型

台风灾害对主配网中的架空线造成多处破坏，使得主网难以向配电网供电、配电网的多条线路发生故障。在相应的故障被隔离后，通过控制远动开关将配电网重构形成多个微电网。每个微电网中的分布式电源配合新能源，V2G站进行紧急功率支撑，从而在完全恢复供电之前恢复尽可能多的负荷。在配电网重构恢复的过程中需要满足系统的运行约束和网络的拓扑约束。

3.2.1　运行约束

含远动开关，分布式电源，新能源，V2G站的配电网在运行过程中主要包含以下约束：

$$P_{i,t}^{\mathrm{W}} + \sum_r P'^{\mathrm{v2gl}}_{r,i,t} + \sum_r P'^{\mathrm{v2g2}}_{r,i,t} + P_{\mathrm{DG},i,t} - P_{i,t}^{\mathrm{L}} = \sum_{j\in\sigma(i)} H_{i,j,t} - \sum_{k\in\varepsilon(i)} H_{k,i,t} \tag{25}$$

$$P'^{\mathrm{v2gl}}_{r,i,t} = P_{r,k,t}^{\mathrm{v2gl}}, i = \nu(k) \tag{26}$$

$$P'^{\mathrm{v2g2}}_{r,i,t} = P_{r,k,t}^{\mathrm{v2g2}}, i = \nu(k) \tag{27}$$

$$P_{k,\min}^{\mathrm{v2g}} \le \sum_{r\in R} P'^{\mathrm{v2g2}}_{r,k,t} + \sum_{r\in R} P'^{\mathrm{v2gl}}_{r,k,t} \le P_{k,\max}^{\mathrm{v2g}} \tag{28}$$

$$Q_{\mathrm{DG},i,t} - Q_{i,t}^{\mathrm{L}} = \sum_{j\in\sigma(i)} G_{i,j,t} - \sum_{k\in\varepsilon(i)} G_{k,i,t} \tag{29}$$

$$\begin{cases} U_{i,t}-U_{j,t}\le \dfrac{(r_{i,j}H_{i,j,t}+x_{i,j}G_{i,j,t})}{U_0}+M\left(1-c_{i,j,t}\right) \\ -S_{\max}c_{i,j,t}\le H_{i,j,t}\le S_{\max}c_{i,j,t} \\ U_{i,t}-U_{j,t}\ge \dfrac{(r_{i,j}H_{i,j,t}+x_{i,j}G_{i,j,t})}{U_0}-M\left(1-c_{i,j,t}\right) \\ -S_{\max}c_{i,j,t}\le G_{i,j,t}\le S_{\max}c_{i,j,t} \end{cases} \tag{30}$$

$$U_{i\min}\le U_{i,t}\le U_{i\max} \tag{31}$$

$$\begin{cases} P_{\mathrm{DG}i\min}\le P_{\mathrm{DG},i,t}\le P_{\mathrm{DG}i\max} \\ Q_{\mathrm{DG}i\min}\le Q_{\mathrm{DG}i,t}\le Q_{\mathrm{DG}i\max} \end{cases} \tag{32}$$

$$\begin{cases} P_{i\min}^{\mathrm{L}}\le P_{i,t}^{\mathrm{L}}\le P_{i\max}^{\mathrm{L}} \\ Q_{i\min}^{\mathrm{L}}\le Q_{i,t}^{\mathrm{L}}\le Q_{i\max}^{\mathrm{L}} \end{cases} \tag{33}$$

$$0\le P_{i,t}^{\mathrm{W}}\le P_{i,t}^{\mathrm{W,max}} \tag{34}$$

式中：$P_{r,i,t}^{\mathrm{v2g1}}$、$P_{r,i,t}^{\mathrm{v2g2}}$分别指电网节点$i$处V2G站响应运营商$r$简单供电模式EV的总供电功率和灵活供电模式EV的总供电功率；R表示所有运营商r的集合；$\sigma(i)$指以i为始端节点线路的始端节点集合；$\varepsilon(i)$指以i为末端节点线路的末端节点集合；$\nu(k)$指路网节点k在电网中的节点编号；$P_{k,\min}^{\mathrm{v2g}}$、$P_{k,\max}^{\mathrm{v2g}}$分别指路网节点$k$处V2G站的反充功率最小最大限制；$P_{i,t}^{\mathrm{W}}$、$P_{\mathrm{DG},i,t}$分别指节点$i$上新能源与分布式电源的有功出力；$P_{i,t}^{\mathrm{L}}$、$Q_{i,t}^{\mathrm{L}}$指节点$i$上的有功无功负荷；$H_{i,j,t}$、$G_{i,j,t}$指线路上流过的有功无功功率；$M$是一个足够大的常数；$c_{i,j,t}$指线路的开通闭合状态；$S_{\max}$指线路的容量；$x_{i,j}$、$r_{i,j}$指线路的阻抗；$U_{i,t}$指节点的电压；$U_0$指基准电压；$U_{i\min}$、$U_{i\max}$是节点$i$处电压的最小最大限制；$P_{\mathrm{DG}i\min}$、$P_{\mathrm{DG}i\max}$和$Q_{\mathrm{DG}i\min}$、$Q_{\mathrm{DG}i\max}$分别指节点$i$上的分布式电源有功无功出力的最小最大限制；$P_{i\min}^{\mathrm{L}}$、$P_{i\max}^{\mathrm{L}}$和$Q_{i\min}^{\mathrm{L}}$、$Q_{i\max}^{\mathrm{L}}$分别指节点$i$上的有功无功负荷的最小最大限制；$P_{i,t}^{\mathrm{W,max}}$指节点$i$上新能源电源在t时段的最大出力。

式(25)是节点的有功功率平衡约束；式(26)和式(27)是V2G站在路网与电网间的耦合约束；式(28)是每个V2G站允许的最大反向充电功率约束；式(29)是节点的无功功率平衡约束；式(30)是采用线性化配网潮流模型建立的相邻节点电压与线路上潮流的关系约束；式(31)是节点电压大小约束；式(32)是分布式电源有功无功出力约束；式(33)是节点负荷大小约束；式(34)是新能源出力约束。

3.2.2 拓扑约束

配电网重构形成微电网的过程中，需要保证每个微电网的连通性以及拓扑结构的辐射性。可以采用单商品流的方法实现，相应的约束条件如下：

$$\sum_{(i,j)\epsilon L_{\mathrm{E}}}c_{i,j,t}=N_{\mathrm{E}}-\sum_{i\in N_{\mathrm{E}}}\delta_{i,\mathrm{DG}}-\kappa,\forall t \tag{35}$$

$$\sum_{j\in\sigma(i)}F_{i,j,t}-\sum_{k\in\varepsilon(i)}F_{k,i,t}=W_i-1,\forall t \tag{36}$$

$$-Mc_{i,j,t}\le F_{i,j,t}\le Mc_{i,j,t},\forall t \tag{37}$$

$$\begin{cases} W_i\gg 1,\delta_{i,\mathrm{DG}}=1 \\ W_i=0,\delta_{i,\mathrm{DG}}=0 \end{cases} \tag{38}$$

式中：L_{E}指配电网中的所有线路的集合；N_{E}指配电网所有节点的数目；$\delta_{i,\mathrm{DG}}$指在节点i上是否分配了分布式电源；κ指因拓扑破坏形成不含分布式电源的孤岛数目；$F_{i,j,t}$指t时段线路上流过的虚拟潮流；W_i是节点i上虚拟电源的出力。式(35)指所有闭合开关数目等于节点数目减去给定子图数目；式(36)是每个节点的虚拟功率平衡约束；式(37)指只有线路是连通状态时才能流过虚拟功率；式(38)指只有分别配了分布式电源的节点才能发出虚拟功率。

3.3 灾后阶段车网协同应急供电模型的目标函数

本问题目标为在配网故障完全恢复前使得台风灾害对配电网负荷造成的经济损失达到最小同时控制应急供电成本。目标函数可表示为：

$$\begin{cases} \max f=\displaystyle\sum_{i\in N_{\mathrm{E}}}\sum_{t\in T}\partial_{\mathrm{L}}\cdot w_i\cdot P_{i,t}^{\mathrm{L}}-\sum_{i\in N_{\mathrm{DG}}}\sum_{t\in T}\partial_{\mathrm{DG}}\cdot P_{\mathrm{DG},i,t} \\ -\displaystyle\sum_{i\in N_{\mathrm{W}}}\sum_{t\in T}\partial_{\mathrm{W}}\cdot P_{i,t}^{\mathrm{W}}-\sum_{t\in T}\partial_{\mathrm{v2g}}\cdot\Big(\sum_{r}P_{r,i,t}^{\mathrm{v2g1}}+\sum_{r}P_{r,i,t}^{\mathrm{v2g2}}\Big) \\ \text{s.t.式(16)—(38)} \end{cases} \tag{39}$$

式中：N_{DG}分布式电源节点的集合；N_{w}是新能源电源节点的集合；T是时段t的集合；∂_{L}、∂_{DG}、∂_{W}和∂_{v2g}分别指负荷功率、分布式电源供电功率、新能源发电功率和V2G站供电功率的经济转换系数；w_i是根据节点i上负荷的重要程度定义的负荷权重系数。目标函数第1部分指应急供电方案挽回的负荷经济损失；第2部分和第3部分指分布式电源与新能源供电的经济成本；第4部分指对所有响应应急供电的EV的电量补偿。

4 车网协同应急供电的分布式优化模型

如前文所述，运营商与配电网、不同的运营商之间都是独立的主体，难以实现集中式的运算和调控。同时运营商需要保护其所服务EV用户的数据隐私安全，包括车辆位置信息和剩余电量信息等，因此运营商与供电公司之间也不能实现全局信息的

共享。因此，本文采用 ADMM 交替向量乘子法对上述的车网耦合问题解耦并进行分布式求解，最终得出配网与各个运营商的分布式优化模型。保证供电公司与各个运营商之间独立性与数据私密性的同时，实现目标函数的最优。

4.1　运营商引导下的 EV 参与应急供电模型

下面采用 ADMM 算法对车网耦合问题解耦。引入对偶变量 $\lambda_{r,i,t}^{\mathrm{R}}$，将配电网与运营商之间的耦合约束条件 $P'^{\mathrm{v2g2}}_{r,i,t}-P^{\mathrm{v2g2}}_{r,k,t}=0$ 进行增广拉格朗日松弛后叠加到目标函数上，最终得到目标函数的增广拉格朗日形式：

$$\begin{aligned}L_{\rho}=&-f_{\mathrm{E}}+\sum_{r\in R}\sum_{i\in I}\sum_{t\in T}\lambda_{r,i,t}^{\mathrm{R}}(P'^{\mathrm{v2g2}}_{r,i,t}-P^{\mathrm{v2g2}}_{r,k,t})+\\&(\rho/2)\|P'^{\mathrm{v2g2}}_{r,i,t}-P^{\mathrm{v2g2}}_{r,k,t}\|_2^2\end{aligned}\tag{40}$$

式中：L_{ρ} 表示目标函数的增广拉格朗日形式；f_{E} 指配网侧的目标函数；在本文问题中运营商侧无目标函数，故 f_{E} 与式(39)相同。ρ 为惩罚系数；$\lambda_{r,i,t}^{\mathrm{R}}$ 为每一个运营商与配电网之间定义的拉格朗日乘子；R 和 I 分别为运营商与 V2G 站的集合。式(40)并不含有耦合项 $P'^{\mathrm{v2g1}}_{r,i,t}-P^{\mathrm{v2g1}}_{r,k,t}$，因为 $P'^{\mathrm{v2g1}}_{r,i,t}$ 和 $P^{\mathrm{v2g1}}_{r,k,t}$ 为常数而并非决策变量，不需要在配网与运营商间进行交互迭代。

在每次迭代过程中，通过在 L_{ρ} 中代入各子问题的变量与不变量，分别得出配网侧与运营商侧的增广拉格朗日函数 $L_{\rho,\mathrm{E}}$，$L_{\rho,r}$。各个独立主体的子问题可以表示如下，对于配电网有：

$$\begin{cases}\min L_{\rho,\mathrm{E}}=-f_{\mathrm{E}}+\sum_{r\in R}\sum_{i\in I}\sum_{t\in T}\lambda_{r,i,t}^{\mathrm{R}}(P'^{\mathrm{v2g2}}_{r,i,t}-P^{\mathrm{v2g2}(q)}_{r,k,t})+\\\quad(\rho/2)\|P'^{\mathrm{v2g2}}_{r,i,t}-P^{\mathrm{v2g2}(q)}_{r,k,t}\|_2^2\\\text{s.t.式(25)—(38)}\end{cases}\tag{41}$$

对于第 r 个运营商有：

$$\begin{cases}\min L_{\rho,r}=\sum_{i\in I}\sum_{t\in T}\lambda_{r,i,t}^{\mathrm{R}}(P'^{\mathrm{v2g2}(q)}_{r,i,t}-P^{\mathrm{v2g2}}_{r,k,t})+\\\quad(\rho/2)\|P'^{\mathrm{v2g2}(q)}_{r,i,t}-P^{\mathrm{v2g2}}_{r,k,t}\|_2^2\\\text{s.t.式(16)—(24)}\end{cases}\tag{42}$$

式(42)中 $L_{\rho,r}$ 只含有拉格朗日乘子项与惩罚系数项，不含目标函数项。$P^{\mathrm{v2g2}(q)}_{r,k,t}$，$P'^{\mathrm{v2g2}(q)}_{r,i,t}$ 分别为运营商与配电网在第 q 次迭代求解所得出的值。它们为数值而非变量。如前文所述，电网对 EV 以及运营商的补偿会在供电恢复后发放。运营商和 EV 在灾后应急供电阶段参与配电网应急供电恢复的过程中并非以运营盈利为目的，只是在约束条件下尽量满足配电网的电能需求。

用 x_{E}^{q} 指代配电网子问题中所有决策变量的第 q 次迭代的值，用 x_r^q 指代运营商 r 子问题中所有决策变量的第 q 次迭代的值。$\lambda^{\mathrm{R}q}$ 指拉格朗日乘子第 q 次迭代的值。则 ADMM 的每一次迭代可以表示为：

$$\begin{cases}x_{\mathrm{E}}^{q+1}=\arg\min L_{\rho}(x_{\mathrm{E}},x_r^q,\lambda^{\mathrm{R}q})=\arg\min L_{\rho,\mathrm{E}}\\x_r^{q+1}=\arg\min L_{\rho}(x_{\mathrm{E}}^q,x_r,\lambda^{\mathrm{R}q})=\arg\min L_{\rho,r}\end{cases}\tag{43}$$

$$\lambda_{r,i,t}^{\mathrm{R}\ (q+1)}=\lambda_{r,i,t}^{\mathrm{R}\ (q)}+\rho(P'^{\mathrm{v2g2}(q)}_{r,i,t}-P^{\mathrm{v2g2}(q)}_{r,k,t})\tag{44}$$

定义原始残差与对偶残差来判断 ADMM 算法的收敛标准。第 q 次迭代的原始残差 r_i^q 与对偶残差 s_i^q 分别可以表示为：

$$\begin{cases}r_i^q=\|P'^{\mathrm{v2g2}(q)}_{r,i,t}-P^{\mathrm{v2g2}(q)}_{r,k,t}\|_2\\s_i^q=\rho\|P'^{\mathrm{v2g2}(q)}_{r,i,t}-P'^{\mathrm{v2g2}(q-1)}_{r,i,t}\|_2\end{cases}\tag{45}$$

给定 ε_{r} 和 ε_{s}，当 $r_i^q<\varepsilon_{\mathrm{r}}$ 且 $s_i^q<\varepsilon_{\mathrm{s}}$ 时可以判定 ADMM 算法收敛。

4.2　多个运营商与配电网的分布式优化流程

通过 ADMM 算法将车网协同应急供电问题解耦后得到多个运营商与配电网的子优化问题。各主体间仅进行边界信息的交互（$P'^{\mathrm{v2g2}}_{r,i,t}$，$P^{\mathrm{v2g2}}_{r,k,t}$），独立优化求解，经过多次迭代后得出最终的车网协同应急供电方案。多个运营商与配电网协同应急供电分布式优化的具体流程如下所示：

步骤 1：初始化 ADMM 算法参数。将迭代次数 q 设置为 0；给定惩罚因子和对偶变量的初始值；将边界全局变量的初始值 $P'^{\mathrm{v2g2}(0)}_{r,i,t}$ 和 $P^{\mathrm{v2g2}(0)}_{r,k,t}$ 设定为零；给定原始残差和都偶残差的设定值；同时输入配电网以及与电动汽车相关的初始数据。

步骤 2：更新迭代次数 q=q+1。

步骤 3：配电网子问题在配电网的相应约束条件进行独立的优化求解(即式(41))。求解后得到配网优化问题第 q 次迭代的决策变量，并将边界耦合变量 $P'^{\mathrm{v2g2}(q)}_{r,i,t}$ 分别传递给各个运营商。即配电网在相应的约束条件下做出最优的决策方案，并分别向各个运营商传递需要每个运营商的 EV 向各个 V2G 站提供多少功率的信息。

步骤 4：接收到配电网传递的边界变量之后，每个运营商进行独立的优化求解(即式(42))。求解后得到运营商优化问题第 q 次迭代的决策变量，并将耦合边界变量 $P^{\mathrm{v2g2}(q)}_{r,k,t}$ 传递给配电网。即每个运营商在接收配电网需要其在各个 V2G 站提供多少功率的信息后，根据自身的情况进行决策以尽可能地满足配电网的需求，并将该运营商的 EV 可以向各个

V2G 站提供多少功率的信息传递给配电网。

步骤 5：根据式(43)更新拉格朗日乘子，同时计算原始残差和对偶残差来判断算法迭代是否收敛以及惩罚系数是否需要更新。若满足迭代终止条件则算法结束并输出最终优化结果。若不满足收敛条件，则重新返回步骤 2 进行下一次迭代，直至满足为止。

4.3 改进 ADMM 算法及其计算流程

如前文所述，开关的开通闭合状态 $c_{i,j,t}$、EV 的充电状态 $\varphi_{k,n,t}^{r}$、EV 的停放状态 $S_{k,n,t}^{r}$ 和移动状态 $M_{l,n,t}^{r}$ 为 01 变量，因此最终的模型为非凸的 MILP 问题。而 ADMM 算法在求解非凸问题时收敛性没有保证，迭代的过程中可能会陷入振荡进而导致算法不收敛。为此，本文参考文献[23]中的方法提出了一种改进 ADMM 算法，既能够很好地求解非凸问题同时也解决了原方法求解复杂问题时不可行的问题。改进 ADMM 算法的计算流程如下：

步骤 1：松弛 01 变量，将原非凸问题转化为 ADMM 算法能够求解的凸问题。将配网侧的 01 变量记作 $x_{\mathrm{E}}^{\mathrm{B}}$，每个运营商 r 侧的 01 变量记作 x_r^{B}。分别将它们松弛为连续变量，记作 $x_{\mathrm{E}}^{\mathrm{C}}$、$x_r^{\mathrm{C}}$。这样在 ADMM 求解的过程中，配网的子问题(41)转化为：

$$\begin{cases}\min L_{\rho,\mathrm{E}} \\ \text{s.t.式(25)—(38)}, x_{\mathrm{E}}^{\mathrm{C}} \in [0,1]\end{cases} \tag{46}$$

每个运营商 r 的子问题式(42)转化为：

$$\begin{cases}\min L_{\rho,r} \\ \text{s.t.式(16)—(24)}, x_r^{\mathrm{C}} \in [0,1]\end{cases} \tag{47}$$

交替求解式(46)和式(47)，收敛后得到松弛 01 变量条件下边界变量 $P_{r,k,t}^{\mathrm{v2g2}}$ 的值，记作 X_{bd}。

步骤 2：获得满足原问题约束条件的边界变量。在阶段一中得到的 X_{bd} 是在 01 变量松弛的前提下得出的，在各运营商子问题中可能会违反与 01 变量相关的约束。因此，每个运营商以与 X_{bd} 的偏差最小为目标函数求解 MIQP 问题(此时 01 变量不松弛)：

$$\begin{cases}\min f_r = \| X_{\mathrm{bd}} - P_{r,k,t}^{\mathrm{v2g2}} \|_2^2 \\ \text{s.t.式(16)—(24)}, x_r^{\mathrm{B}} \in \{0,1\}\end{cases} \tag{48}$$

最终求解得到可行的边界变量 X'_{bd}。

步骤 3：配网和各个运营商分别在固定的 X'_{bd} 下求解 MILP 问题，从而得到各自 01 变量的值。其中配网的目标函数为 f_{E}，运营商没有目标函数：

$$\begin{cases}\min f_{\mathrm{E}} \\ \text{s.t.式(25)—(38)}, P_{r,i,t}^{\prime\mathrm{v2g2}} = X'_{\mathrm{bd}}, x_{\mathrm{E}}^{\mathrm{B}} \in \{0,1\}\end{cases} \tag{49}$$

$$\begin{cases}\min C(\text{常数}) \\ \text{s.t.式(16)—(24)}, P_{r,i,t}^{\mathrm{v2g2}} = X'_{r,\mathrm{bd}}, x_r^{\mathrm{B}} \in \{0,1\}\end{cases} \tag{50}$$

最终求解得到各个 01 变量的值。

步骤 4：固定步骤 3 中得到的 01 变量的值并代入到式(41)和式(42)中，用 ADMM 算法求解 01 变量固定的凸问题。更新 X'_{bd} 为求解得到的边界变量的值并带入到步骤 3 中。

反复循环步骤 3 与步骤 4，直至步骤 3 两次求解得到的 01 变量的值不再发生改变，则输出最终结果。改进 ADMM 算法的框架如图 3 所示。

5 算例测试

本文在 33 节点配电网-30 节点路网系统的基础上进行改进，在配电系统相应的节点加入分布式发电机、新能源电源以及 V2G 站。其中：新能源电源为光伏电源；每个 V2G 站有 40 个充电桩，每个充电桩的放电功率为 7 kW；负荷的类型设定为柔性负荷，并为不同的负荷按照重要程度赋予恰当的权重系数；每条线路上都安设了可以远程控制开通和闭合的开关，同时在节点 22-8，25-29 之间存在联络线连接；各个运营商在路网节点中相应的位置设置了灵活供电模式 EV 的初始停放点。电网与路网的节点耦合关系见附录 A 表 A1，路网的拓扑结构见附录 A 图 A1，电网的详细参数见附录 A 表 A2，负

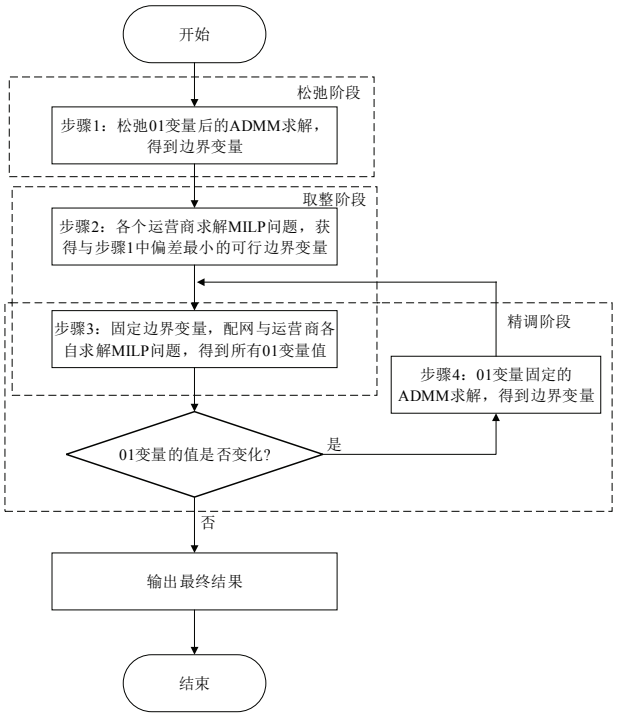


图 3 改进 ADMM 算法框架

Fig.3 Framework of improved ADMM algorithm

荷权重系数见附录 A 表 A3，新能源电源的出力情况见附录 A 表 A4。

假设台风造成配网的线路 9-10，32-33 被破坏，同时主网难以向配网供电。参与应急供电 EV 的反充补偿系数设为 0.4，分布式发电机以及新能源电源的发电成本系数设为 0.3，柔性负荷的经济收益系数为 1。灾后故障完全恢复需要 4 h，以 20 min 的时间步长将其平均分为 12 个时间段。设台风结束的时间为 14:00，故障完全修复的时间为 18:00。

5.1　恢复方案分析

1）灾前电动汽车部署阶段：设路网中一共有 1 200 辆 EV，其中 600 辆为网约车，600 辆为私家车。设在电网事先给定的补偿力度下，网约车对两种供电方案的响应概率区间分别为[0.04,0.06]和[0.055,0.065]，私家车的响应概率分别为[0.042,0.058]和[0.035,0.045]。模拟 EV 的响应，最终有 34 辆 EV 响应简单供电方案，51 辆 EV 响应灵活供电方案。接下来对 85 辆 EV 在 30 节点路网中进行出行链模拟，得出灾前 EV 的状态。经过电量筛选后，最终有 32 辆 EV 参加简单应急供电，50 辆 EV 参加灵活应急供电。与电网签署协议的运营商数目为 2。参加简单供电方案的 EV 就近部署，4 个 V2G 站部署 EV 的数量分别为 9，6，10，7。设灵活供电模式下的 EV 有 30 辆响应运营商 1，20 辆响应运营商 2，在灾前各自前往相应运营商的集中停放点待命。为方便调度，响应灵活供电模式的电动汽车以每 5 辆组成车队的形式参与应急供电。具体 EV 响应结果及出行链模拟结果见附录 B 图 B1、图 B2 和表 B1。最终灾前 EV 的部署情况如图 4 所示。

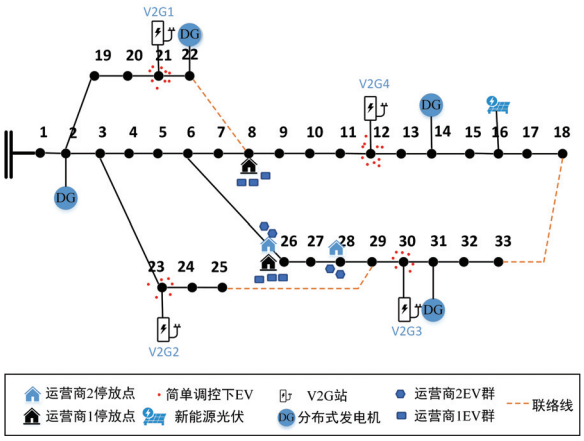


图 4　灾前 EV 预部署情况

Fig.4　Pre-deployment status of EVs in pre-disaster phases

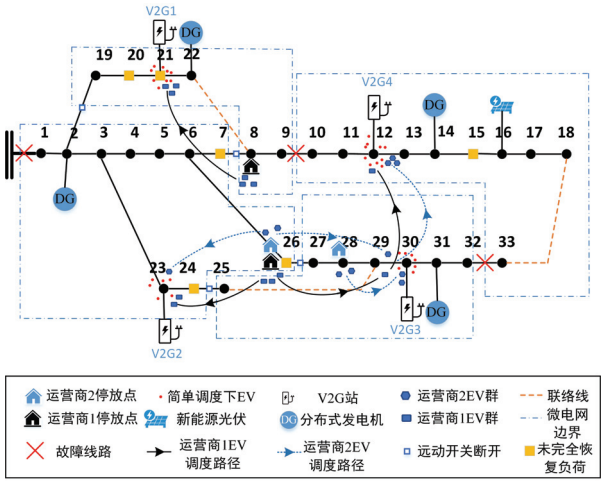


图 5　第 9 个时间段配网重构及 EV 调度方案

Fig.5　Distribution network reconfiguration scheme for the 9th time period and EV dispatch scheme

2）灾后应急供电恢复阶段：根据灵活调度的需求仅考虑各个 V2G 站以及集中停放点在路网中的位置以及它们之间的距离。将 30 节点路网系统简化为 8 节点路网系统，见附录 B 图 B3。在灾后应急供电恢复阶段，配电网重构形成微电网并通过分布式电源以及新能源带动恢复相应的负荷；响应简单供电模式并预先部署在各个 V2G 站的电动汽车开始通过 V2G 站反向供电，同时响应灵活供电模式的电动汽车在各运营商的集中停放点出发，以灵活的调控方式前往不同 V2G 站参与反向供电。下面如图 5 所示以第 9 个时间段的配网重构方案和负荷恢复情况为例进行说明。

其中联络开关全部闭合，远动开关 2-19、7-8、24-25 和 26-27 断开，形成 5 个孤岛。各个分布式电源配合新能源以及 V2G 站进行应急供电支撑。从结果可以看出，权重系数为 3 和 2 的负荷都实现了恢复。运营商 1 下的 3 个 EV 车队前往 V2G3，2 个 EV 车队前往 V2G2，1 个 EV 车队前往 V2G3，且位于 V2G3 的车队在第 8 个时间段前往 V2G4 进行供电；运营商 2 下的 3 个 EV 车队前往 V2G3，1 个 EV 车队前往 V2G2，且位于 V2G3 的 3 个车队在第 8 个时间段前往 V2G4 进行供电。各灵活资源应急供电出力情况以及各 V2G 站的出力情况见图 6、7。

前两个时间段各个 V2G 站的放电功率较少，这是因为参与反向供电的只有响应简单供电模式的 EV，响应灵活供电模式的 EV 正在前往各个 V2G 站。第 3 时间段开始运营商下灵活供电模式的 EV 到达各个 V2G 站参与反向供电，V2G 站的出力提升。V2G4 的出力在第 8 个时间段之后显著提升，而 V2G3 的出力减小。这是因为随着时间的推移光

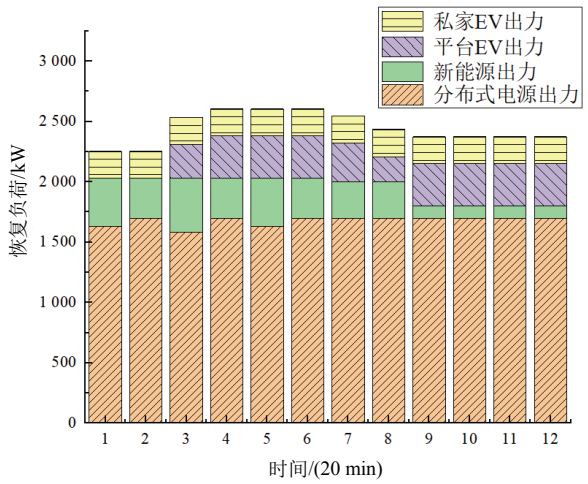


图 6 灾后灵活资源出力情况

Fig.6 Post-disaster flexible resource output status

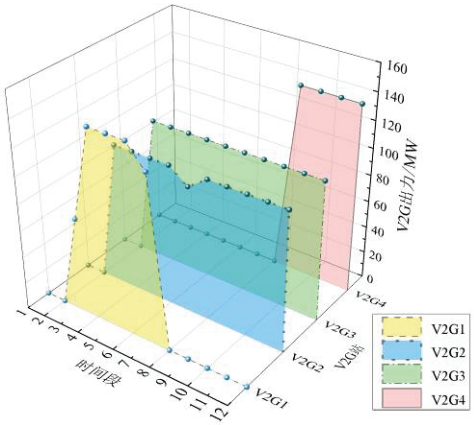


图 7 灾后各 V2G 站出力情况

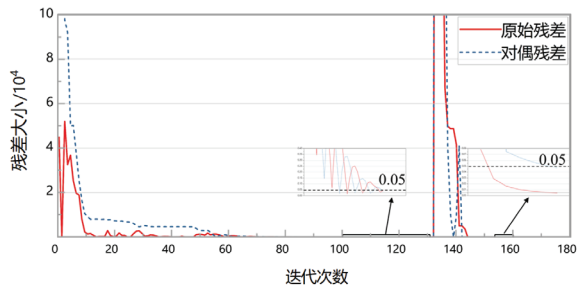
Fig.7 Post-disaster power output status of V2G stations

伏新能源的出力逐渐减弱，为了支撑相应关键负荷的恢复，EV 在不同的 V2G 站之间调度以解决发电资源在空间上分布不均的问题。从上述结果可见，通过本文的分布式优化策略得出的最终恢复调度方案实现了两个电动汽车运营商与配电网之间的协调，也实现了不同运营商引导下的 EV 与配电网中灵活资源之间的协同配合供电恢复。

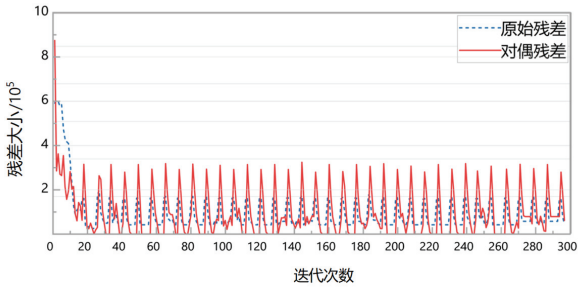
5.2 改进 ADMM 算法收敛分析及与其他算法对比

设定惩罚系数为 5×10^{-5}，原始残差与对偶残差的收敛值为 0.05，所有的拉格朗日乘子以及边界变量的初始值为 0。本文的改进 ADMM 算法原始残差与对偶残差的收敛情况如图 8(a)所示，传统 ADMM 算法的收敛情况如图 8(b)所示。

由图 8 可见，本文所提的改进 ADMM 算法在松弛阶段 01 变量松弛后的 ADMM 算法经过 132 次迭代收敛。在精调阶段 01 变量固定后的 ADMM 算法经过 28 次迭代便完成收敛。在精调阶段循环两次后，01 变量的值并没有发生改变，最终收敛后目标函数的结果为 3 830.38。而传统的 ADMM 算法则陷入了振荡，在 300 次迭代内没有收敛。



(a) 改进 ADMM 算法残差收敛



(b) 传统 ADMM 算法残差收敛

图 8 改进 ADMM 与传统 ADMM 算法残差收敛对比

Fig.8 Comparison of residual convergence between improved ADMM and traditional ADMM algorithm

理想情况下的集中式算法对问题的处理方式为求解以式(39)为目标函数，以式(16)—式(38)为约束条件的混合整数线性规划模型。在相同的测式算例下，最终得到的目标函数值为 3 831.28，与本文改进 ADMM 算法求解得到的目标函数值 3 830.38 十分接近，两者之间的误差仅为 0.02%。两者间具体的求解结果对比见附录 C 表 C1、表 C2 和表 C3。

文献[23]中的 ILM-ADMM 算法在求解本文问题时，将松弛后的 ADMM 算法求解得出的各个 V2G 站的出力结果直接作为取整阶段各运营商求解 MILP 问题的边界变量的约束。由于该约束条件在 EV 约束条件下无法满足(即式 $\|X_{\mathrm{bd}}-P_{r,k,t}^{\mathrm{v2g2}}\|_2^2$ 的最小值为 54 601.60，而该算法要求该值必须为零)，最终求解失败。

文献[24]中的 BLAI-ADMM 算法在求解本文问题时，外层迭代获得初始边界变量相当于各运营商以最大化反向充电总量为目标函数求解得出的 V2G 出力。在该边界变量下取整 01 变量，并进行 01 变量固定的 ADMM 算法。算法经过 77 次迭代收

敛，且精调阶段循环两次 01 变量的值不变，最终收敛后的求解结果为 3 787.88。该结果与理想集中式算法的 3 831.28 之间误差为 1.15%，差于本文方法。

5.3　模型有效性分析

5.3.1　对比实验分析

为了验证本文提出的车网分布式协同应急供电模型的优越性，本文从参与应急供电的电动汽车的调控模式、车网之间的信息传递模式等多个角度对比各方案的恢复效果，具体的方案设计如下：

1）方案 1：没有 EV 参与应急供电，仅通过配电网自身的远动开关，联络线，分布式电源以及新能源电源等灵活资源进行配网重构恢复。

2）方案 2：仅为所有参与供电的 EV 提供简单的应急供电模式选择，同时保持参与应急供电 EV 的总数不变。

3）方案 3：为 EV 用户提供简单供电方案与灵活供电方案，但灵活供电方案采用文献[12]中的一次调控方式，即 EV 从集中停放点按需求调度到 V2G 站后不再进行再调度。

4）方案 4：为 EV 用户提供简单供电方案与灵活供电方案，且对选择灵活供电方案的 EV 采取本文的灵活调控方式。但不同运营商之间以及运营商与电网之间不存在信息交互，各运营商以最大化反向充电总量为目标进行 EV 调控。

5）方案 5：采用本文的车网分布式协同应急供电方法。

各个恢复方案的效果对比如表 1 所示，负荷恢复情况的对比如图 9 所示。从结果可见，本文所提出的车网分布式协同应急供电方法的负荷恢复效果优于方案 2，方案 3 和方案 4。同时，本文所提方案的总经济效益也是最高的。

下面将各个方案之间进行对比分析：

不考虑对 EV 灵活调控的方案 2 相比于本文的方案 5，由于简单供电模式下所有的电动汽车在灾前就已经预部署在各个 V2G 站，其在灾后恢复初始时间段就可以进行应急供电。因此在前两个时间段，方案 2 的负荷恢复效果优于方案 5。但由于简单供电模式下电动汽车的部署原则为就近部署，其不能有效满足配电网不同区域的应急供电需求，所以在新能源出力不足的 9—12 时间段，方案 2 的负荷恢复效果显著差于方案 5。

对灵活供电模式的 EV 采用一次调控的方案 3 相比于本文的方案 5，由于方案 3 的运营商下灵活供电模式电动汽车的调度方式为一次调度，其为了应对时间段 9—12 的新能源出力不足，会倾向于将电动汽车部署到相应区域的 V2G 站。因此方案 3 在新能源出力不足的时间段也有不错的恢复效果。然而由此也会造成方案 3 在新能源出力充足的时间段供电资源的浪费。其在时间段 3—7 的恢复效果明显低于方案 5。

表 1　各恢复方案效果对比

Table 1　Comparison of performance under each scheme

方案编号	方案总经济效益/百元	方案总负荷恢复经济效益/百元	灵活调控 EV 反向供电量/kWh	简单调空 EV 反向供电量/kWh
1	3 416.00	4 130.00	0	0
2	3 812.80	4 768.00	0	2 240.00
3	3 797.08	4 714.80	906.67	896.00
4	3 787.88	4 736.80	1 166.67	896.00
5	3 830.38	4 770.30	1 091.67	896.00

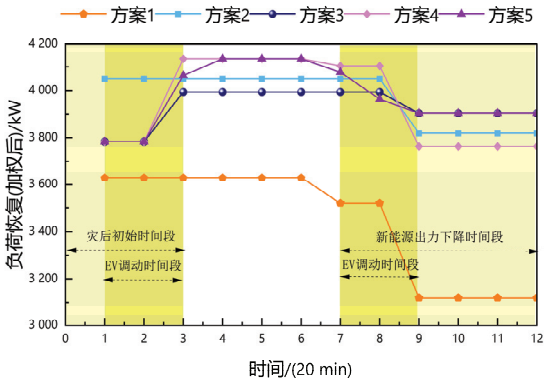


图 9　各方案负荷恢复情况对比

Fig.9　Comparison of load recovery under each scheme

不考虑运营商和配网间信息交互的方案 4 相比于本文的方案 5，由于各个运营商之间、运营商与配电网之间并不存在信息交互，各个运营商只能以最大化灾害期间的反向供电总量为目标来进行电动汽车的调度。由于电动汽车的调控并没有考虑到配电网灾害期间的供电需求情况，方案 4 的恢复效果并不理想。从表 1 中也可以发现，方案 4 比方案 5 的电动汽车反向充电总量更大，但负荷的恢复情况却远差于方案 5。

5.3.2　69 节点配电网-30 节点路网算例测试

为了进一步说明本文工作的正确性、扩展性以及所提算法的收敛性，在改进 69 节点配电网-30 节点路网的算例上进行测试。其中算例的具体参数见附录 D，EV 灾前预部署的具体情况仍与本文主算例保持一致。

在取同样的惩罚系数5×10^{-5}、残差收敛值 0.05 的条件下，改进改进 ADMM 算法在松弛阶段 01 变量松弛后的 ADMM 算法经过 173 迭代收敛，在精调阶段 01 变量固定后的 ADMM 算法经过 42 次迭代便完成收敛。在精调阶段循环两次后，01 变量的值并没有发生改变，最终收敛后得目标函数的结果为 6 223.50。而理想情况下集中式算法得到的值为 6 223.98，误差仅为 0.01%，算法的收敛性仍然很好。改进 ADMM 算法的残差收敛图见附录 D 图 D3。

按照 5.3.1 节中的方案设计进行对比实验。在各方案对比结果中，本文所提出的方案(方案 5)的负荷恢复效果和总经济效益仍然是最优的，由此可以进一步说明本文所提方案的有效性。其中各恢复方案的效果对比见附录 D 表 D5，加权后负荷恢复情况对比见附录 D 图 D4。

6 结论

本文针对以台风为代表的极端灾害下多个运营商引导 EV 与配电网协同应急供电的问题，提出了一个“车-商-网”模式下的车网协同分布式应急供电策略。根据算例分析的结果表明：

1）所提的车网协同分布式应急供电策略可以协调配电网中的远动开关，分布式电源等灵活资源配合多个运营商引导下的电动汽车实现灾后的应急功率支撑并保证关键负荷的供电，提升配电网的弹性。

2）改进 ADMM 算法求解多个运营商与配电网之间协同恢复的耦合问题时，在保证多个运营商与配电网各主体数据信息隐私，运算独立的前提下得到的解十分接近理想情况下集中式算法的最优解。同时其也解决了模型非凸导致传统 ADMM 算法收敛难、解的质量差等问题。

3）对运营商下电动汽车采用差异化应急供电方案的灾后负荷的恢复效果以及总体的经济效益优于现有的就近调度、一次调度等现有 EV 调控策略，同时也可以有效应对配电网供电资源在时间空间上分布不均的问题。

4）车网协同应急供电问题中的车辆侧与电网侧之间的信息交互十分必要。本文提出的运营商与电网间的分布式协同应急供电策略可以在有限的信息交互下实现各主体之间的协作，显著提升了配网负荷恢复的效果，为解决未来电网与多个运营商引导的 EV 协同应急供电的问题提供了一种有效的方案。

在未来的研究中，可以考虑配电网与各种打车平台，地图平台的合作，挖掘出租车电动汽车在配网恢复问题中的潜力。考虑平台在参与配网恢复过程中协调平台下出租车电动汽车的运营与参与应急供电的问题。

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

参考文献 References

[1] BIE Z H, LIN Y L, LI G F, et al. Battling the extreme: a study on the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1253-1266.

[2] ROMERO R, FRANCO J F, LEÃO F B, et al. A new mathematical model for the restoration problem in balanced radial distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(2): 1259-1268.

[3] 李更丰，孙少华，别朝红，等. 面向新型电力系统弹性提升的储能优化配置与灵活调度研究综述[J]. 高电压技术，2023，49(10)：4084-4095.
LI Gengfeng, SUN Shaohua, BIE Zhaohong, et al. Review on optimal configuration and flexible scheduling research of energy storage for resilience improvement of new power system[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(10): 4084-4095.

[4] BROWN M A, SONI A. Expert perceptions of enhancing grid resilience with electric vehicles in the United States[J]. Energy Research & Social Science, 2019, 57: 101241.

[5] MEHRJERDI H. Resilience oriented vehicle-to-home operation based on battery swapping mechanism[J]. Energy, 2021, 218: 119528.

[6] DING T, LIN Y L, LI G F, et al. A new model for resilient distribution systems by microgrids formation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4145-4147.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 王治然，杨祺铭，黄玉雄，等. 考虑动态互联微电网与网络重构的弹性配电网多源序贯协同供电恢复方法[J]. 电力建设，2025，46(9)：13-26.
WANG Zhiran, YANG Qiming, HUANG Yuxiong, et al. Multi-source sequential coordinated power-supply recovery method for resilient distribution networks considering dynamic networked microgrids and network reconfiguration[J]. Electric Power Construction, 2025, 46(9): 13-26.

[11] 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.

[12] 刘达夫，钟 剑，杨祺铭，等. 基于 V2G 与应急通信的配电网信息物理协同快速恢复方法[J]. 电力系统自动化，2024，48(7)：147-158.
LIU Dafu, ZHONG Jian, YANG Qiming, et al. Fast recovery method for distribution network through cyber-physical collaboration based on

vehicle to grid and emergency communication[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(7): 147-158.
[13] 刘子裕，刘达夫，杨祺铭，等. 风涝复合灾害下配电网恢复资源灾前部署及灾后调度方法[J]. 电力系统自动化，2025，49(17)：154-164.
LIU Ziyu, LIU Dafu, YANG Qiming, et al. Pre-disaster deployment and post-disaster dispatching method for distribution network restoration resources under compound typhoon and waterlog disaster[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(17): 154-164.
[14] 张添奥，陈永翀，杨奕贤，等. 基于电动汽车换电站的配网解列下弹性提升策略的探索研究[J]. 储能科学与技术，2024，13(11)：3961-3970.
ZHANG Tianao, CHEN Yongchong, YANG Yixian, et al. Exploration and research on elastic enhancement strategies for distribution networks using electric vehicle exchange stations during disconnection events[J]. Energy Storage Science and Technology, 2024, 13(11): 3961-3970.
[15] 张　雄，张海春，刘政林. V2G 网络的安全和隐私问题研究[J]. 汽车实用技术，2021，46(23)：12-15.
ZHANG Xiong, ZHANG Haichun, LIU Zhenglin. Research on security and privacy of V2G network[J]. Automobile Applied Technology, 2021, 46(23): 12-15.
[16] 杨　挺，覃小兵，冯相为，等. 计及用户充电行为与隐私保护的联邦学习电动汽车短期充电负荷预测[J]. 高电压技术，2024，50(10)：4512-4519.
YANG Ting, QIN Xiaobing, FENG Xiangwei, et al. Short-term charging load prediction of federated learning electric vehicles after accounting for user charging behavior and privacy protection[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4512-4519.
[17] 程　杉，王贤宁，冯毅煊. 电动汽车充电站有序充电调度的分散式优化[J]. 电力系统自动化，2018，42(1)：39-46.
CHENG Shan, WANG Xianning, FENG Yichen. Decentralized optimization of ordered charging scheduling in electric vehicle charging station[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(1): 39-46.
[18] 吕仁周，白晓清，李佩杰，等. 基于交替方向乘子法的电动汽车分散式充电控制[J]. 电力系统自动化，2016，40(16)：56-63.
LÜ Renzhou, BAI Xiaoqing, LI Peijie, et al. Decentralized charging control of electric vehicles based on alternate direction method of multiplier[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(16): 56-63.
[19] 罗　干，李觉友，余季迟，等. 基于 Stackelberg 博弈的微电网插入式电动汽车分布式充电控制[J]. 电力自动化设备，2024，44(2)：81-86，102.
LUO Gan, LI Jueyou, YU Jichi, et al. Distributed charging control of plug-in electric vehicles in microgrid based on Stackelberg game[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(2): 81-86, 102.
[20] 鞠　晨，奚培峰，刘惠萍. 一种电动汽车群有序充电的分布式控制方法[J]. 电器与能效管理技术，2017(2)：71-75.
JU Chen, XI Peifeng, LIU Huiping. A distributed control algorithm for electric vehicles charging[J]. Electrical & Energy Management Technology, 2017(2): 71-75.
[21] 潘振宁，余　涛，王克英. 考虑多方主体利益的大规模电动汽车分布式实时协同优化[J]. 中国电机工程学报，2019，39(12)：3528-3540.
PAN Zhenning, YU Tao, WANG Keying. Decentralized coordinated dispatch for real-time optimization of massive electric vehicles considering various interests[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(12): 3528-3540.
[22] WU H, XIE Y Y, DECONINCK G, et al. Distributed coordinated restoration of transmission and distribution systems with repair crews and mobile emergency generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2025, 40(1): 4-17.
[23] 赵冬梅，王浩翔，陶　然. 基于改进交替方向乘子法的输配电网分散协调鲁棒优化调度模型[J]. 电网技术，2023，47(3)：1138-1150.
ZHAO Dongmei, WANG Haoxiang, TAO Ran. Decentralized coordination robust optimal scheduling model for transmission and distribution networks based on improved alternating direction method of multipliers[J]. Power System Technology, 2023, 47(3): 1138-1150.
[24] 梁宇涛，林舜江，俞晓峰，等. 台风天气下含多海上风电场的输配电网分布式韧性恢复调度[J]. 电网技术，2025，49(2)：447-458.
LIANG Yutao, LIN Shunjiang, YU Xiaofeng, et al. Distributed resilient restoration dispatch for integrated transmission and distribution networks with multiple offshore wind farms under typhoon weather[J]. Power System Technology, 2025, 49(2): 447-458.
[25] 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.
[26] 谢宇峥，章　德，杨祺铭，等. 基于移动储能和电动汽车 V2G 的弹性配电网经济性灾后恢复决策方法[J]. 电工电能新技术，2024，43(7)：91-101.
XIE Yuzheng, ZHANG De, YANG Qiming, et al. Economic post-disaster restoration method of resilient distribution network based on mobile energy storage and electric vehicle V2G coordination[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2024, 43(7): 91-101.
[27] 王岩庆，王　骁，丛若晨，等. 考虑配电网运行安全的出行电动汽车充电引导策略[J]. 高电压技术，2023，49(5)：2131-2139.
WANG Yanqing, WANG Xiao, CONG Ruochen, et al. Charging guidance strategy of traveling electric vehicle considering the operation safety of distribution network[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(5): 2131-2139.
[28] 龙雪梅，杨　军，吴赋章，等. 考虑路网-电网交互和用户心理的电动汽车充电负荷预测[J]. 电力系统自动化，2020，44(14)：86-93.
LONG Xuemei, YANG Jun, WU Fuzhang, et al. Prediction of electric vehicle charging load considering interaction between road network and power grid and user's psychology[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(14): 86-93.



周　政
2002—，男，硕士生
主要研究方向为电力系统恢复力
E-mail: 1592320439@qq.com
ZHOU Zheng



杨祺铭
1999—，男，硕士
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



卞艺衡(通信作者)
1994—，男，博士，助理教授
主要研究方向为电力系统弹性、应对不确定性风险的电力系统优化规划与运行
E-mail: byh0xyz@xjtu.edu.cn
BIAN Yiheng
Ph.D.
Corresponding author

收稿日期　2025-04-30　在线出版日期　2025-07-23　　编辑　陈　蔓

附录 A

表 A1　电网与路网耦合关系

Table A1　Coupling relationship between power grid and road network

电网编号	路网编号	电网编号	路网编号	电网编号	路网编号
1	1	12	15	23	25
2	2	13	15	24	8
3	3	14	27	25	8
4	5	15	27	26	9
5	5	16	30	27	11
6	5	17	14	28	20
7	6	18	13	29	29
8	6	19	2	30	16
9	21	20	2	31	17
10	18	21	24	32	17
11	28	22	7	33	12

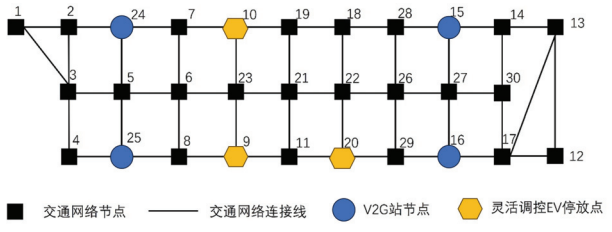


图 A1　30 节点交通网示意图

Fig.A1　Schematic diagram of 30-node transportation system

表 A2　改进 33 节点配电网详细参数

Table A2　Detailed parameter of the improved 33-node distribution network

节点有功负荷	节点无功负荷	分布式发电机节点	分布式发电机出力上限	分布式发电机无功出力上限	新能源节点	线路容量
90 kW	40 kW	2，14，22，31	500 kW(节点 2 14 31) 200 kW(节点 22)	400 kW	16	5 MW

表 A3　负荷权重表

Table A3　Load weight table

节点编号	负荷等级
1，3，28，29	一级负荷
10，11，12，13，14，16，17，18，33	二级负荷
其余节点	三级负荷

表 A4　光伏电源出力参数

Table A4　PV power output parameter

参数	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5	时段 6	时段 7	时段 8	时段 9	时段 10	时段 11	时段 12
数值	400 kW	400 kW	450 kW	450 kW	400 kW	400 kW	300 kW	300 kW	100 kW	100 kW	100 kW	100 kW

附录 B

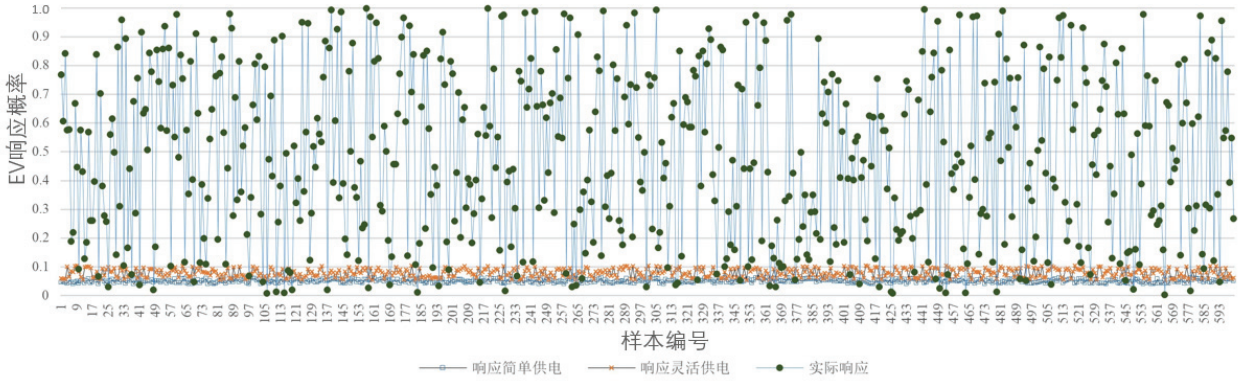


图 B1　网约车 EV 用户响应情况

Fig.B1　Response of ride-hailing EVs to emergency power supply

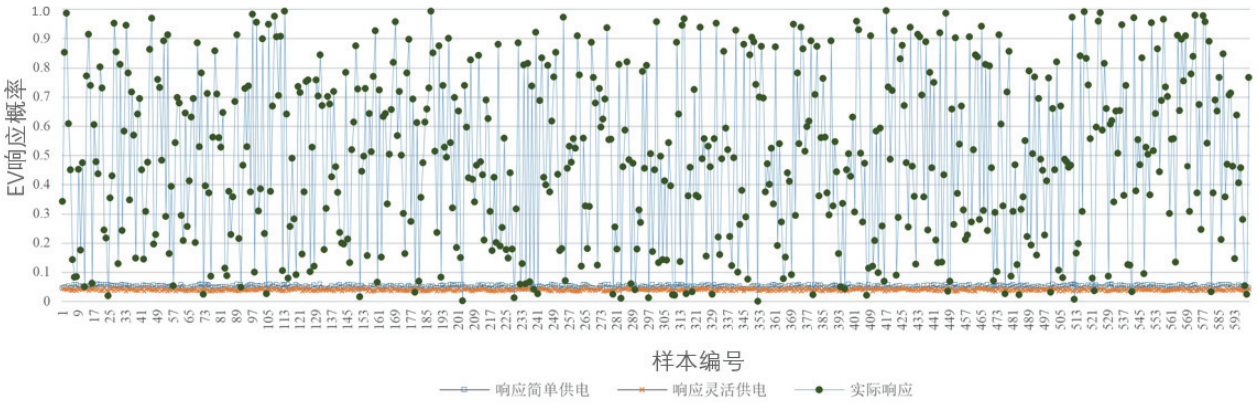


图 B2　私家车 EV 用户响应情况

Fig.B2　Response of Private EV users to emergency power supply

图中横坐标为每辆 EV 的编号，纵坐标为一个在 0 到 1 之间的数。判断 EV 用户响应应急供电的准则为，如若实际响应值低于简单供电和灵活供电任意一个值，则 EV 用户会响应应急供电。响应应急供电的种类为简单供电与灵活供电中值更大的那一种。

表 B1　简单供电模式下的 EV 出行链模拟表

Table B1　Trip chain simulation results of EVs in basic emergency power supply mode

EV 所在节点	EV 剩余电量(占电池容量的比例)	EV 最近的 V2G 节点	是否满足要求（>0.93）
8	0.963 659	25	是
18	0.982 683	15	是
29	0.97	16	是
14	0.936 585	15	是
9	0.959 268	25	是
7	0.963 902	24	是
12	0.932 683	16	是
2	0.944 39	24	是
17	0.925 854	16	否
13	0.943 902	15	是
10	0.945 366	24	是
30	0.965 61	15	是
12	0.939 024	16	是
25	0.968 78	25	是
27	0.962 927	15	是
6	0.966 829	24	是
11	0.974 146	25	是
19	0.982 683	24	是
4	0.942 927	25	是
7	0.946 829	24	是
20	0.977 805	16	是
13	0.961 951	15	是
24	0.970 488	24	是
25	0.952 195	25	是
30	0.967 073	15	是
3	0.952 195	24	是
28	0.958 049	15	是
5	0.926 829	25	否
30	0.965 854	16	是
30	0.956 341	16	是
26	0.954 39	15	是
5	0.965 366	24	是
19	0.977 805	15	是
17	0.937 561	16	是

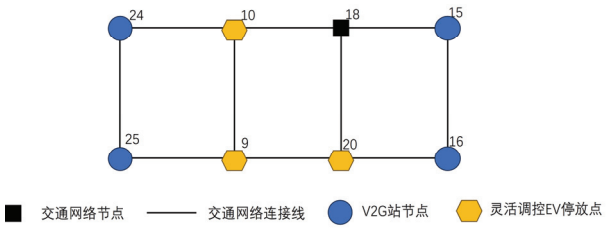


图 B3　简化交通网拓扑图

Fig.B3　Simplified topology diagram of the transportation network

附录 C

表 C1　V2G 站各时段总出力对比表

Table C1　Comparison of total V2G station output power by time period

kW

算法	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
集中式	0	0	280	350	350	345	345	210	350	350	350	345
改进 ADMM	0	0	280	350	350	350	350	210	350	350	350	350

表 C2　分布式电源各时段总出力对比表

Table C2　Comparison of total distributed generation output power by time period

kW

算法	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
集中式	1 700	1 700	1 700	1 580	1 700	1 700	1 700	1 700	1 700	1 700	1 700	1 700
改进 ADMM	1 630	1 700	1 700	1 700	1 630	1 630	1 700	1 700	1 700	1 700	1 700	1 700

表 C3　总负荷恢复(加权后)各时段对比表

Table C3　Comparison of weighted total load recovery by time period

kW

算法	t_1	t_2	t_3	t_4	t_5	t_6	t_7	t_8	t_9	t_{10}	t_{11}	t_{12}
集中式	3 784	3 784	4 064	4 134	4 134	4 129	4 099	3 964	3 904	3 904	3 904	3 899
改进 ADMM	3 784	3 784	4 064	4 134	4 134	4 134	4 104	3 964	3 904	3 904	3 904	3 904

附录 D

本测试算例在 69 节点配电网-30 节点路网系统的基础上进行改进，在配电系统相应的节点加入分布式发电机、新能源电源以及 V2G 站。其中：新能源电源为光伏电源；每个 V2G 站有 40 个充电桩，每个充电桩的放电功率为 7 kW；负荷的类型设定为柔性负荷，并为不同的负荷按照重要程度赋予恰当的权重系数；每条线路上都安设了可以远程控制开通和闭合的开关，同时在节点 50-57，46-69 之间存在联络线连接；各个运营商在路网节点中相应的位置设置了灵活供电模式 EV 的初始停放点。

假设台风造成配网的线路 17-18，30-31 被破坏，同时主网的供电能力衰减为其正常供电能力的 17.7%(1 100 kW)。参与应急供电 EV 的反充补偿系数设为 0.4，分布式发电机以及新能源电源的发电成本系数设为 0.3，柔性负荷的经济收益系数为 1。灾后故障完全恢复需要 4 h，以 20 min 的时间步长将其平均分为 12 个时间段。设台风灾害结束的时间为 14:00，修复完成的时间为 18:00。

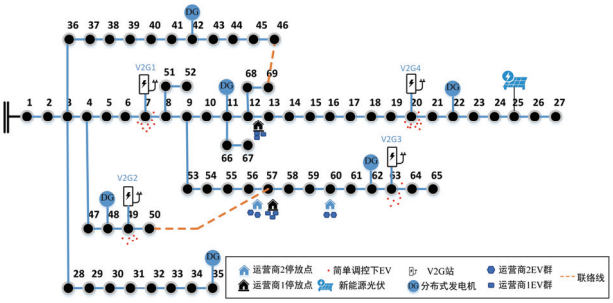


图 D1　改进 IEEE69 节点系统示意图

Fig.D1　Schematic diagram of improved IEEE 69-node system

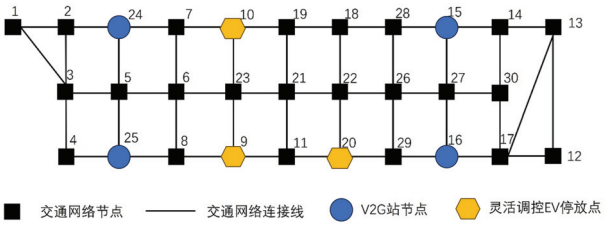


图 D2　30 节点交通网示意图

Fig.D2　Schematic diagram of 30-node transportation system

表 D1　电网与路网耦合关系

Table D1　Coupling relationship between power grid and road network

电网编号	路网编号	电网编号	路网编号	电网编号	路网编号
1	3	24	14	47	4
2	3	25	13	48	25
3	1	26	13	49	25
4	1	27	13	50	8
5	5	28	4	51	24
6	5	29	25	52	7
7	24	30	25	53	8
8	6	31	25	54	9
9	6	32	8	55	9
10	10	33	8	56	9
11	10	34	9	57	9
12	10	35	9	58	11
13	19	36	1	59	20
14	21	37	1	60	20
15	21	38	2	61	29
16	18	39	2	62	16
17	18	40	24	63	16
18	22	41	24	64	17
19	28	42	24	65	12
20	15	43	7	66	23
21	27	44	7	67	23
22	14	45	10	68	10
23	30	46	10	69	10

表 D2　改进 69 节点配电网详细参数

Table D2　Detailed parameter of the improved 69-node distribution network

节点有功负荷	节点无功负荷	分布式发电机节点	分布式发电机出力上限	分布式发电机无功出力上限	新能源节点	线路容量
90 kW	40 kW	2，14，22，31	500 kW(节点 1 11 22 42 48 62) 450 kW(节点 35)	400 kW	25	5 MW

表 D3　负荷权重表

Table D3　Load weight table

节点编号	负荷等级
1，3，28，29，61	一级负荷
18，20，21，22，24，25，26，27，37，43，52	二级负荷
其余节点	三级负荷

表 D4　光伏电源出力参数

Table D4　PV power output parameter

参数	时段 1	时段 2	时段 3	时段 4	时段 5	时段 6	时段 7	时段 8	时段 9	时段 10	时段 11	时段 12
数值	400 kW	400 kW	450 kW	450 kW	400 kW	400 kW	300 kW	200 kW	100 kW	50 kW	50 kW	50 kW

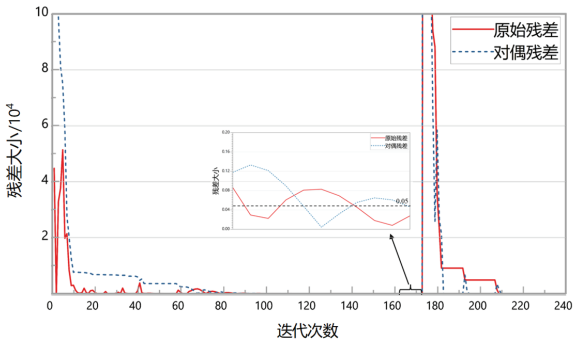


图 D3　改进 ADMM 算法残差收敛

Fig.D3　Residual convergence of the proposed improved ADMM algorithm

表 D5　各恢复方案效果对比

Table D5 Comparison of performance under each scheme

方案编号	方案总经济效益/百元	方案总负荷恢复经济效益/百元	灵活调控 EV 反向供电量/kWh	简单调空 EV 反向供电量/kWh
1	5 825.50	7 378.00	0	0
2	6 204.66	7 987.80	0	2 240.00
3	6 203.70	7 978.00	1 057.33	896.00
4	6 197.38	7 984.80	1 166.67	896.00
5	6 223.50	8 005.00	1 117.34	896.00

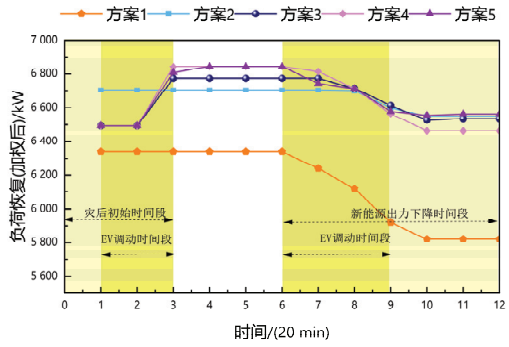


图 D4　各方案负荷恢复情况对比

Fig.D4　Comparison of load recovery under each scheme