

台风灾害下基于V2G的城市配电网弹性提升策略

杨祺铭¹, 李更丰¹, 别朝红¹, 邬嘉雨², 季陈林³, 刘达夫²

(1. 电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学), 陕西省西安市 710049;

2. 四川大学电气工程学院, 四川省成都市 610065; 3. 国网江苏省电力有限公司无锡供电公司, 江苏省无锡市 214061)

摘要:近年来,以台风为代表的极端自然灾害导致城市配电网停电事故频发,给城市电网的持续供电带来挑战。在电动汽车(EV)用户群体数量快速增长的背景下,针对上述问题,提出了一种基于车辆并网(V2G)的城市配电网弹性提升策略,以增强城市电网应对台风灾害的能力。首先,建立配电网元件故障率模型,通过随机抽样生成台风灾害下的配电网故障场景;其次,考虑即将到来的台风灾害对道路拥堵情况及用户出行意愿的影响,搭建了灾害前期EV调度模型;然后,基于消费者心理学理论,制定灾后反向输电激励响应机制,引导V2G站点内的EV参与供电恢复;最后,考虑配电网重构及V2G站点反向充电,制定V2G参与的灾后供电恢复策略。由算例分析可知,与应急发电车相比,V2G参与供电恢复的方案经济性及恢复效果更优,验证了所提弹性提升策略的可行性与有效性。

关键词:弹性配电网; 电动汽车; V2G; 联络线重构; 台风灾害; 移动储能

0 引言

近年来,频发的台风灾害给沿海城市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^[1]。提升城市在灾害中快速应对及恢复的能力已被列入“十四五”规划中^[2]。配电网作为城市能源系统的重要组成部分,必须具有抵御台风等极端灾害的能力,以保证能源安全,尽量减少供电中断对经济社会造成的巨大损失。因此,有必要研究应对台风等极端灾害的城市配电网弹性提升策略。

国内外学者针对城市配电网弹性提升策略已经开展了大量研究。城市配电网弹性可定义为针对小概率高损失极端事件的预防、对抗及快速恢复能力^[3]。文献[4-5]根据灾害历史数据对配电网系统进行弹性评估,分别从脆弱性分析、故障概率曲线以及弹性评估指标体系3个方面进行研究。文献[6-7]考虑灾害破坏最恶劣场景,分别采用分布式资源、天然气网备用资源以及加固重要线路的方法,提出城市配电网预防与抵御极端事件的措施。文献[8-11]通过拓扑优化、人工检修、增设远动开关等方法,提高了城市配电网快速恢复能力。从已有研究来看,台风等极端灾害场景下,系统自身可提供的电能

资源有限,制约了弹性提升效果。

同时,也有研究提供了一些新型的弹性提升手段,以帮助城市配电网实现快速供电恢复。文献[12-14]引入能够更好地控制系统电压与无功功率的智能软开关,以减小配电网故障对整个系统带来的负面影响。文献[15-16]提出一种移动储能调度模型,确定灾后恢复过程中的最优路径。文献[17]根据工程实际需要,将移动电源车细分为移动储能车、应急发电车(mobile emergency generator, MEG)和移动电池车3类,并确定其供电恢复范围。移动电能资源因其可移动的空间特性,可以在灾害发生后快速将电能转移到系统中的缺电区域,解决了系统内电能资源有限的问题,但过高的经济成本限制了其在配电网弹性提升中的工程实际应用。

电动汽车(electric vehicle, EV)作为城市中广泛存在的分布式移动储能单元,被逐渐应用于配电网弹性提升研究中。在灾后,EV以车辆并网(vehicle to grid, V2G)的形式参与配电网供电恢复,从而可以充分利用有限的电能资源并降低经济成本。文献[18]对EV提升配电网弹性的合理模式及可能性进行了总结,为后续研究提供了参考方向。文献[19]构建了EV锂电池梯级利用模型,以提高系统弹性和经济性。文献[20]提出一种基于EV换电模式的弹性提升策略。然而,现有研究较少关注EV用户的自主选择行为及由此而导致的时空分布特性。因

收稿日期: 2021-10-27; 修回日期: 2022-03-03。

上网日期: 2022-04-15。

国家自然科学基金资助项目(51637008)。

此,有必要计及EV出行特征,考虑用户在灾害环境下选择行为的改变,研究基于V2G的城市配电网弹性提升策略。

综上所述,在高比例EV接入的配电网中,本文针对台风灾害造成的部分节点电力供应不足的问题,考虑灾后EV参与供电恢复,提出了一种基于V2G的城市配电网弹性提升策略。本文主要贡献包括:1)考虑EV用户在灾害过程中的行为特征,提出了适用于灾害前期场景的EV调度策略与V2G用户激励机制;2)提出了弹性背景下考虑V2G反向输电的具备较好经济性的供电恢复方案,为弹性配电网供电恢复提供了新思路;3)运用多种弹性评估指标,对比MEG与V2G在弹性供电恢复中的作用,分析了V2G参与供电恢复的优劣性。

1 灾害场景生成与灾害前期EV调度模型

1.1 灾害下配电网的故障场景生成

以台风为例,生成极端灾害下的配电网故障场景。首先,量化线路和杆塔受到风的应力作用与故障率的关系,以体现台风对配电网元件的影响;其次,采用非序贯蒙特卡洛模拟法采样配电网中每条线路的状态;最后,根据N-K原则对生成的故障场景进行筛选,其中N为线路总数,K为多重故障的阶数。具体的台风场景下的故障场景生成过程详见附录A。

1.2 灾害前期的EV调度模型

灾害前期是指台风灾害强度提升到开始对城市配电网产生破坏的时间点之前。计及EV的出行特征,对区域路网及电网进行建模后,基于该模型采用出行链理论描述灾害前期EV用户的调度行为,并且记录调度周期内EV的时空分布状态及剩余电量^[21-22]。该模型中,出行意愿部分反映了EV用户在灾害过程中的出行选择行为。

1) 路网建模

$$G=(V,E) \quad (1)$$

式中: V 为简化图中路网节点的集合; E 为图中各节点间连通关系的集合; G 为路网连边集合。

生成矩阵 $D(G)$ 来记录各节点间的直接连接距离,若不是直接连接,则为无解(inf)。接着,基于 $D(G)$,采用Floyd最短路径算法可得出任意两点间的最短路径行驶方案。

2) 路网与电网耦合建模

可以将两网耦合关系等效为路网、电网两层之间是否有层间节点连接。

$$\zeta=\{E_{\alpha\beta}\in V_{\alpha}V_{\beta}\} \quad (2)$$

$$\alpha_{ij}^{\alpha\beta}=\begin{cases} 1 & \{x_i^{\alpha},x_j^{\beta}\}\in E_{\alpha\beta} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (3)$$

式中: ζ 为路网和电网间节点的连边集合; $E_{\alpha\beta}$ 为路网与电网构成的耦合边集合; V_{α} 为路网节点集合; V_{β} 为电网节点集合; x_i^{α} 为路网的第*i*个节点; x_j^{β} 为电网的第*j*个节点; $\alpha_{ij}^{\alpha\beta}$ 为表示路网、电网之间是否有层间节点连接的0-1变量,若 $\alpha_{ij}^{\alpha\beta}=1$,则两网间路网节点*i*与电网节点*j*存在耦合关系。从能量传输上来看,两网耦合关系可以等效成路网上的站点从对应电网中的节点获取电能。

3) 基于出行需求的出行链建模

将整个路网构成的区域分为3种功能区域,即居民区(R)、工作区(W)、休闲区(L),并分别生成对应路网节点集合R、W和L。将出行链分为简单链和复杂链,分别经过2个和3个节点(包括终点)。

$$T_C=\{L_0,L_f,P_{of},T_0,T_f,t_{of},T_s\} \quad (4)$$

式中: T_C 为出行链中一段行程的状态变量集合,包含起点(不一定是出发地) L_0 、终点(不一定是目的地) L_f 、行驶路径 P_{of} 、出发时间 T_0 、到达时间 T_f 、行驶时长 t_{of} 、停放时长 T_s 。

台风灾害会一定程度地影响EV用户的出行行为。由文献[23]可知,在台风灾害下早高峰时段的道路拥堵情况较为明显,平均速度约下降29.4%。同时,道路拥堵情况以及用户对于灾害的恐慌还会降低用户的出行意愿。为体现灾害对用户出行意愿的影响,本文引入出行比例系数 α_2 来量化EV用户群体的总出行意愿变化^[24]。

$$N_{road}=\alpha_2N_{EV} \quad (5)$$

式中: N_{road} 为出行的EV数量; N_{EV} 为EV总数。

第*l*段路程的行驶时长 $t_{of,l}$ 、到达时间 $T_{f,l}$ 和下一段路程出发时间 $T_{0,l+1}$ 表示如下:

$$t_{of,l}=\frac{d_l}{v} \quad (6)$$

$$T_{f,l}=t_{of,l}+T_0 \quad (7)$$

$$T_{0,l+1}=T_{f,l}+T_s \quad (8)$$

式中: v 为EV行驶的平均速度; d_l 为第*l*段路程的长度。

根据美国国家公路交通安全与管理局(NHTS)的EV调查数据^[25],居民每天首次和末次出行符合一定的正态分布 $N(\mu,\sigma^2)$,其中 μ 为均值, σ^2 为方差。

首次出行出发时间 $T_{first}(t)$ 为:

$$T_{first}(t)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}\exp\left(\frac{-(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad 0 < t \leq 24, \mu=6.92, \sigma=1.24 \quad (9)$$

最后一次出行出发时间 $T_{\text{final}}(t)$ 为:

$$T_{\text{final}}(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(t-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (10)$$

$0 < t \leq 24, \mu = 17.47, \sigma = 1.8$

4) EV 实时状态建模

$$H = \{S_{\text{rem},t}, w_i, P_i\} \quad (11)$$

式中: H 为在时刻 t 每辆 EV 实时状态信息的集合, 包含该时刻每辆车的剩余电量 $S_{\text{rem},t}$ 、行驶状态 w_i 和离所在位置最近的 V2G 交互站编号 P_i 。

2 V2G 用户参与供电恢复引导补偿机制

为引导 EV 用户在台风灾害下参与供电恢复, 本章考虑 EV 用户灾后的响应选择行为, 提出包含避难阶段和响应阶段的供电恢复引导补偿机制, 如图 1 所示。在避难阶段, 停驻在 V2G 站点的 EV 停止充电, 行驶中的 EV 寻找最近的 V2G 站点进行避难; 在响应阶段, V2G 站点里的 EV 在激励机制的引导下, 参与供电恢复。

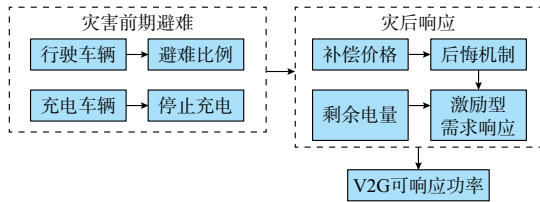


图1 灾害前期避难调度与灾后激励响应机制
Fig.1 Evacuation scheduling in the early stage of disaster and incentive response mechanism after disaster

需要指出的是, 该台风灾害场景并未达到毁灭性的程度, 也不会造成严重的电力及交通故障情况。所提供供电恢复引导机制在台风灾害发生时及灾后能够保证 V2G 站点内 EV 用户人身安全, 且参与供电恢复的 EV 能够获得一定的经济收益。

2.1 避难阶段

当灾害开始对电力系统造成破坏时, 基于用户出行需求的 EV 自由调度停止, 此时即为避难阶段, 需确定该时刻 t 的 EV 空间分布及行驶状态。避难阶段中, 原本停在 V2G 交互站充电的 EV 将停止充电, 原本在路上行驶的 EV 将被引导前往就近的 V2G 交互站。

引导避难的过程是以安全性为主要导向原则的。严重灾难面前, 保证安全是人潜意识下的应激反应, V2G 站点具有良好的避难效果, 对在路上行驶的 EV 用户具有较强的吸引力, 可以通过舆论宣传引导在路上行驶且靠近站点的 EV 前往并参与 V2G 反向输电。

$$N_{\text{re}} = \sigma_1 N_{\text{road}} + N_{\text{station}} \quad (12)$$

式中: N_{station} 为在 V2G 站点停驻的 EV 数量; σ_1 为响应引导并前往 V2G 站点避难的 EV 用户比例; N_{re} 为实际响应并前往 V2G 站点避难的车辆数。

参与 V2G 反向输电的 EV 用户能否有足够的电量持续为电网提供支撑十分关键。因此, 需要对站内的 EV 进行筛选:

$$S_{\text{rem},t} > P_{\text{Rated}}^{\text{V2G}} T_{\text{Rescue}} \quad (13)$$

式中: $P_{\text{Rated}}^{\text{V2G}}$ 为 V2G 站点额定放电功率; T_{Rescue} 为供电恢复抢修时间, 从停电到抢修恢复的时间由两部分组成, 即到达现场时间(城区约为 45 min、偏远地区约为 2 h)和现场抢修时间, 根据故障情况, 现场平均抢修时间为 3~5 h^[26], 故本文中取 T_{Rescue} 为 4 h。

2.2 响应阶段

当灾害不再对电力系统造成破坏时, 可引导用户参与电力系统的灾后恢复过程, 此时即为响应阶段。用户响应的过程是以经济利益为主要导向原则的。基于需求响应的激励机制, 可以促使在站内的 EV 用户参与 V2G 反向输电, 该过程中需对激励的程度和用户响应行为之间的关系以及用户响应的不确定性进行建模。

本文采用消费者心理学理论^[27-28]来描述签订合同过程中, 用户的放电响应行为与 V2G 服务聚合商的激励价格之间的关系。用户参与需求响应的响应行为存在一定的感觉阈值: 只有当激励高于阈值下限时, 用户才愿意与 V2G 服务聚合商签订合同, 参与需求响应。在感觉阈值内, 价格激励越高, 用户的放电响应概率越大, 能够参与需求响应的总 V2G 容量就越大。

基于消费者心理学的激励-放电响应过程如图 2 所示。图中: $f_m^{\text{up}1}(x)$ 和 $f_m^{\text{down}1}(x)$ 分别为正常场景下的放电响应上、下边界函数, $f_m^{\text{up}2}(x)$ 和 $f_m^{\text{down}2}(x)$ 分别为台风场景下的放电响应上、下边界函数, 其中, 上边界函数对应不考虑不确定性的场景, 下边界函数对应考虑不确定性的场景; $x_{\text{min}}^{\text{up}1}$ 和 $x_{\text{min}}^{\text{up}2}$ 分别为正常和台风场景下的放电响应上边界函数的临界激励; $x_{\text{min}}^{\text{down}1}$ 和 $x_{\text{min}}^{\text{down}2}$ 分别为正常和台风场景下的放电响应下边界函数的临界激励; $x_{\text{max}1}$ 和 $x_{\text{max}2}$ 分别为正常和台风场景下的放电响应上、下边界函数的饱和和激励; $f_m^{\text{V2G,up}1}(x_{\text{max}1})$ 和 $f_m^{\text{V2G,up}2}(x_{\text{max}2})$ 分别为正常和台风场景下用户 m 的饱和和放电响应率。

采用线性模型描述放电的不确定性响应过程。当经济激励水平为 x 时, 用户 m 的 V2G 放电响应率上、下界 $f_m^{\text{V2G,up}}(x)$ 和 $f_m^{\text{V2G,down}}(x)$ 分别表示如下。

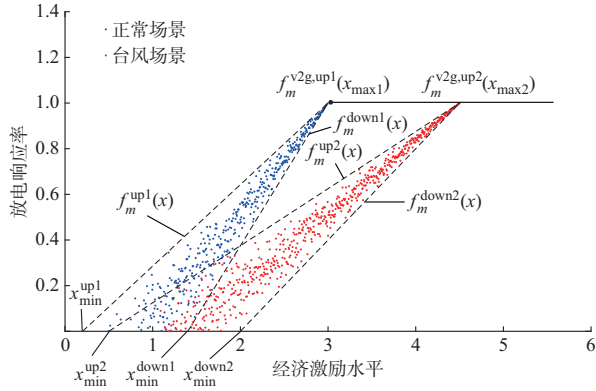


图2 基于消费者心理学的激励-放电响应过程
Fig. 2 Incentive-discharge response process based on consumer psychology

$$f_m^{v2g,up}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < x_{\min}^{\text{up}} \\ \frac{f_m^{v2g}(x_{\max}^{\text{up}})(x - x_{\min}^{\text{up}})}{x_{\max}^{\text{up}} - x_{\min}^{\text{up}}} & x_{\min}^{\text{up}} \leq x < x_{\max}^{\text{up}} \\ f_m^{v2g}(x_{\max}^{\text{up}}) & x_{\max}^{\text{up}} \leq x \end{cases} \quad (14)$$

$$f_m^{v2g,down}(x) = \begin{cases} 0 & 0 \leq x < x_{\min}^{\text{down}} \\ \frac{f_m^{v2g}(x_{\max}^{\text{down}})(x - x_{\min}^{\text{down}})}{x_{\max}^{\text{down}} - x_{\min}^{\text{down}}} & x_{\min}^{\text{down}} \leq x < x_{\max}^{\text{down}} \\ f_m^{v2g}(x_{\max}^{\text{down}}) & x_{\max}^{\text{down}} \leq x \end{cases} \quad (15)$$

本文中主要考虑台风场景,因此,实际计算时各参数后缀应带“2”。

EV用户在决定其是否参与反向输电行为时,经济激励的程度是影响选择结果的主要因素,总体呈正相关关系,但考虑到用户响应行为的不确定性,其实际响应率会在 $[f_m^{v2g,down}(x), f_m^{v2g,up}(x)]$ 内波动。本文中需用到的放电响应上下边界函数的参数 $x_{\min}^{\text{up1}}, x_{\min}^{\text{up2}}, x_{\min}^{\text{down1}}, x_{\min}^{\text{down2}}, x_{\max1}, x_{\max2}$ 均在算例中给出,所提方法在具体应用时,这些参数及实际响应的分布规律可根据特定地域的社会经济发展状况调整或依据历史数据通过拟合得到。本文采用均匀分布描述某一经济激励水平下用户的V2G放电响应:

$$\tilde{f}_m^{v2g}(x) \sim U[f_m^{v2g,down}(x), f_m^{v2g,up}(x)] \quad (16)$$

式中: $U[\cdot]$ 表示均匀分布; $\tilde{f}_m^{v2g}(x)$ 为用户 m 的放电响应率。

当经济激励水平为 x 时,放电响应波动程度如下所示:

$$R_m(x) = \frac{f_m^{v2g,up}(x) - f_m^{v2g,down}(x)}{f_m^{v2g,up}(x)} \quad (17)$$

式中: $R_m(x)$ 为用户 m 的响应波动程度。

节点 b 处对应激励水平为 x_m 的 N_b 个EV用户的实际V2G响应出力记为:

$$P_b^{\text{DR}} = \tilde{f}_m^{v2g}(x_m) N_b^{\text{re1}} P_{v2g} \quad (18)$$

式中: N_b^{re1} 为经第1阶段到达节点 b 充电且剩余电量能够满足持续放电需求的EV数量; P_{v2g} 为单辆EV的反向充电功率; $\tilde{f}_m^{v2g}(x_m)$ 为用户 m 在激励水平为 x_m 时的放电响应率。

由此,可确定节点 b 处有意向参与配电网供电恢复的EV数量 N_b^{v2g} 为:

$$N_b^{v2g} = \left\lfloor \frac{P_b^{\text{DR}}}{P_{\text{Rated},b}^{v2g}} \right\rfloor \quad (19)$$

式中: $P_{\text{Rated},b}^{v2g}$ 为与节点 b 耦合的V2G站点额定放电功率; $\lfloor \cdot \rfloor$ 为取整符号。

本文所提模型中,V2G站点分布密度较大且各站点充电桩数量较为充裕。当与节点 b 耦合的V2G站点可用充电桩数量 N_b^{charge} 小于 N_b^{v2g} 时,为尽可能满足配电网供电恢复需求,不考虑用户间竞争关系时选择剩余电能较多的EV参与供电恢复。因此,节点 b 处实际参与响应过程的EV数量 $N_b^{\text{EV, re}} = \min(N_b^{v2g}, N_b^{\text{charge}})$ 。

V2G服务聚合商补偿给用户的成本 C_{v2g} 包含电量成本和单次响应成本,即

$$C_{v2g} = \sum_{b=1}^{N_b} \lambda_{v2g} P_b^{\text{DR}} + \lambda_{\text{re}} \sum_{b=1}^{N_b} N_b^{\text{EV, re}} \quad (20)$$

式中: N_b 为节点总数; λ_{v2g} 和 λ_{re} 分别为单位响应功率的补偿价格和单次响应行为的补偿价格。

3 考虑V2G反向输电和配电网重构的经济性灾后恢复模型

3.1 考虑二阶锥约束的配电网重构交流最优潮流模型

本文所提的灾后恢复模型是指考虑二阶锥约束的配电网重构交流最优潮流(alternating current optimal power flow, ACOPF)模型。其中,灾后是指台风灾害强度下降到对城市配电网不再有破坏能力的时间点之后,因此,灾后阶段配电网拓扑不再改变。统计各V2G站点内的EV数量,并计算各V2G站点可提供的出力。有V2G站点的路网节点上V2G装置分别连接对应的配电网节点。为简化模型,只考虑重构以后配电网功率平衡,参与反向输电的各V2G交互站点按耗电功率为负的负荷处理。

$$p_i^{v2g} = a_i N_i^{\text{EV}} p_{\text{EV}} \quad (21)$$

式中: p_i^{v2g} 为配电网节点 i 上V2G装置的反向输电功率; N_i^{EV} 为配电网节点 i 上接入的EV数; p_{EV} 为单辆

EV反向充电的额定功率; a_i 为表示配电网节点*i*是否有V2G站点接入的0-1变量,配电网节点*i*有V2G站点接入时 $a_i=1$,并且站点会参与反向输电进行供电恢复,否则 $a_i=0$ 。因单个交互站内充电桩数量有限,需要设置一定的出力上限加以限制。

因此,灾后供电恢复即可转化成纯配电网重构的考虑二阶锥约束的ACOPF问题。

3.1.1 目标函数

由于考虑了激励机制,且灾害发生后需尽快恢复负荷的供电服务,故目标函数需考虑经济性,且需尽量降低失电量。

$$\max \left\{ \alpha \left(-\sum \omega_i \Delta p_i^{LS} \right) + (1-\alpha) \cdot \left[\sum (L_{0,i} - \Delta p_i^{LS}) b_{\Delta L S, i} - Q_{\text{basec}} \right] \right\} \quad i \in B \quad (22)$$

$$b_{\Delta L S, i} = l_{L S, i} (T_{bv} - T_{res}) \quad (23)$$

式中: α 为比例系数; ω_i 为节点*i*的重要负荷权重系数,系统中负荷按重要程度被划分为一级、二级和三级负荷, ω_i 分别取5、3、1; $L_{0,i}$ 为节点*i*供电恢复前的切负荷量; Δp_i^{LS} 为节点*i*供电恢复后的切负荷量; $b_{\Delta L S, i}$ 为节点*i*恢复单位负荷的综合等效收益; $l_{L S, i}$ 为节点*i*单位时间内单位负荷因失电带来的经济损失; T_{bv} 为供电恢复时长基准值(取人工抢修从故障发生到故障修复所用平均时间); T_{res} 为V2G参与供电恢复的响应时长; Q_{basec} 为V2G引导机制补偿给用户的总成本; B 为配电网中节点的集合。

3.1.2 约束条件

1) 功率平衡约束

$$\begin{cases} p_i^g - p_i^d + p_i^{V2G} = f(p^f - p^b + r_{ij} \tilde{I}_{ij}) + w(p^b - p^f + r_{ij} \tilde{I}_{ij}) \\ q_i^g - q_i^d = f(q^f - q^b + x_{ij} \tilde{I}_{ij}) + w(q^b - q^f + x_{ij} \tilde{I}_{ij}) \end{cases} \quad i, j \in B \quad (24)$$

式中: p_i^{V2G} 为与节点*i*耦合的V2G交互站点输入功率,当节点*i*与V2G站点不相连时 p_i^{V2G} 为0,否则为1; p_i^g 和 q_i^g 分别为流入节点*i*的有功和无功功率; p_i^d 和 q_i^d 分别为流出节点*i*的有功和无功功率; f 和 w 均为为规定支路*ij*实际潮流正反方向而引入的0-1变量, $f=1$ 、 $w=0$ 为由节点*i*到节点*j*的方向; p^f 和 p^b 分别为从节点*i*到节点*j*的功率和从节点*j*到节点*i*的功率; \tilde{I}_{ij} 为流经支路*ij*电流的平方; r_{ij} 和 x_{ij} 分别为支路*ij*的电阻和电抗。

2) 节点电压上下限和支路首末端电压约束

$$\underline{V}_j \leq \tilde{V}_j \leq \bar{V}_j \quad j \in B \quad (25)$$

$$\tilde{V}_j < \tilde{V}_i - 2(p_{ij} r_{ij} + q_{ij} x_{ij}) + \tilde{I}_{ij} (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) + M(1 - z_{ij}) \quad ij \in E_b \quad (26)$$

式中: \underline{V}_j 和 \bar{V}_j 分别为节点*j*电压的下限和上限; \tilde{V}_j 表示节点*j*电压的平方; p_{ij} 和 q_{ij} 分别为支路*ij*的有功和无功功率; z_{ij} 为支路*ij*的阻抗; E_b 为配电网中支路的集合; M 为一大数。

3) 支路电流上下限约束

$$\underline{I}_{ij} \leq \tilde{I}_{ij} \leq \bar{I}_{ij} \quad ij \in E_b \quad (27)$$

式中: \underline{I}_{ij} 和 \bar{I}_{ij} 分别为支路*ij*的电流下限和上限。

4) 输入功率上下限约束和支路功率上下限约束

$$(1 - s_i) p_i^{g, \min} \leq p_i^g \leq (1 - s_i) p_i^{g, \max} \quad i \in B \quad (28)$$

$$(1 - s_i) q_i^{g, \min} \leq q_i^g \leq (1 - s_i) q_i^{g, \max} \quad i \in B \quad (29)$$

式中: $p_i^{g, \min}$ 、 $p_i^{g, \max}$ 和 $q_i^{g, \min}$ 、 $q_i^{g, \max}$ 分别为流入节点*i*的有功和无功功率的下限、上限; s_i 为0-1变量, $s_i=0$ 表示线路*i*正常工作, $s_i=1$ 表示线路发生故障。

5) 切负荷量约束

$$p_i^d = p_i - \Delta p_i^{LS} \quad i \in B \quad (30)$$

$$q_i^d = q_i - \delta \Delta p_i^{LS} \quad i \in B \quad (31)$$

$$\Delta p_i^{LS} \leq p_i \quad i \in B \quad (32)$$

式中: p_i 和 q_i 分别为节点*i*的有功和无功功率; δ 为功率因数。

6) 径向约束/辐射状约束

$$0 \leq d_{ij}^f + d_{ij}^r \leq 1 \quad ij \in E_b \quad (33)$$

$$f d_{ij}^f + w d_{ij}^r = 1 \quad ij \in E_{\text{nor}} \quad (34)$$

$$f d_{ij}^f + w d_{ij}^r = 0 \quad ij \in E_{\text{bal}} \quad (35)$$

式中: d_{ij}^f 和 d_{ij}^r 表示支路*ij*的实际潮流流向, $d_{ij}^f=1$ 时潮流为正方向, $d_{ij}^r=1$ 时潮流为反方向; E_{nor} 为不包括平衡节点的支路集合; E_{bal} 为包括平衡节点的支路集合。

7) 二阶锥约束

$$\left\| \begin{array}{l} 2p_{ij} \\ 2q_{ij} \\ \tilde{I}_{ij} - \tilde{V}_j \end{array} \right\|_2 \leq \tilde{I}_{ij} + \tilde{V}_j \quad ij \in E_b \quad (36)$$

式中: $\|\cdot\|_2$ 表示矩阵的2-范数。

当要计算重构后的各参数时,忽略辐射状约束的第1个约束,优化得到重构后各支路的联络状态 $d_{ij} = d_{ij}^f + d_{ij}^r$,从而最终获得重构的线路开关方案。

上述模型为一个混合整数二阶锥优化问题,可采用CPLEX商业求解器直接求解。

3.2 灾后恢复评估指标

为对比V2G和MEG在弹性配电网灾后供电恢复中的作用,本文提出了一些评估指标,从系统失电

量、响应速度、重要负荷恢复程度等方面体现V2G在配电网弹性提升过程中的优劣性。具体的弹性评估指标内容在附录B中给出。

本文所提的台风灾害下基于V2G的城市配电网弹性提升架构详见附录C。

4 算例分析

本文采用改进的IEEE 33节点配电网和30节点路网系统为仿真场景。路网与配电网节点对应关系及功能区划分见文献[29]。具体配电网结构如附录D图D1所示,图中标出了V2G站点的编号;负荷按照重要程度被分为一级、二级和三级负荷,所在节点编号如附录D表D1所示。

仿真算例中,将一级和二级负荷切负荷造成的单位经济损失设为156元/kW和14.4元/kW^[30],放电响应参数 $x_{\min}^{\text{up}1}$ 、 $x_{\min}^{\text{up}2}$ 、 $x_{\min}^{\text{down}1}$ 、 $x_{\min}^{\text{down}2}$ 、 $x_{\max}1$ 、 $x_{\max}2$ 分别设为0.5、0.8、1.5、2.0、3.0、4.2元/(kW·h),单次出动MEG的等效成本为10 000元/辆,MEG最大输出功率为120 kW;供电恢复时长基准值 T_{bv} 为4 h,MEG参与供电恢复的响应时长 T_{res} 为45 min;比例系数 α 取0.8,配电网故障场景中断线数量上下限 K_{\max} 和 K_{\min} 分别取5和2;各V2G交互站点充电桩数量为19台,充电桩充放电功率为7 kW;EV的具体参数见附录D表D2。

4.1 用户行为特性对V2G参与供电恢复的影响

在台风灾害影响下,部分EV用户会选择不出行,即用户的出行意愿可能会发生变化。

附录E图E1所示为灾害发生时刻为09:00且EV数量为300时,不同用户出行意愿下各节点V2G参与供电恢复的出力。由图可知,在居民区节点1~17,用户出行意愿越高,V2G供电恢复出力越低;而在工作区节点18~23,用户出行意愿与V2G供电恢复出力呈正相关。由此可知,灾害发生时的用户出行意愿对各节点V2G出力影响较大,在后续算例中取用户出行意愿 $\alpha_2=0.8$ 。此外,由于行车速度下降,部分道路还可能出现拥堵情况。

附录E图E2所示为灾害发生时刻为20:00且EV数量为300时,道路不同拥堵情况下各节点V2G参与供电恢复的出力。由图可知,拥堵程度增加时,到达居民区节点9~17处的EV数量下降,V2G出力略微降低。由此可知,灾害发生时的道路拥堵情况对各节点V2G供电恢复出力影响较小。

4.2 V2G参与供电恢复策略的效果及经济性

为验证V2G参与供电恢复策略的可行性和适用性,本文设计了以下3种方案:

1)方案1:仅考虑配电网联络线重构;

2)方案2:在配电网联络线重构的基础上,引入V2G参与供电恢复;

3)方案3:在配电网联络线重构的基础上,引入MEG参与供电恢复。

该子算例中,取灾害发生时刻为23:00、EV数量为300、MEG数量为6。随机抽取500组配电网故障场景,对各方案的弹性评估指标进行对比。

1)各方案失电量对比

由表1可知,联络线重构对失电量的减少有一定帮助,能使灾后配电网失电量降低28.26%;而引入V2G或MEG可使失电量显著减少,配合联络线重构,可使灾后配电网失电量分别减少60.18%和53.39%。附录E图E3所示为500组配电网故障场景下各方案的失电量散点图。可见,方案1的失电量分布较为分散;而方案2与方案3的失电量分布大多集中在1 MW以下,两者分布趋势差别不大。

表1 各方案下的失电量对比
Table 1 Comparison of power loss in each scheme

方案种类	失电量/MW	失电量减少百分比/%
不重构	1.341	
方案1	0.962	28.26
方案2	0.534	60.18
方案3	0.625	53.39

由此可见,在考虑配电网联络线重构的基础上,引入V2G和引入MEG两种方案在失电量减少方面的效果都较为显著,两者之间区别不大。

2)各方案经济损失对比

由表2可知,方案3的等效成本比方案1增加了43.70%,体现出MEG参与供电恢复要付出极高的经济代价,符合现今主流弹性提升方案为尽快恢复重要负荷而不惜一切代价的情况;而方案2的等效成本比方案1减少了14.68%,体现出V2G参与供电恢复具有较高的经济性。附录E图E4所示为在500组配电网故障场景下各方案的等效成本散点图。可以看出,方案3在所有场景下的等效成本都高于50 000元,而方案1与方案2的等效成本大部分都低于50 000元,其中方案2的等效成本高于50 000元的场景个数又明显少于方案1的场景个数。

表2 各方案下的等效成本对比
Table 2 Comparison of equivalent cost in each scheme

方案	等效成本/元	成本减少百分比/%
方案1	59 855.90	
方案2	51 067.01	14.68
方案3	86 009.99	-43.70

由此可见,在考虑配电网联络线重构的基础上,引入V2G的方案相比于另外2种方案在经济损失方面具有明显的优势。

3)各方案响应速度与重要负荷恢复程度对比

由图3可知,方案1和2相比于方案3参与供电恢复的响应速度明显更快。对于提高一级负荷的恢复程度而言,运用联络线重构操作的作用显著,因此,方案1已达到了很高的负荷恢复程度,引入V2G和MEG很难再有大的提升;而对于提高二级负荷恢复程度而言,方案2相比于方案1提高了21.98%,方案3相比于方案1提高了10.70%。

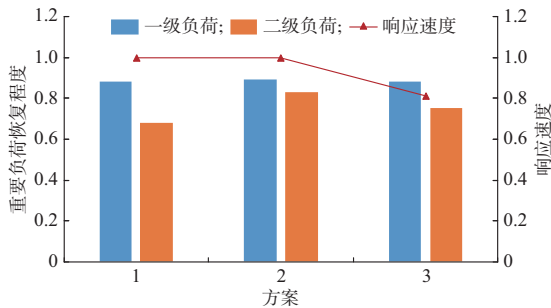


图3 各方案响应速度与重要负荷恢复程度对比
Fig.3 Comparison of response speed and recovery degree of important load in each scheme

由此可见,在响应速度方面,方案2相比于方案3有明显的优势;在重要负荷恢复程度方面,方案2相比于方案3作用更显著。

4.3 EV渗透率与时空特性对方案2的影响

4.3.1 EV渗透率的影响

表3列出了当灾害发生时刻恒定为23:00,且EV数量分别为200、300、400、500、600时的各指标对比。随着EV数量的增加,在其达到500之前,失电量和等效成本都在不断降低;当EV数量达到500之后,失电量和等效成本都不再大幅变化。对于重要负荷供电恢复而言,EV数量对仅使用联络线重构已恢复很好的一级负荷的影响有限,但对提高二级负荷恢复程度效果显著。

表3 方案2下改变EV数量时的各指标对比
Table 3 Index comparison with changing numbers of EVs in scheme 2

EV数量	失电量/MW	等效成本/元	一级负荷恢复程度/%	二级负荷恢复程度/%
200	0.648	52 819.07	88.90	78.31
300	0.534	51 067.01	89.44	83.27
400	0.486	48 756.23	95.60	92.70
500	0.399	45 682.14	94.72	92.76
600	0.403	46 004.61	94.46	92.92

由此可见,EV数量会影响方案2对配电网弹性提升的结果。在一定范围内,EV数量越大越可以有效降低系统的失电量,并提高重要负荷供电恢复程度和方案的经济性,但受限于V2G站点数量、配电网传输能力等因素,在EV达到一定数量后,其数量的进一步增加无法继续提高恢复效果。

4.3.2 EV时空特性的影响

本节研究EV时空特性对方案2在灾后供电恢复过程中的影响,具体从改变灾害发生时刻和选取典型的EV空间分布2个方面进行探讨。

1)灾害发生时刻对方案2在配电网弹性提升中的影响

图4所示为当EV数量恒定为300时,灾难发生在一天内不同时刻使用方案2的等效成本和失电量指标变化。

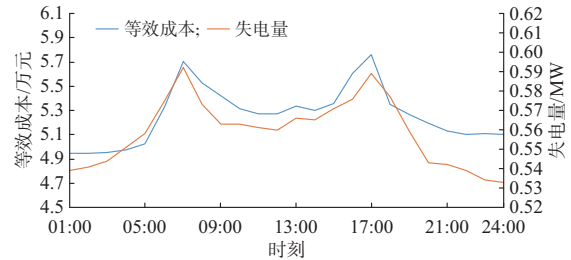


图4 方案2下各时刻的等效成本和失电量曲线
Fig.4 Curves of hourly equivalent cost and power loss in scheme 2

由图4可得到以下结论:

(1)等效成本和失电量的变化趋势大体近似为“M型曲线”,且都在07:00和17:00达到“高峰”,符合出行链模型中出行行为的正态分布期望值。

(2)夜间和午间时段为“谷期”,且曲线趋势较为平稳。上述2个时段内EV大多处于停放状态,愿意响应激励的EV较多,各V2G站点出力较高,故失电量处于相对较低的水平。同时,由于愿意响应的车辆较多,激励机制中补偿价格较低,补偿成本和切负荷成本都不高,等效成本处于较低水平。

(3)车辆出行的早、晚高峰(05:00—09:00和15:00—19:00)为“峰期”,且曲线趋势变化剧烈。上述2个时段内EV大多处于行驶状态,愿意响应激励指令的EV较少,各V2G站点出力较低。同时,由于愿意响应的车辆较少,激励机制中补偿价格较高,补偿成本和切负荷成本大幅提高,在出行高峰的2个时刻(07:00和17:00),等效成本达到最大值。

由此可见,方案2受灾害发生时刻影响显著,一天内不同时刻能提供的出力和经济性波动较大。

2)EV空间分布对方案2在配电网弹性提升中

的影响

该子算例选取确定断线场景下的典型EV空间分布,研究EV聚集区域不同对供电恢复的影响。附录E图E5所示为某确定断线场景下的系统供电分布和范围。由图可知,在该断线场景下,居民区、工作区和休闲区均存在供电效果显著降低的节点。

图5所示为在该断线场景下,EV分别聚集在居民区和休闲区内时的系统供电恢复分布和范围。从图5(a)中可以明显看出,当EV聚集在居民区时,节点13、14、17和18处相比于采用方案2之前的供电效果提升显著,供电比例均达到90%以上;而方案2对另2个区域的系统节点供电恢复效果有限,节点27、28和33处的供电比例均在30%以下。类似的,从图5(b)中可明显看出,当EV聚集在休闲区时,区内各节点供电恢复效果良好,而另2个区域内的节点供电恢复效果有限。

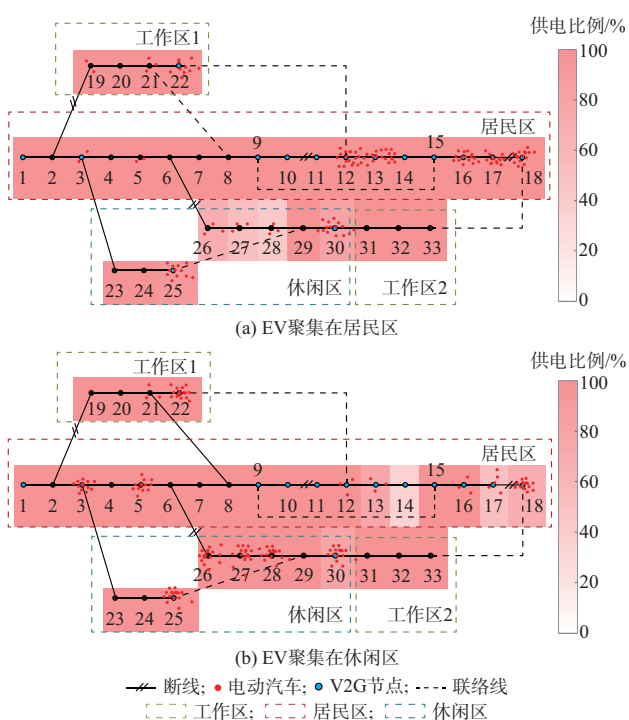


图5 确定断线场景下EV聚集在居民或休闲区的系统供电分布和范围示意图

Fig. 5 Schematic diagram of power supply distribution and scope of the system where EVs gather in residential or leisure areas in the determined line disconnection scenario

综上所述,方案2受EV空间分布影响显著,不同区域供电恢复效果差别较大,在EV聚集的区域系统各节点供电恢复效果较好。

5 结语

本文提出了一种台风灾害下基于V2G的城市配电网弹性提升策略。首先,考虑台风与线路故障

率关系,采用非序贯蒙特卡洛模拟法生成配电网断线场景;其次,考虑灾害下的用户行为改变,建立了EV群体的灾害前期调度及灾后供电恢复响应模型;然后,在生成灾害场景下,考虑V2G反向出力求解最优供电恢复策略;最后,提出多个弹性评估指标,验证了所提方法的有效性及其可行性。得出主要结论如下:

1)台风灾害会影响道路拥堵情况及用户出行意愿,而EV的时空分布特性也会因此改变,进而影响V2G供电恢复出力,其中对道路拥堵情况影响较小、对用户出行意愿影响较大。

2)弹性背景下,引入V2G参与供电恢复的方案相比于引入MEG在失电量减少方面作用接近,在经济性和响应速度提升方面优势明显,为现有配电网弹性提升策略提供了新思路。

3)白天V2G可调动EV出力相对较少,单位补偿价格高,导致失电量上升,等效成本增大,表明V2G参与供电恢复的效果受灾害发生时刻和EV用户的响应行为影响较大,方案的经济性和失电量波动因而较为剧烈。此外,供电恢复效果受EV空间分布影响较大,当EV群体集中在某一区域时,该区域供电恢复好,但对周边区域作用有限。

本文研究中,故障场景生成和用户在激励下的响应行为均基于一定的假设,模型偏理想化。后续工作将进一步研究如何提升V2G在弹性配电网供电恢复中的作用,包括灾后基于能量调度的EV反向充电引导,以及EV和MEG协同参与的配电网供电恢复策略等。

审稿过程中,审稿人与作者的讨论见附录F。

本文在撰写过程中还受到了四川大学电气工程学院向月副教授、何川副教授以及东南大学电气工程学院邢强博士的帮助,特此感谢!

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

参考文献

- [1] 张立先.输变电工程后续工作 提高电网抵御自然灾害的能力[M]//中国三峡建设年鉴.武汉:中国长江三峡集团有限公司,2008.
ZHANG Lixian. Follow-up work of the power transmission and transformation project to improve the ability of the power grid to resist natural disasters[M]// China Three Gorges Construction Yearbook. Wuhan: China Three Gorges Corporation, 2008.
- [2] 杜祥琬,曾鸣.关于能源与电力“十四五”规划的八点建议[N].中国能源报,2019-06-10(001).

- DU Xiangwan, ZENG Ming. Eight suggestions on the 14th Five Year Plan of energy and power[N]. China Energy News, 2019-06-10(001).
- [3] 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):2735-2745.
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): 2735-2745.
- [4] 黄仁山.极端冰雪天气下配电网弹性恢复力指标构建及评估方法[D].天津:天津大学,2019.
HUANG Renshan. Construction and evaluation method of resilient restoration capability metrics for distribution network under extreme ice and snow weather [D]. Tianjin: Tianjin University, 2019.
- [5] 顾明宏,孙为兵,李培培,等.面对极端扰动事件的城市弹性配电网评估指标体系[J].电力系统及其自动化学报,2018,30(7):103-109.
GU Minghong, SUN Weibing, LI Peipei, et al. Evaluation index system for urban elastic distribution network in the face of extreme disturbance events[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(7): 103-109.
- [6] HE C, DAI C X, WU L, et al. Robust network hardening strategy for enhancing resilience of integrated electricity and natural gas distribution systems against natural disasters [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(5): 5787-5798.
- [7] 黄格超,李更丰,肖遥,等.综合考虑自然灾害与人为攻击的电气互联系统优化配置方法[J].电网技术,2021,45(3):959-970.
HUANG Gechao, LI Gengfeng, XIAO Yao, et al. Optimal placement for integrated electricity and gas energy system considering natural disasters and man-made attacks [J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 959-970.
- [8] 李稳国.电力网络拓扑优化与弹性提升方法研究[D].长沙:湖南大学,2019.
LI Wenguo. Research on method of topology optimization and elasticity improvement for power grids [D]. Changsha: Hunan University, 2019.
- [9] 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.
- [10] 张亚超,谢仕炜.面向配电网弹性提升的多时间尺度恢复策略协调优化框架[J].电力系统自动化,2021,45(18):28-34.
ZHANG Yachao, XIE Shiwei. Coordinated optimization framework of multi-timescale restoration strategies for resilience enhancement of distribution networks [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(18): 28-34.
- [11] 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.
- [12] 章博,刘晟源,林振智,等.高比例新能源下考虑需求侧响应和智能软开关的配电网重构[J].电力系统自动化,2021,45(8):86-94.
ZHANG Bo, LIU Shengyuan, LIN Zhenzhi, et al. Distribution network reconfiguration with high penetration of renewable energy considering demand response and soft open point [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(8): 86-94.
- [13] 胡玉,顾洁,马睿,等.面向配电网弹性提升的智能软开关鲁棒优化[J].电力自动化设备,2019,39(11):85-91.
HU Yu, GU Jie, MA Rui, et al. SNOP robust optimization for distribution network resilience enhancement [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 85-91.
- [14] 秦清,韩蓓,李国杰,等.含智能软开关的配电网多阶段弹性力学映射与评估[J].电工技术学报,2021,36(21):4444-4458.
QIN Qing, HAN Bei, LI Guojie, et al. Multi-stage elastic mechanical modelling and evaluation of distribution networks with soft open point [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2021, 36(21): 4444-4458.
- [15] LEI S B, CHEN C, ZHOU H, et al. Routing and scheduling of mobile power sources for distribution system resilience enhancement [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5650-5662.
- [16] YAN M Y, SHAHIDEHPOUR M, PAASO A, et al. Distribution system resilience in ice storms by optimal routing of mobile devices on congested roads [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2021, 12(2): 1314-1328.
- [17] XU Y, WANG Y, HE J H, et al. Resilience-oriented distribution system restoration considering mobile emergency resource dispatch in transportation system [J]. IEEE Access, 2019, 7: 73899-73912.
- [18] 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.
- [19] MOORE E A, RUSSELL J D, BABBITT C W, et al. Spatial modeling of a second-use strategy for electric vehicle batteries to improve disaster resilience and circular economy [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 160: 104889.
- [20] MEHRJERDI H. Resilience oriented vehicle-to-home operation based on battery swapping mechanism [J]. Energy, 2021, 218: 119528.
- [21] 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):3789-3800.
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): 3789-3800.
- [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.
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.
- [23] 丘建栋,庄立坚,周勇,等.台风天气对城市道路交通运行的影响分析——以深圳市为例[J].科学技术创新,2018(28):124-126.
QIU Jiandong, ZHUANG Lijian, ZHOU Yong, et al. Analysis of the impact of typhoon weather on urban road traffic

- operation—taking Shenzhen as an example [J]. *Scientific and Technological Innovation*, 2018(28): 124-126.
- [24] 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.
- [25] Administration of Federal Highway. The 2009 national household travel survey[R]. 2010.
- [26] 陆如, 范宏, 周献远. 基于大数据技术的配电网抢修驻点优化方法[J]. *供用电*, 2015, 32(8): 31-36.
- LU Ru, FAN Hong, ZHOU Xianyuan. Optimization method of repair the stagnation point distribution based on big data analysis method[J]. *Distribution & Utilization*, 2015, 32(8): 31-36.
- [27] 朱兰, 刘仲, 唐陇军, 等. 充放电不确定性响应建模与电动汽车代理商日前调度策略[J]. *电网技术*, 2018, 42(10): 3305-3317.
- ZHU Lan, LIU Shen, TANG Longjun, et al. Modeling of charging and discharging uncertainty and research on day-ahead dispatching strategy of electric vehicle agents[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(10): 3305-3317.
- [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.
- [29] 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.
- [30] SULLIVAN M J, MERCURIO M, SCHELLENBERG J. Estimated value of service reliability for electric utility customers in the United States[R]. 2009.

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

李更丰(1984—), 男, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统恢复力、综合能源系统可靠性评估。E-mail: gengfengli@mail.xjtu.edu.cn

别朝红(1970—), 女, 通信作者, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 主要研究方向: 电力系统恢复力、能源互联网、电力系统规划与市场。E-mail: zhbic@mail.xjtu.edu.cn

(编辑 章黎)

Vehicle-to-Grid Based Resilience Promotion Strategy for Urban Distribution Network Under Typhoon Disaster

YANG Qiming¹, LI Gengfeng¹, BIE Zhaohong¹, WU Jiayu², JI Chenlin³, LIU Dafu²

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049, China;

2. School of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;

3. Wuxi Power Supply Company of State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Wuxi 214061, China)

Abstract: In recent years, extreme natural disasters represented by typhoons have led to frequent power outages in urban distribution networks, which has brought challenges to the sustainable power supply of urban power grids. Under the background of the rapid growth of the number of electric vehicle (EV) user groups, aiming at the above problems, a vehicle-to-grid (V2G) based resilience promotion strategy for the urban distribution network is proposed to enhance the ability of urban power grid to deal with typhoon disasters. Firstly, the failure rate model of the distribution network component is established, and the distribution network failure scenarios under typhoon disasters are generated by random sampling. Secondly, considering the impact of the upcoming typhoon disaster on the road congestion and users' travel intention, an EV scheduling model in the early stage of the disaster is established. Then, based on the theory of consumer psychology, the post-disaster incentive response mechanism for the reverse power transmission is formulated to guide EVs in the V2G station to participate in the power supply restoration. Finally, considering the reconfiguration of the distribution network and the reverse charging of V2G stations, the post-disaster power supply restoration strategy with the participation of V2G is formulated. The example analysis shows that, compared with the mobile emergency generator (MEG), the scheme of V2G participating in the power supply restoration has a better economy and restoration effect, which verifies the feasibility and effectiveness of the proposed resilience promotion strategy.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51637008).

Key words: resilient distribution network; electrical vehicle; vehicle-to-grid (V2G); tie-line reconfiguration; typhoon disaster; mobile energy storage

