

# 融合交通网的局域能源互联网多故障修复策略

吕雪姣<sup>1</sup>, 杨丽君<sup>2</sup>, 安立明<sup>3</sup>, 蔺志鹏<sup>1</sup>

(1. 河北科技师范学院 机电工程学院, 河北 秦皇岛 066004;

2. 燕山大学 电力电子节能与传动控制河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004;

3. 北京电力设备总厂有限公司, 北京 102401)

**摘要:**针对局域能源互联网发生多故障时的失电负荷快速恢复问题,在考虑交通网与电网信息耦合关系的基础上,提出了一种融合交通网的局域能源互联网多故障修复策略。当局域能源互联网发生多故障时,首先能源路由器将故障信息传递给各虚拟微网;然后,虚拟微网通过控制分布式电源出力,再联合交通网信息对电动汽车进行调度,以优先恢复重要负荷和失电负荷恢复价值最大化为目标制定恢复策略;在此基础上,考虑到微网恢复能力以及电动汽车电池容量限制,当局域能源互联网仍有失电负荷时,结合交通网信息以网损最小为目标优化抢修小队路径,从而实现了对关键故障点的抢修,提高恢复效率;最后,以IEEE 69节点系统为例,验证所提策略的可行性。

**关键词:**局域能源互联网;交通网;虚拟微网;电动汽车;分布式电源;故障修复

**中图分类号:**TM 76;TK 01

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202007009

## 0 引言

能源互联网是在第三次工业革命背景下,为解决化石燃料的逐渐枯竭及其造成的环境污染问题,以新能源技术和信息技术深入结合为特征的一种新的能源利用体系<sup>[1]</sup>。能源互联网是以电能为主体形式、以智能电网为载体的能源互联网络<sup>[2]</sup>,是涵盖一次能源网络、电力系统网络、交通网络及信息网络共4个网络耦合而成的复杂的网络体系<sup>[3]</sup>。它用先进的电力电子技术、智能能量管理技术、先进储能技术和可靠通信技术共同支撑实现能源互联网的功能,而局域能源互联网是能源互联网的子网。因此,本文以局域配电网为主,对局域能源互联网发生故障时的失电负荷恢复问题进行了研究。

局域能源互联网自愈模式及主动配电网故障抢修和恢复模型对于局域能源互联系统故障修复研究有很大参考价值。文献[4]针对有源配电网发生故障后的快速供电恢复需求,提出基于多代理技术的自愈恢复系统。文献[5]为准确、快速地获取配电网故障恢复最优策略,提出基于节点状态优化的故障恢复混合整数线性规划方法。然而,以上文献在故障恢复时将负荷看作固定模型,这对于包含多源网络和分布式电源DG(Distributed Generation)的局域能源互联网故障修复工作具有一定的局限性。

由于电动汽车EV(Electric Vehicle)具有负荷和

电源的双重身份,可以为故障修复工作提供更多恢复资源,而考虑EV则需要考虑交通网<sup>[6]</sup>,故而研究EV和交通网对配电网故障恢复和抢修有很大的参考价值。文献[7]基于复杂网络理论,“车-路-网”耦合系统可抽象为交通网和电力网构成的二元网络。文献[8]构建了交通能源互联网,实现横向多源互补与纵向“源-网-荷-储”协调。文献[9]在主动配电网故障恢复中考虑了EV,实现快速且最大化恢复失电负荷。文献[10]通过对EV集中控制,使EV作为公司后备电源为公司盈利服务,或者在配电网发生故障导致公司停电时利用EV对失电负荷进行供电。因此,针对多源网络的局域能源互联网故障修复问题,有必要考虑EV的参与。

基于已有研究,本文在考虑EV入网V2G(Vehicle to Grid)特性的基础上,利用电网和交通网的信息耦合关系,提出了一种融合电网和交通网的局域能源互联网多故障修复策略。首先,根据局域能源互联网分层分区结构,针对就地保护层的DG出力和EV荷电状态(SOC),设计了一种局域能源互联网的虚拟微网VMG(Virtual MicroGrid)分区控制恢复策略。当局域能源互联网发生故障时,各虚拟微网通过控制DG出力及EV的充放电模式,联合交通网信息对失电负荷进行恢复;同时,考虑到DG出力以及EV电池容量的限制,联合交通网信息为抢修小队选择最优路径来实现对各故障点的抢修,从而提高恢复效率。

## 1 局域能源互联网虚拟微网结构模型设计

### 1.1 局域能源互联网分层分区结构

根据能源互联网“局部消纳,局域互联”的需要,

收稿日期:2019-12-07;修回日期:2020-05-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61573302);河北省自然科学基金资助项目(E2019203514)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(61573302) and the Natural Science Foundation of Hebei Province(E2019203514)

局域能源互联网从网络结构角度分为就地保护层、分布自治层和集中优化层<sup>[11]</sup>,其结构如图 1 所示。其中,就地保护层是控制设备的执行和采集单元;分布自治层主要是完成微网、能源服务器、气网、热力网以及交通网内部信息的交换和管理,以实现能源就地消纳;集中优化层是对控制策略的优化,集成了能源变换模块、智能控制模块、故障检测模块和通信模块<sup>[12]</sup>,能源变换模块实现能量转换和存储,智能控制模块对信息进行判断和分析,故障检测模块进行故障信息的检测,通信模块获得设备的运行状态信息。

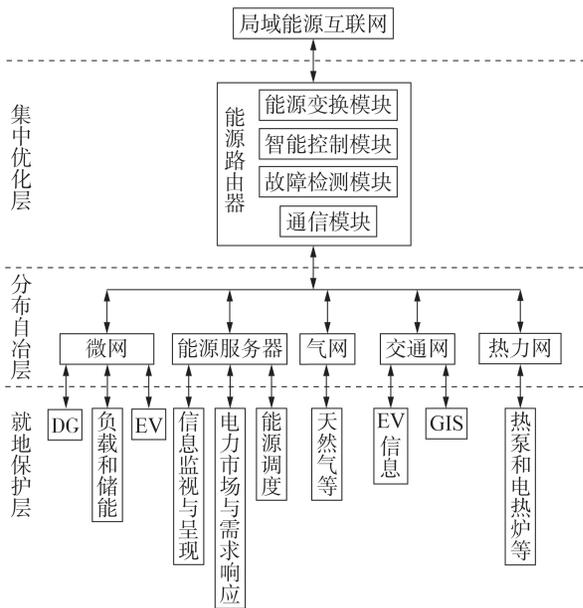


图 1 局域能源互联网分层分区结构

Fig.1 Hierarchical structure of local energy internet

### 1.2 局域能源互联网虚拟微网分区结构

由于 DG 可分为可控 DG(如燃气轮机、内燃机组)和不可控 DG(如光伏、风力),为了平抑不可控 DG 出力的波动性,本文参考文献[13]将不可控 DG 配置储能系统 ESS(Energy Storage System)组成出力可控的 DG,而为了简化模型,在后文中认为可控 DG 和不可控 DG 与 ESS 的组合均为可控 DG,简称 DG。利用虚拟微网对局域能源互联网进行划分的目的是沟通、信息处理、控制和能源管理<sup>[14]</sup>。考虑到各虚拟微网间既彼此独立又相互关联,故而通过能源路由器对其进行管理、控制以及协调。局域能源互联网的虚拟微网分区结构如图 2 所示。针对局域能源互联网中 DG 和 EV 具有分散、难以控制的特点,本文将局域能源互联网内具有若干联系的 DG 和 EV 划分为若干个虚拟微网,其划分原则为:以具有较强调节能力的 DG 为中心,以馈线的拓扑结构为路径对局域能源互联网进行区域划分。

### 1.3 融合交通网的局域能源互联网虚拟微网分区控制恢复模型设计

EV 连接着电网和交通网信息,故利用 EV 进行

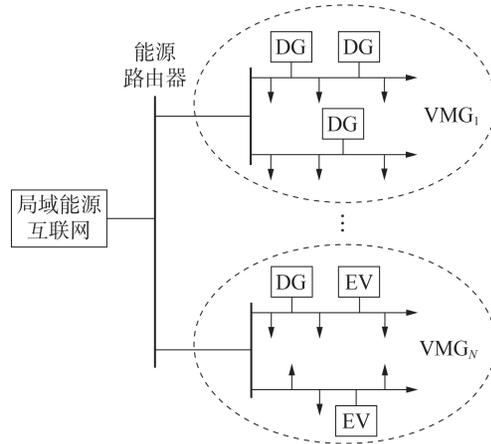


图 2 局域能源互联网的虚拟微网分区结构

Fig.2 Partition structure of virtual microgrid for local energy internet

供电恢复时,需结合交通网对 EV 进行调度,即考虑电网和交通网信息之间的耦合关系。局域能源互联网与交通网间的耦合关系如图 3 所示。其中,交通地理信息系统 GIS(Geographic Information System)主要存储着路径信息和 EV 信息;能源路由器连接了各虚拟微网和交通信息网,并且将交通网中的 EV 信息传递给各个虚拟微网;各个虚拟微网根据失电负荷的信息将 EV 的调度策略传递给交通网,由交通网对一定数量、一定型号的 EV 进行调度;交通信息网具有的监视系统可以将 EV 的监控信息及时传递给各虚拟微网,虚拟微网对出现的突发情况做出及时响应。

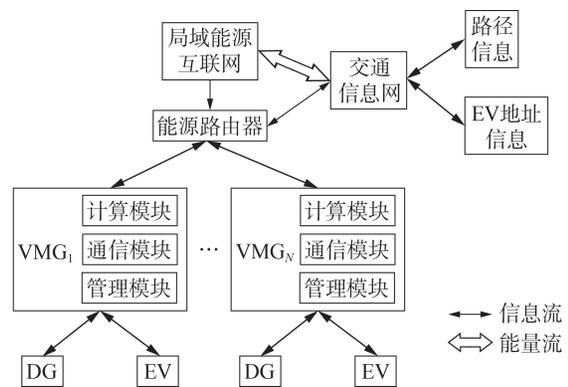


图 3 局域能源互联网与交通网间的耦合关系

Fig.3 Coupling relationship between local energy internet and transportation network

当局域能源互联网系统发生故障时,对各 DG 以及 EV 控制和调度都可以为其失电负荷恢复供电,因此对局域能源互联网虚拟微网分区恢复策略的设计方案如下。

(1)当局域能源互联网发生故障,并且虚拟微网内 DG 能够完全恢复重要负荷时,在分析 DG 当前出力、最大出力和失电负荷量的基础上,以优先恢复重

要负荷为前提最大限度地恢复失电负荷。当单个虚拟微网无法完全恢复失电负荷时,将多个虚拟微网联合成一个大微网采用孤岛运行方式为失电负荷恢复供电<sup>[13]</sup>。

(2)当局域能源互联网发生故障,并且DG仍不能恢复所有重要负荷时,虚拟微网对EV进行直接调度,并且联合交通网信息对故障点的EV进行间接控制。此时,借助交通网的定位系统监控EV动态,并利用GIS分析路况为EV选择最优路径,以减少车程时间。

(3)当局域能源互联网发生故障,并且利用虚拟微网控制DG以及EV仍有失电负荷没有恢复时,需要对故障点进行抢修。此时,能源路由器将需要抢修的故障点信息传递给能源服务器,能源服务器控制能源调度系统对附近的抢修小队进行调度,借助交通网GIS分析路况为抢修小队选择最优路径,以减少抢修时间,提高恢复效率。

## 2 融合交通网的局域能源互联网多故障修复模型

### 2.1 局域能源互联网多故障修复中路径优化模型

EV具备负荷和蓄电池双重特性。然而,EV的充放电技术需要考虑到电网、交通网以及用户,因此本文将电网和交通网相结合研究故障修复策略。为了实现EV及抢修小队的行驶路径最短,首先对现实的道路交通网进行简化和抽象,创建与之相关的网络模型,形成与交通网本身相对应的空间数据及关联属性数据<sup>[15]</sup>。文献[16]给出了IEEE 33节点电网与交通网节点图,充分说明了交通网和电网耦合的必要性和可行性。考虑到极端天气情况导致交通网受损下所建模型和求解方法更为复杂,故而本文假定天气变化不会导致交通网损坏,因此,局域能源互联网多故障修复中路径优化策略为:在对重要失电负荷进行恢复时,交通网的信息系统可以迅速地找到满足约束条件的EV;交通网的定位系统可以实时监控EV和抢修小队的动态,及时应对突发状况;交通网的GIS通过分析路况,根据所创建的交通网模型和Dijkstra算法选取最优路径。其中,采用Dijkstra算法能够快速计算得到从EV起始位置到达失电负荷点位置的最短路径,为EV和抢修小队寻找到最优路径及最短车程时间,从而节省抢修小队的抢修时间和失电负荷的经济损失,提高恢复效率。

### 2.2 EV调度模型

当局域能源互联网发生故障,并且利用虚拟微网控制DG对失电负荷进行恢复后仍存在重要失电负荷时,虚拟微网可以结合交通网的定位技术以及对故障点附近的EV进行调度。根据美国交通部

全美家用车辆的调查可知,私人EV的日行驶里程服从如下概率分布密度曲线<sup>[17]</sup>公式:

$$f_{LD}(x) = \frac{1}{x \delta_D \sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(\ln x - \mu_D)^2}{2\delta_D^2}\right] \quad (1)$$

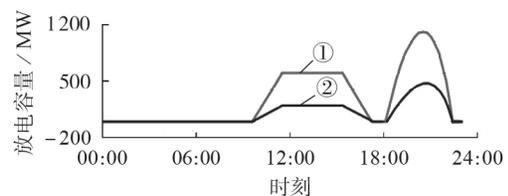
其中, $\mu_D$ 为行驶里程平均值,表示最大概率密度的位置; $\delta_D$ 为行驶里程标准偏差; $x$ 为行驶里程,且 $0 < x < 200$  km。

当局域能源互联网发生故障时,根据EV的日行驶里程的概率分布,EV对失电负荷供电的电量估计如下:

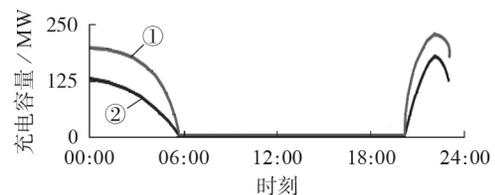
$$B_{LR} = \begin{cases} B_{L0} - dE_E & t \leq t_{reach} \\ (B_{L0} - E_D E_E) + C_P(t - t_{reach}) & t_{reach} + Q_T \leq t \leq t_{leave} \\ B_{LF} & \text{其他} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $B_{LR}$ 为当前时刻剩余电池电量; $B_{L0}$ 为初始电池电量; $d$ 为车辆从出发点到当前位置已经行驶的路径长度; $B_{LF}$ 为EV所在故障点抢修结束后EV所剩电量; $E_E$ 为车辆每千米耗电量; $E_D$ 为从出发点到规划前往的故障恢复点的路径长度; $Q_T$ 为车辆的充电时间; $C_P$ 为车辆的充电功率; $t_{reach}$ 、 $t_{leave}$ 分别为EV到达和离开故障点的时间。

蒙特卡洛方法,又称统计模拟法、随机抽样技术,是以概率和统计理论方法为基础的一种随机模拟计算方法,将其所求解的问题与一定的概率模型相联系,用计算机实现统计模拟或抽样,可有效获取问题的近似解<sup>[18]</sup>。本文采用蒙特卡洛方法对EV充放电容量进行仿真预测,并参考文献[19]中EV在20%和30%的渗透率下的放电和充电容量,具体如图4所示。可见[09:00, 17:00)、[18:00, 22:00)为EV参与调度的放电时段,其放电容量最大可达1100 MW,而[00:00, 05:00)、[20:00, 23:00]为EV的充电时段。



(a) EV放电容量时序图



(b) EV充电容量时序图

① 渗透率为30%, ② 渗透率为20%

图4 EV放、充电容量

Fig.4 Discharging and charging capacity of EV

假设当局域能源互联网发生故障时,对失电负荷所在区域 50 km 范围内的 EV 进行调度, EV 蓄电池的最大可用容量是其最大容量的 60%,并且短时间内 EV 群的放电容量是稳定的。根据失电负荷量及 EV 的最大放电功率来确定 EV 群所要包含的 EV 数量, EV 调度策略为:以 EV 群所在的失电负荷节点为中心,对网络进行深度优先搜索,形成一个孤岛为失电负荷供电,且每隔 1 h 虚拟微网需要对 EV 的充放电容量进行一次数据采集,并判断是否满足 EV 电池容量的约束。

由于 EV 容量的限制,当 EV 无法调度或者电池容量不足时,需要对该失电区域的故障点进行紧急抢修。考虑到不同 EV 群所恢复的失电负荷的恢复价值不同,因此根据失电负荷价值确定故障点的抢修顺序。

### 2.3 目标函数

局域能源互联网是利用微网内的 DG 及 EV 等各种分布式能源及网络对非故障区失电负荷进行恢复的同时,对故障区的各故障点进行抢修。

在保证重要负荷优先恢复的同时,尽可能多地恢复失电负荷,目标函数如下:

$$\min f_1 = \sum_{i \in M} W_i (k_i - 1) L_i \quad (3)$$

其中,  $M$  为失电负荷节点集合;  $k_i$  为节点  $i$  的状态,其值为 1 时表示带电,为 0 时表示失电;  $L_i$  为负荷的功率;  $W_i$  为负荷权重。

网损尽可能地小,目标函数如下:

$$\min f_2 = \sum_{i \in N} I_i^2 R_i \quad (4)$$

其中,  $N$  为局域能源互联网所有支路集合;  $I_i$  为支路  $i$  的电流;  $R_i$  为支路  $i$  的电阻。

### 2.4 约束条件

(1) 辐射状结构约束。

$$g_k \in G_k \quad (5)$$

其中,  $g_k$  为当前的配电网运行结构;  $G_k$  为配电网所有辐射状结构的集合。

(2) 节点电压约束。

$$U_{\min} \leq U_i \leq U_{\max} \quad i = 1, 2, \dots, m \quad (6)$$

其中,  $m$  为节点总数;  $U_i$  为节点  $i$  电压;  $U_{\min}$  为节点  $i$  电压的下限;  $U_{\max}$  为节点  $i$  电压的上限;。

(3) 虚拟微网中 DG 出力约束。

$$P_{DG_{\min}} \leq P_{DG_c} \leq P_{DG_{\max}} \quad c = 1, 2, \dots, N_{dg} \quad (7)$$

其中,  $N_{dg}$  为虚拟微网中 DG 总数;  $P_{DG_c}$ 、 $P_{DG_{\min}}$  和  $P_{DG_{\max}}$  分别为第  $c$  个 DG 的实际出力、出力下限和出力上限。

(4) EV 充放电约束条件。

$$SOC_{ch, \min} \leq SOC_{ch}(t) \leq SOC_{ch, \max} \quad (8)$$

$$SOC_{final} \geq SOC_{final, \min} \quad (9)$$

其中,  $SOC_{ch, \min}$ 、 $SOC_{ch, \max}$  分别为 SOC 的最小值和最大

值;  $SOC_{final, \min}$  为车主可接受的 SOC 最小值;  $SOC_{final}$  为车主可接受的 SOC 值。

## 3 融合交通网的局域能源互联网多故障修复策略模型求解

蚁群算法是一种模拟蚂蚁觅食行为的优化算法,蚂蚁的寻优特性非常适用于求解局域能源互联网这种高维、离散的非线性问题。融合交通网的局域能源互联网多故障修复策略流程图如图 5 所示。

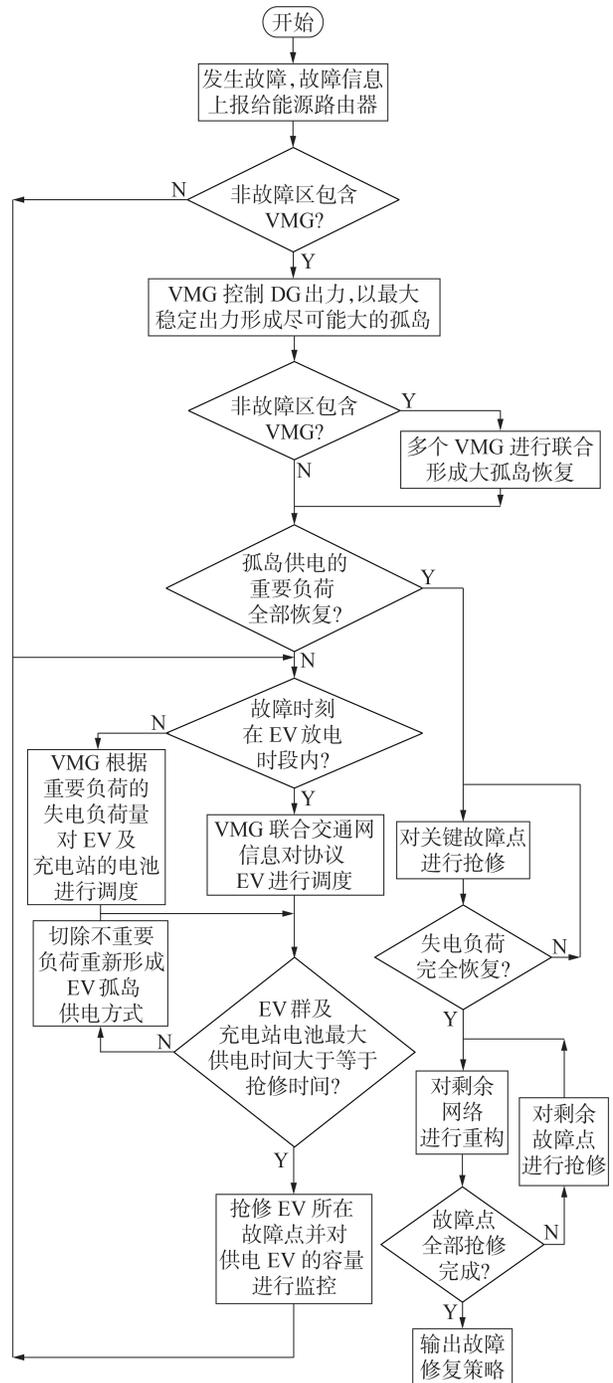


图 5 局域能源互联网多故障修复策略流程图

Fig.5 Flowchart of multi-fault repair and recovery strategy of local energy internet

## 4 算例分析

本文将 IEEE 69 节点的配电网<sup>[13]</sup>看作是由能源路由器连接在主网上的一个局域能源互联网,并用 MATLAB 7.10 进行仿真分析。该局域能源互联网额定电压为 12.66 kV,有 69 个节点、2 个联络开关,总有功负荷为 3 802.2 kW,其结构如图 6 所示。图中,节点 33、68、57、19、48、52 分别安装 DG<sub>1</sub>—DG<sub>6</sub>,各 DG 出力情况如表 1 所示;节点 15 是 EV 充电站, EV 充电站可切 EV 负荷量为 5 MW;一级负荷权重系数为 100,二级负荷权重系数为 10,三级负荷权重系数为 1,失电负荷的负荷等级如表 2 所示。

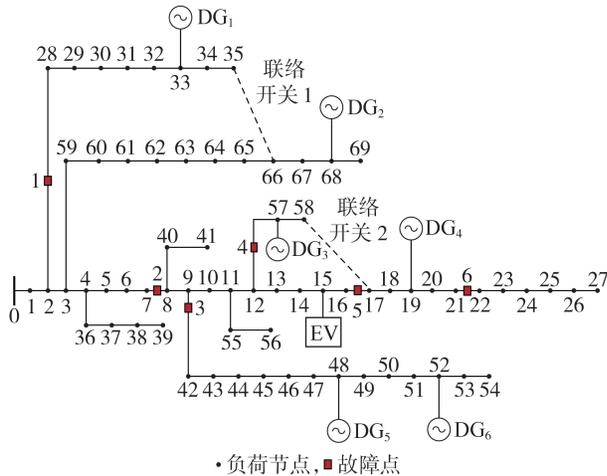


图6 局域能源互联系统结构

Fig.6 Structure of local energy interconnection system

表1 各 DG 出力情况

Table 1 Output of DGs

DG	网络正常情况下的 出力 / kW	网络故障情况下的 最大出力 / kW
DG <sub>1</sub>	30	50
DG <sub>2</sub>	90	120
DG <sub>3</sub>	150	200
DG <sub>4</sub>	320	400
DG <sub>5</sub>	800	10 000
DG <sub>6</sub>	600	800

表2 失电负荷的负荷等级

Table 2 Load level of power loss load

负荷等级	失电负荷节点
1	10—12, 14, 15, 20, 21, 48, 50, 53, 57, 58
2	8, 9, 13, 17—19, 22, 24, 26, 28, 29, 40, 51, 54
3	16, 23, 25, 27, 30—35, 41—47, 49, 52, 55, 56

### 4.1 场景 1

只考虑虚拟微网恢复失电负荷的情况,优先恢复重要负荷供电,且以恢复负荷价值最大为目标对关键故障点进行抢修。当所有失电负荷恢复供电后再以网损最小为目标对剩余故障点抢修,得到的局域能源互联网结构及故障修复策略如图 7 所示,仿

真结果如表 3 所示。

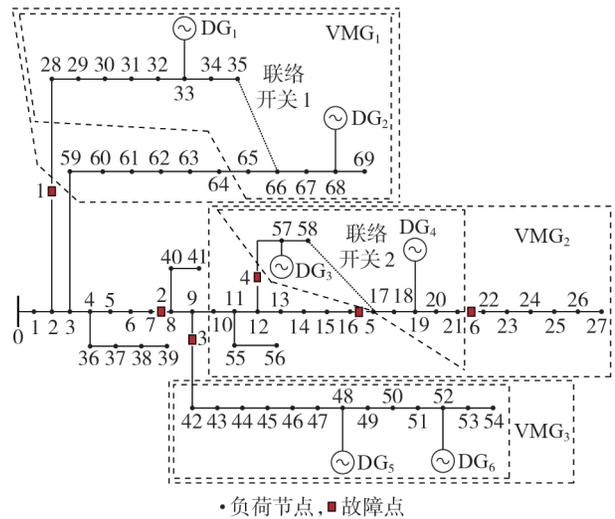


图7 局域能源互联网结构及多故障修复策略

Fig.7 Structure of local energy internet and multi-fault repair and recovery strategy

表3 故障修复策略的仿真结果

Table 3 Simulative results of multi-fault repair and recovery strategy

故障修复 阶段	抢修 任务	负荷恢复 价值 / kW	故障修复 所用时间 / h	网损 / (kW·h)
负荷 恢复	故障点 2	34 662.6	4.65	
	故障点 6	313.3	6.45	
	故障点 4		2	60.995 5
网络 重构	故障点 5		6.3	60.927 5
	故障点 3		10.95	60.917 4
	故障点 1		15.95	60.082 5
总量		34 975.9	22.4	

由图 7 可知,可以形成 3 个虚拟微网,即 VMG<sub>1</sub>—VMG<sub>3</sub>。由表 3 可知,耗费 6.45 h 即可全部恢复供电,虽然故障点 6 抢修时间比故障点 2 抢修时间要短,但是故障点 2 负荷恢复价值较大,因此选择优先抢修故障点 2;当全部失电负荷恢复完成之后再抢修其他故障点,并且抢修顺序为故障点 4、5、3、1。

### 4.2 场景 2

考虑 EV 以及虚拟微网同时恢复供电的情况,融合 EV 群与交通网对失电负荷恢复供电和对故障点的抢修工作,做出如下假设:

(1)当故障时刻发生在 EV 放电时段,并且 EV 满足电网放电时间大于等于抢修时间的情况下,对 EV 所在故障点抢修完成后,虚拟微网对 EV 停止调度, EV 恢复正常运行状态;

(2)当故障时刻发生在 EV 充电时段,并且虚拟微网通过切除充电站中充电 EV 和电池对失电负荷进行恢复供电时,在故障点抢修完成之前,假设充电站中电池容量足够大,能够为失电负荷提供不间断供电;

(3)当对重要失电负荷进行恢复时,假设EV群中EV的数量和容量满足需要。

将虚拟微网作为EV控制中心,局域能源互联网结构及故障修复策略如附录图A1所示。通过虚拟微网和EV联合恢复的失电负荷节点是节点8—16、40、41、55、56,未恢复的负荷节点是节点22—27。由虚拟微网对EV的数量进行调度,参考文献[20]中的Crystal Ball软件实现蒙特卡洛模拟过程计算可知,在本故障时段所能用到的EV的容量为1638.24 kW。由于EV需要恢复的失电负荷为500 kW,因此处于本阶段的EV能够完全恢复失电负荷,需要的EV类型是电池容量为60 kW·h,最大功率为90 kW,最大放电时间为0.66 h,并且数量为5000辆。根据本文选取的EV类型推算至少需要70辆满额的EV,并且为了保证失电负荷的持续供电,因此需要调度120辆EV,仿真结果如附录表A1所示。

由于故障点2是关键的故障点,控制大部分的关键故障点,抢修时间较短,且在负荷节点15处接入EV群,因此首先对故障点2进行抢修,处于失电的负荷节点22—27属于2、3级负荷,对故障点6的抢修工作在故障点2之后。同时,对比表3可知,虚拟微网对EV的调度使得未恢复的负荷量变小,因此EV在抢修和恢复策略中起到减少失电负荷的作用。

## 5 结论

本文考虑了电网和交通网的耦合关系,提出了一种局域能源互联网负荷恢复和故障点抢修策略。该策略中提出虚拟微网分区控制方法,能及时控制DG、EV使其出力达到最大,尽可能多地恢复失电负荷,使得孤岛运行的系统具有一定的稳定性。在此基础上,考虑了电网和交通网的耦合关系,利用EV为重要失电负荷供电,有效减小了失电负荷量。同时,交通网信息系统为抢修小队及需要用到的EV提供最优路径,有效减少了故障恢复时间,提高了故障恢复效率。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] RIFKIN J. The third industrial revolution: how lateral power is transforming energy, the economy, and the world[M]. New York, USA: Palgrave Macmillan, 2011: 74-112.
- [2] 严太山,程浩忠,曾平良,等. 能源互联网体系架构及关键技术[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 105-112.
- [3] YAN Taishan, CHENG Haozhong, ZENG Pingliang, et al. System architecture and key technologies of energy internet[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 105-112.
- [4] 王璟,王利利,林济铿,等. 能源互联网结构形态及技术支撑体系研究[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(4): 1-10.
- [5] WANG Jing, WANG Lili, LIN Jikeng, et al. Energy internet morphology and its technical support system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(4): 1-10.
- [6] 董志辉,林凌雪,管霖,等. 基于多代理技术的有源配电网供电恢复策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(5): 22-29.
- [7] DONG Zhihui, LIN Lingxue, GUAN Lin, et al. Service restoration strategy of active distribution network based on multi-agent technology[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(5): 22-29.
- [8] 刘宗歧,石道桂,陈启,等. 基于节点状态优化的配电网故障恢复混合整数线性规划方法[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(1): 53-57.
- [9] LIU Zongqi, SHI Daogui, CHEN Qi, et al. MILP approach based on node status optimization for distribution network restoration[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(1): 53-57.
- [10] 张津辉,王旭,蒋传文,等. 计及交通流量不确定性的多网耦合综合能源系统优化调度方法[J]. 电网技术, 2019, 43(9): 3081-3089.
- [11] ZHANG Jinhui, WANG Xu, JIANG Chuanwen, et al. Optimal scheduling method of multi-network regional integrated energy system based on traffic flow uncertainty[J]. Power System Technology, 2019, 43(9): 3081-3089.
- [12] 杨昕然,吕林,向月,等. “车-路-网”耦合下电动汽车恶劣充电场景及其对城市配电网电压稳定性影响[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 102-106.
- [13] YANG Xinran, LÜ Lin, XIANG Yue, et al. Degradation charging scenarios and impacts on voltage stability of urban distribution network under “EV-road-grid” coupling[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 102-106.
- [14] 胡海涛,郑政,何正友,等. 交通能源互联网体系架构及关键技术[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(1): 12-24.
- [15] HU Haitao, ZHENG Zheng, HE Zhengyou, et al. The framework and key technologies of traffic energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(1): 12-24.
- [16] 刘伟佳,孙磊. 含间歇电源、储能和电动汽车的配电网孤岛短时恢复供电策略[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(16): 49-58.
- [17] LIU Weijia, SUN Lei. Short-period restoration strategy in isolated electrical islands with intermittent energy sources, energy storage system and electric vehicles[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(16): 49-58.
- [18] 戴欣,袁越. 用户侧电动汽车放电策略及其经济效益评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(6): 55-61.
- [19] DAI Xin, YUAN Yue. Discharges strategy and economic benefits evaluation of electric vehicles in user side[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2013, 25(6): 55-61.
- [20] 王继业,李洋. 基于能源交换机和路由器的局域能源互联网研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(13): 3433-3439.
- [21] WANG Jiye, LI Yang. Research on local-area energy internet control technology based on energy switches and energy routers[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(13): 3433-3439.
- [22] 曹军威,孟坤,王继业,等. 能源互联网与能源路由器[J]. 中国科学:信息科学, 2014, 44(6): 714-727.
- [23] CAO Junwei, MENG Kun, WANG Jiye, et al. An energy internet and energy routers[J]. Scientia Sinica Informationis, 2014, 44(6): 714-727.
- [24] 杨丽君,吕雪姣,李丹,等. 基于多代理系统的主动配电网多故障动态修复策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(23): 6855-6865.
- [25] YANG Lijun, LÜ Xuejiao, LI Dan, et al. Dynamic repair-recovery strategy of multiple faults for active distribution network based on multi-agent system[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(23): 6855-6865.
- [26] LIN Feng, POLIS M P, WANG Caisheng, et al. Hierarchical control and management of virtual microgrids for vehicle

- electrification[C]//IEEE Transportation Electrification Conference and Expo(ITEC). Dearborn,USA:IEEE,2012:1-6.
- [15] CARSTENSEN L W. GPS and GIS:enhanced accuracy in map matching through effective filtering of autonomous GPS points [J]. Cartography and Geographic Information Systems, 2013, 25(1):51-62.
- [16] 刘柏良,黄学良. 含分布式电源及电动汽车充电站的配电网多目标规划研究[J]. 电网技术,2015,39(2):450-456.  
LIU Bailiang,HUANG Xueliang. Multi-objective planning of distribution network containing distributed generation and electric vehicle charging stations[J]. Power System Technology, 2015,39(2):450-456.
- [17] QIAN Kejun,ZHOU Chengke, ALLAN M, et al. Modeling of load demand due to EV battery charging in distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2011,26(2): 802-810.
- [18] SOARES F J, LOPES J A P, ALMEIDA P M R. A Monte Carlo method to evaluate electric vehicles impacts in distribution networks[C]//Innovative Technologies for an Efficient and Reliable Electricity Supply. Waltham,MA,USA:IEEE,2010: 365-372.
- [19] 杨俊秋. 电动汽车充放电容量预测及控制策略的优化研究[D]. 北京:北京交通大学,2012.  
YANG Junqiu. The prediction of electric vehicles charge and discharge capacity and the study on the control strategy of V2G[D]. Beijing:Beijing Jiaotong University,2012.
- [20] 翁国庆,张有兵. 多类型电动汽车电池集群参与微网储能的V2G可用容量评估[J]. 电工技术学报,2014,29(8):36-45.  
WENG Guoqing,ZHANG Youbing. Evaluation for V2G available capacity of battery groups of electric vehicles as energy storage elements in microgrid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2014,29(8):36-45.

#### 作者简介:



吕雪皎

吕雪皎(1988—),女,河北赞皇人,实验师,硕士,通信作者,主要研究方向为配电网故障抢修与恢复、经济调度和电力系统规划(E-mail:981068823@qq.com);

杨丽君(1972—),女,吉林吉林人,教授,博士,主要研究方向为配电网故障抢修与恢复、经济调度和电力系统规划(E-mail:195320008@qq.com);

安立明(1991—),女,河北邢台人,助理工程师,硕士,主要研究方向为主动配电网故障抢修与恢复(E-mail:1365741436@qq.com)。

(编辑 李玮)

## Multi-fault repair and recovery strategy for local energy internet integrated with transportation network

LÜ Xuejiao<sup>1</sup>, YANG Lijun<sup>2</sup>, AN Liming<sup>3</sup>, LIN Zhipeng<sup>1</sup>

- (1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hebei Normal University of Science & Technology, Qinhuangdao 066004, China; 2. State Key Laboratory of Hebei Electric Power Electronic Energy and Drive Control, Yanshan University, Qinhuangdao 066004, China; 3. Beijing Power Equipment Group Co., Ltd., Beijing 102401, China)

**Abstract:** Aiming at the rapid recovery problem of power loss load in case of multiple failures of local energy internet, considering the coupling relationship between the transportation network and power grid, a multi-fault repair and recovery strategy for the local energy internet integrated with transportation network is proposed. When the local energy internet has multiple failures, firstly the fault information is transmitted to virtual microgrids through the energy router. Then, the virtual microgrid controls the distributed power generation, and dispatches electric vehicles in conjunction with the transportation network information to set recovery strategy with priority to restore important loads and maximize the recovery value of power loss load. On this basis, considering the recovery capacity of microgrids and the battery capacity limit of electric vehicles, when the local energy internet still has power loss load, the optimal path is selected for the repair team combined with the transportation network information, so as to repair the critical fault and recover the power loss load as soon as possible. Finally, taking IEEE 69-bus system as an example, the feasibility of the proposed strategy is verified.

**Key words:** local energy internet; transportation network; virtual microgrid; electric vehicles; distributed power generation; fault repair and recovery

## 附录

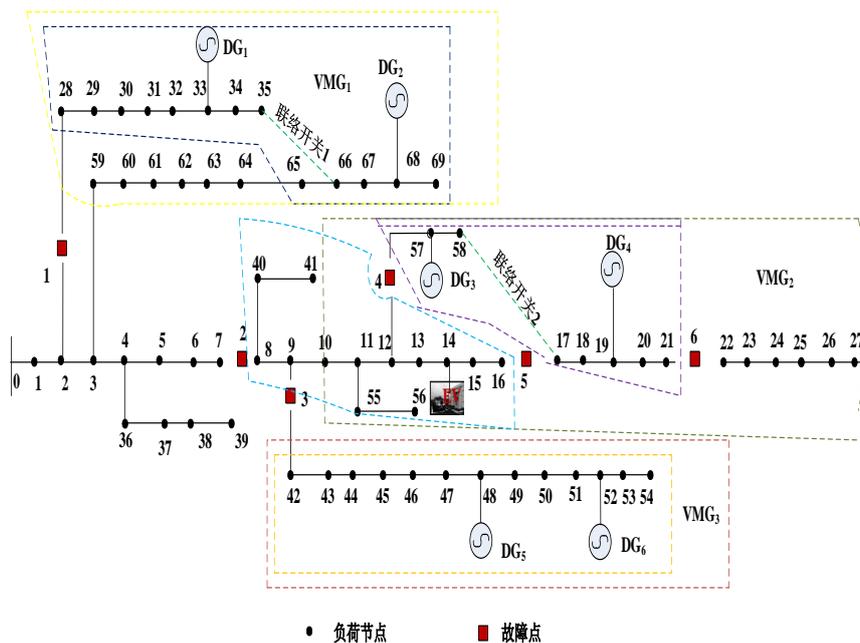


图 A1 恢复策略及局域能源互联网结构图

Fig.A1 Recovery strategy and local energy internet structure

表 A1 恢复策略的仿真结果

Table A1 Simulative results of recovery strategy

恢复策略	抢修任务	负荷恢复价值/kW	故障修复所用时间/h	网损/(kW·h)
负荷恢复	2		4.65	
	6	61.3	6.45	
网络重构	4		2	60.9955
	1		6.3	60.9275
	5		10.95	60.9174
	3		15.95	60.0825
总量		61.3	27.05	