

基于节点网元的韧性配电网时-空调度序列 协同优化负荷恢复策略

孙明琦, 郑予容, 林苑, 刘振宇

(国网上海市电力公司市南供电公司, 上海 200030)

摘要:为提升配电网的韧性,在更大的时间尺度和空间范围内确保新型电力系统下灵活、高效的电力供应,提出一种新颖的基于节点网元的韧性配电网时-空调度序列协同优化负荷恢复策略,获取配电网灾后场景下的最优负荷恢复序列方案及其调度时刻表。在多智能体代理系统架构下提出节点网元的概念,制定负荷恢复序列方案,通过邻近节点间局部信息的交互获取全局参数信息,作为灾后信息网络受损下负荷恢复优化模型的输入。对灾后负荷恢复模型中的混合整数线性规划问题进行求解,获取负荷恢复路径及修复时刻表,形成由多个分布式电源组成的节点网元以恢复停电负荷,实现检修人员调度和操作人员调度间的协同优化。最后,通过改进IEEE 37节点和IEEE 123节点系统验证了所提协同调度优化模型的有效性。

关键词:节点网元;负荷恢复;韧性配电网;检修人员;操作人员;调度序列

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202303027

0 引言

随着能源转型下电力系统的不确定性、开放性增加,需要应对的极端事件增多,如何提升配电网的韧性成为近期研究的热点^[1]。在全球气候变化、极端自然灾害、疫情等多重不确定因素影响的背景下,电力系统的大范围停电对社会将造成巨大的经济损失。例如:2019年8月的超强台风“利奇马”造成了超过600万用户停电^[2];2020年突发的全球疫情、2015年乌克兰遭受网络攻击等^[3]新型极端事件对配电网提出了新的要求。因此,为保障正常情况和极端事件下的电网安全运行,亟需发展具有韧性的新型电力系统。

由于配电网一般采用径向结构,更容易受到极端自然灾害的影响,同时其与用户负荷关联密切,提升配电网应对极端自然灾害的能力可以有效减小停电范围。因此,研究配电网应对极端自然灾害下的负荷恢复策略,对于提升配电网的韧性至关重要,国内外也对此展开了一定的研究。文献[4]指出韧性配电网为采取主动措施以保证在灾害下对关键负荷恢复供电的配电网,在配电网调度运行中提升韧性的措施主要分为灾前的预防措施和灾中、灾后的恢复措施。但是,鉴于电力系统结构复杂,很难对小概率高风险的极端事件做到完全的抵御^[5],因此将研究的重点放在灾中及灾后的恢复策略是更加现实的选择。对于配电网的负荷恢复措施,主要是通过多种方法改变配电网的拓扑结构以恢复故障后的负荷。文献[6]采用专家系统对配电网重构下的负荷

恢复进行评估;文献[7]基于模糊逻辑算法对配电网中多处故障的恢复策略进行研究;文献[8]基于多智能体代理系统(multi-agent system, MAS)架构下分布式储能系统对智能配电网中负荷恢复力展开研究。然而,当受到极端自然灾害天气影响时,变电站可能因为故障而无法接收主网的供电,配电设施的损坏导致用户负荷断电,在这种场景下,传统的恢复措施并不能有效地保证在受到极端自然灾害下的用户负荷正常供电。文献[9]对配电网中多种分布式电源(distributed generator, DG)和储能协同优化以快速恢复重要负荷,提升配电网的韧性展开研究,但其负荷恢复策略中未对时空特性展开研究。

随着智能电网技术的发展,文献[10]通过在配电馈线上安装远程控制的自动开关设备,实现一种分布式网络模式下的“自愈”配电网。这些自动开关装置可以将备用DG恢复关键负荷,形成一个进行负荷恢复的“节点”^[11]。然而,在设备因灾害损坏的情况下,如何在更大的时间尺度和空间范围内充分利用DG对配电网中负荷进行有序恢复供电并不是一项容易的任务^[12],同时,灾难性事件发生时的通信故障给恢复工作带来了更多的挑战^[13]。为了解决以上问题,需要对负荷恢复的“节点”更加“智慧化”。文献[14-16]提出网元(web of cell, WoC)体系的思想,其本质是将电力系统的智能化向群体智能化的方向发展;文献[17]提出了微网网的信息-物理-社会复杂耦合图,运用“微网元”的概念形成集群高度自治;文献[18]提出群学习技术减少了对通信的依赖程度,实现群体智能化。

为此,本文提出了一种基于节点网元(web of node, WoN)的韧性配电网时-空调度序列协同优化

收稿日期:2022-07-26;修回日期:2023-02-10

在线出版日期:2023-03-28

负荷恢复策略。在MAS架构下提出节点网元的概念,基于一致性算法对全局信息参数进行获取。并建立考虑时-空调度序列协同优化的负荷恢复模型。令检修人员对损坏的电力设备进行维修,操作人员对开关进行操作,通过对负荷恢复模型的求解,实现检修-操作-调度的协同优化,获取空间维度上的负荷恢复路径和时间维度上的修复时刻表,快速有效地恢复关键负荷供电。

1 检修-操作人员协同优化调度模型

为了恢复由自然灾害导致的配电网负荷中断,本文建立检修-操作人员协同优化调度模型。定义检修人员负责接收调度指令对损坏的电力设备进行维修,操作人员负责接收调度指令对控制开关进行操作。首先,通过信息层的态势感知获取全局信息数据,关闭相应的开关以定位并隔离故障元件;然后,对故障元件修复时间进行预估,并通过系统状态标识来确定用于恢复供电的DG、检修人员和操作人员;最后,通过检修人员调度模型-操作人员调度模型-灾后恢复模型间的相互协调优化,对所提的混合整数线性规划(mixed integer linear programming, MILP)问题进行求解,制定检修人员与操作人员对于DG、可控负荷、开关的最优操作顺序调度方案。

1.1 检修人员调度模型

检修人员调度模型是协调协同优化调度模型的基础。其负责对检修人员修复故障元件任务进行调度安排,是恢复负荷供电环节中重要的组成部分。在此调度模型中,主要从时空两方面进行研究:①从空间维度方面,制定检修人员到故障点设备的行驶路径调度规划方案;②从时间维度方面,制定检修人员修复损坏设备的时间调度安排。

首先,对于检修人员空间维度上的路径调度规划,定义无向图 $G_{mc}(V_{mc}, E_{mc})$,其中 V_{mc} 为度节点,相当于需要从中心站调派的检修人员站点, E_{mc} 为边向量,其表示检修人员经过2个度节点。定义检修人员值班的中心站集合为 κ ,电力设备故障点集合为 σ 。每一个检修人员在无向图 G_{mc} 中都是从同一个起点出发并返回同一点,同时不经过其他的中心站点。因此,可以用数学表达式表示为:

$$\sum_{a \in \kappa} x_{a,b}^{MC} = \sum_{a \in \kappa} x_{b,a}^{MC} = 1, \quad \sum_{c \in \kappa} x_{c,b}^{MC} = \sum_{c \in \kappa} x_{b,c}^{MC} = 0 \quad c \neq a \quad (1)$$

式中: $x_{a,b}^{MC}$ 和 $x_{b,a}^{MC}$ 为二进制变量, $x_{a,b}^{MC}$ 表示检修人员是否需要从中心站前往电力设备故障地点, $x_{a,b}^{MC} = 1$ 表示需要从中心站 a 前往故障点 b , $x_{a,b}^{MC} = 0$ 表示不需要, $x_{b,a}^{MC}$ 含义类似。

当检修人员数量小于故障设备数量时,安排派遣检修人员对中心站附近管辖的所有故障设备进行设备修复,其数学表达式为:

$$\sum_{a \in \kappa} \sum_{b \in \sigma} x_{a,b}^{MC} = \sum_{a \in \kappa} \sum_{b \in \sigma} x_{b,a}^{MC} \leq 1 \quad (2)$$

然后,在时间维度上,对检修人员修复损坏设备的时间调度安排进行分析。若检修人员的数量多于故障设备数量,则会存在有些检修人员不需要进行维修设备工作的情况。对于这种情况,本文令 $\sum_{a \in \kappa} x_{a,a}^{MC} = 1$ 表示不需要执行维修工作的检修人员。定义每一个损坏的设备都必须由一名检修人员进行维修,且所派检修人员班组需连续修复多个不同的故障点,即:

$$\sum_{a \in \kappa} \sum_{b \in \sigma} s_{a,b}^{MC} = 1 \quad (3)$$

式中: $s_{a,b}^{MC}$ 为中心站 a 向故障点 b 所派检修人员的数量。

当检修人员执行设备修理时,其从中心站 a 出发修好故障点 b 处损坏设备的时刻 $A_{a,b}^{RP}$ 为:

$$A_{a,b}^{RP} = A_{a,b}^{DP} + T_{b,MC}^{RP} + T_{a,b}^{TRA} \quad (4)$$

式中: $A_{a,b}^{DP}$ 为检修人员从中心站 a 向故障点 b 出发的时刻; $T_{b,MC}^{RP}$ 为检修人员维修故障点 b 处损坏设备估计所需花费的时间; $T_{a,b}^{TRA}$ 为从中心站 a 前往故障点 b 所需的路程时间。

对于每一个中心站节点,总的修复时间 $A_a^{MC,RP}$ 为:

$$A_a^{MC,RP} = A_a^{MC,AR} + \sum_{b \in \sigma} T_{b,MC}^{RP} \sum_{a \in \kappa} s_{a,b}^{MC} \quad (5)$$

式中: $A_a^{MC,AR}$ 为中心站 a 检修人员车辆抵达时间,如果不安排检修人员进行损坏设备的修复工作,则设置 $A_a^{MC,AR} = 0$ 。

1.2 操作人员调度模型

当配电网中由自然灾害导致多处设备存在故障时,需要检修人员对损坏的设备进行维修,同时也需要操作人员对远程控制开关和操作控制开关进行协同操作以恢复居民的供电。然而,使用手动控制开关在时间上的变化尺度要比远程控制开关大得多,但完全使用远程控制开关替代手动控制开关又不切实际,因此,本文在时序恢复研究中综合考虑远程控制和手动控制开关。

与检修人员调度模型类似,操作人员调度模型也是从时空两方面维度进行研究。定义无向图 $G_{rc}(V_{rc}, E_{rc})$,其中 V_{rc} 为度节点,表示需从中心站调派操作人员, E_{rc} 表示操作人员经过2个度节点的边向量。定义操作人员值班的中心站集合为 σ ,控制开关集合为 s 。

操作人员路径规划问题的数学模型表示为:

$$\sum_{k \in \sigma} x_{k,l}^{RC} = \sum_{k \in \sigma} x_{l,k}^{RC} = 1, \quad \sum_{w \in \sigma} x_{w,l}^{RC} = \sum_{w \in \sigma} x_{l,w}^{RC} = 0 \quad w \neq k \quad (6)$$

$$\sum_{k \in \sigma} \sum_{l \in s} x_{k,l}^{RC} = \sum_{k \in \sigma} \sum_{l \in s} x_{l,k}^{RC} \leq 1 \quad (7)$$

式中: $x_{k,l}^{RC}$ 和 $x_{l,k}^{RC}$ 为二进制变量, $x_{k,l}^{RC}$ 表示操作人员是否需要从中心站出发对控制开关进行操作, $x_{k,l}^{RC} = 1$ 表示操作人员需要从中心站 k 出发对控制开关 l 进行操作

作, $x_{k,l}^{RC} = 0$ 表示不需要, $x_{l,k}^{RC}$ 含义类似。式(6)表示操作人员从中心站 k 出发返回同一个中心站; 式(7)表示操作人员只对中心站 k 所管辖的控制开关进行操作。

在时间维度上, 定义 $A_{l,rc}^{RC,AR}$ 表示操作人员抵达手动控制开关 l 的时刻, $A_{l,rc}^{MS}$ 表示手动开关 l 合上的时刻, $T_{l,rc}^{MS}$ 表示操作人员对控制开关 l 进行手动操作所需的时间, $T_{k,l}^{DP}$ 表示操作人员从中心站 k 到开关 l 路程所需的时间。需要注意的是, 和检修人员调度模型不同, 并不是所有的控制开关都需要操作人员进行操作, 原因是所有的损坏设备都需要被修复, 但操作人员只需要对部分的手动或远程控制开关进行操作即可恢复整个配电网系统。因此操作人员数量 $s_{k,l}^{RC}$ 与式(3)有所区别, 其表达式为:

$$\sum_{k \in \sigma} \sum_{l \in \sigma} s_{k,l}^{RC} \leq 1 \quad (8)$$

总的修复时间 $A_k^{RC,MS}$ 为:

$$A_k^{RC,MS} = A_k^{RC,AR} + \sum_{l \in \sigma} T_{l,rc}^{MS} \sum_{k \in \sigma} \sum_{l \in \sigma} s_{k,l}^{RC} \quad (9)$$

式中: $A_k^{RC,AR}$ 为中心站 k 操作人员车辆抵达时间, 如果不安排操作人员进行控制开关操作, 则设置 $A_k^{RC,AR} = 0$ 。

为了直观体现式(3)与式(8)的区别, 以时间调度序列图 1(a)、(b)体现其时序上的区别。由图 1 可知: 对于检修人员时间调度序列, 由于每一个损坏的设备都必须由一名检修人员进行维修, 即 $s_{a,b}^{MC} = 1$, 因此当修复时间 $T_{b,MC}^{RP} = 4$ 时, 由式(5)可知 $A_a^{MC,RP} = 4$; 然而对于操作人员并不是一定需要对每一个开关进行操作, 即 $s_{k,l}^{RC} \leq 1$, 因此当控制开关所需操作时间为 $T_{l,rc}^{MS} = 4$ 时, 由式(9)可知 $A_k^{RC,MS} > 4$ 。

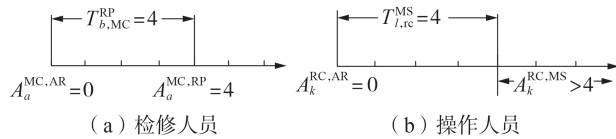


图 1 时间调度序列示意图

Fig.1 Schematic diagram of time scheduling sequence

1.3 灾后负荷恢复模型

1.3.1 负荷恢复路径

本文制定的负荷恢复路径策略如图 2 所示。在分布式 MAS 架构下, 本文提出节点网元的概念, 使其只需与邻近节点进行信息的交互就可获取全局信息, 降低了对通信的依赖, 实现在时-空尺度上对负荷充电路径进行优化。首先定义未经控制开关连接的节点群为一个节点网元, 如图 2 所示, 令二进制变量 $x_{i,j}^{RLM}$ 表示节点网元 i, j 间是否需通过控制开关连接以恢复供电, $x_{1,2}^{RLM} = 1$ 表示节点网元间的控制开关闭合且由节点网元 1 向节点网元 2 充电。以图 2 为例, 节点网元的负荷恢复路径为 $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3$, 因此 $x_{1,2}^{RLM} = x_{2,3}^{RLM} = 1, x_{2,1}^{RLM} = x_{3,2}^{RLM} = 0$ 。同时, 定义 N 为节点网

元的集合, 其可能包含了能够黑启动的 DG; 定义 L 为节点网元区域内所包含节点的集合, 以图 2 为例, $L = \{1, 2, \dots, 12\}$, 则 $\{1, 2, 3, 4\} \in N_1$ 。

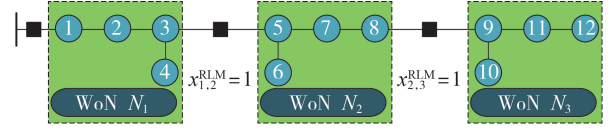


图 2 基于节点网元的负荷恢复路径策略

Fig.2 Load recovery path strategy based on WoN

因此, 在 MAS 架构下, 负荷恢复路径的数学表达式为:

$$\sum_{i,j \in L} x_{i,j}^{RLM} = 0 \quad L \in N_i \quad (10)$$

$$\sum_{i,j \in L} x_{i,j}^{RLM} = 1 \quad L \in \{N_i \cup N_j\} \quad (11)$$

式(10)表示应避免在节点网元内构成充电回路; 式(11)表示应径向访问所有的节点网元, 保证每个单元都能恢复供电。

1.3.2 修复时刻表

定义 $A_{i,j}^{RLM}$ 和 A_j^{RLM} 分别为节点网元 i, j 负荷恢复的时刻, $A_{i,j}^{RLM}$ 为连接节点网元 i, j 的远程控制开关闭合时刻, $T_{L,MC}^{RP}$ 为检修人员修复节点网元区域 L 内损坏设备的时间, $T_{i,j}^{RLM}$ 为远程控制开关连接节点网元 i, j 时的操作时间。

节点网元内的负荷恢复时刻 A_i^{RLM} 主要取决于检修人员修复设备效率, 结合式(5)对检修人员调度模型时间维度上的分析, A_i^{RLM} 可表示为:

$$A_i^{RLM} = A_i^{MC,AR} + T_{i,MC}^{RP} \sum_{a \in k} \sum_{b \in o} s_{a,b}^{MC} \quad i \in L \in N_i \quad (12)$$

在式(9)所示操作人员调度模型的基础上可得 $A_{i,j}^{RLM}$ 表达式为:

$$A_{i,j}^{RLM} = A_i^{RC,AR} + T_{i,j}^{RLM} \sum_{k \in \sigma} \sum_{l \in \sigma} s_{k,l}^{RC} \quad i, j \in L \in \{N_i \cup N_j\} \quad (13)$$

1.3.3 运行约束

在每进行一次负荷恢复路径和修复时刻表制定的同时, 调度部门应检查每次逐步充电时系统是否满足运行的约束条件, 如功率的平衡以及各节点电压是否越限。线性 DistFlow 模型可以作为径向配电网的潮流模型, 根据文献[19]的研究可得各节点网元有功、无功功率平衡约束分别表示为:

$$\sum_{j \in N_i^k} P_j^k = P_i^k - R_{ik} p_i \quad (14)$$

$$\sum_{j \in N_i^k} Q_j^k = Q_i^k - R_{ik} q_i \quad (15)$$

式中: P_j^k, Q_j^k 分别为节点网元 j 下以 k 节点为末端的有功、无功功率; R_{ik} 为线路 ik 的电阻; p_i, q_i 分别为节点网元 i 的有功、无功功率; $j \in N_i^k$ 表示节点 k 属于节点网元 j 。

如果节点 k 不属于节点网元 i , 则 $v_{ki} = 0$, 即其联

络线路间的有功、无功功率应为0,因此需满足以下不等式约束:

$$0 \leq P_i^k \leq v_{ik} P_k^{\max} \quad (16)$$

$$0 \leq Q_i^k \leq v_{ik} Q_k^{\max} \quad (17)$$

式中: $P_k^{\max}$ 、 $Q_k^{\max}$ 分别为节点网元中节点 k 处 DG 的最大有功、无功功率; v_{ik} 为节点网元 i 与节点 k 之间联络线路交换功率的转移矩阵元素。

对于电压约束, DG 节点的电压被作为参考值, 根据线性 DistFlow 模型, 与节点网元 i 中节点 k 有关的电压可以表示为 V_i^k , 其表达式为:

$$V_i^k = V_j^k - \frac{r_i P_i^k + x_i Q_i^k}{V_0^k} - \sigma_i^k \quad (18)$$

式中: V_0^k 为节点 k 初始的节点电压; r_i 和 x_i 分别为线路 i 的电阻和电抗; σ_i^k 为松弛变量, 当节点 i 不属于网元 k 但其邻近节点 j 属于网元 k 时, σ_i^k 满足式 (19)。

$$0 \leq \sigma_i^k \leq (1 - v_{ik}) V_0^k \quad (19)$$

2 时-空调度序列协同优化模型

2.1 分布式多智能体架构

由于目前电网具有信息-物理高度融合的特点^[1], 采用分布式多智能体架构可以有效提升信息-物理强耦合下电网的韧性^[13], 因此本文采用分布式多智能体架构对检修-操作-调度人员进行协同优化调度, 每一个局部智能体 (local agent, LA) 负责管辖节点网元内的设备^[16], 其嵌入检修人员调度模型和操作人员调度模型, 区域智能体 (region agent, RA) 对各 LA 间进行协同优化, 其嵌入灾后负荷恢复模型。定义 M 为 LA 在系统中的集合, 定义 $|M|$ 为 LA 的数量。设计 LA 包含 P_m 、 Q_m 、 C_m 和 S_m 这4个向量, 其中 P_m 为跟踪到的有功功率需要交换的信息, Q_m 为跟踪到的无功功率需要交换的信息, C_m 为线路开关状态, S_m 为节点网元状态。定义第 i 个节点由 LA 获取有功、无功功率的初始值 $P_m^0[i]$ 、 $Q_m^0[i]$ 分别为:

$$P_m^0[i] = \begin{cases} |M| p_i & i \in N \\ 0 & i \notin N \end{cases} \quad (20)$$

$$Q_m^0[i] = \begin{cases} |M| q_i & i \in N \\ 0 & i \notin N \end{cases} \quad (21)$$

定义 $\bar{P}^0$ 、 $\bar{Q}^0$ 分别为 P_m^0 、 Q_m^0 的平均值, 其计算表达式分别为:

$$\bar{P}^0 = \frac{1}{|M|} \sum_{m=1}^{|M|} P_m^0 \quad (22)$$

$$\bar{Q}^0 = \frac{1}{|M|} \sum_{m=1}^{|M|} Q_m^0 \quad (23)$$

对于线路控制开关, 定义 1、0 表示不同的状态, 其中“1”表示开关在正常运行状态, “0”表示开关在打开状态。

每一个 LA 对向量 C_m 、 S_m 进行初始化, 其值分别

为 C_m^0 、 S_m^0 , 根据局部开关所表示的状态, 其中第 i 个元素 $C_m^0[i]$ 、 $S_m^0[i]$ 可以分别表示为:

$$C_m^0[i] = \begin{cases} 0 & x_{i,j}^{\text{RLM}} = x_{j,i}^{\text{RLM}} = 0 \\ 0 & x_{i,j}^{\text{RLM}} + x_{j,i}^{\text{RLM}} = 1, t \leq A_{i,j}^{\text{RC, MS}} \\ M & x_{i,j}^{\text{RLM}} + x_{j,i}^{\text{RLM}} = 1, t > A_{i,j}^{\text{RC, MS}} \end{cases} \quad (24)$$

$$S_m^0[i] = \begin{cases} 0 & x_{i,j}^{\text{RLM}} = x_{j,i}^{\text{RLM}} = 0 \\ 0 & x_{i,j}^{\text{RLM}} + x_{j,i}^{\text{RLM}} = 1, t \leq A_i^{\text{MC, RP}} \\ M & x_{i,j}^{\text{RLM}} + x_{j,i}^{\text{RLM}} = 1, t > A_i^{\text{MC, RP}} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $A_{i,j}^{\text{RC, MS}}$ 为节点网元 i 、 j 间操作人员进行操作的总的修复时间; $A_i^{\text{MC, RL}}$ 为节点网元 i 处检修人员需要进行检修的总时间。

本文利用平均一致性算法对 MAS 架构下电力系统进行全局信息获取。该算法可以通过局部信息的迭代交换从而获取所有智能体的平均值。本文平均一致性算法可以表示为:

$$x_m^{k+1} = x_m^k + \sum_{r \in \mathfrak{R}_m} \varepsilon_{mr} (x_r^k - x_m^k) \quad (26)$$

式中: x_m^k 为向量 P_m 、 Q_m 、 C_m 或 S_m 在第 k 阶段的值; $\mathfrak{R}_m$ 为邻近单元 LA 的集合; ε_{mr} 为 LA 在邻近节点 m 与 r 间进行信息交换时的阶跃系数。通过合理设计阶跃系数 ε_{mr} , x_m^k 可以收敛到初始状态的平均值, 因此 LA 和 RA 在经过有限次的迭代计算后可以获取全局的有功、无功需求, 线路开关状态和节点开关状态, RA 之后便可求解弹性恢复优化问题, 将解决方法 (控制开关是闭还是开) 以及各 DG 的出力结果嵌入各 LA 中。

2.2 基于节点网元的负荷恢复优化模型

本文在 1.3 节提出的节点网元的基础上, 采取协同优化模型, 提出基于节点网元的负荷恢复优化模型对调度—检修—操作协同优化调度, 以尽快、尽可能多地恢复供电, 其流程框架如图 3 所示。

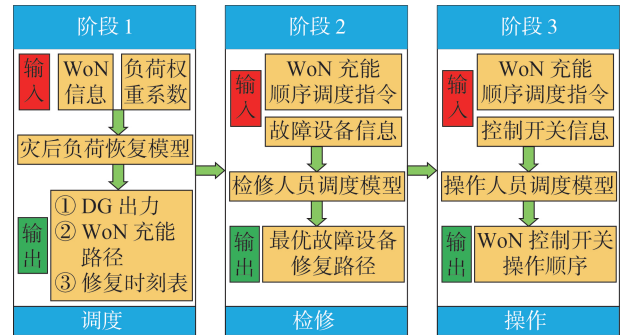


图3 基于节点网元的负荷恢复优化模型框架

Fig.3 Framework of load recovery optimization model based on WoN

基于节点网元的负荷恢复优化模型实现了时-空调度序列的协同优化。首先, 通过对灾后负荷恢复优化模型进行求解, 获取决策变量 DG 的有功出力以及节点网元的充能顺序调度指令 (包含负荷恢复路径和修复时刻表); 然后, 在每个节点网元区域

下,检修人员在接收节点网元的充能顺序调度指令后,通过求解1.1节中检修人员调度模型,获取节点网元区域内的最优故障设备修复路径;最后,通过求解1.2节操作人员调度模型获取各节点网元间控制开关的操作顺序,实现对中断负荷的恢复供电。

设计灾后负荷恢复模型目标函数为在负荷恢复的过程中尽可能减少负荷的削减,令 ω_i 为节点网元 i 中负荷的权重系数,令 t_i^L 为预估对节点网元 i 的充能时间,由于损坏的设备具有不确定性,在灾前阶段对各设备的修复时间可通过日常工作经验进行预估,在灾后恢复阶段只需获取损坏设备的信息便可预估对该节点网元区域内的修复时间。在考虑调度—检修—操作间协同配合下,通过求解本文的目标函数,获取的决策变量为节点网元 i 中DG的有功出力 P_i^L 和操作人员需操作的控制开关状态(0/1)。在满足一系列约束条件下,其可以表示为一个MILP问题:

$$\min \sum_{i \in N} \omega_i t_i^L P_i^L \quad (27)$$

同时还要满足如下约束条件:检修人员约束(式(1)—(5));操作人员约束(式(6)—(9));负荷恢复路径和时刻表制定约束(式(10)—(13));运行条件约束(式(14)—(19))。

上述MILP问题可以用现成的优化求解器来求解。需要注意的是,式(27)的求解结果可作为下一阶段系统状态信息的输入,得到更新的节点网元信息和DG的调度指令。如果可以实现系统状态信息的预测,则可以扩展此模型应用范围,但此时的计算复杂度会更高。

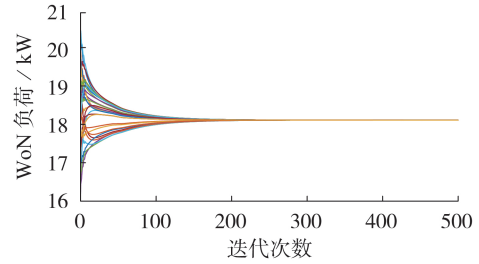
3 仿真验证

本文选用IEEE 37节点系统和IEEE 123节点系统来验证所提基于节点网元的负荷恢复策略的有效性,具体的权重系数等参数设置主要参考文献[11]。通过采用该模型,一方面在验证本文所提策略有效性的同时证明采用节点网元架构有很好的扩展性;另一方面在配电网韧性提升方面对比文献[11]的策略,以验证本文所提策略的优越性。

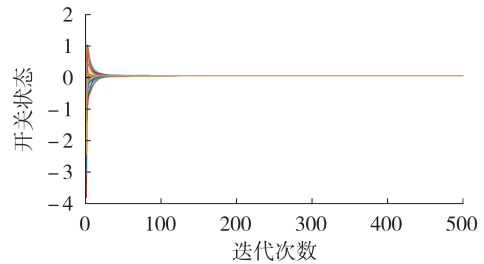
3.1 IEEE 37节点系统

对IEEE 37节点系统进行改进以验证所提策略的有效性,其示意图如附录A图A1所示。图中3个DG分别安装在节点702、710、728处,由于受到自然灾害影响有4条线路断开,在线路727-703、704-720、708-709、737-738处安装控制开关,在MAS架构下设置节点网元如图A1所示。在MAS架构下基于一致性算法获取全局信息变量,其仿真结果如图4所示。从图4(a)中可以看出,RA和LA最终都收敛于18.1109 kW,这与节点702的实际功率需求一致。从图4(b)中可以看出,RA和LA最终都收敛于0,表

示线路702-705处于开断位置(如图A1所示)。可以通过类似的方法获取LA和RA的其他信息,通过将获取的初始参数信息广播给邻近单元,作为MILP优化问题的初始值。需要注意的是,当各LA邻近单元间通信网络连接即可保证算法的收敛。



(a) WoN 负荷



(b) 控制开关状态

图4 基于一致性算法的IEEE 37节点系统的仿真结果

Fig.4 Simulative results of IEEE 37-bus system based on consensus algorithm

3.2 IEEE 123节点系统

为了验证本文所提的策略可以应用于更大的配电网中,对IEEE 123节点系统进行改进以验证所提策略的有效性。附录A图A2为修改的IEEE 123节点系统示意图,其包含了5个变电站、3个班组、6个DG、5个远程控制开关和11个手动开关。节点网元的负荷情况来源于文献[11]的数据,其中包括总的3490 kW的负荷和1020 kW的关键负荷。设置15处线路由于自然灾害影响损坏,3个班组都设有检修班,每一个班组包含2名检修人员,1班和2班设有操作班,每一个班组包含2名操作人员。

对灾害负荷恢复模型进行求解,获取负荷恢复路径序列及调度时刻表。以最先充能的节点网元11、15、6、7为例,对附录B所示负荷恢复策略结果的前3序列的节点网元负荷恢复路径及调度时刻表结果进行分析,其示意图如附录C图C1所示。首先,含有变电站的节点网元15在 $t=0$ 时最先恢复供电;其次,当检修人员数量少于故障设备时,检修人员优先维修受损线路67-160、76-86,在 $t=142$ min和 $t=155$ min分别完成维修,在 $t=156$ min调度部门发出指令派操作人员合上远程控制开关对节点网元7充电,在 $t=157$ min节点网元7恢复供电;然后,检修人员依次对受损线路54-57、57-60、60-62进行维修,在

$t=242$ min、 $t=255$ min 和 $t=295$ min 时分别完成修复工作,操作人员在 $t=296$ min 合上手动开关对节点网元6充能,在 $t=301$ min 完成对节点网元6区域内负荷恢复供电。类似地,对剩余的节点完成负荷恢复供电,需要注意的是,负荷恢复路径的获取主要和各节点负荷权重有很大的关系,通过增加负荷的权重,会优先激活附近节点网元对其充能。

为了体现本文策略的优势,将本文提出的基于节点网元的负荷恢复策略与文献[11]的策略进行韧性恢复比较,结果如图5所示。

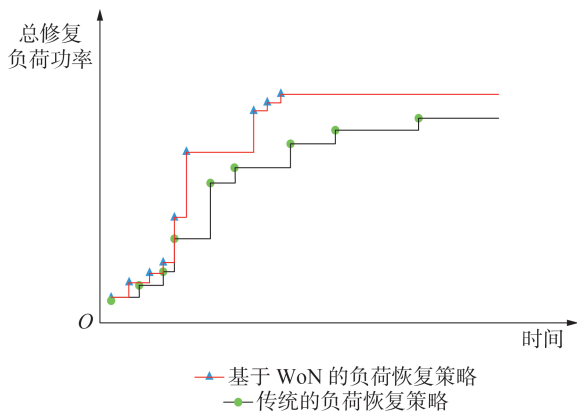


图5 不同策略下配电网韧性恢复能力比较

Fig.5 Comparison of resilience recovery ability for distribution network under different strategies

从图5中可以看出,在本文设定场景下,检修人员需要修复线路7-8、操作人员操作控制开关10-13所需的时间较长。对于含有关键负荷的节点网元2—6,在基于节点网元的负荷恢复策略下充能路径为:节点网元13→节点网元4→节点网元3;节点网元15→节点网元7→节点网元6;节点网元11→节点网元1→节点网元2。而在采用文献[11]的传统负荷恢复策略下,节点网元的充能路径为:节点网元13→节点网元4→节点网元3→节点网元2→节点网元6。虽然运用节点网元13可以有效地给关键节点网元2—6恢复供电,但是检修人员出勤一次期间需对这些节点网元区域内的所有损坏设备进行修复,无法避免对控制开关10-13的操作,同时对故障线路7-8修复的压力也大。而采用本文所提的负荷恢复策略,由节点网元13、15、11分别对节点网元区域内受损故障设备进行修复,这样可以有效缓解检修人员对修复耗时较长的故障设备造成的困扰。因此,在考虑检修人员修复故障设备、操作人员操作控制开关的实际工况下,本文所提的负荷恢复策略具有更好的配电网韧性恢复能力。

4 结论

为了提升配电网的韧性,本文提出了一种新颖的基于节点网元的综合时-空调度序列协同优化的

自然灾害下负荷恢复策略。对通电方案、检修人员、操作人员调度顺序进行了协同优化,提高了负荷恢复供电效率。为了解决在设备因灾害天气而损坏的情况下对配电网中负荷进行有序恢复供电的难题,同时考虑到灾难性事件发生时的通信损坏因素,本文在MAS架构下提出节点网元的概念进行有序恢复供电,仅通过局部通信实现自然灾害下全局信息的获取。灾后负荷恢复模型作为一个MILP问题,通过对其进行求解获取负荷恢复路径和修复时刻表,实现对调度—检修—操作人员的协同优化。通过改进的IEEE 37节点系统和IEEE 123节点系统仿真结果表明:在空间维度上,负荷恢复路径方案可以有效地在自然灾害场景下恢复配电网的负荷供电;在时间维度上,修复时刻表可以有效地减少配电网恢复时间和解决“双碳”背景下新型电力系统存在的韧性不足问题。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 阮前途,谢伟,许寅,等. 韧性电网的概念与关键特征[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6773-6784.
RUAN Qiantu, XIE Wei, XU Yin, et al. Concept and key characteristics of resilient power grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6773-6784.
- [2] 刘菲,林超凡,陈晨,等. 考虑分布式新能源动态不确定性的配电网灾后时序负荷恢复方法[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(7): 159-167.
LIU Fei, LIN Chaofan, CHEN Chen, et al. Post-disaster time-series load restoration method for distribution network considering dynamic uncertainty of distributed renewable energy[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(7): 159-167.
- [3] 苏译, Jiashen TEH, 柏智, 等. 考虑不确定性扰动的含海量资源配电网弹性研究综述[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(16): 17-30.
SU Yi, TEH J, BAI Zhi, et al. Review of research on resilience of distribution network with massive resources considering uncertainty disturbance[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(16): 17-30.
- [4] TANG W H, LI Z P, YU Z Y, et al. Cost-optimal operation and recovery method for power distribution systems considering multiple flexible resources and logistics restrictions[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2022, 49: 101761.
- [5] 高海翔,陈颖,黄少伟,等. 配电网韧性及其相关研究进展[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 1-8.
GAO Haixiang, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Distribution systems resilience: an overview of research progress[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 1-8.
- [6] 别朝红,林雁翎,邱爱慈. 弹性电网及其恢复力的基本概念与研究展望[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(22): 1-9.
BIE Zhaohong, LIN Yanling, QIU Aici. Concept and research prospects of power system resilience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(22): 1-9.
- [7] CHEN C S, LIN C H, TSAI H Y. A rule-based expert system with colored Petri net models for distribution system service restoration[J]. IEEE Transactions on Power Systems,

- 2002,17(4):1073-1080.
- [8] 欧阳森,杨墨缘. 考虑负荷恢复过程的配电网用电可靠性评估指标与方法[J]. 电力自动化设备,2021,41(3):33-40
OUYANG Sen, YANG Moyuan. Reliability assessment indexes and methods of distribution network for power consumer considering load recovery process[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(3): 33-40.
- [9] NGUYEN C P, FLUECK A J. Agent based restoration with distributed energy storage support in smart grids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2012, 3(2): 1029-1038.
- [10] 许寅,王颖,和敬涵,等. 多源协同的配电网多时段负荷恢复优化决策方法[J]. 电力系统自动化,2020,44(2):123-131.
XU Yin, WANG Ying, HE Jinghan, et al. Optimal decision-making method for multi-period load restoration in distribution network with coordination of multiple sources[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(2): 123-131.
- [11] CHEN C, WANG J H, QIU F, et al. Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 958-966.
- [12] ZHANG G, ZHANG F, ZHANG X, et al. Sequential disaster recovery model for distribution systems with co-optimization of maintenance and restoration crew dispatch[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(6): 4700-4713.
- [13] 唐文虎,杨毅豪,李雅晶,等. 极端气象灾害下输电系统的弹性评估及其提升措施研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(7):2244-2254.
TANG Wenhui, YANG Yihao, LI Yajing, et al. Study on the resilience evaluation of transmission system and its improvement measures under extreme meteorological disasters[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2244-2254.
- [14] TI B Z, LI G Y, ZHOU M, et al. Resilience assessment and improvement for cyber-physical power systems under typhoon disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(1): 783-794.
- [15] 王颖,祝士焱,许寅,等. 考虑多类型储能协同的重要负荷恢复方法[J]. 电力自动化设备,2022,42(1):72-78.
WANG Ying, ZHU Shiyan, XU Yin, et al. Critical load restoration method considering coordination of multiple types of energy storage[J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(1): 72-78.
- [16] CABIATI M, TORNELLI C, MARTINI L. The Electric web-of-cells control architecture concept for the future power system operation[C]//2018 AEIT International Annual Conference. Bari, Italy: IEEE, 2018: 1-6.
- [17] 宋蕙慧,于国星,曲延滨,等. Web of Cell体系:适应未来智能电网发展的新理念[J]. 电力系统自动化,2017,41(15):1-9.
SONG Huihui, YU Guoxing, QU Yanbin, et al. Web of Cell architecture-new perspective for future smart grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(15): 1-9.
- [18] 余涛,程乐峰,张孝顺. 基于信息-物理-社会系统融合和群体机器学习的弱中心化微元网:理论研究与关键科学问题分析[J]. 中国科学:技术科学,2019,49(12):1541-1569.
YU Tao, CHENG Lefeng, ZHANG Xiaoshun. The weakly-centralized web-of-cells based on cyberphysical-social systems integration and group machine learning: theoretical investigations and key scientific issues analysis[J]. Scientia Sinica (Technologica), 2019, 49(12): 1541-1569.
- [19] WARNAT-HERRESTHAL S, SCHULTZE H, SHASTRY K L, et al. Swarm learning for decentralized and confidential clinical machine learning[J]. Nature, 2021, 594: 265-270.

作者简介:

孙明琦(1994—),男,助理工程师,硕士,主要研究方向为韧性电网(E-mail:schroambition@163.com)。

(编辑 李玮)

Load recovery strategy considering time-space scheduling sequence co-optimization for resilient network based on web of node

SUN Mingqi, ZHENG Yurong, LIN Yuan, LIU Zhenyu

(State Grid Shanghai Shinan Power Supply Company, Shanghai 200030, China)

Abstract: To improve the resilience of the distribution network, and ensure the flexible and high-efficient power supply in the new power system under a larger time and space scale, a novel load recovery strategy considering time-space scheduling sequence co-optimization for resilient network based on web of node is proposed to obtain the optimal load recovery sequence scheme of distribution network under post-disaster scenario and the corresponding scheduling timetable. Under the multi-agent system architecture, the concept of web of node is proposed to formulate the load recovery sequence scheme, and the global parameter information is obtained through the interaction of local information between adjacent buses, which is used as the input of load recovery optimization model in the post-disaster information network. The mixed-integer linear programming problem in the post-disaster load recovery model is solved to obtain the load recovery path and repair timetable, formulate the web of node composed of several distribution generators to restore outage loads and realize the co-optimization between the dispatching of maintenance crews and repair crews. Finally, the effectiveness of the proposed collaboration scheduling optimization model is verified through the modified IEEE 37-bus and IEEE 123-bus systems.

Key words: web of cell; load recovery; resilient distribution network; maintenance personnel; operation personnel; scheduling sequence

附录 A

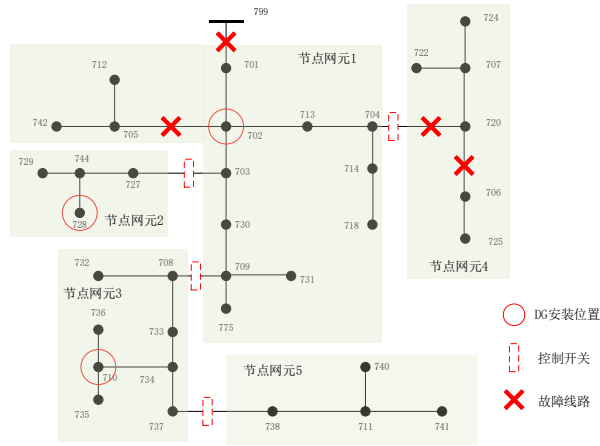


图 A1 改进的 IEEE 37 节点系统

Fig.A1 Modified IEEE 37-bus system

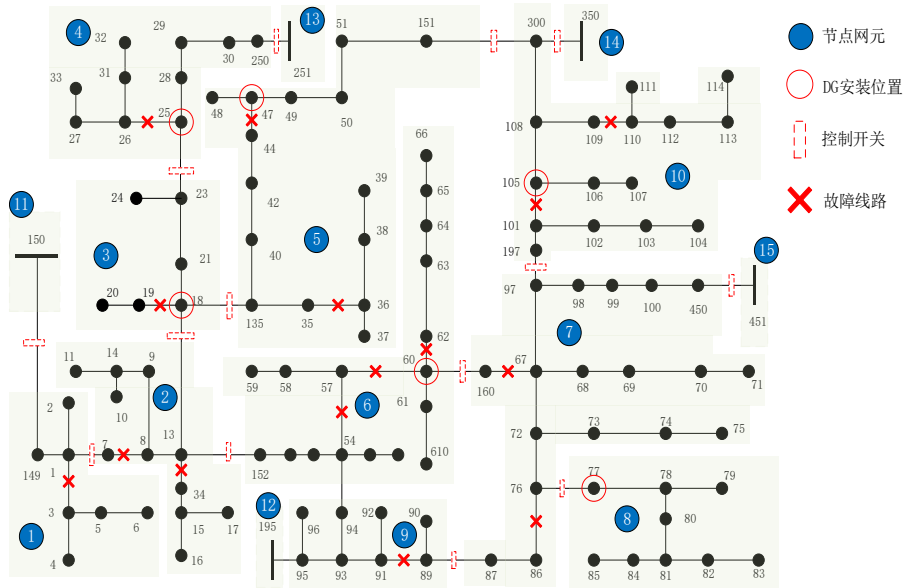


图 A2 改进的 IEEE 123 节点系统

Fig.A2 Modified IEEE 123-bus system

附录 B

2 种负荷恢复策略的结果具体如下。

1) 首先, 选用本文基于节点网元的负荷恢复策略在 IEEE 123 算例测试得到的仿真结果如下, 节点网元的充能路径为以下五部分组成。

①节点网元 14→节点网元 5→节点网元 10。

$T=135\text{ min}$, 修复 47-44 线路。

$T=186\text{ min}$, 修复 35-36 线路。

$T=190\text{ min}$, 合上 300-350 控制开关。

$T=196\text{ min}$, 合上 151-300 控制开关, 从而恢复节点网元 5 的负荷 (1045 kW)。

$T=218\text{ min}$, 修复 101-105 线路。

$T=242\text{ min}$, 修复 109-110 线路。

$T=251\text{ min}$, 恢复节点网元 10 的负荷 (400 kW)。

②节点网元 15→节点网元 7→节点网元 6。

$T=142\text{ min}$, 修复 67-160 线路。

$T=155\text{ min}$, 修复 76-88 线路。

$T=156\text{ min}$, 合上 450-451 控制开关, 节点网元 7 恢复供电 (705 kW)。

$T=242\text{ min}$, 修复 54-574 线路。

$T=255\text{ min}$, 修复 60-62 线路。

$T=301\text{ min}$, 节点网元 6 恢复供电 (880 kW)。

③节点网元 13→节点网元 4→节点网元 3。

$T=33\text{ min}$, 修复 25-26 线路。

$T=38\text{ min}$, 合上控制开关 250-251。

$T=40\text{ min}$, 节点网元 4 恢复供电 (280 kW)。

$T=145\text{ min}$, 修复 18-19 线路。

$T=148\text{ min}$, DG 对节点网元 3 恢复供电 (240 kW)。

④节点网元 12→节点网元 9。

$T=80\text{ min}$, 修复 91-89 线路。

$T=98\text{ min}$, 恢复节点网元 9 负荷 (169 kW)。

⑤节点网元 11→节点网元 1→节点网元 2。

$T=106\text{ min}$, 修复 1-3 线路。

$T=117\text{ min}$, 修复 7-8 线路。

$T=236\text{ min}$, 修复 13-34 线路。

$T=361\text{ min}$, 合上 149-150 开关, 恢复节点网元 1 的负荷 (160 kW)。

$T=380\text{ min}$, 合上 1-7 开关, 恢复节点网元 2 的负荷 (300 kW)。

2)其次, 为了体现算法在考虑实际工程中检修人员、操作人员需要对设备修复以及操作的时间, 将本文所提的算法和文献[11]所提常规的算法进行比较, 运用同一 IEEE 123 模型下, 在未考虑 t_i^L 的情况下, 节点网元的充能路径结果如下。

①节点网元 13→节点网元 4→节点网元 3→节点网元 2→节点网元 6。

$T=33\text{ min}$, 修复 25-26 线路。

$T=38\text{ min}$, 合上控制开关 250-251。

$T=40\text{ min}$, 节点网元 4 恢复供电 (280 kW)。

$T=145\text{ min}$, 修复 18-19 线路。

$T=148\text{ min}$, DG 对节点网元 3 恢复供电 (240 kW)。

$T=288\text{ min}$, 修复 7-8 线路。

$T=415\text{ min}$, 修复 13-34 线路。

$T=438\text{ min}$, 合上 13-18, 完成节点网元 2 的恢复供电 (300 kW)。

$T=568\text{ min}$, 修复 54-57 线路。

$T=596\text{ min}$, 修复 60-61 线路。

$T=613\text{ min}$, 合上 13-152, 完成节点网元 6 的恢复供电 (880 kW)。

②节点网元 11→节点网元 1。

$T=106\text{ min}$, 修复 1-3 线路。

$T=236\text{ min}$, 修复 13-34 线路。

$T=361\text{ min}$, 合上 149-150 开关, 恢复节点网元 1 的负荷 (160 kW)。

③节点网元 15→节点网元 7→节点网元 10。

$T=142\text{ min}$, 修复 67-160 线路。

$T=155\text{ min}$, 修复 76-88 线路。

$T=156\text{ min}$, 合上 450-451 控制开关, 节点网元 7 恢复供电 (705 kW)。

$T=208\text{ min}$, 修复 101-105 线路。

$T=248\text{ min}$, 修复 109-110 线路。

$T=288\text{ min}$, 合上 97-197 控制开关。

$T=302\text{ min}$, 节点网元 10 恢复供电 (400 kW)。

④节点网元 12→节点网元 9→节点网元 8。

$T=80\text{ min}$, 修复 91-89 线路。

$T=98\text{ min}$, 恢复节点网元 9 负荷 (169 kW)。

$T=156\text{ min}$, 恢复节点网元 8 负荷 (240 kW)。

⑤节点网元 14→节点网元 5。

$T=135\text{ min}$, 修复 47-44 线路。

$T=186\text{ min}$, 修复 35-36 线路。

$T=190\text{ min}$, 合上 300-350 控制开关。

$T=196\text{ min}$, 合上 151-300 控制开关, 从而恢复节点网元 5 的负荷 (1045 kW)。

附录 C

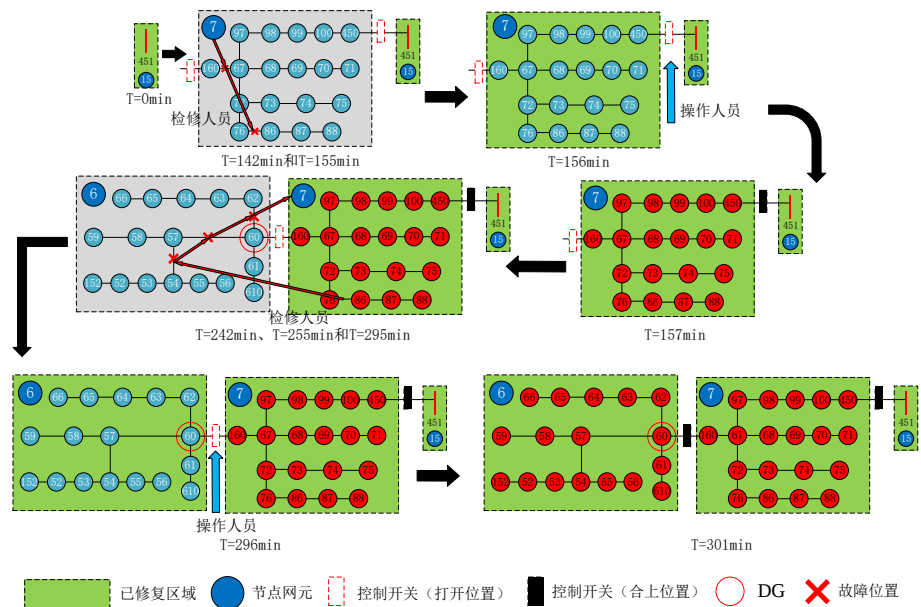


Fig.C1 Load recovery considering time-space scheduling sequence co-optimization