

基于SDN的配电网信息-物理协同恢复策略

钟剑, 陈晨*, 别朝红

(电力设备电气绝缘国家重点实验室(西安交通大学电气工程学院), 陕西省 西安市 710049)

A SDN Based Cyber-physical Integrated Restoration Scheme for Distribution Systems

ZHONG Jian, CHEN Chen*, BIE Zhaohong

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University),
Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

ABSTRACT: With grid modernization in distribution systems (DSs), physical components and cyber systems are tightly integrated. This cyber-physical integrated power system is more vulnerable in the events of disasters. Communication failures may degrade the monitoring and control functions of cyber-physical DSs during disasters, thus restricting their load recovery capability. Therefore, the recovery of communication network is essential for the post-disaster load recovery in DSs. Based on the ring network structure and the software defined networking (SDN) technology, this paper proposes a cyber-physical integrated recovery scheme for DS communication networks and DS load. The first step of this scheme recovers the post-disaster DS communication network, and then controls the topology of the DS to establish microgrids with distributed generators (DGs) as their power sources. To speed up the computation of the scheme, a heuristic computation method is also presented. The IEEE 33-node and IEEE 123-node test systems are used to verify the effectiveness and benefits of the proposed method.

KEY WORDS: cyber physical power system; distribution system restoration; software defined networking; cyber physical integration; microgrid formation

摘要: 随着智能电网的快速发展,配电网中信息物理耦合关系日益紧密。这种耦合性使得配电网更容易被多方面极端事件所影响,在通信网络发生故障时会降低系统的态势感知和控制能力,从而制约配电网的灾后负荷恢复能力,因此通信网络恢复对灾后配电网负荷恢复至关重要。该文提出一种通信网络恢复和负荷恢复的协同优化决策方案,该方案将环网通信网络与软件定义网络(software defined networking, SDN)技术相结合,灵活恢复灾后的配电网通信网络,进而控制配电网拓扑重构形成以分布式电源为中心的微电网

以恢复负荷电力供应,并进一步使用一种信息物理协同的启发式计算方法实现恢复方案的快速计算。最后,使用IEEE 33节点和IEEE 123节点测试系统验证所提出方法的优点和有效性。

关键词: 信息物理电力系统; 配电网灾后恢复; 软件定义网络; 信息物理耦合; 微网重构

0 引言

电力系统是现代社会与经济运行的动力之源,其配电网系统的安全运行面临着日益增长的多重威胁。一方面,近年来洪水、高温、冰灾、飓风等极端天气灾害频发,给配电网系统的正常运行带来极大挑战;另一方面,信息技术在智能电网的广泛应用使配电网极易受到信息层面故障影响。在通信网络故障情况时会降低配电网主站对一次设备的感知与控制能力,并可能引发物理层的连锁性故障^[1]。研究表明,极端事件中信息物理耦合故障会加速故障演变,扩大停电范围,增加电力系统的恢复难度^[2]。为提高配电网在上述信息-物理事件中的弹性^[3],减少极端事件给配电网及其用户带来的影响与损失,需制定配电网在信息-物理耦合故障下的协同恢复策略。

配电网弹性的核心在于灾害发生后迅速利用各类资源恢复用户的电力供应^[3]。通过控制远动开关改变配电网拓扑结构,动态形成由分布式电源(distributed generator, DG)与储能设备供电的微电网^[4-8],使电力供应有效适应极端灾害后的复杂故障场景,是电力恢复的重要手段之一^[3,6,9]。但既往的配电网灾后负荷恢复的研究,往往忽视信息网络的受损情况,认为远动开关的远程控制不受灾害影响,这并不符合配电网的实际受灾情形。由于空间

基金项目: 国家电网公司科技项目(5400-202199524A-0-5-ZN)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5400-202199524A-0-5-ZN)。

上的耦合性,配电网的信息网络和物理设施在遭受灾害时往往同时受损。如2013年登陆我国广东沿海地区的台风“天兔”,不仅引发汕尾地区多条配电线路断线故障,而且破坏了大量电力通信光缆^[10]。而配电网主站对远动开关的控制高度依赖于通过通信网络对保护测量装置(保测装置)下发控制命令。当主站与某一保测装置通信中断时,即失去了相关配电网拓扑结构的控制能力,因而影响负荷的恢复速度。因此,通信恢复是配电网信息-物理耦合故障中负荷快速恢复的前提。在配电网通信恢复方面,相关研究^[11-13]已提出大量恢复方案,但这些方案仅以信息网络恢复为目标,并未根据通信恢复对负荷恢复的作用进行决策。在通信网络资源受限时,现有方案难以恢复所有保测装置与主站间的通信链路,使得负荷的恢复性控制受到通信网络的恢复状态制约。而灾后配电网恢复哪部分通信节点,应当根据通信节点对负荷恢复作用进行优化决策。

解决上述问题需将信息-物理相互依赖特征纳入恢复决策过程。这种综合决策能力要求通信网络应灵活可靠并可集中控制,以与负荷恢复时的拓扑控制相互配合。而软件定义网络(software defined networking, SDN)在该方面具有明显的技术优势^[14]。SDN技术将控制平面与数据平面相分离,打破了传统交换机中控制与转发功能的强耦合关系^[15],使网络交换机变为简单的数据转发设备,并通过集中式控制器实时下发流表控制交换机间的路由路径,使得通信链路灵活可控。文献^[16-18]将SDN技术应用于配电网通信网络,增强配电网通信网络的集中控制能力、自我恢复能力以及对网络故障的抵御能力。但以上通信恢复研究仍未将配电网负荷恢复过程中的信息-物理耦合特性纳入考虑,难以帮助负荷实现最优恢复。

针对以上问题,本文提出一种信息-物理耦合的配电网灾后协同恢复策略,以在配电网的通信网络和电力网络同时受到损害时,在人工抢修前,通过主站控制配电网进行拓扑重构实现负荷的快速恢复。该策略考虑通信网络与拓扑控制的相互依赖性,使用SDN技术的路由灵活性为配电网通信网络在有限的通信资源下按照负荷恢复需求恢复中断的通信链路,进而恢复对远动开关的控制能力,从而控制配电网形成多个以分布式电源为中心的微电网,实现更有效的负荷恢复。此外,由于配电网的结构复杂、元件多样,且通信网络中数据路由

选择问题涉及参量多,运用数学求解器求取上述决策模型的全局最优解时,其计算耗时长,响应速度慢。因此本文提出了一种启发式算法用于计算上述模型。该算法易于部署,能够在耗时较短的前提下得出模型负荷恢复的近似最优方案,从而保证恢复决策的实时性。

本文主要创新点如下:1)提出一种基于SDN技术和环形网络的配电网通信网络恢复方法,使得配电网主站能够控制通信网络的路由路径实现通信恢复;2)建立配电网灾后信息-物理协同恢复模型,将通信与负荷恢复的相互制约关系转化为线性约束,进而将信息物理协同恢复决策问题构建为混合整数线性规划(mixed-integer linear programming, MILP)求解问题;3)提出一种启发式算法以对上述模型快速求解,并将其与3种其他恢复算法进行比较,验证其综合性能。

1 通信-负荷恢复框架及其交互影响

1.1 负荷恢复框架

灾后负荷恢复过程中,配电网可视为一个由母线节点集合 N 、电力线路集合 L 和电源节点集合 $G \in N$ 组成的拓扑结构。配电网负荷恢复主要依靠控制电力线路开合改变配电网拓扑结构,从而使用主网供电与分布式电源恢复母线节点负荷的电力供应。分布式电源应有足够装机容量,以支撑实现有效的配电网灾后负荷恢复。

如图1所示,线路集合 L 中,若一条序号为 k 的线路两端节点分别是节点 i 与节点 j ,则定义其为 $k=(i,j)$ 。对于具有多个分布式电源的配电网架构,可能存在多条线路两端相互供电的情况,因此对于任何一条线路 $k=(i,j)$,假设其两端母线侧均装设有远动开关用于控制线路开断,其工作状态分别用 $b_{k,i}$ 和 $b_{k,j}$ 表示:1表示闭合,0表示断开。

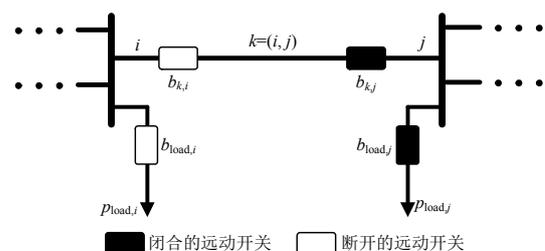


图1 母线和电力线路及其远动开关

Fig. 1 Buses and branches and their automatic switches

此外,当电源输出功率不足时,部分母线可能仅传输功率而不将其负荷接入配电网。因此设定任

意母线节点 i 与其负荷 $p_{load,i}$ 间均装设有负荷开关，用于决定该负荷是否接入配电网，并用 $b_{load,i}$ 表示其工作状态：1 表示闭合，0 表示断开。联络开关在本模型中均视为主站可控的运动开关，其所在线路两端节点均被视为母线节点。

另外，配电网恢复负荷的控制过程中，为保证配电网的安全运行，闭合线路时，应根据形成的辐射式拓扑结构由供电前端节点向末端节点依次恢复母线节点及其负荷的电力供应。

1.2 通信恢复框架

与配电物理结构相对应的配电网通信系统，可以简化为由通信节点集合 N_C 和通信链路集合 L_C 组成的拓扑结构。其中，通信节点集合 N_C 由主站控制中心、负责数据汇聚的网络交换机、集中转发数据的数据集中器和母线处安装的保测装置组成。其中保测装置具有保护和控制功能，能控制所属其所在母线的运动开关进行断开、闭合操作。因此，对于任意母线节点 $i \in N$ ，都存在一个对应的保测装置通信节点 $i \in N_C$ 。

如图 2 所示，本文应用 SDN 技术和环状通信网络架构为配电网通信网络提供链路恢复能力^[19-20]。不同于图 2(a)中传统的树状网络结构，环状网络将交换机环接，增加了通信链路的可选择性。其对传统通信网络结构的改造较小，只涉及交换机间环状链路的增加。研究表明，环状网络在控制和管理方面具有较好的适应性和可扩展性^[20]，有助于实现高效灵活的信息传输^[21]，并在故障条件下仍能保持较高的数据吞吐量^[22]。SDN 技术被广泛应用于智能电网变电站自动化监控系统、电动汽车能量管理系统、电力系统云和物联网系统^[14-15, 23]，为智能电网提供安全防护、数据隔离和故障恢复功能。SDN 网络控制器具有逻辑集中控制能力，能够获取信息的全局视图，动态配置下属交换机和路由器流表，识别、处理故障链路和错误数据包，从而适应不断变化的网络业务需求^[15]。上述功能使得 SDN 网络极其适用于信息-物理耦合恢复中的通信恢复过程。当通信链路或转发设备出现故障时，基于 SDN 技术和环形通信架构的通信网络能够利用替代链路恢复通信链路，使得通信网络具备快速恢复能力。

对于上述的通信网络，通信恢复即为在主站和保测装置间重新建立完整的通信链路，可将其视为保测装置节点与主站节点之间的单源拓扑路径间

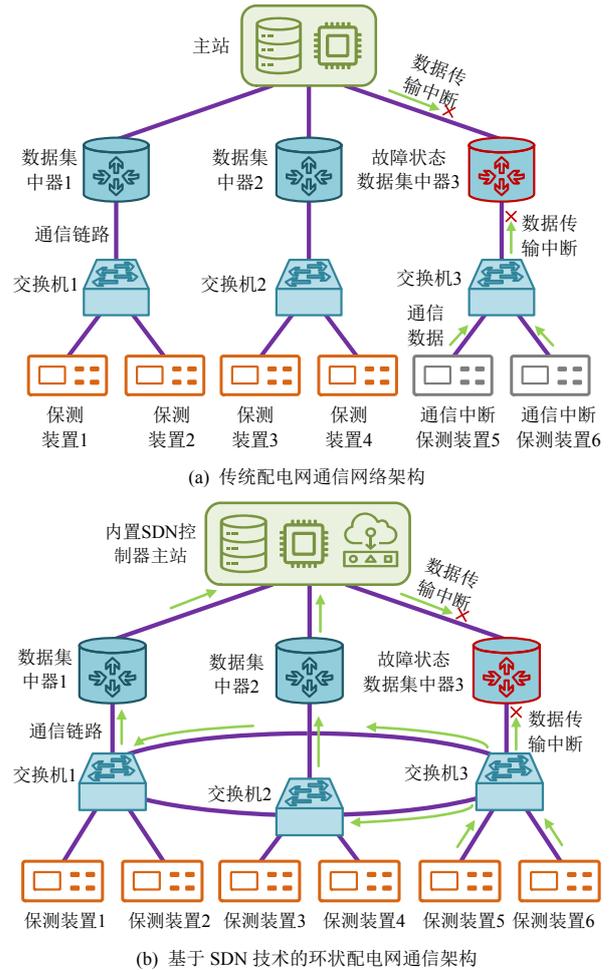


图 2 环状通信网络的恢复性链路说明

Fig. 2 Display of the recoverable links in the ring communication network

题，并应基于保测装置节点的负荷恢复价值与恢复过程消耗的通信资源进行综合考虑决策。

本文依靠 SDN 控制器控制数据在交换机间的传输路径来实现配电网通信网络的快速恢复。由于配电网保测设备与通信设施通常配备蓄电池，在供电中断后数小时内，可依靠电池应急供电实现上述控制功能。当交换机设备故障时，该方法仍能有效使用网络中的剩余通信资源通过重路由功能实现通信恢复，但与故障交换机直连的保测装置，将失去与主站的通信连接，需等待后续人工抢修。

1.3 通信-负荷恢复交互影响

在配电网发生信息层、物理层双重故障后，其恢复过程包含通信网络恢复与负荷恢复两部分工作。负荷恢复过程中对运动开关的控制依赖于正常工作的通信链路，因此配电网主站与保测装置间的通信恢复是负荷恢复的基础条件。因通信中断而失去控制的运动开关会制约配电网微网形成与负荷恢复能力，故通信网络恢复需基于网络带宽、路由

路径和网络延迟等限制条件,考虑恢复控制的远动开关对负荷恢复的作用进行决策。本文将上述通信恢复与负荷恢复过程耦合建立为信息-物理协同恢复决策的MILP模型,从而在灾后配电网通信资源受限的情况下,通过适当的通信恢复使负荷恢复达到最佳效果。

此外,本文中协同恢复方法以常规负荷恢复方法^[6-8]为基础,对于未引入SDN技术或使用其他分布式通信恢复策略的配电网,能够将其通信恢复结果作为模型的边界输入条件,基于通信状态对电力设施控制能力的约束,得出负荷快速恢复方案,具有较好的通用性。

2 信息-物理协同恢复 MILP 模型

2.1 通信网络恢复模型

配电网通信网络恢复决策过程中,需考虑链路带宽、通信延时限制约束。对于任意通信节点*i*和通信链路*k*,设定向量 $\mathbf{c}_{CN,x}=(h_{CN,1,i},\dots,h_{CN,n,x})$ 与 $\mathbf{c}_{CL,z}=(h_{CL,1,z},\dots,h_{CL,n,z})$ 用于表示保测装置1~*n*信号数据是否通过通信节点*x*与链路*z*。其中: $h_{CN,i,x}$ 用于表示来自保测装置*i*的通信数据是否通过通信节点*x*,1表示流入该节点,-1表示流出该节点,0表示未流经该节点; $h_{CL,i,z}$ 用于表示保测装置*i*的通信数据是否流经通信链路 $z=(x,y)$,1表示数据从节点*x*流入通信链路*z*;-1表示数据从节点*y*流入通信链路*z*;0表示未流经该链路。

通信节点和链路可能因自然灾害受损而发生故障。假设保测装置在故障时均可进行设备自检并向数据集中器发送装置故障状态信号;交换机也能基于链路层发现协议(link layer discovery protocol, LLDP)^[23]实时获取链路的工作状态并向主站上传,因此主站可以实时掌握通信网络种通信链路和通信节点的工作状态。

2.1.1 通信节点数据流通约束

节点数据流通约束如式(1)~(6)所示。

$$\sum_{z \in F_{NC,i}} D_{CL,z,x} \cdot \mathbf{c}_{CL,z} = 0, \forall x \in N_C \setminus N \quad (1)$$

$$\mathbf{c}_{CN,x} = \frac{1}{2} \sum_{k \in F_{CN,x}} |\mathbf{c}_{CL,k,x}|, \forall x \in N_C \setminus N \quad (2)$$

$$m_i = h_{CN,i,u}, \forall i \in N \quad (3)$$

$$m_i \leq s_{CN,i}, \forall i \in N \quad (4)$$

$$l_{CN,x} = \sum_{i \in N} o_i \cdot h_{CN,i,x}, \forall x \in N_C \quad (5)$$

$$l_{CN,x} \leq l_{CN,x,\max}, \forall x \in N_C \quad (6)$$

式中:定义常数 $D_{CL,z,x}=1$ 与 $D_{CL,z,y}=-1$ 分别表示链路 $z=(x,y)$ 上数据由节点*x*流入链路*z*、由链路*z*流入节点*y*; $F_{CN,x}$ 为与通信节点*x*连接的链路集合; m_i 为保测装置*i*的通信状态,1表示与主站通信正常,0表示通信断开; u 为主站节点编号; $s_{CN,x}$ 和 $s_{CL,z}$ 为灾后通信节点*x*与通信链路*z*的工作状态,1表示工作正常,0表示故障损坏; $l_{CN,x}$ 和 $l_{CN,x,\max}$ 为通信节点*x*已使用数据带宽及其带宽上限; o_i 为保测装置*i*与主站通信所需通信带宽。

式(1)和(2)为转发节点数据约束,即对于任意转发节点*x*,其流入、流出的通信数据向量之和应为0,且流经该转发节点的数据向量 $\mathbf{c}_{CN,x}$ 应为其流入、流出数据向量绝对值的一半;式(3)和(4)为保测装置节点的通信状态约束,即一台保测装置通信是否正常,取决于主站能否接收到该装置发送的数据,而故障的保测装置无法与主站进行数据交互;式(5)和(6)为通信节点带宽约束,即通信节点已使用带宽,等于流经该节点通信数据消耗带宽之和,且不可超过该节点的带宽上限。

2.1.2 通信链路数据流通约束

链路数据流通约束如式(7)~(9)所示。

$$s_{CL,z} \cdot (-M) \leq c_{CL,z} \leq s_{CL,z} \cdot M, \forall z \in L_C \quad (7)$$

$$l_{CL,z} = \sum_{k \in F_{CN,x}} o_i |h_{CL,i,x}|, \forall z \in L_C \quad (8)$$

$$l_{CL,z} \leq l_{CL,z,\max}, \forall z \in L_C \quad (9)$$

式中: M 为极大值; $l_{CL,z}$ 和 $l_{CL,z,\max}$ 为通信链路*z*已被使用数据带宽及其带宽上限。

式(7)为通信链路状态限制约束,即仅允许数据在正常工作链路上流通;式(8)和(9)为通信链路带宽约束,即通信链路已使用带宽等于流经该链路数据消耗带宽之和,且不可超过其数据带宽上限。

2.1.3 延时约束

通信网络的延时约束可表述为

$$[e_{CN,i,x} - (h_{CL,i,z} \cdot d_{CL,z}) - 0.5(h_{CL,i,z} + 1) \cdot d_{CN,x} + (1 - |h_{CL,i,z}|) \cdot (-M)] \leq [e_{CN,i,y} - 0.5 \cdot (1 - h_{CL,i,z}) \cdot d_{CN,y}] \leq [e_{CN,i,x} - (h_{CL,i,z} \cdot d_{CL,z}) - 0.5 \cdot (h_{CL,i,z} + 1) \cdot d_{CN,i} + (1 - |h_{CL,i,z}|) \cdot M], \forall z = (x, y) \in L_C, \forall i \in N \quad (10)$$

$$e_{CN,i,i} \leq e_{CN,i,\max}, \forall i \in N \quad (11)$$

式中: $e_{CN,i,x}$ 为保测装置*i*的数据在通信节点*x*处与主站的端到端延时; $d_{CL,z}$ 为链路*z*的数据传输延时; $d_{CL,x}$ 为节点*x*的数据转发延时。

式(10)为保测装置的通信数据延时约束，若保测装置 i 的通信数据从通信节点 x 流经链路 $z=(x,y)$ 传输到节点 y ，则节点 y 处数据与主站的端到端延时，应为节点 x 处数据与主站的端到端延时、节点 y 的数据转发延时，与链路 k 的数据传输延时之和；式(11)为保测装置的延时光上约束，即定义主站为数据发送端、保测装置为接收端，模型在保测装置处判断接收数据延时是否符合 IEC61850 的通信规范^[24-25]。

2.2 负荷恢复模型

配电网的负荷恢复模型涉及两方面约束条件：拓扑约束、运行约束。

2.2.1 配电网拓扑约束

研究表明^[7-8]，单商品流(single commodity flow)数学规划方法可用于建立灾后配电网微电网拓扑形成的连通性约束，其微网生成的方法如下：定义商品在配电网电力拓扑图内流通；一个微电网只接入一个电源；每个母线节点均存在单位商品需求，当其满足时即表示该节点接入微电网，即存在电源向该节点供电。

配电网拓扑约束如式(12)–(18)所示。

$$s_{Lp,k} \leq s_{L,k}, \forall k \in L \quad (12)$$

$$t_{L,k} \leq s_{L,k}, \forall k \in L \quad (13)$$

$$-M \cdot t_{L,k} \leq f_{L,k} \leq M \cdot t_{L,k}, \forall k \in L \quad (14)$$

$$-M \cdot (1-t_{L,k}) + f_{N,j} \leq f_{N,i} \leq M \cdot (1-t_{L,k}) + f_{N,j}, \quad (15)$$

$$\forall k=(i,j) \in L$$

$$\sum_{k \in F_i} D_{k,i} \cdot f_{L,k} + f_{N,i} = 0, \forall i \in N \setminus G \quad (16)$$

$$\sum_{k \in F_i} D_{k,i} \cdot f_{L,k} + f_{N,i} = f_{G,i}, \forall i \in G \quad (17)$$

$$\sum_{i \in N} f_{N,i} - \sum_{r \in G} f_{G,r} = \sum_{k \in L} t_{L,k} \quad (18)$$

式中 $s_{Lp,k}$ 表示电力线路 k 在配电网恢复前的分合状态，1 代表闭合，0 代表断开。随着大量传感器、智能仪表和故障指示器接入配电网，以及无人机巡线技术在配电网的应用，配电网故障评估和故障定位技术^[26-29]能够帮助主站快速获取配电网设备的运行状态。因此，本文假设负荷恢复工作前所有母线和线路设备状态均已知，并用 $s_{N,i}$ 与 $s_{L,k}$ 表示母线 i 与线路 k 的设备状态，1 表示工作正常，0 表示设备故障； $t_{L,k}$ 为主站对线路 k 分合的决策变量，0 表示分开，1 表示闭合； $f_{L,k}$ 为流经线路 k 的商品流； $f_{N,i}$ 为母线节点 i 的单位商品需求，0 表示未满足，1

表示满足； F_i 为节点 i 相连的线路集合； $f_{G,r}$ 为电源节点 r 向配电网注入的商品流。

式(12)和(13)为线路保护约束，即故障线路与母线会被保测装置切除以保护配电网；式(14)和(15)为线路商品流通约束，即仅闭合线路允许商品流通，且闭合线路两端节点供电状态相同；式(16)和(17)为节点商品流平衡约束，即流出节点的商品流之和恒为 0；式(18)为辐射状拓扑约束，用于防止形成环状结构并确保单个微电网仅存在一个电源。

2.2.2 配电网运行约束

配电网运行约束如式(19)–(30)所示。

$$p_{L,k} \leq P_{L,\max}, \forall k \in L \quad (19)$$

$$q_{L,k} \leq Q_{L,\max}, \forall k \in L \quad (20)$$

$$-M \cdot t_{L,k} \leq p_{L,k} \leq M \cdot t_{L,k}, \forall k \in L \quad (21)$$

$$-M \cdot t_{L,k} \leq q_{L,k} \leq M \cdot t_{L,k}, \forall k \in L \quad (22)$$

$$\sum_{k \in F_i} D_{k,i} \cdot p_{L,k} + b_{\text{load},i} \cdot p_{\text{load},i} = 0, \forall i \in N \setminus G \quad (23)$$

$$\sum_{k \in F_i} D_{k,i} \cdot q_{L,k} + b_{\text{load},i} \cdot q_{\text{load},i} = 0, \forall i \in N \setminus G \quad (24)$$

$$\sum_{k \in F_i} D_{k,i} \cdot p_{L,k} + b_{\text{load},i} \cdot p_{\text{load},i} = p_{G,i}, \forall i \in G \quad (25)$$

$$\sum_{k \in F_i} D_{k,i} \cdot q_{L,k} + b_{\text{load},i} \cdot q_{\text{load},i} = q_{G,i}, \forall i \in G \quad (26)$$

$$V_i = V_{\text{ref}}, \forall i \in G \quad (27)$$

$$0.9V_{\text{ref}} \leq V_i \leq 1.1V_{\text{ref}}, \forall i \in N \quad (28)$$

$$[V_i - \frac{(p_{L,k} \cdot R_k + q_{L,k} \cdot X_k)}{V_{\text{ref}}} + (1-t_{L,k}) \cdot (-M)] \leq V_j \leq \quad (29)$$

$$[V_i - \frac{(p_{L,k} \cdot R_k + q_{L,k} \cdot X_k)}{V_{\text{ref}}} + (1-t_{L,k}) \cdot M], \forall k=(i,j) \in L$$

$$b_{\text{load},i} \leq f_{N,i}, \forall i \in N \quad (30)$$

式中： V_i 为节点 i 电压； V_{ref} 为配电网参考电压； $p_{L,k}$ 、 $q_{L,k}$ 为流经线路 k 有功与无功功率； $P_{L,\max}$ 、 $Q_{L,\max}$ 为配电网线路有功、无功功率上限；定义常数 $D_{k,i}=1$ 与 $D_{k,j}=-1$ 表示功率在电力线路 $k=(i,j)$ 上由节点 i 流入线路 k 、由线路 k 流入节点 j ； R_k 、 X_k 为线路 k 的电阻与电抗。

式(19)和(20)为线路功率上限约束；式(21)和(22)为线路功率流通约束；式(23)–(26)为节点功率平衡约束；式(27)–(29)为节点电压约束；式(30)为负荷接入约束，即带电母线节点可选择是否接入负载。

2.3 通信与负荷恢复耦合约束与目标函数

负荷恢复控制时需根据线路的初始状态考虑通信恢复需求。信息-物理协同恢复的约束条件与目

标函数如下所示。

2.3.1 通信恢复与配电网拓扑控制约束

配电网负荷恢复的控制过程中，一条线路可能处于断开或闭合的初始状态，而不同状态对通信恢复的需求不同。首先，若欲断开一个原本闭合的线路 $k=(i,j)$ ，其两端母线节点保测装置至少有一台需受主站控制。其次，若欲闭合一条原本断开的线路，其两端保测装置都应受主站通信正常。

换句话说，两端节点都失去控制时线路的状态保持不变，两端节点都受到控制才可使断开线路闭合，图 3 说明了上述情况。根据线路初始状态和两端通信节点的通信状态，可以将电力线路的分合控制范围归纳为如表 1 所示的 6 种情形，并将其总结为不等式约束：

$$[s_{LP,k} - (m_i + m_j)] \leq t_{L,k} \leq [s_{LP,k} + 0.5(m_i + m_j)], \quad \forall k=(i, j) \in L \quad (31)$$

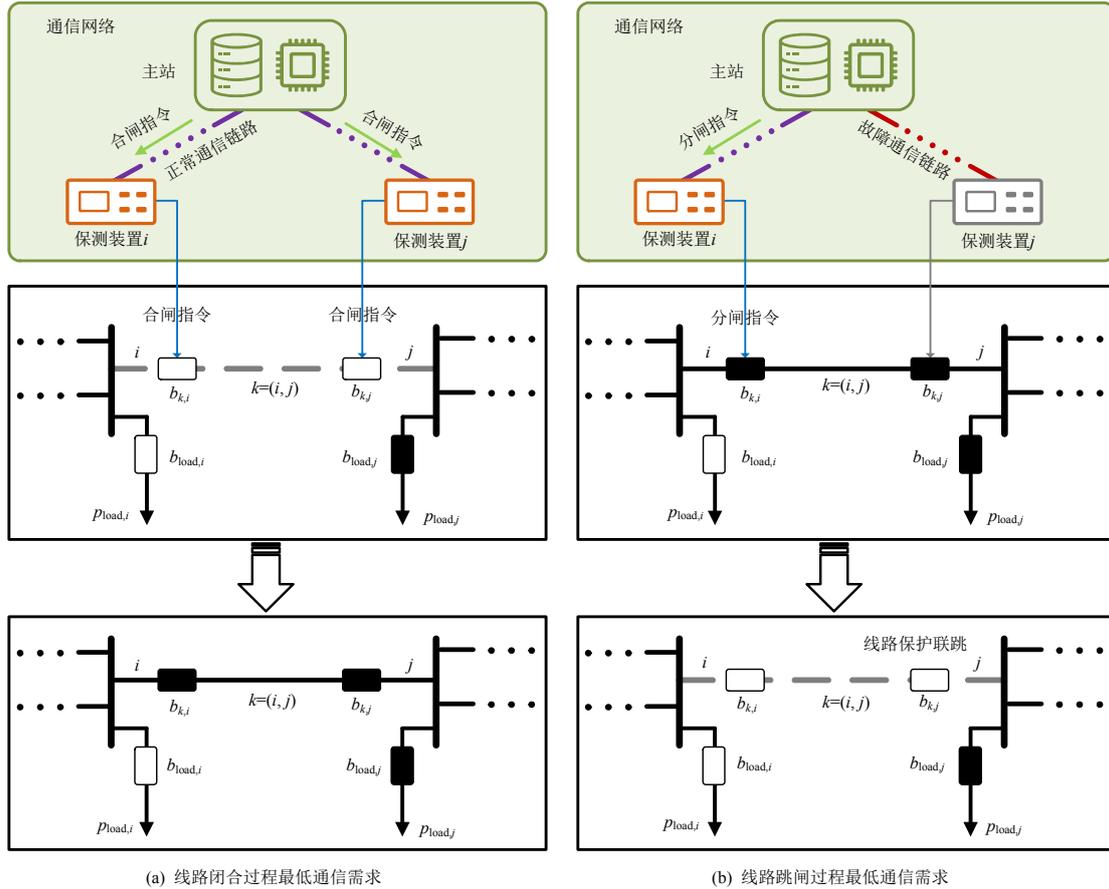


图 3 负荷恢复中线路分合和通信状态的耦合关系

Fig. 3 Integrated relationship between branch control and communication state in load recovery

表 1 线路初始状态与线路两端节点通信情况对线路控制的影响

Table 1 Influence of branch initial state and both end-nodes communication state on branch control

线路 k 的初始状态	通信节点 i 的通信状态	通信节点 j 的通信状态	线路 k 的可控制范围
1	1	1	[0, 1]
1	1	0	[0, 1]
1	0	1	[0, 1]
1	0	0	[0, 0]
0	1	1	[0, 1]
0	1	0	[0, 0]
0	0	1	[0, 0]
0	0	0	[0, 0]

2.3.2 目标函数

文中根据负荷类型设定了不同负荷权重系数。此模型目标是恢复最大负荷价值。

$$W_{load} = \sum_{i \in N} b_{load,i} \cdot P_{load,i} \cdot w_i \quad (32)$$

式中： w_i 为母线节点 i 的负荷权重系数，本文基于配电网负荷分类规范^[30]将其中的三级负荷逐级详细分类为重要、次要、一般 3 个等级，分别对其权重系数进行了合理假设； W_{load} 为配电网负荷恢复总价值。

该模型中，通信恢复的支出成本，体现在负荷恢复的结果中。即通信网络中网络节点恢复消耗的通信资源，会制约其他节点的恢复能力，并根据耦

合约束条件，最终会限制负荷的恢复能力。

3 模型计算复杂度与启发式算法流程

3.1 模型计算复杂度

使用数学求解器求取上述模型全局最优解时，通信恢复过程涉及待求变量数量较大，导致计算耗时长。以一个 n 节点、 m 条线路、 l 个分布式电源的配电网算例为例，该算例对应通信网络有 n 台保测装置、 x 台交换机、 y 台数据集中器、一个主站以及 z 条通信链路，将该受灾案例建立为上述 MILP 模型，使用数学求解器求解时，负荷与通信恢复过程共需建立变量数量如表 2 所示。

表 2 线性求解器求解 MILP 模型变量数量
Table 2 Number of variables in the MILP model solved by linear solvers

归类	变量功能	变量类别	
		实数变量	二进制变量
负荷恢复	线路功率	$2m$	—
	线路商品流	m	—
	分布式电源注入	$3l$	—
	功率与商品流	—	n
	节点状态	—	n
	节点负荷开关	—	n
通信网络恢复	节点电压	n	—
	保测装置状态	—	n
	保测装置延时	n	—
	链路数据向量	—	zn
	链路延时	zn	—
	链路带宽	z	—
	转发节点数据向量	—	$(x+y)n$
	转发节点延时	$(x+y)n$	—
主站数据向量	—	n	

转发节点与通信链路的数据流通判断和延时计算，分别涉及由 n 个二进制变量构成向量与由 n 个实数变量构成向量的求解，其变量数量会随着配电网结构复杂化成指数增长，复杂结构中可能因求解过程计算量大、耗时长而无法在受灾后快速给出恢复方案。另外，在主站端部署数学求解器的成本较高，也不具备经济性优势。因此，为保证恢复方案的实时性与经济性，本文基于上述 MILP 模型，提出一个启发式算法进行求解。

3.2 启发式算法流程

该算法的核心思想是根据分布式电源和配电网的结构状态，考虑通信资源限制、配电网运行约束与耦合恢复控制约束，在当前配电网结构可恢复

的母线节点中，寻找负荷价值(负荷量与负荷系数乘积)最大节点将其接入微电网，通过循环判断直至无节点可接入微电网以保证生成结构的最大化。启发式算法具体流程如图 4 所示。

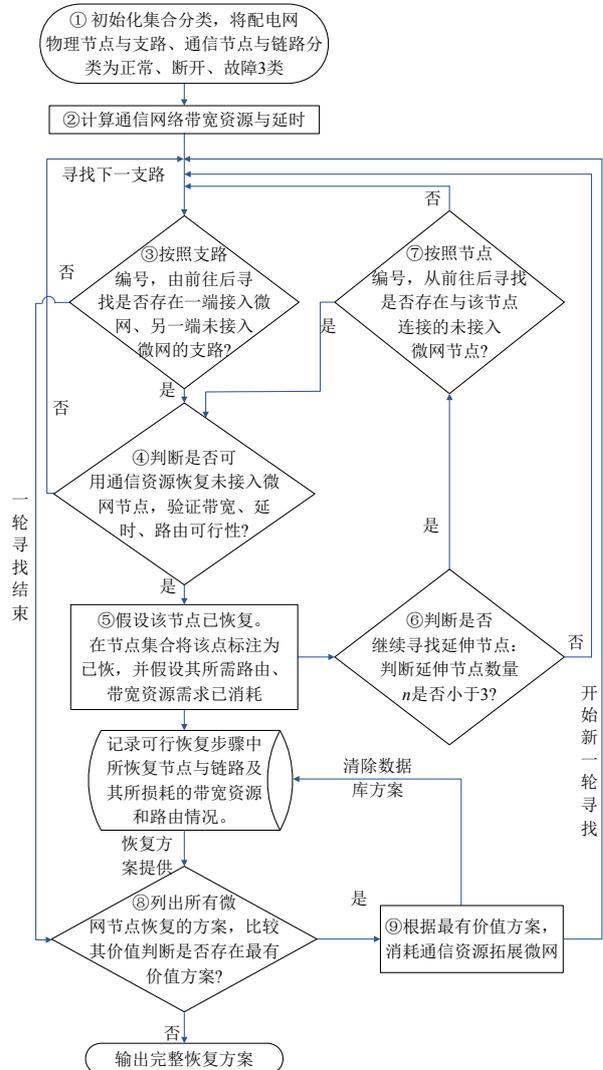


图 4 配电网负荷恢复中的微网形成启发式算法流程图

Fig. 4 Flowchart of heuristic microgrid formation algorithm in distribution system load recovery process

对恢复过程中部分步骤的备注如下。

1) 由于环状通信网络中，通信恢复链路过程存在图 2 中向左、向右、跨越交换机进行传输等多种路径。因此步骤④每次进行通信恢复策略时会随机生成一个 $0 \sim 1$ 的常数 β 。根据其取值范围决定通信恢复路径的优先尝试方向。例如， $0 \leq \beta < 0.5$ 首先尝试故障设备对应交换机左侧交换机恢复链路； $0.5 \leq \beta \leq 1.0$ 首先尝试右侧交换机恢复链路。由此避免某侧链路带宽因固定计算方法而较早耗尽，以致后续设备无剩余带宽恢复通信。

2) 使用节点延伸方案是为了解决如图 5 所示

案例中较高负荷价值节点处于较低负荷价值节点后端的情况。图中恢复母线节点2能恢复较大负荷，但其恢复前提是前端节点3恢复电力供应。因节点3的负荷为0，若进行单个母线节点恢复价值判断时，在资源受限的情况下会因其恢复价值小而不被选择，从而限制了节点2负荷恢复选择性，最终难以实现配电网负荷恢复的价值最大化。

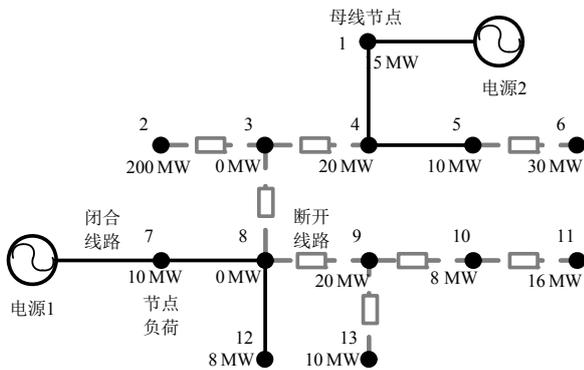


图5 节点延伸恢复方法的必要性说明图例
Fig. 5 Illustration of the necessity of the node extension recovery method

4 仿真分析与比较

本文建立了 IEEE 33 节点与 IEEE 123 节点算例^[31]进行算法验证，算例中设定了配电网的受灾与分布式电源部署情况，对其使用了4类算法进行计算验证与分析比较。具体4类算法如下。

1) 仅负荷恢复算法 (only load recovery algorithm, OLRA): 在不恢复通信网络的情况下使用数学求解器求解负荷恢复的最大目标函数;

2) 通信与负荷分开恢复算法 (separated communication and load recovery algorithm, SCLRA): 将通信恢复和负荷恢复分开考虑, 首先

以最大数量通信节点为目标进行通信恢复; 随后在此基础上运用求解器求取最大目标函数;

3) 通信负荷耦合恢复算法 (communication and load recovery integrated algorithm, CLRIA): 通信恢复和物理恢复基于上述耦合约束条件通过数学求解器求取目标函数最优解;

4) 通信负荷协同恢复启发式算法 (heuristic communication and load recovery integrated algorithm, HCLRIA): 基于上述信息物理协同的启发式算法计算流程进行负荷恢复, 最终计算该恢复方案的目标函数。

其中, OLRA、SCLRA、CLRIA 算法均将算例建模为 MILP 模型, 使用 GUROBI 商业求解器求解, 而 HCLRIA 算法使用启发式方法求解模型。此外, CLRIA 与 HCLRIA 算法根据通信节点对负荷恢复的作用恢复通信。4 种算法均基于通信与拓扑控制的耦合约束, 控制配电网形成以分布式电源为中心的微电网恢复负荷。通过综合比较上述 4 种算法在算例中的负荷恢复结果、计算耗时, 从而验证上述算法的计算性能。

4.1 IEEE 33 节点案例验证

该 IEEE 33 节点案例中, 设定部分母线、线路在灾害袭击时受损, 导致相应负荷失去电力供应。灾害同时引发部分数据集中器与保测装置故障。该配电网装有适当容量的分布式电源, 在灾害发生后能向临近母线节点供应电能。图 6 和 7 详细展示了该案例通信与电力网络的受损情况, 并在表 3 中对节点负荷类别进行了假设。

由于存储转发方式是目前交换机数据转发的主流方法, 本文基于其对节点转发延迟进行设定。

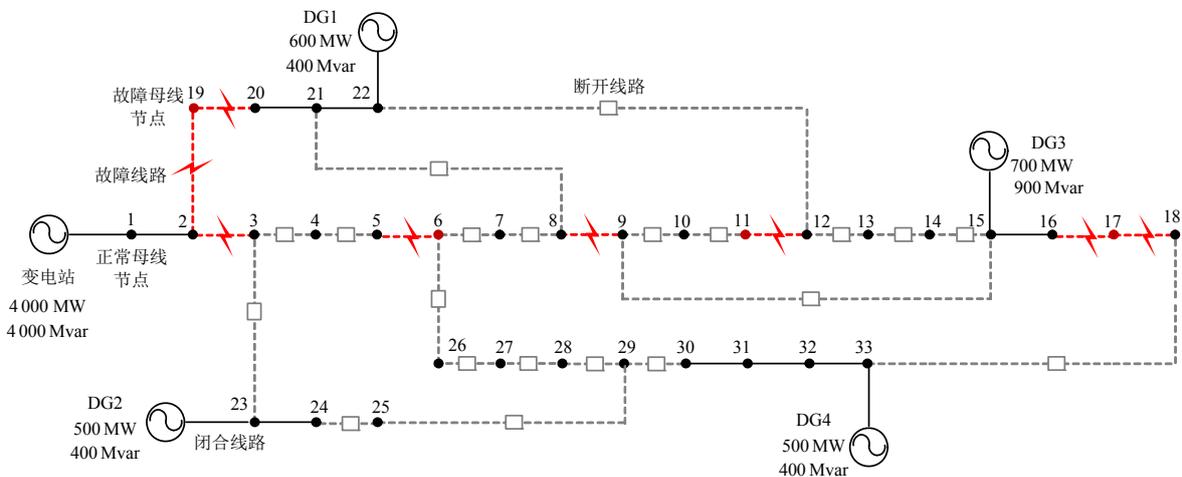


图6 IEEE 33 节点灾后负荷恢复算例
Fig. 6 IEEE 33-node post-disaster recovery example

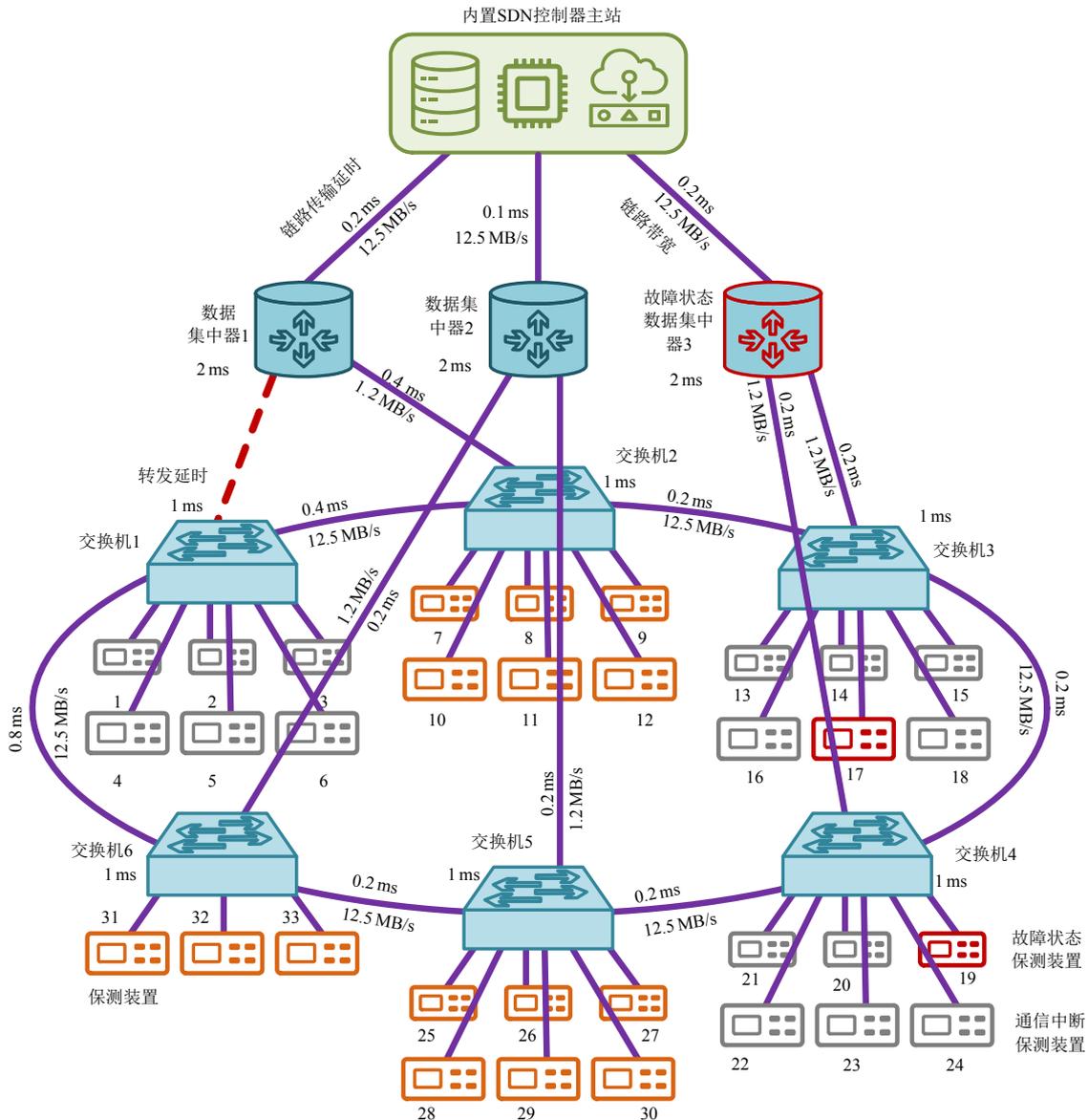


图 7 IEEE 33 节点通信网络结构与故障情况

Fig. 7 IEEE 33-node communication network structure and disaster situation

表 3 IEEE 33 节点负荷权重系数

Table 3 IEEE 33-node load weight coefficients

负荷类别	权重系数	母线编号
三级	一般	0.1
	次要	0.2
	重要	0.3
二级	一般	0.4
	次要	0.5
一级	次要	0.8
	重要	1

根据 IEC 61850-5^[25]中配电网通信标准，节点端到端最大延迟 $e_{CN,i,max}$ 设置为 10 ms。通信链路 with 节点带宽、延迟限制设定如图 7 所示。

该案例使用了上述 4 种算法对其进行计算，提取恢复方案中保测装置的通信状态计入表 4，并在

图 8 展示 HCLRIA 算法的通信恢复结构。

4 种算法的配电网恢复的目标函数计算结果与配电网结构分别如表 5 与图 9 所示。将 OLRA 和 SCLRA 算法结果进行比较，发现 SCLRA 算法负荷恢复结果明显提升，说明通信恢复可以有效提升负

表4 IEEE 33节点4种算法的最终通信网络状态

Table 4 Final communication node state in the four algorithms for the IEEE 33-node case

算法	正常通信节点	通信中断节点
OLRA	1-6, 25-33	7-24
SCLRA	1, 3-4, 6-12, 15, 21, 26-33	2, 5, 13-14, 16-20, 23-25
ICLRA	3-5, 8-10, 12-15, 21-25, 28-30	1-2, 6-7, 11, 16-20, 26-27, 31-33
HICLRA	3, 9-10, 12-13, 15, 22-25, 28-30	1-2, 4-8, 11, 14, 16-21, 26-27, 31-33

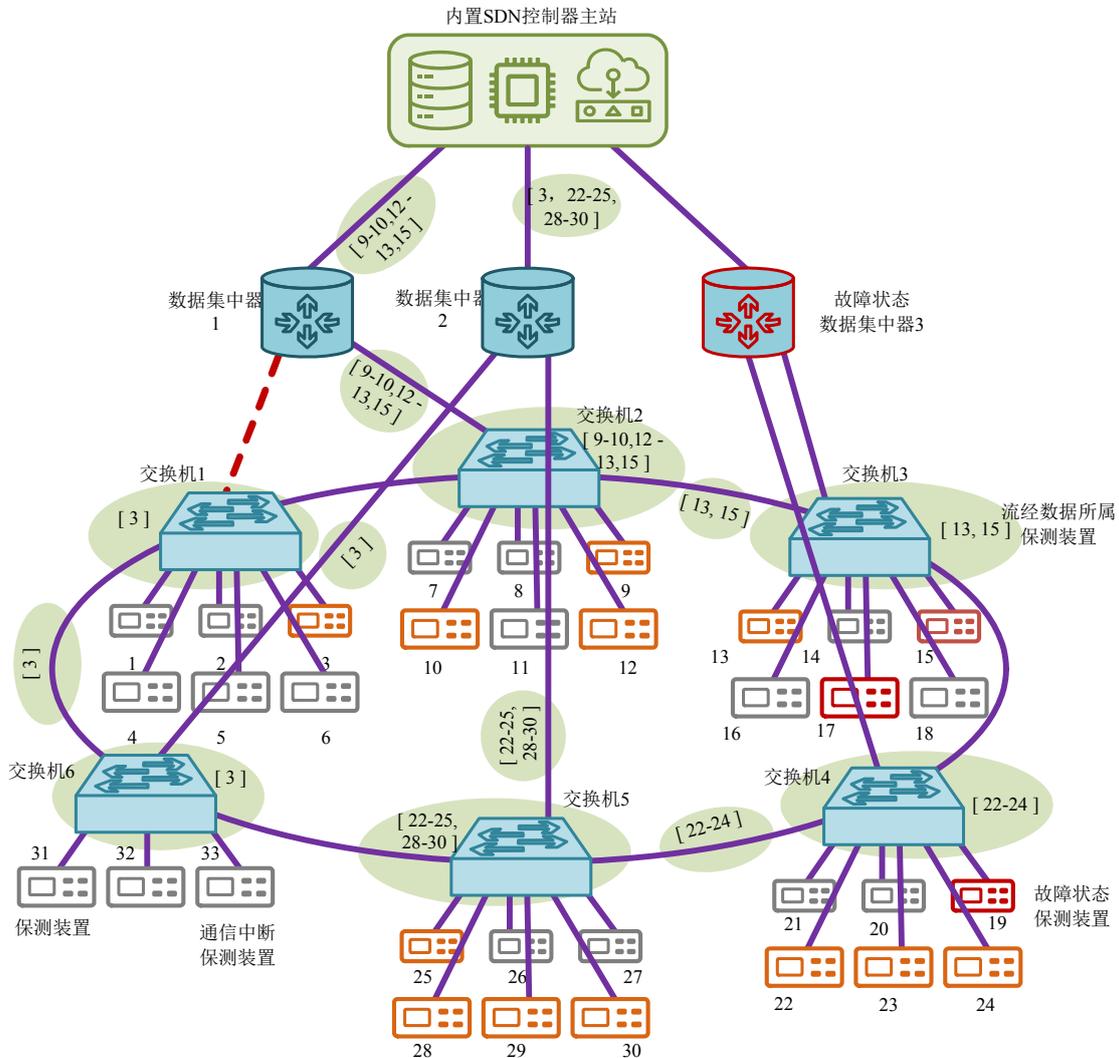


图8 IEEE 33节点通信网络启发式算法恢复结果

Fig. 8 IEEE 33-node case communication network heuristic recovery results

表5 IEEE 33节点算例算法负荷恢复结果和计算耗时

Table 5 Load recovery results and computation time of the four algorithms for the IEEE 33-node case

算法	负荷恢复目标函数值	计算耗时/s
OLRA	552	1.324
SCLRA	644	18.246
CLRIA	996	21.904
HCLRIA	990	0.079

荷恢复效果。但因 SCLRA 算法在通信恢复时未考虑通信节点对负荷的恢复价值，故其恢复效果不如 CLRIA 与 HCLRIA 算法。CLRIA 算法作为全局最优算法，能得出最优协同恢复方案，但其算法涉及

变量多，计算耗时长。而 HCLRIA 算法能以极快速度计算出近似最优恢复方案，从而能在灾害发生后快速提供应对决策。总而言之，信息物理协同恢复的启发式算法综合性能最佳。

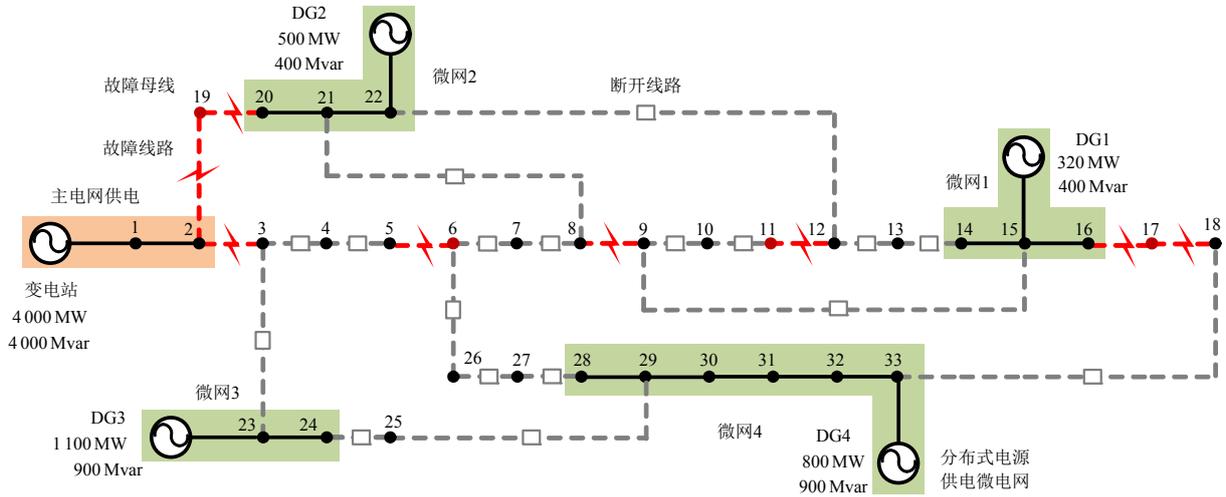
4.2 IEEE 123 节点案例验证

如图 10 和 11 所示，该 IEEE 123 节点案例中设定部分节点、线路、通信链路与保测装置因极端事件而损坏，导致大量运动开关失去控制。该案例中母线负荷权重系数如表 6 所示。

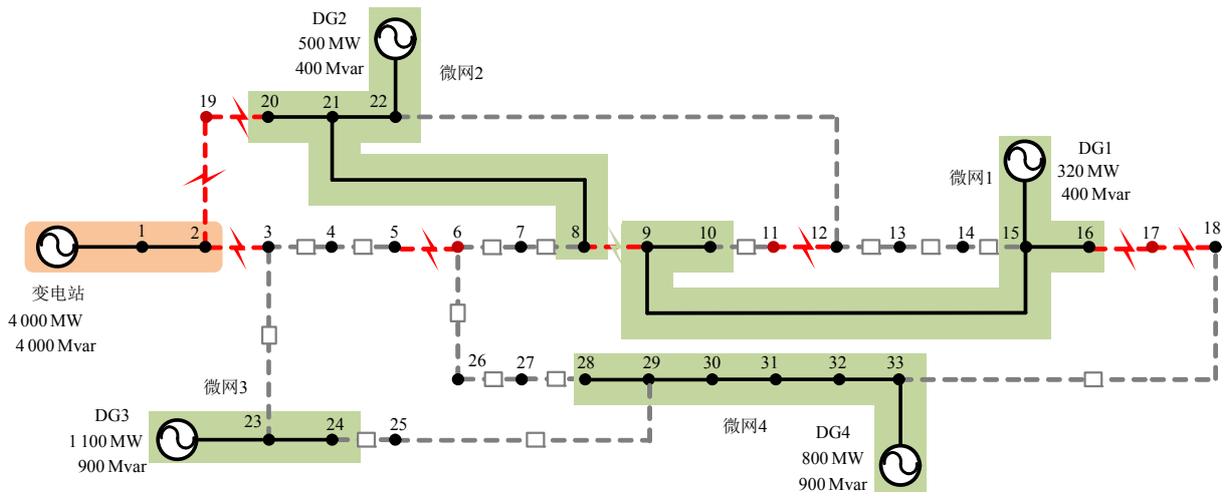
同样使用上述 4 种算法来分别计算目标函数以

验证启发式算法的有效性。4 种算法的通信节点恢复结果如表 7 所示。

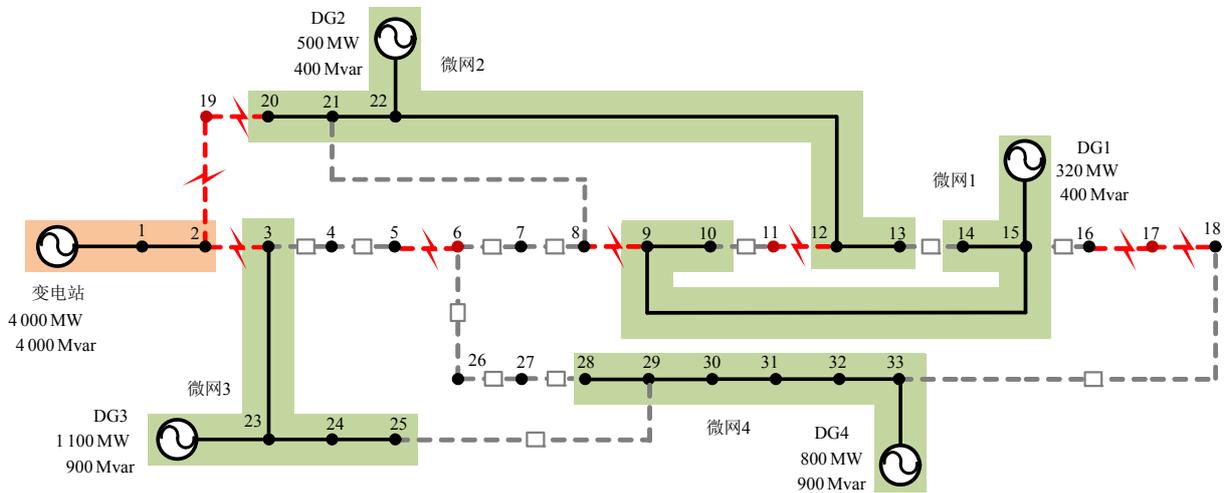
如图 12 与表 8 所示，与其他算法相比，使用求解器求解的 CLRIA 算法负荷恢复结果最佳，但计算耗时长。启发式算法 HCLRIA 在极短时间内得出近似最优的恢复方案，能够帮助配电网在受灾后



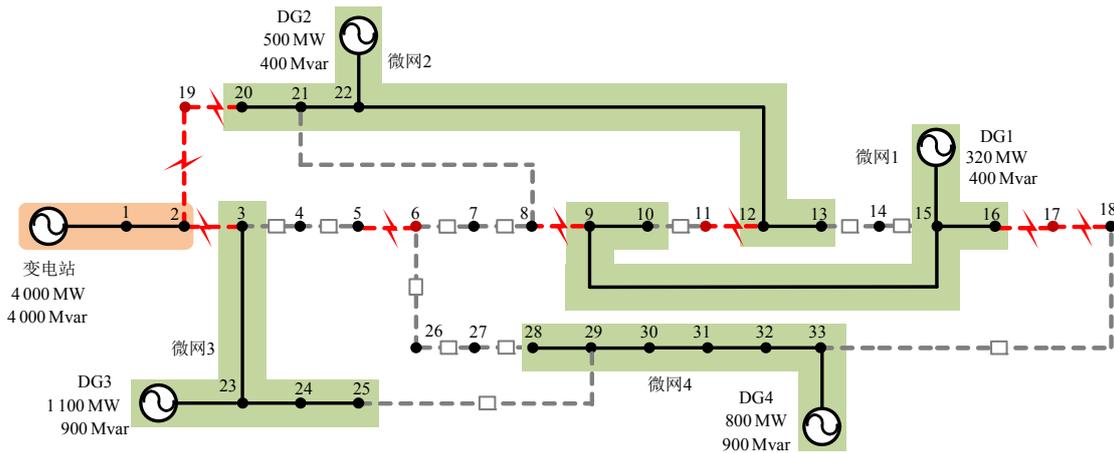
(a) OLRA 算法的负荷恢复结果



(b) SCLRA 算法的负荷恢复结果



(c) CLRIA 算法的负荷恢复结果



(d) HCLRIA 算法的负荷恢复结果

图9 IEEE 33节点算例的4种算法的负荷恢复结构图

Fig. 9 Load recovery structure diagram of the four algorithms for the IEEE 33-node case

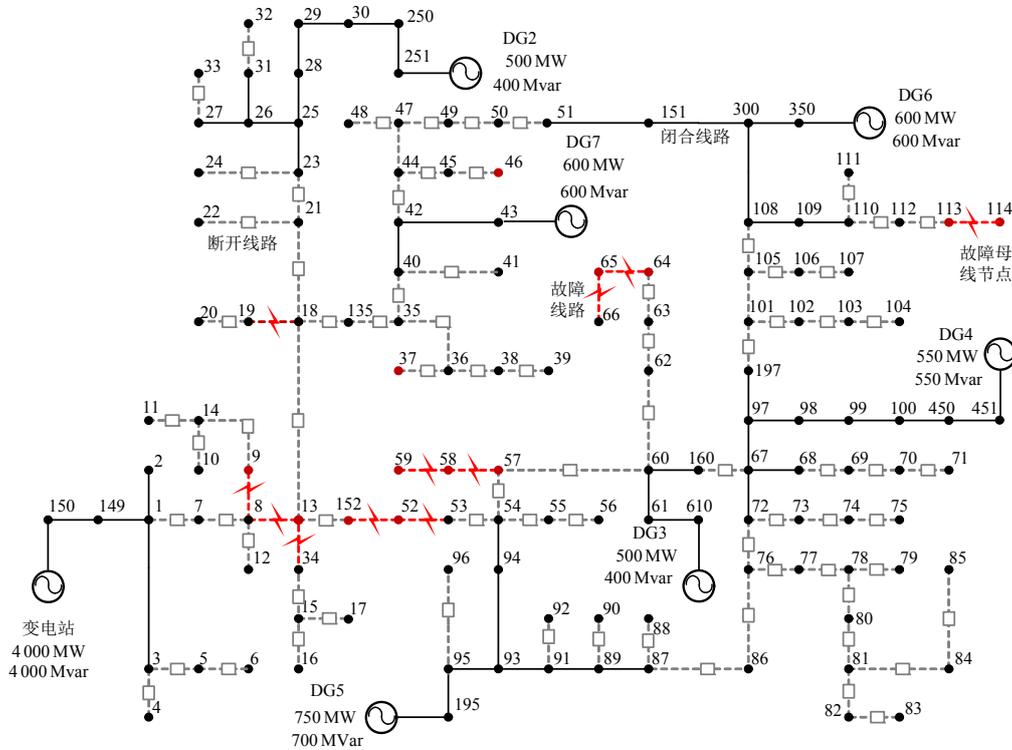


图10 IEEE 123节点灾后恢复算例

Fig. 10 IEEE 123-node post-disaster recovery example

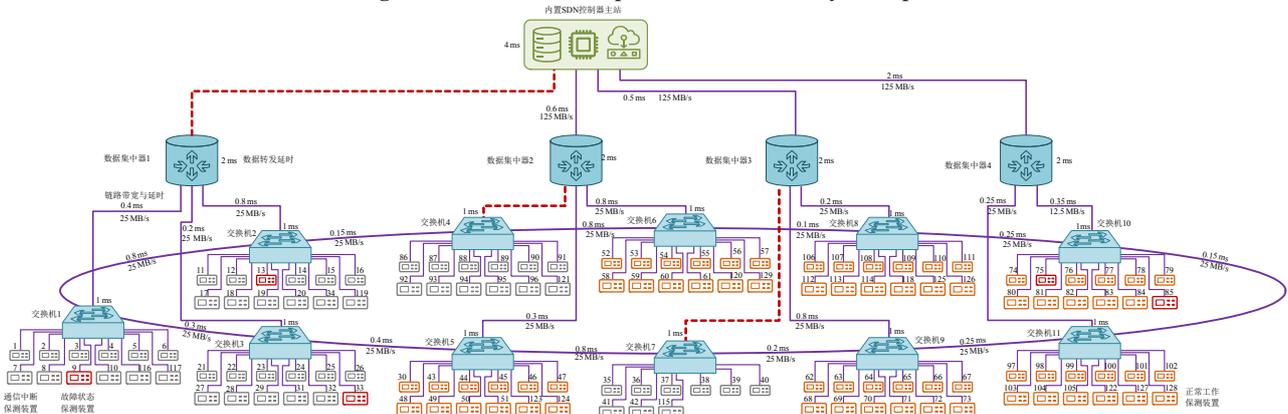


图11 IEEE 123节点通信网络结构与故障情况

Fig. 11 IEEE 123-node communication network structure and disaster situation

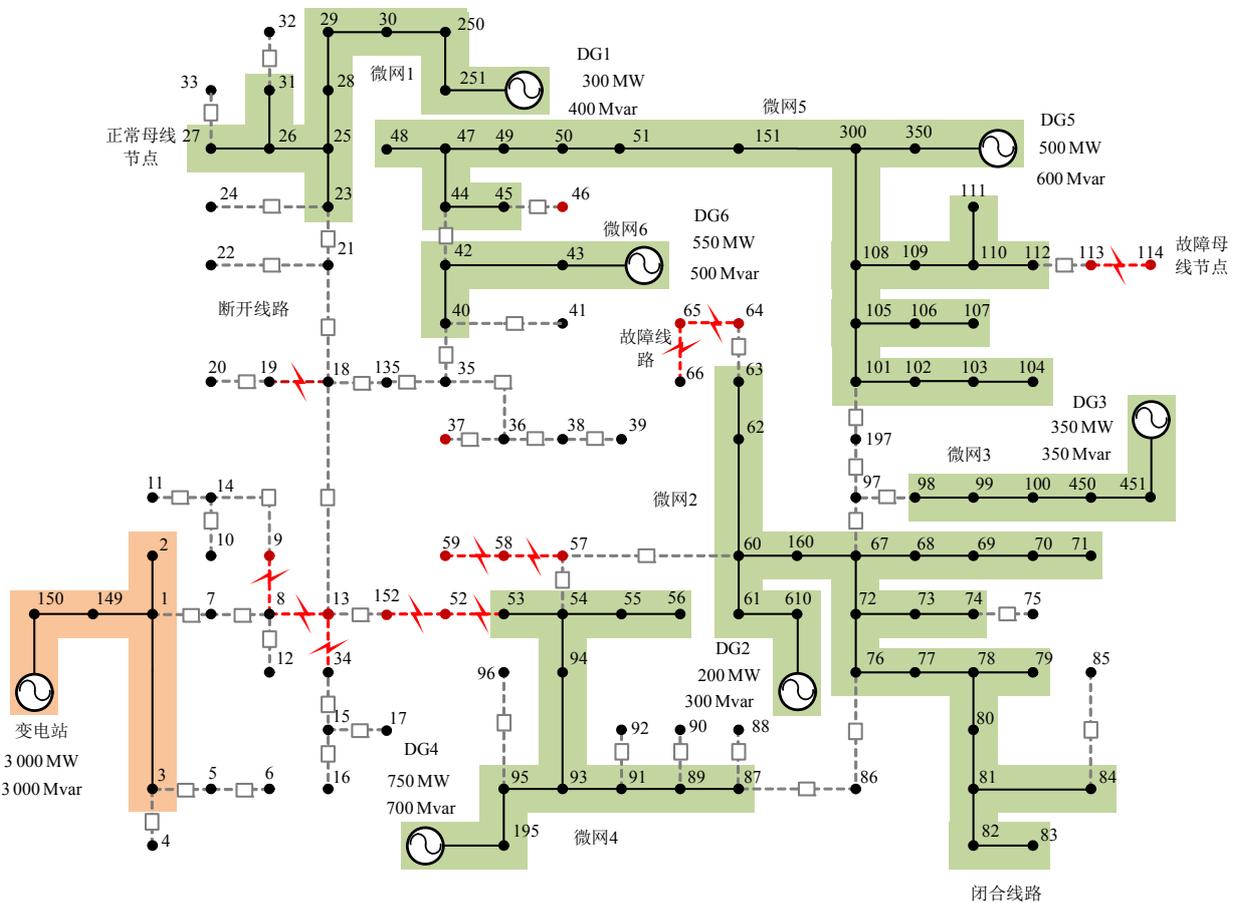
表 6 IEEE 123 节点负荷权重系数
Table 6 IEEE 123-node load weight coefficients

负荷类别	权重系数	母线编号
三级	一般	0.1 1, 4, 6, 7, 10-12, 19, 24, 30-32, 34, 37-40, 42, 45, 47, 50, 51, 58, 59, 65, 68, 69, 71, 73, 76, 77, 82, 83, 86, 87, 90, 92, 96, 98-100, 106, 107, 109, 111-114
	次要	0.2 2, 5, 9, 29, 33, 46, 48, 60, 70, 74, 75, 80, 84, 85, 94
	重要	0.3 102-104
二级	一般	0.4 56, 62-64, 66
	次要	0.5 49, 55, 79
一级	重要	0.6 28, 35, 53
	一般	0.7 17, 22, 52, 95;
	次要	0.8 16, 41, 43;
	重要	1 20, 88.

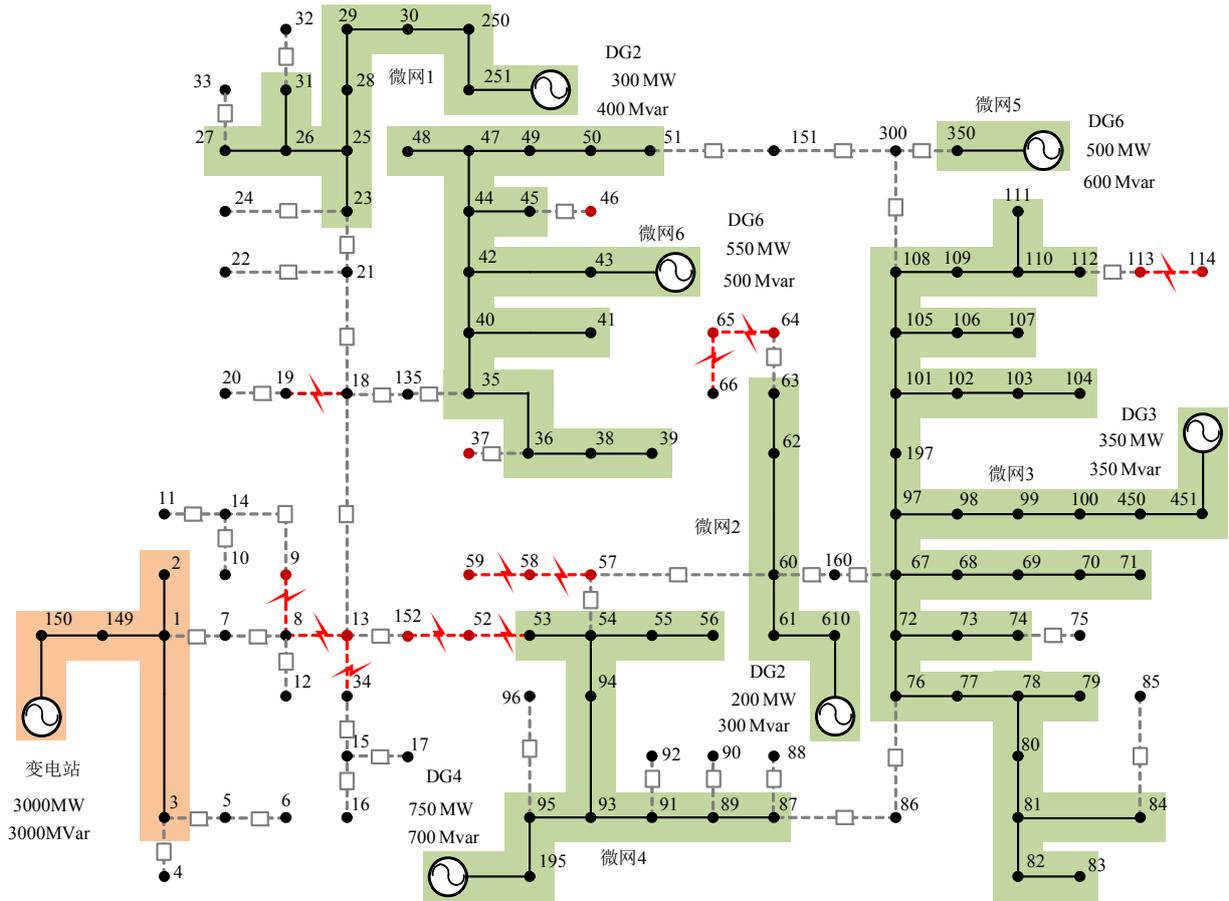
表 7 IEEE 123 节点 4 种算法的最终通信网络状态

Table 7 Final communication network state in the four algorithms for the IEEE 123-node case

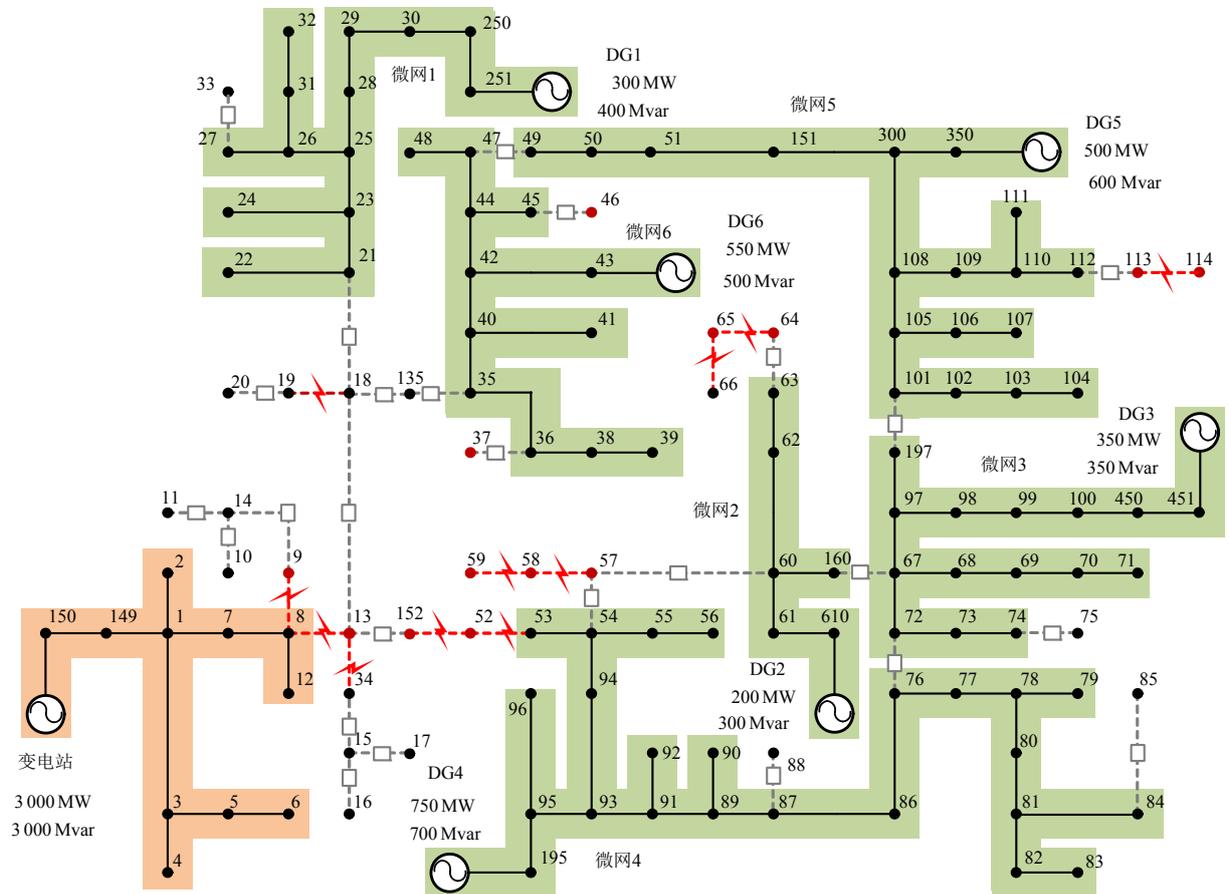
算法分类	正常通信节点	通信中断节点
OLRA	30, 43-74, 76-84, 97-114, 151, 160, 197, 250, 251, 300, 350, 450, 451, 610	1-29, 31-42, 75, 85-96, 135, 149, 150, 152, 195.
SCLRA	21-22, 24, 28, 26-30, 32, 35-74, 76-84, 87, 89, 97-114, 135, 151, 160, 195, 197, 250, 251, 300, 350, 450, 451, 610	1-20, 23, 25, 31, 13-20, 25-27, 29, 33-34, 75, 85-86, 88, 90-96, 149, 150, 152
CLRIA	1, 3-8, 12, 21-24, 31-32, 35-36, 38-42, 44-51, 53-56, 60, 62-74, 76-84, 86-90, 95-114, 135, 151, 160, 197, 300, 350, 450, 451, 610	2, 9-11, 13-20, 25-30, 29, 33-34, 37, 43, 52, 57-59, 61, 75, 85, 91-94, 149, 150, 152, 195, 250, 251
HCLRIA	1, 3-8, 12, 18-19, 21-24, 27, 33, 40-42, 44, 47-51, 53-56, 60, 62-63, 68-71, 76-84, 86-88, 91-92, 95-96, 101-108, 110-112, 135, 197	2, 9-11, 13-17, 20, 25-26, 28-32, 34-39, 43, 45-46, 52, 57-59, 64-67, 72-75, 85, 89-90, 93-94, 97-100, 109, 113-114, 151, 149, 150, 152, 160, 195, 250, 251, 300, 350, 450, 451, 610



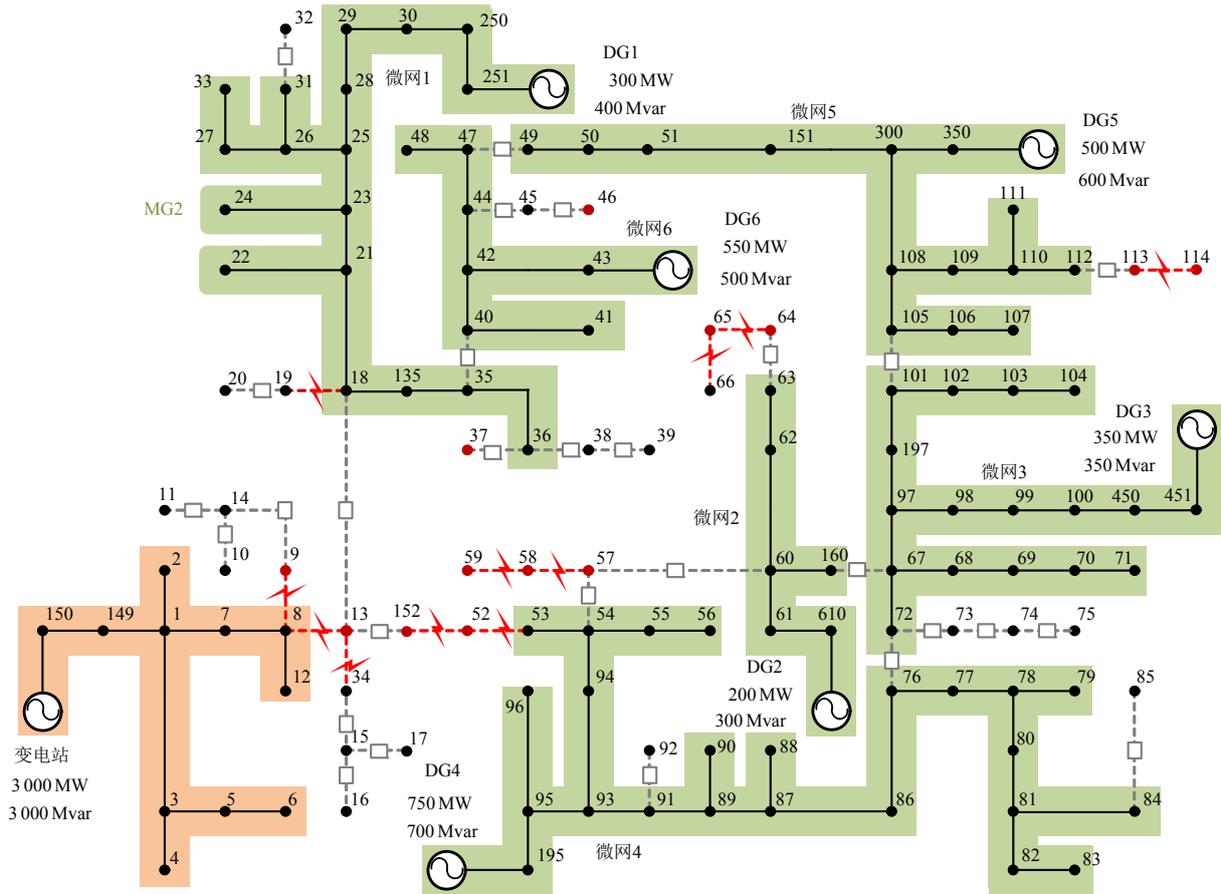
(a) OLRA 算法的负荷恢复结果



(b) SCLRA算法的负荷恢复结果



(c) CLRIA算法的负荷恢复结果



(d) HCLRIA 算法的负荷恢复结果

图 12 IEEE 123 节点算例的 4 种算法的负荷恢复结构图

Fig. 12 Load recovery structure diagram of the four algorithms for the IEEE 123-node case

表 8 IEEE 123 节点算例算法负荷恢复结果和计算耗时
Table 8 Load recovery results and computation time of the four algorithms for the IEEE 123-node case

算法	负荷恢复目标函数数值	计算耗时/s
OLRA	349	2.28
SCLRA	373	675
CLRIA	427	820.51
HCLRIA	419	2.36

快速做出响应，再次验证了该算法的有效性。并通过 IEEE 33 节点系统和 IEEE 123 节点系统算例结果的比较，验证了 HCLRIA 算法的可扩展性。

5 结论

本文基于 SDN 技术和环形通信网络提出信息物理协同的配电网灾后恢复算法，通过综合考虑信息与物理的约束情况，给出配电网极端事件下的有效应对策略。考虑了电力网络的恢复需求与通信网络资源的限制条件以充分发挥分布式电源对配电网的负荷恢复效果。将线路状态、通信设备状态和通信资源限制相关联，建立了通信与配电网控制的耦合约束，实现了信息-物理恢复的协同规划。通过

使用启发式的恢复性算法，提升了配电网恢复方案的求解速度。在后续工作中，将结合时序控制与人工维修等相关恢复性工作对配电网负荷恢复措施进行进一步研究。

参考文献

[1] 张艺伟, 刘文霞, 刘耕铭, 等. 考虑拓扑相关和双重耦合的电力信息物理系统建模与脆弱性分析[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(16): 5486-5499.
ZHANG Yiwei, LIU Wenxia, LIU Gengming, et al. Modeling and vulnerability analysis of electric cyber physical system considering topological correlation and double coupling[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(16): 5486-5499(in Chinese).

[2] GAO Xingle, PENG Minfang, TSE C K. Cascading failure analysis of cyber - physical power systems considering routing strategy[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2023, 70(1): 136-140.

[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): 2735-2744.

- BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2744(in Chinese).
- [4] SEDZRO K S A, SHI Xin, LAMADRID A J, et al. A heuristic approach to the post-disturbance and stochastic pre-disturbance microgrid formation problem[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2019, 10(5): 5574-5586.
- [5] HUANG Yuxiong, LI Gengfeng, CHEN Chen, et al. Resilient distribution networks by microgrid formation using deep reinforcement learning[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2022, 13(6): 4918-4930.
- [6] CHEN Chen, WANG Jianhui, QIU Feng, et al. Resilient distribution system by microgrids formation after natural disasters[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(2): 958-966.
- [7] LEI Shunbo, CHEN Chen, SONG Yue, et al. Radiality constraints for resilient reconfiguration of distribution systems: formulation and application to microgrid formation[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 3944-3956.
- [8] DING Tao, LIN Yanling, LI Gengfeng, et al. A new model for resilient distribution systems by microgrids formation [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(5): 4145-4147.
- [9] ARIF A, WANG Zhaoyu, WANG Jianhui, et al. Power distribution system outage management with co-optimization of repairs, reconfiguration, and DG dispatch [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(5): 4109-4118.
- [10] 罗汉辉. 防御“天兔”台风通信故障处理[J]. 中国新通信, 2014, 16(9): 93-94.
LUO Hanhui. Defending against typhoon "USAGI" communication fault handling[J]. China New Telecommunications, 2014, 16(9): 93-94(in Chinese).
- [11] CHU Zheng, LE T A, NGUYEN H X, et al. A Stackelberg-game approach for disaster-recovery communications utilizing cooperative D2D[J]. IEEE Access, 2018, 6: 10733-10742.
- [12] LIU Xiaobao, WU Qinfang, SUN Jinhua, et al. Research on self-healing technology for faults of intelligent distribution network communication system[C]//2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC). Chengdu: IEEE, 2019: 1404-1408.
- [13] 祁兵, 叶欣, 李彬, 等. 区分电力业务保护质量的链路故障差异化保护策略[J]. 电力系统自动化, 2020, 44(11): 181-188.
- QI Bing, YE Xin, LI Bin, et al. Differential protection strategy of link fault for distinguishing protection quality of power business[J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(11): 181-188(in Chinese).
- [14] REHMANI M H, DAVY A, JENNINGS B, et al. Software defined networks-based smart grid communication: a comprehensive survey[J]. IEEE Communications Surveys & Tutorials, 2019, 21(3): 2637-2670.
- [15] KREUTZ D, RAMOS F M V, VERÍSSIMO P E, et al. Software-defined networking: a comprehensive survey[J]. Proceedings of the IEEE, 2015, 103(1): 14-76.
- [16] CHAUDHARY R, AUJLA G S, GARG S, et al. SDN-enabled multi-attribute-based secure communication for smart grid in IIoT environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(6): 2629-2640.
- [17] LIN Hui, CHEN Chen, WANG Jianhu, et al. Self-healing attack-resilient PMU network for power system operation [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(3): 1551-1565.
- [18] DONG Xinshu, LIN Hui, TAN Rui, et al. Software-defined networking for smart grid resilience: opportunities and challenges[C]//Proceedings of the 1st ACM Workshop on Cyber-Physical System Security. Singapore: Association for Computing Machinery, 2015: 61-68.
- [19] LI Zhiyi, SHAHIDEHPOUR M, AMINIFAR F, et al. Networked microgrids for enhancing the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE, 2017, 105(7): 1289-1310.
- [20] SUN Xiaohan, ZHENG Yu, MAO Zijian, et al. Software defined optical network based on multi-level WDM ring topology for intra data center switching[C]//2015 14th International Conference on Optical Communications and Networks(ICOCN). Nanjing: IEEE, 2015: 1-3.
- [21] LI Xingfeng, GAN Chaoqin, CHEN Yujie, et al. Dual-fiber-ring architecture supporting discretionary peer-to-peer intra-communication and bidirectional inter-communication in metro-access network[J]. IEEE Access, 2019, 7: 52360-52370.
- [22] RUBIN I, LING Jing. Failure protection methods for optical meshed-ring communications networks[J]. IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 2000, 18(10): 1950-1960.
- [23] 韩宇奇, 何宜倩, 楼凤丹, 等. 基于SDN的动态优化路由策略在信息物理融合电力系统连锁故障中的研究与应用[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2620-2629.
HAN Yuqi, HE Yiqian, LOU Fengdan, et al. Analysis and

- application of SDN based dynamic optimal route strategy for cyber layer in cascading failures of cyber-physical power system[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(8): 2620-2629(in Chinese).
- [24] MATHEBULA V C, SAHA A K. Reliability of IEC 61850 based substation communication network architecture considering quality of repairs and common cause failures [J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2022, 7(1): 13.
- [25] IEEE. 61850-9-3-2016 IEC/IEEE International Standard - Communication networks and systems for power utility automation -Part 9-3: Precision time protocol profile for power utility automation[S]. New York: IEEE, 2016: 1-18.
- [26] JIANG Yazhou. Data-driven fault location of electric power distribution systems with distributed generation [J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(1): 129-137.
- [27] SAMUDRALA A N, AMINI M H, KAR S, et al. Distributed outage detection in power distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2020, 11(6): 5124-5137.
- [28] LIM G J, KIM S, CHO J, et al. Multi-UAV pre-positioning and routing for power network damage assessment[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2018, 9(4): 3643-3651.
- [29] DUTTA R, CHAKRABARTI S, SHARMA A. Topology tracking for active distribution networks[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2021, 36(4): 2855-2865.
- [30] 中华人民共和国住房和城乡建设部. GB 50052—2009 供配电系统设计规范[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009. Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. GB 50052—2009 Code for design electric power supply Systems[S]. Beijing: China Planning Press, 2009(in Chinese).
- [31] IEEE PES Power System Analysis, Computing, and Economics Committee: IEEE 123 Node Test Feeder [EB/OL]. (1992)[2014-2-3].<https://cmte.ieee.org/pes-testfeeders/wp-content/uploads/sites/167/2017/08/feeder123.zip>.



钟剑

在线出版日期: 2023-06-16。

收稿日期: 2022-11-15。

作者简介:

钟剑(1991), 男, 博士研究生, 主要研究方向为信息物理耦合, 弹性电力系统, zhongjian0829@stu.xjtu.edu.cn;

*通信作者: 陈晨(1983), 男, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为弹性电力系统、电力系统运行优化, morningchen@xjtu.edu.cn;

别朝红(1970), 女, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统规划与可靠性评估、电力系统恢复力、能源互联网优化运行, zhbic@mail.xjtu.edu.cn。

(责任编辑 李泽荣)

A SDN Based Cyber-physical Integrated Restoration Scheme for Distribution Systems

ZHONG Jian, CHEN Chen*, BIE Zhaohong

(State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University))

KEY WORDS: cyber physical power system; distribution system restoration; software defined networking; cyber physical integration; microgrid formation

The distribution system (DS) communication networks are vulnerable to disasters, and in most cases they are spatially bounded with power DS, resulting in simultaneous damage. The existing DS post-disaster load restoration research work often fails to consider or idealize a DS's communication infrastructure as intact, which differs from the actual scenario.

Based on the ring network structure and software defined networking (SDN) technology, this paper proposes a recovery scheme for communication networks of DSs as well as load recovery optimization. The integrated restoration scheme could take advantage of limited communication resources to recover the communication network on the purpose of better load recovery. A branch may have an initial state of openness or closure so that the communication recovery demand differs in the DS restoration control process. Fig. 1 illustrates the above situation.

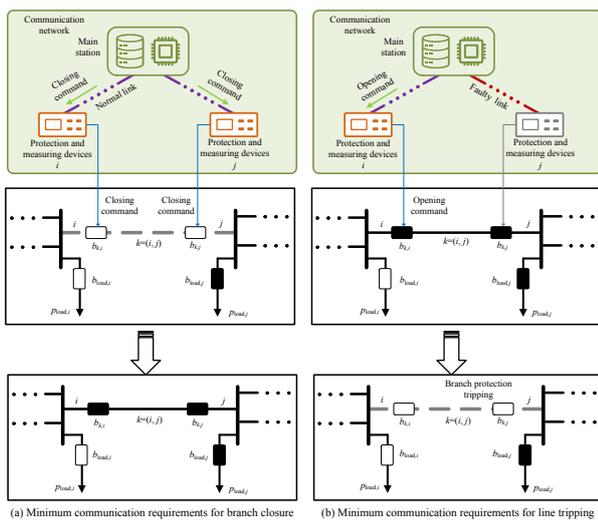


Fig. 1 Integrated relationship between branch control and communication state in load recovery

According to the cyber-physical integrated constraint, the post-disaster DS restoration problem can be formulated as a mixed-integer linear programming (MILP) model which can be solved by the off-the-shelf mathematic solvers. When solving the above model by using a mathematical solver, the communication

recovery process is computationally intensive and time-consuming. Then it is hard to quickly provide a recovery plan for DS after a disaster. In addition, deploying a mathematical solver into the network controller does not have an economical advantage. Therefore, to ensure the real-time and economic efficiency of the recovery scheme, this paper proposes a heuristic algorithm based on the above MILP model to solve it (in Fig. 2).

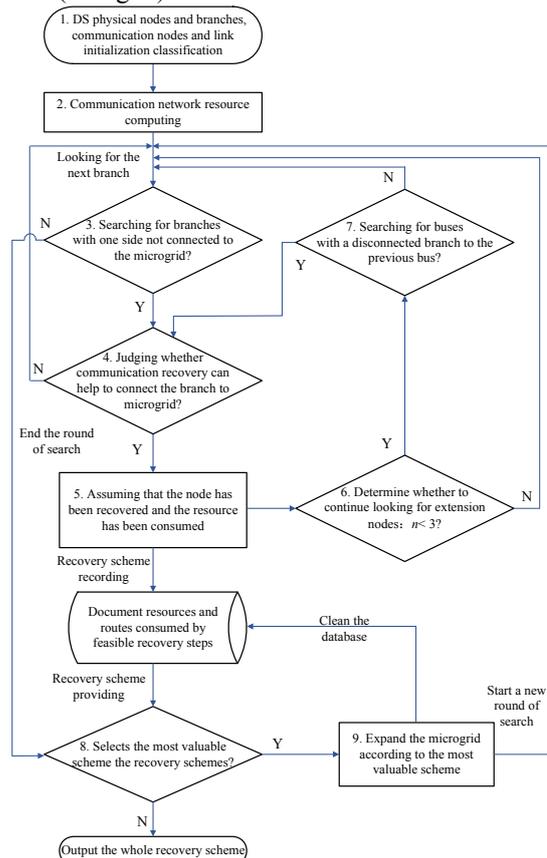


Fig. 2 Flowchart of heuristic microgrid formation algorithm in distribution system load recovery process

IEEE 33-node and IEEE123-node test systems are used to verify the effectiveness and benefits of the proposed method. The calculation results indicate that the applying cyber-physical integrated restoration algorithm improves the DS resilience in cyber-physical integrated events.