



现代电力  
MODERN ELECTRIC POWER

- 中国高校优秀科技期刊
- 中国科技核心期刊
- 万方数据收录期刊
- 全国中文核心期刊
- 中国知网收录期刊
- 《CAJ-CD规范》执行优秀期刊

## 极端天气下的区域能源互联网故障抢修恢复策略

李振坤 陈鹤 李新聪 袁明翰 杨学信

### Emergency Maintenance and Recovery Strategy for Failures in Regional Internet of Energy in Extreme Weather

LI Zhenkun, CHEN He, LI Xincong, YUAN Minghan, YANG Xuexin

引用本文:

李振坤, 陈鹤, 李新聪, 等. 极端天气下的区域能源互联网故障抢修恢复策略[J]. 现代电力, 2024, 41(6): 1109–1118. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0376

LI Zhenkun, CHEN He, LI Xincong, et al. Emergency Maintenance and Recovery Strategy for Failures in Regional Internet of Energy in Extreme Weather[J]. Modern Electric Power, 2024, 41(6): 1109–1118. DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0376

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0376>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 考虑不确定性的区域能源互联网源荷储协调优化

Generation-load-storage Coordinated Optimization for Regional Energy Internet Considering Uncertainties

现代电力. 2019, 36(3): 11–18 <http://xddl.ncepujournal.com/article/Y2019/I3/11>

#### 基于机会约束的区域能源互联网优化运行

Chance-Constrained-Based Optimal Operation for Regional Energy Internet

现代电力. 2022, 39(4): 388–396 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0142>

#### 基于决策试验法与评估实验室网络分析法的能源互联网商业模式适用性评价

Applicability Evaluation of Energy Internet Business Model Based on Decision Making Trial and Evaluation Laboratory-Analytic Network Process

现代电力. 2022, 39(3): 327–337 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0278>

#### 考虑交通网延误的配电网灾后滚动抢修策略优化

Optimization of Post-disaster Rolling Emergency Repair Strategy for Distribution Network Considering Transportation Network Delay

现代电力. 2023, 40(5): 807–816 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0030>

#### 含高比例新能源电力系统极端天气条件下供电安全性的提升

Power Supply Security Improvement of Power Grid With High Proportion of Renewable Energy Under Extreme Weather Events

现代电力. 2023, 40(3): 303–313 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0321>

#### 考虑多尺度需求响应的跨区域综合能源系统运行策略

Operation Strategy of Cross Regional Integrated Energy System Considering Multi-scale Demand Response

现代电力. 2022, 39(6): 730–738 <https://doi.org/10.19725/j.cnki.1007-2322.2021.0223>

# 极端天气下的区域能源互联网故障抢修恢复策略

李振坤<sup>1</sup>, 陈鹤<sup>1</sup>, 李新聪<sup>2</sup>, 袁明翰<sup>3</sup>, 杨学信<sup>1</sup>

(1. 上海电力大学 电气工程学院, 上海市 杨浦区 200090; 2. 国网上海市电力公司经济技术研究院, 上海市 徐汇区 200233;  
3. 国网上海市电力公司, 上海市 杨浦区 200090)

## Emergency Maintenance and Recovery Strategy for Failures in Regional Internet of Energy in Extreme Weather

LI Zhenkun<sup>1</sup>, CHEN He<sup>1</sup>, LI Xincong<sup>2</sup>, YUAN Minghan<sup>3</sup>, YANG Xuexin<sup>1</sup>

(1. College of Electrical Engineering, Shanghai University of Electric Power, Yangpu District, Shanghai 200090, China;  
2. Economic and Technological Research Institute of State Grid Shanghai Electric Power Company, Xuhui District, Shanghai 200233, China; 3. State Grid of Shanghai Electric Power Company, Yangpu District, Shanghai 200090, China)

**摘要:** 针对区域能源互联网 (internet of energy, IOE) 面临的安全性等问题, 提出了一种基于多能互补特性的最佳供电恢复及抢修顺序技术方案。首先给出了区域能源互联网中热、气、电的多能形式数学模型和基于微型燃气轮机的热电联产耦合模型, 在此基础上给出了区域能源互联系统恢复能力指标, 并对极端天气下 IOE 内元件故障的影响及故障恢复过程进行了讨论和分析; 在此基础上, 将各区域根据失电严重程度与紧急程度进行故障场景划分, 以全局总经济损失最小为目标, 给出了区域能源互联网恢复优化目标函数和约束条件, 说明并利用离散粒子群算法 (discrete particle swarm optimization algorithm, DPSO) 寻取全局最优解, 得到最佳供电恢复方案及抢修顺序; 最后, 利用改进的 IOE 系统算例进行仿真验算, 验证了所提策略的可行性和有效性。

**关键词:** 能源互联网; 故障恢复; 多能联供; 抢修策略; 多场景划分

**Abstract:** In view of the security problems in the Internet of energy (IOE), we propose an optimal power supply restoration and emergency maintenance sequence scheme based on the characteristics of multi energy complementarity. A thermal-gas-electric poly-energy form mathematical model of IOE was presented in this paper. In addition, a thermoelectric coupling model based on micro gas turbine was also introduced. On this

basis, the resilience index of the regional IOE was given, and the impact of component failures under extreme weather and the process of failure recovery were discussed and analyzed. Each region was divided into different fault scenarios according to the severity and urgency of power loss. With the aim of minimizing the global total economic loss, the optimal objective function and constraints for regional IOE recovery were given. The discrete particle swarm optimization algorithm (DPSO) was employed to find the global optimal solution, and then the optimal power supply recovery scheme and maintenance order were obtained. Finally, an improved IOE system was utilized to verify the feasibility and effectiveness of the proposed strategy.

**Keywords:** internet of energy; failure recovery; multi-source integrated energy system; emergency maintenance strategy; multi scenarios division

DOI: 10.19725/j.cnki.1007-2322.2022.0376

## 0 引言

随着零碳演进研究的持续推进, 在多类型能源耦合的能源互联网背景下, 传统配电网正转变为以配电网为核心, 以冷-热-气多种能源互补供应的综合能源系统。传统利用分布式电源 (distributed generator, DG) 进行的配电网的供电恢复策略存在无法发挥区域能源互联网最大恢复能力的问题, 且 DG 出力不确定性限制了其安全运行的能力。因此, 提升配电网的供电恢复能力, 需要同时依靠配电网的电源侧以及负荷侧各类灵活性资源, 通过能源互联网多能互补的特性,

**基金项目:** 国家自然科学基金项目 (52177098); 国家电网有限公司科技项目 (SGSHJY00GPJS2100193)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(52177098); Project Supported by Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(SGSHJY00GPJS2100193).

充分挖掘 IOE 内潜在的供电恢复能力。由于 IOE 具有多能互补的特性, 因此为配电网的故障恢复方案提供了更为可靠与合理的策略。相比较于出力随机性较强的光伏、风机等传统的 DG, IOE 中多能耦合元件如燃气轮机、热电联产机组等元件, 由于其出力较为稳定且可控性较高, 在极端天气下对于配电网的支撑作用较强。因此, 本文以 IOE 内区域配电网为研究对象, 对 IOE 在极端天气下发生多故障的抢修恢复问题进行研究。

主动配电网的故障恢复方法与区域能源互联网的自愈控制方式类似, 对于 IOE 的故障抢修恢复方案有很大参考意义<sup>[1-3]</sup>。目前, 关于极端天气下的故障抢修与恢复主要针对主动配电网, 利用配电网内各类分布式能源在故障后形成孤岛运行恢复失电负荷。文献[4]针对高渗透率 DG 的情况下, 提出了以电力网络运行安全为约束条件的故障恢复模型。文献[5]基于路径描述法对配电网网络拓扑结构进行建模, 并采用深度优先算法遍历所有可能的供电路径, 确保重要负荷的优先恢复。文献[6]考虑了分布式出力调节与电容器组无功补偿约束, 提出了考虑主动管理的配电网故障恢复方法。文献[7]针对故障恢复计算量大与恢复时间长等问题, 提出了基于改进 PSO 算法的配电网故障恢复方法, 减少了恢复时间。但上述文献中只针对传统配电网, 在极端天气下的故障恢复中没有考虑通过多能联供的方法恢复供电, 在一定程度上增加了故障经济损失。

IOE 为目前传统配电网改进的主流趋势, 针对 IOE 的故障恢复方案, 文献[8]基于最小直径生成树法形成极端自然灾害后的区域, 以该区域内重要负荷削减量最小为目标函数, 实现对系统重要负荷的稳定供电。文献[9]基于分析恢复收益, 提出了考虑恢复收益与成本的电-气综合能源系统供电恢复方案, 但没有对热力网的供电能力进行分析计算。文献[10]建立了故障情况下功率缺额计算与分配模型, 提出了基于不同利益主体博弈下的最优恢复方法。文献[11]将极端天气进行分类, 提出了综合能源系统恢复能力与框架, 通过蒙特卡洛法模拟极端场景, 提高了系统恢复力。在上述文献中, 主要是对综合能源系统以单一的最小切负荷量为目标, 却忽略了在极端天气下多种突发状况的出现, 无法动态分析不同时段各区域的供电恢复能力, 对于故障后的抢修顺序

与方案也没有进一步考虑。研究如何对极端天气场景预测及停电预测进行故障前场景削减, 指导灾后的抢修恢复, 最大化减少极端天气所造成的停电损失, 是本论文所研究的重点。

在已有的文献基础上, 本文提出了 IOE 故障恢复能力指标以及整个故障期间内总经济损失最小的全局抢修恢复策略。首先, 将 IOE 多能设备及耦合设备进行建模分析, 将 IOE 故障恢复能力指标细分为最大供电能力指标、多能联合供电能力指标以及最大恢复能力指标, 并对极端天气下的故障影响及恢复过程进行分析; 然后, 根据上述所提指标, 将某时段的最大供电能力指标与失电区域功率缺额进行对比, 划分出 3 种失电场景, 分别设定 3 个不同目标函数, 并以整个故障期间内总经济损失最小为目标; 最后, 利用离散粒子群算法对各离散抢修节点进行排序, 求解出全局最优故障抢修恢复策略。

## 1 区域能源互联网模型确立

区域能源互联网是指在原有配电网的基础上, 利用各种 DG 以及天然气等可再生能源, 通过各类耦合元件, 对各类负荷用户进行供能。本文假设 IOE 中多能资源及基本架构如图 1 所示, 其中主要包括电力网、热力网、气网及各类耦合元件, 可以互为能源输入、转换、存储以及输出环节, 以配电网为基础, 形成多能耦合的区域能源互联网。

### 1.1 电-热-气 IOE 数学模型

区域综合能源系统在原有配电网的基础上, 引入了大量可再生能源, 配电网作为能源互联核心纽带, 多种形式电能及燃气、冷/热等能源加剧

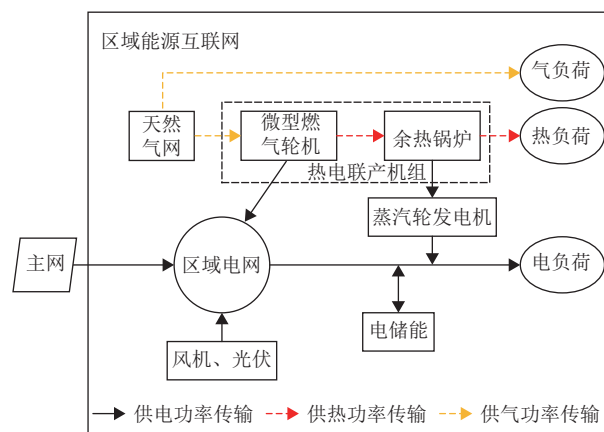


图 1 区域能源互联网示意图

Fig. 1 Schematic diagram of IOE



了区域综合能源系统不确定因素下的运行风险。为了对一般情况下区域综合能源系统进行风险评估,则需要分析区域综合能源系统中的多种能源流的随机性,首先对区域综合能源系统进行多能流建模。

### 1.1.1 电力网模型

IOE 中电力网参考潮流计算中节点注入功率方程:

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_i$  和  $Q_i$  分别表示节点  $i$  注入的有功和无功功率;  $V_i$  表示节点  $i$  的电压幅值;  $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  分别表示节点  $i$  和节点  $j$  之间的电导和电纳;  $\theta_{ij}$  表示节点  $i$  和节点  $j$  之间的电压相角差。

### 1.1.2 热力网数学模型

热力系统中包括管道水力模型以及热力模型 2 部分,各部分模型<sup>[12-14]</sup>如下。

#### 1) 水力模型

$$\begin{cases} A_s m = m_n \\ B_h h_f = 0 \\ h_f = K m |m| \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $A_s$  为热力网节点-支路关联矩阵;  $m$  为各管道流量矩阵;  $m_n$  为各节点负荷流量矩阵;  $B_h$  为供热管道的回路-支路关联矩阵;  $h_f$  为管道中流动的压头损失量;  $K$  为管道的阻力系数矩阵。

#### 2) 热力模型

$$\begin{cases} \varphi = C_p m_q (T_S - T_O) \\ T_{\text{end}} = (T_{\text{start}} - T_a) e^{-\frac{\lambda L}{C_p m} + T_a} \\ T_{\text{out}} \left( \sum m_{\text{out}} \right) = \sum m_{\text{in}} T_{\text{in}} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $\varphi$  为热网管道节点热功率;  $C_p$  为水的比热容;  $m_q$  为热网节点流出流量;  $T_S$ 、 $T_O$  分别为热水注入前和热水流出后负荷节点的温度;  $T_{\text{start}}$ 、 $T_{\text{end}}$  分别为管道首段和末端温度;  $T_a$  为环境温度;  $\lambda$ 、 $L$ 、 $m$  分别为热网管道传热系数、管道长度以及管道流量;  $m_{\text{out}}$ 、 $m_{\text{in}}$  分别为热网管道流出节点与流入节点流量;  $T_{\text{out}}$ 、 $T_{\text{in}}$  分别为热网管道流出与流入节点的热热水温度。

### 1.1.3 天然气网模型

天然气系统模型与热力网水力模型相似,主要满足管道内节点注入流量与流出流量的平衡,

具体表达式如下表征:

$$\begin{cases} A_{g,u} z_g = z_u \\ B_g \Delta g = 0 \\ \Delta g = K_g z_g |z_g^{k-1}| \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $A_{g,u}$  为天然气网节点-支路关联矩阵;  $z_g$  为管道气体流量矩阵;  $z_u$  为节点  $u$  流出气体流量矩阵;  $B_g$  为供气管道的回路-支路关联矩阵;  $\Delta g$  为管道气压降向量;  $K_g$  为管道的阻力系数矩阵;  $k$  为天然气系统压力水平系数,本文取 2。

### 1.1.4 耦合设备模型

IOE 中的多能耦合环节包括 CHP 机组、电锅炉以及燃气锅炉,为对多能流中各设备环节进行简化,本文仅考虑微型燃气轮机 CHP 机组的耦合情况。其电功率  $P_{\text{CHP}}$ 、热功率  $\varepsilon_{\text{CHP}}$  以及耗气量  $F_{\text{in}}$  之间的关系为

$$\begin{cases} \varepsilon_{\text{CHP}} = \gamma_{\text{CHP}} P_{\text{CHP}} \\ F_{\text{in}} = \frac{P_{\text{CHP}}}{\eta_e} \end{cases} \quad (5)$$

式中:  $\gamma_{\text{CHP}}$  为热电转换效率系数;  $\eta_e$  与 CHP 机组发出电功率有关,本文假设其为常数。

## 1.2 IOE 故障恢复能力指标

由于 IOE 以配电网为基础,且一般情况下供电需求可靠性高于热、气负荷,因此本文在进行故障恢复时首先考虑恢复电负荷,在满足供电需求的前提下,再考虑其余负荷的供给。为了在配电网故障情况下尽快恢复失电负荷供电,利用风机、储能等分布式资源,以及各类耦合元件等灵活性资源,本文定义电力网最大供电能力指标、多能联合供电恢复能力指标以及最大恢复能力指标。其中,考虑到可再生能源出力的不确定性,对于每个出力不确定的 DG 配置储能装置,将 DG 与 ESS 组合为一个联合系统缓解其出力波动性。

定义 1: IOE 最大供电能力指标是指在满足支路功率约束与各类安全裕度条件下所能提供的最大负荷。在含有 DG 的配电网内,当 IOE 某处发生故障时,一个孤岛内的最大供电能力指标是指故障断面下供电资源最大供应能力指标。由于 DG 出力的波动性,孤岛内各时段的最大供电能力指标值并不相同,因此本文定义实时供电能力指标,即满足各类安全约束的条件下分布式资源所能提供的最大功率,并且假设 DG 与 ESS 联合系统在某一时段内保持不变,馈线转移能力指标不变。因此,电力网最大供电能力指标计算如下:

$$\max S_E(t) = \sum_{i=1}^{n_1} S_{DE}(t) + \sum_{i=1}^{n_2} S_F(t) \quad (6)$$

式中： $n_1$ 为某个供电区域内 DG 与 ESS 联合系统的设备数； $n_2$ 为馈线数量； $S_{DE}(t)$ 为  $t$  时刻 DG 与 ESS 联合系统的最大供应容量； $S_F(t)$ 为  $t$  时刻馈线最大转移容量。

定义 2：IOE 除了可以利用电力网内的各类设备提供电能，也可以利用热-气系统进行联合供电恢复，通过蒸汽轮发电机将热能转换为电能，以保证电力网供电能力指标的最大保障。因此，IOE 多能联合供电能力指标计算如下：

$$\max S_{OT}(t) = \sum_{i=1}^{n_3} S_H(t) + \sum_{i=1}^{n_4} S_G(t) \quad (7)$$

式中： $n_3$ 、 $n_4$ 为  $t$  时刻下可以进行多能供电的热、气负荷节点数； $S_H(t)$ 为  $t$  时刻热网中可提供电能的最大功率； $S_G(t)$ 为  $t$  时刻气网中可提供电能的最大功率。

定义 3：IOE 最大恢复能力指标是指非故障失电区域内通过分布式能源孤岛恢复以及利用多能资源进行联合供电恢复。因此，本文中 IOE 最大恢复能力指标分为电力网最大供电能力指标和多能联合供电恢复能力指标两部分。最大恢复能力指标计算如下：

$$\max S_A(t) = S_E(t) + S_{OT}(t) \quad (8)$$

式中： $S_A(t)$ 为  $t$  时刻 IOE 最大恢复能力指标； $S_E(t)$ 为  $t$  时刻最大供电能力指标； $S_{OT}(t)$ 为  $t$  时刻多能联合供电能力指标。

### 1.3 极端天气下的 IOE 故障概率及抢修过程分析

近年来，极端天气例如极端高温和沿海地区台风天气等事件频发，这对配电网的正常运行与用户正常用电带来了巨大的挑战。本文以沿海地区的台风极端天气为例，对台风经过时对配电网的影响进行分析。类似于台风的极端天气对于配电网的影响主要有两点：一是台风经过时会使得配电网线路发生故障的几率增加，且有较大可能性发生多重故障，这与台风的强度有关；二是台风经过会造成道路受损，使故障抢修时间延长。基于此，本文将对极端天气下的元件故障概率与抢修过程进行分析。

#### 1.3.1 极端天气下的故障概率分析

根据某地区的极端天气历史数据，并通过分析在某一强度极端天气和与其对应的元件受损情

况，通过 SPSS 软件拟合得到强度与元件受损关系曲线。本文假设通过关系曲线求出极端天气强度为  $s$  时对应的线路与电杆故障概率分别为  $O_l(s)$  和  $O_p(s)$ 。只有当线路与电杆均正常时表明该支路为正常运行，因此可以将极端天气下支路故障模型视为线路与电杆的串联模型，如式 (9) 所示。

$$O_h(s) = 1 - (1 - O_l(s))^{l_h} (1 - O_p(s))^{p_h} \quad (9)$$

式中： $O_h(s)$ 为第  $h$  条支路在  $s$  强度的极端天气下发生故障的概率； $l_h$ 、 $p_h$ 分别为在第  $h$  条支路上线路与电杆的数量。

#### 1.3.2 极端天气下的故障抢修过程

极端天气发生时，配电网防御一段时间后进入事故进程阶段，但是故障区域由于极端天气的存在而无法立即修复，必须待极端天气持续时间过后，方可对故障区域进行修复。因此故障恢复所需的时间分为故障等待修复时间和故障修复时间。其中，故障修复时间  $T_{fc}$  与配电网故障严重程度、抢修效率因素有关，具体可以表示为

$$T_{fc} = \mu_{se} \lambda_{ra} T_0 \quad (10)$$

式中： $\mu_{se}$ 为配电网故障严重程度系数，其值与故障场景相关； $\lambda_{ra}$ 为抢修效率系数，与修复人员的熟练程度与人数相关； $T_0$ 为标准故障修复时间。

在极端天气发生后，发生较为严重的故障时，配网与主网断开连接，此时利用配网中的各类分布式资源与多能联合供能对非故障区域进行恢复供电。合理的配电网恢复方法能够最大化恢复用户负荷功能，维持关键用户负荷在紧急情况下的正常运转。从极端天气发生至配网恢复运行间各阶段修复时间如图 2 所示。

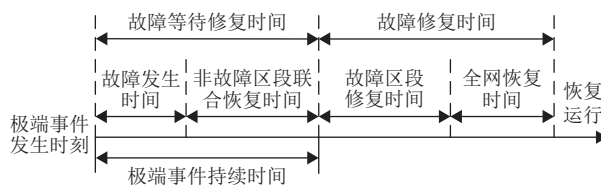


图 2 区域能源互联网故障恢复过程

Fig. 2 Failure recovery process of IOE

## 2 IOE 故障恢复优化模型

### 2.1 目标函数

当极端天气发生后配电网发生多重故障时，IOE 各故障供电区域的电力网最大供电能力指标、

多能联合供电能力指标与最大恢复能力指标不相同，因此故障时各区域内可供失电负荷的能力指标也不同<sup>[16]</sup>。因此，本文根据各故障区域的修复紧急程度进行场景划分，并对各故障场景进行权重赋值。从极端天气发生至配网恢复运行间各阶段修复时间如图 2 所示。

1) 场景 1。在  $t$  时刻时，故障区域内最大供电能力指标大于所有失电负荷容量大小，此时区域内所有负荷均可恢复供电，以恢复成本最小为目标函数：

$$\min f_1(t) = \sum_{i=1}^n C_k P_i \quad (11)$$

式中： $C_k$  为第  $k$  种供电资源的单位发电电量的电价，单位为元/kW·h； $P_i$  为第  $i$  个负荷节点的有功功率； $n$  为子区域内节点个数。

2) 场景 2。在  $t$  时刻时，故障区域内最大供电能力指标小于所有失电负荷容量大小，但通过 IOE 内多能联供，能将子区域内所有的失电负荷进行恢复供电，此时子区域内最大恢复能力指标大于总失电负荷容量。但考虑到热电联产机组设计时通常以满足热负荷的供热为主，以发电为辅，在极端天气下为保障电力网的正常运行，同时也需要考虑多能联供恢复的经济性，则需要考虑到失负荷代价与热-气联供时所产生的费用，若失负荷代价高于联供时所需费用，则以下述场景 3 最小切负荷代价为目标函数，反之，若失负荷代价小于联供费用，则此时以热-气联供所用费用最小为目标函数：

$$\min f_2(t) = \lambda_l \left( \sum_{i=1}^{n_1} \gamma_{\text{CHP}} \varepsilon_{\text{CHP}} + \sum_{i=1}^{n_2} \eta_e F_{\text{in}} \right) \quad (12)$$

式中： $\gamma_{\text{CHP}}$  为热电转换效率系数； $\varepsilon_{\text{CHP}}$  为热气系统的热功率； $\eta_e$  与 CHP 机组发出电功率有关，本文假设其为常数； $F_{\text{in}}$  为天然气系统中的耗气量； $\lambda_l$  为多能联供时的功率损耗。

3) 场景 3。在  $t$  时刻时，故障区域内最大恢复能力指标小于所有失电负荷容量大小，区域内无法恢复全部负荷，此时以失电负荷所造成的损失最小为目标函数：

$$\min f_3(t) = \sum_{L \in D_i} \mu_L k_L P_L \quad (13)$$

式中： $\mu_L$  为节点  $L$  的负荷权重等级； $k_L$  为节点  $L$  的失电状态，失电为 1，通电为 0； $P_L$  为负荷节

点  $L$  的有功功率； $D_i$  为第  $i$  个故障失电子区域中负荷节点集合。

以 IOE 整个故障期间内总经济损失最小为目标函数。

$$\min f = \sum_{i=1}^N \left[ \sum_{t=1}^{T_i+T_{\text{ifc}}} (\varphi_{ikt} P_{ikt}) + T_{i2} \varphi_{ik(T_{i1}+1)} P_{ik(T_{i1}+1)} \right] \quad (14)$$

式中： $N$  为故障总数； $T_i$  为第  $i$  个故障修复的等待时间； $T_{\text{ifc}}$  为第  $i$  个故障修复所需时间； $\varphi_{ikt}$  为故障  $i$  在  $t$  时刻故障场景  $k$  时的故障权重系数，本文定义故障紧急程度较低，对整个故障恢复优化模型无影响，设置场景 1 故障权重系数为 0，当故障程度越严重，则故障权重系数设置较大，本文设定场景 1、2、3 分别对应故障权重系数 0、1、5； $P_{ikt}$  为故障  $i$  在  $t$  时刻  $k$  场景时的失电负荷量； $T_{i1}$ 、 $T_{i2}$  分别为故障等待修复到故障完全修复所需时间  $T$  的整数部分与小数部分。

## 2.2 约束条件

### 2.2.1 电力网约束

电力网约束包括电力网辐射状约束、潮流约束以及节点电压约束等，如下所示<sup>[15]</sup>：

$$\sum P_{G1} = \sum \Delta P_{ij} - \sum P_{Li0} \quad (15)$$

$$-P_{ij,\max} \leq \Delta P_{ij} \leq P_{ij,\max} \quad (16)$$

$$0 \leq P_{Li} \leq P_{Li0,\max} \quad (17)$$

$$P_{G,\min} \leq P_G \leq P_{G,\max} \quad (18)$$

$$Q_{G,\min} \leq Q_G \leq Q_{G,\max} \quad (19)$$

$$U_{i,\min} \leq U_i \leq U_{i,\max} \quad (20)$$

$$P_{c,\min} \leq P_c(t) \leq P_{c,\max} \quad (21)$$

$$P_{d,\min} \leq P_d(t) \leq P_{d,\max} \quad (22)$$

$$N_e \in N_E \quad (23)$$

式中： $P_{G1}$  为 DG 在电力网故障时的有功输出功率； $\Delta P_{ij}$  为线路  $ij$  上的有功功率损耗； $P_{Li0}$  为节点  $i$  的有功负荷值； $P_{ij,\max}$  为线路  $ij$  允许的最大载流值； $P_{G,\max}$ 、 $P_{G,\min}$  为 DG 有功出力的上下限； $Q_{G,\max}$ 、 $Q_{G,\min}$  为 DG 无功出力的上下限； $U_{i,\max}$ 、 $U_{i,\min}$  分别为节点电压的上下限； $P_{c,\max}$ 、 $P_{c,\min}$  为电储能允许的电池电量上下限； $P_{d,\max}$ 、 $P_{d,\min}$  为电储能最大充放电功率； $N_e$  为当前时刻电力网结构； $N_E$  为电力网辐射运行结构的集合。式 (15)—



(17) 为配电网潮流约束；式 (18)(19) 为 DG 出力约束；式 (20) 为电压安全约束；式 (21)(22) 为电储能约束；式 (23) 为辐射状拓扑约束。

### 2.2.2 热力网约束

热力网约束包括水力与热力约束，机组出力约束以及爬坡约束，同时为考虑运行安全性，需要满足热负荷削减约束以及运行安全约束，如下所示<sup>[14]</sup>：

$$0 \leq h_{i,t} \leq H_{i,t} \quad (24)$$

$$T_i^{s,\min} \leq T_{i,t}^s \leq T_i^{s,\max} \quad (25)$$

$$T_i^{o,\min} \leq T_{i,t}^o \leq T_i^{o,\max} \quad (26)$$

$$m_{k,t} \leq T_k^{\max} \quad (27)$$

式中： $h_{i,t}$  为  $t$  时段  $i$  节点的热负荷削减量； $H_{i,t}$  为  $t$  时段  $i$  节点的热负荷削减量的最大值； $T_i^{s,\max}$ 、 $T_i^{s,\min}$  为节点  $i$  供水温度的上下限； $T_i^{o,\max}$ 、 $T_i^{o,\min}$  为节点  $i$  回水温度的上下限； $T_k^{\max}$  为热力网管道  $k$  流量的最大值。

### 2.2.3 天然气网约束

天然气网约束与热力网水力约束类似，除了满足天然气网基本等式模型外，也需要满足气负荷削减约束以及运行安全约束，如下所示：

$$0 \leq f_{i,t} \leq F_{i,t} \quad (28)$$

$$g_i^{\min} \leq g_{i,t} \leq g_i^{\max} \quad (29)$$

$$z_g \leq z_g^{\max} \quad (30)$$

式中： $f_{i,t}$  为  $t$  时段  $i$  节点的气负荷削减量； $F_{i,t}$  为  $t$  时段  $i$  节点的气负荷削减量的最大值； $g_i^{\max}$ 、 $g_i^{\min}$  分别为节点  $i$  气压上下限； $g_{i,t}$  为节点  $i$  在  $t$  时刻的气压值； $z_g^{\max}$  为气网管道流量上限。

## 2.3 IOE 多能联供故障恢复求解流程

当极端天气发生后，IOE 中电力网故障的抢修顺序为离散变量，因此为寻得全局最优故障抢修方案，本文使用 DPSO 优化算法对整体进行寻优优化。首先在故障发生后输入各故障因素，计算各故障修复完成所需时间，再对各故障区域内的最大供电能力指标与失电负荷功率进行对比，然后将各故障区域划分为具体的故障场景，分别以相应的目标函数进行求解计算经济损失，最后将各故障区域进行整体计算，利用 DPSO 算法进行求解全局最优故障恢复与抢修策略。

常规粒子群算法 (particle swarm optimization

algorithm, PSO) 的粒子初始速度以及更新速度为连续函数，而 DPSO 则与 PSO 相对应，DPSO 的位置与速度更新均为离散值。基于本文所提模型与故障抢修恢复策略，对于各个故障节点需要进行离散化处理，粒子在状态空间的取值只限于 0, 1 两个值，而速度的每一个位代表的是粒子位置所对应的位取值为 0-1 的可能性。因此在离散粒子群算法中，粒子速度的更新公式依然保持不变，但是个体最优位置和全局最优位置每一位的取值只能为 0-1。基于 DPSO 算法的具体计算步骤如下：

1) 参数初始化。读取电力网拓扑结构，输入电源出力数据、负荷数据，进行粒子群参数初始化。

2) 初始化粒子群。随机生成  $x_i$  个初始种群，代表  $x_i$  种恢复方案。初始化粒子群的速度、位置、个体最优值和群体最优值，设置当前迭代次数  $i=0$ 。

3) 粒子群更新。粒子速度的更新方式与传统粒子群方式一样，但位置的更新方式则使用 sigmoid 函数将粒子的速度映射到 0-1 之间。判断更新后是否满足连通性与功率约束，若不满足，则搜索下一个粒子，并完成迭代次数  $i=i+1$ 。

4) 计算适应度值。根据当前种群种粒子数据，求解得出粒子适应度。

5) 更新适应度值。计算个体最优值、最优适应度以及群体最优值、最优适应度，若当前适应值比个体极值优秀，则将当前适应值赋给个体。

6) 迭代次数判断。判断迭代次数是否满足算法迭代终止条件，若满足，则输出全局最优抢修恢复方案，若不满足，则至步骤 3) 继续进行迭代。

区域能源互联网故障抢修恢复策略具体求解流程如图 3 所示。

## 3 算例分析

### 3.1 参数设置

本节采用的算例系统拓扑结构如图 4 所示，该算例图由改进的 19 节点电力网、11 节点气网以及 6 节点热网组成。本算例系统的应用场景为：电力系统处于并网模式，由电节点 1 与大电力网相连，其中电节点 5、16 分别接入 2 台微型燃气轮机，节点 18 接入一台额定功率为 800 kW 的风

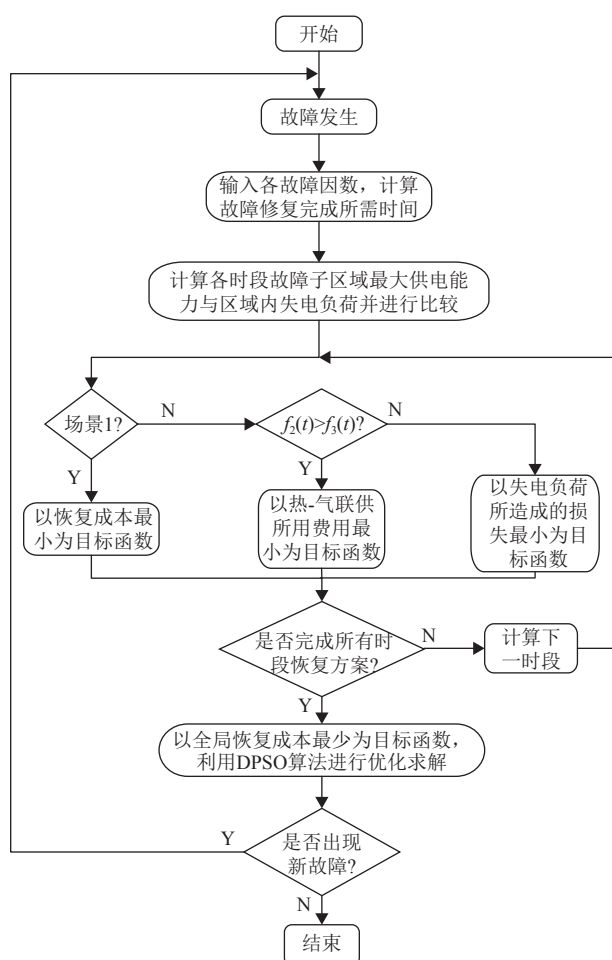


图 3 区域能源互联网故障恢复求解流程图

Fig. 3 Flow chart of failure recovery solving process of IOE

电机组与一台额定容量为 500 kW·h, 最大充放电功率为 250 kW 的分布式储能装置, 将风机与储能合并成风-储系统平衡出力, 其出力如图 5 所示; 热力系统中的热节点 1 连接一台 CHP 作为热力系统的平衡节点; 天然气系统中气节点 7、10 分别接入一台微型燃气轮机, 在日常状态下以供热为主、供电为辅, 在某些极端故障状况下, 可以通过转换供能比例, 为电力网减少失负荷损失。算例系统具体参数参考文献 [13]。以台风作为本文考虑的典型极端天气情况, 此时极端天气强度包括台风最大风速和最大风速半径, 参考文献 [2] 中极端天气模型, 对本算例进行仿真计算。

### 3.2 仿真结果

假设故障时间发生于上午 7:00, 在极端天气下造成电力网中节点 4、7、13、15 发生故障, 故障发生后, 各馈线终端系统立即对故障节点进行

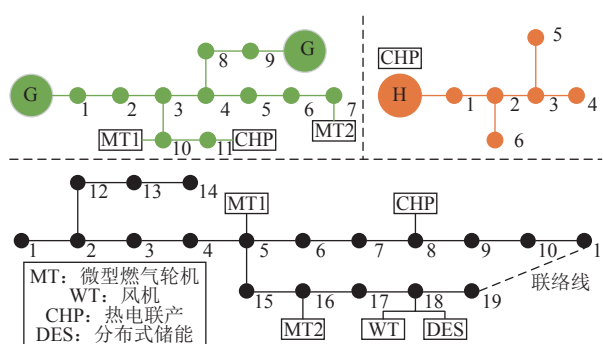


图 4 区域能源互联网算例拓扑结构图

Fig. 4 Example topology of IOE

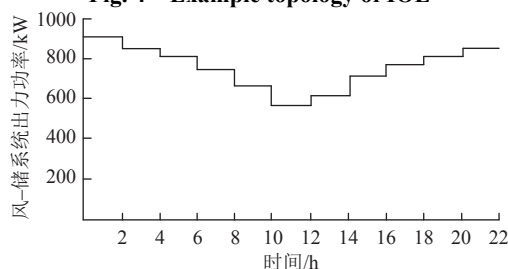


图 5 风-储系统出力图

Fig. 5 Output diagram of wind-storage system

隔离, 并利用区域内 DG 对未发生故障的负荷节点进行孤岛恢复, 具体孤岛恢复划分方案如图 6 所示。

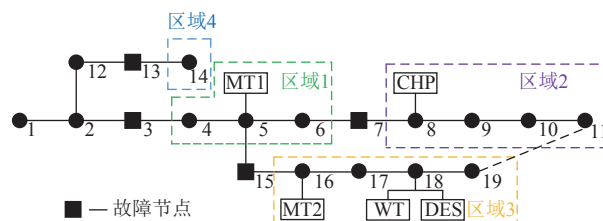


图 6 区域能源互联网故障分区图

Fig. 6 Fault partition of IOE

对上述故障区域的故障场景按各时段供用电负荷的平衡程度进行划分, 以便制定最优的故障修复方案, 故障区域场景划分如表 1 所示。

通过对上述算例系统进行仿真验证可知, 可以根据各时段子区域的场景筛选出存在失电负荷的子区域, 优先抢修此类子区域内的故障, 以尽快恢复失电负荷供电。当 7 时发生故障后, 由于区域 1 在 7:00—15:00 为故障场景 1, 即该时段区域 1 内 DG 出力能满足所有失电负荷, 因此故障节点 3 可以在 15:00 之后进行抢修, 优先修复其他急需修复的故障节点以最优抢修方案进行恢复供电; 由于区域 3 在 7:00—13:00 为故障场景 2, 同理该区域也可通过孤岛内 DG 对失电负荷进行



表1 区域故障场景划分  
Table 1 Regional fault scenarios division

| 时间          | 故障场景 |     |     |     |
|-------------|------|-----|-----|-----|
|             | 区域1  | 区域2 | 区域3 | 区域4 |
| 7:00—9:00   | 1    | 2   | 2   | 3   |
| 9:00—11:00  | 1    | 2   | 2   | 3   |
| 11:00—13:00 | 1    | 3   | 2   | 3   |
| 13:00—15:00 | 1    | 3   | 1   | 3   |
| 15:00—17:00 | 3    | 3   | 1   | 3   |
| 17:00—19:00 | 3    | 3   | 1   | 3   |
| 19:00—21:00 | 3    | 2   | 2   | 3   |
| 21:00—23:00 | 3    | 1   | 1   | 3   |
| 23:00—1:00  | 1    | 1   | 1   | 3   |
| 1:00—3:00   | 1    | 1   | 1   | 3   |
| 3:00—5:00   | 1    | 1   | 1   | 1   |
| 5:00—7:00   | 1    | 1   | 1   | 1   |

可靠供电,且此时以热-气联供所用费用最小为目标函数,故障抢修任务可安排在13时之后或者等待其他区域抢修完成后进行故障处理。

由于各区域内DG各时段出力不同,因此各时段可恢复的失电负荷量也不同。对于区域2而言,在7:00—11:00之间,失电节点8、9、10、11通过区域内CHP机组进行恢复供电,其中在7:00—9:00时恢复负荷功率718.3 kW,在9:00—11:00时恢复负荷功率576.8 kW,此时失电负荷可通过区域内CHP机组可靠孤岛运行;而在11:00—13:00之间,由于CHP可用出力小于区域内所有失电负荷功率大小,无法可靠孤岛运行,此时失电负荷恢复功率为0。

对于故障失电区域当前时段无法满足所有失电负荷功率时,在等待抢修的过程中,若下一时段可动态调整DG供电范围,例如,在7:00—9:00时,在区域3中WT与DES仅可对节点18、19进行供电恢复,恢复负荷功率426.6 kW,且区域3中MT2仅为节点16进行供电,恢复负荷功率358.7 kW,此时区域3内电源出力无法满足全部负荷。在9:00—11:00时,由于DG各时段出力不同,因此孤岛恢复范围需要调整,此时通过合并相邻两个孤岛,由MT2、WT以及DES对合并孤岛区域3内节点16、17、18、19进行联合供电,此时恢复负荷功率1095.4 kW。

参考文献[2]所提出的极端天气下的故障场景选取,利用蒙特卡洛法对故障类型与故障持续

时间进行仿真计算,假设各故障均可成功修复。根据仿真计算各故障区域的各时段恢复方案,得到在故障发生后等待抢修至修复成功期间全局最优修复方案以及造成的综合经济损失大小,如表2所示。

表2 故障全局最优修复方案  
Table 2 Global optimal maintenance scheme for faults

| 故障修复时间段     | 故障节点 | 修复时间/h | 总经济损失/kW·h |
|-------------|------|--------|------------|
| 7:00—10:12  | 3    | 3.2    | 9605.32    |
| 10:13—15:01 | 7    | 4.8    | 13562.5    |
| 15:02—19:14 | 15   | 4.2    | 20315.37   |
| 19:15—22:51 | 13   | 3.6    | 15843.2    |

为显示所提IOE在极端天气下发生多故障时故障修复的优越性,本文设置另外2组参照组进行对比,分别设置:参照组一为无热-气联供的传统配电网;参照组二为无抢修顺序安排的IOE;参照组三为本文所提IOE故障抢修及恢复方案。假设三组参照组发生相同故障,分别计算3组仿真情况下的故障修复时间总长与总经济损失,仿真计算结果如表3所示。

表3 不同抢修方案对比  
Table 3 Comparison of different emergency maintenance schemes

| 组别   | 故障修复时间总长/h | 总经济损失/kW·h |
|------|------------|------------|
| 对照组一 | 17.8       | 96742.62   |
| 对照组二 | 17.2       | 81320.6    |
| 对照组三 | 15.8       | 59326.39   |

从表3仿真结果分析可知,由于传统配电网中在故障下无法利用热-气进行联合供电,且抢修顺序制定无明确目标,因此其总经济损失以及抢修时间总长相较于其他两组对照组较高,对于参照组二,由于采用了在故障场景下的多能联合供电,此时在故障总经济损失相应的减少,但由于无法明确制定抢修顺序,增加了总的故障修复时间,且对比于对照组三,因为抢修时无法在全局中得到最优解,增加了总的经济损失。而本文所提方案在抢修时间上减少了故障时的总经济损失,也通过热-气联供最大程度减少了故障时的经济损失,充分体现出本文所提方案在极端天气下故障修复的优越性。

## 4 结论

本文针对极端天气下 IOE 发生多故障的供电恢复及抢修问题, 首先给出了区域能源互联系统恢复能力指标, 并对极端天气下 IOE 内元件故障的影响及故障恢复过程进行了讨论和分析; 然后建立了 IOE 供电恢复及抢修顺序模型, 提出了各失电区域的最大供电能力指标、多能联合供电能力指标以及最大恢复能力指标制定各区域合适的供电策略, 充分利用 IOE 多能资源进行联合供电, 保证失电区域的正常用电。同时, 考虑到各个故障区域对于抢修及恢复供电的紧急程度与需求度不同, 本文对各个故障区域进行场景划分, 将故障区域根据上述 3 个指标划分为 3 个需求度不同的场景, 对故障损失较大且区域内的多能资源无法进行孤岛恢复的区域实行优先抢修与恢复供电, 并且由于微型燃气机组日常情况下以供热为主, 发电为辅, 考虑到以 CHP 机组进行联合供电恢复时的经济性问题, 本文将联合供电的费用与故障损失代价进行对比, 划分为不同场景不同目标函数进行优化计算。最后, 以全局总经济损失最小为目标函数, 利用离散粒子群算法寻取全局最优解, 得到最佳供电恢复方案及抢修顺序, 减少了总抢修时间与经济损失, 提高了恢复效率。但对于下述研究因素, 本文暂未考虑, 这些内容应是下一步的研究方案:

1) 本文暂未考虑极端天气下对路网的影响, 在抢修时间上需要进一步分析研究。

2) 本文暂未考虑冷负荷的影响, 在更进一步的研究中需要将这一部分进行考虑。

3) 在极端天气下对于气网、热网供应环节的影响, 本文暂未深入研究。

## 参考文献

- [1] 李振坤, 何苗, 苏向敬, 等. 基于生物体免疫机制的智能配电网故障恢复方法 [J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 7924-7937.  
LI Zhenkun, HE Miao, SU Xiangjing, *et al.* Smart distribution network fault recovery method based on biology immune mechanism [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 7924-7937(in Chinese).
- [2] 李振坤, 王法顺, 郭维一, 等. 极端天气下智能配电网的弹性评估 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(09): 60-68.  
LI Zhenkun, WANG Fashun, GUO Weiyi, *et al.* Resilience evaluation of smart distribution network in extreme weather [J]. Automation of Electric Power Systems, 2020, 44(09): 60-68(in Chinese).
- [3] 李振坤, 周伟杰, 王坚敏, 等. 基于风光荷功率曲线的有源配电网动态孤岛划分方法 [J]. 电力系统自动化, 2016, 40(14): 58-64+71.  
LI Zhenkun, ZHOU Weijie, WANG Jianmin, *et al.* Dynamic islanding method of active power distribution network based on wind-photovoltaic-load curve [J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(14): 58-64+71(in Chinese).
- [4] 刘刚, 陈莎, 仝进, 等. 含 DG 接入的配电网故障恢复方法 [J]. 电测与仪表, 2020, 57(18): 50-56.  
LIU Gang, CHEN Sha, TONG Jin, *et al.* Fault restoration method for power distribution networks considering distributed generations [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(18): 50-56(in Chinese).
- [5] 张林垚, 雷勇, 施鹏佳, 等. 基于路径描述的配网灾后供电恢复策略 [J]. 电测与仪表, 2020, 57(15): 59-64.  
ZHANG Linyao, LEI Yong, SHI Pengjia, *et al.* Power supply recovery strategy for distribution network after disaster based on path description [J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(15): 59-64(in Chinese).
- [6] 陈攀峰, 程浩忠, 吕佳炜, 等. 基于二阶锥规划考虑主动管理的主动配电网故障恢复 [J]. 电测与仪表, 2019, 56(21): 46-51.  
CHEN Panfeng, CHENG Haozhong, LÜ Jiawei, *et al.* Fault recovery of active distribution network considering active management based on second-order cone programming [J]. Measurement & Instrumentation, 2019, 56(21): 46-51(in Chinese).
- [7] 李豪, 马驰, 孙菊, 等. 基于改进 BPSO 算法的含微网的配电网故障恢复方法研究 [J/OL]. 电测与仪表: 1-7.  
LI Hao, MA Chi, SUN Ju, *et al.* Distribution network fault recovery method with microgrid based on improved BPSO algorithm [J/OL]. Measurement & Instrumentation, 1-7 [2022-09-16].
- [8] 杜晓雪. 多源协同的城市综合能源系统韧性评估与提升方法研究 [D]. 吉林: 东北电力大学, 2022.
- [9] 王川, 郝丽丽, 胡望雨, 等. 电-气综合能源系统供能恢复协调优化决策研究 [J]. 电网技术, 2022, 46(08): 3017-3030.  
WANG Chuan, HAO Lili, HU Wangyu, *et al.* Collaborative optimization decision-making of energy supply and restoration in power-gas integrated energy system [J]. Power System Technology, 2022, 46(08): 3017-3030(in Chinese).

- Chinese).
- [10] 张筱慧, 潘永超, 张璐, 等. 考虑综合能源聚合商与配电公司利益均衡的配电网故障恢复方法 [J/OL]. 电力自动化设备: 1-15.  
ZHANG Xiaohui, PAN Yongchao, ZHANG Lu, *et al.* Distribution network fault recovery method considering balance of interests between integrated energy aggregators and power distribution company [J]. Electric Power Automation Equipment: 1-15.
- [11] 齐世雄, 王秀丽, 邵成成, 等. 极端天气下电-气混联综合能源系统的恢复力分析 [J]. 电网技术, 2019, 43(01): 41-51.  
QI Shixiong, WANG Xiuli, SHAO Chengcheng, *et al.* Resilience analysis of integrated electricity and natural gas energy system under extreme events[J]. Power System Technology, 2019, 43(01): 41-51(in Chinese).
- [12] 陈丽娟, 刘丽, 周昶, 等. 计及运行风险与韧性的综合能源系统薄弱环节辨识 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(06): 48-57  
CHEN Lijuan, LIU Li, ZHOU Chang, *et al.* Weakness identification of integrated energy systems considering operation risk and resilience [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(06): 48-57(in Chinese).
- [13] 王波, 王红霞, 朱丹蕾, 等. 基于统一潮流大数据的综合能源系统薄弱点辨识方法 [J]. 电力系统自动化, 2022, 46(07): 85-93.  
WANG Bo, WANG Hongxia, ZHU Danlei, *et al.* Identification method for weak nodes of integrated energy system based on big data of unified power flow [J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(07): 85-93(in Chinese).
- [14] 王英瑞, 曾博, 郭经, 等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法 [J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2942-2951.  
WANG Yingrui, ZENG Bo, GUO Jing, *et al.* Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity, heat and gas [J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2942-2951(in Chinese).
- [15] 李雪, 孙霆锴, 侯恺, 等. 地震灾害下海岛综合能源系统韧性评估方法研究 [J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(17): 5476-5493.  
LI Xue, SUN Tingkai, HOU Kai, *et al.* Evaluating resilience of island integrated energy systems with earthquake [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(17): 5476-5493(in Chinese).
- [16] 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+7076.  
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+7076(in Chinese).
- [17] 潘益, 王明深, 叶昱媛, 等. 一种计及能量枢纽不同运行模式的综合能源系统混合能量流求解方法 [J]. 现代电力, 2021, 38(03): 277-287.  
PAN Yi, WANG Mingshen, YE Yuyuan, *et al.* A multi-energy flow calculation method for integrated energy system considering different operation modes of energy hub[J]. Modern Electric Power, 2021, 38(03): 277-287(in Chinese).

收稿日期: 2022-09-30

作者简介:

李振坤 (1982), 男, 博士, 教授, 通信作者, 研究方向为配电网规划及运行控制、DG 并网及微电网、主动配电网技术等, E-mail: [lzk021@163.com](mailto:lzk021@163.com);

陈鹤 (1998), 男, 硕士研究生, 研究方向为区域能源互联网故障恢复策略研究, E-mail: [chchsch@163.com](mailto:chchsch@163.com);

李新聪 (1990), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事配电网规划和配电自动化工作。