

DOI:10.19651/j.cnki.emt.2416860

# 考虑运行状态与拓扑结构的 RIES 脆弱支路辨识<sup>\*</sup>

赵璐豪 崔双喜 郑丁园

(新疆大学电气工程学院 乌鲁木齐 830017)

**摘要:** 脆弱支路故障可能导致区域综合能源系统的稳定性下降,甚至引发系统大范围失稳。因此识别系统的脆弱支路成为保证系统安全稳定运行和预防的重要环节。为此提出一种电-气-热区域综合能源系统脆弱支路识别方法。首先基于统一能路理论对电-气-热网络进行统一能路能流建模和计算,获取网络的初始运行状态,同时针对区域综合能源系统建立预想事故集,考虑热网与电网 N-1 事故对网络内部的影响,通过 N-1 求得故障后支路的运行状态;其次基于能流变化熵的运行特性以及局部集中度的结构特性脆弱性分析,提出支路的综合脆弱度指标,通过粒子群优化算法确定运行脆弱度和结构脆弱度权重,确保评估过程的客观性与准确性,根据脆弱度指标进行排序从而识别出系统的脆弱支路,最后采用电 IEEE14 节点-气 14 节点-热 14 节点算例辨识系统脆弱支路,实验结果表明所提出的方法能够合理反映系统实际情况,粒子群优化算法所确定的权重能够更好地识别脆弱支路,提升了识别的准确性和可靠性。

**关键词:** 统一能路;区域综合能源系统;运行状态;拓扑结构;预想事故集;粒子群算法

**中图分类号:** TM721;TN711 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4054

## Identification of vulnerable branches in RIES considering operating states and topological structure

Zhao Luhao Cui Shuangxi Zheng Dingyuan

(College of Electric Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830017, China)

**Abstract:** Failures in vulnerable branches can lead to a decline in the stability of regional integrated energy systems and even trigger large-scale system instability. Therefore, identifying the vulnerable branches of the system becomes a crucial step in ensuring safe and stable operation as well as prevention. To address this, a method for identifying vulnerable branches in electric-gas-thermal regional integrated energy systems is proposed. First, based on the unified energy route theory, unified energy flow modeling and calculations are performed for the electric-gas-thermal network to obtain the initial operating state of the network. At the same time, a set of hypothetical accidents for the regional integrated energy system is established, considering the impact of N-1 contingencies in the thermal and electric networks on the internal network. The post-fault operational state of the branches is then determined through N-1 analysis. Next, vulnerability analysis is conducted based on the operational characteristics of energy flow entropy changes and the structural characteristics of local concentration, and a comprehensive vulnerability index for the branches is proposed. Particle swarm optimization (PSO) is used to determine the weights of operational and structural vulnerabilities, ensuring the objectivity and accuracy of the evaluation process. The branches are then ranked according to the vulnerability index, allowing the identification of the system's vulnerable branches. Finally, the method is applied to an IEEE 14-bus electric system, a 14-node gas network, and a 14-node thermal network to identify the vulnerable branches of the system. The experimental results show that the proposed method can reasonably reflect the actual conditions of the system, and the weights determined by the PSO algorithm can more effectively identify the vulnerable branches, improving the accuracy and reliability of the identification process.

**Keywords:** unified energy circuit; regional integrated energy system; operating state; topological structure; hypothetical fault set; particle swarm optimization algorithm

## 0 引言

随着能源系统向更高效、更环保的方向发展,区域综合

能源系统(regional integrated energy system, RIES)通过整合电、热、气等多种能源形式,优化资源配置,已成为当前研究热点<sup>[1]</sup>。然而,系统的复杂性也随之增加,一旦某一环节

收稿日期:2024-09-10

\* 基金项目:国家自然科学基金(52266018)、新疆维吾尔自治区重点研发项目(2022B01016-1)资助

发生故障,可能会引发连锁反应,导致整个系统的功能受到影响。网络中的脆弱支路会对系统因故障导致的连锁反应起到推波助澜作用<sup>[2]</sup>。因此,辨识系统中脆弱支路对于预防连锁故障的发生,并确保系统安全稳定运行具有重要意义。

多能流统一能路建模理论源于电力网络由“场”到“路”推演规律。文献[3]提出综合能源系统的统一能路理论,推导出天然气系统的能路方程。文献[4]基于此理论,建立了热力系统的水路、热路模型,并推导出热力、水力的网络方程,简化了传统热网分析。统一能路理论将传统天然气和热力网络模型转化为代数方程,为综合能源系统多能流分布和系统的稳定运行提供理论支撑,同时也是本文脆弱支路识别的重要基础。

关于脆弱支路辨识,国内外学者对此进行了广泛的研究,并取得了一定的成果。首先在电力系统中,文献[5]引入泰尔熵指标考虑电压等级的基础上构建潮流增长率泰尔熵模型,有效的从运行状态识别网络支路。文献[6]将电网输电能力作为衡量指标,分析线路开断后电网输电能力的变化,以此判断是否为脆弱线路。文献[7]将熵理论应用到电力系统中,提出潮流转移熵指标,作为判断脆弱线路的辨识指标;文献[8]引入最大流理论,基于最大流传输贡献度对电力网络的线路与节点进行辨识;文献[9]通过泰尔熵理论与复杂网络理论构建脆弱评估指标分析系统的关键线路。以上方法是基于电力系统对脆弱环节的运行状态及拓扑结构进行辨识,这为综合能源系统脆弱线路的辨识提供依据。对于综合能源系统来说,文献[10]将复杂网络理论引用到综合能源系统中,以复杂网络的视角识别系统的脆弱环节;文献[11]基于复杂网络理论,提出改进的带权重线路系数引入都综合能源系统中,通过不同的攻击策略对系统的脆弱性进行了分析。将复杂网络应用到综合能源系统中,推动了综合能源系统脆弱环节辨识的研究,但是仅从静态角度去分析,无法反映系统的真实运行状态。文献[12]基于互联系统的故障前后的运行状态,从拓扑结构与运行状态两方面对电-气互联系统进行脆弱线路识别。对于综合指标的权重构建,仅通过固定权重分配主观地去辨识脆弱支路,缺乏一定的客观性。文献[13]引入潮流分布因子与最大流概念,建立综合能源系统的脆弱性评价指标对综合能源系统的元件脆弱性进行评估;文献[14]通过建立管道 N-1 预想事故量化指标,来评估关键线路;文献[15]提出以天然气 N-1 开断事故作为预想事故集,通过分析事故下系统的安全性来对脆弱部位进行辨识,但仅考虑了气网的 N-1,忽略了综合能源系统电网与热网 N-1 对系统的影响。

这些研究为本文奠定了良好的基础。但大多数文献中应用 RIES 脆弱支路辨识的指标仅考虑了网络的拓扑结构,未能充分考虑运行状态。为此,本文将文献[7]的潮流转移熵与文献[12]局部集中度指标应用到 RIES 中,提出了一种适用于电-气-热网络的综合脆弱度指标,该指标综

合考虑运行脆弱度与结构脆弱度指标,并利用粒子群优化算法进行权重分配,从而优化各指标对系统脆弱度评估的影响。最后采用 IEEE14 节点-气 14 节点-热 14 节点算例辨识系统脆弱支路,实验结果表明所提出的方法能够合理反映系统实际情况。

## 1 RIES 能流模型

### 1.1 RIES 稳态模型

本文以电网、热网以及天然气网组成的 RIES 为研究对象,整体结构如图 1 所示。

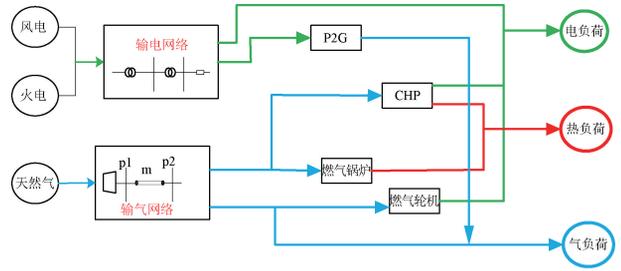


图 1 RIES 结构图

Fig. 1 RIES structure diagram

### 1.2 电力网络稳态能流模型

在电力系统中常常采用 II 形电路对支路进行等值,其对应的网络方程如下:

$$\mathbf{Y}_e \mathbf{U}_e = \mathbf{I}_e \quad (1)$$

式中:  $\mathbf{Y}_e$  为节点导纳矩阵;  $\mathbf{U}_e$  与  $\mathbf{I}_e$  分别表示节点电压与注入流量所构成的向量。

针对网络方程,采用传统交流潮流模型<sup>[16]</sup>,具体以极坐标形式表示为:

$$\begin{cases} \Delta P_i = P_i - V_i \sum_{j \in 1} V_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ \Delta Q_i = Q_i - V_i \sum_{j \in 1} V_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

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

### 1.3 天然气系统统一能路能流模型

文献[17]对异质能流的统一分析,将电路中的“场”到“路”的推演应用到天然气网络中,提出了统一能路模型。因此天然气系统的网络方程<sup>[18]</sup>如下:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{g,g} & \mathbf{Y}_{g,p} \\ \mathbf{Y}_{g,p} & \mathbf{Y}_{p,p} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{g,g} \\ \mathbf{p}_{g,p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{g,g} \\ \mathbf{G}_{g,p} \end{bmatrix} \quad (3)$$

式中:  $\mathbf{G}_{g,g}$ 、 $\mathbf{G}_{g,p}$  为边界条件的已知量,分别代表定注入节点的节点注入与定压力节点的节点压力;  $\mathbf{p}_{g,g}$ 、 $\mathbf{p}_{g,p}$  为待求量,分别表示定注入节点的节点压力和定压力节点的节点注入;  $\mathbf{Y}_{g,g}$ 、 $\mathbf{Y}_{g,p}$ 、 $\mathbf{Y}_{p,g}$ 、 $\mathbf{Y}_{p,p}$  表示广义导纳矩阵的分块矩阵。

因此可以求出待求变量  $\mathbf{p}_{g,g}$ 、 $\mathbf{G}_{g,p}$ :

$$\mathbf{p}_{g,g} = (\mathbf{Y}_{g,gg})^{-1} \cdot (\mathbf{G}_{g,g} - \mathbf{Y}_{g,gg}\mathbf{p}_{g,p}) \quad (4)$$

$$\mathbf{G}_{g,p} = \mathbf{Y}_{g,pg}\mathbf{p}_{g,g} + \mathbf{Y}_{g,pp}\mathbf{p}_{g,p} \quad (5)$$

#### 1.4 热力系统统一能路能流模型

热力网络稳态模型由水力网络统一能路模型与热力网络统一能路模型两部分组成<sup>[19]</sup>。其中热力网络统一能路模型的网络方程为:

$$\mathbf{T}_i = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_i \mathbf{A}_{h+}^T \tilde{\mathbf{A}}_{h-})^{-1} \cdot (\mathbf{K}_i \mathbf{A}_{h+}^T \tilde{\mathbf{T}}_n - \mathbf{E}_i) \quad (6)$$

$$\mathbf{T}_j = \mathbf{K}_j^{-1} (\mathbf{T}_i + \mathbf{E}_j) \quad (7)$$

式中:  $\mathbf{T}_i$  和  $\mathbf{T}_j$  分别表示是管道末首端温度列向量;  $\mathbf{I}$  为单位矩阵;  $\mathbf{K}_i$  为管道传热因子矩阵;  $\mathbf{A}_{h+}^T$  为流出节点-支路关联转置矩阵;  $\tilde{\mathbf{A}}_{h-}$  为加权流入节点-支路关联矩阵;  $\tilde{\mathbf{T}}_n$  为节点加权注入温度列向量;  $\mathbf{E}_i$  为支路热压源两侧的温差向量。

为统一网络方程数学形式,将式(7)记为:

$$\mathbf{Y}_i \cdot \mathbf{T}_i = \mathbf{h}_i \quad (8)$$

式中:  $\mathbf{Y}_i$  为节点-支路的关联矩阵和传热因子;  $\mathbf{h}_i$  为节点注入温度与换热器的温差。

水力网络统一能路模型与天然气网络统一能路模型类似,网络方程记为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{Y}_{h,gg} & \mathbf{Y}_{h,gp} \\ \mathbf{Y}_{h,pg} & \mathbf{Y}_{h,pp} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{p}_{h,g} \\ \mathbf{p}_{h,p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{G}_{h,g} \\ \mathbf{G}_{h,p} \end{bmatrix} \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{G}_{h,g}$ 、 $\mathbf{G}_{h,p}$  为边界条件的已知量,分别代表定注入节点的节点注入与定压力节点的节点压力;  $\mathbf{p}_{h,g}$ 、 $\mathbf{p}_{h,p}$  为待求量,分别表示定注入节点的节点压力和定压力节点的节点注入;  $\mathbf{Y}_{h,gg}$ 、 $\mathbf{Y}_{h,gp}$ 、 $\mathbf{Y}_{h,pg}$ 、 $\mathbf{Y}_{h,pp}$  表示广义导纳矩阵的分块矩阵。

进一步可以求出待求变量  $\mathbf{p}_{h,g}$ 、 $\mathbf{G}_{h,p}$  如下:

$$\mathbf{p}_{h,g} = (\mathbf{Y}_{h,gg})^{-1} \cdot (\mathbf{G}_{h,g} - \mathbf{Y}_{h,gg}\mathbf{p}_{h,p}) \quad (10)$$

$$\mathbf{G}_{h,p} = \mathbf{Y}_{h,pg}\mathbf{p}_{h,g} + \mathbf{Y}_{h,pp}\mathbf{p}_{h,p} \quad (11)$$

#### 1.5 能流计算方法

根据电网、天然气网络以及热力网络的统一能路能流模型,采用牛顿拉夫逊法对综合能源系统进行能流计算,为后续稳态分析中初始状态的选定奠定基础。具体的迭代公式如下<sup>[20]</sup>:

$$\begin{cases} \Delta x^{(k+1)} = (\mathbf{J}^{(k)})^{-1} \Delta F^{(k)} \\ x^{(k+1)} = x^{(k)} - \Delta x^{(k)} \end{cases} \quad (12)$$

式中:  $x$  表示系统的状态量;  $\Delta x$  表示系统的状态修正量;  $\Delta F$  为系统的不平衡量;  $k$  表示迭代次数;  $\mathbf{J}$  为雅可比矩阵,具体公式如下:

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} J_{ee} & J_{eh} & J_{eg} \\ J_{he} & J_{hh} & J_{hg} \\ J_{ge} & J_{gh} & J_{gg} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \Delta F_e}{\partial x_e^T} & \frac{\partial \Delta F_e}{\partial x_h^T} & \frac{\partial \Delta F_e}{\partial x_g^T} \\ \frac{\partial \Delta F_h}{\partial x_e^T} & \frac{\partial \Delta F_h}{\partial x_h^T} & \frac{\partial \Delta F_h}{\partial x_g^T} \\ \frac{\partial \Delta F_g}{\partial x_e^T} & \frac{\partial \Delta F_g}{\partial x_h^T} & \frac{\partial \Delta F_g}{\partial x_g^T} \end{pmatrix} \quad (13)$$

式中:  $J_{ee}$ 、 $J_{hh}$ 、 $J_{gg}$  分别代表电、气、热子系统的自身潮流与其自变量之间的关系;非对角块表示不同能源之间的耦合关系。

## 2 RIES支路脆弱度计算

本节提出了一种基于能流变化熵的运行特性和局部集中度的结构特性脆弱性分析方法,用于计算各网络中支路的脆弱度。在后续研究中,本文将电力网络的输电线路、天然气网络以及热力网络的传输管道统称为支路。

### 2.1 RIES N-1 事故集构建

本文将电力系统的 N-1 准则拓展到 RIES 中,根据 N-1 准则建立预想事故集,即逐个断开系统内部各个支路,以此为基础,获取事故后 RIES 的能流分布情况。为考虑系统的全局性,故针对电-气-热网络支路进行 N-1 开断。

### 2.2 RIES 支路 N-1 严重性评估

为更好的分析支路 N-1 开断对网络内部的影响情况,采用支路断开后剩余支路越限情况来分析其对网络所造成的影响。当支路  $l$  断开后,支路  $m$  的能流越限指标为:

$$I_{l,m} = \sum \frac{|f_{l,m} - f_{0,m}|}{f_{\max,m}} \quad (14)$$

式中:  $I_{l,m}$  为衡量各网络支路  $m$  在 N-1 开断后是否越限指标;  $N$  表示电-气-热网络支路数;  $f_{0,m}$  表示系统正常状态下支路  $m$  的初始能流;  $f_{\max,m}$  表示支路的最大允许流量即最大流。

### 2.3 运行脆弱度

熵是表达一个无序状态的物理学概念,其值越大,系统混乱程度越高,通过熵值可以反映系统是否处于平衡状态<sup>[21]</sup>。因此本文从熵的基本原理出发,通过支路的能流变化熵建立 RIES 的运行脆弱度指标。该指标用于衡量系统在支路断开后的稳健性。反映了系统在受到外部扰动时,能流冲击在系统内各条线路的分布情况。若能流冲击分布不均,系统某些线路可能承受较大能流,容易引发系统失稳;若分布均匀,则系统具备更好的稳健性和抗风险能力。

支路  $l$  断开后引起网络内部支路  $m$  能流冲击量为  $F_l$ ,如式(15)所示。此时支路断开后引起支路  $m$  上的能流变化比率为  $r_{l,m}$ ,如式(16)所示。综合考虑系统全局支路,得到支路断开后系统的能流变化熵为  $H_l$ ,计算方法如式(17)所示。结合以上分析,提出支路  $l$  的运行脆弱度指标为  $V_l$ ,如式(18)所示。

$$F_{l,m} = |f_{l,m} - f_{0,m}| / |f_{\max,m} - f_{0,m}| \quad (15)$$

$$r_{l,m} = F_{l,m} / \sum F_l \quad (16)$$

$$H_l = - \sum r_{l,m} \ln r_{l,m} \quad (17)$$

$$V_l = \sum \frac{F_l}{H_l} \quad (18)$$

$V_l$  值越小,表示系统的能流冲击在各条线路中分布得越均匀。这样的系统在面对支路断开的扰动时,不会因为

某条线路失效后而导致局部超载,因此脆弱度越小,系统的抗扰动能力越强,运行越稳健。

### 2.4 结构脆弱度

仅从网络的运行角度衡量支路的脆弱性并不客观,为更全面地评估,应考虑网络中结构的脆弱性。因此本文基于复杂网络理论,利用支路两端节点的局部集中度积提出拓扑结构脆弱度指标。

$$C_L(i) = \sum_{u \in \Gamma(i)} \sum_{j \in \Gamma(u)} N(j) \quad (19)$$

$$W_{i-j} = \frac{1}{C_L(i) \times C_L(j)} \quad (20)$$

式中:  $C_L(i)$  表示节点  $i$  的局部集中度,反映了节点  $i$  所在区域的紧密度和冗余度;  $N(j)$  表示与  $J$  相邻的节点数目;  $j \in \Gamma(u)$  为节点  $u$  的邻近节点集合。

当  $W_{i-j}$  值较小时,表示两端节点的局部集中度都较高,支路连接的区域剪剪度高、冗余度强,因此即使某条支路失效,系统仍然可以通过其他路径维持正常运行,这条支路的结构脆弱性较低。

### 2.5 支路综合脆弱度指标

为全面辨识网络中的脆弱支路,构建综合脆弱度指标,如式(21)所示。

$$R_l = \lambda v \cdot V_l + \lambda w \cdot W_{i-j} \quad (21)$$

式中:为统一量纲,各指标均为 min-max 归一化后的值;  $\lambda v, \lambda w$  待优化权重。  $V_l$  与  $W_{i-j}$  分别根据能流变化熵和两端节点的局部集中度从运行状态以及拓扑结构两方面反映了网络支路的脆弱度,因此综合能够全面地对网络中的脆弱支路进行辨识。  $R_l$  值越大,说明网络支路的脆弱度越高,一旦该支路断开对系统的能流传输的影响就越大。

### 2.6 基于粒子群算法优化权重

为确保综合脆弱度指标  $R_l$  的合理性,本文引入粒子群优化算法(PSO)优化权重粒子群优化算法模拟智能,通过个体之间的信息交换,逐步逼近最优解<sup>[22]</sup>。粒子群更新公式为:

$$v_{s,t+1} = \omega \times v_{s,t} + c_1 \times rand \times (pbest_s - x_{s,t}) + c_2 \times rand \times (gbest_s - x_{s,t}) \quad (22)$$

$$x_{s,t+1} = x_{s,t} + \lambda \times v_{s,t+1} \quad (23)$$

式中:  $v_{s,t}$  是粒子  $s$  在  $t$  次迭代时的速度;  $t$  为粒子的位置,  $pbest_s$  表示个体极值;  $gbest_s$  表示群体极值;  $rand$  为  $0 \sim 1$  之间的随机数;  $c_1$  和  $c_2$  分别是个体学习因子和群体学习因子;  $\lambda$  为速度系数。

PSO 的优化目标最小化支路的综合脆弱度指标如式(21)所示。粒子群算法通过不断更新粒子的速度和位置,找到能够最小化  $R_l$  的最优权重组合。从而最终得到的权重能够真实反映网络系统中的脆弱支路。

## 3 RIES 脆弱支路辨识方法流程

在 RIES 中,单个能源子系统内的某一条支路发生故障,其能流冲击会通过耦合单元传递到整个系统中,从而产

生连锁反应使得整个网络发生能流超限,若不加以预防会使得系统发生崩溃,这是一种使系统“脆弱”的现象,具体来说脆弱是指当系统某一环节发生改变而引起整个系统状态变化的能力<sup>[23]</sup>。基本步骤如下:

步骤 1) 根据文中第 1 节将异质能源系统进行统一能流建模,求取整个网络的初始运行状态;

步骤 2) 根据第 2 节对全局支路进行建立预想事故集,进入下一步骤;

步骤 3) 对选择的支路进行 N-1 开断事故模拟,利用统一能流方程确定事故后的稳态;

步骤 4) 采用粒子群算法求取最优权重组合,针对网络支路计算综合脆弱度指标,并且对结果进行排序;

步骤 5) 对所识别的结果能流变化进行分析验证。

## 4 算例分析

为了验证本文所提 RIES 的脆弱线路辨识指标,本文建立了电 IEEE14 节点-气 14 节点-热 14 节点的 RIES<sup>[24]</sup>。综合能源系统网络结构图如图 2 所示。为了便于对系统拓扑结构进行分析,将系统的各个设备以及线路管道抽象为拓扑图的节点与边,RIES 拓扑结构图如图 3 所示,支路编号如表 1 所示。

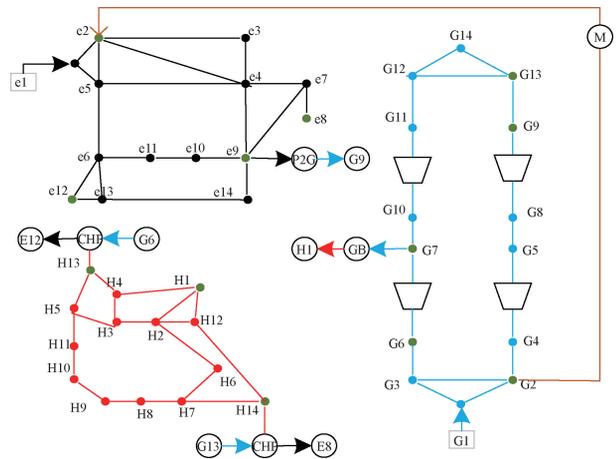


图 2 14-14-14 RIES 网络结构图

Fig. 2 14-14-14 RIES network structure diagram

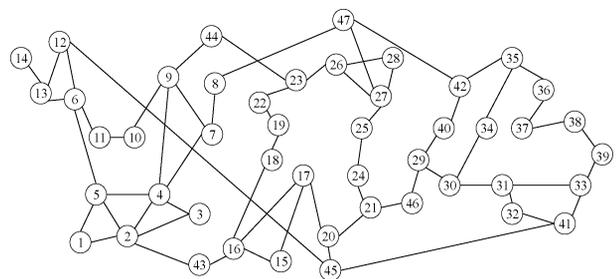


图 3 RIES 拓扑结构图

Fig. 3 RIES topology diagram

表1 电网支路编号  
Table 1 Grid branch number

编号	起始节点	终止节点	支路能流/ MW	编号	起始节点	终止节点	支路能流/ MW
1	1	2	96.45	11	6	11	11.65
2	1	5	53.6	12	6	12	8.31
3	2	3	42.69	13	6	13	19.95
4	2	4	45.79	14	7	8	5.56
5	2	5	34.67	15	7	9	31.4
6	3	4	2.34	16	9	10	1.02
7	4	5	47.22	17	9	14	6.77
8	4	7	25.84	18	10	11	7.99
9	4	9	15.89	19	12	13	2.13
10	5	6	31.12	20	13	14	8.32

编号	起始节点	终止节点	支路能流/ m <sup>3</sup> h	编号	起始节点	终止节点	支路能流/ m <sup>3</sup> h
21	1	2	31.03	29	12	13	218.41
22	1	3	30.27	30	12	14	193.25
23	3	2	6.81	31	14	13	291.63
24	2	4	18.55	32	11	12	482.17
25	4	5	511.12	33	10	11	527.29
26	5	8	313.50	34	7	10	510.32
27	8	9	665.78	35	6	7	588.32
28	9	13	722.86	36	3	6	23.46

编号	起始节点	终止节点	支路能流/ (kg·s <sup>-1</sup> )	编号	起始节点	终止节点	支路能流/ (kg·s <sup>-1</sup> )
37	1	2	512.54	46	9	10	61.39
38	2	3	219.14	47	11	10	183.22
39	3	4	295.51	48	12	2	247.85
40	3	5	244.38	49	13	5	386.51
41	5	11	494.94	50	14	7	347.17
42	2	6	219.21	51	4	13	48.43
43	6	7	219.03	52	1	4	472.64
44	7	8	380.19	53	1	12	448.62
45	8	9	376.75	54	12	14	192.17

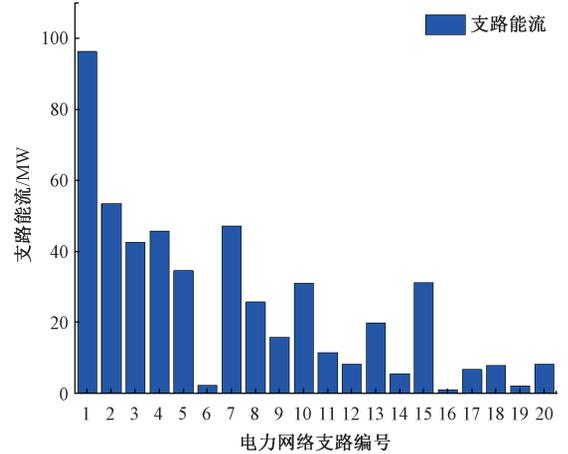
#### 4.1 RIES 初始运行状态

通过对 RIES 进行初始运行状态计算,具体结果如图 4 所示,耦合元件均处于保护控制模式,且保证进行能流计算中所有仿真结果收敛。

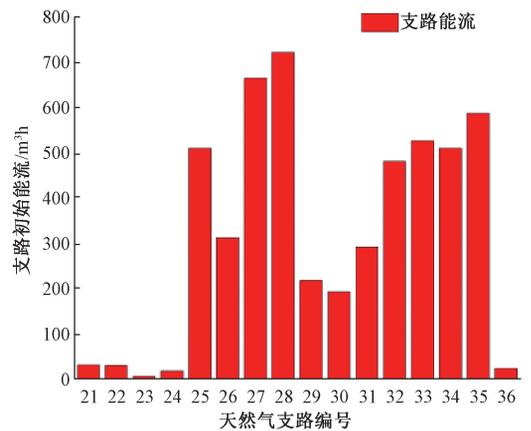
#### 4.2 RIES N-1 开断事件的影响

对 RIES 的预想事故集进行模拟,各网络的运行状态发生变化,系统的能流也会因不同事故有着不同的波动情况,具体能流变化情况如图 5 所示。其中支路 1、支路 41 支

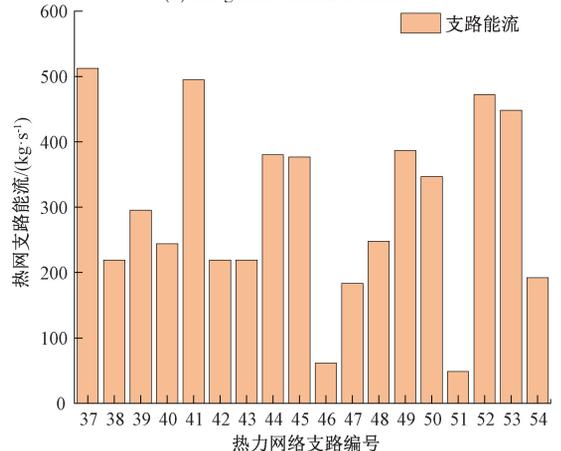
路 7 与支路 25 的颜色最深,即开断造成的波动幅度最大,为更好的对电-气-热网络内部进行分析,本文对支路 1、41 与支路 25 这 3 条脆弱支路的断开所造成的影响进行分析。具体如图 6~8 所示。



(a) 电力网络能流结果  
(a) The power network flow results



(b) 天然气网络能流结果  
(b) The gas network flow results



(c) 热力网络能流结果  
(c) The thermal network flow results

图4 初始运行状态结果

Fig. 4 Initial operating state results

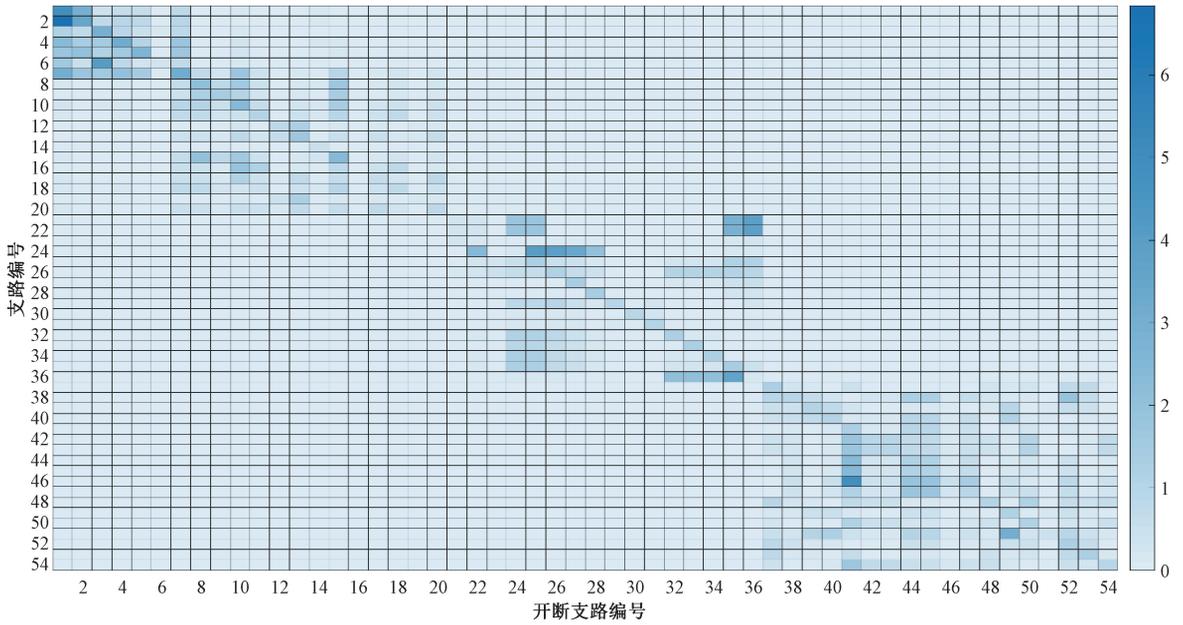


图 5 各支路 N-1 开断下热图

Fig. 5 Heat map of branch outages under N-1 conditions

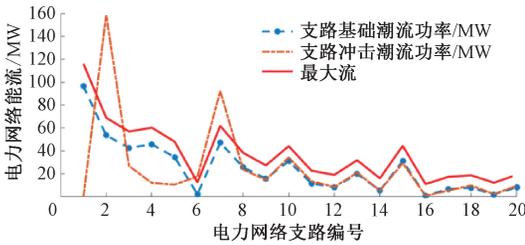


图 6 支路 1 开断情况

Fig. 6 Branch 1 outage scenario

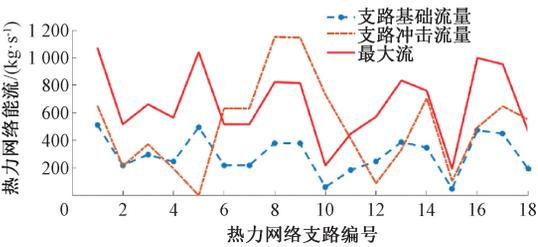


图 7 支路 41 开断情况

Fig. 7 Branch 41 outage scenario

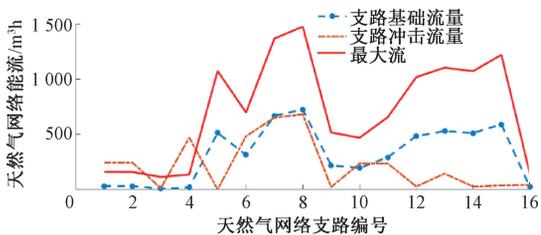


图 8 支路 25 开断情况

Fig. 8 Branch 25 outage scenario

由于支路 1 毗邻电源,该支路断开后发生能流转移使与之相连的支路 2 发生能流越限,从而间接导致支路 7 发生越限现象,同时节点 2 连接燃气轮机,由于受到该机组稳定供电的影响,使得支路 3、4 与支路 5 在能流重新分配过程中虽然有一定的能流波动,但因远离电源,波动相对较小且最终趋于稳定。

由图 7 可知,支路 41(热网支路 5)的断开使得热力网络重新分配能流,特别是由于支路 5 处于 CHP 机组近端,其断开会迫使其他支路承受额外的负载,导致多条支路能流越限。在其退出运行后,造成热网中支路 6~11 与支路 18 等发生能流越限,表明这些支路承受了更大的能量传输负担,而支路 10~12 的冲击能流下降表明整个网络正在重新调整以适应支路 5 断开的影。

由图 8 可知,支路 25(天然气支路 5)处于压缩机支路,同时处于气源近端又紧邻燃气轮机,该支路的断开,使得天然气支路 1 与支路 2 以及支路 4 发生不同程度的能流越限,因为它们都毗邻气源,压缩机支路的断开导致天然气增压环节持续降压,最终导致能流越限。

### 4.3 脆弱支路辨识结果

本文结合 N-1 开断后能流的影响,计算 RIES 中所有支路的脆弱度指标,结果如图 9 所示。识别结果脆弱性较大的几条支路主要处于电源、气源以及耦合环节测,这是因为这些支路断开后造成大量的能流转移,使得剩余系统支路的能流发生越限,进一步导致系统所承受的能流冲击的能力变差。

根据本文脆弱支路仿真结果,取脆弱度较大的前 10 条支路,具体相对应的综合脆弱度指标值结果如表 2 所示。

表2 脆弱支路识别结果

Table 2 Vulnerable branch identification results

序号	支路编号	综合脆弱度指标
1	1	0.549 6
2	41	0.549 1
3	10	0.506 9
4	7	0.501 0
5	3	0.471 4
6	5	0.466 6
7	8	0.461 1
8	15	0.426 5
9	12	0.397 7
10	25	0.362 0

## 4.4 对比分析

在现有文献关于脆弱支路辨识中,相较于其他文献以电-气综合能源系统为研究对象,文献[11]采用复杂网络理论从静态拓扑结构的角对电-气-热综合能源系统的脆弱支路进行识别,因此带权重线路介数法适用于电-气-热网络,具有较强的典型性。基于14-14-14RIES结构图采用带权重线路介数法<sup>[11]</sup>分别得到如表2的线路排序结果,具体的结果如表3所示。

表3 支路对比结果

Table 3 Branch comparison results

序号	本文方法	带权重线路介数法
1	1(0.549 6)	10(0.718 6)
2	41(0.549 1)	24(0.637 1)
3	10(0.506 9)	41(0.615 0)
4	7(0.501 0)	1(0.576 3)
5	3(0.471 4)	7(0.559 4)

由表3可知,支路1在带权重线路介数法中的排名较低,表明传统方法仅依赖于拓扑结构和最短路径的频率进行分析,忽视了该支路在综合能源系统中的实际能流变化和负载情况。而本文方法则将运行状态中的能流变化的影响纳入考虑,将该支路识别为系统中重要的脆弱线路。这说明,支路1虽然在拓扑结构中并不占据核心位置,但在系统运行时承载了重要的能流分配,一旦该线路失效,可能引发更大范围的能源供给不平衡。而支路10虽然在带权重线路介数法中被认为是脆弱线路(排名靠前),但通过本文方法的分析,发现其在实际运行中的能量变化相对稳定,脆弱性相对较低,因此本文方法对其排名有所下降。这说明,传统方法难以准确反映运行状态对线路脆弱性的影响,而本文方法能够结合系统的实际运行情况,综合考量能流分配和拓扑结构的重要性,更为合理地评估线路脆弱性。

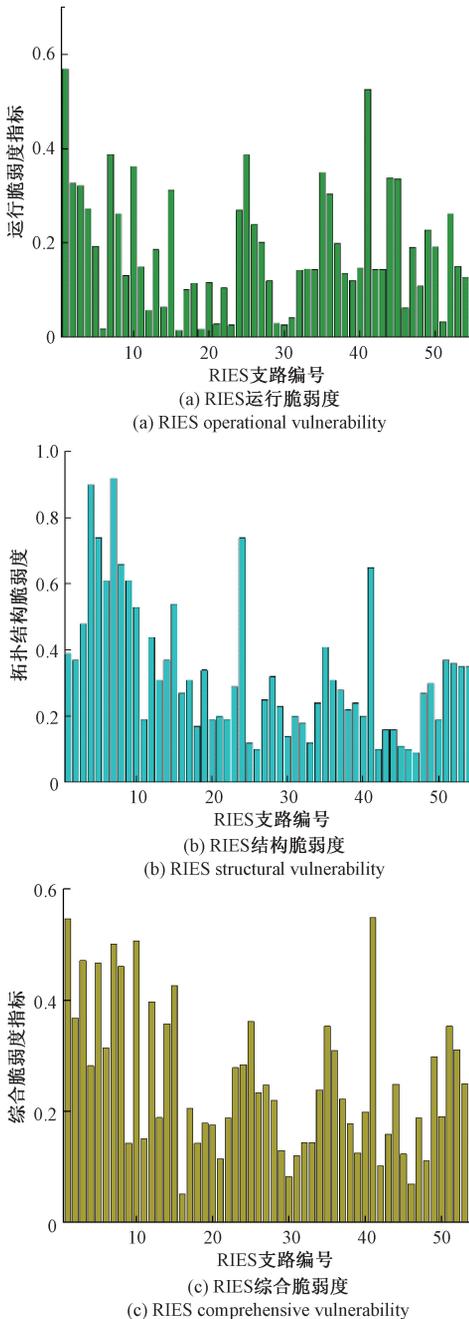


图9 支路辨识结果

Fig. 9 Branch identification results

由表2可知,紧邻电源、气源、以及网络中心的支路能流变化熵最高,因为这些线路起到中继的作用,一旦断开会对上下游的支路造成较大的能流转移,从而导致其他支路发生越限。支路1的综合脆弱度指标最大,此支路的断开会对系统的稳定运行造成较大的风险,因此这条支路最为脆弱,应对这条支路予以高度重视,预防事故的发生,并设置相应的安全预防方案,降低事故发生后的危害性强度与蔓延范围。

为验证本文方法有效性,本文采用粒子群优化权重算法与文献[12]的固定比例进行对比,具体如表 4 所示。

表 4 取不同权重时支路脆弱度排序

Table 4 Vulnerable line identification results

序号	本文方法	固定权重 50%	固定 $\lambda_v$ 取 60%
1	1(0.549 6)	7(0.645 1)	41(0.575 7)
2	41(0.549 1)	41(0.588 1)	7(0.573 0)
3	10(0.506 9)	4(0.586 3)	1(0.498 3)
4	7(0.501 0)	24(0.505 2)	4(0.483 6)
5	3(0.471 4)	1(0.480 2)	24(0.458 3)
6	5(0.466 6)	5(0.466 6)	10(0.429 3)
7	8(0.461 1)	8(0.461 1)	8(0.421 3)
8	15(0.426 5)	10(0.446 1)	5(0.412 0)
9	12(0.397 7)	15(0.426 4)	15(0.403 8)
10	25(0.362 0)	3(0.400 9)	3(0.385 2)

表 4 中的脆弱度排名结果展示了不同权重分配策略下,各支路的脆弱度值。在固定权重情况下,随着运行脆弱度权重  $\lambda_v$  的增大,支路脆弱度的排序结果逐渐向运行脆弱度高的支路倾斜。例如,支路 41 在运行脆弱度较大时,其排名从固定权重 50% 的第 2 位(脆弱度为 0.588 1)显著提升至固定权重 60% 时的第 1 位(脆弱度为 0.575 7)。这表明在固定权重分配中,过高的权重会使某些运行脆弱度较大的支路被错误地识别为高脆弱度支路而忽略了拓扑结构的重要度。相比之下,本文所采用的粒子群优化方法通过自动化权重优化,综合考虑了支路的运行脆弱度和拓扑结构脆弱度,能够更全面地反映支路的实际脆弱性。例如,支路 1 和支路 41 在本文方法中的排名更为合理且符合系统的实际情况,而采用固定权重时这些支路的脆弱度被放大或缩小,导致识别结果失真。

因此,粒子群优化算法不仅能够自动确定最佳权重组合,减少人为干预,能更好地反映系统中各支路的综合脆弱度。该算法在不同情况下都能保持较高的识别准确性和客观性,尤其是在复杂系统中具有较大的应用优势。通过本文方法,支路 1、41、10 的脆弱度识别结果更加符合实际,表明该方法在支路脆弱度评估中表现优越。

## 5 结 论

本文从系统的运行状态和拓扑结构两个角度出发,提出了综合脆弱度指标,并通过粒子群算法对支路权重进行优化。利用该综合脆弱度指标对脆弱支路进行排序,并深入分析了热网与电网支路断开后对系统内部的影响。结果表明,综合考虑系统的状态与结构参数,不仅反映了各支路在系统结构中的重要性,还有效描述了电-气-热能流的分布特征,使分析结果更加贴近系统的实际运行情况。基于粒子群算法的权重优化使综合脆弱度指标能够更加

客观地识别脆弱支路,克服了固定比例权重对系统复杂性考虑不足的缺陷。此研究为 RIES 的规划和降低大规模故障的风险提供了参考依据,也为未来的研究工作奠定了基础。

## 参考文献

- [1] 邹嘉嘉,曾诚玉,赵瑾,等.用户级综合能源仿真分析系统研究与开发[J].电力系统保护与控制,2020,48(3):180-187.  
XUN J J, ZENG CH Y, ZHAO J, et al. Research and development of user-level integrated energy simulation analysis system [J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 180-187.
- [2] CHEN Z, WU J, XIA Y, et al. Robustness of interdependent power grids and communication networks: A complex network perspective[J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs, 2017, 65(1): 115-119.
- [3] 陈彬彬,孙宏斌,陈瑜玮,等.综合能源系统分析的统一能路理论(一):气路[J].中国电机工程学报,2020,40(2):436-444.  
CHEN B B, SUN H B, CHEN Y W, et al. Unified energy route theory for integrated energy system analysis ( I ): Gas route [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2020, 40(2): 436-444.
- [4] 陈彬彬,孙宏斌,尹冠雄,等.综合能源系统分析的统一能路理论(二):水路与热路[J].中国电机工程学报,2020,40(7):2133-2142.  
CHEN B B, SUN H B, YIN G X, et al. Unified energy route theory for integrated energy system analysis ( II ): Water route and thermal route [J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2020, 40(7): 2133-2142.
- [5] 张弘历,李华强,杨植雅,等.基于潮流增长率泰尔熵的脆弱支路辨识[J].电网技术,2017,41(7):2340-2346.  
ZHANG H L, LI H Q, YANG ZH Y, et al. Identification of vulnerable branches based on theil entropy of power flow growth rate[J]. Power System Technology, 2017, 41(7): 2340-2346.
- [6] BOMPARD E, NAPOLI R, XUE F. Analysis of structural vulnerabilities in power transmission grids[J]. International Journal of Critical Infrastructure Protection, 2009, 2(1-2): 5-12.
- [7] 李勇,刘俊勇,刘晓宇,等.基于潮流熵测度的连锁故障脆弱线路评估及其在四川主干电网中的应用[J].电力自动化设备,2013,33(10):40-46.  
LI Y, LIU J Y, LIU X Y, et al. Assessment of vulnerable lines in cascading failures based on power

- flow entropy measure and its application in the Sichuan backbone power grid[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2013, 33(10): 40-46.
- [8] 鞠文云,李银红.基于最大流传输贡献度的电力网关键线路和节点辨识[J]. *电力系统自动化*, 2012, 36(9): 6-12.
- JU W Y, LI Y H. Identification of critical lines and nodes in power grid based on maximum flow transmission contribution[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2012, 36(9): 6-12.
- [9] 吴昊,朱自伟.基于熵权-层次分析法综合指标的电网关键线路辨识[J]. *中国电力*, 2020, 53(5): 39-47.
- WU H, ZHU Z W. Identification of critical lines in power grid based on entropy wight and AHP comprehensive Index [J]. *Electric Power*, 2020, 53(5): 39-47.
- [10] 潘华,肖雨涵,梁作放,等.基于复杂网络的电-气-热综合能源系统健壮性分析[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(8): 104-112.
- PAN H, XIAO Y H, LIANG Z F, et al. Robustness analysis of integrated electricity-gas-heat energy systems based on complex networks [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(8): 104-112.
- [11] 黄奎安,张一雄,郑涛,等.基于复杂网络的综合能源系统脆弱环节辨识[J]. *智慧电力*, 2021, 49(1): 29-34.
- HUANG K AN, ZHANG Y X, ZHENG T, et al. Identification of vulnerable components in integrated energy systems based on complex networks[J]. *Smart Electric Power*, 2021, 49(1): 29-34.
- [12] 南璐,何川,刘天琪.考虑风光出力不确定性的电-气互联系统脆弱线路辨识[J]. *中国电机工程学报*, 2022, 42(2): 524-537.
- NAN L, HE CH, LIU T Q. Identification of vulnerable lines in electric-gas interconnected systems considering the uncertainty of wind and solar power output[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2022, 42(2): 524-537.
- [13] 徐冰燕.基于复杂网络理论的综合能源系统安全分析与评估研究[D].南京:东南大学,2022.
- XU B Y. Research on security analysis and evaluation of integrated energy systems based on complex network theory[D]. Nanjing: Southeast University, 2022.
- [14] 荣以平,刘玉娇,李国亮,等.基于综合能源系统 N-1 静态安全评估的燃气轮机接入规划策略[J]. *山东电力技术*, 2023, 50(6): 27-33.
- RONG Y P, LIU Y J, LI G L, et al. Gas turbine integration planning strategy based on N-1 static security assessment of integrated energy systems[J]. *Shandong Electric Power Technology*, 2023, 50(6): 27-33.
- [15] 马瑞,王大朔.考虑天然气 N-1 的多能流系统静态安全耦合分析[J]. *中国电机工程学报*, 2019, 39(6): 1627-1636.
- MA R, WANG D SH. Static security coupling analysis of multi-energy flow systems considering N-1 in natural gas[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2019, 39(6): 1627-1636.
- [16] 李雪,孙霆皓,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 X, SUN T K, HOU K, et al. Research on resilience assessment methods of island integrated energy systems under earthquake disasters [J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2020, 40(17): 5476-5493.
- [17] 王舒萍,张沈习,程浩忠,等.考虑天然气系统初值优化的综合能源系统改进多能流计算方法[J]. *电力自动化设备*, 2022, 42(1): 28-36.
- WANG SH P, ZHANG SH X, CHENG H ZH, et al. Improved multi-energy flow calculation method for integrated energy systems considering initial value optimization of natural gas systems[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2022, 42(1): 28-36.
- [18] 陈彬彬,孙宏斌,吴文传,等.综合能源系统分析的统一能路理论(三):稳态与动态潮流计算[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(15): 4820-4831.
- CHEN B B, SUN H B, WU W CH, et al. Unified energy circuit theory for integrated energy system analysis(III): Steady-state and dynamic power flow calculation[J]. *Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering*, 2020, 40(15): 4820-4831.
- [19] 刘述欣,戴赛,胡林献,等.计及回水管网热损失的电热联合系统潮流模型及算法[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(4): 77-81.
- LIU SH X, DAI S, HU L X, et al. Power flow model and algorithm for electric-heat combined system considering heat loss in return water network [J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(4): 77-81.
- [20] 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 Y R, ZENG B, GUO J, et al. Multi-energy flow calculation method for integrated electric-heat-gas energy systems[J]. *Power System Technology*, 2016, 40(10): 2942-2951.
- [21] 郑惠萍,赵兴泉,芦晓辉,等.考虑源荷不确定性的电力

- 系统薄弱环节辨识方法[J]. 太原理工大学学报, 2024, 55(1): 12-19.
- ZHENG H P, ZHAO X Q, LU X H, et al. Method for identifying weak links in power systems considering uncertainties in source and load [J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2024, 55(1): 12-19.
- [22] 张鹏飞, 刘朋熙, 章爱武, 等. 基于粒子群算法的电网资源最优匹配方法[J]. 自动化技术与应用, 2024, 43(5): 27-31.
- ZHANG P F, LIU P X, ZHANG AI W, et al. Optimal matching method for power grid resources based on particle swarm optimization algorithm [J]. Automation Technology and Application, 2024, 43(5): 27-31.
- [23] 丁梁, 黄建杨, 徐恩, 等. 考虑复杂环境特性的电网线路脆弱性综合评估与结构优化分析[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(13): 105-113.
- DING L, HUANG J Y, XU EN, et al. Comprehensive assessment and structural optimization analysis of power grid line vulnerability considering complex environmental characteristics [J]. Power System Protection and Control, 2021, 49 (13): 105-113.
- [24] 陈厚合, 邵俊岩, 姜涛, 等. 基于多能流解耦算法的综合能源系统 N-1 静态安全分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 20-27.
- CHEN H H, SHAO J Y, JIANG T, et al. Static security analysis of integrated energy systems N-1 based on multi-energy flow decoupling algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 20-27.

### 作者简介

赵璐豪, 硕士研究生, 主要研究方向为区域综合能源系统。

E-mail: 492551457@qq.com

崔双喜(通信作者), 博士, 副教授, 主要研究方向为新能源发电及优化控制。

郑丁园, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统优化。