

# 基于安全域的区域综合能源系统安全预警方法

肖峻<sup>1</sup>, 孙纲<sup>1</sup>, 宋晨辉<sup>2</sup>, 王丹<sup>1</sup>, 莫少雄<sup>3</sup>

(1. 智能电网教育部重点实验室(天津大学), 天津市 南开区 300072; 2. 长沙理工大学电气与信息工程学院, 湖南省 长沙市 410114; 3. 中船智海创新研究院有限公司, 北京市 大兴区 100036)

## A Security Early Warning Method based on Security Region for Regional Integrated Energy System

XIAO Jun<sup>1</sup>, SUN Gang<sup>1</sup>, SONG Chenhui<sup>2</sup>, WANG Dan<sup>1</sup>, MO Shaoxiong<sup>3</sup>

(1. Key Laboratory of Smart Grid Ministry of Education (Tianjin University), Nankai District, Tianjin 300072, China; 2. School of Electrical and Information Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410114, Hunan Province, China; 3. CSSC Intelligent Innovation Research Institute Co., Ltd., Daxing District, Beijing 100036, China)

**ABSTRACT:** Based on the security region theory, this paper proposes a relatively complete security early warning process for regional integrated energy system (RIES). First, this paper constructs the RIES security region model and introduces the RIES security boundary calculation method, including the AC security boundary and DC security boundary. Then, fuzzy inference and fuzzy comprehensive evaluation methods are introduced to assess the severity of violation in early warning. Next, the security early warning method is proposed, which comprehensively considers the  $N-0$  and  $N-1$  security to send the early warning or alarm signals. The method proposed includes the selection and assessment of early warning indices, the level classification of security early warning, the analysis of early warning, and the prediction of security trend. Finally, the effectiveness of the proposed method is tested on case studies. The security early warning method proposed in this paper has important application value for improving the security management and control ability of RIES.

**KEY WORDS:** regional integrated energy system; security early warning; security region; fuzzy inference; fuzzy comprehensive evaluation

**摘要:** 该文基于安全域理论提出一套较完整的区域综合能源系统(regional integrated energy system, RIES)安全预警流程。首先,建立 RIES 安全域模型并给出 RIES 安全边界计算方法,包括交流安全边界与直流安全边界。其次,介绍模糊推理与模糊综合评判方法,用于预警中评估越限的严重程度。再次,

提出 RIES 预警方法,能综合考虑系统  $N-0$  与  $N-1$  安全性从而发出预警或告警信号。该方法包括预警指标选取与评判、安全预警分级、预警原因分析、安全趋势预测等步骤。最后,用算例验证该方法的有效性。可知,该文提出的安全预警方法对于提升 RIES 的安全管控能力,具有一定应用价值。

**关键词:** 区域综合能源系统; 安全预警; 安全域; 模糊推理; 模糊综合评判

## 0 引言

区域综合能源系统(regional integrated energy system, RIES)由中低压配电网、中低压天然气管网、热力管网等供能网络耦合互联构成<sup>[1]</sup>。RIES 具有能源梯级利用、绿色低碳耗能等特点<sup>[2]</sup>,是能源系统的重要发展方向。发挥 RIES 系统优势,安全稳定是前提。随着多能耦合程度的提高,局部的波动与故障会通过能流在不同耦合子网中传递,进而影响整个系统安全<sup>[3]</sup>。当系统正常运行时,应根据运行点发展态势进行安全预警,以提前采取预防措施,保证系统安全。

预警含义为对某一“事件”的现状和未来进行测度,预报系统未来状态及“事件”影响范围等<sup>[4]</sup>。在工业领域中,“事件”通常为不安全因素,如故障。预警在故障之前,预警信息可供调度人员参考,从而提前采取措施保障故障发生后系统仍能维持安全运行。Dy-Liacco 提出电力系统安全运行框架<sup>[5]</sup>。安全预警是框架中的一个高级功能,能量管理系统根据实时数据或预测数据确定系统安全状态,在有必要时发出预警信号。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52307079); 中国南方电网有限责任公司科技项目(GXKJXM20222221)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52307079); Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (GXKJXM20222221).

在电力系统领域中,安全预警研究较为成熟。文献[6]提出一种基于综合模糊评判方法的电压预警方法。文献[7]基于模糊聚类和模糊推理方法,实现考虑静态安全的电网连锁故障风险预警分级。文献[8]考虑多时间尺度,提出一种基于数据动态安全滚动预警方法。文献[9]针对频率安全,提出一种基于改进残差网络的多级预警模型。

“域”方法的出现大大推进安全预警的研究。对于拓扑结构确定的系统,安全域是唯一确定的,因此“域”方法可根据运行点与安全域的位置关系,描述系统可行范围与安全裕度相关信息。相对于传统逐点法,“域”方法的安全评价更加方便与快速,为在线安全预警提供技术支撑。在电力系统领域,基于“域”的预警取得大量成果。文献[10]基于安全域进行概率动态安全评估,预测系统不安全概率的变化情况,帮助调度人员预知系统未来的变化。文献[11]在文献[10]的基础上,基于能量管理系统(energy management system, EMS)提出输电网在线概率安全分析框架,具备安全监视与预警功能。文献[12]基于  $N-1$  静态安全距离提出电力系统态势感知框架,预测安全态势的变化趋势,若趋向不安全,则发出预警信号。文献[13-14]在配电网管理系统(distribution management system, DMS)基础上,提出基于安全域的配电网监测、预警、预防、预测及优化控制的功能框架,通过实时计算运行点与安全边界的安全距离进行安全预警。文献[15]基于安全距离进行配电网安全态势预测,得到安全性变化趋势,为运行人员提供预警信息。

目前,“域”方法在 RIES 安全分析中也有初步应用。文献[16]假设节点参数安全,提出 RIES 实用化安全边界模型与降维观测方法。文献[17]基于实用化安全边界模型对 RIES 安全运行进行瓶颈分析。文献[18]提出含电动汽车的时变 RIES 安全域模型与降维观测方法,对不安全运行点进行预防控制。文献[19]提出含可再生能源的 RIES 安全域模型并对运行点进行最优控制。文献[20-21]提出含可再生能源的 RIES 区间化安全域模型,并进行全维观测以及几何特征优化分析。上述 RIES 安全域研究为其安全预警奠定基础,但仅得到运行点安全性判断结果,未涉及系统预警等级、原因分析与安全趋势等安全预警的核心内容。目前,RIES 的安全预警研究非常缺乏。文献[22]提出一种 RIES 风险预警等级预测方法,但未得到过载元件、越限参数及预

警原因分析等关键信息。

本文提出基于安全域与模糊理论的 RIES 安全预警方法,包括预警指标选取与评判、预警等级确定、预警原因分析及安全趋势预测等较完整预警内容和流程,并用算例验证方法的有效性。本文符号清单见附录 A。

## 1 RIES 安全域建模及安全边界计算

### 1.1 研究条件

本文研究考虑 2 个前提条件:

1) 在 RIES 的安全研究中,静态安全分析是最基本的问题,现有研究关注点也主要集中在静态安全分析<sup>[16-21]</sup>,因此本文针对静态安全问题展开研究。

2)  $N-1$  准则作为安全分析方法被广泛应用于电力系统<sup>[12-15]</sup>与综合能源系统<sup>[16-21]</sup>中,故本文在正常运行的  $N-0$  安全基础上考虑  $N-1$  安全。预想事故集选取同文献[16],为主变压器、热电联产机组(combined heat and power, CHP)等能量枢纽关键供能元件及关键线路出口的故障。

### 1.2 RIES 安全域模型

RIES 安全域根据系统满足的安全约束可分为  $N-0$  安全域与  $N-1$  安全域。

RIES 的  $N-0$  安全域为系统运行需满足的所有  $N-0$  安全约束的运行点集合<sup>[23]</sup>。RIES 的  $N-1$  安全域为系统运行需的满足所有  $N-1$  安全约束的运行点集合<sup>[16]</sup>。运行点记为  $W_s$ 。

#### 1.2.1 $N-0$ 安全域模型

配电系统(power distribution system, PDS) $N-0$  安全域模型<sup>[23-24]</sup> $\Omega_{\text{PDS-SR0}}$ 及其约束条件如式(1)~(5)所示。

$$\Omega_{\text{PDS-SR0}} = \{W_s | h_{0,e}(W_s) = 0, g_{0,e}(W_s) \leq 0\} \quad (1)$$

$$\begin{cases} P_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \cos \theta_{ij} + B_{ij} \sin \theta_{ij}) \\ Q_i = U_i \sum_{j \in i} U_j (G_{ij} \sin \theta_{ij} - B_{ij} \cos \theta_{ij}) \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} P_i = P_{D,i} - P_{G,i} + \sum_{j=1}^{n_e} P_{ij} \\ Q_i = Q_{D,i} - Q_{G,i} + \sum_{j=1}^{n_e} Q_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

$$L_{\text{ossij}}^e = (P_{ij}^2 + Q_{ij}^2) / [U_i^2 \cdot (G_{ij} + jB_{ij})] \quad (4)$$

$$U_i^{\min} \leq U_i \leq U_i^{\max}, S_{ij} \leq S_{ij}^{\max}, S_T \leq S_T^{\max} \quad (5)$$

式(1)为 $\Omega_{\text{PDS-SR0}}$ 表达式。式中: $h_{0,e}(W_s)=0$ 和 $g_{0,e}(W_s) \leq 0$ 分别为配电系统  $N-0$  安全满足的等式(式

(2)–(4)和不等式约束式(5)； $e$  表示电能。

式(2)为交流潮流方程等式约束。式中： $i, j$  为节点； $P_i$  和  $Q_i$  分别为向节点  $i$  注入的有功功率和无功功率； $U_i$  为节点  $i$  电压幅值； $G_{ij}$  和  $B_{ij}$  为线路  $ij$  的电导和电纳； $\theta_{ij}$  为节点  $i, j$  电压相角差。

式(3)为功率平衡等式约束。式中： $P_{D,i}$  和  $Q_{D,i}$  分别为负荷节点  $i$  的有功和无功功率； $P_{G,i}$  和  $Q_{G,i}$  分别为电源向节点  $i$  注入的有功和无功功率； $n_e$  为与节点  $i$  相连节点的数目； $P_{ij}$  和  $Q_{ij}$  分别为节点  $i$  向节点  $j$  传输的有功和无功功率。

式(4)为功率损耗方程等式约束。式中  $L_{\text{oss}ij}^e$  为线路  $ij$  的电功率损耗。

式(5)为电压幅值、线路容量与主变容量不等式约束。式中  $S_{ij}$  与  $S_T$  分别为线路  $ij$  与主变  $T$  的视在功率。

天然气系统(natural gas system, NGS) $N-0$  安全域模型<sup>[25]</sup> $\Omega_{\text{NGS-SR0}}$  及其约束条件如式(6)–(10)所示。

$$\Omega_{\text{NGS-SR0}} = \{W_s | h_{0,g}(W_s) = \mathbf{0}, g_{0,g}(W_s) \leq \mathbf{0}\} \quad (6)$$

$$\begin{cases} f_{ij} = \eta_{ij} \text{sign}(\pi_i, \pi_j) \sqrt{\pi_i^2 - \pi_j^2} \\ \eta_{ij} = \sqrt{T_0 d_{ij}^5 / (1.62 \rho p_0 T Z l_{ij} \lambda_{ij})} \\ \lambda_{ij} = 9.407 / \sqrt[3]{d_{ij}} \end{cases} \quad (7)$$

$$\begin{cases} \sum_{j \in i} f_{ij} = f_i \\ \sum_{ij \in l_n} \Delta \pi_{ij} = 0 \end{cases} \quad (8)$$

$$f_{ij} \leq f_{ij}^{\max}, \pi_i^{\min} \leq \pi_i \leq \pi_i^{\max} \quad (9)$$

$$P_C = \frac{3 \times 10^{-5} p_0 \lambda_C Z T f_{ij} (H_C^{(\lambda_C-1)/\lambda_C} - 1)}{\eta_C T_0 (\lambda_C - 1)} \quad (10)$$

式(6)为 $\Omega_{\text{NGS-SR0}}$  表达式。式中： $h_{0,g}(W_s) = \mathbf{0}$  和  $g_{0,g}(W_s) \leq \mathbf{0}$  分别为天然气系统  $N-0$  安全满足的等式(式(7)、(8)、(10))和不等式约束式(9)； $g$  表示气能。

式(7)为管道气流量方程<sup>[27]</sup>。式中： $f_{ij}$  为管道  $ij$  流量； $\eta_{ij}$  为管道常数； $T_0$  为标准温度； $p_0$  为标准大气压； $d_{ij}$  为管径； $\rho$  为天然气密度； $T$  为天然气温度； $Z$  为压缩因子； $l_{ij}$  为管道长度； $\lambda_{ij}$  为气体绝热常数； $\pi_i$  为节点  $i$  压力；符号函数  $\text{sign}(\cdot)$  表示流量方向。

式(8)为气流量与回路压力平衡等式约束。式中： $f_i$  为注入节点  $i$  的气流量； $j \in i$  表示节点  $j, i$  相连； $ij \in l_n$  表明管道  $ij$  属于回路  $l_n$ ； $\Delta \pi_{ij}$  为压降。

式(9)为管道气容量与气压的不等式约束。

式(10)为压缩机耦合约束<sup>[28]</sup>。式中： $P_C$  为压缩机耗电功率； $\eta_C$  为效率； $\lambda_C$  为比热率； $H_C$  为压缩比。

热力系统(district heating system, DHS) $N-0$  安全域模型<sup>[26]</sup> $\Omega_{\text{DHS-SR0}}$  及其约束条件如式(11)–(17)所示。

$$\Omega_{\text{DHS-SR0}} = \{W_s | h_{0,h}(W_s) = \mathbf{0}, g_{0,h}(W_s) \leq \mathbf{0}\} \quad (11)$$

$$\begin{cases} A_h M = M_i \\ B_h h_f = 0 \\ h_f = K M |M| \end{cases} \quad (12)$$

$$\begin{cases} \phi_i = C_p m_i (T_{Si} - T_{Oi}) \\ T_{\text{end}} = (T_{\text{start}} - T_a) e^{-\lambda_k l_k / (C_p m_k)} + T_a \\ (\sum m_{\text{out}}) T_{\text{out}} = \sum (m_{\text{in}} T_{\text{in}}) \end{cases} \quad (13)$$

$$L_{\text{oss}k}^h = C_p m_k (T_{\text{start}} - T_{\text{end}}) \quad (14)$$

$$\begin{cases} \phi_{ij} \leq \phi_{ij}^{\max} \\ T_{Oi}^{\min} \leq T_{Oi} \leq T_{Oi}^{\max} \\ T_{Si}^{\min} \leq T_{Si} \leq T_{Si}^{\max} \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} 0 \leq P_{\text{CHP}} \leq P_{\text{CHPm}} \\ 0 \leq \phi_{\text{CHP}} \leq \phi_{\text{CHPm}} \\ c_m \phi_{\text{CHP}} \leq P_{\text{CHP}} \leq P_{\text{CHPm}} - c_u \phi_{\text{CHP}} \end{cases} \quad (16)$$

$$\begin{cases} \phi_{\text{GB}} = \eta_{\text{GB}} F_{\text{GB}} \\ \phi_{\text{GB}} \leq \phi_{\text{GBm}} \end{cases} \quad (17)$$

式(11)为 $\Omega_{\text{DHS-SR0}}$  表达式。 $h_{0,h}(W_s) = \mathbf{0}$  和  $g_{0,h}(W_s) \leq \mathbf{0}$  分别为热力系统  $N-0$  安全满足的等式和不等式约束； $h$  表示热能。

式(12)为水力方程等式约束<sup>[29]</sup>。式中： $A_h$  为节点-支路关联矩阵； $M$  为管道水流量向量； $M_i$  为注入节点  $i$  的水流量向量； $B_h$  为回路-支路关联矩阵； $h_f$  为管道压降向量； $K$  为管道阻力系数矩阵。

式(13)为热力方程等式约束<sup>[29]</sup>。式中： $\phi_i$  为节点  $i$  热负荷； $m_i, m_k$  为节点  $i$  和管道  $k$  水流量； $T_{\text{end}}, T_{\text{start}}$  为管道终点和起点的温度； $m_{\text{out}}, m_{\text{in}}$  为流出和流入节点水流量； $T_{\text{out}}, T_{\text{in}}$  为流出和流入管道温度； $C_p$  为比热容； $T_a$  为环境温度； $\lambda_k$  为传热系数。

式(14)为管道热损耗方程等式约束<sup>[29]</sup>。式中  $L_{\text{oss}k}^h$  为管道  $k$  的热损耗。

式(15)为管道热容量与节点温度的不等式约束。式中  $T_{Si}, T_{Oi}$  分别为节点  $i$  的供水温度和回水温度。

式(16)为抽汽式 CHP 机组耦合约束<sup>[16]</sup>。式中：

$P_{\text{CHPm}}$ 为电功率上限； $\phi_{\text{CHPm}}$ 为热功率上限； $c_m$ 为电热比率下限； $c_u$ 为电热比率上限。

式(17)为燃气锅炉(gas boiler, GB)耦合约束<sup>[30]</sup>。式中： $\phi_{\text{GB}}$ 为GB输出热功率； $\eta_{\text{GB}}$ 为效率； $F_{\text{GB}}$ 为所需燃料的能量； $\phi_{\text{GBm}}$ 为GB输出热功率上限。

RIES的N-0安全域模型由 $\Omega_{\text{PDS-SR0}}$ (式(1)–(5))、 $\Omega_{\text{NGS-SR0}}$ (式(6)–(10))和 $\Omega_{\text{DHS-SR0}}$ (式(11)–(17))共同组成。考虑到上述模型包含多种异质能流，较为烦琐。因此，本文采用N-0安全域的统一能流模型，记为 $\Omega_{\text{RIES-SR0}}$ ，模型见式(18)–(21)。统一的含义是将各能流负荷(电、气、热)统一为 $L_k^a$ ，将各子系统参数(电压、气压、温度)统一为 $p_k$ 。此时线路所带负荷的等式约束可统一为式(19)；供能元件所带负荷的等式约束可统一为式(20)；线路容量不等式约束可统一为式(21)；供能元件容量不等式约束可统一为式(22)；节点参数不等式约束可统一为式(23)。

$$\Omega_{\text{RIES-SR0}} = \{W_s | h_0(W_s) = \mathbf{0}, g_0(W_s) \leq \mathbf{0}\} \quad (18)$$

$$L_k^a = \begin{cases} \sum L_k^e + L_{\text{ossk}}^e, & a=e \\ L_k^g, & a=g \\ L_k^h + L_{\text{ossk}}^h, & a=h \end{cases} \quad (19)$$

$$L_b = \sum_{k \in Y_b} L_k^a \quad (20)$$

$$L_k^a \leq C_k \quad (21)$$

$$L_b \leq C_b \quad (22)$$

$$p_{\min} \leq p_k \leq p_{\max} \quad (23)$$

式(18)为 $\Omega_{\text{RIES-SR0}}$ 表达式。式中 $h_0(W_s) = \mathbf{0}$ 和 $g_0(W_s) \leq \mathbf{0}$ 分别为N-0安全时RIES需满足的等式(式(19)–(20))和不等式约束(式(21)–(23))。

式(19)为线路所带负荷等式约束。式中： $L_k^a$ 为线路 $k$ 负荷，包含电负荷 $L_k^e$ 、气负荷 $L_k^g$ 与热负荷 $L_k^h$ 。

式(20)为能量枢纽供能元件所带负荷等式约束。式中： $L_b$ 为供能元件 $b$ 所带负荷； $Y_b$ 为 $b$ 出口线路的集合； $k \in Y_b$ 表示线路 $k$ 出自供能元件 $b$ 。

式(21)为线路容量约束。式中 $C_k$ 为线路 $k$ 的容量。

式(22)为供能元件容量约束。式中 $C_b$ 为 $b$ 的容量。

式(23)与线路节点参数约束。式中 $p_k$ 为线路 $k$ 上的节点参数，如电压、气压或温度。

## 1.2.2 N-1安全域模型

N-1安全域采用统一能流模型(记为 $\Omega_{\text{RIES-SR}}$ )<sup>[16]</sup>，并在文献[16]模型基础上考虑损耗，所得模型见式(24)–(28)。

$$\Omega_{\text{RIES-SR}} = \{W_s | h_1(W_s) = \mathbf{0}, g_1(W_s) \leq \mathbf{0}\} \quad (24)$$

$$L_k^a = \begin{cases} \sum L_k^{e,\text{shift}} + L_{\text{ossk}}^e, & a=e \\ L_k^{g,\text{shift}}, & a=g \\ L_k^{h,\text{shift}} + L_{\text{ossk}}^h, & a=h \end{cases} \quad (25)$$

$$L_{b_1 b_2}^{a,\text{shift}} = \begin{cases} \sum_{k_1 \in Y_{b_1}, k_2 \in Y_{b_2}} L_{k_1 k_2}^{e,\text{shift}} + L_{\text{ossk}_1 k_2}^e, & a=e \\ L_{k_1 k_2}^{g,\text{shift}}, & a=g \\ L_{k_1 k_2}^{h,\text{shift}} + L_{\text{ossk}_1 k_2}^h, & a=h \end{cases} \quad (26)$$

$$L_{b_2} = \sum_{k \in Y_{b_2}} L_k^a \quad (27)$$

$$\begin{cases} L_{k_1 k_2}^{a,\text{shift}} + L_{\text{ossk}_1 k_2}^a + L_{k_2}^a \leq C_{k_2} \\ L_{b_1 b_2}^{a,\text{shift}} + L_{b_2} \leq C_{b_2} \\ p_{\min} \leq p_{k_2}, p_{k_1} \leq p_{\max} \end{cases} \quad (28)$$

式(24)为 $\Omega_{\text{RIES-SR}}$ 表达式。式中 $h_1(W_s) = \mathbf{0}$ 和 $g_1(W_s) \leq \mathbf{0}$ 分别为N-1安全时RIES需满足的等式(式(25)–(27))和不等式约束式(28)。

式(25)为线路所带负荷等式约束。式中：shift表示转带关系； $L_k^{e,\text{shift}}$ 、 $L_k^{g,\text{shift}}$ 、 $L_k^{h,\text{shift}}$ 分别为线路 $k$ 在N-1后转带的电、气、热负荷。

式(26)为能量枢纽供能元件N-1故障后负荷转带等式约束。式中： $L_{b_1 b_2}^{a,\text{shift}}$ 为供能元件 $b_1$ 故障后转带给 $b_2$ 的负荷； $L_{\text{ossk}_1 k_2}^a$ 为线路 $k_1$ 负荷转带给 $k_2$ 时的损耗。

式(27)为能量枢纽供能元件负荷等式约束。

式(28)为被转带线路与能量枢纽供能元件容量不等式约束、被转带线路节点参数不等式约束、转带线路节点参数不等式约束。式中 $p_{k_2}^{\text{shift}}$ 为被转带线路 $k_2$ 上的节点参数。

## 1.3 RIES安全边界计算方法

### 1.3.1 本文采用的两种安全边界

本文采用2种安全边界：交流安全边界和直流安全边界。交流安全边界运行点用于确定预警等级；直流安全边界用于定位过载元件。

借鉴配电网交流安全边界<sup>[31]</sup>，本文利用考虑容量与参数约束的RIES安全域模型求边界点，再由边界点拟合成一组超平面，本文称其为RIES交流安全边界。文献[16]提出一种RIES实用化安全边

界, 忽略节点参数超限非线性约束<sup>[31-32]</sup>, 与配电网直流安全边界<sup>[14]</sup>类似, 同时为与交流安全边界名称对应, 本文将命名为 RIES 直流安全边界。交流安全边界与直流安全边界的区别是: 前者同时考虑元件过载的线性约束和节点参数超限的非线性约束<sup>[31-32]</sup>; 后者只考虑元件过载的线性约束<sup>[16]</sup>。

根据运行点与交流安全边界的位置关系能判断系统是否存在元件过载(线路、供能元件过载等)与参数超限(电压、气压、温度超限等)的不安全情况。本文的预警等级需要能区分节点参数超限且元件不过载的不安全情况, 交流安全边界运行点能做到, 而直流安全边界不能。因此本文确定预警等级采用交流安全边界运行点。

交流安全边界也存在一个缺点: 拟合后边界表达式系数失去与元件的对应关系, 很难定位过载元件。而根据越界直流安全边界表达式系数与元件对应关系能方便地定位过载元件。因此本文在预警原因分析的定位过载元件中采用直流安全边界。

本文将  $N-0$  交流安全边界  $i$  记为  $\partial\Omega_i^{AC}$ ,  $N-1$  交流安全边界  $i$  记为  $\partial\Omega_i^{AC}$ ,  $N-0$  直流安全边界  $i$  记为  $\partial\Omega_i^{DC}$ ,  $N-1$  直流安全边界  $i$  记为  $\partial\Omega_i^{DC}$ 。

### 1.3.2 安全边界计算方法

直流安全边界计算方法见文献[16]。将交流安全边界计算方法<sup>[31]</sup>从配电网扩展到 RIES, 步骤如下。

步骤 1: 建立安全域模型。若计算  $N-0$  边界, 采用式(18)–(23); 若计算  $N-1$ , 采用式(24)–(28)。

步骤 2: 解耦降维。筛选出无耦合关系的负荷作为一个子系统, 单独考虑, 从而简化计算。

步骤 3: 边界点计算。对解耦后的每个子系统采用仿真法<sup>[32]</sup>进行采样逼近。选取某安全运行点中某一元素为修正元素, 对剩余元素等间距采样, 逐步逼近修正元素直至系统不满足  $N-0/N-1$  安全约束。

步骤 4: 边界点拟合。采用文献[32]方法将步骤 3 得到的每个子系统的边界点进行超平面拟合。首先, 设定拟合误差阈值; 其次, 构建初始平面与首个分段点; 最后, 不断分段线性拟合直至满足阈值要求。系统的安全域为每个子系统边界共同包围的区域。

## 2 模糊理论及其在 RIES 的应用

在 RIES 预警等级确定中, 需对系统不安全程度量化评估。故本文应用模糊理论。首先, 输入表征系统元件过载与参数超限的指标变量, 经过模糊

推理可得到严重等级, 从而将不安全程度量化; 其次, 采用模糊综合评判方法, 综合考虑  $N-0$  与  $N-1$  下的严重等级, 进行最终的预警等级确定。

模糊推理步骤<sup>[7]</sup>如下: 1) 输入变量模糊化。把输入变量转化为由隶属度描述的模糊集; 2) 输入输出空间的模糊分割。把输入和输出变量进行层级划分; 3) 建立模糊规则库。以两输入单输出系统为例, 模糊规则表示为 IF  $x_1$  is  $\alpha_{1j}$  AND  $x_2$  is  $\alpha_{2j}$ , THEN  $y$  is  $\beta_j$ ,  $\alpha$  为前件模糊集合,  $\beta$  为模糊规则后件, 上述规则记为  $\alpha \rightarrow \beta$ , 表蕴含关系; 4) 输出模糊集与去模糊化。本文采用 Mamdani 法<sup>[33]</sup>确定输出模糊集, 再采用重心法<sup>[34]</sup>去模糊化得到精确值:

$$y_0 = \frac{\int_{\beta} y v_{\beta}(y) dy}{\int_{\beta} v_{\beta}(y) dy} \quad (29)$$

式(7)物理意义: 设变量  $y$  在连续论域  $\beta$  上的模糊集合为  $v_{\beta}(y)$ , 则重心法去模糊化的结果为  $y_0$ , 即隶属度曲线与横坐标轴围成面积的重心。

模糊综合评判步骤<sup>[6]</sup>如下: 1) 构造因素集  $U$ 。  $U$  是影响评判对象的各种因素集合; 2) 构造权重向量  $A$ 。  $A$  确定各因素权重; 3) 构造评语集  $V$ 。  $V$  包含对评判对象的评语; 4) 确定单因素模糊隶属度向量  $R^i$ 。确定每一个因素在评语集中的隶属度, 得到隶属度向量  $R^i$ ,  $i=1,2,\dots$ ; 5) 计算综合评判矩阵  $B=A \circ [R^1, R^2, \dots]^T$ , 依据最大隶属度原则进行评判。

## 3 基于安全边界与模糊理论的预警方法

### 3.1 预警指标选取

#### 3.1.1 安全距离指标

为刻画运行点安全裕度, 输电网率先提出安全距离概念<sup>[35]</sup>, 而后配电网<sup>[36]</sup>、RIES<sup>[16]</sup>相继提出安全距离概念与计算方法。本文沿用文献[16]的安全距离定义, 即运行点到安全边界的欧氏距离, 记为  $G_{SD}$ (geometry security distance, GSD)。运行点至边界  $i$  的  $G_{SDi}$  表达式为

$$G_{SDi} = \begin{cases} (C - \sum_{x=1}^{n_x} \lambda_x L_x) / (\sqrt{\sum_{x=1}^{n_x} \lambda_x^2}), W_s \rightarrow \partial\Omega^+ \\ (\sum_{x=1}^{n_x} \lambda_x L_x - C) / (\sqrt{\sum_{x=1}^{n_x} \lambda_x^2}), W_s \rightarrow \partial\Omega^- \end{cases} \quad (30)$$

式中:  $n_x$  为与安全边界  $i$  相关的多能负荷节点数目;  $\lambda_x$  为安全边界  $i$  超平面表达式系数;  $W_s \rightarrow \partial\Omega^+$  与  $W_s \rightarrow \partial\Omega^-$  分别表示研究对象为运行点  $W_s$  至上安全

边界与下安全边界的距离； $G_{SDi}>0$  表示运行点位于安全边界  $i$  内，运行点安全； $G_{SDi}<0$  表示运行点位于安全边界  $i$  外，运行点不安全。

本文将运行点  $W_s$  至  $N-0$  与  $N-1$  交流安全边界  $i$  的距离记为  $G_{SD0,i}^{AC}$  与  $G_{SD1,i}^{AC}$ ，至  $N-0$  与  $N-1$  直流安全边界  $i$  的距离记为  $G_{SD0,i}^{DC}$  与  $G_{SD1,i}^{DC}$ 。

为体现运行点的  $N-0$  与  $N-1$  安全性，本文定义  $\text{sign}(G_{SD0}^{AC})$  与  $\text{sign}(G_{SD1}^{AC})$  为表征运行点至  $N-0$  与  $N-1$  交流安全边界距离的符号函数。以  $\text{sign}(G_{SD0}^{AC})$  举例：

$$\text{sign}(G_{SD0}^{AC}) = \begin{cases} +1 & \forall i, \text{ s.t. } G_{SD0,i}^{AC} > 0 \\ 0 & \forall i, \text{ s.t. } G_{SD0,i}^{AC} = 0 \\ -1 & \exists i, \text{ s.t. } G_{SD0,i}^{AC} < 0 \end{cases} \quad (31)$$

若任意  $G_{SD0,i}^{AC} > 0$ ，则  $\text{sign}(G_{SD0}^{AC}) = +1$ ，表示运行点在所有  $N-0$  边界内；若存在  $G_{SD0,i}^{AC} < 0$ ，则  $\text{sign}(G_{SD0}^{AC}) = -1$ ，表示运行点在某些  $N-0$  边界外。

本文所用安全距离指标及物理意义如表1所示。

表1 安全距离指标族及物理意义

指标符号	物理意义
$G_{SD0,i}^{AC}$	运行点至 $N-0$ 交流安全边界 $i$ 的距离
$G_{SD1,i}^{AC}$	运行点至 $N-1$ 交流安全边界 $i$ 的距离
$G_{SD0,i}^{DC}$	运行点至 $N-0$ 直流安全边界 $i$ 的距离
$G_{SD1,i}^{DC}$	运行点至 $N-1$ 直流安全边界 $i$ 的距离
$\text{sign}(G_{SD0}^{AC})$	表征运行点至 $N-0$ 交流安全边界距离的符号函数
$\text{sign}(G_{SD1}^{AC})$	表征运行点至 $N-1$ 交流安全边界距离的符号函数

### 3.1.2 过负荷指标

在静态安全分析中，过负荷(overload, OL)指标可以衡量元件过载的严重程度<sup>[7]</sup>，本文沿用文献<sup>[7]</sup>过负荷严重度函数：

$$\begin{cases} O_{Lk} = \begin{cases} L_k / C_k - 0.9, & L_k > 0.9C_k \\ 0, & L_k \leq 0.9C_k \end{cases} \\ O_L = \sum_{k=1}^{n_k} O_{Lk} / n_k \end{cases} \quad (32)$$

式中： $O_{Lk}$ 为线路  $k$  过负荷严重度； $O_L$ 为系统过负荷严重度； $n_k$ 为过负荷线路数目。

设置  $O_L$  严重等级隶属度函数  $f_1$  如图1(a)所示。 $O_L$  严重等级分为3级， $v_s$ 为隶属度。

### 3.1.3 压力越限指标

压力在不同系统中有不同的表现形式，在电力系统中表现为电压，在天然气系统中表现为气压，在热力系统中表现为温度。压力越限指标(pressure

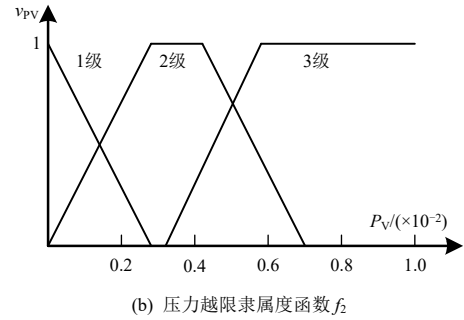
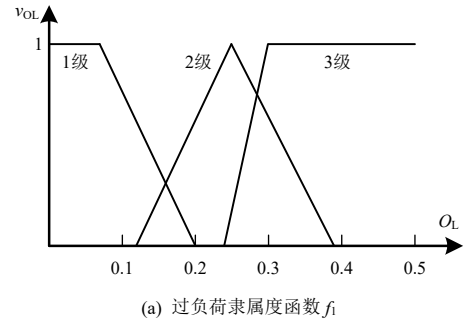


图1 过负荷与压力越限严重等级隶属度函数

Fig. 1 Membership functions of overload and pressure violation indices

violation, PV)可以衡量参数越限严重程度。

本文定义压力越限严重度函数为

$$\begin{cases} P_{Vi} = \begin{cases} p_i / p_i^{\max} - 1, & p_i > p_i^{\max} \\ p_i^{\min} / p_i - 1, & p_i < p_i^{\min} \\ 0, & p_i^{\min} < p_i < p_i^{\max} \end{cases} \\ P_V = \sum_{i=1}^{n_i} P_{Vi} / n_i \end{cases} \quad (33)$$

式中： $P_{Vi}$ 为节点  $i$  压力越限严重度； $P_V$ 为系统压力越限严重度； $n_i$ 为压力越限数目。

设置  $P_V$  严重等级隶属度函数  $f_2$  如图1(b)所示。

$P_V$  严重等级分为3级， $v_P$ 为隶属度。

## 3.2 预警指标评判

### 3.2.1 安全距离指标评判方法

利用  $\text{sign}(G_{SD0}^{AC})$  指标判断运行点  $N-0$  安全性。若  $\text{sign}(G_{SD0}^{AC}) = +1$ ，则运行点  $N-0$  安全，系统满足  $N-0$  安全约束，即元件无过载，参数无越限。若  $\text{sign}(G_{SD0}^{AC}) = -1$ ，则运行点  $N-0$  不安全，系统元件过载或参数越限，此时发出告警信号。

利用  $\text{sign}(G_{SD1}^{AC})$  指标判断运行点  $N-1$  安全性。若  $\text{sign}(G_{SD1}^{AC}) = +1$ ，则运行点  $N-1$  安全，即单一元件退出时，非故障区元件无过载、参数无越限。若  $\text{sign}(G_{SD1}^{AC}) = -1$ ，则不安全，单一元件退出时，非故障区元件过载或参数越限。此时发出预警信号，当预警与告警信号同时发出时，告警信号优先。

3.2.2 过负荷与压力越限指标评判方法

本文基于模糊推理方法，结合过负荷严重度指标  $O_L$  与压力越限严重度指标  $P_V$  评估  $N=0$  与  $N=1$  下的越界综合严重等级，模糊推理步骤如下。

1) 输入变量模糊化。利用式(32)–(33)计算  $O_L$ 、 $P_V$ ，带入隶属度函数  $f_1$ 、 $f_2$ ，求得隶属度向量。

2) 输入输出空间模糊分割。本文将  $O_L$  与  $P_V$  严重等级分为 3 级，如图 1 所示。综合越界严重等级分为 5 级，其隶属度函数  $f_3$  如图 2 所示。

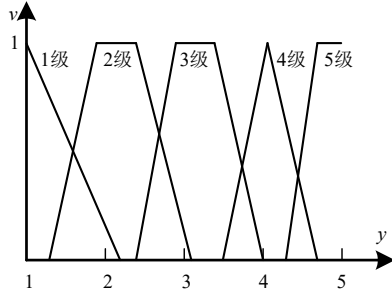


图 2 综合越界严重等级隶属度函数  $f_3$

Fig. 2 Membership function of comprehensive violation severity

3) 建立模糊规则库。本文设置规则库如表 2 所示。

表 2 越界综合严重等级逻辑规则

Table 2 Rules of comprehensive violation severity level

过负荷 $\alpha_1$	压力越限 $\alpha_2$	越界综合严重等级 $\beta$
3 级	2~3 级	5 级
1~3 级	3 级	5 级
3 级	1 级	4 级
2 级	2 级	4 级
1 级	2 级	3 级
2 级	1 级	2 级
1 级	1 级	1 级

表 2 中，模糊规则为“IF  $x_1$  is  $\alpha_{1j}$  AND  $x_2$  is  $\alpha_{2j}$ , THEN  $y$  is  $\beta$ ”， $x_1$  为过负荷  $O_L$  严重等级， $x_2$  为压力越限  $P_V$  严重等级， $y$  是越界综合严重等级的评价。

4) 输出模糊集与去模糊化。利用 MATLAB 软件 Simulink 平台中模糊逻辑控制仿真模块。首先，输入隶属度函数  $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  与模糊规则库至模块中，并选择 Mamdani 方法；其次，输入  $O_L$  与  $P_V$ ，求得输出模糊集；最后，利用式(29)将模糊集去模糊化，得到越界综合严重等级精确值  $y_{N=0}$  与  $y_{N=1}$ 。

3.3 预警等级确定

设计两段的分段预警，一段预警选取 GSD 指标，二段预警选取  $O_L$  与  $P_V$  指标。一段预警快速判断系统运行状态并初始量化预警等级；二段预警根据严重程度对预警等级进一步细化。

3.3.1 一段预警等级确定

RIES 运行状态可按当前与扰动后是否满足等式约束和不等式约束进行划分<sup>[37]</sup>，如表 3 所示。

表 3 RIES 运行状态

Table 3 RIES operating state

运行状态	等式约束是否满足		不等式约束是否满足	
	当前	扰动后	当前	扰动后
正常	是	是	是	是
警戒	是	是	是	否
紧急	是	否	否	否
待恢复	否	否	否	否

表 3 清晰划分 RIES 的运行状态，为运行人员提供参考，但是其使用存在一个缺点，即扰动后的状态需要大量仿真计算才能得到，很难满足大规模系统在线运行时间要求。而安全域方法事先得到安全边界，在线运行时只需通过计算运行点到安全边界的距离，能快速实现安全分析，实现安全预警<sup>[12-15]</sup>。因此，本文采用 GSD 指标作为判据，按照当前运行点至  $N=0$  与  $N=1$  安全边界的距离来划分运行状态，并赋予相应的初始预警等级，如表 4 所示。预警等级越高表示越不安全。

表 4 基于 GSD 划分的 RIES 运行状态

Table 4 RIES operating states classification based on GSD

一段预警等级	运行状态	信号类别	$\text{sign}(G_{SD0}^{AC})$	$\text{sign}(G_{SD1}^{AC})$
I	正常	无信号	+1	+1
II	警戒	预警信号	+1	-1
III	紧急	告警信号	-1	-1

表 4 中， $N=0$  安全性与表 3 当前安全性对应， $N=1$  安全性与表 3 扰动后安全性对应；表 3 中待恢复状态为故障后状态，本文预警针对的是在故障发生之前，故表 4 未列出。

I级：正常状态，不发出信号，表示系统满足  $N=0$  安全约束，且  $N=1$  事件后，系统参数不越限、元件不过载。判定方法为  $\text{sign}(G_{SD0}^{AC}) = +1$ ， $\text{sign}(G_{SD1}^{AC}) = +1$ ，即  $N=0$ 、 $N=1$  安全。

II级：警戒状态，发出预警信号，表示系统满足  $N=0$  安全约束，但应对  $N=1$  事件的安全裕度不足。 $N=1$  事件后，系统非故障区元件过载或参数越限。判定方法为  $\text{sign}(G_{SD0}^{AC}) = +1$ ， $\text{sign}(G_{SD1}^{AC}) = -1$ ，即  $N=0$  安全， $N=1$  不安全。

III级：紧急状态，发出告警信号，表示系统不满足  $N=0$  安全约束，安全裕度严重不足，更无法应对  $N=1$  事件。判定方法为  $\text{sign}(G_{SD0}^{AC}) = -1$ ， $\text{sign}(G_{SD1}^{AC}) = -1$ ，即  $N=0$ 、 $N=1$  不安全。

3.3.2 二段预警等级确定

一段预警根据安全距离 GSD 指标可快速判断系统是否存在元件过载或参数越限情况。二段预警在一段预警基础上,利用模糊推理得到不安全状态下越界综合严重等级精确值 $y_{N-0}$ 与 $y_{N-1}$ (见3.2.2节),再通过模糊综合评判方法,进一步划分系统预警等级。二段预警分级流程如图3所示。

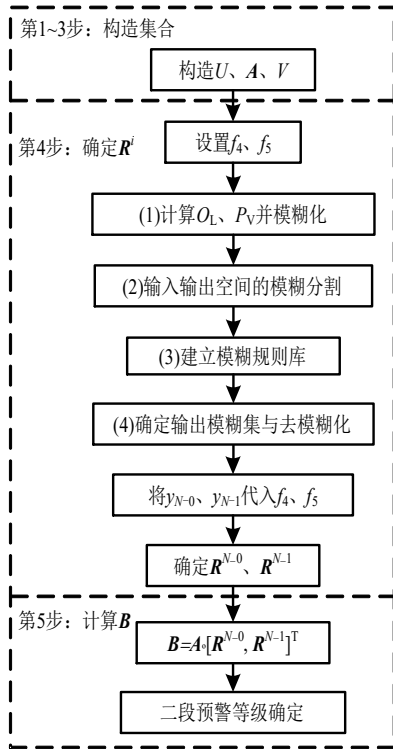


图3 二段预警分级流程

Fig. 3 Second stage early warning classification process

步骤1: 构造因素集  $U = \{y_{N-0}, y_{N-1}\}$ 。 $y_{N-0}$ 、 $y_{N-1}$  分别为  $N-0$ 、 $N-1$  越界综合严重等级精确值。

步骤2: 构造权重向量  $A$ 。设置警戒与紧急状态下  $y_{N-0}$  与  $y_{N-1}$  权重向量  $A$ 。本文设置如表5所示。

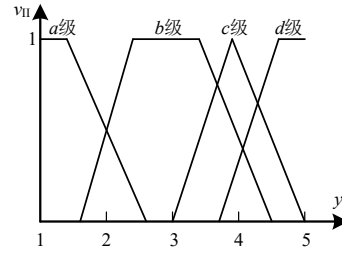
表5 警戒与紧急状态下的权重向量  $A$

Table 5 Vector  $A$  in alert and emergency state

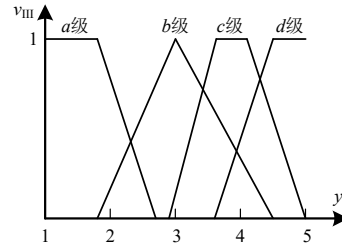
一段预警等级	运行状态	权重向量 $A[y_{N-0}, y_{N-1}]$
II	警戒	$A^II = [0, 1.0]$
III	紧急	$A^III = [0.7, 0.3]$

步骤3: 构造评语集  $V$ 。本文设置警戒与紧急状态下  $V^II = \{II-a, II-b, II-c, II-d\}$ 、 $V^III = \{III-a, III-b, III-c, III-d\}$ 。 $a$  预警等级最低,  $b$ 、 $c$ 、 $d$  递增之。

步骤4: 确定单因素模糊隶属度向量  $R^i$ 。分别设置警戒与紧急状态下二段预警等级隶属度函数  $f_4$  与  $f_5$ , 如图4所示,  $v_{II}$ 、 $v_{III}$  为隶属度。将3.2.2节得到的  $y_{N-0}$  与  $y_{N-1}$  带入  $f_4$  与  $f_5$ , 确定  $N-0$  与  $N-1$  下的二段预警等级模糊评价向量  $R^{N-0}$  与  $R^{N-1}$ 。



(a) 警戒状态隶属度函数  $f_4$



(b) 紧急状态隶属度函数  $f_5$

图4 二段预警等级隶属度函数  
Fig. 4 Membership functions of second stage warning level

步骤5: 计算综合评判矩阵  $B = A \circ [R^{N-0}, R^{N-1}]^T$ , 根据最大隶属度原则确定二段预警等级。

3.4 预警原因分析

预警等级确定后,针对不安全运行点剖析预警原因。本文提出的预警原因分析方法包括定位过载元件与越限程度分析两方面内容,步骤如下。

步骤1: 定位过载元件  $e_{OL}$ 。采用直流安全边界分析,负安全距离越界边界的约束元件  $e_c$  就是  $e_{OL}$ 。

步骤2: 判断越界边界种类。若为  $N-1$  边界,则进一步定位  $N-1$  元件,转步骤3;否则转步骤7。

步骤3: 寻找供能线路  $L_{es}$ 。通过边界左侧寻找各负荷  $N-1$  前的供能线路,记供能线路数目为  $n_{es}$ 。

步骤4: 定位  $N-1$  元件  $e_{N-1}$ 。

首先,判断  $e_{OL}$  种类。情况1:  $e_{OL} = L_{esi}$ ; 情况2:  $e_{OL} = b_i$  ( $L_{esi}$  的上级供能元件)。

其次,若为情况1,则  $n_{es} = 2$ , 原因是  $N-1$  后开环运行要求只允许一个新供能线路(即便多联络接线)。在2个供能线路中,过载线路为  $L_{esi}$ , 记另一线路为  $L_{esj}$ 。 $L_{esi}$  在  $N-1$  后仍供能,所以  $e_{N-1} = L_{esj}$ 。

再次,若为情况2,则  $n_{es} \geq 2$ , 原因是该上级供能元件  $b_i$  可能有多条出口线路(设有  $n_{op}$  条,  $n_{op} \geq 1$ )。

若  $n_{es} = n_{op} + 1$ ,  $N-1$  元件是不由  $b_i$  供能的那一条线路  $L_{esj}$ 。因此  $e_{N-1} = L_{esj}$ , 且  $L_{esj} \notin Y_{bi}$ 。

若  $n_{es} \geq n_{op} + 2$ ,  $e_{N-1} = b_j$ , 且  $b_j \neq b_i$ ,  $Y_{bj} = \{L_{es1}, \dots, L_{esn}\}$ ,  $n = n_{es} - n_{op}$ 。表明有多条线路发生  $N-1$ , 且这些线路不由  $b_i$  供能。 $N-1$  元件是这些  $N-1$  线路的上级元

件  $b_j$ 。

最后，当  $e_{N-1}=L_{esj}$  时，进一步确定  $L_{esj}$  是否存在上级元件  $b_j(L_{esj} \in \gamma_{bj})$ 。若存在，则  $e_{N-1}=L_{esj}$  或  $b_j$ 。

步骤 5：交流能流计算。计算元件与参数的越限量，从而定量描述系统不安全程度。交流能流计算<sup>[38]</sup>是电力系统交流潮流计算应用到 RIES 的扩展，能根据给定网络结构参数等，确定系统运行状态。

本文预警原因分析方法流程图如图 5 所示。

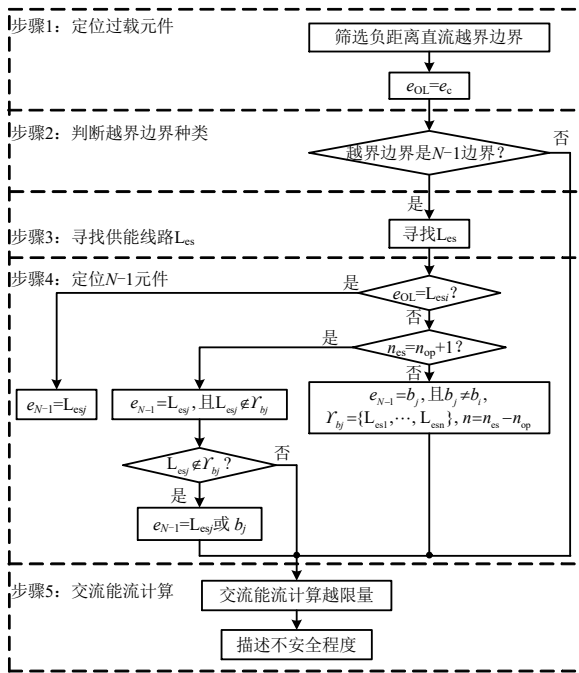


图 5 预警原因分析流程

Fig. 5 Analysis process of early warning

### 3.5 安全趋势预测

在预警等级确定后，应进一步感知系统安全态势走向，从而预测系统近期安全水平。具体方法为通过比较时序出现的运行点  $G_{SD0,i}^{AC}$  与  $G_{SD1,i}^{AC}$  平均值  $\overline{G_{SD0,i}^{AC}}$  与  $\overline{G_{SD1,i}^{AC}}$ ，以判断系统的安全趋势。

### 3.6 安全预警流程

总结 3.1—3.5 节，形成预警流程如图 6 所示。

步骤 1：安全边界计算。利用 1.3 节方法离线计算  $N-0$ 、 $N-1$  交流安全边界与直流安全边界。

步骤 2：一段预警等级确定。采集运行点数据，计算  $\text{sign}(G_{SD0}^{AC})$ 、 $\text{sign}(G_{SD1}^{AC})$ 、 $G_{SD0,i}^{DC}$  与  $G_{SD1,i}^{DC}$ 。由表 4 方法判断运行状态与初始预警等级，发出预警或告警信号。

步骤 3：二段预警等级确定。具体方法见图 3。

步骤 4：预警原因分析。具体方法见 3.4 节。

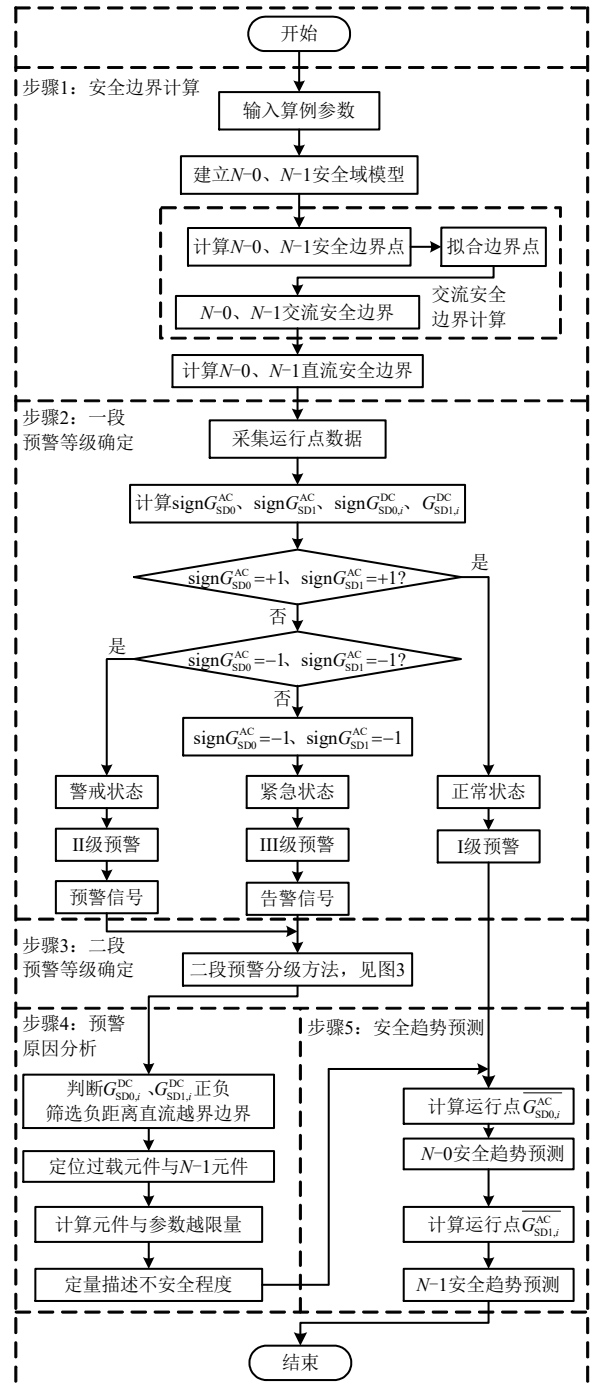


图 6 RIES 安全预警流程

Fig. 6 RIES early warning process

步骤 5：安全趋势预测。具体方法见 3.5 节。

## 4 算例验证

### 4.1 算例概况

采用电-气-热 RIES 算例验证本文方法的有效性。算例拓扑结构如图 7 所示。电力侧采用修改后的 IEEE-RTBS-BUS4 算例<sup>[39]</sup>， $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$ 、 $T_4$ 为变电站主变。热力侧采用修改的 4 节点算例<sup>[16]</sup>，天然气侧采用修改的 7 节点算例<sup>[16]</sup>，其中 GB 为燃气锅

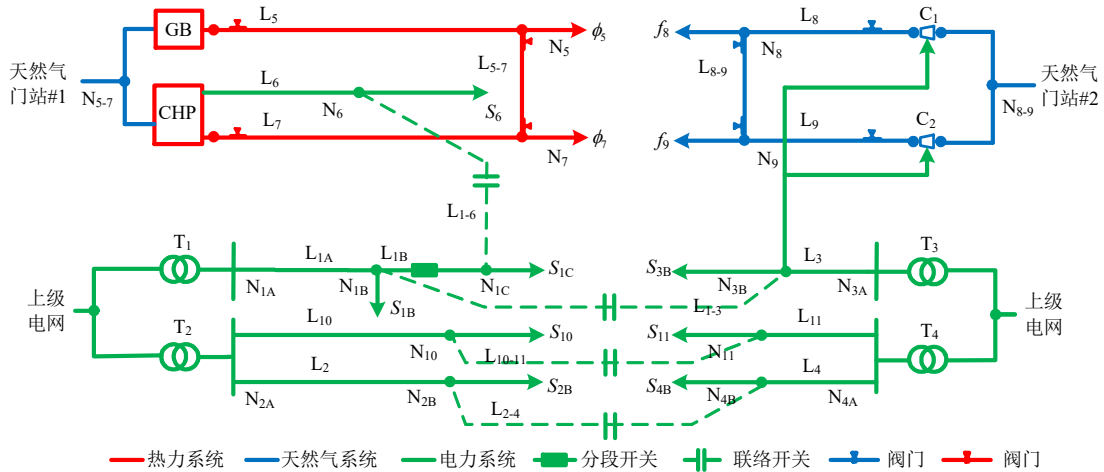


图7 电气-热耦合算例结构

Fig. 7 Structure of electrical-gas-heat case

炉, CHP 为热电联产机组, C<sub>1</sub>、C<sub>2</sub> 为电驱动式压缩机。算例具体参数见附表 B1—B3。

4.2 离线安全边界计算

根据 1.3 节方法, 进行 N-0 与 N-1 交流安全边界的求解, 求解步骤如下。

步骤 1: 根据式(18)–(23)建立 N-0 安全域模型。根据式(24)–(28)建立 N-1 安全域模型。

步骤 2: 解耦降维。1) N-0 下, 联络开关断开,

算例可分为 5 个子系统。各子系统用黑色线框区分, 如图 8 所示。N-0 子系统 1 由 L<sub>1</sub> 与 T<sub>1</sub> 组成; N-0 子系统 2 由 L<sub>2</sub>、L<sub>10</sub> 与 T<sub>2</sub> 组成; N-0 子系统 3 由 L<sub>3</sub>、T<sub>3</sub> 与天然气侧组成; N-0 子系统 4 由 L<sub>4</sub>、L<sub>11</sub> 与主变 T<sub>4</sub> 组成; N-0 子系统 5 由 L<sub>6</sub>、热力侧组成。2) N-1 下, 可分为 2 个子系统。N-1 子系统 1 由 N-0 子系统 2 与 N-0 子系统 4 包含的元素组成; N-1 子系统 2 由系统的剩余元素组成。

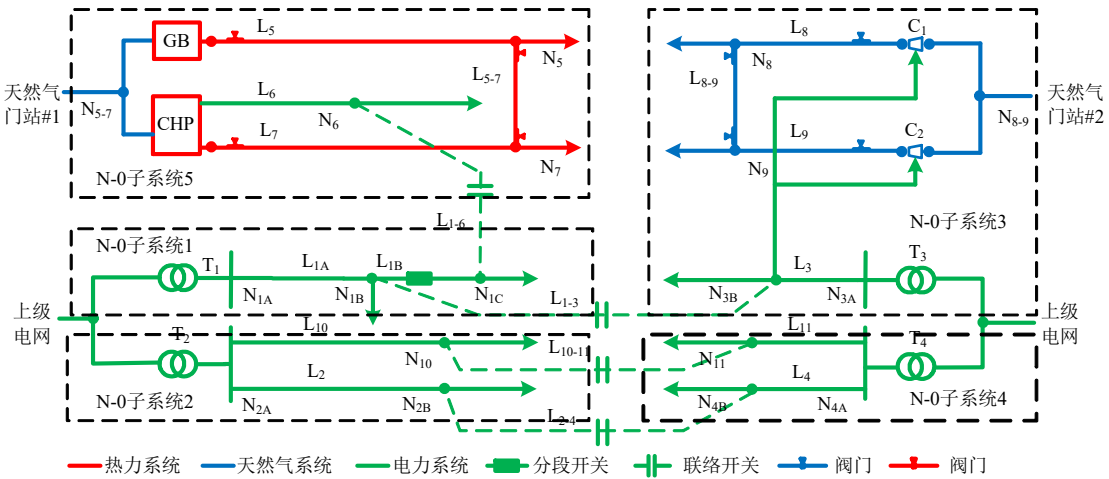


图8 电气-热算例子系统分解

Fig. 8 Electrical-gas-heat coupling system decomposition

步骤 3: 求解安全边界点。以 N-0 子系统 1 为例进行说明。选取某安全运行点如(0, 0), 对 S<sub>1B</sub> 等间距采样, 逼近 S<sub>1C</sub> 直至刚好不满足 N-0 安全约束, 记录此时的 S<sub>1B</sub>、S<sub>1C</sub>。其他子系统边界点求解同理。

求得 N-0 上安全边界点 29 600 个, 下安全边界点 657 个。N-1 上安全边界点 356 554 个, 下安全边界点 3 856 个, 部分结果见附表 B4—B7。

步骤 4: 拟合所得边界点, 求得 16 个 N-0 与

29 个 N-1 交流安全边界, 结果见附表 B8。

根据文献[16]方法, 求得 21 个 N-0 与 49 个 N-1 直流安全边界, 结果见附表 B9。需要指出, 等号右侧括号内为约束元件。若该边界越界, 则约束元件过载。例如, 第 1 行: 若  $\partial \Omega_{0,1}^{DC}$  越界则 L<sub>1</sub> 过载。

4.3 在线安全预警分析

4.3.1 运行点数据

RIES 运行中实时采集运行点数据, 对其进行

在线安全预警。以时序出现的运行点  $W_1 \sim W_4$  为例进行分析。运行点数据见表 6。

表 6 运行点数据

Table 6 Data of operating points

运行点	$S_{1B}/(MV \cdot A)$	$S_{1C}/(MV \cdot A)$	$S_{2B}/(MV \cdot A)$	$S_{3B}/(MV \cdot A)$	$S_{4B}/(MV \cdot A)$	$S_6/(MV \cdot A)$	$S_{10}/(MV \cdot A)$	$S_{11}/(MV \cdot A)$	$\phi_7/MW$	$\phi_7/MW$	$f_8/MMCFD$	$f_9/MMCFD$
$W_1$	1.01	1.09	1.65	1.33	3.99	3.26	1.65	0.50	1.00	1.00	0.20	0.05
$W_2$	1.42	3.21	1.64	2.00	2.38	2.86	1.64	2.38	2.60	2.00	0.20	0.19
$W_3$	3.60	2.99	1.56	3.56	1.78	2.50	6.00	5.82	1.00	1.00	0.10	0.10
$W_4$	3.42	3.21	5.96	3.69	5.78	2.50	2.00	2.00	0.12	1.00	0.30	0.21

4.3.2 预警等级确定

1) 一段预警等级确定。

根据式(30)计算  $W_1 \sim W_4$  至各  $N-0$  与  $N-1$  交流安全边界的安全距离，结果见附表 B10。

由表 B10 可知， $W_1$  的  $\text{sign}(G_{SD0}^{AC}) = +1$ ， $\text{sign}(G_{SD1}^{AC}) = +1$ ，一段预警等级为 I 级，正常状态，不发出信号； $W_2$  的  $\text{sign}(G_{SD0}^{AC}) = +1$ ， $\text{sign}(G_{SD1}^{AC}) = -1$ ，II 级，警戒状态，发出预警信号； $W_3$  与  $W_4$  的  $\text{sign}(G_{SD0}^{AC}) = -1$ ， $\text{sign}(G_{SD1}^{AC}) = -1$ ，III 级，紧急状态，发出告警信号。 $W_1 \sim W_4$  一段预警等级见表 7。

表 7 一段预警等级

Table 7 First stage early warning level

编号	$\text{sign}(G_{SD0}^{AC})$	$\text{sign}(G_{SD1}^{AC})$	运行状态	一段预警等级
$W_1$	+1	+1	正常	I
$W_2$	+1	-1	警戒	II
$W_3$	-1	-1	紧急	III
$W_4$	-1	-1	紧急	III

2) 二段预警等级确定。

仅对警戒状态的  $W_2$  与紧急状态的  $W_3$ 、 $W_4$  计算二段预警等级。第 1~3 步构造因素集、权重向量和评语集，本文设置参数见 3.3.2 节。

第 4 步：通过模糊推理确定  $N-0$  与  $N-1$  下的二段预警等级模糊评价向量  $R^{N-0}$  与  $R^{N-1}$ 。

①输入变量模糊化。利用式(32)~(33)得到过负荷严重度  $O_L$ 、压力超限严重度  $P_V$ 。将  $O_L$  和  $P_V$  分别代入严重等级隶属度函数  $f_1$  与  $f_2$ ，求得隶属严重等级。上述结果如表 8 所示。

表 8 指标计算结果及严重等级

Table 8 Calculation results of indices and severity levels

运行点	$O_L$		$P_V/(\times 10^{-2})$		$O_L$ 严重等级		$P_V$ 严重等级	
	$N-0$	$N-1$	$N-0$	$N-1$	$N-0$	$N-1$	$N-0$	$N-1$
$W_2$	—	0.32	—	0.29	—	3	—	2
$W_3$	0.11	0.61	0	0.29	1	3	1	2
$W_4$	0.12	0.54	1.00	0.67	1	3	3	3

注：因警戒状态权重向量  $A=[0, 1]$ ，故未计算  $N-0$  指标。

执行步骤 2 输入输出空间模糊分割、步骤 3 建

立模糊规则库，执行过程与数据见 3.2.2 节。

②输出模糊集与去模糊化。在 3.2.2 节创建的模糊逻辑控制模块中输入表 8 中的  $O_L$  与  $P_V$ ，求得输出模糊集，再利用式(29)将输出模糊集去模糊化求得  $y_{N-0}$  与  $y_{N-1}$ 。结果如表 9 所示。

表 9 输出模糊集及精确值

Table 9 Output fuzzy sets and exact values

运行点	输出模糊集		精确值	
	$N-0$	$N-1$	$y_{N-0}$	$y_{N-1}$
$W_2$	—		—	3.80
$W_3$			1.42	4.75
$W_4$			4.72	4.75

注：多边形为输出模糊集；竖线位置为模糊集重心横坐标；红字为横坐标值，表示越界综合严重等级精确值。

第 5 步，根据表 9 数据确定  $R^{N-0}$  与  $R^{N-1}$ ，并计算综合模糊评判矩阵  $B=A \circ [R^{N-0}, R^{N-1}]^T$ ，确定二段预警等级。结果如表 10 所示，可以看出， $W_3$  与  $W_4$  虽一段预警等级相同，都为 III 级，处于紧急状态，但  $W_4$  二段预警等级比  $W_3$  高，表明  $W_4$  更不安全。 $W_4$  的越限程度更加严重，需立即采取措施。

表 10 二段预警等级

Table 10 Second stage early warning level

运行点	$B$	二段预警等级
$W_2$	[0, 0.38, 0.54, 0.08]	II-c
$W_3$	[0.70, 0, 0.07, 0.23]	III-a
$W_4$	[0, 0, 0.25, 0.75]	III-d

4.3.3 预警原因分析

对 3 个预警运行点按图 5 步骤分析预警原因。正文展示  $W_2$  分析过程， $W_3$  与  $W_4$  分析见附表 B5。

步骤 1：定位过载元件  $e_{OL}$ 。根据式(30)计算  $W_2$  至各直流安全边界的距离。通过负距离越界边界的约束元件  $e_c$  定位过载元件  $e_{OL}$ ，结果见表 11。

步骤 2：判断越界边界种类。所有越界边界均为  $N-1$  边界，需进一步定位  $N-1$  元件。 $N-1$  元件定位结果见表 11。以表 11 的第 3 行  $\partial \Omega_{4,15}^{DC}$  与第 4 行  $\partial \Omega_{4,17}^{DC}$  越界为例，说明  $N-1$  元件定位的详细步骤。

表 11 运行点  $W_2$  直流越界边界及对应元件Table 11 DC crossing boundaries and corresponding components of operating point  $W_2$ 

序号	越界边界	越界边界表达式	$G_{SDI,i}^{DC}/MW$	$N-1$ 元件 $e_{N-1}$	过载元件 $e_{OL}$
1	$\partial Q_{4,4}^{DC}$	$0.85S_{1C}+0.85S_6=5(ChP)$	-0.64		
2	$\partial Q_{4,6}^{DC}$	$0.85S_{1C}+0.85S_6+0.1\phi_7=5(ChP)$	-0.76	电力线路 $L_1$ 或主变 $T_1$	ChP 机组
3	$\partial Q_{1,15}^{DC}$	$S_{2B}+S_{4B}+S_{10}+S_{11}=8(T_4)$	-0.02	主变 $T_2$	主变 $T_4$
4	$\partial Q_{4,17}^{DC}$	$0.211f_8+0.211f_9+S_{1B}+S_{1C}+S_{3B}=6.582(L_{1A})$	-0.06	电力线路 $L_3$ 或主变 $T_3$	电力线路 $L_{1A}$
5	$\partial Q_{4,26}^{DC}$	$\phi_5+\phi_7=3.40(L_7)$	-0.85	热力线路 $L_5$ 或燃气锅炉 GB	热力线路 $L_7$
6	$\partial Q_{4,30}^{DC}$	$0.85S_6-0.8\phi_5-0.8\phi_7=0(ChP)$	-0.89		ChP 机组
7	$\partial Q_{4,34}^{DC}$	$S_{1C}+S_{1B}+S_6=6.582(L_{1A})$	-0.45		电力线路 $L_{1A}$
8	$\partial Q_{4,36}^{DC}$	$\phi_5+\phi_7=3.40(L_5)$	-0.33	电力线路 $L_6$ 或 ChP 机组	热力线路 $L_5$
9	$\partial Q_{4,38}^{DC}$	$\phi_5+\phi_7=3.40(L_5)$	-0.85	热力线路 $L_7$ 或 ChP 机组	热力线路 $L_5$

#### 4.3.4 安全趋势预测

根据表 B10 数据计算运行点  $W_1 \sim W_4$  的  $\overline{G_{SD0,i}^{AC}}$  与  $\overline{G_{SD1,i}^{AC}}$  平均值  $\overline{G_{SD0,i}^{AC}}$  与  $\overline{G_{SD1,i}^{AC}}$ 。以  $W_1 \sim W_4$  为横坐标, 安全距离平均值为纵坐标, 绘制系统安全程度的变化趋势, 如图 9 所示。

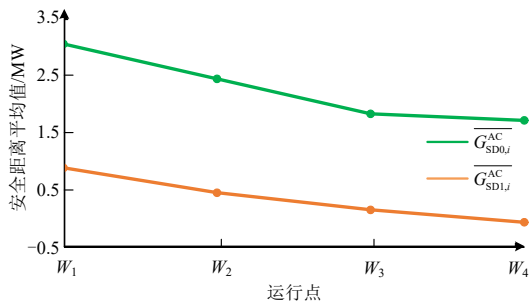


图 9 系统安全程度变化趋势

Fig. 9 Security trend of system

从图 9 可以看出, 运行点按时间顺序发展从  $W_1$  到  $W_4$  的过程中,  $\overline{G_{SD0,i}^{AC}}$  与  $\overline{G_{SD1,i}^{AC}}$  均逐渐减小, 系统  $N-0$  与  $N-1$  安全程度呈下降趋势。

## 5 结论

本文基于安全域与模糊理论, 提出一套较完整的 RIES 安全预警方法, 主要结论如下:

1) 提出一段预警方法。一段预警综合考虑系统  $N-0$  与  $N-1$  安全性, 通过计算运行点到交流安全边界的距离快速初步量化系统安全程度, 将系统分为正常、警戒、紧急 3 种运行状态, 分别对应 I、II、III 3 种等级。紧急状态 ( $N-0$  不安全) 发出告警信号, 警戒状态 ( $N-1$  不安全) 发出预警信号。

2) 提出二段预警方法。通过计算过负荷与压力越限指标, 采用模糊推理与模糊综合评判方法进一步细化安全程度, 对一段预警的 II (警戒)、III (紧急) 进一步划分为  $a$ 、 $b$ 、 $c$ 、 $d$  4 种等级。

3) 提出基于直流安全边界表达式和交流能流

计算结合的预警原因分析方法。由越界的直流安全边界表达式中的约束元件定位过载元件; 分析过载元件与供能线路以及上级元件拓扑关系, 并结合开环运行规则定位  $N-1$  元件; 通过交流能流计算得到元件与参数的越限量, 以描述不安全程度。

4) 提出安全趋势预测方法。通过比较时序出现的运行点安全距离平均值以判断安全趋势。

采用电-气-热 RIES 算例验证所提方法有效性。本文预警结果可为 RIES 系统调度运行中的安全防控决策提供科学依据, 是实现 RIES 安全控制的理论基础。目前本文预警等级和预警方法均针对结构满足  $N-1$  的系统设计, 对于具有辐射型结构的 RIES 尚需改进和完善。

## 参考文献

- [1] 贾宏杰, 王丹, 徐宪东, 等. 区域综合能源系统若干问题研究[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 198-207. JIA Hongjie, WANG Dan, XU Xiandong, et al. Research on some key problems related to integrated energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207(in Chinese).
- [2] 司方远, 张宁, 韩英华, 等. 面向多元灵活资源聚合的区域综合能源系统主动调节能力评估与优化: 关键问题与研究架构[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(6): 2097-2119. SI Fangyuan, ZHANG Ning, HAN Yinghua, et al. Fundamental problems and research framework for assessment and optimization of the functional regulation capacity of the regional integrated energy system under the aggregation of diversified and flexible resources [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(6): 2097-2119(in Chinese).
- [3] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 能源互联网背景下的典型区域综合能源系统稳态分析研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(12): 3292-3305. WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Review of steady-state analysis of typical regional integrated

- energy system under the background of energy internet [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3292-3305(in Chinese).
- [4] BERSINI H, VARELA F J. Hints for adaptive problem solving gleaned from immune networks[C]//1st Workshop on Parallel Problem Solving from Nature. Dortmund: Springer, 1991: 343-354.
- [5] DY LIACCO T E. The adaptive reliability control system[J]. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, 1967, PAS-86(5): 517-531.
- [6] 刘宝柱, 朱涛, 于继来. 电力系统电压态势预警等级的多级模糊综合评判[J]. 电网技术, 2005, 29(24): 31-36. LIU Baozhu, ZHU Tao, YU Jilai. Multilevel fuzzy comprehensive assessment for forewarning grade of voltage state and tendency in power systems[J]. Power System Technology, 2005, 29(24): 31-36(in Chinese).
- [7] 吴旭, 张建华, 赵天阳, 等. 基于模糊聚类 and 模糊推理的电网连锁故障预警方法[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1659-1665. WU Xu, ZHANG Jianhua, ZHAO Tianyang, et al. A forewarning method of cascading failure in power grid based on fuzzy clustering and fuzzy inference[J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1659-1665(in Chinese).
- [8] 闫炯程, 李常刚, 刘玉田. 计及源荷不确定性的交直流大电网动态安全分级滚动预警[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 35-43. YAN Jiongcheng, LI Changgang, LIU Yutian. Graded rolling early warning of dynamic security for large-scale AC/DC power grid considering uncertainties on source and load sides[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 35-43(in Chinese).
- [9] 李栌苏, 吴俊勇, 李宝琴, 等. 基于改进残差网络的两阶段电力系统频率安全多级预警[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(1): 22-34. LI Lusu, WU Junyong, LI Baoqin, et al. Two-stage multi-level early warning for power system frequency safety based on improved residual network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(1): 22-34(in Chinese).
- [10] WANG Dongtao, YU Yixin, FU Chuan, et al. Security region based probabilistic security assessment of power transmission system a basic concepts[C]//2005 IEEE/PES Transmission & Distribution Conference & Exposition: Asia and Pacific. Dalian: IEEE, 2005: 1-5.
- [11] 余贻鑫, 王东涛, 王成山, 等. 基于安全域的输电系统概率安全评估系统框架[J]. 天津大学学报, 2007, 40(6): 699-703. YU Yixin, WANG Dongtao, WANG Chengshan, et al. Framework of security region based probabilistic security assessment for power transmission system [J]. Journal of Tianjin University, 2007, 40(6): 699-703(in Chinese).
- [12] 张冶, 曹世龙, 蔡颖凯, 等. 基于趋势分析的电力系统态势感知方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(1): 99-106. ZHANG Ye, CAO Shilong, CAI Yingkai, et al. A novel situational awareness method based on trend analysis of power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(1): 99-106(in Chinese).
- [13] XIAO Jun, ZU Guoqiang, HE Qibo, et al. A new DMS with real-time security analysis and control based on security region[C]//2015 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Denver: IEEE, 2015: 1-5.
- [14] 肖峻, 贺琪博, 苏步芸. 基于安全域的智能配电网安全高效运行模式[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(19): 52-60. XIAO Jun, HE Qibo, SU Buyun. A secure and efficient operation mode for smart distribution networks based on security region method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(19): 52-60(in Chinese).
- [15] XIAO Jun, ZHANG Baoqiang, LUO Fengzhang. Distribution network security situation awareness method based on security distance[J]. IEEE Access, 2019, 7: 37855-37864.
- [16] LIU Liu, WANG Dan, HOU Kai, et al. Region model and application of regional integrated energy system security analysis[J]. Applied Energy, 2020, 260: 114268.
- [17] LIU Kaicheng, CHEN Hongyin, LI Siyuan, et al. Security and energy supply valleys assessment of regional integrated energy system based on practical security region[C]//2021 IEEE 5th Conference on Energy Internet and Energy System Integration(EI2). Taiyuan, China: IEEE, 2021: 1474-1478.
- [18] GUO Ying, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Preventive control of regional integrated energy system based on interval time-varying security region considering reserve capacity of electric vehicle[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023: 1-12, doi: 10.17775/CSEEJPES.2022.06400.
- [19] ZHANG Feifei, WANG Yueqiang, HUANG Dong, et al. Integrated energy system region model with renewable energy and optimal control method[J]. Frontiers in Energy Research, 2022, 10: 1067202.
- [20] 王丹, 李思源, 贾宏杰, 等. 含可再生能源的区域综合能源系统区间化安全域研究(一): 概念、建模与降维观测[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3188-3203. WANG Dan, LI Siyuan, JIA Hongjie, et al. Research on interval security region of regional integrated energy system integrated with renewable energy sources(Part I): concepts, modeling and dimension reduction observation [J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3188-3203(in Chinese).
- [21] 王丹, 李思源, 贾宏杰, 等. 含可再生能源的区域综合能源系统区间化安全域研究(二): 全维观测与域的几何特征优化[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(21): 7809-7820. WANG Dan, LI Siyuan, JIA Hongjie, et al. Research on interval security region of regional integrated energy system integrated with renewable energy sources, Part II: full-dimensional observation and optimization of region geometric features[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(21): 7809-7820(in Chinese).
- [22] LIN Qidai, GONG Ying, SHI Yizhi, et al. A fault risk warning method of integrated energy systems based on Relief-Softmax algorithm[J]. Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2022, 132(3): 929-944.

- [23] CHEN Sheng, WEI Zhinong, SUN Guoqiang, et al. Steady-state security regions of electricity-gas integrated energy systems[C]//2016 IEEE Power and Energy Society General Meeting(PESGM). Boston: IEEE, 2016: 1-5.
- [24] 肖峻, 李宗哲, 宋晨辉, 等. 综合能源系统能源耦合度及其对运行域的影响[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(5): 74-83.  
XIAO Jun, LI Zongzhe, SONG Chenhui, et al. Energy coupling degree of integrated energy system and its influence on operation region[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(5): 74-83(in Chinese).
- [25] 肖峻, 宋晨辉, 鲍震宇, 等. 天然气管网系统的稳态安全域模型[J]. 石油学报, 2021, 42(8): 1103-1112.  
XIAO Jun, SONG Chenhui, BAO Zhenyu, et al. Steady-state security region model of the natural gas transmission system[J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(8): 1103-1112(in Chinese).
- [26] JIANG Tao, ZHANG Rufeng, LI Xue, et al. Integrated energy system security region: concepts, methods, and implementations[J]. Applied Energy, 2021, 283: 116124.
- [27] SHABANPOUR-HAGHIGHI A, SEIFI A R. An integrated steady-state operation assessment of electrical, natural gas, and district heating networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5): 3636-3647.
- [28] SONG Chenghui, XIAO Jun, ZU Guoqiang, et al. Security region of natural gas pipeline network system: concept, method and application[J]. Energy, 2021, 217: 119283.
- [29] 顾伟, 陆帅, 王珺, 等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1305-1315.  
GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1305-1315(in Chinese).
- [30] 杨畅, 李正烁. 计及可变流量调节模式的电热综合能源系统条件分布鲁棒优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(12): 4702-4715.  
YANG Chang, LI Zhengshuo. Conditional distributionally robust optimization of integrated electricity and heat systems with variable flow regulation modes [J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(12): 4702-4715(in Chinese).
- [31] 肖峻, 左磊, 祖国强, 等. 基于潮流计算的配电系统安全域模型[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(17): 4941-4949.  
XIAO Jun, ZUO Lei, ZU Guoqiang, et al. Model of distribution system security region based on power flow calculation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(17): 4941-4949(in Chinese).
- [32] 肖峻, 宋晨辉, 焦衡, 等. 基于能路的综合能源系统安全域稳态建模与求解[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(19): 53-63.  
XIAO Jun, SONG Chenhui, JIAO Heng, et al. Stability modeling and solution for security region of integrated energy system based on energy circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 2023, 47(19): 53-63(in Chinese).
- [33] MAMDANI E H, ASSILIAN S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller [J]. International Journal of Human-Computer Studies, 1999, 51(2): 135-147.
- [34] CHEN S J, CHEN S M. Fuzzy risk analysis based on similarity measures of generalized fuzzy numbers [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2003, 11(1): 45-56.
- [35] 陈思捷, 陈启鑫, 夏清. 静态安全距离: 概念, 模型和意义[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 600-608.  
CHEN Sijie, CHEN Qixin, XIA Qing. Steady-state security distance: concept, model and meaning[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 600-608(in Chinese).
- [36] 肖峻, 甄国栋, 王博, 等. 配电网的安全距离: 定义与方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(10): 2840-2851.  
XIAO Jun, ZHEN Guodong, WANG Bo, et al. Security distance of distribution network: definition and method [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(10): 2840-2851(in Chinese).
- [37] 潘昭光, 孙宏斌, 郭庆来. 面向能源互联网的多能流静态安全分析方法[J]. 电网技术, 2016, 40(6): 1627-1634.  
PAN Zhaoguang, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Energy internet oriented static security analysis method for multi-energy flow[J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1627-1634(in Chinese).
- [38] 许康平, 王程, 毕天姝. 基于气网动态代理模型的电-气综合能源系统最优能流计算[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(9): 3415-3429.  
XU Kangping, WANG Cheng, BI Tianshu. Optimal Energy Flow Calculation of Integrated Electric-gas Systems Based on Gas Network Dynamic Surrogate Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(9): 3415-3429(in Chinese).
- [39] ALLAN R N, BILLINTON R, SJARIEF I, et al. A reliability test system for educational purposes-basic distribution system data and results[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 813-820.

## 附录

<http://ntps.epri.sgcc.com.cn/djgxcb/CN/10.13334/j.0258-8013.pcsee.232629>



肖峻

在线出版日期: 2024-08-26。

收稿日期: 2023-12-01。

作者简介:

肖峻(1971), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为配电系统与综合能源系统安全分析与规划, xiaojun@tju.edu.cn;

孙纲(2000), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为综合能源系统安全分析, sun\_gang2000@163.com;

宋晨辉(1993), 男, 博士, 主要研究方向为综合能源系统安全分析, songchenhui66399@163.com。

(编辑 乔宝榆, 张蕾)