

面向区域综合能源系统的安全域模型

刘柳,王丹,贾宏杰,李思源

(天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072)

摘要:区域综合能源系统(RIES)中自动化水平的提高为故障后的负荷转带奠定了基础,基于 $N-1$ 安全准则的系统安全边界有待研究。针对以能量枢纽(EH)为多能供应源的RIES,提出了RIES安全域概念与模型;分析了RIES的 $N-1$ 安全性校验方法,包括EH关键设备 $N-1$ 安全性校验与EH关键管线出口 $N-1$ 安全性校验;基于系统最大供能能力工作点,提出了安全边界仿真拟合计算方法,实现了安全域的降维观测;结合算例验证了所提模型的有效性,并讨论了系统的供能能力、安全状态与安全边界距离。

关键词:区域综合能源系统;能量枢纽;安全域; $N-1$ 安全性校验;最大供能能力

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.201908029

0 引言

能源互联网概念的广泛推进以及能源转换技术的持续革新,促进了多能源在不同学科领域的交叉互融,能源领域呈现出多样化发展趋势。区域综合能源系统(RIES)^[1-2]作为能源互联网的一种重要物理载体,具有能源梯级利用、多能优化分配、绿色低碳耗能等特点,其相关技术已成为学术界与工业界研究的热点。安全稳定是RIES运行的基本要求,也是规划设计、优化控制、多能交易等方面研究的基础。然而随着RIES中多能流耦合交互的程度不断提高,不同能源子系统之间的相互影响也日益显著,某元件的局部扰动将经由耦合组件传递至整体多能网络,RIES的安全性面临新的挑战^[3-4],相关安全性分析亟待开展。

目前关于RIES的安全性研究已有安全评估、预防控制、鲁棒优化等。在RIES安全评估方面,文献[5]划分了多能流系统的运行状态,给出了系统运行状态的安全性判定方法;文献[6]构建了一种考虑电网随机故障影响的电力系统连锁故障模型,提出了连锁故障情况下的系统安全评估指标体系。在RIES故障的预防控制方面,文献[7]提出了一种考虑电-气互联系统关键故障筛选的混合控制方法,对关键故障进行预防控制,对其他故障进行校正控制,在缩减预想故障集的同时减少故障控制过程中的切

负荷。在RIES鲁棒优化方面,文献[8]面向风电接入的综合能源系统,计及风电不确定性、气网与电网 $N-1$ 安全性约束,构建了一种鲁棒优化调度模型。上述研究从多角度分析了RIES安全性,大多通过逐点校验或通过安全约束限制进行优化调度,目前研究存在以下几点不足:逐点法只能针对局部运行点进行安全评估,无法刻画系统的整体安全区域,无法获取工作点安全裕度、调整方向等信息;通过安全约束来保障安全性,可能导致最优解处于安全边界附近,局部扰动易使系统进入不安全状态,此时未知系统完整安全边界下的调度方案安全性较低。

“域”方法是解决上述问题的一种有效措施,利用安全域可以有效便捷地观察系统安全边界,根据工作点在安全域内的相对位置,获取各种运行控制信息,从而大幅提高安全评估的效率。“域”方法在电力系统中的研究已较为成熟,在安全域模型方面,文献[9]基于相轨迹的判稳分界函数提出了一种实用动态安全域建模方法,可以实现电力系统暂态稳定性的快速判定;在安全域边界方面,文献[10]对电力系统热稳定安全域模型进行了改进,提出了临界点快速搜索的安全域优化模型,有助于快速获取安全域边界;在安全域可视化方面,文献[11]针对智能配电网,构建了安全域模型并提出了安全域的可视化观测方法。然而对于耦合复杂的RIES,现有安全域研究还较为粗浅, $N-1$ 安全性校验尚未得到满足。文献[12]率先提出电-气互联综合能源系统安全域概念与模型,然而该模型仅针对系统正常状态下的传输边界进行探究,并未涉及故障;文献[13]在文献[12]基础上,进一步考虑风电厂不确定性,提出基于凸壳的电-气互联综合能源系统鲁棒安全域构造方法,然而并未讨论 $N-1$ 安全约束。综上,基于 $N-1$ 安全性分析的区域综合能源系统安全域(RIES-SR)有待进一步研究。

可开展安全域工作的前提是系统的自动化程度

收稿日期:2019-04-15;修回日期:2019-06-25

基金项目:国家重点研发计划资助项目(2018YFB0905000);国家杰出青年科学基金资助项目(51625702);国家电网公司总部科技项目(SGTJDK00DWJS1800232);分布式能源与微网国际联合实验室合作项目

Project supported by the National Key R&D Program of China (2018YFB0905000), the National Science Fund for Distinguished Young Scholars(51625702), the Science and Technology Project of SGCC(SGTJDK00DWJS1800232) and the Co-operation Program of UNILAB-DEM

充足,可观测可调控,具有故障后负荷转带或多能流再分配承担负荷条件。随着配电自动化的普及,城市地区的中压配电网已基本实现互联,具备关键点信息采集、通信和开关远程自动操作的条件^[14];管道自动化的应用,使得冷、热等多能管道中关键管道的自动化数据采集与控制基本得到实现^[15]。因此,以能量枢纽(EH)为多能网络供应源的RIES具备安全域观测条件,RIES-SR方法具有可行性。安全域对工程应用的指导,主要体现在其边界、形状、体积等性质指标可作为系统评价或优化的依据,可应用于RIES的规划设计、优化运行等研究中,是平衡安全、高效等需求的重要工具。

鉴于此,本文基于EH管线段出口负荷,提出一种RIES-SR定义与模型,分析了RIES中的关键设备 $N-1$ 安全性校验与关键管线出口 $N-1$ 安全性校验,同时提出了一种安全边界仿真拟合求解流程。最后通过具体算例验证所提安全域模型的有效性。

1 RIES概述

RIES由配电网、区域热网、区域冷网、配气网耦合互联构成,多种异质能源交互的核心为EH,本文重点介绍以EH为多能供应源,具有负荷转带与多能流再分配承担负荷能力的RIES。

一种基于多EH互联的RIES示意图如附录中图A1所示。其应用场景为以冷、热、电用能需求为主的都市园区,包含配电网、区域热网、区域冷网、EH以及终端负荷。为提高多能网络供能的安全可靠性,区域1与区域2之间的电网通过联络开关形成互联,具有区域间供能互济特点;热网、冷网在区域内通过管线形成多源互联,具有区域内供能自用特点。这是由于中压变电站之间的距离较远,而以水或蒸汽为媒介的热、冷网在远距离传输中损失较大,故热能、冷能不适用于远距离传输,热、冷源在同一EH中互联。

以附录中图A1中压等级EH为例,对其结构、供能方式、参数配置进行详细介绍。EH内部功能区分为变电站(供电区)与区域能源站(多能互补区),供电区中关键设备为变压器,关键管线为电力馈线,城市配电网多为10 kV馈线;多能互补区中关键设备包含溴化锂制冷机、燃气锅炉(GB)、热电联产(CHP)、电制冷机、储能、循环泵,关键管线为电、热、冷管线。根据《国家电网公司业扩报装管理规则制度》相关规定,接入中压10 kV配电网的单台多能设备额定功率需大于500 kW;站内循环泵(CP)、照明系统等均采用400 V供电方式。基于此,EH中燃气类多能设备大多直接从门站购气,对EH上级电网及气网进行简化处理,认为其无穷大可充分满足供能需求。

综上,EH可视为中压RIES的多能供应源,具有

可观测及自动化控制条件,是RIES-SR定义、建模以及安全性分析的重点。

2 RIES-SR定义与模型

2.1 RIES-SR定义

RIES-SR基于负荷功率空间进行定义与建模,其中负荷功率空间是指由EH输出侧管线段出口功率构成的空间。安全域的定义为在EH关键设备 $N-1$ 与关键管线出口 $N-1$ 约束下,系统能够安全运行的所有工作点集合。工作点的定义为表征系统安全性的状态变量的最小集合,本文选取EH输出侧管线段负荷表示运行工作点,其累加可得到EH各关键设备负荷,同时该状态量具有可观测性。假设EH中共有 M 个管线段,分别编号为1、2、 \dots 、 m 、 \dots 、 M ,则工作点可表示为欧氏空间中的向量 $L=[L_1, L_2, \dots, L_m, \dots, L_M]$,其中 L_m 为第 m 号管线的管线段负荷。

2.2 RIES-SR模型

在EH关键设备与关键管线出口 $N-1$ 共同约束下,RIES-SR可表示为:

$$\Omega_{\text{RIES-SR}} = \{L | f(L) \leq 0, g(L) \leq 0\} \quad (1)$$

其中, $f(L) \leq 0$ 为满足 $N-1$ 校验的EH关键设备约束条件; $g(L) \leq 0$ 为满足 $N-1$ 校验的EH关键管线出口约束条件。

RIES能量流计算是安全域分析的基础,电力、天然气、区域热力系统是其中几种典型的能源系统,可采用前推回代法求解电网潮流,采用牛顿-拉夫逊法求解气网与热网流体系统能量流。由于目前关于多能流求解的相关研究已较为成熟^[16],不再赘述,重点介绍负荷转带及多能流再分配过程中的安全约束。在保障RIES能量平衡的基础上, $\Omega_{\text{RIES-SR}}$ 需满足安全约束如下:

$$\begin{cases} L_k^a = \begin{cases} \sum L_k^{\text{shift},e} & a=e \\ L_k^{\text{shift},v} & a=v \end{cases} \\ H_j = \sum_{k \in r_j} L_k^a \quad \forall j \\ L_{ij}^{\text{shift},a} = \begin{cases} \sum_{m \in r_i, n \in r_j} L_{mn}^{\text{shift},e} & a=e \\ L_{mn}^{\text{shift},v} & m \in r_i; n \in r_j; a=v \end{cases} \\ L_{mn}^{\text{shift},a} + L_n^a \leq C_n^{(m)} \quad \forall m, n \\ L_{ij}^{\text{shift},a} + H_j \leq k_1 C_j \quad \forall i, j \\ \begin{cases} U_{\min} \leq U_m \leq U_{\max} & m \in r_i; m=e \\ w_{\min} \leq w_m \leq w_{\max} & m \in r_i; m=v \end{cases} \\ \begin{cases} U_{\min} \leq U_n^{\text{shift}} \leq U_{\max} & n \in r_j; n=e \\ w_{\min} \leq w_n^{\text{shift}} \leq w_{\max} & n \in r_j; n=v \end{cases} \end{cases} \quad (2)$$

其中, L_k^a 为第 k 号管线段出口负荷,当该线所带为电负荷时(e 表示电力),由于馈线 k 可能存在分段开

关,此时 L_k^a 为馈线段负荷之和,当该线所带为多能负荷时(v 表示冷、热、气类多能),由于管线中不存在分段结构,此时 L_k^a 为管线段负荷; $L_{mn}^{\text{shift},e}$ 为电力馈线 m 发生 $N-1$ 故障时转带给馈线 n 的负荷,等价于工作点分量中的馈线段负荷 L_m ; $L_{mn}^{\text{shift},v}$ 为多能管线 m (如冷、热、气管线等)发生 $N-1$ 故障后转带给管线 n 的多能负荷(如冷负荷、热负荷、气负荷等); H_j 为设备 j 所带的负荷; $L_{ij}^{\text{shift},a}$ 为设备 i 发生 $N-1$ 故障后转带给设备 j 的负荷; $L_{mn}^{\text{shift},a}$ 为管线 m 发生 $N-1$ 故障后转带给管线 n 的负荷; L_n^a 为管线 n 所带的负荷; $C_n^{(m)}$ 为管线 L_n 的额定容量,也表示管线 m 与管线 n 有转带关系; C_j 为设备 j 的额定容量; k_i 为设备 j 短时允许的过载系数; r_i 为设备 i 出口的管线集合; $m \in r_i$ 表示管线 m 出自设备 i ; U_m, w_m 表示系统正常运行且管线 m 负荷类型为电负荷、多能负荷时,管线 m 的电压及多能网络的气压、水压等关键运行参数; $U_n^{\text{shift}}, w_n^{\text{shift}}$ 表示管线 m 退出运行且与其联络的管线 n 在负荷类型为电负荷、多能负荷时,管线 n 的电压及多能网络的气压、水压等关键运行参数。

式(2)中各子式分别表示多能源类型下的管线负荷等式约束、设备与对应管线的负荷等式约束、设备 $N-1$ 故障后的管线负荷转带等式约束、关键管线 $N-1$ 故障后的转带管线容量不等式约束、关键设备 $N-1$ 故障后的转带设备容量不等式约束、正常运行时管线的运行约束、管线发生 $N-1$ 故障后与其有联络的转带管线的运行约束。

2.3 工程简化的安全边界模型

式(2)表示的是EH中任意设备及管线 $N-1$ 故障后的安全域全模型安全约束,而在工程实践中,由于管线的线路长度往往较短,同时系统中存在无功补偿或循环泵等设备可对电压^[17]、水压^[18]等运行参数进一步调节,因此可对式(2)中的关键运行参数约束进行简化处理。为提升计算速度,本文基于简化的安全约束定义了安全边界模型,假设设备短时允许的过载系数为1,则任意安全边界 B_m 可表示为:

$$B_m = \begin{cases} C_{L_n}^{(m)} - L_{mn}^{\text{shift},a} - L_n^a = 0 & m \in r_i; n \in r_j \\ C_j - L_{ij}^{\text{shift},a} - H_j = 0 & m \in r_i; n \in r_j \end{cases} \quad (3)$$

式(3)确定的安全约束是线性的,因此安全边界 B_m 可用超平面表示,其通式可记为 $C^* - \sum L_k = 0$,其中 C^* 为管线/设备容量, L_k 为故障后的该管线/设备负荷。可见,每个边界 B_m 包含2个超平面方程,即管线 $N-1$ 约束方程与设备 $N-1$ 约束方程,工作点维度为 M 的安全域则由 $2M$ 个超平面围成,由系统网架结构、设备容量、管线容量唯一确定。

RIES-SR刻画的是工作点可安全运行的最大区域,调度员可根据工作点在域中的相对位置,判断当前系统的安全状态。当工作点位于安全域内或安全

边界上时,其是 $N-1$ 安全的(简称为安全);当工作点位于安全域外时,其是不安全的。工作点安全性评价结果可直观、快速地给调度员提供系统安全信息,帮助其制定决策方案。

2.4 工作点距安全边界的距离

工作点的安全边界距离(SBD)是指管线出口负荷可增加的最大容量,其可以量化系统的安全裕度。在RIES-SR基础上,定义安全边界距离为工作点到安全边界的垂直距离,属于欧氏空间中点到面的最近距离。工作点 $P(L_1, L_2, \dots, L_m, \dots, L_M)$ 到任意一个 M 维安全边界的距离计算公式为式(4),其中管线 L 数目共计 M 个。

$$f_{\text{SBD}} = \left(C^* - \sum_{m=1}^M L_m \right) / \sqrt{M} \quad (4)$$

当 f_{SBD} 为正时,表明工作点位于边界内部;当 f_{SBD} 为负时,表明工作点位于边界外部;当 f_{SBD} 为0时,表明工作点位于边界上。仅当工作点距所有安全边界的距离均为正时,即所有 f_{SBD} 中的最小距离为正时,工作点处于安全域内,满足 $N-1$ 安全,否则会跨越边界处于不安全状态。

在其他负荷不变情况下,假定安全边界有 B_1, B_2 2条,工作点 $P(L_x, L_y)$ 距安全边界的距离可由式(5)计算获得,其中的变量定义与前文类似,此处不再赘述。

$$\begin{cases} f_{\text{SBD1}} = (C_1 - L_x - L_y) / \sqrt{2} \\ f_{\text{SBD2}} = (C_2 - L_x - L_y) / \sqrt{2} \end{cases} \quad (5)$$

因此,在实际调度中保障系统安全的负荷增量应为 $\Delta L = \min(f_{\text{SBD1}}, f_{\text{SBD2}})$ 。

3 RIES的 $N-1$ 安全性校验

$N-1$ 安全准则是RIES规划与运行中普遍采用的技术准则,也是 $N-1$ 安全性校验需要遵循的基准,其要求RIES在运行时,任一独立元件(EH中关键设备、关键管线出口)发生故障情况下,系统不会失去除故障区外的任何负荷。

考虑到EH设备以及管线出口故障是RIES中最严重、最易发生的情况,同时该处发生故障后具有负荷转带或多能流再分配能力,因此RIES的 $N-1$ 安全性校验主要包括:EH关键设备 $N-1$ 安全性校验,EH关键管线出口 $N-1$ 安全性校验。

3.1 EH关键设备 $N-1$ 安全性校验

EH关键设备 $N-1$ 安全性校验,是指EH中单台设备退出运行时,能否通过联络线或多能流再分配将故障区负荷由互联设备承担。具体而言,故障后变电区通过闭合联络开关将故障区负荷转带至互联设备,多能互补区通过阀门切断故障管线,利用多源互联重新承担故障区负荷。

当负荷转带或者多能流再分配完毕后,应当满足各设备及管线负荷不超过对应的容量约束。负荷转带/多能流再分配应遵循以下规则:

(1) 优先考虑同变电站^[17]/区域能源站内同类设备转带/多能流再分配,承担故障区负荷的转带设备数量应尽量少;

(2) 若同变电站^[17]/区域能源站内同类设备无法转带成功,则通过同EH转带至同负荷类型设备,优先考虑负荷裕量大的设备转带;

(3) 若同EH无法转带成功,则通过EH站内与站外的不同设备同时转带,由多台设备共同承担故障设备负荷,在转带设备的容量裕度之内,按照负荷裕度由高到低排序,依次将负荷转带给不同设备。

以图1为例说明EH关键设备N-1安全性校验需满足的约束。图中,HE为换热装置。

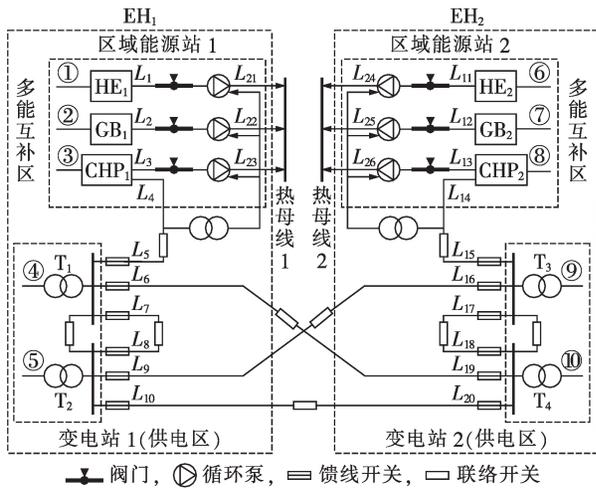


图1 EH关键设备N-1安全性校验示意图

Fig.1 Schematic diagram of N-1 test for EH key equipments

区域能源站(多能互补区):以图1中设备⑦(GB₂)故障为例,说明EH多能互补区关键设备N-1校验需满足的约束如式(6)所示。

$$\begin{cases} L_{11} = C_w \dot{m}_{11} (T_{s6} - T_{o6}) \\ L_{12} = C_w \dot{m}_{12} (T_{s7} - T_{o7}) \\ L_{13} = C_w \dot{m}_{13} (T_{s8} - T_{o8}) \\ L_{11} + L_{12} + L_{13} \leq C_6 + C_8 \\ L_{11} + L_{12} + L_{13} \leq C_{L_{11}} + C_{L_{13}} \end{cases} \quad (6)$$

其中, L_{11} — L_{13} 分别为管道11—13的出口功率; C_w 为水的比热容; \dot{m}_{11} — \dot{m}_{13} 分别为管道11—13的质量流量; T_{s6} — T_{s8} 分别为节点6—8的供水温度; T_{o6} — T_{o8} 分别为节点6—8的回水温度; C_6 、 C_8 分别为设备⑥(HE₂)、⑧(CHP₂)的额定容量; $C_{L_{11}}$ 、 $C_{L_{13}}$ 分别为管道11、13的额定容量。

变电站(变电区):以图1中设备④(主变T₁)故障为例,说明EH变电区关键设备N-1校验需满足的

约束。

转带情况1:设备④(主变T₁)负荷优先考虑同站内设备⑤(主变T₂)转带,若同站内转带成功,需满足式(7)所示的约束。

$$L_5 + L_6 + L_7 + H_5 \leq C_5 \quad (7)$$

转带情况2:若同站内设备⑤(主变T₂)转带不成功,则通过站外设备⑩(主变T₄)、站外设备③(CHP₁)与站内设备⑤(主变T₂)共同转带,需满足式(8)所示的约束。

$$\begin{cases} L_5 + H_3 \leq C_3 \\ L_5 + L_4 \leq C_{L_4} \\ L_6 + H_{10} \leq C_{10} \\ L_6 + L_{19} \leq C_{L_{19}} \\ L_7 + H_5 \leq C_5 \\ L_7 + L_8 \leq C_{L_8} \end{cases} \quad (8)$$

其中, H_3 、 H_{10} 、 H_5 分别为设备③(CHP₁)、⑩(主变T₄)、⑤(主变T₂)所带的负荷。其余参数含义与前文类似。

3.2 EH关键管线出口N-1安全性校验

EH关键管线出口N-1安全性校验,是指当EH中单条管线出口位置发生故障退出运行时,能否通过联络线或多能流再分配将负荷转带给其他联络管线^[18]。当负荷转带或多能流再分配完毕后,应满足各管线负荷不超过对应的容量约束。

以图2为例说明EH关键管线出口N-1安全性校验需满足的约束。

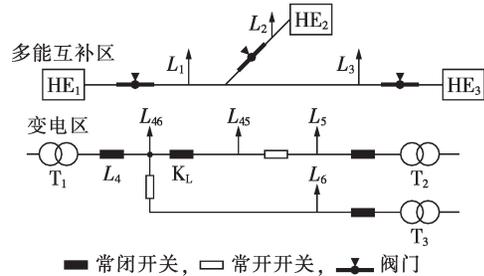


图2 EH关键管线出口N-1安全性校验示意图

Fig.2 Schematic diagram of N-1 test for EH key pipeline outputs

区域能源站(多能互补区):图2中多能互补区共有3条联络管线,以管线1为例说明EH多能互补区的关键管线出口N-1校验原理,应满足约束如式(9)所示。

$$\begin{cases} L_1 = C_w \dot{m}_1 (T_{s1} - T_{o1}) \\ L_2 = C_w \dot{m}_2 (T_{s2} - T_{o2}) \\ L_3 = C_w \dot{m}_3 (T_{s3} - T_{o3}) \\ L_1 + L_2 + L_3 \leq C_{L_2} + C_{L_3} \end{cases} \quad (9)$$

其中, \dot{m}_1 — \dot{m}_3 分别为管道1—3的质量流量; T_{s1} — T_{s3} 分别为节点1—3的供水温度; T_{o1} — T_{o3} 分别为节点1—3的回水温度; C_{L_2} 、 C_{L_3} 分别为管道2、3的额定

容量。

变电站(变电区):图2中变电区共有3条馈线4—6,其中馈线4通过分段开关 K_L 分为2段,这2段分别通过联络开关与馈线5、6相联络。以管线4为例说明EH变电区关键管线出口 $N-1$ 校验原理,应满足约束如下:

$$\begin{cases} L_6 + L_{46} \leq C_{L_6} \\ L_5 + L_{45} \leq C_{L_5} \end{cases} \quad (10)$$

其中, L_{46} 、 L_{45} 分别为馈线段46、45的负荷。其余参数含义与前文类似,此处不再赘述。

4 RIES-SR 安全边界仿真拟合法求解流程

RIES最大供能能力(TSC)是指在一定供能区域内系统满足 $N-1$ 安全准则,同时考虑网络实际运行情况下的最大负荷供应能力。其实质为安全域边界上效率最高的工作点,即TSC是满足 $N-1$ 校验的最大负荷工作点^[19]。基于此,本文在TSC工作点附近,通过仿真拟合求解安全边界。以附录中图A2所示的三维安全域为例,阐述安全边界求解流程。

(1)以系统TSC为优化目标,以安全域模型为约束条件,调用内点法求解系统TSC工作点,获取全网负荷达到TSC时的负荷分布。

(2)选取多能管线出口负荷组合 $L_b=(L_m, L_n, L_o)$ 为自由变量,固定其余 $M-3$ 个变量为TSC分布时的管线负荷;令 L_m 以步长 ΔL 向边界 L_u 逼近,在 L_n 、 L_o 约束范围内,求解使安全域模型约束临界通过的其余2个自由变量 L_n 、 L_o ,将工作点 L_b 记录至临界点数组 B ,直至 L_m 到达边界上限。

(3)利用最小二乘法拟合临界点数组 B ,获取安全域三维可视化边界。

5 算例分析

5.1 算例简介

本文参考某工程案例中以电、热为用能需求的RIES设置算例场景,为便于分析,减少了变电站、区域能源站数量与管线条数,如附录中图A3所示。RIES中共包含2个EH,电力侧基于修改的IEEE-RTBS-BUS4^[20],变电站总容量为 $28 \text{ MV}\cdot\text{A}$;热力侧基于修改的环状热网拓扑^[21],任意管段的流速小于 3 m/s ,供水温度上、下限分别为 100 、 $99 \text{ }^\circ\text{C}$,回水温度上、下限分别为 50 、 $49 \text{ }^\circ\text{C}$ 。EH关键参数如附录中表A1所示。

5.2 RIES的TSC计算结果

经计算得到RIES的TSC为 19.69 MW ,RIES中EH变电区负荷分布为 1.97 、 0.61 、 4.34 、 2.99 MW ;EH多能互补区中CHP负荷分布为 2.62 、 2.09 MW ,GB负荷分布为 0.07 、 2.37 MW ,电锅炉(EB)负荷分布为

0.17 MW ,HE负荷分布为 2.25 MW ,蓄热装置(HS)处于放电状态的功率为 1.35 、 0.36 MW ,蓄电池处于放电状态的功率为 0.90 MW 。各关键管线的TSC允许负荷如表1所示。

表1 TSC允许负荷

管线	负荷 L_n / MW	管线	负荷 L_n / MW
1	0.07	9	2.99
2	2.62	10	0.64
3	2.25	11	2.37
4	0.17	12	1.35
5	2.09	13	0.36
6	1.33	14	0.90
7	0.61	15	3.97
8	4.34	16	0.53

5.3 二维空间上的RIES-SR

选取电力馈线负荷 L_7 、 L_8 组合(L_7 , L_8)为自由变量进行观测,其余管线负荷均处于TSC点,通过仿真拟合求解二维电空间上的安全边界,结果如图3所示。由图3可知,临界点拟合获取的安全边界均为直线,边界围成的区域为梯形;安全域中斜线上工作点的负荷分布均为TSC,其余工作点的负荷分布均小于TSC;热网侧负荷分布均为TSC。

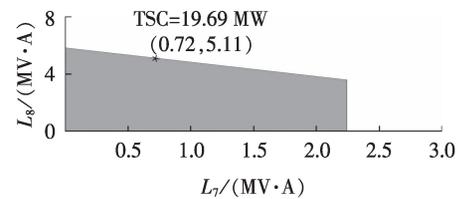


图3 基于(L_7 , L_8)的电网侧二维安全域

Fig.3 Two-dimensional security region of electric network based on (L_7 , L_8)

为说明本文工程化安全域的精度,将电网侧二维安全域与考虑完整约束的准确安全域进行比较,对比结果如图4所示。由对比可知,2种安全域的形状基本相同,边界误差控制在 3% ,工程化安全边界的拟合误差控制在 1% ,工程化安全边界与准确安全边界的误差较小,一定程度上可由工程化安全边界近似替代准确安全边界。

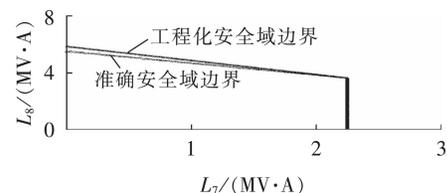


图4 电网工程化安全域与准确安全域对比

Fig.4 Comparison of electric network between engineering and accurate security regions

选取热网管线负荷 L_3 、 L_4 组合(L_3 , L_4)为自由变量,以 0.01 MW 为步长求解二维热空间上的安全边

界,结果如图5所示。由图5可知,临界点拟合获取的安全边界均为直线,边界围成的区域为三角形;安全域中斜线上工作点的负荷分布均为TSC,其余工作点的负荷分布均小于TSC;电网侧负荷分布均为TSC。

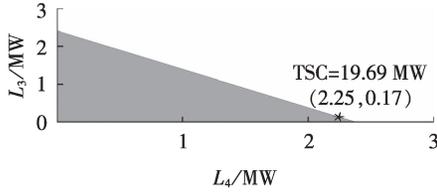


图5 基于 (L_3, L_4) 的热网二维安全域

Fig.5 Two-dimensional security region of thermal network based on (L_3, L_4)

由于热网多热源遵循“闭环运行,故障关阀门断开管线”原则,其安全域至少观测2端管线出口负荷,因此包含电热多能观测变量的RIES-SR至少为三维。由上述分析可知,二维安全域只能实现纯电或纯热侧的可视化,仅适用于非观测能源网络负荷分布均为TSC时的场景。然而在系统实际运行中,多能网络负荷分布均处于TSC运行状态的场景较少,以图3所示的电力安全域为例,此时若只观测图3,则无法判断热网中处于非TSC工作点的安全状态,造成系统安全信息缺失,无法综合评判系统的安全状态。而观测电、热双侧能源的安全域则可同时实现电网、热网非TSC工作点的安全性判定,更符合实际观测需求,故需探究基于电热管线出口负荷的三维安全域。

5.4 三维空间上的RIES-SR

考虑到RIES在实际运行中存在电、热双侧不同时处于TSC工作状态情况,故本文假定附录中图A3中热力管线负荷 L_3, L_4 与电力馈线负荷 L_7 存在供能波动,未处于TSC恒定值,其余管线均处于最大供能状态,负荷分布为TSC。因此,为实现波动管线的安全性观测,选取多能管线负荷组合 (L_7, L_4, L_3) 为自由变量求解含储能系统的RIES三维安全域 SR_1 ,计算结果如图6所示,其中 HS_1 与蓄电池接入 EH_1 中

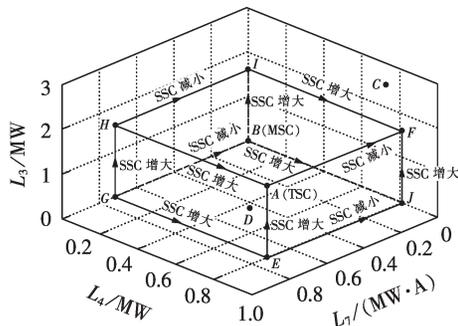


图6 基于 (L_7, L_4, L_3) 的含储能系统三维安全域 SR_1

Fig.6 Three-dimensional SR_1 with storage system based on (L_7, L_4, L_3)

CHP, HS_2 接入 EH_2 中EB。图中点C、点D分别为电、热双侧能源网络中部分未处于TSC的工作点,此时点D安全、点C不安全,而这两点的安全状态信息无法由图3、图5所示的二维安全域获取,因此三维安全域的观测是必要的。

图6中,临界点拟合获取的安全边界为直线,所围成的区域为台体,TSC工作点为点A(0.72 MV·A, 0.80 MW, 1.60 MW);最小供能能力(MSC)工作点为点B(0,0,0),除TSC点外台体中其余所有工作点对应的网络管线总负荷均小于TSC。为描述系统供能能力变化趋势,定义系统供能能力(SSC),则安全边界BJ、IF、HA、GE、EA、JF、BI、GH方向上的SSC逐渐增大,EJ、GB、AF、HI方向上的SSC逐渐减小。

储能作为RIES中的重要环节,具有削峰填谷、容量调配、调节供能能力等特点,有助于改善系统运行的经济性、安全性、环保性。为探究储能装置对RIES安全性的具体影响,求解EH侧未安装 ES, HS_1, HS_2 的安全域 SR_2 如图7所示,其与EH安装有储能装置的安全域 SR_1 对比如表2所示。

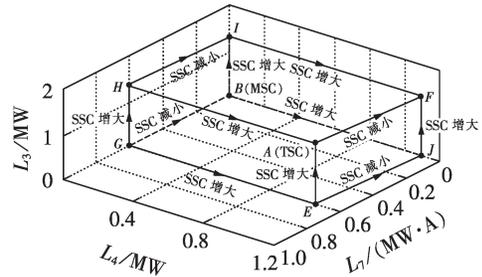


图7 基于 (L_7, L_4, L_3) 的不含储能系统三维安全域 SR_2

Fig.7 Three-dimensional SR_2 without storage system based on (L_7, L_4, L_3)

表2 SR_1 与 SR_2 安全范围对比

Table 2 Comparison of security range between SR_1 and SR_2

安全范围	$L_7 / (\text{MW} \cdot \text{A})$	L_4 / MW	L_3 / MW	域体积 / $[\text{MW}^2 \cdot (\text{MW} \cdot \text{A})]$
SR_1	0~0.72	0~0.81	0~1.59, 0~1.60	0.93
SR_2	0~0.60	0~1.09	0~1.31, 0~1.34	0.87

当 RES_2 中安装有储热装置时, HS_2 与 HE, GB_2, EB 共同承担热负荷,此时为了保障故障扫描的完整性与安全域对比的同一参照性, SR_1 与 SR_2 的工作点均选取 HE, EB, T_2 管线段出口负荷进行观测。 HS_2 的加入分担了管线负荷 L_3, L_4 的负载压力,EB消耗的电功率降低,管线负荷 L_9 可转带的负荷量增大,间接使得负荷 L_7 增加。因此,储能装置加入EH,热网侧负荷 L_4 安全范围有所减小,负荷 L_3 安全范围有所增大,电网侧负荷 L_7 安全范围有所提升;系统的整体供能能力增加了2.64 MW;安全域体积提升了6.90%。

工作点的安全范围扩大,有助于改善系统的整体安全特性。

5.5 工作点安全性评价与 $N-1$ 安全性校验

以图 6 含储能系统的三维安全域 SR_1 为例,选取 TSC 工作点 A、域外工作点 C、域内工作点 D 分别对其进行 $N-1$ 安全性校验,校验结果见下文。

5.5.1 TSC 工作点

安全域边界上 TSC 工作点 A (0.72 MV·A, 0.80 MW, 1.60 MW) 为安全状态,对其进行 $N-1$ 安全性校验,校验结果如表 3、4 所示。可知,除设备 CP_2 及管线 8、9、15 的 $N-1$ 安全性校验处于临界状态外,其余关键设备及关键管线的 $N-1$ 安全性校验结果均为通过。“临界状态”即 $N-1$ 安全性校验恰好处于通过与不通过的临界状态,当任意管线负荷稍微增加时, $N-1$ 安全性校验不通过;当任意管线负荷稍微减少时, $N-1$ 安全性校验通过。

表 3 EH 关键设备 $N-1$ 安全性校验结果
Table 3 $N-1$ security test results for EH key equipments

关键设备	校验结果	关键设备	校验结果
GB_1	1	T_1	1
CP_1	1	T_2	1
CHP	1	T_3	1
CP_2	—	T_4	1
HE	1	GB_2	1
CP_3	1	HS_1	1
EB	1	HS_2	1
CP_4	1	ES	1

注:“1”表示通过,“—”表示临界状态,后同。

表 4 EH 关键管线出口 $N-1$ 安全性校验结果
Table 4 $N-1$ security test results for EH key pipeline outputs

关键管线	校验结果	关键管线	校验结果
1	1	9	—
2	1	10	1
3	1	11	1
4	1	12	1
5	1	13	1
6	1	14	1
7	1	15	—
8	—	16	1

5.5.2 安全域外工作点

安全域外工作点 C (0, 0.7 MW, 2.2 MW) 为不安全状态,对其进行 $N-1$ 安全性校验,其余管线负荷保持在 TSC 点。校验结果如表 5、6 所示。可见对设备 CP_3 、 GB_2 、管线 3、11 的 $N-1$ 安全性校验均不通过,对设备 CP_2 、管线 9、15 的 $N-1$ 安全性校验均临界通过。

5.5.3 安全域内工作点

安全域内工作点 D (0.6 MV·A, 0.7 MW, 0.2 MW)

表 5 EH 关键设备 $N-1$ 安全性校验结果
Table 5 $N-1$ security test results for EH key equipments

关键设备	校验结果	关键设备	校验结果
GB_1	1	T_1	1
CP_1	1	T_2	1
CHP	1	T_3	1
CP_2	—	T_4	1
HE	1	GB_2	0
CP_3	0	HS_1	1
EB	1	HS_2	1
CP_4	1	ES	1

注:“0”表示不通过,后同。

表 6 EH 关键管线出口 $N-1$ 安全性校验结果
Table 6 $N-1$ security test results for EH key pipeline outputs

关键管线	校验结果	关键管线	校验结果
1	1	9	—
2	1	10	1
3	0	11	0
4	1	12	1
5	1	13	1
6	1	14	1
7	1	15	—
8	1	16	1

为安全状态,对其进行 $N-1$ 安全性校验,其余管线负荷均保持在 TSC 点,校验结果如表 7、8 所示,可见 EH 关键设备及关键管线的 $N-1$ 安全性校验结果均为通过。

表 7 EH 关键设备 $N-1$ 安全性校验结果
Table 7 $N-1$ security test results for EH key equipments

关键设备	校验结果	关键设备	校验结果
GB_1	1	T_1	1
CP_1	1	T_2	1
CHP	1	T_3	1
CP_2	1	T_4	1
HE	1	GB_2	1
CP_3	1	HS_1	1
EB	1	HS_2	1
CP_4	1	ES	1

表 8 EH 关键管线出口 $N-1$ 安全性校验结果
Table 8 $N-1$ security test results for EH key pipeline outputs

关键管线	校验结果	关键管线	校验结果
1	1	9	1
2	1	10	1
3	1	11	1
4	1	12	1
5	1	13	1
6	1	14	1
7	1	15	1
8	1	16	1

5.6 工作点的安全边界距离分析

针对图6中安全域,选取5.5节中3个工作点分别计算其与各安全边界的距离,各平面法向量方向设定为 xyz 轴正方向,即负荷 L_7 、 L_4 、 L_3 增长方向,结果如表9所示。

表9 工作点的安全边界距离
Table 9 Security boundary distance of operating points

安全平面	与各平面的安全边界距离		
	点A	点C	点D
AHGE / (MV·A)	0	0.72	0.12
FIBJ / (MV·A)	0.72	0	0.60
EJFA / MW	0	0.11	0.10
GBIH / MW	0.80	0.70	0.70
AHIF / MW	0	-0.61	1.39
EGBJ / MW	1.60	1.20	0.20

由表9可知,点A的 f_{SBD} 均为非负值,为安全工作点,距平面EGBJ的 f_{SBD} 最大,平面EGBJ法线反方向上的负荷可调域量最大为1.60 MW;点C的 f_{SBD} 存在负值,为不安全工作点,其有效可达距离为沿平面AHIF法线反方向降低负荷0.61 MW,可指导其快速调整至安全域内;点D的 f_{SBD} 均为正值,为安全工作点,距平面EJFA的 f_{SBD} 最小,安全域量较为不足,应沿平面EGFA法线反方向调整工作点负荷,将其引导致安全裕度更大的位置。

6 结论

本文基于EH管线段出口负荷,面向RIES提出了一种安全域模型,模型计及了EH关键设备与关键管线出口 $N-1$ 安全约束,通过量化工作点安全边界,可为调度员提供一种可视化安全性分析工具。由算例结果可得如下结论:

(1) 本文所提的RIES-SR模型可以计算系统的TSC;

(2) RIES-SR的降维观测宜采用含电、热的多能侧绘制三维安全域,获取的工作点安全性信息更全面;

(3) RIES-SR可以直观地判断工作点安全状态,观测系统安全边界,域内及边界上工作点均为 $N-1$ 安全,域外工作点不满足 $N-1$ 安全;

(4) 储能装置的加入可以扩大安全域体积,提高系统TSC,是改善系统安全性的一种可行措施;

(5) 提出的安全边界距离指标可评估工作点的安全状态,定量刻画工作点的安全域量。

本文提出的安全域模型是RIES安全性分析的理论基础,笔者的后续工作将讨论安全域的严格数学定义,并研究基于安全域的RIES安全控制策略。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 彭克,张聪,徐丙垠,等. 多能协同综合能源系统示范工程现状与展望[J]. 电力自动化设备, 2017, 7(6): 3-10.
PENG Ke, ZHANG Cong, XU Bingyin, et al. Status and prospect of pilot projects of integrated energy system with multi-energy collaboration [J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 3-10.
- [3] 张思德,胡伟,卫志农,等. 基于机会约束规划的电-气互联综合能源系统随机最优潮流[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 121-128.
ZHANG Side, HU Wei, WEI Zhinong, et al. Stochastic optimal power flow of integrated power and gas energy system based on chance-constrained programming [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 121-128.
- [4] 潘益,梅飞,郑建勇,等. 计及静态安全因素与热电最优潮流的综合能源系统联合运行优化模型[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 50-57.
PAN Yi, MEI Fei, ZHENG Jianyong, et al. Operation optimization model for multi-integrated energy systems considering static security and optimal energy flow [J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 50-57.
- [5] 潘绍光,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 Shaoguang, SUN Hongbin, GUO Qinglai. Energy internet oriented static security analysis method for multi-energy flow [J]. Power System Technology, 2016, 40(6): 1627-1634.
- [6] 包铭磊,杨阳,丁一,等. 考虑天然气系统影响的电力系统连锁故障评估[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 32-40.
BAO Minglei, YANG Yang, DING Yi, et al. Assessment of cascading failures in power system considering effects of natural gas system [J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 32-40.
- [7] 梅建春,卫志农,张勇,等. 考虑关键故障筛选的电-气互联综合能源系统混合控制方法[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 23-31.
MEI Jianchun, WEI Zhinong, ZHANG Yong, et al. Hybrid control of integrated power and gas energy systems based on significant contingency screening [J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 23-31.
- [8] BAI L, LI F, JIANG T, et al. Robust scheduling for wind integrated energy systems considering gas pipeline and power transmission $N-1$ contingencies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(2): 1582-1584.
- [9] 曾沅,常江涛,秦超,等. 基于相轨迹分析的实用动态安全域构建方法[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(7): 1905-1912.
ZENG Yuan, CHANG Jiangtao, QIN Chao, et al. A method for building practical dynamic security region based on phase-plane trajectory [J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(7): 1905-1912.
- [10] 姜涛,谭洪强,李雪,等. 电力系统热稳定安全域边界快速搜索的优化模型[J/OL]. 中国电机工程学报. (2018-07-26) [2019-04-15]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.180551>.
- [11] XIAO J, ZU G, GONG X, et al. Observation of security region boundary for smart distribution grid [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 8(4): 1731-1738.
- [12] CHEN S, WEI Z, SUN G, et al. Steady-state security regions of electricity-gas integrated energy systems [C] // 2016 IEEE

- Power and Energy Society General Meeting(PESGM). Boston, MA, USA:IEEE,2016:1-5.
- [13] CHEN S, WEI Z, SUN G, et al. Convex hull based robust security region for electricity-gas integrated energy systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3):1740-1748.
- [14] LI Y J, WANG F R. Implementation of smart grid software system based on configurable feeder terminal unit [C]//2012 IEEE Symposium on Electrical & Electronics Engineering. Kuala Lumpur, Malaysia:IEEE,2012:277-280.
- [15] 米晓庆. 东北天然气站用小型 RTU 装置开发设计[D]. 天津:天津大学,2009.
MI Xiaoqing. Design of small scaled RTU used in natural gas stations of northerneast China[D]. Tianjin:Tianjin University,2009.
- [16] 王伟亮,王丹,贾宏杰,等. 考虑运行约束的区域电力-天然气-热力综合能源系统能量流优化分析[J]. 中国电机工程学报, 2017,37(24):1-13.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Analysis of energy flow optimization in regional electricity-gas-heat integrated energy system considering operational constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(24):1-13.
- [17] 肖峻,谷文卓,贡晓旭,等. 基于馈线互联关系的配电网最大供电能力模型[J]. 电力系统自动化,2013,37(17):72-77.
XIAO Jun, GU Wenzhuo, GONG Xiaoxu, et al. A total supply capability model for power distribution network based on feeders interconnection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17):72-77.
- [18] 王珺,顾伟,陆帅,等. 结合热网模型的多区域综合能源系统协同规划[J]. 电力系统自动化,2016,40(15):17-24.
WANG Jun, GU Wei, LU Shuai, et al. Coordinated planning of multi-district integrated energy system combining heating network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15):17-24.
- [19] 肖峻,贺琪博,贡晓旭,等. 智能配电网 $N-1$ 安全边界拓扑性质及边界算法[J]. 中国电机工程学报,2014,34(4):545-554.
XIAO Jun, HE Qibo, GONG Xiaoxu, et al. Topological characteristics and algorithm of $N-1$ security boundary for smart distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(4):545-554.
- [20] 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.
- [21] 姚帅,顾伟,张雪松,等. 热网特性对于综合能源系统超短期调度的影响[J]. 电力系统自动化,2018,42(14):89-96.
YAO Shuai, GU Wei, ZHANG Xuesong, et al. Effect of heating network characteristics on ultra-short-term scheduling of integrated energy system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(14):89-96.

作者简介:



刘 柳

刘 柳(1995—),女,河北沧州人,硕士研究生,主要研究方向为综合能源系统安全性分析(**E-mail**:liulsu@tju.edu.cn);

王 丹(1981—),男,安徽安庆人,副教授,博士,通信作者,主要研究方向为综合能源系统分析、智能配用电系统分析、分布式供能与微网(**E-mail**:wangdantjue@tju.edu.cn);

贾宏杰(1973—),男,河北石家庄人,教授,博士,主要研究方向为大电网稳定性分析、电网规划、新能源集成、综合能源系统分析(**E-mail**:hjia@tju.edu.cn)。

Security region model for regional integrated energy system

LIU Liu, WANG Dan, JIA Hongjie, LI Siyuan

(Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: The automation level of RIES (Regional Integrated Energy System) has improved rapidly, which lays a foundation for load transfer after faults, so the system security boundaries based on the $N-1$ security guideline need to be further researched. For RIES with EH (Energy Hub) as multi-energy supply source, the concept and model of RIES-SR (Regional Integrated Energy System Security Region) are proposed. The $N-1$ security test method of RIES is analyzed, including EH key equipment $N-1$ security test and EH $N-1$ key pipeline output security test. Then, a simulation fitting calculation method for security boundaries is proposed based on the total supply capability point, which can realize dimension reduction observation of security boundaries. The effectiveness of the proposed model is verified by a case study, where the energy supply capability, security state and security boundary distance are discussed.

Key words: regional integrated energy system; energy hub; security region; $N-1$ security test; total supply capability

附录

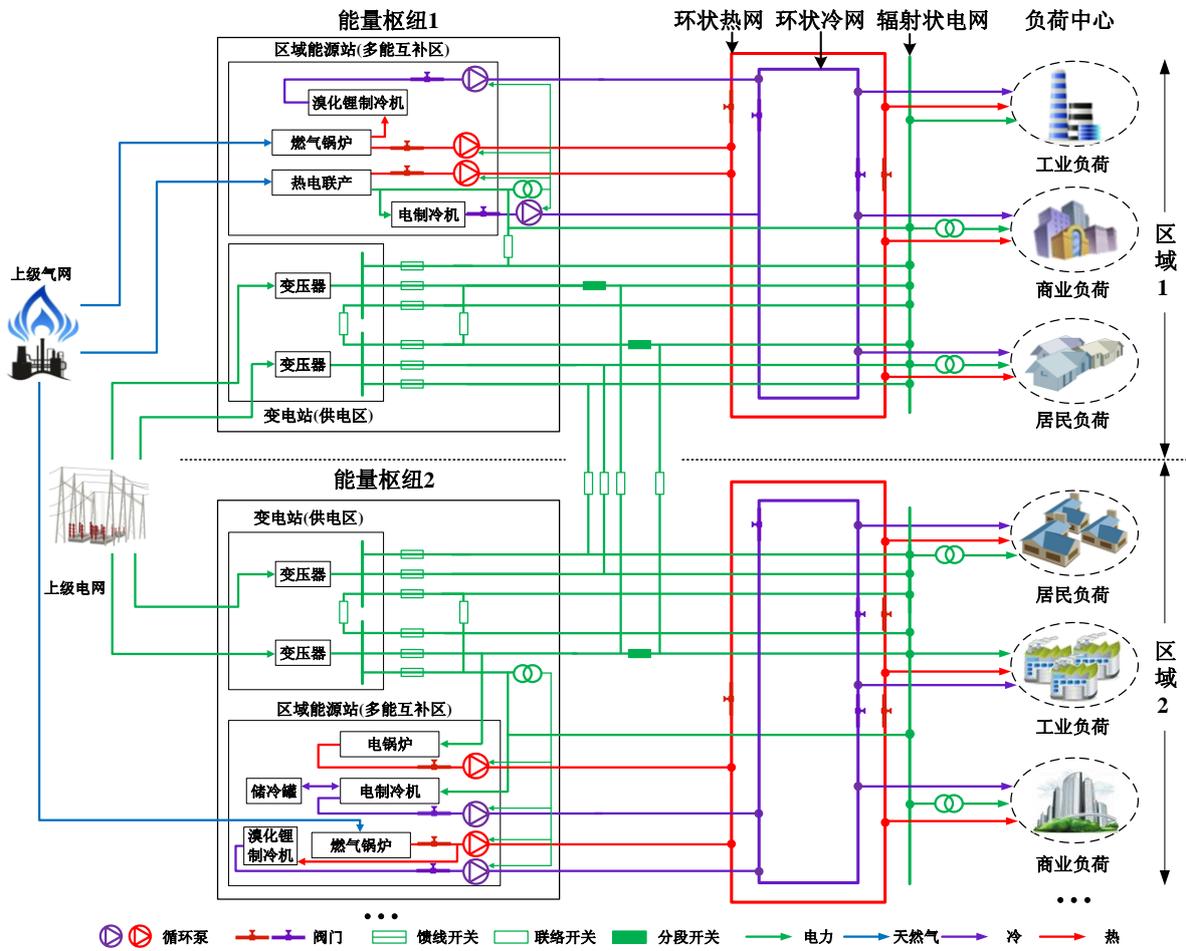


图 A1 基于多 EH 互联的 RIES 示意图

Fig.A1 Schematic diagram of RIES based on multiple EH interconnections

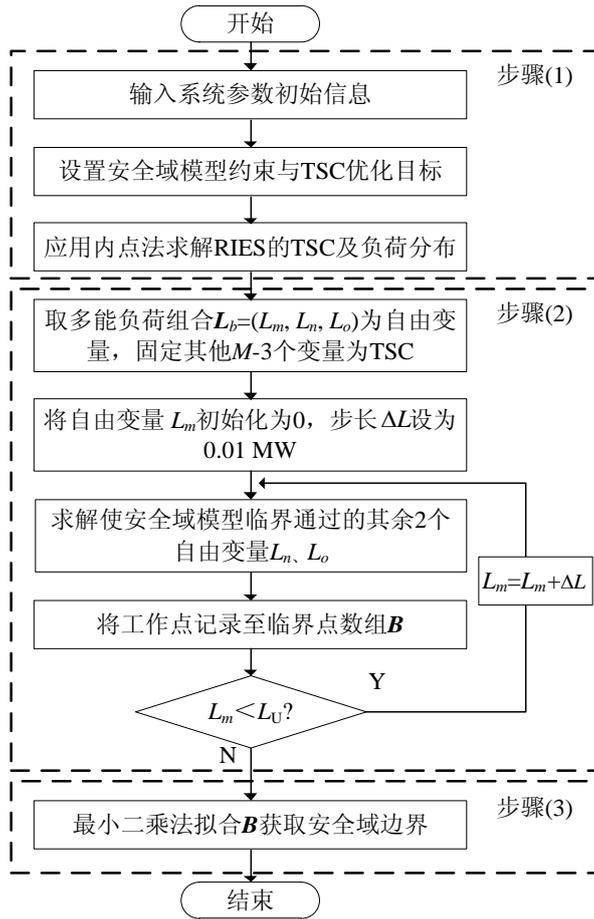


图 A2 三维安全域边界的仿真拟合求解流程图

Fig.A2 Flowchart of three-dimensional security region boundaries solution based on simulation and fitting method

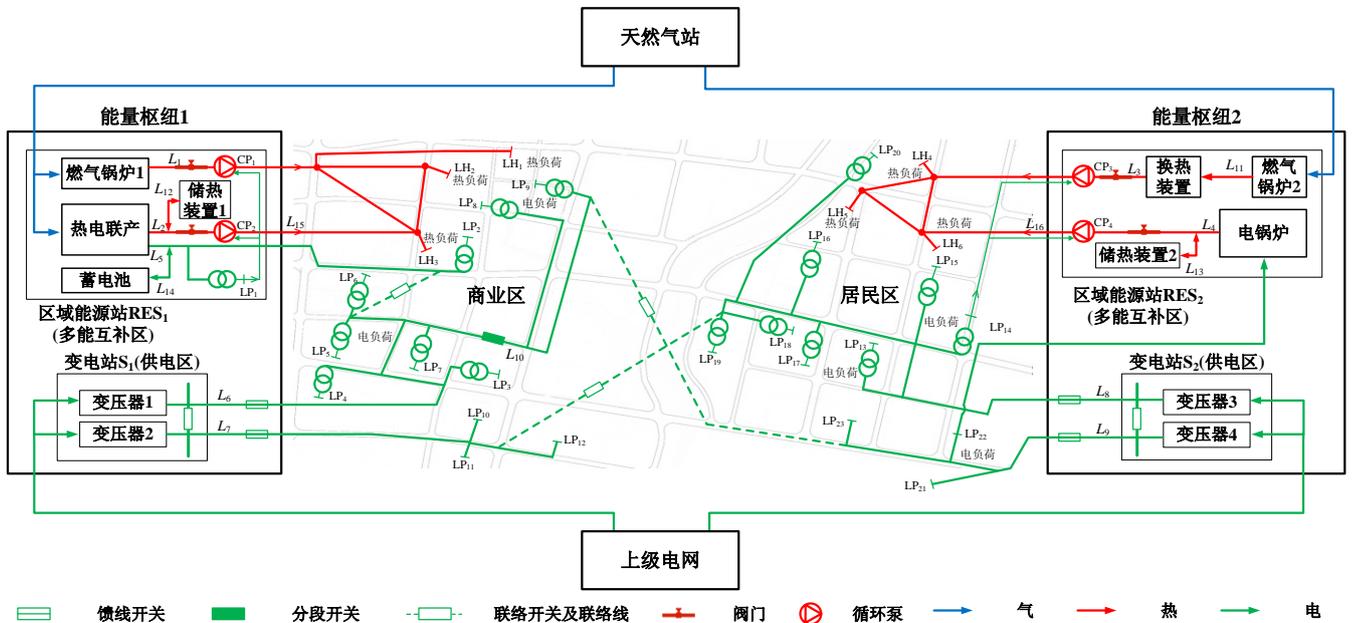


图 A3 RIES 算例场景示意图^[20-21]

Fig.A3 Case diagram of RIES

表 A1 EH 关键参数^[20-21]

Table A1 Key parameters of EHs

EH	对象	设备	设备参数	设备容量	主干线参数/型号	主干线允许流量/容量
EH ₁	RES ₁	GB ₁	能源转换效率: 0.9	3MW	DN400	376.99 kg/s
		CHP	热电比: 0.8~1	4MW	热: DN300; 电: JKLYJ-120	热: 212.06 kg/s; 电: 5.83 MV·A
		HS ₁	储存\释放热能效率: 0.99	0.3 MW·h	DN300	212.06 kg/s
		Battery	储存\释放电能效率: 0.95	0.3 MW·h	JKLYJ-120	5.83 MV·A
		CP ₁ , CP ₂	能源转换效率: 0.6	0.3 MW	DN400, DN300	376.99 kg/s, 212.06 kg/s
	S ₁	T ₁	变比: 35kV/10kV	8 MV·A	JKLYJ-120	5.83 MV·A
	T ₂	变比: 35kV/10kV	8 MV·A	JKLYJ-120	5.83 MV·A	
EH ₂	RES ₂	EB	能源转换效率: 0.8	3 MW	DN300	212.06 kg/s
		GB ₂	能源转换效率: 0.9	5 MW	DN300	212.06 kg/s
		HE	能源转换效率: 0.95	5 MW	DN300	212.06 kg/s
		HS ₂	储存\释放热能效率: 0.99	0.4 MW·h	DN300	212.06 kg/s
		CP ₃ , CP ₄	能源转换效率: 0.6	0.3 MW	DN300	212.06 kg/s
	S ₂	T ₃	变比: 35kV/10kV	6 MV·A	JKLYJ-150	6.91 MV·A
	T ₄	变比: 35kV/10kV	6 MV·A	JKLYJ-150	6.91 MV·A	