

综合能源配电系统运行域模型

刘 柳,王 丹,贾宏杰,王成山,王伟亮
(天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072)

摘要:综合能源配电系统(IEDS)是未来配电系统的一种可行发展形态,多能耦合在改善经济性、综合能效等方面的同时,也给系统的安全稳定运行带来诸多挑战。为研究系统的最大运行边界,基于电、气、热典型能源耦合的IEDS形态分析,提出IEDS运行域的概念与模型。考虑到能量枢纽(EH)的地理分隔与能源调控作用,将安装有自动化控制装置的EH输入侧联络线功率集合定义为工作点。进而以EH为调控手段,重点关注电压约束,提出运行域工作点电压边界遍历仿真求解算法。最后,以典型电-气耦合IEDS为例,求解不同观测变量构成的多种运行域,并进一步分析多能流约束、多能负荷变化以及热电比可调模式对运行域的影响。计算结果表明,所提方法可以准确描述系统的运行状态与可行边界,其结果可为调度人员提供一定的理论指导。

关键词:综合能源配电系统;能量枢纽;运行域;多能流;运行约束
中图分类号:TM 73 **文献标志码:**A **DOI:**10.16081/j.epae.201908001

0 引言

近年来,能源需求的持续增长以及由此引发的气候环境问题日益突出,传统能源结构亟待提质升级。另一方面,以冷热电三联供、燃气锅炉等为代表的能源转换关键技术发展迅速,其为新型能源供给方式的提出奠定了技术基础^[1]。能源互联网、综合能源系统等概念的提出,揭示了多能源系统之间具有协同优化的可调潜力。而配电系统(下文简称为EPS)在区域级和用户级层面,对可再生能源集成、能量交互利用以及“源-网-荷-储”运行优化等方面具有承上启下作用,故基于多源协同利用的综合能源配电系统^[1]IEDS(Integrated Energy Distribution System)受到普遍关注,其可视为传统EPS的一种可行的发展形态,是近年来国内外在能源/电气领域发展的重点。

多能源耦合一方面给EPS带来经济性、环保性、能效性等方面的诸多好处^[2],但另一方面,由于各能源子系统的结构、特性、组成存在差异,耦合形式多样复杂,也给IEDS的规划、运行、潮流、保护等方面带来新的挑战^[2]。已有研究对多能耦合系统的静态安全分析进行了初探,文献[2]针对预想事故集中不同扰动对电-热耦合系统的影响进行了静态安全分

析,文献[3]讨论了电力系统与天然气系统的相互影响作用,文献[4]提出了计及静态安全因素的热电综合能源系统联合优化模型。上述研究主要通过最优潮流方法保障系统的静态安全,尚未对整个多能系统进行全面的整体衡量,无法获取系统的最大可行边界、运行点距可行边界的距离、可调裕量等信息。而“域”方法可在一定程度上改善传统多能系统静态安全分析的不足,其描述的是系统整体可安全运行的最大区域,通过提供运行点在域中的相对位置获取安全裕度与最优控制信息^[5],使系统的安全监视、评估更为科学和有效。目前针对传统EPS静态安全分析的“域”研究已较为成熟,文献[6]在割集功率空间上构建了系统的静态电压稳定域,有助于系统的在线安全分析;文献[7]基于分区负荷总空间,对电压稳定安全域进行局部近似与降维处理,在保障计算精度的同时缩短了运算时间;文献[8]研究了计及分布式电源的主动配电网运行域模型与特性。然而在IEDS静态安全分析方面,关于“域”的系统性研究尚不充分,考虑多能流约束、系统运行约束的综合能源配电系统运行域IEDS-ORs(Integrated Energy Distribution System-Operation Regions)模型亟待构建。

IEDS是一个典型的高维非线性系统,一般地,在全维功率注入空间中描述系统运行域最为直观,但较高的空间维度使得运行域的精确表达十分困难,故选取典型注入空间十分关键^[6]。考虑到调度人员习惯利用区域间联络线监视系统运行状态,同时IEDS中不同能源系统之间存在天然的地理断面,能量枢纽EH(Energy Hub)^[9-10]常作为能源调控与管理的核心,因此将EH与能源网络耦合处的联络线作为运行域关注重点,其可视为能源网络节点负荷空间^[7]中的注入负荷集合,反映系统运行状态。

收稿日期:2019-01-07;修回日期:2019-05-10

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 Distingui-
shed Young Scholars of China (51625702), the Science and
Technology Project of SGCC(SGTJDK00DWJS1800232) and
the Cooperation Program of UNILAB-DEM

开展运行域研究可以为调度人员提供一种全局可视化方法,表征系统运行的“红线”^[5],界定系统最大可行边界;同时可提供工作点位置,帮助调度人员直观地判断系统运行状态与可行域量,有助于保障IEDS正常工况下的安全运行。本文首先分析了以电、气、热能源形式为主的IEDS典型形态;然后,以EH输入侧联络线功率为运行域观测对象,定义IEDS-ORs并构建相应模型;进一步地,以电压约束为边界点判定依据,提出了运行域电压边界遍历仿真求解算法,该方法同样适用于其他类型运行域求解(如以线路功率约束为判定依据等);最后,以电-气耦合IEDS为例验证所提运行域模型及求解算法的有效性,为电压安全监视提供参考。

1 IEDS典型形态

IEDS以配电、配气、区域热力等典型供能网络为骨干网架,以EH为典型能源耦合环节,是对多能源的生产、分配、转换、消费等环节进行有机协调与优化后所实现的产供销一体化系统,具有能源结构复杂、源荷分布广泛、用能特征多样、能量交互密集、物理信息强耦合等特点^[1]。

多能耦合互动是IEDS区别于传统EPS的典型物理现象^[11],而EH是支持多能互补的重要环节,是本文关注的重点,其可抽象为描述多能源系统中不同能源、多种耦合关系以及供能负荷之间的输入-输出多端口模型,是一种广义的通用化表示方法。根据EH的不同供能对象与能量交互特性,可将其分为区域级EH与用户级EH^[11],如图1所示。前者主要面向区域级能源网络供能,大多为独立大容量供能设备,能量交互形式较为单一;后者主要面向用户侧多能负荷供能,同时也可与区域能源网络实现有效互动,大多为中/小容量能源设备,能量交互形式丰富。

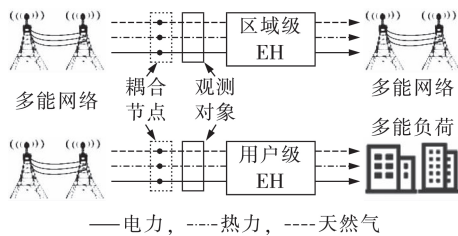


图1 区域级与用户级EH网络拓扑结构示意图

Fig.1 Topological structure schematic diagram of regional-level and user-level EH

附录中图A1基于2种典型的用户级EH,对IEDS逻辑形态进行示意说明。EH可视为IEDS中通过能源网络相连的一种广义变压器,通过对多能流进行合理的分配与转换实现对EH终端多能负荷的供应。EH的基本通用化模型可由图2进行抽象化表示。

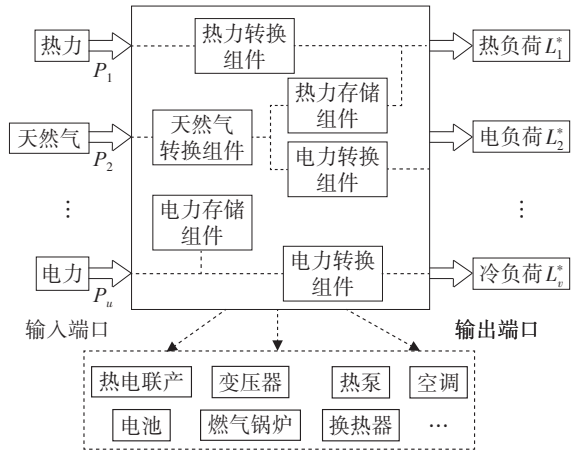


图2 EH通用模型

Fig.2 General model of EH

2 IEDS-ORs定义与模型

IEDS-ORs从系统运行最大出力的角度出发,未考虑 $N-1$ 故障因素,重点关注 $N-0$ 情况下多能流对系统运行的影响,其可视为能源互联网下传统无源EPS运行域在多象限、多观测变量领域的拓展研究。本文针对以电、气、热为典型能源形式的IEDS,以EH输入侧联络线功率为观测对象,提出IEDS-ORs新概念,并对其进行定义与建模。

2.1 IEDS-ORs定义

2.1.1 工作点定义

EH作为不同能源系统耦合交互的核心,是调度人员调控与关注的重点,与多能网络状态关联紧密。考虑到不同类型能源系统的自动化水平具有差异性,本文将EH输入侧安装有自动化控制装置^[12]的联络线功率集合定义为工作点,即工作点具有可观测、可调控能力。假设EH中共有 n 个工作点,可由 n 维欧氏空间中的向量 $\mathbf{P}$ 表示,即 $\mathbf{P} = [P_1 \ \dots \ P_i \ \dots \ P_n]^T$,其中 $P_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为第 i 个可观可测可调的EH输入功率。

2.1.2 运行域定义

IEDS-ORs定义为IEDS背景下,所有满足安全运行约束条件(能量平衡约束、能源网络约束、耦合设备出力约束)的工作点 $\mathbf{P}$ 所构成的集合。若工作点处于运行域内,则其满足所有运行约束条件,可称之为安全运行或 $N-0$ 安全^[8],反之为不安全。

2.2 IEDS-ORs模型

本文重点关注EH联络线上的关键线路,假定除耦合环节外其他环节均处于正常状态,IEDS-ORs模型 $\Omega_{\text{IEDS-ORs}}$ 构建如下:

$$\Omega_{\text{IEDS-ORs}} = \{ \mathbf{P} | \mathbf{f}(\mathbf{P}) = 0, \mathbf{g}(\mathbf{P}) \leq 0 \} \quad (1)$$

其中, $\mathbf{f}(\mathbf{P}) = 0$ 表示IEDS中的能量平衡等式约束集合,包含电力潮流等式约束及天然气、热力等系统能

量流连续等式约束; $g(\mathbf{P}) \leq 0$ 表示 IEDS 中电力、天然气、热力等系统的能源网络约束及耦合设备运行不等式约束集合。

IEDS-ORs 运行边界用于划分安全工作点与不安全工作点,由满足 IEDS 安全运行约束条件的所有临界工作点集合所构成,运行边界模型 $f_{BD \text{ IEDS-ORs}}$ 为:

$$f_{BD \text{ IEDS-ORs}} = \{f_{BD_1}, f_{BD_2}, \dots, f_{BD_j}\} \quad (2)$$

$$f_{BD_j} = \{P | g_j(\mathbf{P}) = 0, f(\mathbf{P}) = 0\}$$

其中, f_{BD_j} 为 $f_{BD \text{ IEDS-ORs}}$ 的第 j 个边界; $g_j(\mathbf{P}) = 0$ 为 EH 输入功率使得第 j 个不等式约束 $g_j(\mathbf{P}) \leq 0$ (如 EPS 中节点电压或线路容量约束等)^[10] 变为等式约束时的临界边界,此时除 $g_j(\mathbf{P})$ 之外的其他不等式约束均保持在运行约束范围内。

基于上述运行域及运行边界模型,可进一步定义安全工作点模型,令向量 $\mathbf{P}_{sec}$ 为运行域中所有安全工作点集合、向量 $\mathbf{P}_{insec}$ 为运行域中所有不安全工作点集合,则 $g(\mathbf{P}_{sec,i}) \leq 0, g(\mathbf{P}_{insec,i}) > 0, \forall i$ 。

2.3 IEDS 运行约束条件

2.3.1 EH 能量平衡约束

根据上文构建的 EH 多端口通用模型,本文选取 2 种典型的 EH (A 类型 EH 与 B 类型 EH) 进行具体能量流特性分析,如图 3 所示。

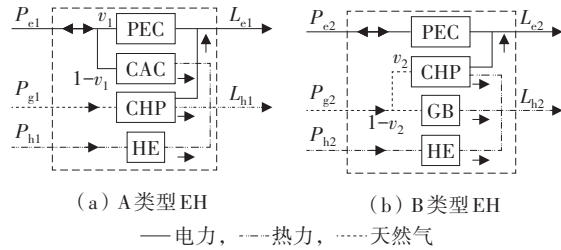


图 3 2 种典型 EH

Fig.3 Two typical EHs

电力电子转换器 PEC (Power Electronic Converter) 是支撑潮流双向流动的物理组件^[10],当 EH 吸收的气功率较高时,在满足 EH 负荷情况下,可通过 PEC 将富余电力输送回电力系统,此时 EH 输入侧电功率 $P_e < 0$ 可实现 EPS 中潮流双向流动。基于此,本文将从 $P_e \geq 0$ 与 $P_e < 0$ 这 2 个方面描述 EH 的能量守恒关系。由能量守恒关系可得 EH 的能量平衡方程如下。

(1) A 类型 EH。

EH 中 $P_e \geq 0$ 时,有:

$$\begin{bmatrix} L_{e1} \\ L_{h1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_1 \eta^{PEC} & \eta^{CHP_{ge}} & 0 \\ (1-v_1) \eta^{CAC} & \eta^{CHP_{gh}} & \eta^{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{e1} \\ P_{g1} \\ P_{h1} \end{bmatrix} \quad (3)$$

EH 中 $P_e < 0$ 时,有:

$$\begin{bmatrix} L_{e1} \\ L_{h1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/(v_1 \eta^{PEC}) & \eta^{CHP_{ge}} & 0 \\ (1-v_1) \eta^{CAC}/v_1 & \eta^{CHP_{gh}} & \eta^{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{e1} \\ P_{g1} \\ P_{h1} \end{bmatrix} \quad (4)$$

(2) B 类型 EH。

EH 中 $P_e \geq 0$ 时,有:

$$\begin{bmatrix} L_{e2} \\ L_{h2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta^{PEC} & v_2 \eta^{CHP_{ge}} & 0 \\ 0 & (1-v_2) \eta^{GB} + v_2 \eta^{CHP_{gh}} & \eta^{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{e2} \\ P_{g2} \\ P_{h2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

EH 中 $P_e < 0$ 时,有:

$$\begin{bmatrix} L_{e2} \\ L_{h2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\eta^{PEC} & v_2 \eta^{CHP_{ge}} & 0 \\ 0 & (1-v_2) \eta^{GB} + v_2 \eta^{CHP_{gh}} & \eta^{HE} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P_{e2} \\ P_{g2} \\ P_{h2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中, v_1, v_2 分别为 A 类型与 B 类型 EH 的分配系数; η^{PEC} 为 PEC 的能源转换效率; η^{CAC} 为中央空调 CAC (Central Air-Conditioner) 的电转热效率; η^{HE} 为换热站 HE (Heat Exchanger) 的热能转换效率; η^{GB} 为燃气锅炉 GB (Gas Boiler) 的气转热效率; $\eta^{CHP_{ge}}, \eta^{CHP_{gh}}$ 分别为热电联产 CHP (Combined Heat and Power) 气转电、气转热效率。

EH 具有多种典型运行模式^[13],不同工况条件下的 EH 能量流约束及建模方式各异,其对运行域计算影响深远。EH 运行模式主要受三部分因素影响:EH 外部能源输入受能源网络状态影响,EH 内部能源转换受耦合组件工况影响,EH 外部能源利用受多能负荷变化影响。基于此,本文对几种典型的 EH 运行模式进行总结,如表 1 所示。

表 1 典型 EH 运行模式

Table 1 Typical operating modes of EH

影响环节	影响因素	运行模式
EH 外部能源输入	多能流运行约束 ^[10]	耦合运行 ^[10]
	传输介质混合 ^[14] (如天然气气质改变等)	混合介质 ^[14]
	能量流双向流动组件接入 ^[8] (如分布式电源、PEC 等)	双向能量流运行 ^[8]
EH 内部能源转换	负荷需求供应顺序 ^[15]	以热定电 ^[15] , 以电定热 ^[15] , 混合运行 ^[15]
	CHP 中余热锅炉类型 ^[13]	热电比恒定 ^[13] , 热电比可调 ^[16]
	CHP 与蓄能技术 (冷、热、电等)结合 ^[17]	供-蓄协同运行 ^[17]
EH 外部能源利用	EH 多能负荷根据用能需求变化 ^[17]	变负荷运行 ^[17]
	EH 负荷通过需求响应策略调控 ^[16]	综合需求响应 ^[16]

2.3.2 EPS 潮流约束

EPS 潮流约束为:

$$\begin{cases} P_q^p = \left| U_q^p \right| \sum_{w \in \Omega_m^m, p \in \{a, b, c\}} \left| U_w^m \right| \times \\ \quad (G_{qw}^{pm} \cos \theta_{qw}^{pm} + B_{qw}^{pm} \sin \theta_{qw}^{pm}) \quad q \in \Omega_n \\ Q_q^p = \left| U_q^p \right| \sum_{j \in \Omega_m^m, p \in \{a, b, c\}} \left| U_w^m \right| \times \\ \quad (G_{qw}^{pm} \sin \theta_{qw}^{pm} - B_{qw}^{pm} \cos \theta_{qw}^{pm}) \quad q \in \Omega_n \end{cases} \quad (7)$$

其中, P_q^p 、 Q_q^p 分别为节点 q 的 p 相有功功率、无功功率; G_{qw}^{pm} 、 B_{qw}^{pm} 分别为节点 q 与节点 w 之间的电导、电纳; θ_{qw}^{pm} 为节点 q 与节点 w 的 p 相与 m 相相角差; Ω_m 为与节点 q 直接相连的所有负荷节点集合; Ω_n 为所有负荷节点集合。

2.3.3 配气系统能量平衡约束

配气系统能量平衡约束主要包括管道流量与节点压力两部分^[18]。考虑到 IEDS 中配气系统(下文简称为 NGS)压力等级往往不高,因此一般采用 Lacey 方程计算低压场景(0~75 mbar)的管道流量,如式(8)所示;支路压力可由式(9)计算;流体力学质量守恒定律可由式(10)计算;耦合节点处天然气热量与功率的对应关系可由式(11)表示。

$$Q_{xy} = 5.72 \times 10^{-4} \sqrt{\frac{(p_x - p_y) D_{xy}^5}{f_{xy} L_{xy} S}} \quad (8)$$

其中, Q_{xy} 为流经管道 xy 的流量; p_x 、 p_y 分别为管道 xy 始、末两端节点压力值; D_{xy} 、 L_{xy} 分别为管道 xy 直径、长度; f_{xy} 为管道 xy 摩擦系数; S 为天然气的相对密度。

$$\Delta P_{\text{press}} = -A^T P_{\text{press}} \quad (9)$$

其中, ΔP_{press} 为支路压力降矩阵; A 为 NGS 的节点-管道关联矩阵; P_{press} 为节点压力矩阵。

$$AQ + \omega_s - \omega_l = 0 \quad (10)$$

其中, Q 为 NGS 中管道流量矩阵; ω_s 为节点天然气供应矩阵; ω_l 为节点天然气负荷需求矩阵。

$$P_g = f_{\text{GHV}} (\omega_l^{\text{with}} - \omega_l^{\text{without}}) \quad (11)$$

其中, P_g 为 EH 输入侧天然气功率矩阵; f_{GHV} 为天然气总热值 GHV (Gross Heating Value); ω_l^{with} 为接入 EH 后的 NGS 耦合节点天然气负荷需求矩阵; $\omega_l^{\text{without}}$ 为接入 EH 前的 NGS 耦合节点天然气负荷需求矩阵。

2.3.4 区域热力系统能量平衡约束

区域热力系统 DHS (District Heating System) 中能量平衡约束主要由水力流量方程、热力流量方程共同构成^[10],其中热媒介质流量及节点供、回水温度等变量是管道流体系统潮流等式约束的关键变量。水力流量方程主要用于描述流量连续性与循环压力守恒,如式(12)所示;热力流量方程则主要用于描述温度降落与流量混合,如式(13)和式(14)所示。

$$\begin{cases} A_D \dot{m} = \dot{m}_s \\ B_D h_l = 0 \end{cases} \quad (12)$$

其中, A_D 、 B_D 分别为节点-管道关联矩阵与水网回路关联矩阵; $\dot{m}$ 、 $\dot{m}_s$ 分别为管道水流质量流量与节点注入的水流质量流量; h_l 为水头损失。

$$T^{\text{end}} = T^{\text{sur}} + (T^{\text{start}} - T^{\text{sur}}) e^{-\frac{\lambda L_{kl}}{C_p \dot{m}_{kl}}} \quad (13)$$

其中, T^{start} 为水流进入管道时的温度; T^{end} 为水流流出管道时的温度; T^{sur} 为外界环境温度; λ 、 L_{kl} 、 $\dot{m}_{kl}$ 分

别为管道的传热系数、长度、质量流量; C_p 为水的比热容。

多管道汇合处的混合温度计算方程如下:

$$\left(\sum \dot{m}_{\text{out}} \right) T^{\text{out}} = \sum (\dot{m}_{\text{in}} T^{\text{in}}) \quad (14)$$

其中, $\dot{m}_{\text{out}}$ 、 $\dot{m}_{\text{in}}$ 分别为节点水流流出、进入的质量流量; T^{out} 、 T^{in} 分别为节点水流流出、进入的温度。

类比电力系统, EH 可视为 DHS 中的热负荷,其消耗的热功率 P_h 与该耦合节点注入的质量流量 $\dot{m}_k$ 呈如下关系^[10]:

$$P_h = (T_s - T_o) C_p \dot{m}_k \quad (15)$$

其中, T_s 、 T_o 分别为水流由热网进入热负荷节点时的供水温度、从热负荷节点流出时的出水温度。

求解运行域首先需满足上述能量平衡关系,其次为了保障 IEDS 处于安全稳定状态供应能源,能源子系统中关键变量与耦合设备出力还需满足相应的运行约束,具体包括^[10]EPS 中电压偏移与馈线容量不等式约束、NGS 中节点压力与管道流量不等式约束、DHS 中质量流量不等式约束、EH 中耦合设备出力不等式约束。

3 IEDS-ORs 边界求解算法

本文以运行域电压边界为例,选取节点电压是否越限为边界点判定依据,计及电压约束外的其他多能流约束,对电压边界求解进行详细介绍。需要说明的是,多能流约束中的其他不等式约束如馈线容量约束等,也可作为边界点判定依据,不同判定依据下的运行域均可通过遍历仿真方法获取。

本文选取 2 种类型 EH 为研究对象,假定电力侧 n 端均安装有自动化控制装置,基于此求解运行域电压边界。假定除 n 个耦合节点之外,其他节点负荷保持不变,通过遍历仿真与边界点拟合方法计算运行域电压边界,算法实现流程如附录中图 A2 所示。

(1) 工作点初始化:根据 EH 负荷及能源转换设备参数确定工作点初始运行边界,将工作点初始化为其下限,令 $i=n$,由第 n 端 EH 工作点开始遍历。

(2) 工作点电压下限遍历:求解此时 EH 工作点情况下的 IEDS 能量流,判断此时工作点是否在满足多能流约束(不含电压约束)的同时满足电压下限约束,若不满足则记录上次迭代工作点数值;若满足则通过增加步长 Δx 更新 $P_{e(i)}$ ($P_{e(i)}$ 为第 i 个 EH 的输入电功率),继续进行电压下限遍历仿真,直至找到违反约束的工作点,并记录上次迭代工作点数值。

(3) 工作点电压上限遍历:工作点电压下限遍历完成后,将 $P_{e(i)}$ 初始化为初值,仿照步骤(2)流程进行工作点电压上限遍历,此时边界点判定条件为节点电压是否满足上限及多能流约束。

(4)IEDS-ORs电压边界拟合:更新 $P_{e(i)}$,进行 $i-1$ 端工作点遍历,重复步骤(2)与步骤(3)迭代,直至所有工作点遍历完毕;对步骤(2)与步骤(3)记录的一系列边界点进行仿真拟合,获得运行域电压边界。

上述电力可观测运行域求解算法具有一定的通用性,其同样适用于电力感知度较差的系统情况,此时可通过观测EH联络线上其他类型能源功率,如EH与NGS联络线上的天然气功率来获取运行边界。

4 算例分析

本文基于MATLAB与OpenDSS平台,以节点电压是否越限为运行域边界点判定依据,选取用户级EH为能源耦合核心,基于一种典型的电-气耦合IEDS^[10]求解运行域。需要说明的是,该方法同样适用于电-热耦合或其他类型运行域求解,笔者将会在后续工作中进行进一步的研究。该系统结构如附录中图A3所示。主要包括以下三部分:修改的IEEE 37节点EPS、11节点低压NGS、I型与II型EH。IEDS具体参数详见附录中表A1与表A2。

EH与EPS、NGS之间的联络线功率由电、气2种能源形式体现,不同能源的自动化控制水平具有差异性,存在某一侧或某两侧不可观现象。为了实现运行域在不同量测水平下的可观可调,本文设置算例1研究以不同能源为观测变量的多种运行域。

为进一步探究不同影响因素下的运行域变化规律及机理,根据IEDS多能源耦合交互特性及表1中典型EH运行模式,选取EH能源输入侧多能流约束^[10]、能源利用侧多能负荷变化^[17]、能源转换侧可调热电比^[16]为影响因素,分别设置算例2—4研究多能流网络约束、EH多能负荷增长、CHP热电比可调模式^[16]对运行域的影响。具体算例场景设置详见表2。

表2 算例场景

Table 2 Case scenes

算例	观测变量	场景设置目的
1	电力与天然气	分析不同观测变量构成的多种运行域
2	电力	研究多能流约束对运行域的影响
3	天然气	研究多能负荷增长对运行域的影响
4	电力	研究CHP热电比可调模式对运行域的影响

4.1 算例1:不同观测变量构成的运行域

本文采用二维可视化方法观测IEDS-ORs,根据EH输入侧不同能源观测水平差异性,分别选取 P_{e1} 、 P_{e2} 和 P_{g1} 、 P_{g2} 以及 P_{g1} 、 P_{e2} 为观测对象,并假定其他变量为常数,绘制由电-电、气-气、电-气不同观测变量构成的运行域体系。基于解耦求解法的混合能量流遍历仿真计算,得到运行域计算结果如图4—6所示。图4—6中,浅灰色虚线区为工作点的初始运行边界,其设定尚未考虑能源网络安全约束,而是依据

EH负荷及能源转换设备参数,人为预先设置可操作边界。考虑IEDS多能流约束后,不同观测变量计算的运行域边界为 L_1 — L_4 、 B_1 — B_4 及 G_1 — G_3 ,其具体含义详见下文。

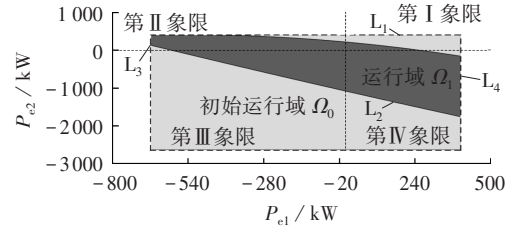


图4 电力可观测运行域

Fig.4 Electricity observable OR

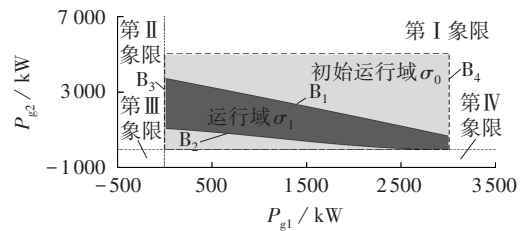


图5 天然气可观测运行域

Fig.5 Gas observable OR

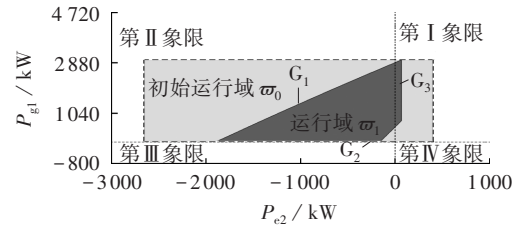


图6 电-气可观测运行域

Fig.6 Electricity-gas observable OR

假定仅有EPS侧安装有自动化控制系统,此时运行域可通过 P_{e1} 与 P_{e2} 表示,如图4所示。由于文章篇幅有限,本文以图4为例,列举部分运行域边界临界点数值,详见附录中表A3。图4中, L_1 与 L_2 分别为EPS节点电压临近下限与上限时,EH输入侧电功率边界; L_3 与 L_4 为工作点临近初始运行域边界时,EH输入侧电功率边界。当 P_{e1} 与 P_{e2} 过大时,EPS负载较高,此时节点电压易接近下限边界,故较高的 L_1 为电压临近下限边界;而当 P_{e1} 与 P_{e2} 为负时,EH向EPS输送功率,相当于在EPS加入“负的负荷”补充无功,此时节点电压易接近上限边界,故较低的 L_2 为电压临近上限边界。

假定仅有NGS侧安装有自动化控制系统,此时运行域可通过 P_{g1} 与 P_{g2} 表示,如图5所示。当EH吸收的天然气功率较高时,其可以在满足自身负荷需求的同时,通过PEC将富余电力输送回EPS,由此可能导致节点电压越上限,故 B_1 为节点电压临近上限时的EH天然气功率边界;而当其吸收的天然气功率较低时,EH负荷需求主要依靠电力供应,此时EH

吸收的电力较多, EPS负荷增加易导致节点电压越下限, 故 B_2 为节点电压临近下限时的EH天然气功率边界; B_3 与 B_4 则为工作点临近初始运行域边界时的EH天然气功率边界。

假定仅有I型EH吸收的气功率与II型EH吸收的电功率联络线处安装有自动化控制装置, 此时运行域可由 P_{g1} 与 P_{e2} 构成, 计算结果如图6所示。与上文运行域边界说明类似, G_1 与 G_2 分别为节点电压临近上限与下限时的的工作点边界, G_3 为临近运行域可行边界时的的工作点边界。

对比上述3种不同观测变量构成的运行域, 可得以下的结论。

(1) 象限扩展。

传统无源配电网中节点功率仅有功率流出的单方向, 故其运行域在二维平面上只位于第I象限。而IEDS中由于PEC提供了潮流双向流动的物理支撑^[12], CHP组件在满足EH负荷需求基础上产生的剩余电力可输送回EPS, 使得EPS中的耦合节点同时具有功率流入与流出的双向特性, 因此含有电力观测变量的IEDS-ORs将产生象限拓展现象。

当以 P_{e1} 与 P_{e2} 为观测变量时, 2个观测变量均含有正、负两部分, 运行域分布在4个象限, 相较于传统配电网拓展了3个象限(见图4); 当以 P_{g1} 与 P_{g2} 为观测变量时, 由于无支撑气功率反向流动的组件, 观测变量均为正值, 故运行域分布在第I象限, 相较于传统配电网无象限拓展(见图5); 当以 P_{g1} 与 P_{e2} 为观测变量时, 仅有 P_{e2} 含有负值部分, 所以运行域分布在第I与第II这2个象限, 相较于传统配电网拓展了1个象限(见图6)。

(2) 运行状态判断与可行裕量调整。

3类运行域可以在多能源自动化控制水平不同情况下, 帮助调度人员多角度全方位直观地判断系统的运行状态, 并提供针对EH联络线功率的多种调控手段。若工作点在运行域内, 则系统处于安全稳定运行状态; 若工作点临近运行域边界, 则说明此时系统的安全裕量较小, 系统应发出预警信号, 督促调度人员及时实施校正控制措施, 使系统保持在具有较充裕安全裕量的运行范围内; 若工作点在运行域外, 则此时系统已越过安全边界, 处于不安全运行状态, 调度人员应根据工作点位置, 适量增大或减小EH输入侧功率, 紧急情况下可选取工作点与运行域边界最近点的连线为EH功率调整方向, 使不安全工作点较快地调整至IEDS-ORs范围内^[19]。

4.2 算例2: 多能流约束对运行域的影响

IEDS中能量交互会使能源子系统的负荷产生一定变化, 进而影响系统的运行状态^[20], 如CHP输入的气功率较高时, 一方面, 产生的电力可以注入至EPS, 可能造成节点电压抬升越限现象; 另一方面,

相当于NGS耦合节点处的负荷需求增多, 系统处于重载运行状态, 可能造成节点气压低于运行下限^[10]。因此, 多能流约束对IEDS-ORs影响深远, 这同时也是IEDS区别于传统EPS的重要特征。

本文以电力安装有自动化控制装置的二维运行域为例, 获取未考虑NGS不等式约束的运行域如图7所示, 其与考虑NGS多能流约束后的二维运行域比较如图8所示。由对比图可知, 相较于未考虑NGS不等式约束的 Ω_2 , 考虑NGS不等式约束的运行域范围 Ω_1 在左下角处有明显的收缩。这是由于左下角EH电功率均为较大负值, 此时EH吸收的气功率较高不满足NGS运行约束。

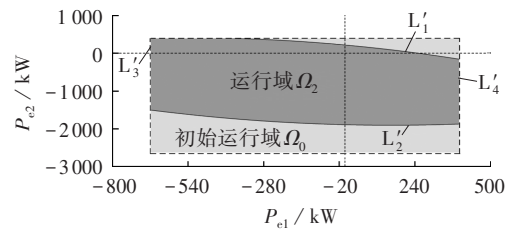


图7 未考虑NGS不等式约束的运行域

Fig.7 OR without considering NGS inequality constraints

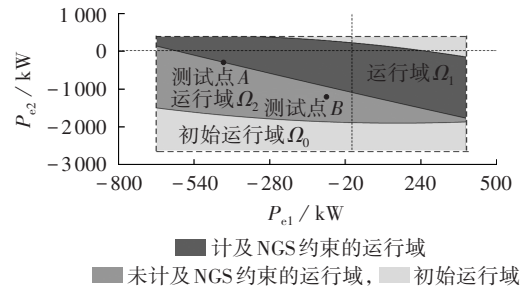


图8 考虑NGS约束前、后的运行域比较

Fig.8 Comparison of ORs before and after considering NGS constraints

选取运行域边界上测试点A与边界外测试点B分别进行多能流运行约束校验, 校验结果如附录中图A4与图A5所示。图中, 测试点A、B处EPS节点电压均保持在相应的运行约束范围内; 测试点A处NGS节点压力均满足运行约束, 而测试点B由于气功率较高, 使得NGS中节点11压力低于运行下限, 系统处于不安全运行状态。此时为了实现系统的安全运行, 调度人员应根据工作点在运行域所处位置, 适当增加EH输入侧功率, 将测试点B调整至运行域 Ω_1 内。

4.3 算例3: 多能负荷增长对运行域的影响

本文研究的IEDS耦合环节运行域与EH供应的冷、热、电等多能负荷大小关联紧密, 多能负荷 L 通过EH能量守恒等式 $L = CP$ 进而影响EH输入侧矩阵 P , 其中包含电功率 P_{e1} 、 P_{e2} 和气功率 P_{g1} 、 P_{g2} 。本文以天然气安装有自动化控制装置的运行域为例, 研

究 EH 多能负荷增长对 IEDS-ORs 的影响。

本文在图 5 所示的 EH 多能负荷基础上,计算 1.3 倍多能负荷与 1.6 倍多能负荷时的运行域,分别如图 9 中 σ_2 及 σ_3 所示。由图 9(d) 可知,随着多能负荷的增长,IEDS 运行域范围呈逐渐缩小趋势,其下边界收缩尤为显著。这是由于随着多能负荷的增长,为了保持能量平衡,此时 EH 吸收的电力与天然气也随之增长,故 EPS 节点电压越下限时,所需的气-电能源转换组件消耗的天然气增多,下边界呈收缩上抬趋势。

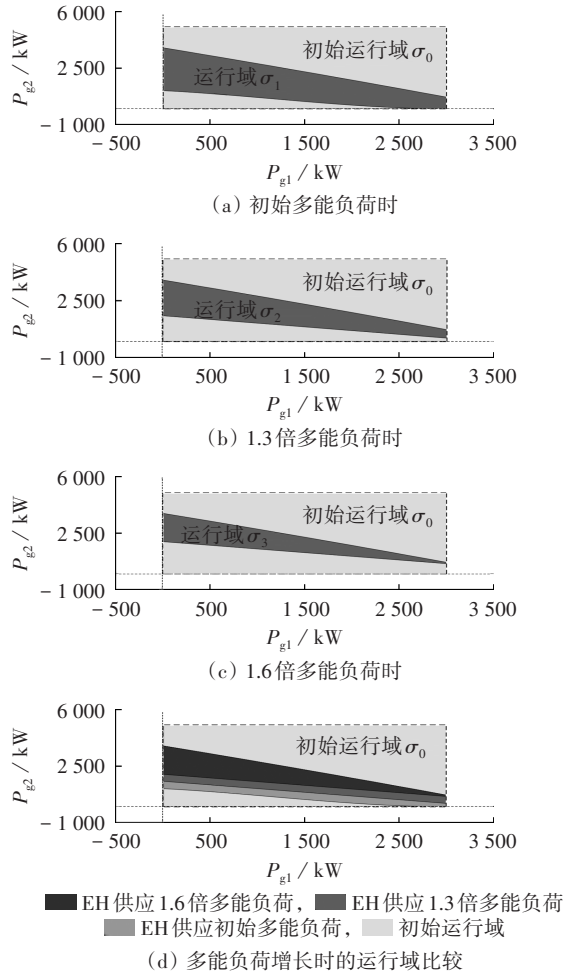


图 9 多能负荷增长时的二维运行域

Fig.9 Two-dimensional feasible operational regions when multi-energy loads increase

因此,为了保障系统的安全稳定运行,调度人员需严格监控 EH 供应的多能负荷,避免负荷中心用能需求激增,引起运行域安全裕度过小,进而造成系统抗干扰能力弱等安全隐患。

4.4 算例 4: CHP 热电比可调模式对运行域的影响

目前关于 EH 运行模式的研究通常采用热电比恒定的 CHP 机组,此时 CHP 中的余热锅炉^[13]为无补燃余热锅炉。而当余热锅炉类型选取带补燃余热锅炉^[21]时,此时可通过控制补燃装置的补燃量调节热

电比,实现提高 CHP 以及 EH 能源转换效率的目标。其中,补燃燃油 P_s 与 CHP 热电比 α 的关系方程^[16]如下:

$$\alpha = K_2 + K_1(K_3 P_s + K_4) \quad (16)$$

其中, $K_3 P_s + K_4$ 为 CHP 的补燃率; $K_1 \sim K_4$ 为拟合系数^[16]。

本文选取投资成本较低、结构相对简单的内补燃装置进行 CHP 的补燃与热电比调节,考虑到内补燃装置的补燃量较少,有一定补燃率约束,故分别选取补燃燃油为 10、20、30 kW 时的 EH 进行 IEDS-ORs 计算,此时热电比分别为 1.514、1.743、1.971,能源转换效率呈逐渐上升趋势。上述 3 种 CHP 热电比模式下的运行域计算结果如图 10 所示。

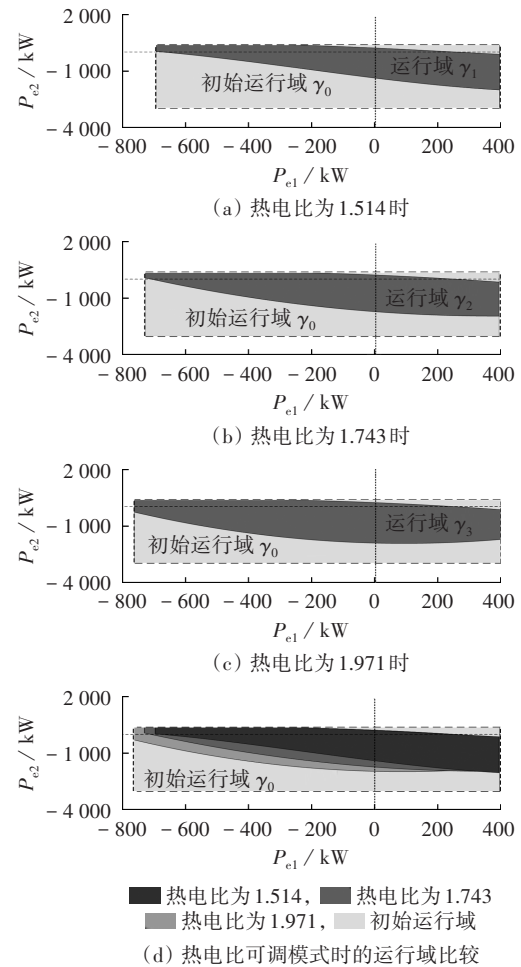


图 10 热电比可调模式下的二维运行域

Fig.10 Two-dimensional feasible operational regions under regulated heat-to-electric ratio mode

由图 10 可知,随着热电比的提高,运行域的范围也逐渐增加。这是由于通过增加 CHP 的热电比调节功能,可以提高 CHP 的热功率输出极限,增大 EH 的供能能力,进而减少其耗电供热比例,此时 EH 输入侧满足运行约束的可输入电功率便会相应的增加。因此,为提高机组的供电能力及用能效率,改善

运行域特性,通过调节补燃装置补燃量提高 CHP 热电比是一种可行方法。

5 结论

本文构建了 IEDS-ORs 模型,提出了运行域最大可行电压边界求解算法,在 EH 输入侧注入空间实现了运行域的可视化表达,可辅助调度人员进行电压安全监视,提出的方法可应用于其他不同类型运行域求解。最后,以一个典型的电-气耦合 IEDS 为例,对所提模型及算法进行了验证,得到结论如下:

(1)运行域可由多种不同观测变量构成,全方位多角度地为调度人员提供工作点运行状态信息与可行裕量调整依据,其中含电力观测变量的运行域具有象限拓展现象;

(2)同等 EH 运行模式及多能负荷情况下,多能流约束使得运行域的范围缩小;

(3)EH 运行模式恒定时,运行域范围随 EH 多能负荷的增长而逐渐缩小;

(4)EH 中 CHP 的热电比可调模式影响运行域最大可行边界,CHP 热电比的增加有助于扩大运行域范围,改善运行域特性。

本文研究了 IEDS 正常工况下的运行域特性,对 IEDS 安全性分析理论进行了初探。在后续研究工作中,将重点关注系统 $N-1$ 校验下的安全域求解,展开系统故障情况下的安全性分析;同时,在运行域方面将研究快速求解高维运行域边界的算法,讨论分布式电源出力波动性、网络侧扰动等不确定因素对运行域的影响,进一步地完善运行域模型。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] WANG D, LIU L, JIA H, et al. Review of key problems related to integrated energy distribution systems[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2018, 4(2): 130-145.
- [2] 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.
- [3] XU X, JIA H, CHIANG H D, et al. Dynamic modeling and interaction of hybrid natural gas and electricity supply system in microgrid[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1212-1221.
- [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): 50-59.
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): 50-59.
- [5] 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.
- [6] 李慧玲, 余贻鑫, 韩琪, 等. 割集功率空间上静态电压稳定域的实用边界[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 18-23.
LI Huiling, YU Yixin, HAN Qi, et al. Practical boundary of static voltage stability region in cut-set power space of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 18-23.
- [7] 王成山, 范孟华, 魏伟. 分区总负荷空间上电压稳定安全域的研究[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(28): 62-67.
WANG Chengshan, FAN Menghua, WEI Wei. Research on voltage stability security region in area total load space[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(28): 62-67.
- [8] 王博, 肖峻, 周济, 等. 主动配电网中分布式电源和微网的运行域[J]. 电网技术, 2017, 41(2): 363-372.
WANG Bo, XIAO Jun, ZHOU Ji, et al. Dispatchable region of distributed generators and microgrids in distribution systems[J]. Power System Technology, 2017, 41(2): 363-372.
- [9] 王毅, 张宁, 康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(22): 5669-5681.
WANG Yi, ZHANG Ning, KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(22): 5669-5681.
- [10] 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): 7108-7120.
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): 7108-7120.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 李朋, 臧向东, 刘聿拯, 等. 分布式热电联产中热电比的确定[J]. 热电技术, 2005, 18(4): 43-46.
LI Peng, ZANG Xiangdong, LIU Yuzheng, et al. Rational determination to heat and power ratio for distributed CHP plant[J]. Gas Turbine Technology, 2005, 18(4): 43-46.
- [14] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑天然气网络状态的电力-天然气区域综合能源系统稳态分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1293-1304.
WANG Weiliang, WANG Dan, JIA Hongjie, et al. Steady state analysis of electricity-gas regional integrated energy system with consideration of NGS network status[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1293-1304.
- [15] LI M, MU H, LI N, et al. Optimal option of natural-gas district distributed energy systems for various buildings[J]. Energy and Buildings, 2014, 75: 70-83.
- [16] 施锦月, 许健, 曾博, 等. 基于热电比可调模式的区域综合能源系统双层优化运行[J]. 电网技术, 2016, 40(10): 2959-2966.
SHI Jinyue, XU Jian, ZENG Bo, et al. A bi-level optimal operation for energy hub based on regulating heat-to-electric ratio mode[J]. Power System Technology, 2016, 40(10): 2959-2966.

- [17] 冯志兵,金红光. 燃气轮机冷热电联产系统与蓄能变工况特性[J]. 中国电机工程学报,2006,26(4):25-30.
FENG Zhibing, JIN Hongguang. Part-load performance of CCHP with gas turbine and storage system[J]. Proceedings of the CSEE, 2006,26(4):25-30.
- [18] ABEYSEKERA M, WU J, JENKINS N, et al. Steady state analysis of gas networks with distributed injection of alternative gas[J]. Applied Energy, 2016, 164:991-1002.
- [19] 余贻鑫,李鹏,孙强,等. 电力系统潮流可行域研究[C]//第十届全国电工数学学术年会论文集. 吉林:中国电机工程学会电工数学专业委员会,2005:6.
YU Yixin, LI Peng, SUN Qiang, et al. A study on power flow feasibility region[C]//Proceedings of the 10th National Conference on Electrical Mathematics. Jilin, China: China Electrical Engineering Society Electrical Mathematics Professional Committee, 2005:6.
- [20] 姜子卿,郝然,艾芊. 基于冷热电多能互补的工业园区互动机制研究[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):260-267
JIANG Ziqing, HAO Ran, AI Qian. Interaction mechanism of industrial park based on multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(6):260-267.

- [21] 郝然,艾芊,朱宇超,等. 基于能源集线器的区域综合能源系统分层优化调度[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):171-178.
HAO Ran, AI Qian, ZHU Yuchao, et al. Hierarchical optimal dispatch based on energy hub for regional integrated energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017,37(6):171-178.

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电力系统安全性分析(E-mail:liulscu@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电力系统分析、智能配用电系统分析、分布式供能与微网(E-mail:wangdantjuee@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:hjjia@tju.edu.cn)。

Operation region model for integrated energy distribution system

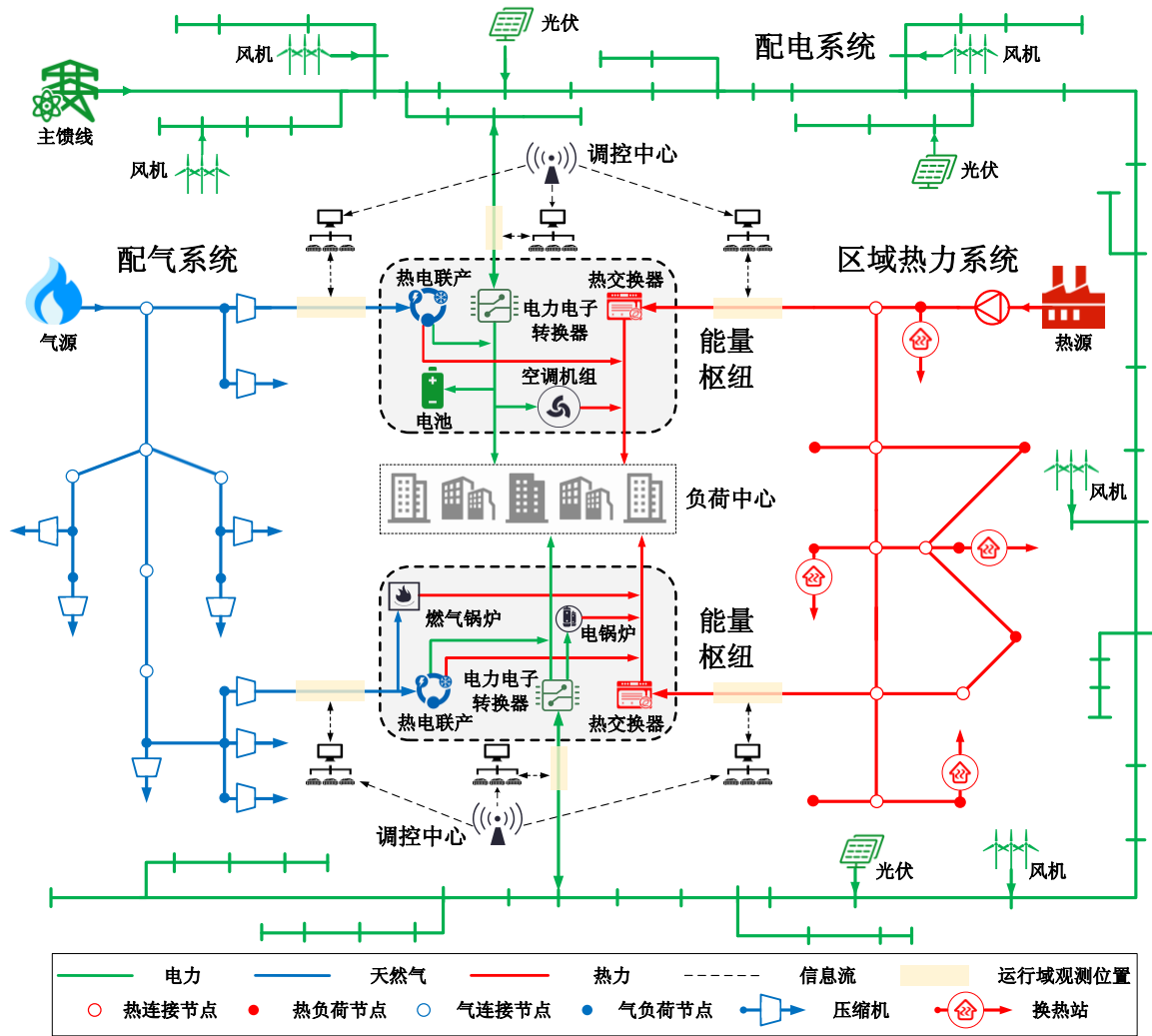
LIU Liu, WANG Dan, JIA Hongjie, WANG Chengshan, WANG Weiliang

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

Abstract: IEDS(Integrated Energy Distribution System) is a feasible development form of distribution power system in the future. Multi-energy coupling not only improves economy and comprehensive energy efficiency, but also brings challenges to the safe and stable operation of IEDS. To study the maximum operation boundaries of IEDS, based on the morphology analysis of typical electricity-gas-heat IEDS, the concept and model of IEDS-ORs(Integrated Energy Distribution System-Operation Regions) are proposed. Considering the geographical separation and energy regulation of EHs(Energy Hubs), the input power set of EHs' tie-lines installed with automatic control devices is defined as the operational point. Furthermore, with the control means of EH, the voltage constraint is focused on. A traversal simulation algorithm for solving voltage boundaries of operational points in IEDS-OR is developed. Finally, taking a typical electricity-gas IEDS as an example, various operation regions composed of different observed variables are solved. Moreover, the effects of multi-energy flow constraints, multi-energy load changes and regulated heat-to-electric ratio modes on IEDS-ORs are analyzed. The calculative results show that the proposed method can accurately describe operation status and boundaries of IEDS, which can provide theoretical guidance for dispatchers.

Key words: integrated energy distribution system; energy hub; operation regions; multi-energy flow; operational constraints

附录



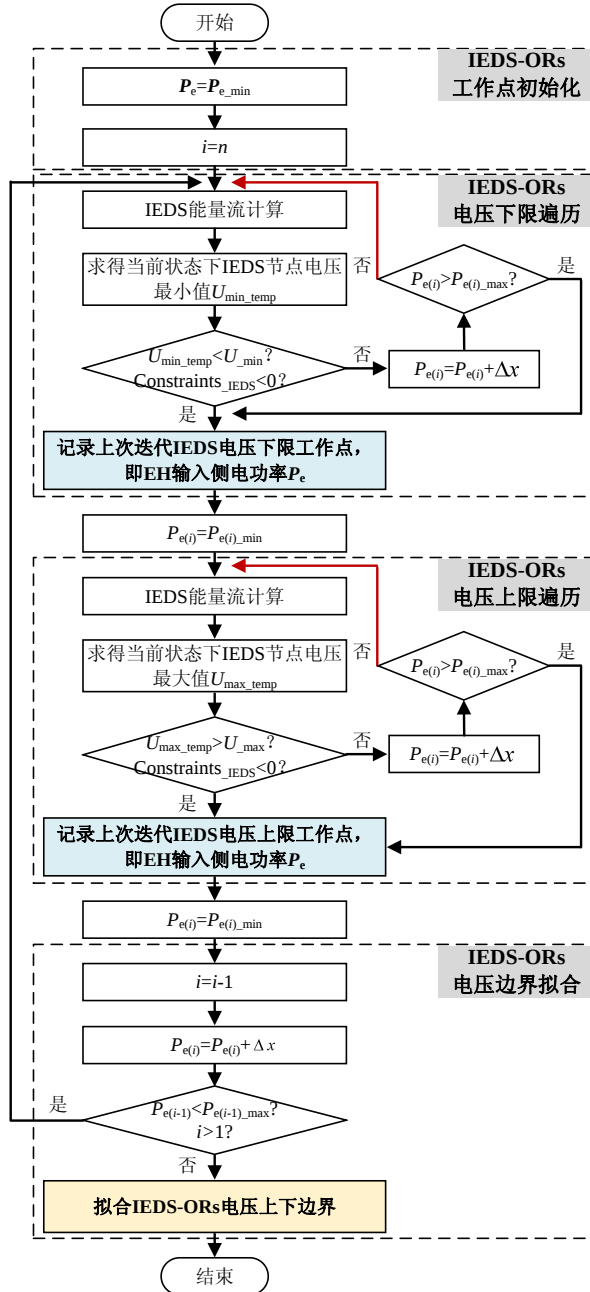


图 A2 IEDS-ORs 电压边界求解流程图

Fig.A2 Flowchart of voltage boundary calculation of IEDS-ORs

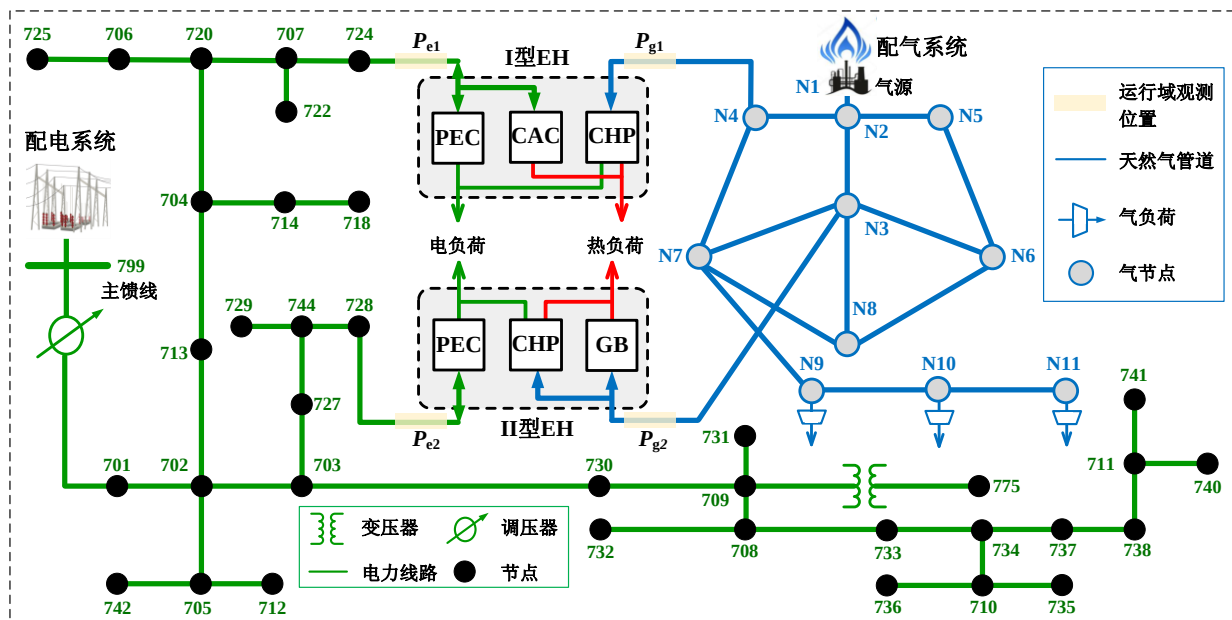
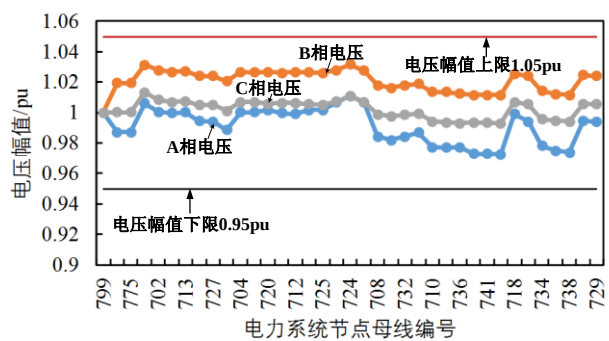
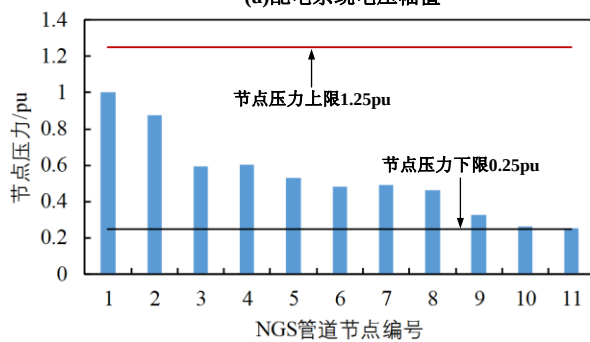


图 A3 一种典型电力-天然气综合能源配电系统示意图

Fig.A3 Schematic diagram of a typical electricity-gas IEDS



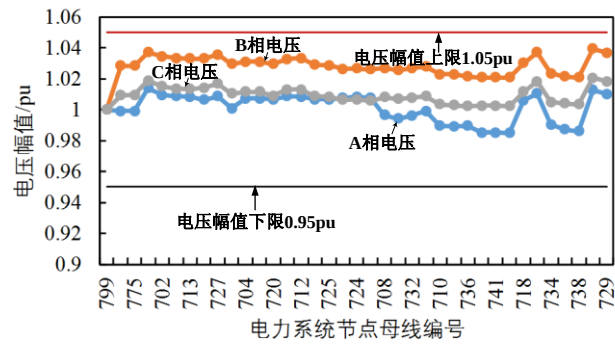
(a)配电系统电压幅值



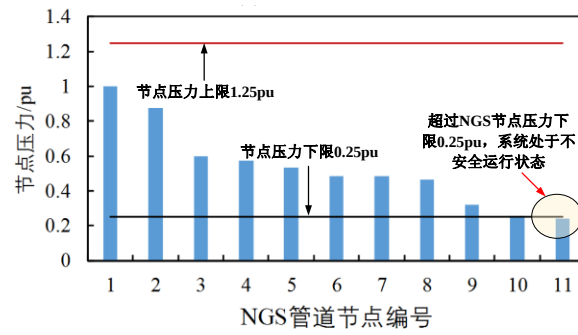
(b)配气系统节点压力

图 A4 测试点 A 运行约束校验结果

Fig.A4 Verification results of operational constraints at the test point A



(a)配电系统电压幅值



(b)配气系统节点压力

图 A5 测试点 B 运行约束校验结果

Fig.A5 Verification results of operational constraints at test point B

表 A1 11 节点低压配气系统管网参数
Table A1 Pipeline data of the 11-node NGS

管道起点	管道终点	管道长度/m	管道直径/mm
1	2	50	160
2	3	500	160
2	4	500	110
2	5	500	110
3	6	600	110
3	7	600	110
3	8	500	110
5	6	600	80
4	7	600	80
6	8	780	80
7	8	780	80
7	9	200	80
9	10	200	80
10	11	200	80

表 A2 EH 参数
Table A2 Parameters of EH

类别	I 型 EH/kW	II 型 EH/kW
PEC	2000	3000
CHP	3000	3000
CAC/GB	1000(CAC)	2000(GB)
电负荷	380	417
热负荷	204	266
运行模式	混合运行	混合运行

表 A3 运行域的部分临界点数值
Table A3 Partial critical points of FOR

上边界 L_1	下边界 L_2	左边界 L_3	右边界 L_4
401.19	-47.72	-660	400
398.47	-230.66	-660	400
382.97	-413.84	-660	400
354.70	-591.25	-660	400
313.66	-774.90	-660	400
313.66	-952.77	-660	400
193.26	-1128.69	-660	400
113.91	-1308.23	-660	400
21.79	-1475.80	-660	400
-83.10	-1648.61	-660	400