

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.210084

基于统一潮流灵敏度的电-气-热综合能源系统安全控制策略

刘奇¹, 周海全¹, 张玉平², 雷霞²

(1. 国网山东省电力公司聊城供电公司, 山东 聊城 252000; 2. 西华大学电气与电子信息学院, 四川 成都 610039)

摘要: 为实现更高的能源利用率, 分离的电-气-热系统逐渐向耦合的综合能源系统(Integrated Energy System, IES)转化。然而随着 IES 中耦合关系和运行方式日趋复杂, IES 内各子系统的运行安全性问题面临新的要求。首先构建了 IES 中电-气-热网的独立稳态潮流模型, 并列写为 IES 统一潮流方程。利用多能流计算过程中的雅可比矩阵及变量间的耦合关系, 计算 IES 中电压、气压、支路潮流、节点温度对控制变量的综合灵敏度矩阵。定量描述 IES 系统内部跨能源品类的控制变量及状态变量间的关系。然后, 利用综合灵敏度矩阵寻求对 IES 中不安全点最具控制效率的参数进行调整, 使其满足系统安全运行要求。最后, 通过 IES39-26-44 算例对所提方法进行分析和验证, 结果证明了其正确性和有效性。

关键词: 综合能源系统; 优化运行; 安全控制; 综合灵敏度

Security control strategy of an electricity-gas-thermal integrated energy system based on uniform power flow sensitivity

LIU Qi¹, ZHOU Haiquan¹, ZHANG Yuping², LEI Xia²

(1. Liaocheng Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company, Liaocheng 252000, China;

2. School of Electrical Engineering and Electronic Information, Xihua University, Chengdu 610039, China)

Abstract: To improve the utilization of energy, separate electric power, gas and thermal systems are gradually transformed into an Integrated Energy System (IES). However, with the increasingly complex coupling relationship and operational mode in an IES, each subsystem in the IES faces new requirements for secure operation. First, the steady power flow equations of independent electricity, gas and thermal networks are formulated and integrated into a uniform equation of an IES. Based on the Jacobian matrix of multi energy flow and analysis of the coupling relationship among variables, the comprehensive matrix of sensitivities of voltage, air pressure, branch current, node temperature to the control variables in the IES is calculated. The relationship between control variables and state variables of different energy categories in the IES is described quantitatively. Then, based on the comprehensive sensitivity matrix, the parameters that are the most sensitive to the unsafe points in the IES are adjusted to meet the requirements for the safe operation of the system. Finally, an IES39-26-44 example is used to analyze and verify the proposed method and the simulation results verify the correctness and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 51877181) and the Science and Technology Project of State Grid Shandong Electric Power Company (No. 520611190002).

Key words: integrated energy system; optimal operation; security control; comprehensive sensitivity

0 引言

随着工业生产和居民生活对能源需求形式的多样化以及环境与能耗矛盾的日益突出, 建设以电力

为核心的综合能源系统(Integrated Energy System, IES)是未来社会的发展趋势^[1-6]。IES 系统改变了原有能源系统分离运行的模式, 可以实现电-气-热等系统的联合优化运行, 促进能源的梯级利用和多能间的互动互补, 从而提高能源利用效率^[7-11]。然而, 随着各能源系统间的联系日趋紧密, IES 安全运行面临多重形态并存、多重关系耦合的复杂问题, 使

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(51877181); 国网山东省电力公司科技项目资助(520611190002)

得 IES 内部各子系统的运行安全性分析和控制变得更加困难^[12]。相比传统单一的安全控制策略, IES 的状态变量与决策变量更多, 不同能源种类的决策变量对其他形式能源的状态变量又具有耦合影响, 多个能源子系统的紧密耦合所带来的不确定因素更多, 严重威胁 IES 的安全运行^[13]。因此, 亟需寻求能对综合能源系统进行快速有效安全控制的方法。

针对 IES 的安全性, 文献[14]在考虑电力系统和天然气系统多种安全约束的情况下, 建立了电-气互联系统机组组合模型以提高电-气混联系统的经济性。文献[15]基于安全博弈理论, 分析辨识了 IES 安全运行的关键影响因素, 将其作为系统安全防御的薄弱环节, 并制定防御策略, 仿真结果表明优先防护系统的薄弱环节可提升系统的安全性、可靠性。针对安全控制方法, 文献[16]为消除 $N-1$ 情况下线路过载和节点电压越限, 提出了一种基于源-荷协同的电网静态安全校正最优控制算法。文献[17]指出在 IES 框架下, 传统面向单一能源子系统的的天性分析方法难以适用, 有必要针对电-气-热的 IES 静态安全问题进行深入分析, 文献通过对 IES 的静态 $N-1$ 安全校核结果进行分析, 探究了 IES 中耦合元件的不同控制模式对 IES 运行安全性的影响。文献[18]考虑热网传输延迟, 对电力系统和供热系统之间的准动态相互作用进行了量化, 并应用准动态相互作用, 通过安全控制来缓解电力系统的拥塞。文献[19-20]提出了基于参数灵敏度的 IES 静态安全控制策略, 通过灵敏度矩阵辨识系统薄弱环节的关键环节, 对越限元件通过灵敏度矩阵对控制变量进行调控, 提升电-气 IES 系统安全性。上述研究多是对各个子系统进行独立的安全控制, 鲜有文献对电-气-热 IES 系统利用综合灵敏度进行不同系统间的安全控制。

本文首先构建了含电转气装置(Power to Gas, P2G)、热电联产机组(Combined Heat and Power, CHP)、燃气轮机(Gas Turbine, GT)、电锅炉(Electric Boiler, EB)、燃气锅炉(Gas Boiler, GB)等耦合设备的电-气-热 IES, 并分析了其内部的能量流动关系。其次, 对天然气系统和区域供热网络(District Heat Network, DHN)进行了详细建模, 建立了 IES 稳态能量流模型, 探究 IES 系统稳态能量调度中能量的分配、交换与循环过程。然后, 通过 IES 统一潮流方程中的 Jacobian 矩阵变换得到综合灵敏度矩阵, 量化描述多能流的控制变量对状态变量的影响程度, 并基于此对系统越限元件进行调控, 保证系统的安全性。最后, 通过算例仿真对本文所提方法进行分析、验证, 结果验证了所提方法的正确性和有效性。

1 综合能源系统构成及能量流

1.1 IES 系统构成

本文构建了一个电-气-热 IES, 包含了能源生产设备、能源转换设备、能源储存设备, 其间流动的能量包括了电能、气能、热能, 其能量流示意图如图 1 所示。



图 1 IES 能量流示意图

Fig. 1 Energy flow in IES

IES 中, 由风电(Wind Turbine, WT)、火电(Thermal Power, TP)出力向电负荷供应电能; 系统中多余的电能可以通过 P2G 装置转化为天然气储存于气网管道中; CHP 消耗天然气同时产生电能和热能分别供应电负荷和热负荷; EB、GB 分别消耗电能和天然气产生热能供应热负荷; 蓄电池(Bat)、储热罐(Heat Storage Tank, HST)和储气罐(Gas Storage, GS)分别对电能、热能及气能进行存储与释放。图中, P 表示功率, 下标 e、g、h 分别表示电、气和热, 上标对应功率输入输出装置, 上标 in 和 L 分别表示 IES 的输入和输出。本节主要对气、热系统进行能量描述。

1.2 天然气系统模型

供气管道气体稳态运行时, 运行工况必须满足节点流量平衡方程, 即节点 i 的注入气体流量代数和为零($\Delta M_{i,t}^G = 0$)。令气体流入节点为正方向, 流出为负方向, 则供气管网节点 i 的流量平衡方程为

$$\sum_{k'=1}^{N_{i,k',t}^{G,so}} (B_{i,k',t}^{G,so} M_{k',t}^{G,so}) + \sum_{p'=1}^{N_{i,p',t}^{G,P2G}} (B_{i,p',t}^{G,P2G} M_{p',t}^{G,P2G}) + \sum_{j=1}^{N_{i,j,t}^{G,b}} (-B_{i,j,t}^{G,b} M_{j,t}^{G,b}) + \sum_{m'=1}^{N_{i,m',t}^{G,lo}} (B_{i,m',t}^{G,lo} M_{m',t}^{G,lo}) + \sum_{g'=1}^{N_{i,g',t}^{G,GG}} (B_{i,g',t}^{G,GG} M_{g',t}^{G,GG}) + \sum_{c'=1}^{N_{i,c',t}^{G,Co,G}} (B_{i,c',t}^{G,Co,G} M_{c',t}^{G,Co,G}) + \sum_{h'=1}^{N_{i,h',t}^{G,CHP}} (B_{i,h',t}^{G,CHP} M_{h',t}^{G,CHP}) + \sum_{b'=1}^{N_{i,b',t}^{G,boil}} (B_{i,b',t}^{G,boil} M_{b',t}^{G,boil}) + \sum_{v'=1}^{N_{i,v',t}^{G,st}} (B_{i,v',t}^{G,st} M_{v',t}^{G,st}) = \Delta M_{i,t}^G \quad (i \neq j) \quad (1)$$

$$B_{i,\{k',p',j,m',g',c',h',b',v'\},t}^{G,so} = \begin{cases} 1 & \text{节点}i\text{与}\{\text{气源}k',\dots\}\text{相连} \\ 0 & \text{节点}i\text{与}\{\text{气源}k',\dots\}\text{不相连} \end{cases} \quad (2)$$

式中: $N^{G,so}$ 、 $N^{G,P2G}$ 、 $N^{G,b}$ 、 $N^{G,lo}$ 、 $N^{G,GG}$ 、 $N^{Co,G}$ 、 $N^{G,CHP}$ 、 $N^{G,boil}$ 、 $N^{G,st}$ 为天然气系统的气源、P2G装置、气网节点、气负荷、燃气轮机、压缩机、CHP、燃气锅炉、储气罐的总个数; k' 、 p' 、 j 、 m' 、 g' 、 c' 、 h' 、 b' 、 v' 为气源、P2G装置、气网节点、气负荷、燃气轮机、压缩机、CHP、燃气锅炉、储气罐的编号; $B_{i,k',t}^{G,so}$ 、 $B_{i,p',t}^{G,P2G}$ 、 $B_{i,j,t}^{G,b}$ 、 $B_{i,m',t}^{G,lo}$ 、 $B_{i,g',t}^{G,GG}$ 、 $B_{i,c',t}^{Co,G}$ 、 $B_{i,h',t}^{G,CHP}$ 、 $B_{i,b',t}^{G,boil}$ 、 $B_{i,v',t}^{G,st}$ 为节点 i 与相应类型节点的关联 0-1 变量; $M_{k',t}^{G,so}$ 、 $M_{p',t}^{G,P2G}$ 、 $M_{j,t}^{G,b}$ 、 $M_{m',t}^{G,lo}$ 、 $M_{g',t}^{G,GG}$ 、 $M_{c',t}^{Co,G}$ 、 $M_{h',t}^{G,CHP}$ 、 $M_{b',t}^{G,boil}$ 、 $M_{v',t}^{G,st}$ 为气源、P2G、气网节点、气负荷、燃气轮机、压缩机、CHP、燃气锅炉、储气罐的气流量($m^3/\text{天}$), 流入系统方向为正。

针对可控环节, 应用 Weymouth 稳态模型建立的天然气管道流量方程^[21-25]见附录式(A1)–(A8), 压缩机支路能耗方程见附录式(A9)–(A11), P2G 的能耗方程见附录式(A12)。

1.3 区域供热网(DHN)模型

本文 DHN 采用间接连接方式, 间接连接方式以换热器耦合一级管网和二级管网, 一级管网向二级管网供热, 二级管网向采暖热用户供热, 上下级管网间具有水力工况相对独立、热力工况相互关联的特点, 因其具有适应性强、运行可靠、调节方便、失水率小等特点, 在我国广泛采用。本文 DHN 采用变流变温模式, 需要建立热网流量平衡方程和温度变化方程, 本小节分别建立水力和热力模型。

1.3.1 水力模型

管道热媒稳态运行时, 节点水力工况具备连续性, 满足节点流量平衡方程, 即节点 i 注入质量流之和等于零($\Delta m_{i,t}^{H,s} = 0$)。令热媒流入节点为正方向, 流出为负方向, 则供水管道节点 i 的流量平衡方程为

$$\sum_{k=1}^{N^{H,so}} (B_{ik,t}^{H,s,so} m_{k,t}^{H,s,so}) + \sum_{j=1}^{N^{H,b}} (-B_{ij,t}^{H,s,b} m_{j,t}^{H,s,b}) + \sum_{g=1}^{N^{H,st}} (B_{ig,t}^{H,s,st} m_{g,t}^{H,s,st}) + \sum_{h=1}^{N^{H,lo}} (B_{ih,t}^{H,s,lo} m_{h,t}^{H,s,lo}) = \Delta m_{i,t}^{H,s} \quad (i \neq j) \quad (3)$$

$$B_{s,i\{k,j,g,h\},t}^{H,so} = \begin{cases} 1 & \text{节点}i\text{与}\{\text{热源}k,j,g,h\}\text{相连} \\ 0 & \text{节点}i\text{与}\{\text{热源}k,j,g,h\}\text{不相连} \end{cases} \quad (4)$$

式中: $N^{H,so}$ 、 $N^{H,b}$ 、 $N^{H,st}$ 、 $N^{H,lo}$ 为同一等级 DHN 的热源、节点、储热站以及热负荷的总个数; k 、 j 、 g 、 h 为热源、节点、储热站及热负荷的编号; $B_{ik,t}^{H,s,so}$ 、 $B_{ij,t}^{H,s,b}$ 、 $B_{ig,t}^{H,s,st}$ 、 $B_{ih,t}^{H,s,lo}$ 为节点关联 0-1 变量, 分别表示热网节点 i 与热源 k 、热网节点 j 、储热站 g 以及

热负荷 h 的关联情况; $m_{k,t}^{H,s,so}$ 为热源 k 的质量流率(kg/s); $m_{ij,t}^{H,s}$ 为节点 i 流向节点 j 的质量流率(kg/s); $m_{g,t}^{H,s,st}$ 为储热罐 g 与节点 i 等效交换的质量流率(kg/s); $m_{h,t}^{H,s,lo}$ 为热负荷 h 的质量流率(kg/s); $\Delta m_{i,t}^{H,s}$ 为节点 i 流量误差(kg/s)。

在 DHN 中, 热媒主要通过供水管网和水泵从热源节点输送到热负荷节点或储热罐, 又经回水管网流回热源, 流经每条供水管道的热媒质量流率 $m_{ij,t}^{H,s}$ 见附录式(A13)–(A17)定义^[26-27], 回水管道的质量流率 $m_{ij,t}^{H,r}$ 与供水管道相同。

在 DHN 中, 热源或长距离供/回水管道入口处安装水泵, 用以提供热媒循环所需的驱动压力, 使热媒可以克服管道摩擦造成的压力损失, 顺利输送到最远端热负荷中心, 水泵是调节管网节点液体压力的主要设备。单位时间水泵消耗的电能公式见附录式(A18)–(A21)。

1.3.2 热力模型

热力系统中, 热源包括 CHP 机组、电热(燃煤)锅炉、热泵等产热装置, 热负荷包含换热站、集中式散热器等耗热设备, 储热罐既可以作为热源, 又可以作为热负荷。热源与热负荷都是 DHN 的换热节点, 换热过程可以用换热方程描述, 见附录式(A22)–(A24)。

1) 管道温度耗散方程

根据管道的材料和导热特性建立热耗散方程, 用以求解在管道水力工况稳定且进水端温度恒定不变的状态下, 有管壁散热造成的温度损失。已知管道参数、供水端温度和质量流率时, 管道的温度损失由式(5)表示。

$$\Delta T_{ij,t}^{H,s} = \frac{(T_{ij,t}^{H,s,in} - T_{ij,t}^{H,s,air}) (1 + \beta_{ij}^{H,s}) L_{ij}^{H,s}}{10^3 \times C_p^H |m_{ij,t}^{H,s}| R_{ij}^{H,s}} \quad (5)$$

$$T_{ij,t}^{H,s,out} = T_{ij,t}^{H,s,in} - \Delta T_{ij,t}^{H,s} \quad (6)$$

式中: $\Delta T_{ij,t}^{H,s}$ 为管道温度降(K); $T_{ij,t}^{H,s,in}$ 为管道 ij 进水端热媒温度(K); $T_{ij,t}^{H,s,out}$ 为管道 ij 出水端热媒温度(K); $T_{ij,t}^{H,s,air}$ 为土壤表面空气温度(K); $\beta_{ij}^{H,s}$ 为管道配件的附加散热损失系数; C_p^H 为热媒比热容(kJ/kg K); $R_{ij}^{H,s}$ 为总热阻(m K/W)。

2) 节点温度混合方程

节点 i 注入总的等效温度 $\Delta TM_{s,i,t}^H$ 为

$$\Delta TM_{s,i,t}^H = \sum_{\xi=so,b,st} T_{s,i,t}^{H,\xi,in} m_{s,i,t}^{\xi,in} - T_{s,i,t}^{H,out} (m_{s,i,t}^{lo,out} + m_{s,i,t}^{b,out} + m_{s,i,t}^{st,out}) \quad (7)$$

式中: $T_{s,i,t}^{H,\xi,in}$ 、 $m_{s,i,t}^{\xi,in}$ 分别为与节点 i 相连的热源、供热管道、储热罐向节点 i 注入的热媒温度(K)及质量流率(kg/s); $T_{s,i,t}^{H,out}$ 为节点 i 混合后的热媒温度(K); $m_{s,i,t}^{lo,out}$ 、 $m_{s,i,t}^{b,out}$ 、 $m_{s,i,t}^{st,out}$ 为从节点 i 流出至与其相连的热负荷、供热管道、储热罐的热媒质量流率(kg/s); 回水管网的节点温度混合方程 $\Delta TM_{r,i,t}^H$ 和供水管网类似。

2 基于电-气-热综合灵敏度的 IES 系统安全控制策略

本节考虑在 IES 架构下, 搭建综合灵敏度矩阵来量化描述多能流的控制变量对状态变量的影响程度, 并基于此获得 IES 安全控制策略。

2.1 基于 IES 统一潮流的全局灵敏度矩阵

目前, 对于 IES 能量流的求解方法主要有统一潮流求解法和顺序潮流求解法 2 种^[28-29], 本文采用统一潮流求解法的思路以获取全局灵敏度矩阵。首先列写顺序求解法的独立潮流方程如式(8)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_{i,t}^{Ele} = P_{i,t}^{Ele} - V_{i,t}^{Ele} \sum_{j \in i} V_{j,t}^{Ele} (G_{ij,t}^{Ele} \cos \theta_{ij,t}^{Ele} + B_{ij,t}^{Ele} \sin \theta_{ij,t}^{Ele}) = 0 \\ \Delta Q_{i,t}^{Ele} = Q_{i,t}^{Ele} - V_{i,t}^{Ele} \sum_{j \in i} V_{j,t}^{Ele} (G_{ij,t}^{Ele} \sin \theta_{ij,t}^{Ele} - B_{ij,t}^{Ele} \cos \theta_{ij,t}^{Ele}) = 0 \\ \Delta M_{i,t}^G = 0 \\ \Delta m_{s,j,t}^H = 0 \\ \Delta m_{r,j,t}^H = 0 \\ \Delta TM_{s,i,t}^H = 0 \\ \Delta TM_{r,i,t}^H = 0 \end{cases} \quad (8)$$

式(8)分别表示电力系统的节点有功/无功方程、天然气系统的节点气流量平衡方程、热力系统供/回水管网节点流量平衡方程、供/回水管网节点温度混合方程, 其中状态变量为 $V_{i,t}^{Ele}$ 、 $\theta_{i,t}^{Ele}$ 、 $\pi_{i,t}^G$ 、 $p_{s,i,t}^H$ 、 $p_{r,i,t}^H$ 、 $T_{s,i,t}^H$ 、 $T_{r,i,t}^H$, 控制变量为 $P_{i,t}^{Ele}$ 、 $Q_{i,t}^{Ele}$ 、 $M_{i,t}^G$ 、 $m_{s,i,t}^H$ 、 $m_{r,i,t}^H$ 、 $TM_{s,i,t}^H$ 、 $TM_{r,i,t}^H$, 将式(8)的非线性方程组用状态变量表示, 可以列写为

$$\begin{cases} \Delta P_{i,t}^{Ele} (V_{i,t}^{Ele}, \theta_{i,t}^{Ele}) = 0 \\ \Delta Q_{i,t}^{Ele} (V_{i,t}^{Ele}, \theta_{i,t}^{Ele}) = 0 \\ \Delta M_{i,t}^G (\pi_{i,t}^G) = 0 \\ \Delta m_{s,i,t}^H (p_{s,i,t}^H) = 0 \\ \Delta m_{r,i,t}^H (p_{r,i,t}^H) = 0 \\ \Delta TM_{s,i,t}^H (p_{s,i,t}^H, T_{s,i,t}^H) = 0 \\ \Delta TM_{r,i,t}^H (p_{r,i,t}^H, T_{r,i,t}^H) = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式(9)表示状态变量已知时, 潮流方程(8)等式左边 Δ 值便可以求解, 式(9)描述了状态变量与节点平衡方程之间的函数关系, 现考虑能量转换单元的耦合作用, 将式(9)的独立潮流方程列写为 IES 统一潮流方程, 如式(10)所示。

$$\begin{cases} \Delta P_{i,t}^{Ele} (V_{i,t}^{Ele}, \theta_{i,t}^{Ele}, \pi_{i,t}^G, p_{s,i,t}^H, p_{r,i,t}^H, T_{r,i,t}^H) = 0 \\ \Delta Q_{i,t}^{Ele} (V_{i,t}^{Ele}, \theta_{i,t}^{Ele}) = 0 \\ \Delta M_{i,t}^G (V_{i,t}^{Ele}, \theta_{i,t}^{Ele}, \pi_{i,t}^G, p_{s,i,t}^H, p_{r,i,t}^H, T_{r,i,t}^H) = 0 \\ \Delta m_{s,j,t}^H (V_{i,t}^{Ele}, \theta_{i,t}^{Ele}, p_{s,i,t}^H, T_{s,i,t}^H, T_{r,i,t}^H) = 0 \\ \Delta m_{r,j,t}^H (V_{i,t}^{Ele}, \theta_{i,t}^{Ele}, p_{r,i,t}^H, T_{s,i,t}^H, T_{r,i,t}^H) = 0 \\ \Delta TM_{s,i,t}^H (p_{s,i,t}^H, T_{s,i,t}^H) = 0 \\ \Delta TM_{r,i,t}^H (p_{r,i,t}^H, T_{r,i,t}^H) = 0 \end{cases} \quad (10)$$

式(10)反映了多能流状态变量与 IES 统一潮流方程之间相互影响、相互依赖关系。将式(10)方程在稳态运行点 $x^{(0)}$ 处分别按泰勒级数展开, 并忽略包含二次及以上的高次项, 得到用于更新状态变量的多能修正方程:

$$\Delta f = J(V_{i,t}^{Ele}, \theta_{i,t}^{Ele}, \pi_{i,t}^G, p_{s,i,t}^H, p_{r,i,t}^H, T_{s,i,t}^H, T_{r,i,t}^H) \Delta x \quad (11)$$

J 为全局 Jacobian 矩阵, 展开式如式(12)所示^[30]。

$$J = \begin{bmatrix} J_{P-V} & J_{P-\theta} & J_{P-\pi} & J_{P-ps} & J_{P-pr} & 0 & J_{P-tr} \\ J_{Q-V} & J_{Q-\theta} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ J_{M-V} & J_{M-\theta} & J_{M-\pi} & J_{M-ps} & J_{M-pr} & 0 & J_{M-tr} \\ J_{ms-V} & J_{ms-\theta} & 0 & J_{ms-ps} & 0 & 0 & 0 \\ J_{mr-V} & J_{mr-\theta} & 0 & 0 & J_{mr-pr} & 0 & 0 \\ J_{tms-V} & J_{tms-\theta} & 0 & J_{tms-ps} & 0 & J_{tms-ts} & 0 \\ J_{tmr-V} & J_{tmr-\theta} & 0 & 0 & J_{tmr-pr} & 0 & J_{tmr-tr} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式中, 非零元素的数学表达式为偏导数矩阵, 如 $J_{P-V} = \partial \Delta P_{i,t}^{Ele} / \partial \Delta V_{j,t}^{Ele}$ 表示电力系统节点电压幅值的变化导致节点注入有功变化的大小, $J_{M-V} = \partial \Delta M_{i,t}^G / \partial V_{j,t}^{Ele}$ 表示电力系统节点电压幅值的变化导致节点注入气体流量变化的大小, 反映了多能状态变量与控制变量之间相互耦合的作用, 同理可得其他雅克比矩阵的意义。

当天然气网络中存在电驱动型压缩机(Electric Driven Compressor, EDC)或者天然气网平衡节点为 P2G 时存在 $J_{P-\pi}$ 矩阵。EDC 首末端节点气压的变化将引起压缩机流量变化, 进而导致压缩机耗电量改变, 同理当天然气网络平衡节点为 P2G 时, P2G 的耗电量受全网节点气压分布影响, 因此上述两种情况都会影响电力系统节点注入有功; 当 DHN 的供水管网和回水管网安装有电驱水泵时, 存在 J_{P-ps} 、 J_{P-pr} ; DHN 的平衡节点采用电热锅炉时存在 J_{P-tr} ,

如果采用燃气锅炉存在 J_{M-ps} 、 J_{M-pr} 、 J_{M-tr} ；当电力系统平衡节点采用燃气轮机供电时存在 J_{M-v} 、 $J_{M-\theta}$ ；当电力系统中存在以电定热的 CHP 机组并充当电网平衡节点时，存在 J_{ms-v} 、 $J_{ms-\theta}$ 、 J_{mr-v} 、 $J_{mr-\theta}$ 、 J_{ims-v} 、 $J_{ims-\theta}$ 、 J_{imr-v} 、 $J_{imr-\theta}$ 。

对全局 Jacobian 矩阵进行求逆运算，便得到了多能决策变量与状态变量之间的全局灵敏度矩阵 $S^{[19]}$ ：

$$S = J^{-1} \quad (13)$$

2.2 IES 安全控制流程

IES 安全控制流程如图 2 所示。

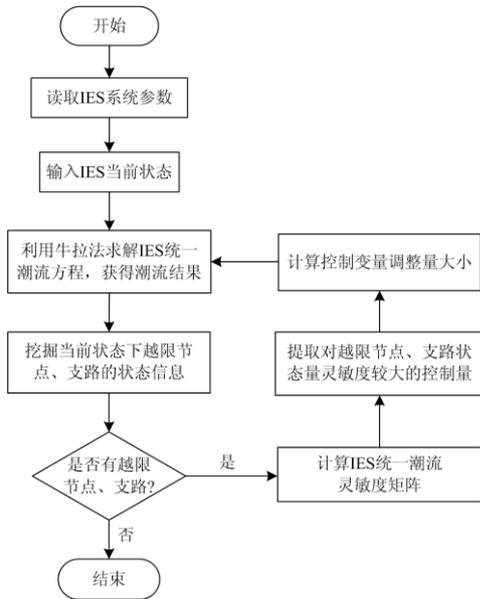


图 2 IES 安全控制流程图

Fig. 2 Flow chart of IES security regulation

其步骤如下。

Step1: 输入 IES 系统参数，如电网支路阻抗、气网和热网管道长度、管径等管道、支路参数。

Step2: 输入 IES 当前状态，如电-气-热负荷，各机组出力等。

Step3: 利用牛拉法求解 IES 统一潮流方程，得到网络中各元件的运行状态(电网、气网、热网各节点电压幅值、相角、气压、热媒压力以及各支路潮流、流量、各节点温度等)。

Step4: 提取当前状态下越限节点、支路、管道的信息，如果当前各元件运行满足安全运行约束，程序结束。

Step5: 计算 IES 统一潮流灵敏度矩阵，提取对越限节点、支路状态量灵敏度较大的控制量，并计算控制变量调整量大小。

Step6: 将调整后的决策变量作为初值，代入 IES 系统重新计算 IES 统一潮流，并返回 Step4。

3 算例分析

3.1 参数设置

本文 IES 算例系统中，电网采用 IEEE39 节点系统、DHN 采用 26 节点系统、气网采用比利时 20 节点输气网系统(不算水泵、压缩机首末端节点)，如附录图 B1 所示，相关参数见附录表 B1—B3。电网包含 3 组风电机组，分别在第 32、36、39 号节点并网运行；包含 2 组深度调峰火电机组，在第 14、35 号节点并网运行；在第 24 号节点包含 1 组蓄电池组。热网包含 4 个热源节点，分别位于第 1、7、18、23 号节点，并在热源处配置了 4 组储热罐 S1、S2、S4、S5，在负荷中心 11 号节点处配置了一组储热罐 S3。在供热管道 1—2 和 1—14 的首端分别配置两个水泵 27—28、35—36(本文用首末端节点号来表示供热管道支路和水泵支路的编号)，加压方向由节点 1 指向节点 2 和节点 14，水泵耗电均从电网第 26 号节点取电，同理，水泵 29—30、31—32 从电网 28 号节点取电，水泵 33—34 从电网 16 号节点取电，水泵 37—38、43—44 从电网 37 号节点取电，水泵 39—40、41—42 从电网 21 号节点取电。天然气网络中包含 3 个气源节点 N1、N2、N3 和 4 组储气罐 S1、S2、S3、S4；包含 3 个压缩机，其中压缩机 25—26 为燃气驱动压缩机(Gas Driven Compressor, GDC)，位于供气管道 1—2 的首端，工作耗气从首端节点 25 取气，供气方向为节点 1 指向节点 2(用首末端节点号来表示供气管道支路和压缩机支路的编号)，压缩机 21—22、23—24 为 EDC，分别从电网 23、34 号节点取电。算例系统耦合元件包含两个燃气轮机 GT1、GT2，分别从气网的节点 11 和节点 16 取气，并向电网的节点 4 和节点 8 供电；包含两组 P2G 设备 P2G1 和 P2G2，分别从电网的节点 18 和节点 13 取电，并向气网的节点 14 和节点 5 供气；包含两组 CHP 装置 CHP1 和 CHP2，从气网的节点 10 和节点 2 取气，分别向电网的节点 3 和节点 5 供电以及向热网的节点 18 和节点 1 供热；包含 1 组电热锅炉 EB，从电网第 38 号节点取电并向热网第 7 号节点供热；包含 1 组燃气锅炉 GF，从气网第 9 号节点取气并向热网第 23 号节点供热。DHN 中 CHP1 为以电定热运行模式，CHP2 为以热定电运行模式，平衡节点为 23 节点，GF 充当平衡热功率的热源；IEEE39 节点系统平衡节点为节点 8，GT2 充当平衡有功、无功的电源；天气系统平衡节点为节点 5。

3.2 结果分析

在基准状态下计算上述 IES 系统潮流，对越限

节点采用 2.2 节所述流程进行安全控制。

3.2.1 节点电压安全控制

由图 3 可看出 IEEE39 系统中节点 13 电压幅值偏低, 低于正常运行范围下限 0.95。由于 13 节点通过 P2G2 耦合到天然气系统的平衡节点, 因此不仅存在 S_{V-P} 、 $S_{V-\theta}$, 还存在气负荷对电压幅值灵敏度 S_{V-M} , 依据式(12)、式(13)可计算出电力系统有功无功以及天然气系统气负荷等控制变量对 13 号节点电压幅值的灵敏度标幺值, 以及恢复正常电压控制变量的调整量标幺值, 选取灵敏度较高的 9 个节点进行分析, 如表 1 所示。

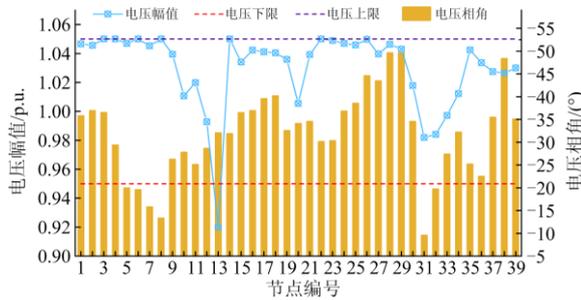


图 3 控制前电网节点电压幅值、相角

Fig. 3 Voltage amplitude and phase angle of grid nodes before control

表 1 电网节点 13 电压幅值灵敏度

Table 1 Voltage amplitude sensitivity of node 13 of power grid

节点	有功	无功	气负荷	调整量
电-11	0.187	0.200	—	0.417/0.381
电-12	0.197	0.217	—	0.403/0.367
电-13	0.231	0.265	—	0.384/0.335
电-14	0.195	0.204	—	0.409/0.393
电-15	0.174	0.179	—	0.566/0.534
气-4	—	—	0.229	0.388
气-5	—	—	0.187	0.417
气-6	—	—	0.173	0.573
气-7	—	—	0.159	0.610

由表 1 可知, 节点 13 本身的无功、有功负荷对节点电压影响最大, 气网节点 5 的储气罐进气量对电压的灵敏度次之, 由于 P2G2 作为供气网络平衡节点负担着整个天然气系统供需平衡, 耗电量较大, 对节点电压幅值的影响较为明显, 因此, 在没有无功补偿的条件下, 可以通过减少储气罐 S2 的进气量(或增加出气量)从而减少 P2G2 有功消耗, 调整后的节点电压如图 4 所示。

3.2.2 节点气压安全控制

由图 5 可得气网 26 节点系统中节点 16 的气压偏低, 低于正常运行范围下限 5 000 kPa。由于 16



图 4 控制后电网节点电压幅值、相角

Fig. 4 Voltage amplitude and phase angle of grid nodes after control

节点通过 GT2 耦合到 IEEE39 系统的平衡节点, 因此不仅存在 $S_{\pi-M}$, 还存在有功负荷对节点气压的灵敏度 $S_{\pi-P}$, 同理, 由式(12)、式(13)计算气网系统节点注气量、电力系统有功负荷等控制变量对 16 号节点气压的灵敏度标幺值, 以及恢复正常气压控制变量的调整量标幺值, 同样选取灵敏度较高的 9 个节点进行分析, 如表 2 所示。

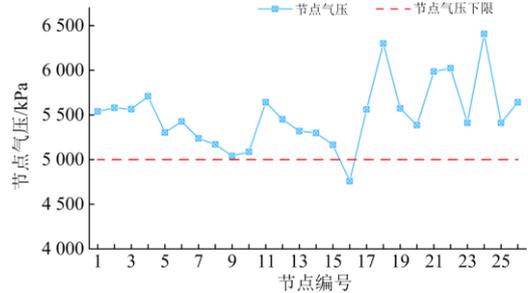


图 5 控制前气网节点气压

Fig. 5 Air pressure of gas network node before control

表 2 气网节点 16 气压灵敏度

Table 2 Air pressure sensitivity of node 16 of gas network

节点	有功	气负荷	调整量
电-8	0.317	—	0.403
电-7	0.301	—	0.415
电-5	0.294	—	0.433
电-9	0.290	—	0.439
气-16	—	0.325	0.398
气-15	—	0.298	0.427
气-14	—	0.280	0.497
气-13	—	0.266	0.511
气-4	—	0.253	0.632

由表 2 可知, 节点 16 的气负荷对节点气压影响最大, 因此可以通过削减节点 16 气负荷或减少 GT2 耗气量来控制节点气压, 在用气高峰时段可采取需求响应措施, 根据灵敏度大小, 削减或转移节点 8、节点 7、节点 5、节点 9 有功负荷, 达到控制节点气压的目的, 调整后的节点电压如图 6 所示。

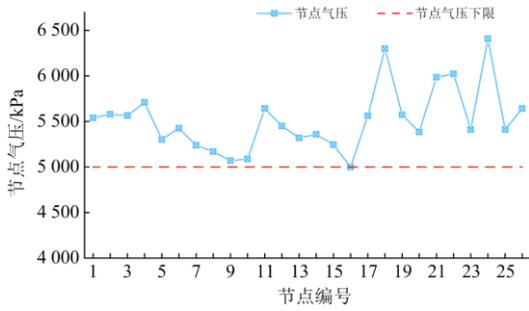


图6 控制后气网节点气压

Fig. 6 Air pressure of gas network nodes after control

3.2.3 节点温度安全控制

假设电网系统平衡节点由节点 8 改为节点 3(CHP1), 由图 7 可得热网系统中节点 18 的温度偏高, 高于正常运行范围上限 120°C 。由于节点 18 通过 CHP1 与电网节点 3 耦合且 CHP1 运行模式为以电定热, 因此可以通过削减电网负荷从而降低 CHP1 热出力来达到调节温度的效果, 由式(12)、式(13)计算电网节点有功负荷对热网 18 号节点温度的灵敏度标幺值和恢复正常温度需要削减负荷量的标幺值, 选取灵敏度较高的 9 个节点进行分析, 如表 3 所示。

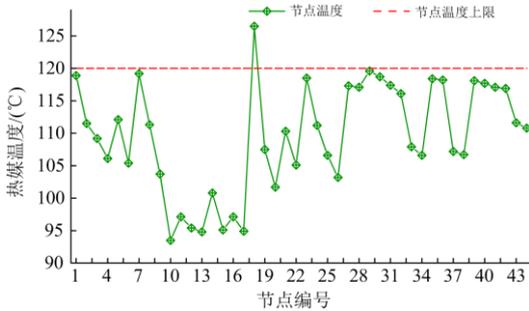


图7 控制前热网节点温度

Fig. 7 Node temperature of heating network before control

表3 热网节点 18 温度灵敏度

Table 3 Temperature sensitivity of node 18 of heating network

节点	有功	调整量
电-3	0.306	0.202
电-2	0.304	0.207
电-4	0.295	0.216
电-18	0.297	0.211
电-1	0.294	0.239
电-5	0.280	0.244
电-17	0.273	0.267
电-6	0.249	0.290
电-27	0.244	0.301

由表 3 可知, 电网 3 号、2 号、18 号节点的有功负荷对热网节点 18 温度影响最大, 因此可以通过削减上述节点有功负荷来控制温度, 还可以通过调整全网机组有功出力来减少 CHP1 的出力达到同样的效果, 调整后的节点电压如图 8 所示。

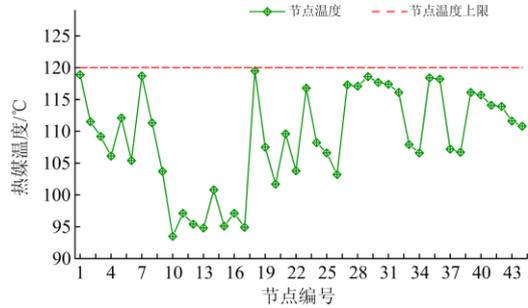


图8 控制后热网节点温度

Fig. 8 Node temperature of heating network after control

4 结论

本文提出一种基于电-气-热综合灵敏度的 IES 安全控制策略, 基于 IES 统一潮流的全局灵敏度矩阵, 探究各子系统间的耦合机理, 通过 IES39-26-44 节点系统对本文所提出的安全控制策略进行分析、验证, 相关结论如下:

1) 灵敏度矩阵可以反映状态变量和控制变量之间的局部线性关系, 揭示了 IES 电力有功负荷、天然气负荷、用户热负荷以及耦合元件出力变化影响系统状态的定量变化情况。灵敏度矩阵元素的绝对值越大表明控制变量变化引起状态变量的变化幅度越大。

2) 所提的方法可以对 IES 进行定量的安全控制, 控制手段不仅限于对 IES 系统负荷的削减和转移, 还可以通过调整压缩机、水泵、燃气锅炉、电锅炉的运行状态来实现。控制对象也不仅限于节点电压、气压、温度, 同样的方法适用于支路潮流、管道气流量、供热热媒流量安全控制。

3) 随着气网和热网的加入, 多能源耦合的问题将更加复杂, 需要建立更加细致准确的数学模型来描述电、气、热网间的能量交互与协调, 进行全面的协调优化调度将具有更大的实际意义。

附录 A

$$M_{ij,t}^G = \text{sign}(\pi_{i,t}^G, \pi_{j,t}^G, P_{ij,t}^G) C_{ij,t}^G \left((\pi_{i,t}^G)^2 - (\pi_{j,t}^G)^2 - P_{ij,t}^G \right)^{0.5} \quad (\text{A1})$$

$$P_{ij,t}^G = \frac{6.83508 \times 10^{-2} \gamma^G (h_j - h_i) (\pi_{ij,t}^{\text{G,a}})^2}{Z_{ij,t}^{\text{G,a}} T_{ij,t}^{\text{G,a}}} \quad (\text{A2})$$

$$C_{ij,t}^G = \frac{1.14933 \times 10^{-3} T_0^G (D_{ij}^G)^{2.5} E_{ij}^G}{P_0^G (L_{ij}^G \gamma^G Z_{ij,t}^{G,a} T_{ij,t}^{G,a} \chi_{ij}^G)^{0.5}} \quad (A3)$$

$$\pi_{ij,t}^{G,a} = \frac{2}{3} \left[(\pi_{i,t}^G + \pi_{j,t}^G) - \left(\frac{\pi_{i,t}^G \pi_{j,t}^G}{\pi_{i,t}^G + \pi_{j,t}^G} \right) \right] \quad (A4)$$

$$T_{ij,t}^{G,a} = T_{ij,t}^{G,s} + \frac{T_{i,t}^G - T_{j,t}^G}{\ln \left(\frac{T_{i,t}^G - T_{ij,t}^{G,s}}{T_{j,t}^G - T_{ij,t}^{G,s}} \right)} \quad (A5)$$

$$Z_{i,t}^G = \frac{(T_{i,t}^G)^{3.825}}{5.274 \pi_{i,t}^G \times 10^{(3+1.785\gamma^G)} + (T_{i,t}^G)^{3.825}} \quad (A6)$$

$$Z_{ij,t}^{G,a} = \frac{Z_{i,t}^G + Z_{j,t}^G}{2} \quad (A7)$$

$$\frac{1}{\sqrt{\chi_{ij}^G}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon^G}{3.71 D_{ij}^G \times 10^{-3}} + \frac{2.51}{N^{G,R} \sqrt{\chi_{ij}^G}} \right) \quad (A8)$$

式中: i, j 为管道首、末端节点编号; t 为调度时段; $C_{ij,t}^G$ 为管道常数; $\pi_{i,t}^G$ 、 $\pi_{j,t}^G$ 为节点 i 、节点 j 处的气压(kPa); $P_{ij,t}^G$ 为管道压力修正系数(kPa²), 表示倾斜管道气体重力引起的压力损失; γ^G 为天然气相对密度; h_i 、 h_j 为节点 i 、 j 处的绝对海拔高度(m); $\pi_{ij,t}^{G,a}$ 为管道平均气压(kPa); $Z_{ij,t}^{G,a}$ 为管道天然气平均压缩因子; $T_{ij,t}^{G,a}$ 为管道气体等效平均温度(K); T_0^G 为基准温度(K); D_{ij}^G 为管道内径(mm); E_{ij}^G 为管道效率; P_0^G 为基准压强(kPa); L_{ij}^G 为管道长度(km); χ_{ij}^G 为管道流体摩阻系数; $T_{ij,t}^{G,s}$ 为管道敷设环境的平均温度(K); $T_{i,t}^G$ 、 $T_{j,t}^G$ 为节点 i 、 j 处气体温度(K); $Z_{i,t}^G$ 、 $Z_{j,t}^G$ 分别为节点 i 、 j 处天然气压缩因子; $N^{G,R}$ 为雷诺数; ε^G 为管道内壁绝对粗糙度(m); sign 为符号函数, 当 $(\pi_{i,t}^G)^2 - (\pi_{j,t}^G)^2 - P_{ij,t}^G > 0$ 时, $\text{sign}(\pi_{i,t}^G, \pi_{j,t}^G, P_{ij,t}^G)$ 值取 1, 否则取 -1。

$$W_{c',t}^{\text{Co}} = \frac{\rho_0^G M_{c',t}^{\text{Co}} T_{i,t}^{\text{Co}} R^G Z_{i,t}^{\text{Co}}}{24 \cdot 3600 E_{c',t}^{\text{Co,s}} E_{c',t}^{\text{Co,m}}} \left[\frac{C_{c',t}^{\text{Co}}}{C_{c',t}^{\text{Co}} - 1} \right] \left[\left(\frac{\pi_{j,t}^{\text{Co}}}{\pi_{i,t}^{\text{Co}}} \right)^{\frac{C_{c',t}^{\text{Co}} - 1}{C_{c',t}^{\text{Co}}}} - 1 \right] \quad (A9)$$

$$M_{c',t}^{\text{Co,G}} = \alpha_{c',t}^{\text{Co,G}} \cdot (W_{c',t}^{\text{Co}})^2 + \beta_{c',t}^{\text{Co,G}} \cdot W_{c',t}^{\text{Co}} + \gamma_{c',t}^{\text{Co,G}} \quad (A10)$$

$$\tau_{c',t}^{\text{Co}} = \frac{\pi_{j,t}^{\text{Co}}}{\pi_{i,t}^{\text{Co}}} \quad (A11)$$

式中: i, j 为压缩机支路进气端、出气端节点编号; $W_{c',t}^{\text{Co}}$ 为压缩机支路能耗(kW); ρ_0^G 为标况下天然气密度(kg/m³); $Z_{i,t}^{\text{Co}}$ 为压缩机进气端天然气压缩因子;

R^G 为天然气的气体常数(kJ/kg K); $T_{i,t}^{\text{Co}}$ 为压缩机进气端气体温度(K); $E_{c',t}^{\text{Co,s}}$ 为压缩机燃气效率(针对 GDC 型)或电传效率(针对 EDC 型); $E_{c',t}^{\text{Co,m}}$ 为加压机机构机械效率(GDC、EDC 型相同); $C_{c',t}^{\text{Co}}$ 为压缩机气体多变指数; $\pi_{i,t}^{\text{Co}}$ 、 $\pi_{j,t}^{\text{Co}}$ 为压缩机进出气端气压(kPa); $M_{c',t}^{\text{Co,G}}$ 为压缩机耗气量(m³/day), 燃气轮机从压缩机首端节点 i 取气; $\alpha_{c',t}^{\text{Co,G}}$ 、 $\beta_{c',t}^{\text{Co,G}}$ 、 $\gamma_{c',t}^{\text{Co,G}}$ 为压缩机耗量系数; $\tau_{c',t}^{\text{Co}}$ 为压缩机的压缩比。

$$W_{p',t}^{\text{P2G}} = \frac{H^{\text{P2G}} V_{p',t}^{\text{P2G}}}{3.6 \beta_{p',t}^{\text{P2G}}} \quad (A12)$$

式中: $W_{p',t}^{\text{P2G}}$ 为 P2G 设备耗电量(W h); H^{P2G} 为标况下天然气热值(MJ/m³); $V_{p',t}^{\text{P2G}}$ 为合成的天然气的体积(km³); $\beta_{p',t}^{\text{P2G}}$ 为 P2G 稳态转换效率。

$$m_{ij,t}^{\text{H,s}} = \text{sign}(p_{i,t}^{\text{H,s}}, p_{j,t}^{\text{H,s}}) C_{ij}^{\text{H,s}} \left[10^3 \times \rho^{\text{H}} |p_{i,t}^{\text{H,s}} - p_{j,t}^{\text{H,s}}| \right]^{0.5} \quad (A13)$$

$$C_{ij}^{\text{H,s}} = \left[\frac{\pi^2 (D_{ij}^{\text{H,s}})^5}{8 f_{ij}^{\text{H,s}} L_{ij}^{\text{H,s}}} \right]^{0.5} \quad (A14)$$

$$\frac{1}{\sqrt{f_{ij}^{\text{H,s}}}} = -2 \log \left(\frac{\varepsilon^{\text{H,s}}}{3.71 D_{ij}^{\text{H,s}}} + \frac{2.51}{Re_{ij}^{\text{H,s}} \sqrt{f_{ij}^{\text{H,s}}}} \right) \quad (A15)$$

$$Re_{ij}^{\text{H,s}} = \frac{v_{ij,t}^{\text{H,s}} D_{ij}^{\text{H,s}}}{\sigma^{\text{H}}} \quad (A16)$$

$$v_{ij,t}^{\text{H,s}} = \frac{4 m_{ij,t}^{\text{H,s}}}{\pi \rho^{\text{H}} (D_{ij}^{\text{H,s}})^2} \quad (A17)$$

式中: i, j 为供/回水管道首、末端节点编号; 上标 s 代表供水管网参数, 由于供/回水方程相同, 本文只列出供水管网方程; $C_{ij}^{\text{H,s}}$ 为管道常数; ρ^{H} 为热媒密度(kg/m³); $p_{i,t}^{\text{H,s}}$ 、 $p_{j,t}^{\text{H,s}}$ 分别为节点 i 、 j 处的液体压强(kPa); 当 $p_{i,t}^{\text{H,s}} - p_{j,t}^{\text{H,s}} > 0$ 时, $\text{sign}(p_{i,t}^{\text{H,s}}, p_{j,t}^{\text{H,s}})$ 值取 1, 否则, 取 -1; π 为圆周率; $D_{ij}^{\text{H,s}}$ 为管道内径(m); $f_{ij}^{\text{H,s}}$ 为管道摩擦因子; $L_{ij}^{\text{H,s}}$ 为管道长度(m); $\varepsilon^{\text{H,s}}$ 为热力管道内壁绝对粗糙度(m); $Re_{ij}^{\text{H,s}}$ 为雷诺数; $v_{ij,t}^{\text{H,s}}$ 为热媒流速(m/s); σ^{H} 为热媒运动粘度系数(m²/s)。

$$P_{n,t}^{\text{Pump}} = \frac{\Delta p_{n,t}^{\text{Pump}} m_{n,t}^{\text{H}}}{1000 \rho^{\text{H}} \eta_n^{\text{Pump,p}} \eta_n^{\text{Pump,m}} \eta_n^{\text{Pump,t}}} \quad (A18)$$

$$\Delta p_{n,t}^{\text{Pump}} = p_{n,t}^{\text{Pump,out}} - p_{n,t}^{\text{Pump,in}} \quad (A19)$$

$$\tau_{n,t}^{\text{Pump}} = \frac{P_{n,t}^{\text{Pump,out}}}{P_{n,t}^{\text{Pump,in}}} \quad (\tau_{n,t}^{\text{Pump}} \geq 1) \quad (\text{A20})$$

$$P_{n,t}^{\text{Pump,out}} = P_{n,t}^{\text{Pump,ra}} \quad (\text{A21})$$

式中: n 为水泵编号; $P_{n,t}^{\text{Pump}}$ 为水泵耗能(kW); $\Delta p_{n,t}^{\text{Pump}}$ 为水泵压差(kPa); $m_{n,t}^{\text{H}}$ 为水泵的热媒质量流率(kg/s); $\eta_n^{\text{Pump,p}}$ 、 $\eta_n^{\text{Pump,m}}$ 、 $\eta_n^{\text{Pump,f}}$ 分别为水泵的机械效率、电机效率和变频器效率; $p_{n,t}^{\text{Pump,in}}$ 、 $p_{n,t}^{\text{Pump,out}}$ 为水泵进水口、出水口节点热媒压强(kPa)。水泵通常有两种运行方式: 恒压比运行、恒出口压力运行。恒压比模式下水泵出口压力与进口压力比值 $\tau_{n,t}^{\text{Pump}}$ 恒定不变, 恒出口压力模式下水泵出口压力为 $P_{n,t}^{\text{Pump,ra}}$ (kPa)。

$$Q_{k,t}^{\text{H,s,so}} = C_p^{\text{H}} m_{k,t}^{\text{H,s,so}} (T_{k,t}^{\text{H,s,so,out}} - T_{k,t}^{\text{H,s,so,in}}) \quad (\text{A22})$$

$$Q_{s,h,t}^{\text{H,lo}} = C_p^{\text{H}} m_{s,h,t}^{\text{H,lo}} (T_{s,h,t}^{\text{H,lo,out}} - T_{s,h,t}^{\text{H,lo,in}}) \quad (\text{A23})$$

$$\begin{cases} Q_{s,g,t}^{\text{H,st}} = C_p^{\text{H}} m_{s,g,t}^{\text{H,st}} T_{s,g,t}^{\text{H,st,in}} & m_{s,g,t}^{\text{H,st}} \leq 0 \\ Q_{s,g,t}^{\text{H,st}} = C_p^{\text{H}} m_{s,g,t}^{\text{H,st}} T_{s,g,t}^{\text{H,st,ta}} & m_{s,g,t}^{\text{H,st}} > 0 \end{cases} \quad (\text{A24})$$

式中: $Q_{k,t}^{\text{H,s,so}}$ 表示供水管网中第 k 个热源在时段 t 的热出力(kW); $T_{k,t}^{\text{H,s,so,in}}$ 、 $T_{k,t}^{\text{H,s,so,out}}$ 分别为热源输入输出端热媒温度(K); $Q_{s,h,t}^{\text{H,lo}}$ 为第 h 个热负荷的热交换量(kW); $T_{s,h,t}^{\text{H,lo,in}}$ 、 $T_{s,h,t}^{\text{H,lo,out}}$ 分别为热负荷的供、回水端热媒温度(K); $Q_{s,g,t}^{\text{H,st}}$ 为第 g 个储热罐的热交换量(kW); $T_{s,g,t}^{\text{H,st,in}}$ 为储热罐 g 处供水网热媒温度(K); $T_{s,g,t}^{\text{H,st,ta}}$ 为第 g 个储热罐水箱热媒温度(K); $m_{s,g,t}^{\text{H,st}} \leq 0$ 为储热状态, 否则为放热状态。

附录 B

表 B1 天然气管道参数

Table B1 Pipe parameters of the gas network

首节点	末节点	管道长度/km	管道直径/mm	首节点	末节点	管道长度/km	管道直径/mm
1	25	0.1	890	13	12	40	890
26	2	4	890	12	11	42	890
2	3	6	890	11	10	25	890
3	4	26	890	10	9	20	890
4	7	19	590	9	22	5	890
7	6	29	590	21	8	0.1	973
6	5	43	590	11	17	10.5	395
4	14	55	890	17	23	0.1	315
14	15	10	890	24	18	26	315
15	16	25	890	18	19	98	315
14	13	5	890	19	20	6	315

表 B2 热网管道参数

Table B2 Pipe parameters of the heating network

首节点	末节点	管道长度/km	管道直径/mm	首节点	末节点	管道长度/m	管道直径/mm
1	2	30	240	1	9	40	240
2	3	5	240	10	9	30	240
4	2	20	240	10	11	25	240
4	5	20	240	11	12	5	240
5	9	20	240	11	13	25	240
5	6	10	240	14	10	50	240
6	7	5	240	14	13	10	240
6	8	5	240				

表 B3 其余热网参数

Table B3 Other heating network parameters

参数	值	参数	值	参数	值	参数	值
σ^{Heat}	0.294×10^{-6}	$\varepsilon^{\text{Heat}}$	0.4×10^{-3}	$\lambda_{s,ij}^{\text{Heat,b}}$	0.027	$S_{s,ij}^{\text{Heat,wgo}}$	1.05
C_p^{Heat}	4.182	$\beta_{s,ij}^{\text{Heat}}$	0.15	$\lambda_{s,ij}^{\text{Heat,go}}$	1.74	$F_{s,ij}^{\text{Heat,ngo}}$	0.05
$T_{s,ij,t}^{\text{Heat,air}}$	262	$\alpha_{s,ij}^{\text{Heat,soi}}$	15	$\lambda_{s,ij}^{\text{Heat,soi}}$	2.4	$F_{s,ij}^{\text{Heat,wgo}}$	0.08
ρ^{Heat}	960	$\alpha_{s,ij}^{\text{Heat,n}}$	3 058	$H_{s,ij}^{\text{Heat,soi}}$	1.6	$\eta_n^{\text{Pump,p}}$	0.84
$a_{s,ij}^{\text{Heat,soi}}$	4.6	$\alpha_{s,ij}^{\text{Heat,w}}$	1.8	$D_{s,ij}^{\text{Heat,out}}$	0.32	$\eta_n^{\text{Pump,m}}$	0.91
$b_{s,ij}^{\text{Heat,soi}}$	3.8	$\alpha_{s,ij}^{\text{Heat,ngo}}$	11.39	$D_{s,ij}^{\text{Heat,ins}}$	0.58	$\eta_n^{\text{Pump,f}}$	0.94
$h_{s,ij}^{\text{Heat,soi}}$	1.28	$\lambda_{s,ij}^{\text{Heat,g}}$	58.2	$S_{s,ij}^{\text{Heat,ngo}}$	0.76		

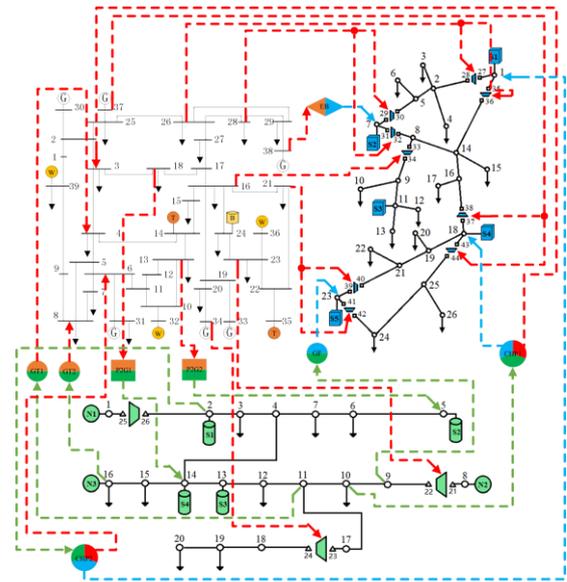


图 B1 算例系统

Fig. B1 Example system

参考文献

- [1] 杨海柱, 李梦龙, 江昭阳, 等. 考虑需求侧电热气负荷响应的区域综合能源系统优化运行[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(10): 30-37.
YANG Haizhu, LI Menglong, JIANG Zhaoyang, et al. Optimal operation of regional integrated energy system considering demand side electricity heat and natural-gas loads response[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(10): 30-37.
- [2] 张涛, 郭玥彤, 李逸鸿, 等. 计及电气热综合需求响应的区域综合能源系统优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(1): 52-61.
ZHAO Tao, GUO Yuetong, LI Yihong, et al. Optimization scheduling of regional integrated energy systems based on electric-thermal-gas integrated demand response[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(1): 52-61.
- [3] 李宇泽, 齐峰, 朱英伟, 等. 多能互补综合能源电力系统的建设模式初探[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(1): 3-10.
LI Zongze, QI Feng, ZHU Yingwei, et al. A preliminary investigation on construction modes of a multi-energy complementary integrated energy system[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(1): 3-10.
- [4] 张利军, 王一铮, 陈飞, 等. 计及能源网络特性的综合能源系统最优协调规划[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(1): 3-13.
ZHANG Lijun, WANG Yizheng, CHEN Fei, et al. Optimal coordinated planning of an integrated energy system considering characteristics of energy networks[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(1): 3-13.
- [5] 任洪波, 王广涛, 李琦芬, 等. 供需互动视角下区域综合能源系统设备配置与运行策略协同优化研究[J]. 热力发电, 2020, 49(3): 60-67.
REN Hongbo, WANG Guangtao, LI Qifen, et al. Collaborative optimization of equipment configuration and operation strategy for integrated energy systems based on supply-demand interaction[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(3): 60-67.
- [6] 严嘉伦, 林俊光, 楼可炜, 等. 基于 AHP-变异系数法的楼宇型综合能源系统评价体系[J]. 热力发电, 2019, 48(12): 25-30.
YAN Jialun, LIN Junguang, LOU Kewei, et al. Evaluation system for building integrated energy system based on AHP-CV method[J]. Thermal Power Generation, 2019, 48(12): 25-30.
- [7] LI G, ZHANG R, JIANG T, et al. Security-constrained bi-level economic dispatch model for integrated natural gas and electricity systems considering wind power and power-to-gas process[J]. Applied Energy, 2017, 194: 696-704.
- [8] HUANG Zhao, FANG Baling, DENG Jin. Multi-objective optimization strategy for distribution network considering V2G-enabled electric vehicles in building integrated energy system[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(1): 48-55. DOI: 10.1186/s41601-020-0154-0.
- [9] 罗金满, 赵善龙, 封祐钧, 等. 考虑综合需求响应不确定性的电-气综合能源系统优化运行[J]. 中国电力, 2020, 53(12): 119-126.
LUO Jinman, ZHAO Shanlong, FENG Youjun, et al. Optimal operation of integrated electricity-gas system considering uncertainty of integrated demand response[J]. Electric Power, 2020, 53(12): 119-126.
- [10] 孙强, 谢典, 聂青云, 等. 含电-热-冷-气负荷的园区综合能源系统经济优化调度研究[J]. 中国电力, 2020, 53(4): 79-88.
SUN Qiang, XIE Dian, NIE Qingyun, et al. Research on economic optimization scheduling of park integrated energy system with electricity-heat-cool-gas load[J]. Electric Power, 2020, 53(4): 79-88.
- [11] 徐晨博, 薛友, 林紫菡, 等. 计及可转移负荷的电-气综合能源系统多目标优化[J]. 电力科学与技术学报, 2019, 34(3): 13-23.
XU Chenbo, XUE You, LIN Zihan, et al. Multi-objective optimization of an integrated electricity-gas energy system considering transferable loads[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2019, 34(3): 13-23.
- [12] 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 system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 198-207.
- [13] XUE Y S. Energy internet or comprehensive energy network[J]. Journal of Modern Power System and Clean Energy, 2015, 3(3): 297-301.
- [14] 沈海平, 陈铭, 钱磊, 等. 计及电转气耦合的电-气互联系统机组组合线性模型研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 34-41.
SHEN Haiping, CHEN Ming, QIAN Lei, et al. Liner model research of unit commitment for integrated electricity and natural-gas systems considering power-to-gas coupling[J]. Power System Protection and Control, 2019,

- 47(8): 34-41.
- [15] 王丹, 赵平, 臧宁宁, 等. 基于安全博弈的综合能源系统安全性分析及防御策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 10-16.
WANG Dan, ZHAO Ping, ZANG Ningning, et al. Security analysis and defense strategy of integrated energy system based on security game[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 10-16.
- [16] 王艳松, 卢志强, 李强, 等. 基于源-荷协同的电网静态安全校正最优控制算法[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(20): 73-80.
WANG Yansong, LU Zhiqiang, LI Qiang, et al. Optimal control algorithm for static safety correction of power grid based on source-load coordination[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(20): 73-80.
- [17] 陈厚合, 邵俊岩, 姜涛, 等. 基于多能流解耦算法的综合能源系统 N-1 静态安全分析[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(17): 20-35, 131.
CHEN Houhe, SHAO Junyan, JIANG Tao, et al. Static N-1 security analysis for integrated energy system based on decoupled multi-energy flow calculation method[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(17): 20-35, 131.
- [18] PAN Zhaoguang, WU Jianzhong, SUN Hongbin, et al. Quasi-dynamic interactions and security control of integrated electricity and heating systems in normal operations[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2019, 5(1): 120-129.
- [19] 陈厚合, 张鹏, 姜涛, 等. 基于灵敏度分析的综合能源系统运行安全性的研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(8): 95-103.
CHEN Houhe, ZHANG Peng, JIANG Tao, et al. Security analysis based on sensitivity analysis for integrated electric and gas energy system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(8): 95-103.
- [20] 陈厚合, 邵俊岩, 姜涛, 等. 基于参数灵敏度的综合能源系统安全控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(15): 4831-4842.
CHEN Houhe, SHAO Junyan, JIANG Tao, et al. Security control measures for integrated energy system based on sensitivity analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(15): 4831-4842.
- [21] MASSRUR H R, NIKNAM T, FOTUHI-FIRUZABAD M. Investigation of carrier demand response uncertainty on energy flow of renewable-Based integrated electricity-gas-heat systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2018, 14(11): 5133-5142.
- [22] ALBERTO M, CLAUDIO R F. A unified gas and power flow analysis in natural gas and electricity coupled networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(4): 2156-2166.
- [23] CLAMOND D. Efficient resolution of the Colebrook equation[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research, 2009, 48(7): 3665-3671.
- [24] HE Chuan, WU Lei, LIU Tianqi, et al. Co-optimization scheduling of interdependent power and gas systems with electricity and gas uncertainties[J]. Energy, 2018, 159: 1003-1015.
- [25] 孔川. 区域天然气管网规划设计理论研究[J]. 煤气与热力, 2016, 36(3): 40-44.
KONG Chuan. Theoretical study on planning and design theory of regional natural gas pipeline network[J]. Gas and Heat, 2016, 36(3): 40-44.
- [26] PIROUTI M. Modelling and analysis of a district heating network[D]. Cardiff: Cardiff University, 2013.
- [27] LIU Xuezhi. Combined analysis of electricity and heat networks[D]. Cardiff: Cardiff University, 2014.
- [28] 张义斌. 天然气—电力混合系统分析方法研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005.
ZHANG Yibin. Research on analysis method of natural gas-power hybrid system[D]. Beijing: China Electric Power Research Institute, 2005.
- [29] 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. Power-gas regional comprehensive energy system steady state analysis considering the state of the natural gas network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1293-1304.
- [30] 潘学萍, 李乐, 黄华, 等. 综合灵敏度和静态电压稳定裕度的直流受端交流系统电压薄弱区域评估方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(3): 7-14.
PAN Xueping, LI Yue, HUANG Hua, et al. Method for evaluating voltage weak area of AC power system at DC receiving end considering sensitivity and static voltage stability margin[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(3): 7-14.

收稿日期: 2021-01-21; 修回日期: 2021-03-08

作者简介:

刘奇(1988—), 男, 高级工程师, 主要研究方向为智能电网分析;

雷霞(1973—), 女, 通信作者, 教授, 硕士生导师, 主要研究方向为电力市场、调度自动化、配电自动化。
E-mail: Snow_lei246@mail.xhu.edu.cn

(编辑 葛艳娜)