

文章编号: 1006-2467(2023)04-0422-10

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2021.513

考虑经济性与碳排放的电-气综合 能源系统多目标规划

朱海南¹, 王娟娟¹, 陈兵兵¹, 张厚望², 陈健², 吴秋伟³

(1. 国网山东省电力公司潍坊供电公司, 山东 潍坊 261000; 2. 山东大学 电气工程学院, 济南 250061; 3. 丹麦科技大学 电气工程学院, 丹麦 灵比 2800)

摘要: 为加速电-气系统快速、经济的低碳转型, 构建了一种综合考虑经济性成本与碳排放量的电-气综合能源系统多目标随机优化规划模型. 首先建立电-气网络与相关设备的数学模型, 并运用场景法表征电、气负荷与光伏出力的不确定性. 其次建立综合考虑系统经济性成本和碳排放量两个指标的混合整数二次约束规划(MIQCP)模型, 对电网馈线、气网管道、变电站、配气站、燃气机组、电转气装置、光伏及储能装置进行统筹规划. 最后, 构建算例验证模型的可行性及有效性. 结果表明: 在不同的目标函数权重选择下, 模型可以充分考虑电-气网络线路与多种综合能源设备间的耦合关系, 获得整体最优的规划方案.

关键词: 综合能源; 多目标; 扩展规划; 低碳转型

中图分类号: TM 715

文献标志码: A

Multi-Objective Planning of Power-Gas Integrated Energy System Considering Economy and Carbon Emission

ZHU Hainan¹, WANG Juanjuan¹, CHEN Bingbing¹

ZHANG Houwang², CHEN Jian², WU Qiuwei³

(1. State Grid Weifang Power Supply Company, Weifang 261000, Shandong, China; 2. School of Electrical Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China; 3. Department of Electrical Engineering, Technical University of Denmark, 2800 Kgs. Lyngby, Denmark)

Abstract: In order to accelerate the rapid and economic low-carbon transformation of the power-gas system, a multi-objective stochastic optimization programming model for the whole equipment of the power-gas system was established, which comprehensively considered the economic cost and carbon emissions. First, the mathematical model of the electric-gas network and related equipment was established, and the uncertainty characteristics of the electric and gas loads and photovoltaic output were analyzed by using the scenario method. Next, a mixed-integer quadratically constrained programming (MIQCP) model considering the economic cost and carbon emissions of the system was established. An overall planning was made for power feeders, gas network pipelines, substations, gas distribution stations, gas units, power-to-gas devices, photovoltaic, and energy storage devices. Finally, a numerical example was built to verify the feasibility and effectiveness of the model. The results show that the model

收稿日期: 2021-12-16 修回日期: 2022-01-06 录用日期: 2022-02-07

基金项目: 国网山东省电力公司科技项目(520604200003), 国家重点研发计划(2018YFA0702200)

作者简介: 朱海南(1987-), 高级工程师, 博士, 从事电网运行与控制研究; E-mail: hainanzhu@mail.sdu.edu.cn.

can fully consider the coupling relationship between power-gas network lines and a variety of comprehensive energy equipment under different weight choices of objective function, and obtain the overall optimal planning scheme.

Key words: integrated energy; multi-objective; expansion planning; low-carbon transformation

近年来,随着环境问题的日益凸显,传统能源带来的污染问题逐渐显露,实现能源生产和使用的低碳化已成为人类社会可持续发展的必然趋势^[1]. 电-气网络是能源供应的重要环节,实现电-气系统快速、经济的低碳转型是推进我国经济社会发展动力转换的重要引擎,是保障国家能源安全的重要举措. 综合考虑经济性与碳排放量,对电-气网络线路及相关设备进行统筹规划,保证规划网络的经济性与灵活性,提高光伏等清洁能源的消纳能力,具有重大研究意义.

电-气系统联合规划以电网规划为基础,在电-气网络耦合日益密切的当下逐渐成为国内外研究的热点问题. 文献[2]以电-气网络综合投资与运行成本最小为目标,对电-气网络线路进行联合扩展规划. 文献[3]建立了计及传输线重构的分布鲁棒电-气综合能源系统扩展规划模型,以系统总投资成本和包括弃负荷成本在内的总运行成本最低为目标,对电力线路与天然气管道进行规划. 文献[4-5]建立了考虑风力发电(简称风电)出力随机性的规划模型,模型聚焦于风电场、电转气装置等综合能源设备的选址定容问题,未考虑电-气网络线路的规划问题. 文献[6]建立了考虑风电不确定性的综合能源系统扩展规划模型,在风电装机容量确定的前提下对电网线路与耦合设备进行规划. 文献[7]建立了考虑需求侧响应的电-气系统规划模型,以建设、运营总成本和需求侧响应补偿最小为目标,对电-气网络线路和燃气机组、电转气装置进行规划. 文献[8]所提的扩展规划模型考虑全球电网的廉价燃料获取和输电瓶颈问题,以低碳经济为导向,实现对电-气网络线路与燃气机组、压气泵的规划. 总结上述文献可知,目前电-气网络规划模型部分聚焦于电-气网络线路、拓扑的扩展规划问题^[2-3],部分聚焦于综合能源设备的选址定容问题^[4-5],对同时进行线路扩展规划与设备选址定容的研究也局限于少数几种设备类型^[6-8]. 电-气综合能源系统内部各设备相互耦合,如果规划方案仅考虑其中线路或部分类型设备的配置,势必会引起资源的不合理配置.

总结目前电-气综合能源系统规划中常见的待规划设备类型,实现了对电网馈线、气网管道以及变

压器、配气站、燃气轮机、电转气装置、光伏及储能装置等多种类型设备的统筹规划. 另外,规划模型综合考虑了系统的经济性成本与碳排放量,决策者可以根据需求自由选择两个目标的权重系数,获得符合需求的规划方案.

1 数学模型

1.1 综合能源系统设备数学模型

1.1.1 燃气机组 燃气机组可以在电网电能不足时通过燃烧天然气产生电能,实现天然气网向电网的能量传递. 相较于传统燃煤机组,燃气机组产生单位电能时碳排放量更低,具有良好的环境效益. 燃气机组数学模型如下:

$$P_{i,d,h}^{\text{gt}} = \sum_{g \in T_g} P_{g,i,d,h}^{\text{gt}} \quad (1)$$

$$Q_{i,d,h}^{\text{gt}} = \sum_{g \in T_g} \eta_g P_{g,i,d,h}^{\text{gt}} \quad (2)$$

$$F_{m,d,h}^{\text{gt}} = \sum_{g \in T_g} \frac{P_{g,i,d,h}^{\text{gt}}}{\zeta_g H_{\text{gas}}} \quad (3)$$

$$0 \leq P_{g,i,d,h}^{\text{gt}} \leq \sum_{g \in T_g} Z_{g,i}^{\text{gt}} P_g^{\text{max}} \quad (4)$$

$$\sum_{g \in T_g} Z_{g,i}^{\text{gt}} \leq 1 \quad (5)$$

式中: $\forall i \in N_g$, N_g 为配电网中备选燃气机组节点集合; T_g 为备选燃气机组类型集合; $P_{i,d,h}^{\text{gt}}$ 和 $Q_{i,d,h}^{\text{gt}}$ 分别表示配电网节点 i 处燃气机组在典型日 d 中时刻 h 输出的有功和无功率; $F_{m,d,h}^{\text{gt}}$ 表示气网节点 m 处燃气机组在典型日 d 中时刻 h 消耗的天然气体积; $P_{g,i,d,h}^{\text{gt}}$ 表示配电网节点 i 处 g 类型燃气机组在典型日 d 中时刻 h 输出的有功功率; $Z_{g,i}^{\text{gt}}$ 为 0-1 变量,表示配电网节点 i 处是否新建 g 类型燃气机组; P_g^{max} 、 ζ_g 、 η_g 分别为 g 类型燃气机组的额定容量、气转电效率、无功系数; H_{gas} 为天然气热值.

式(1)~(4)表示燃气机组能量转换过程,式(5)为燃气机组建设逻辑约束. 式(1)表示节点 i 处燃气机组的有功功率. 式(2)、式(3)分别表示节点 i 处燃气机组有功与无功、有功与气量的转换关系. 式(4)保证各类型机组发出的有功功率小于建设的额定功率. 式(5)保证节点 i 最多建设一种类型的备选燃气机组.

1.1.2 电转气装置 电转气装置可以将电网中的过剩电能转换为天然气,实现电网向天然气网的能量传递.在电转气装置运行过程中,产生单位体积的天然气需要单位 CO_2 气体作为原料,因此该装置具有一定的固碳作用.电转气装置数学模型如下:

$$P_{i,d,h}^{\text{p}2\text{g}} = \sum_{p \in T_{\text{pg}}} P_{p,i,d,h}^{\text{p}2\text{g}} \quad (6)$$

$$F_{m,d,h}^{\text{p}2\text{g}} = \sum_{p \in T_{\text{pg}}} \zeta_p \frac{P_{p,i,d,h}^{\text{p}2\text{g}}}{H_{\text{gas}}} \quad (7)$$

$$0 \leq P_{p,i,d,h}^{\text{p}2\text{g}} \leq \sum_{p \in T_{\text{pg}}} Z_{p,i}^{\text{p}2\text{g}} P_p^{\text{max}} \quad (8)$$

$$\sum_{p \in T_{\text{pg}}} Z_{p,i}^{\text{p}2\text{g}} \leq 1 \quad (9)$$

式中: $\forall i \in N_{\text{pg}}, N_{\text{pg}}$ 为配电网中备选电转气装置节点集合; T_{pg} 为备选电转气装置类型集合; $P_{p,i,d,h}^{\text{p}2\text{g}}$ 表示配电网节点 i 处电转气装置在典型日 d 中时刻 h 消耗的有功功率; $F_{m,d,h}^{\text{p}2\text{g}}$ 表示气网节点 m 处电转气装置在典型日 d 中时刻 h 产生的天然气体积; $P_{p,i,d,h}^{\text{p}2\text{g}}$ 表示配电网节点 i 处 p 类型电转气装置在典型日 d 中时刻 h 消耗的有功功率; $Z_{p,i}^{\text{p}2\text{g}}$ 为 0-1 变量,表示配电网节点 i 处是否新建 p 类型电转气装置; $P_p^{\text{max}}, \zeta_p$ 分别为 p 类型电转气装置的额定容量、电转气效率.

式(6)表示节点 i 处电转气装置的有功功率.式(7)表示节点 i 处电转气装置有功功率与天然气流量的转换关系.式(8)保证各类型电转气装置发出的有功功率小于各自的额定功率.式(9)保证节点 i 最多建设一种类型的备选电转气装置.

1.1.3 储能装置 在电-气综合能源系统中,储能装置通过在不同时刻的充放电调节网络供需关系,提高系统光伏利用率.由于储能装置充放电效率小于 1,所以最优解将自动满足充放电互补松弛^[9],基于此建立的不含充放电标志位的储能装置数学模型如下:

$$\sum_{e \in T_e} Z_{e,i}^{\text{ess}} E_e^{\text{min}} \leq E_{i,d,h}^{\text{ess}} \leq \sum_{e \in T_e} Z_{e,i}^{\text{ess}} E_e^{\text{max}} \quad (10)$$

$$0 \leq P_{i,d,h}^{\text{ess,cha}} \leq \sum_{e \in T_e} Z_{e,i}^{\text{ess}} P_e^{\text{max}} \quad (11)$$

$$0 \leq P_{i,d,h}^{\text{ess,dis}} \leq \sum_{e \in T_e} Z_{e,i}^{\text{ess}} P_e^{\text{max}} \quad (12)$$

$$E_{i,d,h}^{\text{ess}} = E_{i,d,h-1}^{\text{ess}} + \mu P_{i,d,h}^{\text{ess,cha}} - P_{i,d,h}^{\text{ess,dis}} / \mu \quad (13)$$

$$E_{i,d,24}^{\text{ess}} = E_{i,d,0}^{\text{ess}} \quad (14)$$

$$\sum_{e \in T_e} Z_{e,i}^{\text{ess}} \leq 1 \quad (15)$$

式中: $\forall i \in N_{\text{es}}, N_{\text{es}}$ 为配电网中备选储能装置节点集合; T_e 为备选储能装置类型集合; $Z_{e,i}^{\text{ess}}$ 为 0-1 变量,表示配电网节点 i 处是否新建 e 类型储能装置; P_e^{max} 为 e 类型储能装置的功率上限; $E_e^{\text{min}}, E_e^{\text{max}}$ 分别

为 e 类型储能装置的最小容量、最大容量; $E_{i,d,h}^{\text{ess}}, P_{i,d,h}^{\text{ess,cha}}, P_{i,d,h}^{\text{ess,dis}}$ 分别表示配电网节点 i 处储能装置在典型日 d 中时刻 h 时的电量、充电功率、放电功率; μ 为储能装置的充放电效率.

式(10)为储能装置容量约束.式(11)、式(12)分别表示充电功率、放电功率约束.式(13)为储能装置电量变化与充、放电功率间的关系约束.式(14)保证典型日内储能装置电量的初、末状态相同.式(15)为储能装置建设逻辑约束.

1.1.4 分布式光伏 分布式光伏建设与运行约束如下:

$$\sum_{v \in T_v} Z_{v,i}^{\text{pv}} \leq 1 \quad (16)$$

$$0 \leq P_{i,d,h}^{\text{pv}} \leq \sum_{v \in T_v} Z_{v,i}^{\text{pv}} P_v^{\text{max}} \hat{P}_{d,h}^{\text{pv}} \quad (17)$$

式中: $\forall i \in N_v, N_v$ 为配电网中备选光伏电站节点集合; T_v 为备选光伏电站类型集合; $Z_{v,i}^{\text{pv}}$ 为 0-1 变量,表示配电网节点 i 处是否新建 v 类型光伏电站; $P_{i,d,h}^{\text{pv}}$ 表示配电网节点 i 处光伏电站在典型日 d 中时刻 h 的输出功率; P_v^{max} 表示 v 类型光伏电站的装机容量; $\hat{P}_{d,h}^{\text{pv}}$ 表示单位容量光伏电站在典型日 d 中时刻 h 的输出功率.

式(16)为光伏电站建设逻辑约束,式(17)为光伏电站各时刻输出的有功功率约束.

1.2 配电网模型

1.2.1 变电站 变电站建设与运行约束如下:

$$(P_{i,d,h}^{\text{sub}})^2 + (Q_{i,d,h}^{\text{sub}})^2 \leq \sum_{s \in T_s} Z_{s,i}^{\text{sub}} (S_s^{\text{max}})^2 \quad (18)$$

$$Z_{n,s,i}^{\text{sub}} = Z_{n,s,i}^{\text{sub}} + Z_{c,s,i}^{\text{sub}} \quad (19)$$

$$\sum_{s \in T_s} Z_{s,i}^{\text{sub}} \leq 1 \quad (20)$$

式中: $\forall i \in N_s, N_s$ 为配电网中变电站节点集合; T_s 为备选变电站类型集合; S_s^{max} 表示 s 类型变电站的额定容量; $P_{i,d,h}^{\text{sub}}, Q_{i,d,h}^{\text{sub}}$ 分别表示节点 i 处变电站在典型日 d 中时刻 h 输出的有功和无功功率; $Z_{n,s,i}^{\text{sub}}, Z_{c,s,i}^{\text{sub}}$ 为 0-1 变量,分别表示配电网备选变电站节点 i 处是否存在新建的、扩建的 s 类型变电站; $Z_{s,i}^{\text{sub}}$ 为 0-1 变量,表示规划后节点 i 处是否存在 s 类型变电站.

式(18)为变电站有功功率、无功功率与其额定容量的关系约束.式(19)、式(20)保证在配电网节点 i 处仅存在一种类型的变电站.

1.2.2 配电网潮流 配电网潮流模型采用适合于辐射状网络的线性交流 DistFlow 模型^[10],模型如下:

$$V_{i,d,h} - V_{j,d,h} =$$

$$\frac{\sum_{c \in T_c} (r_c P_{c,ij,d,h}^{\text{cod}} + x_c Q_{c,ij,d,h}^{\text{cod}}) L_{ij}}{V_{\text{ref}}} + b_{ij,d,h} \quad (21)$$

$$V^{\min} \leq V_{i,d,h} \leq V^{\max} \quad (22)$$

$$\sum_{ji \in B_e} P_{ji,d,h}^{\text{bra}} + P_{i,d,h}^{\text{gt}} + P_{i,d,h}^{\text{pv}} + P_{i,d,h}^{\text{ess,dis}} = \sum_{ij \in B_e} P_{ij,d,h}^{\text{bra}} + P_{i,d,h}^{\text{pg}} + P_{i,d,h}^{\text{ess,cha}} + P_i^{\text{load}} \hat{S}_{d,h} \quad (23)$$

$$\sum_{ji \in N_e} Q_{ji,d,h}^{\text{bra}} - \sum_{ij \in N_e} Q_{ij,d,h}^{\text{bra}} + Q_{i,d,h}^{\text{gt}} + Q_i^{\text{load}} \hat{S}_{d,h} = 0 \quad (24)$$

$$P_{ij,d,h}^{\text{bra}} = \sum_{c \in T_c} P_{c,ij,d,h}^{\text{cod}} \quad (25)$$

$$Q_{ij,d,h}^{\text{bra}} = \sum_{c \in T_c} Q_{c,ij,d,h}^{\text{cod}} \quad (26)$$

$$|P_{c,ij,d,h}^{\text{cod}}| \leq Z_{c,ij}^{\text{cod}} P_{\text{cod},c}^{\text{max}} \quad (27)$$

$$|Q_{c,ij,d,h}^{\text{cod}}| \leq Z_{c,ij}^{\text{cod}} Q_{\text{cod},c}^{\text{max}} \quad (28)$$

$$|b_{ij,d,h}| \leq (V^{\max} - V^{\min}) (1 - \sum_{c \in T_c} Z_{c,ij}^{\text{cod}}) \quad (29)$$

$$Z_{c,ij}^{\text{cod}} = Z_{n,c,ij}^{\text{cos}} + Z_{c,c,ij}^{\text{cod}} \quad (30)$$

$$\sum_{c \in T_c} Z_{c,ij}^{\text{cod}} \leq 1 \quad (31)$$

式中: $\forall ij \in B_e, \forall i \in N_e, \forall c \in T_c, B_e$ 为配电网中备选线路集合; N_e 为配电网节点集合; T_c 为备选输电线路类型集合; $V_{i,d,h}$ 表示节点 i 在典型日 d 中时刻 h 的电压幅值; V_{ref} 为参考节点电压; $P_{c,ij,d,h}^{\text{cod}}, Q_{c,ij,d,h}^{\text{cod}}$ 分别表示配电网线路 ij 处在典型日 d 中时刻 h 时刻 c 类型馈线流过的有功、无功功率; $P_{ij,d,h}^{\text{bra}}, Q_{ij,d,h}^{\text{bra}}$ 分别表示在典型日 d 中时刻 h 时刻流过线路 ij 的有功、无功功率; $P_i^{\text{load}}, Q_i^{\text{load}}$ 分别表示节点 i 的有功、无功功率基值; $\hat{S}_{d,h}$ 表示在典型日 d 中时刻 h 时刻的归一化电负荷; $b_{ij,d,h}$ 为辅助松弛变量; r_c, x_c 分别表示 e 类型导线的单位长度电阻值、电抗值; L_{ij} 表示线路 ij 的长度; V^{\max}, V^{\min} 分别表示节点电压最大值与最小值; $Z_{c,ij}^{\text{cod}}$ 为 0-1 变量, 表示规划后配电网线路 ij 处是否存在 c 类型馈线; $Z_{n,c,ij}^{\text{cod}}, Z_{c,c,ij}^{\text{cod}}$ 为 0-1 变量, 分别表示配电网线路 ij 处是否存在新建的、扩建的 c 类型馈线; $P_{\text{cod},c}^{\text{max}}, Q_{\text{cod},c}^{\text{max}}$ 表示流过 c 类型馈线的最大有功、无功功率。

式(21)~(29)为配电网运行约束, 式(30)~(31)为馈线建设逻辑约束。式(21)为简化的 Dist-Flow 潮流方程。式(22)为节点电压上下限约束。式(23)、式(24)为节点有功、无功功率平衡约束。式(25)、式(26)表示流过线路的有功、无功功率与各类馈线中有功、无功功率的关系。式(27)、式(28)为各类型馈线有功、无功功率上下限约束。式(29)约束了变量 $b_{ij,d,h}$ 的取值, 当线路 ij 处不建设馈线时, $\sum_{c \in T_c} Z_{c,ij}^{\text{cod}} = 0, b_{ij,d,h}$ 为在 $[V^{\min} - V^{\max}, V^{\max} - V^{\min}]$ 范

围内随意变动的辅助变量, 此时代表线路两端电压与流过线路功率间关系的约束式(21)被松弛; 反之, 当线路 ij 存在馈线时, $b_{ij,d,h} = 0$, 式(21)正常存在。式(30)、式(31)保证在配电网线路 ij 处仅存在一种类型的馈线。

1.2.3 放射状拓扑 为保证规划后配电网为放射状拓扑, 需要引入放射状拓扑约束。采用潮流剥离配电网规划方法, 通过引入非负连续辅助变量 y_{ij}^+, y_{ij}^- , 保证规划后配电网为放射状拓扑^[11]。建立模型如下:

$$y_{ij}^+ \geq 0, \quad y_{ij}^- \geq 0 \quad (32)$$

$$y_{ij}^+ + y_{ij}^- \leq 1 \quad (33)$$

$$\sum_{c \in T_c} Z_{c,ij}^{\text{cod}} = y_{ij}^+ + y_{ij}^- \quad (34)$$

$$\sum_{ki \in B_e} y_{ki}^+ + \sum_{ij \in B_e} y_{ij}^- = 1 - \sum_{s \in T_s} Z_{s,i}^{\text{sub}} \leq 1, \quad \forall i \in N_s \quad (35)$$

$$\sum_{ki \in B_e} y_{ki}^+ + \sum_{ij \in B_e} y_{ij}^- = 1, \quad \forall i \in N_e - N_s \quad (36)$$

式中: $\forall ij \in B_e, y_{ij}^+, y_{ij}^-$ 为虚拟潮流方向辅助变量, 通过式(32)~(36)的共同作用, y_{ij}^+, y_{ij}^- 的值被约束为 0 或 1。 $y_{ij}^+ = 1$ 代表存在由节点 i 流向节点 j 的虚拟潮流, $y_{ij}^+ = 0$ 代表不存在; $y_{ij}^- = 1$ 代表存在由节点 j 流向节点 i 的虚拟潮流, $y_{ij}^- = 0$ 代表不存在。

式(32)、式(33)约束连续辅助变量 y_{ij}^+, y_{ij}^- 的取值范围。式(34)保证当线路 ij 处存在馈线时 y_{ij}^+ 与 y_{ij}^- 之和为 1, 反之为 0。式(35)保证潮流不从配电网其他节点倒流向变电站。式(36)保证配电网除变电站外的任意节点都有且仅有一个父节点。

1.3 天然气网模型

1.3.1 配气站 配气站建设与运行约束如下:

$$0 \leq F_{m,d,h}^{\text{gat}} \leq \sum_{a \in T_a} F_a^{\text{max}} Z_{a,m}^{\text{gat}} \quad (37)$$

$$Z_{a,m}^{\text{gat}} = Z_{n,a,m}^{\text{gat}} + Z_{c,a,m}^{\text{gat}} \quad (38)$$

$$\sum_{a \in T_a} Z_{a,m}^{\text{gat}} \leq 1 \quad (39)$$

式中: $\forall m \in N_a, N_a$ 为天然气网中备选配气站节点集合; T_a 为备选配气站类型集合; F_a^{max} 表示 a 类型配气站的额定容量; $F_{m,d,h}^{\text{gat}}$ 表示天然气网节点 m 处配气站在典型日 d 中时刻 h 输出的气量; $Z_{n,a,m}^{\text{gat}}, Z_{c,a,m}^{\text{gat}}$ 为 0-1 变量, 分别表示节点 m 处是否存在新建的、扩建的 a 类型配气站; $Z_{a,m}^{\text{gat}}$ 为 0-1 变量, 表示规划后节点 m 处是否存在 a 类型配气站。

式(37)为配气站流量上下限约束, 式(38)、式(39)为配气站建设逻辑约束。

1.3.2 天然气网 忽略天然气管道 Weymouth 方程、压缩机方程, 建立如下气网模型^[12]:

$$\sum_{mn \in B_t} F_{mn,d,h}^{\text{bra}} + F_{m,d,h}^{\text{p2g}} = \sum_{mn \in B_t} F_{mn,d,h}^{\text{bra}} + F_{m,d,h}^{\text{gt}} + F_m^{\text{load}} \hat{F}_{d,h} \quad (40)$$

$$|F_{f,nm,d,h}^{\text{pip}}| \leq F_{f,nm}^{\text{pip}} F_f^{\text{max}} \quad (41)$$

$$F_{mn,d,h}^{\text{bra}} = \sum_{f \in T_f} F_{f,nm,d,h}^{\text{pip}} \quad (42)$$

$$Z_{f,nm}^{\text{pip}} = Z_{n,f,nm}^{\text{pip}} + Z_{c,f,m}^{\text{pip}} \quad (43)$$

$$\sum_{f \in T_f} Z_{f,nm}^{\text{pip}} \leq 1 \quad (44)$$

式中: $\forall m \in N_t, \forall mn \in B_t, \forall f \in T_f, N_t$ 为气网中备选管道集合, n 为天然气网节点序号; B_t 为气网节点集合; T_f 为备选管道类型集合; $F_{f,nm,d,h}^{\text{pip}}$ 表示气网线路 mn 处在典型日 d 中 h 时刻 f 类型管道流过的流量; $F_{mn,d,h}^{\text{bra}}$ 表示在典型日 d 中 h 时刻流过线路 mn 的气量; F_m^{load} 表示节点 m 的气负荷基值; $\hat{F}_{d,h}$ 表示在典型日 d 中 h 时刻的归一化气负荷; $Z_{f,nm}^{\text{pip}}$ 为 0-1 变量, 表示规划后气网线路 mn 处是否存在 f 类型管道; $Z_{n,f,nm}^{\text{pip}}, Z_{c,f,m}^{\text{pip}}$ 为 0-1 变量, 分别表示气网线路 mn 处是否存在新建的、扩建的 f 类型管道; F_f^{max} 表示 f 类型管道最大传输容量。

式(40)~(42)为天然气网运行约束, 式(43)~(44)为馈线建设逻辑约束。

1.3.3 放射状拓扑 与电网放射状拓扑约束相同, 将 y_{nm}^+, y_{nm}^- 设置为连续变量, 获得气网放射状网络拓扑约束如下:

$$y_{nm}^+ \geq 0, \quad y_{nm}^- \geq 0, \quad \forall mn \in B_t \quad (45)$$

$$\sum_{f \in T_f} Z_{f,nm}^{\text{pip}} = y_{nm}^+ + y_{nm}^-, \quad \forall mn \in B_t \quad (46)$$

$$y_{nm}^+ + y_{nm}^- \leq 1, \quad \forall mn \in B_t \quad (47)$$

$$\sum_{lm \in B_t} y_{lm}^+ + \sum_{mn \in B_t} y_{nm}^- = 1 - \sum_{a \in T_a} Z_{a,m}^{\text{gat}}, \quad \forall m \in N_a \quad (48)$$

$$\sum_{lm \in B_t} y_{lm}^+ + \sum_{nm \in N_e} y_{nm}^- = 1, \quad \forall m \in N_t - N_a \quad (49)$$

2 规划模型

2.1 目标函数

目标函数由系统经济性成本 f_1 与碳排放量 f_2 两部分组成。经济性成本 f_1 包括设备投资成本 C_{inv} 与系统运行成本 C_{ope} 两部分, 其中投资成本折算至一年, 运行成本为一年的购电成本与购气成本; 碳排放量 f_2 包括传统煤炭发电产生的碳排放、燃气机组发电产生的碳排放以及电转气装置运行过程中减少

的碳排放。 f_1, f_2 的具体表达形式如下:

$$f_1 = C_{\text{inv}} + C_{\text{ope}} \quad (50)$$

$$\begin{aligned} C_{\text{inv}} = & \sum_{mn \in B_t} \sum_{f \in T_f} \kappa (C_{f,n}^{\text{pip}} L_{mn} Z_{n,f,nm}^{\text{pip}} + C_{f,c}^{\text{pip}} L_{mn} Z_{c,f,nm}^{\text{pip}}) + \\ & \sum_{ij \in B_e} \sum_{c \in T_c} \kappa (C_{c,n}^{\text{cod}} L_{ij} Z_{n,c,ij}^{\text{cod}} + C_{c,c}^{\text{cod}} L_{ij} Z_{c,c,ij}^{\text{cod}}) + \\ & \sum_{m \in N_t} \sum_{a \in T_a} \kappa (C_{a,n}^{\text{gat}} Z_{n,a,m}^{\text{gat}} + C_{a,c}^{\text{gat}} Z_{c,a,m}^{\text{gat}}) + \\ & \sum_{i \in N_s} \sum_{s \in T_s} \kappa (C_{s,n}^{\text{sub}} Z_{n,s,i}^{\text{sub}} + C_{s,c}^{\text{sub}} Z_{c,s,i}^{\text{sub}}) + \\ & \sum_{i \in N_g} \sum_{g \in T_g} \kappa C_g^{\text{gt}} Z_{g,i}^{\text{gt}} + \sum_{i \in N_{pg}} \sum_{p \in T_{pg}} \kappa C_p^{\text{p2g}} Z_{p,i}^{\text{p2g}} + \\ & \sum_{i \in N_v} \sum_{v \in T_v} \kappa C_v^{\text{pv}} Z_{v,i}^{\text{pv}} + \sum_{i \in N_e} \sum_{e \in T_e} \kappa C_e^{\text{ess}} Z_{e,i}^{\text{ess}} \end{aligned} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} C_{\text{ope}} = & C_e \sum_{i \in N_s} \sum_d (n_d \sum_h P_{i,d,h}^{\text{sub}}) + \\ & C_a \sum_{m \in N_a} \sum_d (n_d \sum_h F_{m,d,h}^{\text{gat}}) \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} f_2 = & W_c \eta_c \sum_{i \in N_s} \sum_d (n_d \sum_h P_{i,d,h}^{\text{sub}}) + \\ & W_{\text{gt}} \sum_{i \in N_g} \sum_d (n_d \sum_h P_{i,d,h}^{\text{gt}}) - \\ & W_{\text{p2g}} \sum_{i \in N_{pg}} \sum_d (n_d \sum_h P_{i,d,h}^{\text{p2g}}) \end{aligned} \quad (53)$$

$$\kappa = \frac{r}{1 - (1+r)^{-T}} \quad (54)$$

式中: $C_{f,n}^{\text{pip}}, C_{f,c}^{\text{pip}}$ 分别表示单位长度 f 类型天然气管道新建、扩建成本; $C_{c,n}^{\text{cod}}, C_{c,c}^{\text{cod}}$ 分别表示单位长度 c 类型馈线新建、扩建成本; $C_{a,n}^{\text{gat}}, C_{a,c}^{\text{gat}}$ 分别表示 a 类型配气站新建、扩建成本; $C_{s,n}^{\text{sub}}, C_{s,c}^{\text{sub}}$ 分别表示 s 类型变电站新建、扩建成本; $C_g^{\text{gt}}, C_p^{\text{p2g}}, C_v^{\text{pv}}, C_e^{\text{ess}}$ 分别表示 g 类型燃气机组、 p 类型电转气装置、 v 类型光伏电站、 e 类型储能装置建设成本; C_e, C_a 分别表示单位电价、单位气价; n_d 表示典型日 d 在一年中出现的时间; η_c 为变电站从外界电网获得的电能中传统煤炭发电所占的比例, 本文取 1; W_c, W_{gt} 分别表示传统煤炭发电、燃气机组发电生产单位电能时产生的 CO_2 气体质量; W_{p2g} 表示电转气装置产生单位天然气时消耗的 CO_2 气体质量; κ 表示设备的年投资成本折算系数; r 表示年利率; T 表示规划年限。

经济性成本 f_1 与碳排放量 f_2 由于单位、数量级上的差异无法直接相加, 为了协调两个目标函数, 本文首先进行模糊化处理将目标函数归一化, 分别表示出各个目标函数对各自解的满意度, 再通过加权满意度指标法求得最优的折中解, 最终的目标函数如下:

表 2 备选天然气管道参数
Tab. 2 Parameters of alternate piping

类型	$C_{f,c}^{pip}/$ (元·km ⁻¹)	$C_{f,n}^{pip}/$ (元·km ⁻¹)	$F_f^{max}/(m^3\cdot h^{-1})$
1	—	14.88	420
2	35.65×10^4	37.14×10^4	2 600

表 3 备选变电站参数
Tab. 3 Parameters of alternate transformer substation

类型	$C_{s,c}^{sub}/$ 元	$C_{s,n}^{sub}/$ 元	$S_s^{max}/(MV\cdot A)$
1	—	198.0×10^4	10
2	185.7×10^4	297.1×10^4	15
3	267.3×10^4	445.7×10^4	20

表 4 备选配气站参数
Tab. 4 Parameters of alternate gas distributing station

类型	$C_{a,c}^{gat}/$ 元	$C_{a,n}^{gat}/$ 元	$F_a^{max}/(m^3\cdot h^{-1})$
1	—	399.0×10^4	3 200
2	331.4×10^4	533.7×10^4	4 200
3	468.0×10^4	668.5×10^4	5 200

表 5 备选燃气机组参数
Tab. 5 Parameters of alternate gas generator

类型	ζ_g	η_g	$C_g^{gt}/(元\cdot MW^{-1})$	P_g^{max}/MW
1	0.35	0.34	40.24×10^4	1.08
2	0.40	0.34	83.46×10^4	2.62

表 6 备选电转气装置参数
Tab. 6 Parameters of alternate power to gas device

类型	ζ_p	$C_p^{p2g}/$ 元	P_p^{max}/MW
1	0.60	666.4×10^4	1
2	0.62	$1\,928.0\times10^4$	3

表 7 备选光伏电站参数
Tab. 7 Parameters of alternate PV

类型	P_p^{max}/MW	$C_p^{pv}/$ 元	N_p
1	10	$2\,704\times10^4$	2,4,11
2	15	$4\,056\times10^4$	2,4,11
3	20	$5\,406\times10^4$	2,4,11

据进行分类,型号越大,对应容量越大,即 2 型设备容量大于 1 型,3 型大于 2 型. 单位电价 C_e 、单位气价 C_a 分别取 0.5 元/(kW·h)、3.95 元/m³. 碳排放量系数^[14] W_e 、 W_{gt} 、 W_{p2g} 分别取 0.623 kg/(kW·h), 0.184 kg/(kW·h), 1.96 kg/m³. 电压上下限 V^{max} 、

V^{min} 分别取 1.05(p. u.)、0.95(p. u.). 规划年限 $T=10$ a, 年利率 $r=5\%$.

利用场景法表征电负荷、气负荷与光伏出力的不确定性特征^[15-16], 夏季典型日、冬季典型日及春秋过渡季典型日的数据如图 2~4 所示. 其中夏季、冬季、春秋过渡季典型日的权重分别取 0.25、0.25、0.50, 即夏季、冬季、春秋过渡季典型日在一年中出现的时间 n_d 分别取 91、91、183 d.

表 8 备选储能装置参数
Tab. 8 Parameters of alternate energy storage device

类型	$E_e^{max}/$ (MW·h)	$P_e^{max}/$ MW	$C_e^{ess}/$ 元	N_{es}	μ
1	5	1.75	883.2×10^4	2,4,11	0.95
2	7	2.45	$1\,236.0\times10^4$	2,4,11	0.95
3	10	3.5	$1\,766.0\times10^4$	2,4,11	0.95

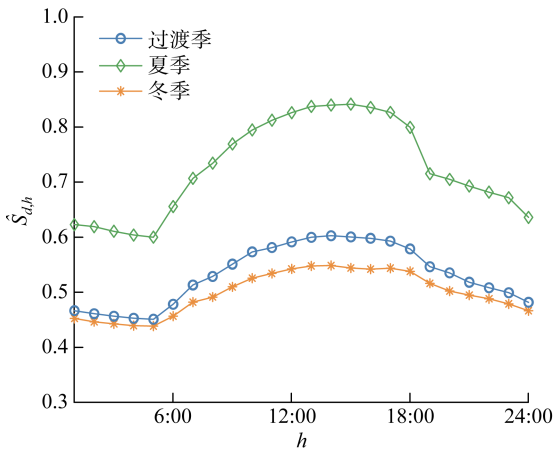


图 2 归一化电负荷变化

Fig. 2 Curves of normalized electrical load

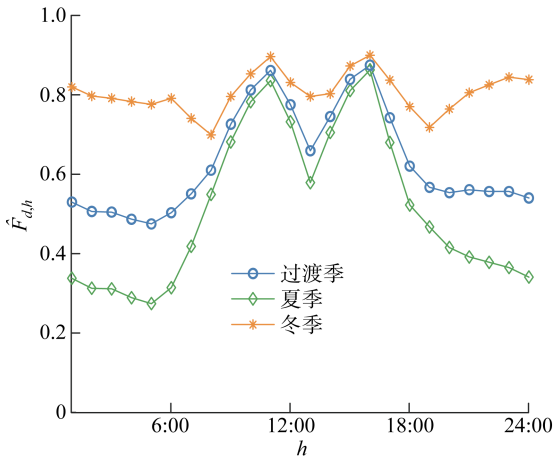


图 3 归一化气负荷变化

Fig. 3 Curves of normalized gas load

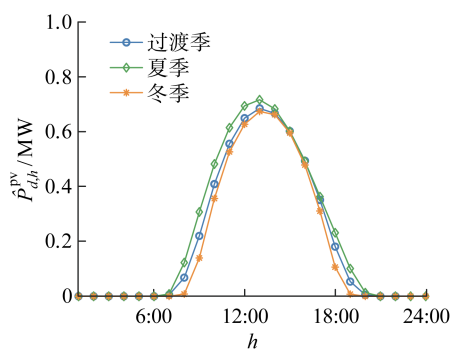


图 4 单位容量光伏出力变化

Fig. 4 Variation curves of photovoltaic output per unit capacity

表 9 各方案设备选型比较

Tab. 9 Equipment selection of each case

设备名称	位置	设备类型		
		算例 1	算例 2	算例 3
光伏电站	2、4、11	n3、n1、n3	n1、n1、n2	n3、n3、n3
储能装置	2、4、11	n3、n3、n3	0、0、0	n3、n3、n3
燃气机组	6、18	n2、n2	n1、n1	n2、n2
电转气	6、18	0、0	0、0	n2、n2
变电站	22、23	c2、e1	c2、e1	c3、c3
配气站	26	c2	c2	c3

对比算例 1 与算例 2 规划结果,可以发现算例 1 中新建了两处 3 型光伏电站与 1 处 1 型光伏电站,大于算例 2 中光伏电站的建设容量.这是由于算例 1 兼顾系统碳排放量,所以倾向于建设更多的光伏电站增加系统清洁能源渗透率.与此相应,算例 1 中建设了 3 处 3 型储能装置,在光伏发电过剩时吸收多余电能,在光伏出力较少时发出电能,以此来平抑光伏出力的波动性,提高光伏的电能利用率,而光伏电站容量较小的算例 2 中没有建设储能装置.

另外,算例 1 在节点 6、18 两处分别规划了 2 型燃气机组,而算例 2 仅规划了 1 型燃气机组.这是由于在电-气网络运行过程中,燃气机组有两方面的作用:一是在电网电能不足、气网天然气过盛时将天然气转换为电能,提高电-气网络内设备利用率,降低系统整体的经济性成本;二是替代传统化石能源发电,降低系统的碳排放量.算例 2 仅考虑到燃气机组在降低系统经济性成本上的作用,未考虑到其在降低碳排放量方面产生的效益,因此规划结果中燃气机组容量较算例 1 较小.

各算例中配电网、天然气网线路扩展规划结果如图 5 所示.不同算例中线路扩展规划结果呈现出较大的差异性,这是不同权重系数下综合能源设备

为验证模型有效性,设置如下对照算例:

算例 1,兼顾系统经济成本与碳排放量,权重系数取 $\omega_1=0.5,\omega_2=0.5$.

算例 2,只考虑系统经济性成本,权重系数取 $\omega_1=1,\omega_2=0$.

算例 3,只考虑系统碳排放量,权重系数取 $\omega_1=0,\omega_2=1$.

3.2 结果分析

各算例中综合能源设备选址定型结果如表 9 所示,表中 e、c、n 分别代表原有设备、扩建设备与新建设备,如 e1 代表原有 1 型设备.

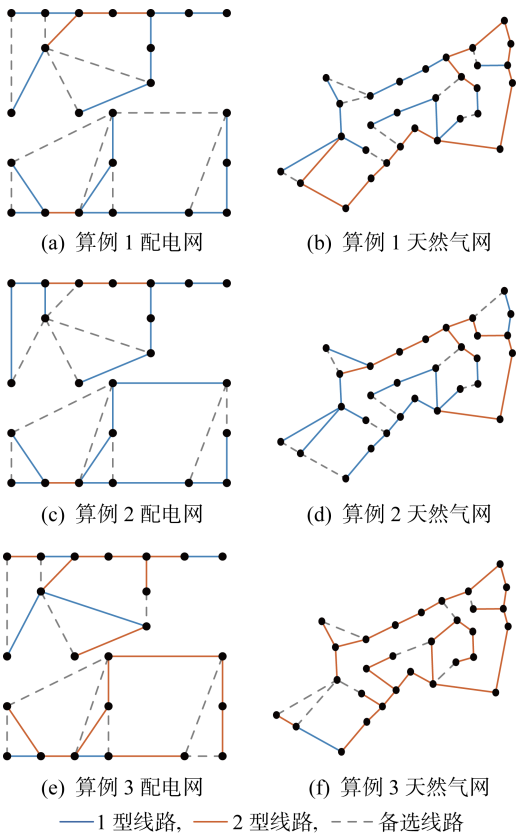


图 5 各算例线路扩展规划结果

Fig. 5 Expansion planning results of cases

建设容量的差异导致的.在配电网与天然气网中,各综合能源设备扮演着分布式源、荷的角色,其容量的不同导致网络中源、荷分布的差异.这种差异会影响网络最优潮流分布,进而使线路扩展规划呈现不同结果.

各算例规划方案的经济性成本及碳排放量如表 10 所示.算例 1 所获得的规划方案年投资、运行产生的总经济成本为 1.678×10^8 元,较之仅考虑经济成本的算例 2 增加了 1.520×10^7 元;而算例 1 中系统年碳排放量为 4.378×10^7 kg,较之算例 2 减少了 2.403×10^7 kg.简而言之,算例 1 中规划方案以每年增加 1.521×10^9 元成本为代价,减少了 CO₂ 气体的排放 2.403×10^7 kg.

表 10 各方案成本比较

Tab. 10 Cost of each case

算例	投资成本/元	运行成本/元	总经济成本/元	碳排放量/kg
算例 1	3.422×10^7	1.336×10^8	1.678×10^8	4.378×10^7
算例 2	1.854×10^7	1.341×10^8	1.526×10^8	6.781×10^7
算例 3	4.724×10^7	1.395×10^8	1.867×10^8	3.517×10^7

对比算例 1 与算例 3 规划结果,可以发现仅考虑碳排放量的算例 3 的规划方案中所有设备均进行了最大容量的建设.算例 3 所获得的规划方案相较于算例 1 每年增加了 1.890×10^7 元的成本,减少了 8.610×10^6 kg CO₂ 气体的排放.

通过以上分析可以看出,电-气系统线路与各种综合能源设备在规划运行过程中相互耦合、相互影响,在规划过程中对线路及多种设备进行统一、合理的规划才能获得最优的规划结果.本文所提出的模型可以在不同的目标函数权重选择下,综合考虑系统经济性与碳排放量,实现对电-气网络线路以及变电站、配气站、光伏电站、储能装置、燃气机组、电转气装置的统筹配置.

4 结语

合理的规划方案是提高电-气综合能源系统经济性、降低系统整体碳排放量的基础.提出一种综合考虑经济性成本与碳排放量的电-气综合能源系统多目标随机优化规划模型,实现对电网馈线、气网管道以及变压器、配气站、燃气轮机、电转气装置、光伏及储能装置等多种类型综合能源设备的统筹规划.算例结果表明:① 通过经济性成本与碳排放量二者权重系数的选择可以获得不同规划要求下的电-气综合能源系统规划方案;② 规划模型可以统筹考虑电-气网络线路与多类型综合能源设备的耦合关系,

获得待规划系统的最优规划方案.但是,本文对气网的建模不够精确,且没有考虑热网模型,因此考虑更精细的气网模型并将热网引入规划模型将是下一步的工作方向.

参考文献:

[1] 奚剑明,吴瀚然.供给侧改革中资源与能源行业去产能政策效果研究[J]. 工业技术经济, 2021, 40(1): 113-119.
XI Jianming, WU Hanran. Research on the Effect of supply side reform and the de-capacity policy in resource and energy industry[J]. Journal of Industrial Technological Economics, 2021, 40(1): 113-119.

[2] UNSIHUAY C, MARANGON-LIMA J W, SOUZA A C Z D. Integrated power generation and natural gas expansion planning[C]// Hans-Björn Püttgen. 2007 IEEE Lausanne Power Tech. New York, USA: IEEE, 2007: 1-6.

[3] 魏震波,郭毅,魏平桢,等.考虑传输线重构的电气综合能源系统分布鲁棒扩展规划模型[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 16-23.
WEI Zhenbo, GUO Yi, WEI Ping'an, et al. Distribution robust expansion planning model for integrated natural gas and electric power systems considering transmission switching[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 16-23.

[4] 薛友,李杨,高滢,等.计及风电出力随机特性的电气综合能源系统随机优化[J]. 电力建设, 2018, 39(12): 2-12.
XUE You, LI Yang, GAO Ying, et al. Stochastic optimization in integrated electricity-gas energy systems considering stochastic characteristics of wind power outputs [J]. Electric Power Construction, 2018, 39(12): 2-12.

[5] 王芃,刘伟佳,林振智,等.基于场景分析的风电场与电转气厂站协同选址规划[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(6): 20-29.
WANG Peng, LIU Weijia, LIN Zhenzhi, et al. Scenario analysis based collaborative site selection planning of wind farms and power-to-gas plants[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(6): 20-29.

[6] 李哲,王成福,梁军,等.计及风电不确定性的电气-热综合能源系统扩展规划方法[J]. 电网技术, 2018, 42(11): 3477-3487.
LI Zhe, WANG Chengfu, LIANG Jun, et al. Expansion planning method of integrated energy system considering uncertainty of wind power[J]. Power System Technology, 2018, 42(11): 3477-3487.

[7] GAO Y, WEN F S, WANG K, *et al.* Optimal collaborative planning with demand side management in integrated gas-electricity energy systems[C] // **2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting**. New York, USA: IEEE, 2018: 1-5.

[8] JING Q, DONG Z Y, ZHAO J H, *et al.* Low carbon oriented expansion planning of integrated gas and power systems[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2015, 30(2): 1035-1046.

[9] 李捷, 余涛, 潘振宁. 基于强化学习的增量配电网实时随机调度方法[J]. **电网技术**, 2020, 44(9): 3321-3332.

LI Jie, YU Tao, PAN Zhenning, *et al.* Real-time stochastic dispatch method for incremental distribution network based on reinforcement learning [J]. **Power System Technology**, 2020, 44(9): 3321-3332.

[10] BARAN M, WU F. Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system [J]. **IEEE Transactions on Power Delivery**, 1989, 4(1): 735-743.

[11] ZHOU X Z, GUO C X, WANG Y F, *et al.* Optimal expansion co-planning of reconfigurable electricity and natural gas distribution systems incorporating energy hubs[J]. **Energies**, 2017, 10(1): 124.

[12] ZHANG X P, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, *et al.* Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures[J]. **IEEE Transactions on Smart Grid**, 2017, 6(5): 2302-2311.

[13] SALDARRIAGA C A, HINCAPIE R A, SALAZAR H, *et al.* A holistic approach for planning natural gas and electricity distribution networks[J]. **IEEE Transactions on Power Systems**, 2013, 28(4): 4052-4063.

[14] 栗然, 申雪, 钟超, 等. 考虑环境效益的分布式电源多目标规划 [J]. **电网技术**, 2014, 38(6): 1471-1478.

LI Ran, SHEN Xue, ZHONG Chao, *et al.* Multi-objective planning of distributed generation considering environmental benefit[J]. **Power System Technology**, 2014, 38(6): 1471-1478.

[15] 胡源, 薛松, 杨素, 等. 综合能源背景下的配电网多场景规划[J]. **中国电力**, 2021, 54(4): 175-184.

HU Yuan, XUE Song, YANG Su, *et al.* Multi-scenario planning of distribution network under integrated energy background[J]. **Electric Power**, 2021, 54(4): 175-184.

[16] SAROJ, KAVITA. Review: Study on simple k mean and modified K mean clustering technique[J]. **International Journal of Computer Science Engineering and Technology**, 2016, 6(7): 279-281.

(本文编辑:王一凡)