基于混合整数二阶锥的配电-气网联合规划

周贤正¹,郭创新¹,陈 玮¹,李晏君¹,张章煌¹,赵达维²,张文涛²,刘旭娜² (1. 浙江大学 电气工程学院,浙江 杭州 310027; 2. 国网四川省电力公司经济技术研究院,四川 成都 610041)

摘要:提出了一种考虑配电网重构及小时级潮流变化的配电-气网(EGDN)联合规划模型。一方面,融入配电 网重构来优化系统的运行状态,两网协同规划能发挥不同能源间的互补共济作用,提升系统的可靠性和运行 效率;另一方面,所提模型考虑小时级配电网和配气网的潮流方程,以精细化描述系统的运行状态。为了求 解该非线性非凸模型,适当松弛原问题,将其转换为可直接求解的混合整数二阶锥规划(MISOCP)问题。仿 真结果表明所提规划模型显著提升了系统的可靠性,降低了相关设备的配置容量,减少了能量传输损耗,降 低了总体规划与运行费用,证明了 MISOCP 模型与简单的混合整数线性规划模型相比,更能获得满足实际工 程需求的规划方案。

关键词:配电-气网;配电网重构;综合能源系统;配电网;配气网;混合整数二阶锥规划;联合规划;模型 中图分类号:TM 761 文献标志码:A DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2019.06.001

0 引言

为了构建安全、高效的能源体系,国家能源局颁 发的《2018年能源工作指导意见》中明确指出;加快 配气管网建设,推进配电网建设改造,加强能源系统 整体优化,提升系统协调性和整体效率。如何利用 电网与气网之间的有机耦合,充分挖掘能源系统的 潜力,协调优化各能源环节,成为近年来国内外研究 的热点问题^[1]。配电-气网 EGDN(Electricity-Gas Distribution Network)处于能源互联网的能量传输末 梢,同时也是能量损耗最大的环节,对其进行合理的统 筹规划能够显著提升供能的可靠性与经济性^[2]。

目前,已经有一些针对主网电-气综合能源系统 联合规划的研究。Mohammad Shahidehpour 等学者 较早地讨论了天然气设施对电力系统的影响^[3]。文 献[4]使用混合整数线性规划建立了长期多区域多 阶段的电网与气网的联合规划模型,可得到能量源 和输送通道的投建位置、容量以及时间。近年来,学 者们主要开展了关于主网层面的电-气网联合规划 研究。文献[5]针对大规模系统的发电、输电以及 天然气网络的拓展问题,提出了一种多阶段联合规 划方法;文献[6]考虑在电网和气网市场环境下,提 出一种多阶段弹性的联合扩展规划方法,并用场景 缩减技术解决模拟系统运行不确定性过程带来的大 计算量问题,可得到在何时、何地投建何种类型的气

收稿日期:2018-11-22;修回日期:2019-04-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0902600);国家 自然科学基金资助项目(51877190);国家电网公司科技项 目(SGSCJY00JHJS1800019)

Project supported by the National Key R&D Program of China (2017YFB0902600), the National Natural Science Foundation of China(51877190) and the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China(SGSCJY00JHJS1800019)

站、气网管道以及输电线路;文献[7]通过一阶泰勒 展开式线性化天然气网络方程,并提出一种线性联 合拓展规划,以最小化电网与气网的成本;文献[8] 提出了一种电网与气网联合规划的模型,并对气网 进行了精细化的建模;文献[9]考虑市场的不确定 性和系统的可靠性,并使用模糊粒子群优化算法求 解混合整数非线性规划模型;文献[10]建立了基于 混合整数线性规划且考虑 N-1 安全约束的输电网 和输气网的联合规划模型,并且提出了一种可降低 变量数量的扩展约化析取模型 RDM (Reduced Disjunctive Model),通过算例证明了该模型可缩小搜索 空间,大幅提升了计算性能;文献[11] 对输电网与 输气网的潮流相关方程均进行了二次化松弛,在考 虑内部市场负荷价格的情况下,建立了混合整数二 次锥规划模型,以联合优化规划2种网络。但以上 文献的应用场景均为主网规划。在配网规划层面, 相关研究已取得了初步的进展。文献[12]通过气 转电装置实现配电网和配气网的耦合,通过与传统 的2种网络分开规划的案例进行对比,说明联合规 划能显著降低成本;在此基础上,文献[13]进一步 考虑了供能可靠性、负荷不确定性以及多目标优化 等,但是其建模过于复杂,大量的非线性项使得模型 只能采用智能算法进行求解,不能保证寻找到最 优解。

配电网重构作为一种主动管理方法,是主动配 电网的常备功能,能灵活控制潮流,并显著提升配电 网的智能化水平^[14]。文献[15]在配电网电压控制 模型中考虑重构,使用二阶锥松弛潮流约束,建立了 主动电压控制的双层优化模型。文献[16]考虑了 新能源与电动汽车接入情况下的配电网重构策略, 以网损最小作为目标,并利用一种改进的智能算法 进行求解。但是以上文献均未在规划中考虑重构问 题。因此,为了充分挖掘 EGDN 的潜力,有必要在规 划时考虑配电网重构。

如何精确评估综合能源系统的运行情况,并快 速求解其联合规划问题是当前的研究难点。本文从 配网层面将配电网和配气网的潮流相关方程进行适 度松弛,得到混合整数二阶锥优化模型;然后,引入 小时级别的配电网重构,以降低网损、提升系统可靠 性、改善供能质量。测试网络采用 24 节点配电网系 统^[17]和改造的 30 节点配气网系统^[12],并通过 3 个 能量集线器进行耦合,算例验证了所提模型的正确 性和有效性。

1 EGDN 联合规划数学模型

1.1 模型描述

本文采用能量集线器作为描述 EGDN 的耦合单 元——能量集线器数学模型,进而构建考虑 EGDN 中含配电网重构的配电网络、配气网络以及能量集 线器相关约束的小时级优化规划模型。本文中的 EGDN 主要由配电网、配气网以及能量集线器这 3 个部分构成。其中,能量集线器模型需要确定设备 的安装年份、型号以及是新装还是扩容;配电网模 型、配气网模型需要根据小时级的网络运行情况,模 拟能量运行的实时潮流,确定能量源和输能通道的 安装年份、型号以及是新装还是扩容。EGDN 位于 能源供给的末端,考虑到经济性以及后续管理的便 利性,配电网和配气网均采用辐射状网架结构。

EGDN 联合规划模型的相关变量如表 1 所示。 配电网和配气网的部分节点通过能量集线器相耦 合。表 1 中,上标 E、G 分别表示配电网与配气网; 上标 S、L 分别表示能量源和能量配送通道;下标 C 表示备选设备;下标 E 表示设备已存在;下标 t 表示 备选设备的类型;上标 h、s、y 分别表示小时、季度、 年份;P、Q 分别为有功和无功功率;L 为负荷; Π 为 气压的平方;z 为方向辅助变量;w 为配电网联络线 的开关状态;ij 表示连接节点 i 和节点 j 的能量配送 通道;决策变量 $X_{C,u}^{ES,y}$ 、 $X_{C,u}^{C,y}$ 、 X_{C,u

表 1	EGDN	联合规划模型	的相关变量
-----	------	--------	-------

Table 1 Related variables of joint planning model of EGDN

Table 1 1	iciated variables of	onit planning model of LODIT
构成部分	决策变量	中间变量
配电网	$X_{\mathrm{C},it}^{\mathrm{ES},y}, X_{\mathrm{C},ijt}^{\mathrm{EL},y}, X_{\mathrm{E},ij}^{\mathrm{EL},y}$	$ \begin{array}{c} P_{ij}^{\text{E},hsy} , Q_{ij}^{\text{E},hsy} , P_{i}^{\text{ES},hsy} , \\ Q_{i}^{\text{ES},hsy} , z_{ij}^{\text{E},hsy} , P_{i}^{\text{EC},hsy} , \\ & w_{ijy}^{hy} , (V_{i}^{hsy})^{2} \end{array} $
配气网	$X_{\mathrm{C},ii}^{\mathrm{GS},y}, X_{\mathrm{C},iji}^{\mathrm{GL},y}, X_{\mathrm{E},ij}^{\mathrm{GL},y}$	$P^{\mathrm{C},hsy}_{ij},P^{\mathrm{CS},hsy}_i,\ P^{\mathrm{GC},hsy}_i,\ T^{hsy}_i,z^{\mathrm{C},y}_{ij}$
能量集线器	$X_{\mathrm{C},u}^{\mathrm{CHP},y}, X_{\mathrm{C},u}^{\mathrm{B},y}$	$P_i^{\text{E},hsy}, P_i^{\text{G},hsy}, P_i^{\text{HLC},hsy}, L_i^{\text{E},hsy}, L_i^{\text{EQ},hsy}, L_i^{\text{G},hsy}, L_i^{\text{H},hsy}$

初始年已存在的电力线路、配气网管道(*i*,*j*)在第 y 年是否存在,当决策变量取值为1时表示该设备存 在,取值为0时表示该设备不存在。

配电网中, $P_{ii}^{E,hsy}$ 、 $Q_{ii}^{E,hsy}$ 分别为第 y 年、第 s 季度、 第h小时电力线路(i, j)的有功功率和无功功率; $P_i^{\text{ES},hsy}$ 、 $Q_i^{\text{ES},hsy}$ 分别为第 y 年、第 s 季度、第 h 小时节 点 i 变电站的总有功功率输出、总无功功率输出; $P_i^{\text{ELC},hsy}$ 为第 γ 年、第s季度、第h小时节点i的电负 荷削减量;辅助变量 w^{hsy}表示电力线路(i,j)是否处 于闭合状态,若闭合则取值为1,若断开则取值为0; 方向辅助变量 $z_{ii}^{\mathbb{E},hsy}$ 表示第y年、第s季度、第h小时 配电线路(i,j)从节点 i 到节点 j 的潮流方向,此方 向有潮流时取值为1,没有潮流时取值为0;(V^{hy})² 为第 γ 年、第s季度、第h小时节点i电压的平方。 配气网中, $P_{ii}^{G,hsy}$ 为配气网管道(*i*,*j*)的配送能量; $P_i^{GS,hsy}$ 为第 y 年、第 s 季度、第 h 小时配气站的总配 送气量; $P_i^{GLC,hsy}$ 为第y年、第s季度、第h小时节点i的气负荷削减量; Π_i^{hsy} 为第y年、第s季度、第h小时 节点 i 气压的平方;方向辅助变量 z_i^{C,y}表示第 y 年配 气管道(i,j)从节点 i 到节点 j 的气流方向,此方向 有气流时取值为1.没有气流时取值为0。能量集线 器中, $P_i^{E,hsy}$ 、 $P_i^{G,hsy}$ 分别为第 γ 年、第 s 季度、第 h 小 时输入能量枢纽 i 的有功功率和气量; $P_i^{\text{HLC},hsy}$ 为第 γ 年、第 s 季度、第 h 小时节点 i 的热负荷削减量; $L_i^{E,hsy}$ 、 $L_i^{EQ,hsy}$ 、 $L_i^{G,hsy}$ 、 $L_i^{H,hsy}$ 分别为第 γ 年、第 s 季度、第 h 小时 节点 i 的有功电负荷、无功电负荷、气负荷、热负荷。

1.2 能量集线器数学模型

在 EGDN 中,能量集线器通过转换矩阵联系能 源需求端与配送端。从系统的角度来看,能量集线 器为多输入多输出的多能源载体,可视为一个终端 网络节点。图1为能量集线器待规划的架构,输入 端接收来自配电网、配气网的能量,输出端为负荷供 给电能和热能,其内部包括变压器、热电联产装置 (CHP)、燃气锅炉这3种能量转换装置。其中变压 器、燃气锅炉为初始年已经存在的设备,随着负荷的 增长,设备需要新建或扩容。



图1 能量集线器示意图

Fig.1 Schematic diagram of energy hub 能量集线器的矩阵表达式如式(1)所示。

$$\begin{bmatrix} L^{\rm E} \\ L^{\rm H} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \eta^{\rm TF} & \eta^{\rm CGE} v \\ 0 & \eta^{\rm CGH} v + \eta^{\rm B} (1 - v) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} P^{\rm E} \\ P^{\rm G} \end{bmatrix}$$
(1)

其中,η^{TF}为变压器的转换效率;η^{CCE}、η^{CCH}分别为热 电联产装置将天然气转变为电能和热能的转换效 率;η^B为燃气锅炉将天然气转变为热能的转换效 率;v为将来自配气网的天然气分配给热电联产装 置的比例。

2 EGDN 联合规划模型

2.1 目标函数

本文选取 EGDN 的总成本最小作为目标函数, 如式(2)所示。

$$\min F = C_{\rm INV} + C_{\rm MNT} + C_{\rm OPR} + C_{\rm INT}$$
(2)

为了便于说明,定义对于任意给定的 $t \in \Omega_{C}^{type}$ 有:

$$x_{C,t}^{y} = \begin{cases} X_{C,t}^{y} - X_{C,t}^{y-1} & y \in \{2, 3, \cdots, T\} \\ X_{C,t}^{y} & y = 1 \end{cases}$$
(3)

其中, $x_{c,t}^{v}$ 表示设备 t 在第 y 年是否安装,取值为 0 时 表示在第 y 年不安装设备 t,反之则表示在第 y 年安 装该设备; Ω_{c}^{vpe} 为所有候选设备的可选型号集合; $X_{c,t}^{v}$ 表示备选设备 t 在第 y 年是否存在,取值为 1 表 示存在,取值为 0 表示不存在;T 为总规划年限。

a. 新建成本。

$$C_{\rm INV} = \sum_{y} \sum_{t \in \Omega_{\rm C}^{\rm type}} D_{y} C_{t}^{\rm INV} x_{{\rm C},t}^{y} - \sum_{y} \sum_{t \in \Omega_{\rm E}} D_{y} \psi_{t} C_{t}^{\rm INV} x_{{\rm C},t}^{y} \quad (4)$$

其中, $\Omega_{\rm E}$ 为所有初始年已含有设备的集合; $D_{\rm y} = 1/(1+d)^{\rm y-1}$ 为净现值系数, d 为贴现率; ψ_t 为设备 t 的回收因子, 其值越大, 说明设备 t 的残值越高, 意味着越低的损耗; $C_t^{\rm INV}$ 为设备 t 的新建成本。

b. 维护成本。

$$C_{\text{MNT}} = \sum_{y} \sum_{t \in \Omega_{C}^{\text{hype}}} D_{y} C_{t}^{\text{MNT}} X_{C,t}^{y} + \sum_{y} \sum_{t \in \Omega_{E}} D_{y} C_{t}^{\text{MNT}} (1 - X_{C,t}^{y})$$
(5)

其中, C_t^{MNT} 为设备 t 的维护成本。

c. 运行成本。

运行成本包括配电网的线路损耗成本和能量集 线器的能量损耗成本,表达式为:

$$C_{\text{OPR}} = \sum_{y} \sum_{s} \sum_{h} D_{y} \left\{ C_{\text{LOSS}}^{\text{E}} \left[\sum_{m \in \mathcal{O}_{\text{BUS}}^{\text{ESUB}}, j: (m, j) \in \mathcal{O}^{\text{EL}}} P_{mj}^{\text{E}, hsy} - \sum_{i \in \mathcal{O}_{\text{BUS}}^{\text{E}}} (L_{i}^{\text{E}, hsy} - P_{i}^{\text{ELC}, hsy} + P_{i}^{\text{E}, hsy}) \right] + C_{\text{LOSS}}^{\text{EH}} \sum_{i \in \mathcal{O}^{\text{EH}}} (1 - \eta_{i}) P_{i}^{hsy} \right\}$$
(6)

其中, $C_{\text{LOSS}}^{\text{E}}$ 为配电网的单位损耗成本; $\sum_{i \in \Omega_{\text{BUS}}^{\text{E}}} (L_i^{\text{E},hsy} - P_i^{\text{ELC},hsy})$ 为第 y 年、第 s 季度、第 h 小时所有电负荷有 功功率之和; $\sum_{i \in \Omega_{\text{BUS}}^{\text{E}}} P_i^{\text{E},hsy}$ 为第 y 年、第 s 季度、第 h 小 时所有输入能量集线器的有功功率之和, Ω_{BUS}^{E} 为所 有电力节点的集合; $\sum_{m \in \Omega_{BUS}^{ESUB},j:(m,j) \in \Omega^{EL}} P_{mj}^{E,hsy}$ 为在第 y

年、第 *s* 季度、第 *h* 小时所有变电站输出的有功功率 之和, $\Omega_{\text{BUS}}^{\text{ESUB}}$ 为所有配电网变电站的节点集合, Ω^{EL} 为 所有电力线路集合, *j*: (*m*, *j*) $\in \Omega^{\text{EL}}$ 表示节点 *j* 与节点 *m* 相连, 且线路(*m*, *j*) 在集合 Ω^{EL} 内; Ω^{EH} 为能量集线 器内所有设备的集合; η_i 为能量集线器中设备 *i*(包 括变压器、热电联产装置和燃气锅炉)的转换效率, 包括变压器的转换效率 η^{TF} 、热电联产装置的转换效 率 η^{CCE} 和 η^{CCH} 以及燃气锅炉的转换效率 η^{B} ; $C_{\text{LOSS}}^{\text{EH}}$ 为 能量集线器中设备的单位能量损失成本; P_i^{hy} 为输 入能量集线器的设备 *i* 的功率,包括输入变压器的 有功功率 $P_i^{\text{E},hy}$ 、输入热电联产装置的气量 $vP_i^{\text{C},hy}$ 和 输入燃气锅炉的气量(1-*v*) $P_i^{\text{C},hy}$ 。

从系统角度来看,购电-气量为负荷需求与切负 荷量和各种损耗之差,购电-气量与其直接相关,但 切负荷量已体现在中断成本中,各种损耗已考虑在 运行成本中;而且购电-气成本与中断成本和各种损 耗成本相比,可能会有数量级的差别,不便体现中断 成本和各种损耗成本对规划结果的影响,亦不利于 后续求解寻优。故本文在运行成本的定义中没有包 括配电网的购电成本和配气网的购气成本。另外, 本文亦不考虑配气网的技术损失(如漏气等)^[12]。

d. 中断成本。

$$C_{\text{INT}} = \sum_{y} \sum_{s} \sum_{h} D_{y} \left(\sum_{i \in \mathcal{Q}_{\text{BUS}}^{\text{E}} \setminus \mathcal{Q}_{\text{BUS}}^{\text{ESUB}}} C_{\text{VOLL}}^{\text{E}} P_{i}^{\text{ELC}, hsy} + \sum_{i \in \mathcal{Q}_{\text{BUS}}^{\text{EH}}} C_{\text{VOLL}}^{\text{H}} P_{i}^{\text{HLC}, hsy} + \sum_{i \in \mathcal{Q}_{\text{BUS}}^{\text{E}} \setminus (\mathcal{Q}_{\text{BUS}}^{\text{CGATE}} \cup \mathcal{Q}_{\text{BUS}}^{\text{CEH}})} C_{\text{VOLL}}^{\text{G}} P_{i}^{\text{CLC}, hsy} \right)$$

$$(77)$$

其中, C_{VOLL}^{E} 、 C_{VOLL}^{H} 、 C_{VOLL}^{C} 分别为电负荷、热负荷、气负荷的单位中断成本; Ω_{BUS}^{C} 为所有气网节点的集合; Ω_{BUS}^{CCH} 为配气网中所有包含能量集线器的节点集合; Ω_{BUS}^{CCATE} 为所有配气网配气站节点集合;符号\表示不包含;符号U表示两集合取并集。

2.2 状态变量约束

针对 $\forall i \in \Omega_{c}, \forall y \in \{2, 3, \dots, T\}, \forall t \in \Omega_{type},$ 设备的安装状态变量应满足如下逻辑关系:

$$X_{\mathrm{C},ii}^{y-1} \leqslant X_{\mathrm{C},ii}^{y} \tag{8}$$

$$\sum_{c,0} X_{C,ii}^{y} + X_{E,i}^{y} = 1$$
 (9)

$$X_{\mathrm{F}\,i}^{y} \leqslant X_{\mathrm{F}\,i}^{y-1} \tag{10}$$

其中, Ω_{c} 为所有候选设备的集合; Ω_{type} 为该设备所 有类型的集合; $X_{c,i}^{y}$ 表示第 t 类备选设备 i 在第 y 年 是否存在; $X_{F_{i}}^{y}$ 表示已有设备 i 在第 y 年是否存在。

式(8)表示所有候选设备一旦安装,则该设备

不再拆除。式(9)表示对于初始年不存在的设备, 其所有候选类型在规划年内只能安装一种;对于已 存在设备,无论规划年内是否扩容,该设备必然存 在。式(10)表示若扩容已存在设备,则其在之后年 份的状态将变为0。

2.3 能量集线器约束

a. 能量集线器热电功率平衡约束。

针对 $\forall i \in \Omega_{BUS}^{EH}$ 、 $\forall h$ 、 $\forall s$ 、 $\forall y$,存在如下约束:

$$L_{i}^{\text{E},hsy} - P_{i}^{\text{ELC},hsy} = \eta_{i}^{\text{TF}} P_{i}^{\text{E},hsy} + \sum_{\iota \in \Omega_{\text{type}}^{\text{CHP}}} \eta_{i}^{\text{CGE}} v X_{\text{C},i\iota}^{\text{CHP},y} P_{i}^{\text{G},hsy}$$
(11)

考虑到在初始年能量集线器中已经包含燃气锅 炉,而且根据式(9),在规划年内该能量集线器内必 然一直含有燃气锅炉。故本文将能量集线器中的燃 气锅炉分为初始年已经存在和其他年份待建这 2 类,可得式(12)和式(13)。

针对∀*i*∈Ω^{EHE}_{BUS}、∀*h*、∀*s*、∀*y*,存在如下约束:

$$L_i^{\text{H},hsy} - P_i^{\text{HLC},hsy} = \eta_i^{\text{B}} P_i^{\text{G},hsy} + \sum_{\iota \in \Omega_{\text{CHP}}^{\text{CHP}}} (\eta_i^{\text{CGH}} - \eta_i^{\text{B}}) v X_{\text{C},i\iota}^{\text{CHP},\gamma} P_i^{\text{G},hsy}$$
 (12)

其中, $\Omega_{\text{BUS}}^{\text{EHE}}$ 为所有初始年已经存在能量集线器的节 点集合。

针对 $\forall i \in \Omega_{BUS}^{EH} \setminus \Omega_{BUS}^{EHE}$ 、 $\forall h$ 、 $\forall s$ 、 $\forall y$,存在如下 约束:

$$L_{i}^{\mathrm{H,hsy}} - P_{i}^{\mathrm{HLC,hsy}} = \sum_{\iota \in \Omega_{\mathrm{type}}^{\mathrm{B}}} \eta_{i}^{\mathrm{B}} X_{\mathrm{C},i\iota}^{\mathrm{B},y} P_{i}^{\mathrm{C},hsy} + \left(\eta_{i}^{\mathrm{CGH}} - \sum_{\iota \in \Omega_{\mathrm{type}}^{\mathrm{B}}} \eta_{i}^{\mathrm{B}} X_{\mathrm{C},i\iota}^{\mathrm{B},y}\right) v \left(\sum_{\iota \in \Omega_{\mathrm{type}}^{\mathrm{CHP},y}} X_{\mathrm{C},i\iota}^{\mathrm{CHP},y}\right) P_{i}^{\mathrm{G},hsy} \quad (13)$$

其中, $\Omega^{\rm B}_{\rm type}$ 为燃气锅炉的所有备选类型。

因热电联产装置和燃气锅炉在该年的能量集线器中不一定存在,故式(11)—(13)中需含有状态变量 $X_{C,u}^{CHP,y}, X_{C,u}^{B,y}$ 。

b. 能量集线器内设备容量约束。

针对 $\forall i \in \Omega_{BUS}^{EH}$ 、 $\forall h$ 、 $\forall s$ 、 $\forall y$,热电联产装置及 燃气锅炉的容量限制应分别满足:

$$0 \leq (\eta_i^{\text{CGE}} + \eta_i^{\text{CGH}}) v P_i^{\text{G}, hsy} \leq \sum_{\iota \in \Omega_{\text{trup}}^{\text{CHP}}} P_{\text{C}, i\iota}^{\text{CHP} \text{max}} X_{\text{C}, i\iota}^{\text{CHP}, y} \quad (14)$$

$$0 \leq \eta_{i}^{\mathrm{B}} P_{i}^{\mathrm{G},hsy} \left(1 - v \sum_{\iota \in \Omega_{\mathrm{type}}^{\mathrm{CHP}}} X_{\mathrm{C},i\iota}^{\mathrm{CHP},y} \right) \leq \sum_{\iota \in \Omega_{\mathrm{type}}^{\mathrm{B}}} P_{\mathrm{C},i\iota}^{\mathrm{Bmax}} X_{\mathrm{C},i\iota}^{\mathrm{B},y} + P_{\mathrm{E},i}^{\mathrm{Bmax}} \left(1 - \sum_{\iota \in \Omega_{\mathrm{type}}^{\mathrm{B}}} X_{\mathrm{C},i\iota}^{\mathrm{B},y} \right)$$
(15)

其中, $(\eta_i^{CGE} + \eta_i^{CGH}) v P_i^{G,hsy}, \eta_i^B P_i^{G,hsy} \left(1 - v \sum_{\iota \in \mathcal{D}_{Spe}^{GHP}} X_{G,ii}^{CHP, y} \right)$ 分别为热电联产装置、燃气锅炉的运行输出功率, 此 处为了降低求解算法的难度,未设置新的变量; $P_{C,i}^{CHPmax}$ 、 $P_{C,i}^{Bmax}$ 分別为第i个能量集线器中第t种备选 类型的热电联产装置、燃气锅炉的最大容量; $P_{E,i}^{Bmax}$ 为 第i个能量集线器中已存在燃气锅炉的最大容量。 为了简化模型,本文将分配比例v设置为常数,假定 取值为 0.5^[18]。

2.4 配电网与配气网建模

2.4.1 配电网模型

a. 配电网的潮流方程。

图 2 为配电网线路相关变量示意图,变量方向如图中箭头所示。图中, $L_{aux,i}^{E,hsy}$ 为节点 i 的有功负荷 $L_i^{E,hsy}$ 、有功负荷削减量 $P_i^{ELC,hsy}$ 以及输入能量集线器的有功功率 $P_i^{E,hsy}$ 之和; $L_{aux,i}^{EQ,hsy}$ 为节点 i 的无功负荷 $L_i^{EQ,hsy}$ 和无功负荷削减量 $Q_i^{ELC,hsy}$ 之和。由图 2 可 知,配电网的潮流方程包括节点功率平衡方程和电 力线路电压降落方程^[19-20]式(16)—(18)。



图 2 配电网线路相关变量示意图

Fig.2 Schematic diagram of related variables of electricity distribution network line

针对 $\forall i \in \Omega_{BUS}^{\mathbb{E}}$ 、 $\forall h$ 、 $\forall s$ 、 $\forall y$,有如下节点功率 平衡方程:

$$\sum_{j:(i,j) \in \Omega^{EL}} \frac{r_{ij} [(P_{ji}^{E,hsy})^{2} + (Q_{ji}^{E,hsy})^{2}]}{(V_{j}^{hsy})^{2}} = \sum_{j:(i,j) \in \Omega^{EL}} (P_{ji}^{E,hsy} - P_{ij}^{E,hsy}) - L_{aux,i}^{E,hsy}$$
(16)
$$\sum_{j:(i,j) \in \Omega^{EL}} \frac{x_{ij} [(P_{ji}^{E,hsy})^{2} + (Q_{ji}^{E,hsy})^{2}]}{(V_{j}^{hsy})^{2}} =$$

$$\sum_{j:(i,j) \in \Omega^{\text{EL}}} (Q_{ji}^{\text{E},hsy} - Q_{ij}^{\text{E},hsy}) - L_{\text{aux},i}^{\text{EQ},hsy}$$
(17)

其中, r_{ij} 为配电线路(i,j)的电阻; x_{ij} 为配电线路(i,j)的电抗; $L_{aux,i}^{E,hsy}$ 为节点i的有功负荷 $L_{i}^{E,hsy}$ 、有功负荷削减量 $P_{i}^{ELC,hsy}$ 以及输入能量集线器的有功功率 $P_{i}^{E,hsy}$ 之和; $L_{aux,i}^{EQ,hsy}$ 为节点i的无功负荷 $L_{i}^{EQ,hsy}$ 和无功负荷削减量 $Q_{i}^{ELC,hsy}$ 之和。

针对 ∀*i*和*j* ∈ Ω_{BUS}^{E} 、∀(*i*,*j*) ∈ Ω^{EL} 、∀*h*、∀*s*、 ∀*y*,有如下电力线路电压降落方程:

$$(V_{i}^{hsy})^{2} = (V_{j}^{hsy})^{2} - 2(r_{ij}P_{ji}^{E,hsy} + x_{ij}Q_{ji}^{E,hsy}) + (r_{ij}^{2} + x_{ij}^{2})\frac{(P_{ji}^{E,hsy})^{2} + (Q_{ji}^{E,hsy})^{2}}{(V_{ji}^{hsy})^{2}}$$
(18)

式(16)—(18)为非线性非凸方程,对其进行一 定程度的松弛,将其转化为二阶锥方程。 本文引入辅助变量 $\hat{P}_{ji}^{E,hsy}$ 、 $\hat{Q}_{ji}^{E,hsy}$ 、令:

$$\hat{P}_{ji}^{\text{E},hsy} = \frac{r_{ij} \left[\left(P_{ji}^{\text{E},hsy} \right)^2 + \left(Q_{ji}^{\text{E},hsy} \right)^2 \right]}{\left(V_j^{hsy} \right)^2}$$
(19)

$$\hat{Q}_{ji}^{\text{E},hsy} = \frac{x_{ij} \left[(P_{ji}^{\text{E},hsy})^2 + (Q_{ji}^{\text{E},hsy})^2 \right]}{(V_j^{hsy})^2}$$
(20)

则由式(16)、式(17)可得,对于 $\forall h, \forall s, \forall y, \forall i \in \Omega_{\text{RUS}}^{\text{E}} \setminus (\Omega_{\text{RUS}}^{\text{ESUB}} \cup \Omega_{\text{RUS}}^{\text{EEH}}),存在如下约束:$

$$\sum_{j:(i,j) \in \Omega^{\text{EL}}} \hat{P}_{ji}^{\text{E},hsy} = \sum_{j:(i,j) \in \Omega^{\text{EL}}} (P_{ji}^{\text{E},hsy} - P_{ij}^{\text{E},hsy}) - L_{i}^{\text{E},hsy} + P_{i}^{\text{ELC},hsy}$$
(21)

$$\sum_{j:(i,j)\in\Omega^{\mathrm{EL}}} \hat{Q}_{ji}^{\mathrm{E},hsy} = \sum_{j:(i,j)\in\Omega^{\mathrm{EL}}} (Q_{ji}^{\mathrm{E},hsy} - Q_{ij}^{\mathrm{E},hsy}) - L_{i}^{\mathrm{EQ},hsy} + Q_{i}^{\mathrm{ELC},hsy}$$
(22)

对于∀
$$i \in \Omega_{BUS}^{EEH}$$
、∀ h 、∀ s 、∀ y ,存在如下约束:

$$\sum_{j:(i,j) \in \Omega^{\text{EL}}} \hat{P}_{ji}^{\text{E},hsy} = \sum_{j:(i,j) \in \Omega^{\text{EL}}} (P_{ji}^{\text{E},hsy} - P_{ij}^{\text{E},hsy}) - L_{i}^{\text{E},hsy} + P_{i}^{\text{ELC},hsy} - P_{i}^{\text{E},hsy}$$
(23)

$$\sum_{j:(i,j) \in \Omega^{\text{EL}}} \hat{Q}_{ji}^{\text{E},hsy} = \sum_{j:(i,j) \in \Omega^{\text{EL}}} (Q_{ji}^{\text{E},hsy} - Q_{ij}^{\text{E},hsy}) - L_i^{\text{EQ},hsy} + Q_i^{\text{ELC},hsy}$$
(24)

其中, *Q*^{EEH}为配电网中所有包含能量集线器的节点 集合。各变量的方向如图 2 所示。

对式(19)、(20)进行松弛, 对∀*i*和*j* ∈ $\Omega_{\text{BUS}}^{\text{E}}$ 、 ∀(*i*,*j*) ∈ Ω^{EL} 、∀*h*、∀*s*、∀*y*,可得双曲线约束为^[21]:

$$r_{ij} [(P_{ji}^{\text{E},hsy})^{2} + (Q_{ji}^{\text{E},hsy})^{2}] \leq (V_{j}^{hsy})^{2} \hat{P}_{ji}^{\text{E},hsy}$$
(25)
$$x_{ij} [(P_{ji}^{\text{E},hsy})^{2} + (Q_{ji}^{\text{E},hsy})^{2}] \leq (V_{j}^{hsy})^{2} \hat{Q}_{ji}^{\text{E},hsy}$$
(26)

其中,二次变量(*V*_j^{hsy})² 在求解计算时需设置成一个 整体变量。

针对线路电压降落方程式(18),考虑到二次项 对方程的影响远远小于一次项,故忽略二次项。另 外,可能因为线路(*i*,*j*)未建设或者潮流方向的原 因, $V_i^{hsy} = V_j^{hsy}$ 并没有直接关系。故对于 $\forall i \ \pi j \in \Omega_{BUS}^{E}, \forall (i,j) \in \Omega^{EL}, \forall h, \forall s, \forall y, 需增加 M(1-z_{ji}^{E,hsy})这一项,因此可得电压降落方程的等价方$ 程为:

$$(V_{i}^{hsy})^{2} \leq (V_{j}^{hsy})^{2} - 2(r_{ij}P_{ji}^{E,hsy} + x_{ij}Q_{ji}^{E,hsy}) + M(1 - z_{ji}^{E,hsy})$$
(27)
$$(V_{i}^{hsy})^{2} \geq (V_{j}^{hsy})^{2} - 2(r_{ij}P_{ji}^{E,hsy} + x_{ij}Q_{ji}^{E,hsy}) - M(1 - z_{ji}^{E,hsy})$$
(28)

其中,M为比较大的数,依据 $(V_i^{hsy})^2$ 的值来设定。

当 $z_{ji}^{\text{E},hsy} = 1$ 时, $(V_i^{hsy})^2 = (V_j^{hsy})^2 - 2(r_{ij}P_{ji}^{\text{E},hsy} + x_{ii}Q_{ii}^{\text{E},hsy})$; 当 $z_{ii}^{\text{E},hsy} = 0$ 时, $(V_i^{hsy})^2$ 不受 $(V_i^{hsy})^2$ 的限制。

本文设变电站为平衡节点^[18],并限定其他节点的电压范围,即对于 $\forall i \in \Omega_{\text{BUS}}^{\text{ESUB}}$ 有:

$$(V_i^{hsy})^2 = V_{rated}^2 (X_{C,i}^{ES,y} + X_{E,i}^{ES,y})$$
 (29)

对于 $\forall i \in \Omega_{BUS}^{E} \setminus \Omega_{BUS}^{ESUB}$ 有:

 $(1-\beta) V_{\text{rated}}^2 \leq (V_i^{hsy})^2 \leq (1+\beta) V_{\text{rated}}^2$ (30)

其中, V_{rated}为变电站的节点电压值; β 为电压降落比 例范围。

式(29)保持已建变电站节点的电压不变;式 (30)保证电压在一定的范围内。

b. 配电网变电站及线路容量约束。

针对 $\forall i \in \Omega_{BUS}^{ESUB}$ 、 $\forall h$ 、 $\forall s$ 、 $\forall y$,变电站容量应 满足:

$$0 \leq \sum_{j:(i,j) \in \Omega^{\text{EL}}} \left[(P_{ij}^{\text{E},hsy})^{2} + (Q_{ij}^{\text{E},hsy})^{2} \right] \leq \sum_{\iota \in \Omega^{\text{E}}_{\text{type}}} (S_{\text{C},\iota\iota}^{\text{ES,max}})^{2} X_{\text{C},\iota\iota}^{\text{ES},\iota} + (1 - X_{\text{C},\iota}^{\text{ES},\iota}) (S_{\text{E},\iota}^{\text{ESmax}})^{2} (31)$$

针对 \forall (*i*,*j*) ∈ Ω^{EL} 、 \forall *h*、 \forall *s*、 \forall *y*,线路容量应 满足:

$$0 \leq (P_{ij}^{E,hsy})^{2} + (Q_{ij}^{E,hsy})^{2} \leq \left[\sum_{\iota \in \Omega_{type}^{E}} (S_{C,ij\iota}^{ELmax})^{2} X_{C,ij\iota}^{EL,y} + (S_{E,ij}^{EL,max})^{2} (1 - X_{C,ij}^{EL,y})\right] z_{ij}^{E,hsy}$$
(32)

其中, Ω_{iype}^{E} 为配电网中所有该设备备选型号的集合; 辅助变量 $z_{ij}^{E,hsy}$ 确保当线路(i,j)从节点 i 到节点 j 无 潮流时 $P_{ij}^{E,hsy}$ 说及 $Q_{ij}^{E,hsy}$ 被限制为 0; $\sum_{j:(i,j) \in \Omega^{EL}} P_{ij}^{E,hsy}$ 、 $\sum_{j:(i,j) \in \Omega^{EL}} Q_{ij}^{E,hsy}$ 分别为变电站输出的总有功功率和总

无功功率; $S_{C,it}^{ES,max}$ 为t类型备选变电站i的视在功率 最大值; $S_{E,i}^{ES,max}$ 为已存在变电站i的视在功率最大值; $S_{C,ij}^{ELmax}$ 为t类型备选配电线路(i,j)可承载的视在功 率最大值; $S_{E,ij}^{EL,max}$ 为已存在配电线路(i,j)可承载的 视在功率最大值。

c. 配电网重构和辐射状约束。

针对 \forall (*i*,*j*) ∈ Ω^{EL} 、 \forall *h*、 \forall *s*、 \forall *y*,有如下约束:

$$z_{ij}^{\mathrm{E},hsy} \ge 0 \tag{33}$$

针对∀*m*∈ $\Omega_{\text{BUS}}^{\text{ESUB}}$ 、∀(*i*,*m*)∈ Ω^{EL} 、∀*h*、∀*s*、∀*y*, 有如下约束:

$$z_{im}^{\mathrm{E},hsy} = 0 \tag{34}$$

针对∀(*i*,*j*) ∈ $\Omega^{EL} \setminus \Omega^{E}_{SWITCH}, \forall h, \forall s, \forall y, 有如 下约束:$

$$z_{ij}^{\mathrm{E},hsy} + z_{ji}^{\mathrm{E},hsy} = X_{\mathrm{E},ij}^{\mathrm{EL},y} + X_{\mathrm{C},ij}^{\mathrm{EL},y}$$
(35)

针对 \forall (*i*,*j*) ∈ $\Omega_{\text{SWITCH}}^{\text{E}}$ 、 \forall *h*、 \forall *s*、 \forall *y*, 有如下 约束:

$$z_{ij}^{\text{E},hsy} + z_{ji}^{\text{E},hsy} = w_{ij}^{hsy} (X_{\text{E},ij}^{\text{EL},y} + X_{\text{C},ij}^{\text{EL},y})$$
(36)

针对∀*i*∈ $\Omega_{\text{BUS}}^{\text{E}} \setminus \Omega_{\text{BUS}}^{\text{ESUB}}$ 、∀(*i*,*j*) ∈ Ω^{EL} 、∀*h*、∀*s*、 ∀*y*,有如下约束:

$$\sum_{j:(i,j)\in\Omega^{\mathrm{EL}}} z_{ji}^{\mathrm{E},hsy} = 1$$
(37)

其中, $\Omega^{\text{E}}_{\text{SWITCH}}$ 为所有备选电力联络线的集合。

为了降低求解难度,可以将方向辅助变量 $z_{ij}^{E,hsy}$ 设置为连续变量,通过辅助约束式(33)—(37),可 使其自动置 0 和 1,且 $z_{ij}^{E,hsy}$ 并不一定等于 $z_{ji}^{E,hsy}$;式 (34)表示从变电站流出的潮流方向是确定的;式 (35)、(36)使得网络可重构,每一条联络线都对应 一个开关变量 $w_{ij}^{E,hsy}$,取值为 0 时表示开关断开,取 值为 1 时表示开关闭合;式(37)确保配电网为辐射 状,与式(34)配合使得变电站之间不相互供电。

2.4.2 配气网模型

a. 配气网的潮流方程。

配气网线路相关变量示意图如图 3 所示(变量 方向如图中箭头所示),不计及配气管道的仰角偏差 以及天然气温度的变化,可得配气管道的稳态方 程^[22]。对于 $\forall i$ 和 $j \in \Omega^{c}_{BUS}, \forall (i,j) \in \Omega^{cL}, \forall h, \forall s, \forall y, 有:$

$$z_{ij}^{G,y}(\Pi_{i}^{hsy} - \Pi_{j}^{hsy}) = W_{ij}(P_{ij}^{G,hsy})^{2}$$
(38)

其中, Ω^{CL} 为所有配送管道的集合; W_{ij} 为管道系数 (某一管道的该系数取恒定值,且值的大小取决于管 道的内径、长度、粗糙度、天然气温度以及海拔等多 种因素)^[6]。

式(38)是非线性非凸方程,使得模型难以直接 求解,本文将此复杂的约束松弛为易于求解的二阶 锥约束^[23]。



图 3 配气网管道相关变量示意图

Fig.3 Schematic diagram of related variables of gas distribution network pipeline

引入式(39)所示的非负辅助变量 $\gamma_{ij}^{\text{C},hsy}$,则对于 $\forall i \pi j \in \Omega_{\text{BUS}}^{\text{C}}, \forall (i,j) \in \Omega^{\text{CL}}, \forall h, \forall s, \forall y, 有式$ (40)成立。

$$\gamma_{ij}^{G,hsy} = z_{ij}^{G,y} (\Pi_i^{hsy} - \Pi_j^{hsy})$$
(39)

$$\gamma_{ij}^{G,hsy} = W_{ij} (P_{ij}^{G,hsy})^2$$
(40)

若将 $z_{ij}^{C,y} \Pi_i^{hsy}$ 和 $z_{ij}^{C,y} \Pi_j^{hsy}$ 按照等效的方式引入辅助变量展开,必须将 $z_{ij}^{C,y}$ 设置为二进制变量,引入过多的等式约束和二进制变量使得约束过紧,模型难于寻找到最优解。故使用 McCormick 的方法将式(39)进行适度的松弛^[24],并且配合气压降幅约束, 其中 $\Pi_i^{hsy} \in [\Pi_i^{min}, \Pi_i^{max}], \Pi_j^{hsy} \in [\Pi_j^{min}, \Pi_j^{max}]$ 。对于 $\forall i 和 j \in \Omega_{BUS}^{C}, \forall (i,j) \in \Omega^{CL}, \forall h, \forall s, \forall y, 有:$

$$\gamma_{ij}^{G,hsy} \ge \Pi_j^{hsy} - \Pi_i^{hsy} + (\Pi_i^{\min} - \Pi_j^{\max}) (z_{ij}^{G,y} + 1) \quad (41)$$

$$\gamma_{ij}^{\mathrm{G},hsy} \geq \Pi_i^{hsy} - \Pi_j^{hsy} + (\Pi_i^{\max} - \Pi_j^{\min}) (z_{ij}^{\mathrm{G},y} - 1) \quad (42)$$

$$\gamma_{ii}^{G,hsy} \leq \Pi_i^{hsy} - \Pi_i^{hsy} + (\Pi_i^{max} - \Pi_i^{min}) (z_{ii}^{G,y} + 1)$$
 (43)

 $\gamma_{ii}^{\mathrm{G},hsy} \leq \Pi_i^{hsy} - \Pi_i^{hsy} + (\Pi_i^{\min} - \Pi_i^{\max}) \left(z_{ii}^{\mathrm{G},y} - 1 \right) \quad (44)$

对式(40)进行松弛,可得二阶锥约束^[11]。则对 于 \forall (*i*,*j*) $\in \Omega^{CL}$ 、 \forall *h*、 \forall *s*、 \forall *y*,有式(45)成立。

$$\gamma_{ii}^{\mathrm{G},hsy} \ge W_{ii} (P_{ii}^{\mathrm{G},hsy})^2 \tag{45}$$

考虑到式(41)—(44)的松弛方法过于宽松,为 使之更为紧凑,本文添加气压降幅约束,即对于 $\forall i$ 和 $j \in \Omega_{BUS}^{C}$ 、 $\forall (i,j) \in \Omega^{CL}$ 、 $\forall h$ 、 $\forall s$ 、 $\forall y$,有:

 $-M_{1}(1-z_{ij}^{G,y}) \leq \Pi_{i}^{hsy} - \Pi_{j}^{hsy} \leq \Delta \Pi^{max} + M_{1}(1-z_{ij}^{G,y}) (46)$ 其中,当 $z_{ij}^{G,y} = 1$ 时有 $0 \leq \Pi_{i}^{hsy} - \Pi_{j}^{hsy} \leq \Delta \Pi^{max}$,当 $z_{ij}^{G,y} = 0$ 时有 $-M_{1} \leq \Pi_{i}^{hsy} - \Pi_{j}^{hsy} \leq \Delta \Pi^{max} + M_{1}, M_{1}$ 为一个比 $\Pi_{i}^{hsy} - \Pi_{j}^{hsy}$ 大很多的数。

设配气站节点的气压不变,则对于 $\forall i \in \Omega_{BUS}^{GSUB}$ 可得:

$$\Pi_{i}^{hsy} = \Pi_{\text{rated}} (X_{C,i}^{\text{GS},y} + X_{E,i}^{\text{GS},y})$$
(47)

其中, Π_{rated} 为配气站节点气压值的平方。

b. 配气网节点流量平衡方程。

根据基尔霍夫第一定律,对于 $\forall h, \forall s, \forall y, \forall i \in \Omega_{RUS}^{G} \setminus (\Omega_{RUS}^{GCATE} \cup \Omega_{RUS}^{CEH}) 应满足:$

$$\sum_{k:(i,k)\in\Omega^{\mathrm{GL}}} P_{ik}^{\mathrm{G},hsy} = \sum_{j:(i,j)\in\Omega^{\mathrm{GL}}} P_{ji}^{\mathrm{G},hsy} - L_i^{\mathrm{G},hsy} + P_i^{\mathrm{GLC},hsy} \quad (48)$$

对于∀*i*∈ $\Omega_{\text{BUS}}^{\text{GEH}}$ 、∀*h*、∀*s*、∀*y*,应满足:

$$\sum_{k:(i,k)\in\Omega^{GL}} P_{ik}^{G,hsy} = \sum_{j:(i,j)\in\Omega^{GL}} P_{ji}^{G,hsy} - P_i^{G,hsy}$$
(49)

考虑到加压器一般用于远距离传输,因此本文 忽略加压器的影响^[18]。

c. 配气网配气站及配送管道容量约束。

对于∀*i* ∈ $\Omega_{\text{BUS}}^{\text{GCATE}}$ 、∀*h*、∀*s*、∀*y*,配气站容量满 足如下约束:

$$0 \leq \sum_{k:(i,k) \in \mathcal{A}_{\text{LNE}}^{\text{C}}} P_{ik}^{\text{G},hsy} \leq \sum_{\iota \in \mathcal{A}_{\text{type}}^{\text{G}}} P_{\text{C},i\iota}^{\text{GSmax}} X_{\text{C},i\iota}^{\text{GS}} + P_{\text{E},i}^{\text{GSmax}} (1 - X_{\text{C},i}^{\text{GS},y})$$

$$(50)$$

对于 \forall (*i*,*j*) ∈ Ω^{GL} 、 \forall *h*、 \forall *s*、 \forall *y*, 配送管道容量 满足如下约束:

$$0 \leq P_{ij}^{G,hsy} \leq \left[\sum_{\iota \in \Omega_{type}^{G}} P_{C,ij\iota}^{GL,\max} X_{C,ij\iota}^{GL,\gamma} + P_{E,ij}^{GL,\max} (1 - X_{C,ij}^{GL,\gamma}) \right] z_{ij}^{G,\gamma}$$

$$(51)$$

其中, $\sum_{k:(i,k) \in \Omega_{LINE}^{C}} P_{ik}^{G,hsy}$ 为第 i 个配气站输出的总气

量; $P_{C,it}^{GS,max}$ 为t类型备选配气站i的气量最大输出值; $P_{E,i}^{GS,max}$ 为已存在配气站i的气量最大输出值; $P_{C,ij}^{GL,max}$ 为已存在配气管道(i,j)可承载的气量最大输出值; $P_{E,ij}^{GL,max}$ 为已存在配气管道(i,j)可承载的气量最大输出 位; $P_{E,ij}^{GL,max}$ 为已存在配气管道(i,j)可承载的气量最

d. 配气网辐射状约束。 对于 \forall (*i*,*j*) $\in \Omega^{CL}$ 、 \forall *y*,有如下约束:

$$z_{ij}^{\mathrm{G},y} \ge 0 \tag{52}$$

对于 $\forall m \in \Omega_{BUS}^{CGATE}$ 、 $\forall (i,m) \in \Omega^{CL}$ 、 $\forall y$,有如下 约束:

$$z_{im}^{G,y} = 0 \tag{53}$$

对于∀(*i*,*j*) ∈
$$\Omega^{\text{CL}}$$
、∀*y*,有如下约束:

$$z_{ij}^{G,y} + z_{ji}^{G,y} = X_{E,ij}^{GL,y} + X_{C,ij}^{GL,y}$$

$$(54)$$

对于
$$\forall i \in \Omega_{BUS}^{G} \setminus \Omega_{BUS}^{GGATE}, \forall y, 有如下约束:$$

$$\sum_{(i,j) \in \mathcal{Q}^{\mathrm{GL}}} z_{ji}^{\sigma,y} = 1 \tag{55}$$

为了降低求解难度,式(52)—(55)中的 $z_{ij}^{G,v}$ 与 $z_{ij}^{G,v}$ 可设置为连续变量。

2.5 负荷削减约束

对于 $\forall i \in \Omega^{EH}$ 、 $\forall h$ 、 $\forall s$ 、 $\forall y$,能量集线器内的 负荷削减限制应满足:

$$0 \leq P_i^{\text{ELC},hsy} \leq \alpha_{\text{EL},i}^{\text{max}} L_i^{\text{E},hsy}$$
(56)

$$0 \leq P_i^{\text{HLC},hsy} \leq \alpha_{\text{HL},i}^{\text{max}} L_i^{\text{H},hsy}$$
(57)

对于 $\forall i \in \Omega_{BUS}^{E}$ \($\Omega_{BUS}^{ESUB} \cup \Omega_{BUS}^{EEH}$)、 $\forall h, \forall s, \forall y$, 配电网的直供负荷削减限制应满足:

$$0 \leq P_i^{\text{ELC},hsy} \leq \alpha_{\text{EL},i}^{\text{max}} L_i^{\text{E},hsy}$$
(58)

对于 $\forall i \in \Omega_{BUS}^{G} \setminus (\Omega_{BUS}^{GCATE} \cup \Omega_{BUS}^{GEH}), \forall h, \forall s, \forall y,$ 配气网的直供负荷削减限制应满足:

$$0 \leq P_i^{\text{GLC},hsy} \leq \alpha_{\text{GL},i}^{\max} L_i^{G,hsy}$$
(59)

其中, $\alpha_{\text{EL},i}^{\text{max}}$ 、 $\alpha_{\text{RL},i}^{\text{max}}$ 、 $\alpha_{\text{CL},i}^{\text{max}}$ 分别为节点*i*的电负荷、热负荷和气负荷的最大削减比例。

2.6 求解算法

本文模型中的非线性包括2类:一类非线性是2 个二进制变量相乘,如式(36)中含有 $w_{ij}^{hsy}X_{E,ij}^{EL,y}$ 以及 $w_{ij}^{hsy}X_{C,ij}^{EL,y}$,这时需引入非负的实数辅助变量;另一类 非线性是二进制变量与连续变量相乘,如式(11)和 式(14)中含有 $X_{C,i}^{CHP,y}P_i^{C,hsy}$,式(32)含有 $X_{C,ij}^{EL,y}z_{ij}^{E,hsy}$,式 (51)含有 $X_{C,ij}^{CL,y}z_{ij}^{G,hsy}$,即 $X_{C,i}^{CHP,y}X_{C,ij}^{CL,y}X_{C,ij}^{L,y}z_{ij}^{H,y}$ 均为二 进制变量, $P_i^{C,hsy}$ 、 $z_{ij}^{E,hsy}$ 、 $z_{ij}^{C,y}$ 均为连续变量,这时需引 入实数辅助变量,具体可参考文献[25]中的线性化 方法。在编写代码时,连续变量并没有上限值,此时 需要根据连续变量的实际值设置一个较大的上限 值,从而使等价关系成立。本文使用基于 Python 的 建模工具 Pyomo,并调用商业优化软件 Gurobi 求解 混合整数二阶锥规划模型。其标准形式为:

$$\begin{cases} \min \boldsymbol{f}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} \\ \text{s.t.} & \|\boldsymbol{A}_{\mathrm{ineq}}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{b}_{\mathrm{ineq}} \|_{2} \leq \boldsymbol{c}_{\mathrm{ineq}}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{x} + \boldsymbol{d}_{\mathrm{ineq}} \\ \boldsymbol{A}_{\mathrm{eq}}\boldsymbol{x} = \boldsymbol{b}_{\mathrm{eq}} \\ x_{j} \in \{0,1\} \quad j = 1, 2, \cdots, p \end{cases}$$
(60)

其中, f, b_{ineq} , $d_{ineq} \in \mathbb{R}^{n \times 1}$; A_{ineq} , $c_{ineq} \in \mathbb{R}^{n \times n}$; $A_{eq} \in \mathbb{R}^{m \times n}$; $b_{eq} \in \mathbb{R}^{m \times 1}$; $x \ge n \times 1$ 阶的非负变量矩阵; $p \ge -$

进制变量个数。

优化变量 x 包含决策变量和中间变量。决策变 量包括各类设备的安装类型、安装时间,中间变量包 括各设备运行时的能量以及相应的一些辅助变量。 目标函数为式(2)—(7);不等式约束包括各类设备 的容量限制约束式(14)、(15)、(31)、(32)、(50)、 (51),潮流方程的松弛方程式(25)—(30)、(41)— (47),负荷削减约束式(56)—(59),建设过程中的 状态变量约束式(8)、(10)以及辅助变量相关约束; 等式约束包括各类能量平衡方程式(11)—(13)、 (21)—(24)、(48)、(49),网络拓扑约束式(33)— (37)、(52)—(55)以及建设过程中的状态变量约束 式(9)。

3 案例分析

3.1 仿真参数

图 4 为本文选取 24 节点 20 kV 配电网规划 图^[17];图 5 为改造的 30 节点配气网规划图^[12]。2 个网络通过 3 个能量集线器耦合。本文使用分时电 价,分为峰、平、谷 3 档,分别为 0.185 5 \$/(kW · h)、 0.114 2 \$/(kW · h)和 0.055 5 \$/(kW · h)。规划年 限为 10 a,划分为 2 个阶段(阶段 I 和阶段 II),每个 阶段时长 5 a,在每个阶段的初始年安装设备^[12],年 利率为 5%。配电网中,电力线路 $L_1 - L_5 \ L_{18} \ L_{31},$ $L_{21} \ L_{23} - L_{25} 为备选电力联络线,电力节点 1、7、15$ 为能量集线器节点。配气网中,气节点 3、15、20 为能量集线器节点。其中,所有设备均可新建,已存在的能源供应站和能量配送通道可扩容,且所有设备均有 2 种备选型号,备选型号 2 的容量比备选型号 1的容量更大,成本更高。



■ 己有变电站, □ 备选变电站, ○ 能源集线器
 — 已有线路,---- 阶段 I 备选线路,---- 阶段 II 备选线路
 ● 已有/阶段 I 新建节点, ○ 阶段 II 新建节点

图 4 待规划的配电网拓扑结构

Fig.4 Topology structure of electricity distribution network to be planned



Fig.5 Topology structure of gas distribution network to be planned

3.2 仿真结果分析

3.2.1 2种场景下 EGDN 的联合规划结果对比

本文比较了以下 2 种场景的规划结果:场景 1 为传统的规划方式,即配电网与配气网这 2 个网络 分开规划,无能量集线器和配电网重构;场景 2 为本 文所提模型,即考虑配电网重构和能量集线器的 2 个网络联合规划。表 2 比较了 2 种场景下的各项成 本。表 3 比较了 2 种场景下的规划结果。在场景 1 下,配电网和配气网分开规划,配电网的节点 1、7 以 及 13 在阶段 II 过载,中断成本为 \$ 9.79×10⁶ (9.79 MUSD,即1 MUSD=10⁶ \$)。场景 2 增加了能 量集线器,使 2 个网络实现耦合,配气网通过热电联 产装置在电力负荷高峰时为配电网提供电力支撑, 虽然管道 11 被迫改用容量更大、成本更高的类型 2, 但是配气网的支援成功避免了配电网节点 1、7 的负 荷损失,减少了中断成本,提高了系统的可靠性。

Table 2 Comparison of cost between two scenarios																
			建设成本/MUSD				维护成本/MUSD				运行成本/MUSD			中断	单阶段	两阶段
场景	阶段	网络	能量 源	配送 管道	能量 集线器	合计	能量 源	配送 管道	能量 集线器	合计	电网	能量 集线器	合计	成本/ MUSD	成本合计/ MUSD	′成本合计/ MUSD
	T	电网	0.74	1.84	_	3.58	0.28	0.55	_	1.55	0.04		0.04	0	5.17	- 19.26
1		气网	0.20	0.80			0.19	0.53			_					
1	п	电网	0.54	0.93	_	2.31	0.27	0.67	_	1.93	0.06		0.06	9.79	14.09	
	ш	气网	0.30	0.54			0.30	0.69			_					
2 <u> </u>	T	电网	0.47	1.95	0.64	4.08	0.21	0.58	0.33	1.85	0.04	—	0.10	0	6.03	- 11.56
		气网	0.20	0.82			0.19	0.54				0.06				
	п	电网	0.54	1.26	0.27	2.98	0.24	0.77	0.39	2.43	0.05	0 12	0.12	0	5.53	
	Ш	气网	0.30	0.61	0.27		0.30	0.73			—	0.07	0.12			

表 3 2 种场景的规划结果对比

Table 3 Comparison of planning results between two scenarios

场景	阶段	网络	规划结果
		电网	变电站:21(1),22(2),23(2) 线路:L ₅ (2),L ₇ (1),L ₁₁ (1),L ₁₂ (1),L ₁₅ (1),L ₁₈ (2),L ₂₀ (2),L ₂₅ (2),L ₂₈ (1)
1 -	Ι	气网	配气站:29(1) 管道:P ₂ (1),P ₃ (1),P ₆ (2),P ₇ (1),P ₉ (2),P ₁₀ (1),P ₁₁ (1),P ₁₃ (1),P ₁₅ (1),P ₁₇ (1),P ₂₂ (1),P ₂₄ (1),P ₂₅ (1)
		EH	_
		电网	变电站:24(2) 线路:L ₁₄ (1),L ₁₇ (1),L ₃₂ —L ₃₄ (1),L ₃₇ (2),L ₃₈ (1)
	Π	气网	配气站:30(1) 管道:P ₂₉ (1),P ₃₁ (1),P ₃₃ (1),P ₃₄ (1),P ₃₆ (1),P ₄₅ (1),P ₃₉ (1),P ₃₇ (1),P ₄₀ (1),P ₄₁ (1),P ₄₄ (2),P ₄₈ (1),P ₄₉ (1)
		EH	_
	Ι	电网	变电站:21(1),22(1),23(1) 线路:L ₅ (2),L ₆ —L ₈ (1),L ₁₂ (1),L ₁₅ (1),联络线 L ₁₈ (2),L ₂₀ (2),L ₂₅ (2),L ₂₈ (1)
		气网	配气站:29(1) 管道:P ₂ (1),P ₃ (1),P ₆ (2),P ₁₉ (1),P ₉ (2),P ₁₀ (1),P ₁₁ (2),P ₁₃ (1),P ₁₅ (1),P ₁₇ (1),P ₂₂ (1),P ₂₄ (1),P ₂₅ (1)
2		EH	EH ₁ :热电联产装置(1) EH ₂ :热电联产装置(1),燃气锅炉(2)
	Ш	电网	变电站:24(2) 线路:L ₁₇ (1),L ₂₇ (1),联络线 L ₃₁ (2),L ₃₂ —L ₃₄ (1),L ₃₆ (1),L ₃₇ (2),L ₃₈ (2)
		气网	配气站:30(1) 管道:P ₂₈ (1),P ₃₁ (1),P ₃₃ (1),P ₃₄ (1),P ₃₆ —P ₃₉ (1),P ₄₁ (1),P ₄₄ (2),P ₄₅ (1),P ₄₈ (1),P ₄₉ (1)
		EH	EH3:热电联产装置(1),燃气锅炉(2)

注:表中,括号中的数字表示设备类型,后同。

在配电网网络拓扑层面,因配气网在电负荷高 峰时段为配电网提供电力支援,相当于使得配电网 的耦合节点处电负荷下降,由表 3 可以看出,配电网 供应电节点 1 负荷和电节点 2 负荷的能量有所下 降,使得变电站 21 在仅选择类型 1 的情况下即可供 应节点 3 的负荷。同时,因为节点 7 的需求下降和 节点 3 的负荷转移,变电站 23 在场景 1 中采用类型 2,而在场景 2 中采用类型 1,节省了成本 0.135 MUSD。

相比于场景 1,场景 2 还增加了配电网重构功 能。由表 3 可知,在场景 2 中,经过算法综合优化之 后,选中了联络线 L₁₈、L₃₁,同时电力线路 L₃₈选用了 容量更大的类型 2。当负荷处于非峰值时,通过联 络线 L₁₈和 L₃₁以网损最小的方式保证电节点 13 的 负荷供电;当变电站 22 的容量不够时,将节点 13 的 负荷通过联络线转移至变电站 24。由表 2 可知,通 过配电网的灵活重构,消除了节点 17 的负荷选择相 对较远的路径供电的影响,场景 2 的网络损耗成本 还降低了 0.01 MUSD。另一方面,配电网重构使得 负荷在高峰期时段实现了灵活的负荷转移,避免了 节点 13 的负荷损失,减少了中断成本,同时充分利 用了变电站的容量,场景 2 中变电站 22 可选择成本 更低的类型 1 即可满足负荷的不间断供电。

3.2.2 混合整数二阶锥规划模型与混合整数线性规 划模型对 EGDN 联合规划结果的影响分析

本文选择对比的混合整数线性规划模型忽略了 电压相关约束式(25)、(27)、(29)、(30)和气压相 关约束式(41)、(45)—(47),即不考虑电压与气压。 模型由混合整数二阶锥规划问题变为混合整数线性 规划问题。本文将采用该混合整数线性规划模型进 行求解的场景称为场景 3。

图 6 给出了 2 种场景(场景 2 和场景 3)下各配 电网节点的电压分布(图中节点电压为标幺值)。 算例中配电网的电压等级为 20 kV,相对压降较小。 在场景 2 中,因配电网重构选择了最优路径供电,使 得节点 13 的电压相较于场景 3 略有升高,改善了电 压质量。从整体电压分布来看,场景 2 下的电压分



Fig.6 Node voltage distribution of electricity distribution network under Scenario 2 and 3

布更为均衡。事实上,在实际工程中,如果电压等级 较低,供电路径较远,同时伴随有较大的负荷,配电 网会有较大的压降,因此在规划的过程中需要对电 压进行约束,避免在实际运行中低电压质量对生产、 生活造成的影响。

表4和图7分别为场景2和3下配气网的规划 结果与配气网节点气压分布图(图中节点气压为标 幺值)。由图7可知,场景3下的气压降落很大,最 大降幅达到了0.6 p.u.。由表4可知,为了规避气压 大幅度下降,当考虑气压约束时,配气网的最优管道 走线选择了相对较远的路径供气。由此可见,场景 2和3的最终规划结果有很大的不同。在实际规划 中,如果采用不考虑气压约束的规划方案,将导致天 然气以较低的气压配送至负荷端,从而直接影响负 荷端用户的用气。

Table 4 Planning results of gas distribution network under Scenario 2 and 3

场景	阶段	规划结果
		配气站:29(1)
	Ι	管道: $P_2(1)$, $P_3(1)$, $P_6(2)$, $P_7(1)$, $P_9(2)$, $P_{10}(1)$,
		$P_{11}(1), P_{13}(1), P_{15}(1), P_{17}(1), P_{22}(1), P_{24}(1), P_{25}(1)$
2	Ш	配气站:30(1)
		管道:P ₂₉ (1),P ₃₁ (1),P ₃₃ (1),P ₃₄ (1),P ₃₆ (1),P ₃₇ (1),
		$P_{39}(1), P_{40}(1), P_{41}(1), P_{44}(2), P_{45}(1), P_{48}(1), P_{49}(1)$
	Ι	配气站:29(1)
3		管道: $P_2(1)$, $P_3(1)$, $P_6(2)$, $P_7(1)$, $P_9(2)$, $P_{10}(1)$,
		$P_{11}(2), P_{12}(1), P_{16}(1), P_{17}(1), P_{22}(1), P_{24}(1), P_{25}(1)$
	Ш	配气站:30(1)
		管道:P ₂₈ (1),P ₃₃ (1),P ₃₅ —P ₃₇ (1),P ₄₀ (1),P ₄₁ (1),
		$P_{44}(2), P_{45}(1), P_{47}(1), P_{48}(1), P_{49}(2)$



Fig.7 Node pressure distribution of gas distribution network under Scenario 2 and 3

经过上述比较可知,本文所提融合小时级别配 电网重构的 EGDN 联合规划模型有如下特点。

a. 融合小时级别的配电网重构,一方面可降低 网损,减少运行成本;另一方面在负荷高峰期可实现 灵活的负荷转移,减少了中断成本,提升了系统可靠 性,同时还能充分利用变电站容量,改善电压质量。

b. 配电网和配气网通过能量集线器相耦合, 配

气网可在负荷高峰期时支援配电网,提升系统的运 行可靠性。

c. 与简单的混合整数线性规划模型相比,混合 整数二阶锥规划模型更能获得满足实际工程需求的 规划方案。不考虑压力影响的混合整数线性规划模 型虽然简单,但是会导致实际运行中气压过低,同时 说明了在系统规划中考虑电压和气压的必要性。

4 结论

本文提出了融合配电网重构的 EGDN 联合规划 模型。首先,对配电网与配气网潮流方程进行了精 确建模,建立了含配电网重构的复杂电-气综合能源 系统联合规划模型,对配电网和配气网潮流方程进 行适度松弛,将其转化为可直接求解的二阶锥凸优 化问题,建立了混合整数二阶锥优化模型,以实现 EGDN 综合能源系统快速精确求解:其次,引入了小 时级别的配电网重构,尽可能挖掘配电网网架潜力, 利用其网架的灵活性,降低网损,提升系统可靠性, 改善供能质量;另外,通过能量集线器耦合配电网和 配气网,说明了不同能源的替代作用,提升了系统运 行可靠性:最后,证明了混合整数二阶锥规划模型与 简单的混合整数线性规划模型相比,更能获得满足 实际工程需求的规划方案,说明了精确建模的重要 性。本文的研究可为 EGDN 的联合规划提供一定的 理论支撑,但是因为此模型过于精细,并不能适应大 规模网络规划。后续的研究,可以根据实际场景进 行更为合理的简化。除此之外,还可考虑预想故障 提升系统可靠性;利用深度学习等大数据方法进行 更为精准的负荷预测,为规划提供更为准确的数 据源。

参考文献:

- [1] 程林,张靖,黄仁乐,等. 基于多能互补的综合能源系统多场景 规划案例分析[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):282-287.
 CHENG Lin,ZHANG Jing, HUANG Renle, et al. Case analysis of multi-scenario planning based on multi-energy complementation for integrated energy system [J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):282-287.
- [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,2017,37(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] SHAHIDEHPOUR M, FU Y, WIEDMAN T. Impact of natural gas infrastructure on electric power systems [J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5):1042-1056.
- [4] UNSIHUAY-VILA C, MARANGON-LIMA J W, SOUZA A C Z D, et al. A model to long-term, multiarea, multistage, and integrated expansion planning of electricity and natural gas systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2010, 25(2):1154-1168.
- [5] BARATI F, SEIFI H, SEPASIAN M S, et al. Multi-period integrated

framework of generation, transmission, and natural gas grid expansion planning for large-scale systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(5): 2527-2537.

- [6] QIU J, DONG Z Y, ZHAO J H, et al. Multi-stage flexible expansion co-planning under uncertainties in a combined electricity and gas market[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(4): 2119-2129.
- [7] QIU J, YANG H, DONG Z Y, et al. A linear programming approach to expansion co-planning in gas and electricity markets [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(5):3594-3606.
- [8] CHAUDRY M, JENKINS N, QADRDAN M, et al. Combined gas and electricity network expansion planning [J]. Applied Energy, 2014,113(6):1171-1187.
- [9] QIU J, 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.
- [10] ZHANG Y, HU Y, MA J, et al. A mixed-integer linear programming approach to security-constrained co-optimization expansion planning of natural gas and electricity transmission systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6):6368-6378.
- [11] BENT R, BLUMSACK S, VAN HENTENRYCK P, et al. Joint electricity and natural gas transmission planning with endogenous market feedbacks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(6):6397-6409.
- [12] SALDARRIAGA C A, HINCAPIÉ R A, SALAZAR H. A holistic approach for planning natural gas and electricity distribution networks [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2013, 28 (4): 4052-4063.
- [13] SALDARRIAGA C A, HINCAPIE R A, SALAZAR H. An integrated expansion planning model of electric and natural gas distribution systems considering demand uncertainty[C] // Power & Energy Society General Meeting. Denver, CO, USA: IEEE, 2015:1-5.
- [14] CAPITANESCU F, OCHOA L F, MARGOSSIAN H, et al. Assessing the potential of network reconfiguration to improve distributed generation hosting capacity in active distribution systems [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(1):346-356.
- [15] 廖秋萍,吕林,刘友波,等.考虑重构的含可再生能源配电网电 压控制模型与算法[J].电力系统自动化,2017,41(18):32-39.
 LIAO Qiuping, LÜLin, LIU Youbo, et al. Reconfiguration based model and algorithm of voltage regulating for distribution network with renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2017,41(18):32-39.
- [16] 朱正,廖清芬,刘涤尘,等.考虑新能源与电动汽车接入下的主动配电网重构策略[J].电力系统自动化,2015,39(14):82-88,96.

ZHU Zheng, LIAO Qingfen, LIU Dichen, et al. Strategy of distribution network reconfiguration considering wind power and electric vehicle integration [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(14):82-88,96.

- [17] HEIDARI S, FOTUHI-FIRUZABAD M, KAZEMI S. Power distribution network expansion planning considering distribution automation
 [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(3): 1261-1269.
- [18] ZHANG X, SHAHIDEHPOUR M, ALABDULWAHAB A, et al. Optimal expansion planning of energy hub with multiple energy infrastructures [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2015, 6 (5): 2302-2311.
- [19] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989,4(2):1401-1407.

- [20] TAYLOR J A, HOVER F S. Convex models of distribution system reconfiguration [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27 (3):1407-1413.
- [21] LOBO M S, VANDENBERGHE L, BOYD S, et al. Applications of second-order cone programming[J]. Linear Algebra & Its Applications, 1998, 284(1-3): 193-228.
- [22] 赵霞,杨仑,瞿小斌,等. 电-气综合能源系统能流计算的改进方法[J]. 电工技术学报,2018,33(3):467-477.
 ZHAO Xia, YANG Lun, QU Xiaobin, et al. An improved energy flow calculation method for integrated electricity and natural gas system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33 (3):467-477.
- [23] SÁNCHEZ C B, BENT R, BACKHAUS S, et al. Convex optimization for joint expansion planning of natural gas and power systems [C] // 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS). Koloa, HI, USA; IEEE, 2016; 2536-2545.
- [24] MCCORMICK G P. Computability of global solutions to factorable nonconvex programs: Part I: Convex underestimating problems [J]. Mathematical Programming, 1976, 10(1):147-175.
- [25] 吴聪,唐巍,白牧可,等. 基于能源路由器的用户侧能源互联网

规划[J]. 电力系统自动化,2017,41(4):20-28.

WU Cong, TANG Wei, BAI Muke, et al. Energy router based planning of energy internet at user side [J]. Automation of Electric Power Systems, 2017, 41(4):20-28.

作者简介:



周贤正(1986—),男,湖南永州人,博 士研究生,主要研究方向为配电网规划、综 合能源系统规划(E-mail:zhouxianzheng@ zju.edu.cn);

郭创新(1969—),男,湖北黄冈人,教授,博士,主要研究方向为能源互联网运行

与规划、风险调度、新能源接入等(E-mail:

guochuangxin@zju.edu.cn);

陈 玮(1994—),男,四川南充人,博士研究生,主要研 究方向为配电网故障恢复、分布式新能源运行优化(E-mail: chenwei_ee@zju.edu. cn)。

Joint planning of electricity-gas distribution network based on mixed integer second-order cone programming

ZHOU Xianzheng¹, GUO Chuangxin¹, CHEN Wei¹, LI Yanjun¹, ZHANG Zhanghuang¹,

ZHAO Dawei², ZHANG Wentao², LIU Xuna²

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

2. State Grid Sichuan Economic Research Institute, Chengdu 610041, China)

Abstract: A joint planning model of EGDN(Electricity-Gas Distribution Network) considering the reconfiguration of electricity distribution network and hourly power flow variation is proposed. On the one hand, the reconfiguration of electricity distribution network is integrated to optimize the operation state of the system, and the collaborative planning between the two networks can play a complementary and mutual role among different energy sources and improve the system's reliability and operational efficiency. On the other hand, the operation state of the system is described in detail by considering the power flow equation of electricity distribution network and gas distribution network hourly. In order to solve this non-linear non-convex model, the original problem is appropriately relaxed and converted into a MISOCP (Mixed Integer Second-Order Cone Programming) problem which can be solved directly. Simulative results show that the proposed planning model significantly improves the reliability of the system, reduces the configuration capacity of related equipment, decreases the energy transmission loss, and reduces the overall planning and operating costs. It proves that MISOCP model is more able to obtain the planning scheme meeting the actual engineering requirements, compared with the simple mixed integer linear programming model.

Key words: electricity-gas distribution network; reconfiguration of electricity distribution network; integrated energy system; electricity distribution network; gas distribution network; MISOCP; joint planning; models