

# 电-气互联系统潮流优化与安全性研究综述

林涛<sup>1</sup>, 毕如玉<sup>1</sup>, 杜蕙<sup>1</sup>, 徐遐龄<sup>2</sup>

(1. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北省 武汉市 430072; 2. 华中电力调控分中心, 湖北省 武汉市 430077)

## Summary of Research on Power Flow Optimization and Safety of Integrated Electricity and Gas Systems

LIN Tao<sup>1</sup>, BI Ruyi<sup>1</sup>, DU Hui<sup>1</sup>, XU Xialing<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, Hubei Province, China;

2. Central China Branch of State Grid Cooperation of China, Wuhan 430077, Hubei Province, China)

**Abstract:** With the development of China's energy transformation, power-grid-based integrated power and gas systems (IEGSs) are expected to become the new energy transmission carriers, with great potential to improve energy efficiency. The rapid development of power-to-gas technology has introduced a two-way relationship between the power grid and the natural gas network. Because the degree of coupling between the two networks is deepening, conventional analytical methods for studying the two networks separately may be insufficient to determine the reliability and economics of IEGS operations. Therefore, more and more scholars are regarding the two networks as a whole and conducting research on collaborative optimization. This paper first introduces the existing research on and application status of power-to-gas technology, and then summarizes the unified power flow model that considers the two-way coupling of grid and gas networks in IEGSs. Limitations of this model and possibilities for improvement are analyzed, and research on the planning, operation, and optimal power flow calculation for IEGSs are summarized. Finally, the main research directions and problems of IEGS operational safety are analyzed. This comprehensive review of the current state of the art can be used as a reference for subsequent research.

**Keywords:** integrated electricity and gas systems; power-to-gas; optimization of operation

**摘要:** 随着中国能源转型发展, 以电网为核心的电-气互联综合能源系统 (integrated electricity and gas systems, IEGS) 有望成为能源传输的新载体。IEGS作为能源互联网的基础和过渡, 对于提升能源利用效率具有重要意义。随着电转气技术的快速发展, 电网和天然气网间具备了双向耦合关系。两

网耦合程度不断加深, 分别对两网进行研究的传统分析方法可能难以满足IEGS运行的可靠性和经济性, 因此越来越多的学者将两网视为一个整体展开协同优化等方面的研究。首先介绍了电转气技术的研究及应用现状, 在此基础上, 介绍了考虑电网和气网双向耦合的IEGS统一潮流模型建模和求解方法, 总结了国内外相关研究现状, 并分析了统一潮流模型建模中还可进一步完善提高的关键点。进一步, 归纳了面向IEGS的规划、运行调度、最优潮流计算等方面的研究现状。最后, 分析了IEGS运行安全性方面的主要研究方向及问题, 以为后续研究提供参考。

**关键词:** 电-气互联综合能源系统; 电转气; 运行优化

## 0 引言

能源是现代社会生存和发展所必需的战略基础资源。随着能源结构转型发展, 能源互联网有望成为未来能源利用的新模式<sup>[1]</sup>。作为重要一次能源的天然气, 随着互联互通计划推进<sup>[2]</sup>, 有望实现天然气“全国一张网”格局, 天然气网与电网能量流形式相似, 与电网联系也最紧密。针对此问题, 综合能源系统 (integrated energy system, IES) 的概念被学者们相继提出, 并得到各国政府和工业界的广泛重视。目前, 综合能源系统的概念和框架已经有了较为深入的研究<sup>[3-5]</sup>。文献[3]针对IES提出了类似电网能量管理系统的能源互联网能量管理系统总体架构, 以实现综合能源系统的优化调度、安全预警和协同控制。文献[4]介绍了能量网络理论, 介绍了能量网络的共性, 为建立综合能源系统的能量管理提供了依据。在电-气耦合设备的建模方面, 文献[6-9]对不同类型的电-气耦合设备单元的数学模型进行了研究。

基金项目: 国家电网公司总部科技项目“新能源基地特高压外送在线安全运行风险评估和预警技术研究与应用”。

Science and Technology Foundation of SGCC.

随着中国能源转型积极推进,燃气发电渗透率逐渐提高<sup>[10]</sup>,电网与气网耦合程度逐渐加深。2016年末,中国燃气机组总装机容量占比4.3%,同比增长6.1%<sup>[11]</sup>。文献[12]根据2016年12月29日发布的《能源生产和消费革命战略(2016—2030)》预测2020年中国燃气机组装机容量占比约6%,2030年将达到约10%,是2016年的230%。同时,电转气技术的迅速发展使得电网与气网能源双向交互成为可能,电网富余功率可以通过电转气技术转换为天然气,从而实现大规模、长时间存储或直接注入天然气管道进行输送<sup>[13]</sup>,在提高对新能源消纳的同时,也可回收利用二氧化碳。

新形势下,电网与天然气网的运行将不再独立,以电网为核心的电-气互联综合能源系统(integrated electricity and gas systems, IEGS)将成为能源传输的新载体。IEGS的结构如图1所示。

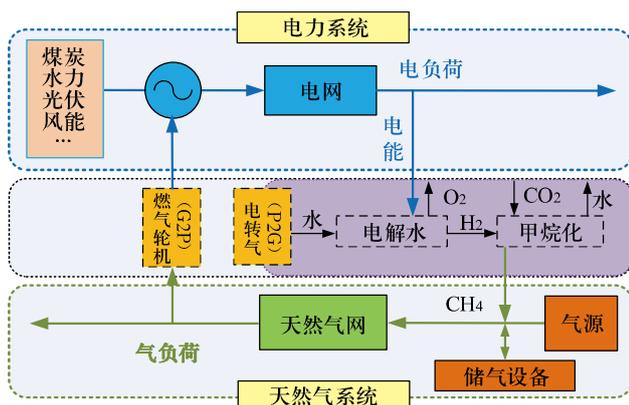


图1 电-气互联综合能源系统结构图

Fig. 1 Structure of integrated electricity and gas systems

与此同时,近年来全世界发生了多起电网大停电事故,比如2015年土耳其“3·31”事故、2012年印度“7·30”和“7·31”事故、2011年美国“9·8”事故等<sup>[11-12]</sup>,这些大停电事故的影响范围巨大,引起了学者们对电网安全运行的关注。能源互联网是未来电网发展的趋势,IEGS作为能源互联网的基础和过渡<sup>[1]</sup>,为保障电网安全运行和充分利用可再生能源提供了新思路。

分别对两网进行研究的分析方法可能难以满足IEGS运行的可靠性和经济性,因此将两网视为一个整体展开研究具有重要意义。

本文对电-气互联系统潮流优化与安全性相关研究现状进行了梳理:首先,介绍电转气技术的研究及应用现状;然后,介绍IEGS潮流优化相关研究情况,

总结统一潮流模型建模和求解方法,分析建模中还可进一步完善提高的关键点,归纳IEGS的规划、运行调度、最优潮流计算等方面的研究现状;最后,分析了IEGS运行安全性方面的主要研究现状并进行了展望。

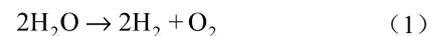
## 1 电转气技术研究现状

电力系统与天然气系统的耦合与互动是电-气互联系统的典型物理现象和跨区级连的关键组件。对电转气技术进行深入分析与研究有利于厘清电气互联系统的耦合关系。

电转气技术最早由德国提出,即在可再生能源或电网功率富余时将多余的电能转化为氢气或天然气,并进行储存或注入天然气管道中。根据转化气体种类,可分为电转氢气和电转天然气两种。

### 1) 电转氢气

电转氢气是通过电解水实现的,能量转换效率一般为75%~85%<sup>[14-15]</sup>。电解水反应的方程式如式(1)所示。

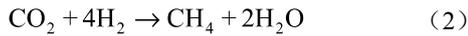


电解水制氢方法主要有三种:①碱性电解水制氢;②固体聚合物电解水制氢;③高温固体氧化物电解水制氢。目前相对成熟的是前两种方法。第一种方法的技术最成熟、成本最低,但是其灵活性欠缺,最小负荷限制在20%~40%之间<sup>[16]</sup>。第二种方法成本较高,但是得到的氢气和氧气的纯度更高,灵活性也更高,负荷可为0~100%。第三种属于高温电解技术,是直接对气态水进行电解,其能量转换效率是最高的,可达85%~95%<sup>[17]</sup>。但是该技术目前还在研究阶段,尚未工程化应用。

电解水直接生成氢气虽然能量转化效率较高,但是实际中也存在一些限制。一方面,如果氢气直接大量注入天然气管道,容易使管道出现渗透和氢脆现象,因此其注入比例受到严格限制,如德国规定天然气管道中氢气的比重不能高于5%,美国规定不得高于10%等<sup>[14]</sup>,也有用户要求氢气含量不得高于2%<sup>[18]</sup>。另一方面,氢气的能量密度仅为甲烷的25%左右,当两者能量相同时氢气的体积更大,存储和运输更为困难<sup>[19]</sup>。

### 2) 电转天然气

电转天然气是在经过电解水产生氢气后,进一步在加压加温的环境下进行甲烷化反应,即将氢气与二氧化碳进行反应产生天然气和水。其反应的方程式如式(2)所示。



甲烷化过程的转换效率大约为75%~80%<sup>[14-15]</sup>, 该过程中所需要的二氧化碳可来自于火电厂废气, 因此有助于实现碳减排目标。目前, 电转天然气的电解水和甲烷化两阶段的综合效率大约为60%~70%<sup>[20]</sup>。电转气的额定功率可达到吉瓦级, 其产生的甲烷可以直接注入天然气管道, 也可进行大容量、长距离的输送以及大规模、长时间的存储<sup>[13]</sup>。

目前, 部分国家已经开展了电转气的试点工程, 其中德国在这方面的研究较多。文献[13, 16]总结了全世界范围内一些电转气的试点工程的情况, 并对未来的研究方向进行了展望。文献[17]对高温电解类电解技术进行了详细介绍并分析了其应用前景, 同时指出当电解与甲烷化共同集成在高温电解池内时可以共电解直接合成甲烷, 有望将电转天然气的综合效率提高至94.5%。文献[19, 21]基于电网和气网的最优潮流模型, 从环境、经济等方面分析了电转气技术对电网和气网的影响和带来的益处。

## 2 IEGS优化调度研究综述

### 2.1 IEGS潮流模型研究现状

IEGS的潮流模型主要由电网模型和气网模型组成。标准的电网、气网潮流模型均属于非线性模型, 其优化计算较为不便。因此部分学者对其进行简化处理, 提出直流潮流模型或分段线性化模型等线性模型。但是线性模型在某些情况下可能准确性欠佳。近些年, 随着凸优化的快速发展, 诸多学者都开始研究电网或气网的凸松弛模型。

二阶锥规划(second order cone programming, SOCP)<sup>[22-23]</sup>是凸优化的一种, 其求解效率高, 求解结果稳定以及具备全局寻优能力。由于电网的交流潮流模型可以被转化为SOCP模型并进行快速、准确的潮流优化, 在常规交流电网的最优潮流计算<sup>[24-27]</sup>以及无功优化<sup>[28-30]</sup>等诸多问题中, 学者们开展了较多研究, 并验证了二阶锥松弛应用于电网潮流优化的准确性和可行性。因此对于IEGS, 其电网部分依然可以沿用常规电网的SOCP模型。

对于气网, 其潮流模型的非凸非线性主要来源于Weymouth方程:

$$f_{mn} = \text{sgn}(\pi_m - \pi_n) C_{mn} \sqrt{\text{sgn}(\pi_m - \pi_n)(\pi_m^2 - \pi_n^2)} \quad (3)$$

式中:  $\text{sgn}(\pi_m - \pi_n)$ 为符号函数,  $\pi_m > \pi_n$ 时为1,  $\pi_m < \pi_n$ 时为-1;  $f_{mn}$ 为输气管 $mn$ 的流量;  $\pi_m$ 和 $\pi_n$ 为输气管 $mn$ 两端的压力;  $C_{mn}$ 为管道 $mn$ 的管道常数。

在天然气网的潮流优化问题中, 直接基于该非线性方程建立的非线性模型会导致求解耗时且优化效果欠佳, 因此有部分学者基于二阶锥松弛对Weymouth方程进行近似处理, 将非线性模型转化为SOCP模型, 以加快求解速度并获得更优的结果。

#### 1) 单向二阶锥松弛模型

在已知管道中天然气的流动方向时, Weymouth方程中管道两端压力大小为已知量, 因此式(3)可以简化为单向方程(4)。部分文献基于单向的管道方程构建了相应的二阶锥凸松弛模型进行潮流优化研究。

$$f_{mn}^2 + C_{mn}^2 \pi_n^2 = C_{mn}^2 \pi_m^2 \quad \pi_m > \pi_n \quad (4)$$

文献[31-33]对式(4)进行了二阶锥松弛, 构建了如式(5)所示的二阶锥模型, 然后用式(5)替换式(3)进行潮流优化, 将原NLP问题转化为SOCP问题求解, 显著降低了求解复杂度。

$$\left\| \begin{matrix} f_{mn} \\ C_{mn} \pi_n \end{matrix} \right\|_2 \leq C_{mn} \pi_m \quad \pi_m > \pi_n \quad (5)$$

为了保证二阶锥松弛的严格性, 文献[33]提出基于松弛间隙判断松弛是否足够紧。如果松弛间隙过大而不满足要求, 就通过添加割集约束重新求解模型, 反复迭代求解直至松弛间隙能够满足要求为止, 以保证解的全局最优性。但是这样会导致需要反复求解模型, 将大大增加求解时间。

#### 2) 双向二阶锥松弛模型

文献[34-35]也基于相同的思路构建了天然气管道流量的二阶锥模型, 额外引入了代表天然气流动方向的0-1二元型变量, 使得模型可以囊括天然气在管道中双向流动的情况。文献[34-35]构造的双向二阶锥凸松弛模型如式(6)~(9)所示。

$$(1/C_{mn})^2 f_{mn}^2 \leq T_{mn} \quad (6)$$

$$\begin{cases} T_{mn} \leq \pi_n - \pi_m + (I_{mn}^+ - I_{mn}^- + 1)(\pi_m^{\max} - \pi_n^{\min}) \\ T_{mn} \leq \pi_m - \pi_n + (I_{mn}^+ - I_{mn}^- - 1)(\pi_m^{\min} - \pi_n^{\max}) \\ T_{mn} \geq \pi_n - \pi_m + (I_{mn}^+ - I_{mn}^- + 1)(\pi_m^{\min} - \pi_n^{\max}) \\ T_{mn} \geq \pi_m - \pi_n + (I_{mn}^+ - I_{mn}^- - 1)(\pi_m^{\max} - \pi_n^{\min}) \end{cases} \quad (7)$$

$$-(1 + I_{mn}^+) f_{mn}^{\max} \leq f_{mn} \leq (1 - I_{mn}^-) f_{mn}^{\max} \quad (8)$$

$$I_{mn}^+ + I_{mn}^- = 1 \quad I_{mn}^+, I_{mn}^- \in \{0, 1\} \quad (9)$$

式中:  $I_{mn}^+$ 、 $I_{mn}^-$ 为表示管道流量方向的辅助0-1二元型变量;  $T_{mn}$ 为表示管道两端压力差的辅助变量。

在上述双向二阶锥松弛模型中, 由于引入了0-1二元型辅助变量, 使得该模型为混合整数二阶锥规划

(mixed integer SOCP, MISOCP) 模型, 计算复杂度较高, 其计算效率可能不如单向的SOCP模型。

文献[35-36]指出, 对天然气网潮流模型应用二阶锥松弛的严格性难以保证, 在某些情况下可能会有很大的误差。因此, 为了使得二阶锥松弛更紧, 文献[35-36]将凸松弛对应的凹约束引入模型中, 构建了MISOCP-C优化模型并基于连续锥优化方法进行多轮次的迭代求解。但是由于所构建的模型为MISOCP模型, 采用连续锥优化方法求解的收敛性难以保证, 尤其是当0-1二元型变量个数较多时, 其求解将更为困难。

上述文献表明, 越来越多的学者开始关注电网以及气网潮流模型的建立, 并取得了阶段性的成果。但是气网SOCP模型的严格性未得到验证, 可能会导致较大误差。

## 2.2 IEGS潮流优化研究现状

目前对IEGS的潮流优化的相关研究主要集中在规划<sup>[37-39]</sup>、运行调度<sup>[40-44]</sup>、最优潮流计算<sup>[45]</sup>等方面。

在IEGS的潮流优化相关研究方面, 文献[46]构建了IEGS的统一稳态潮流模型并基于牛顿-拉夫逊法求解, 同时考虑了温度对天然气网运行的影响。文献[47]提出了IEGS的双层经济优化调度模型, 基于灵敏度计算气网管道流量并构建气网优化上层模型, 基于电网DC潮流模型构建电网优化下层模型并转化为单层的MILP模型求解。文献[48]从经济和环保两个角度出发, 研究了IEGS的日前调度问题, 其中天然气网潮流基于分段线性化的稳态潮流模型计算。文献[49]构建了IEGS中利用电转气和燃气发电机进行削峰填谷的NLP潮流优化模型, 在兼顾系统经济性的前提下达到有效抑制负荷波动以及减少弃风的目标。文献[50]基于电网DC潮流模型和气网分段线性化模型构建了IEGS的安全约束最优潮流MILP模型, 假设故障后IEGS瞬间达到稳态, 根据灵敏度计算出故障后IEGS稳态潮流, 约束该稳态潮流需满足安全约束条件。文献[42]在详细分析热网与气网动态特性基础上, 提出一种同时考虑气、热网络动态特性的电-气-热互联系统日前优化调度模型。文献[43]考虑天然气管网的慢动态特性以及暂态天然气系统变量时段耦合特性, 提出了一种基于模型预测控制的多时间尺度优化调度策略。文献[44]将电转气(power-to-gas, P2G)细分为电转氢气和电转天然气, 建立了P2G精细化模型, 在源侧采用鲁棒优化的工程博弈模型处理风电不确定性, 在荷侧利用随机优化方法处理负荷不确定性, 构建了

一种计及电转气精细化模型的综合能源系统鲁棒随机优化调度模型。

## 3 IEGS运行安全性研究综述

### 3.1 IEGS安全性评估研究现状

目前, 基于潮流计算分析IEGS安全性的研究方面, 部分文献分析了一种能源网络的变化对另一能源网络安全性的影响, 也有文献研究了IEGS运行的安全域。

文献[51]从多个角度讨论了天然气网对电网的影响, 包括燃气价格对电网发电计划制定的影响, 天然气网故障对电网运行的影响, 以及削弱电-气耦合关系时新能源系统对电网安全的影响。文献[52]基于对气网和电网分别进行稳态潮流计算的分立求解方法分析了天然气网气质改变、负荷调节等变化对IEGS运行的影响。文献[53]基于IEGS的统一潮流模型提出了电网节点注入功率对气网节点压力灵敏度的计算方法, 并基于此分析电网功率变化对气网安全性的影响, 快速寻找气网薄弱环节。文献[54]将电网安全域的概念拓展到IEGS系统, 通过反复的能量流计算确定安全域边界的临界点, 然后基于超平面近似方法进一步确定安全域, 但是未校验是否满足 $N-1$ 约束。文献[55-56]基于能源集线器模型构建综合能源系统模型, 并基于分层解耦优化框架分析最优能量流以及最优负荷削减方案, 提出了面向综合能源系统的可靠性评估方法, 并基于状态枚举法提高可靠性评估速度。

### 3.2 IEGS安全校正研究现状

在IEGS预防-校正混合控制方面, 文献[11]将针对关键故障集的预防控制策略研究作为主问题, 将非预想故障集内其它故障的校正控制策略作为子问题, 提出了IEGS的预防-校正混合控制方法, 构建了相应的NLP优化模型并求解。但是受到NLP模型的限制, 所提方法的计算时间较长, 并且其优化所得方案通常为局部最优解。

安全校正作为维持系统安全稳定运行的重要调控手段, 其研究的主要内容是当系统因发生故障而处于紧急状态时, 如何在允许的校正控制时间内进行发电机功率的再调整或切负荷, 以使得电网能够重新过渡至正常状态。对于故障导致线路跳闸的情况, 由于该支路的潮流会重新分配至其他线路, 可能会使其他线路出现潮流越限。此时如不能及时重新分配发电机的

功率或者切除负荷,可能会导致进一步的潮流越限<sup>[57]</sup>及线路跳闸<sup>[58]</sup>,而进一步的线路开断又会加重过载程度和连锁反应速度<sup>[59]</sup>。故而,在过载程度较轻且有更多时间可用于实施校正措施的故障早期更容易消除潮流越限。因此,制定合理且能被快速实施的安全校正方案对保障系统安全运行意义显著。

目前,常规电网安全校正策略在制定安全校正方案时未评估校正方案对天然气网的影响,也未充分利用两种能源网络间互补特性对电网安全校正提供助益。事实上,当电网故障导致部分输电通道潮流严重越限而不得不切除部分负荷以及大量弃风时,可将富余的电能转化为天然气,利用气网的输送能力将天然气送至负荷近区的燃气发电机进行发电,然后经过轻载的电网线路重新供应给负荷,这样能够在消除电网越限的同时,减少切电负荷和弃风。因此,未来进一步研究协同安全校正策略对于保障IEGS安全运行以及实现以最小的校正代价消除电网越限有重要意义。

## 4 结论与展望

能源是人类生存发展的必要资源,电能作为二次能源中最重要的一种优质能源,是关系国计民生的重要物质基础。电力系统作为电能传输的重要载体,其安全稳定运行是人民正常生活和社会经济发展的重要保障。在当前“工业4.0”和“互联网+”的潮流推动下,能源互联网是电网发展的必然趋势,IEGS作为能源互联网的基础和过渡,其规划、运行调度等一直是研究热点。本文主要针对IEGS潮流优化与安全性研究做了介绍,并探讨了IEGS统一潮流模型建立以及系统安全性方面值得深入研究的问题。

能源互联网是未来能源行业发展的重要趋势,而多能流耦合是能源互联网的重要特征之一。在能源系统潮流优化方面,针对现有的多能流系统线性模型部分情况下准确性欠佳的缺陷,有必要进一步研究能够快速准确计算气网潮流的数学模型,并在此基础上建立IEGS的统一潮流模型。而在IEGS运行安全性方面,可以进一步开展考虑电-气双向耦合的协同安全校正策略研究。充分利用两种能源网络间的互补特性,在电网故障后输送能力受限、不得不切电负荷或弃风时,利用电-气双向耦合关系将能源通过气网进行输送,对电网安全运行提供支撑,减少电负荷切除量和弃风。这不仅有助于降低校正代价,亦能够提高能源的综合利用效率。

## 参考文献

- [1] 黄武靖, 张宁, 董瑞彪, 等. 构建区域能源互联网:理念与实践[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(2): 103-111.  
Huang Wujing, Zhang Ning, Dong Ruibiao, et al. Construction of regional energy internet: concept and practice[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(2): 103-111(in Chinese).
- [2] 中华人民共和国国务院. 关于促进天然气协调稳定发展的若干意见(国发[2018]31号)[EB/OL]. [2019-3-21]. [http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-09/05/content\\_5319419.htm](http://www.gov.cn/zhengce/content/2018-09/05/content_5319419.htm).
- [3] 孙宏斌, 潘昭光, 郭庆来. 多能流能量管理研究: 挑战与展望[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(15): 1-8.  
Sun Hongbin, Pan Zhaoguang, Guo Qinglai. Energy management for multi-energy flow: challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(15): 1-8(in Chinese).
- [4] 陈皓勇, 文俊中, 王增煜, 等. 能量网络的传递规律与网络方程[J]. 西安交通大学学报, 2014, 48(10): 66-76.  
Chen Haoyong, Wen Junzhong, Wang Zengyu, et al. Transfer laws and equations of energy networks[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(10):66-76(in Chinese).
- [5] 梅生伟, 李瑞, 黄少伟, 等. 多能互补网络建模及动态演化机理初探[J]. 全球能源互联网, 2018, 1(1): 10-22.  
Mei Shengwei, Li Rui, Huang Shaowei, et al. Preliminary investigation on the modeling and evolutionary analytics of multi-carrier energy systems[J]. Journal of Global Energy Interconnection, 2018, 1(1): 10-22(in Chinese).
- [6] Liu C, Shahidehpour M, Wang J. Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures with a transient model for natural gas flow[J]. Chaos, 2011, 21(21): 599-606.
- [7] Correa-posada C M, Sanchez-martin P. Integrated power and natural gas model for energy adequacy in short - term operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2015, 30(6):3347-3355.
- [8] 孔令国. 风光氢综合能源系统优化配置与协调控制策略研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.  
Kong Lingguo. Research on optimal sizing and coordinated control strategy of integrated energy system of wind photovoltaic and hydrogen[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017(in Chinese).
- [9] 孙娟, 卫志农, 孙国强, 等. 计及P2H的电-热互联综合能源系统概率能量流分析[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(6): 62-68.  
Sun Juan, Wei Zhinong, Sun Guoqiang, et al. Analysis of probabilistic energy flow for integrated electricity-heat energy system with P2H[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(6): 62-68(in Chinese).
- [10] 陈娟伟, 余涛, 许悦, 等. 气电耦合综合能源系统供电可靠性评估解析算法[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(24): 59-69.  
Chen Juanwei, Yu Tao, Xu Yue, et al. Analytic method for power supply reliability assessment of electricity-gas coupled

- energy system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(24): 59-69(in Chinese).
- [11] 梅建春, 卫志农, 张勇, 等. 考虑关键故障筛选的电-气互联综合能源系统混合控制方法[J]. *电网技术*, 2019, 43(1): 23-33.  
Mei Jianchun, Wei Zhinong, Zhang Yong, et al. Hybrid control of integrated power and gas energy systems based on significant contingency screening[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(1):23-33(in Chinese).
- [12] 周孝信, 陈树勇, 鲁宗相, 等. 能源转型中我国新一代电力系统的技术特征[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(7): 1893-1904.  
Zhou Xiaoxin, Chen Shuyong, Lu Zongxiang, et al. Technology features of the new generation power system in China[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(7): 1893-1904(in Chinese).
- [13] 窦迅, 赵文浩, 郎伊紫禾, 等. 计及电转气技术的天然气-电力耦合系统运行研究综述[J]. *电网技术*, 2019, 43(1): 165-173.  
Dou Xun, Zhao Wenhao, Lang Yizihe, et al. A review of operation of natural gas-electricity coupling system considering power-to-gas technology[J]. *Power System Technology*, 2019, 43(1): 165-173(in Chinese).
- [14] 陈沼宇. 考虑P2G多源储能型微网日前最优经济调度策略研究[D]. 天津: 天津大学, 2017.  
Chen Zhaoyu. Research on optimal day-ahead economic dispatching strategy for microgrid considering P2G and multi-source energy storage system[D]. Tianjin: Tianjin University, 2017(in Chinese).
- [15] 周任军, 肖钧文, 唐夏菲, 等. 电转气消纳新能源与碳捕集电厂碳利用的协调优化[J]. *电力自动化设备*, 2018, 38(7): 61-67.  
Zhou Renjun, Xiao Junwen, Tang Xiafei, et al. Coordinated optimization of carbon utilization between power-to-gas renewable energy accommodation and carbon capture power plant[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2018, 38(7): 61-67(in Chinese).
- [16] Gahleitner G. Hydrogen from renewable electricity: an international review of power-to-gas pilot plants for stationary applications[J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2013, 38(5): 2039-2061.
- [17] 邢学韬, 林今, 宋永华, 等. 基于高温电解的大规模电力储能技术[J]. *全球能源互联网*, 2018, 1(3): 303-312.  
Xing Xuetao, Lin Jin, Song Yonghua, et al. Large scale energy storage technology based on high-temperature electrolysis[J]. *Journal of Global Energy Interconnection*, 2018, 1(3): 303-312(in Chinese).
- [18] 许志恒, 张勇军, 陈泽兴, 等. 考虑运行策略和投资主体利益的电转气容量双层优化配置[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(13): 76-84.  
Xu Zhiheng, Zhang Yongjun, Chen Zexing, et al. Bi-level optimal capacity configuration for power to gas facilities considering operation strategy and investment subject benefit[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(13): 76-84(in Chinese).
- [19] Clegg S, Mancarella P. Storing renewables in the gas network: modelling of power-to-gas seasonal storage flexibility in low-carbon power systems[J]. *IET Generation, Transmission & Distribution*, 2016, 10(3): 566-575.
- [20] 董帅, 王成福, 梁军, 等. 计及电转气运行成本的综合能源系统多目标日前优化调度[J]. *电力系统自动化*, 2018, 42(11): 8-15.  
Dong Shuai, Wang Chengfu, Liang Jun, et al. Multi-objective optimal day-ahead dispatch of integrated energy system considering power-to-gas operation cost[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2018, 42(11): 8-15(in Chinese).
- [21] Clegg S, Mancarella P. Integrated modeling and assessment of the operational impact of power-to-gas (P2G) on electrical and gas transmission networks[J]. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2015, 6(4): 1234-1244.
- [22] Ben-Tal A, Nemirovski A. On polyhedral approximations of the second-order cone[J]. *Mathematics of Operations Research*, 2001, 26(2): 193-205.
- [23] Alizadeh F, Goldfarb D. Second-order cone programming[J]. *Mathematical Programming*, 2003, 95(1): 3-51.
- [24] Li N, Chen L, Low S H. Exact convex relaxation of OPF for radial networks using branch flow model[C]// *IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications*, Tainan, 2012: 7-12.
- [25] Farivar M, Low S H. Branch flow model: relaxations and convexification-part I[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 2554-2564.
- [26] Farivar M, Low S H. Branch flow model: relaxations and convexification-part II[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2013, 28(3): 2565-2572.
- [27] Baradar M, Hesamzadeh M R. AC power flow representation in conic format[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2015, 30(1): 546-547.
- [28] 郭清元, 吴杰康, 莫超, 等. 基于混合整数二阶锥规划的新能源配电网电压无功协同优化模型[J]. *中国电机工程学报*, 2018, 38(5): 1385-1396.  
Guo Qingyuan, Wu Jiekang, Mo Chao, et al. A model for multi-objective coordination optimization of voltage and reactive power in distribution networks based on mixed integer second-order cone programming[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2018, 38(5): 1385-1396(in Chinese).
- [29] 赖晓文, 马晓伟, 白杨, 等. 基于混合整数二阶锥规划的动态无功优化方法[J]. *电力系统自动化*, 2017, 41(17): 37-42.  
Lai Xiaowen, Ma Xiaowei, Bai Yang, et al. Dynamic reactive power optimization method based on mixed integer second-order cone programming[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2017, 41(17): 37-42(in Chinese).

- [30] 刘一兵, 吴文传, 张伯明, 等. 基于混合整数二阶锥规划的主动配电网有功-无功协调多时段优化运行[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(16): 2575-2583.  
Liu Yibing, Wu Wenchuan, Zhang Boming, et al. A mixed integer second-order cone programming based active and reactive power coordinated multi-period optimization for active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(16): 2575-2583(in Chinese).
- [31] Fan J, Tong X, Zhao J. Unified optimal power flow model for AC/DC grids integrated with natural gas systems considering gas-supply uncertainties[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2018, 6(6): 1193-1203.
- [32] Wang C, Wei W, Wang J, et al. Convex optimization based distributed optimal gas-power flow calculation[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2018, 9(3): 1145-1156.
- [33] 张博文, 孙永辉, 张世达. 基于SOCP的综合能源系统日前调度概率最优能量流[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(6): 25-36.  
Zhang Bowen, Sun Yonghui, Zhang Shida. Second-order cone programming based probabilistic optimal energy flow of day-ahead dispatch for integrated energy system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(6): 25-36(in Chinese).
- [34] Borraz-Sánchez C, Bent R, Backhaus S, et al. Convex relaxations for gas expansion planning[J]. INFORMS Journal on Computing, 2016, 28(4): 645-656.
- [35] He Y, Yan M, Shahidehpour M, et al. Decentralized optimization of multi-area electricity-natural gas flows based on cone reformulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(4): 4531-4542.
- [36] 张伊宁, 何宇斌, 晏鸣宇, 等. 计及需求响应与动态气潮流的电-气综合能源系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(20): 1-10.  
Zhang Yining, He Yubin, Yan Mingyu, et al. Optimal dispatch of integrated electricity-natural gas system considering demand response and dynamic natural gas flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(20): 1-10(in Chinese).
- [37] Zhao B, Conejo A J, Sioshansi R. Coordinated expansion planning of natural gas and electric power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2018, 33(3): 3064-3075.
- [38] Yuan H, Bie Z, Tao D, et al. An NSGA-II based multi-objective optimization for combined gas and electricity network expansion planning[J]. Applied Energy, 2016, 167: 280-293.
- [39] Chaudry M, Jenkins N, Qadrdan M, et al. Combined gas and electricity network expansion planning[J]. Applied Energy, 2014, 113(6): 1171-1187.
- [40] Zhang X, Shahidehpour M, Alabdulwahab A, et al. Hourly electricity demand response in the stochastic day-ahead scheduling of coordinated electricity and natural gas networks[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2016, 31(1): 592-601.
- [41] Bai L, Li F, Cui H, et al. Interval optimization based operating strategy for gas-electricity integrated energy systems considering demand response and wind uncertainty[J]. Applied Energy, 2016, 167: 270-279.
- [42] 董帅, 王成福, 徐士杰, 等. 计及网络动态特性的电-气-热综合能源系统日前优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 12-19.  
Dong Shuai, Wang Chengfu, Xu Shijie, et al. Day-ahead optimal scheduling of electricity-gas-heat integrated energy system considering dynamic characteristics of networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 12-19(in Chinese).
- [43] 梅建春, 卫志农, 张勇, 等. 电-气互联综合能源系统多时间尺度动态优化调度[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 36-42.  
Mei Jianchun, Wei Zhinong, Zhang Yong, et al. Dynamic optimal dispatch with multiple time scale in integrated power and gas energy systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 36-42(in Chinese).
- [44] 朱兰, 王吉, 唐陇军, 等. 计及电转气精细化模型的综合能源系统鲁棒随机优化调度[J]. 电网技术, 2019, 43(1): 116-126.  
Zhu Lan, Wang Ji, Tang Longjun, et al. Robust stochastic optimal dispatching of integrated energy systems considering refined power-to-gas model[J]. Power System Technology, 2019, 43(1): 116-126(in Chinese).
- [45] 张思德, 胡伟, 卫志农, 等. 基于机会约束规划的电-气互联综合能源系统随机最优潮流[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(9): 121-128.  
Zhang Side, Hu Wei, Wei Zhinong, et al. Stochastic optimal power flow of integrated power and gas energy system based on chance-constrained programming[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(9): 121-128(in Chinese).
- [46] Martinez-Mares A, Fuente-Esquivel C R. 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.
- [47] 张儒峰, 姜涛, 李国庆, 等. 考虑电转气消纳风电的电-气综合能源系统双层优化调度[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(19): 5668-5678.  
Zhang Rufeng, Jiang Tao, Li Guoqing, et al. Bi-level optimization dispatch of integrated electricity-natural gas systems considering P2G for wind power accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(19): 5668-5678(in Chinese).
- [48] 刘继春, 周春燕, 高红均, 等. 考虑氢能-天然气混合储能电-气综合能源微网日前经济调度优化[J]. 电网技术, 2018, 42(1): 170-179.  
Liu Jichun, Zhou Chunyan, Gao Hongjun, et al. A day-ahead economic dispatch optimization model of integrated electricity-natural gas system considering hydrogen-gas energy storage system in microgrid[J]. Power System Technology, 2018, 42(1): 170-179(in Chinese).
- [49] 卫志农, 张思德, 孙国强, 等. 计及电转气的电-气互联综

- 合能源系统削峰填谷研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16): 4601-4609.
- Wei Zhinong, Zhang Side, Sun Guoqiang, et al. Power-to-gas considered peak load shifting research for integrated electricity and natural-gas energy systems[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(16): 4601-4609(in Chinese).
- [50] Correa-Posada C M, Sanchez-Martin P. Security-constrained optimal power and natural-gas flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(4): 1780-1787.
- [51] Shahidepour M, Fu Y, Wiedman T. Impact of natural gas infrastructure on electric power systems[J]. IEEE Proceedings, 2005, 93(5): 1042.
- [52] 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): 1293-1305.
- Wang Weiliang, Wang Dan, Jia Hongjie, et al. Steady state analysis of electricity-gas regional integrated energy system with consideration of NGS network status[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1293-1305(in Chinese).
- [53] 骆柏锋, 穆云飞, 赵波, 等. 基于统一潮流模型的电-气耦合综合能源系统静态灵敏度分析[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(13): 29-35.
- Luo Bofeng, Mu Yunfei, Zhao Bo, et al. Static sensitivity analysis of integrated electricity and gas system based on unified power flow model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 29-35(in Chinese).
- [54] Sheng C, Wei Z, Sun G, et al. Steady-state security regions of electricity-gas integrated energy systems[C]// IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Boston, MA, 2016.
- [55] Lei Y, Hou K, Wang Y, et al. A new reliability assessment approach for integrated energy systems: using hierarchical decoupling optimization framework and impact-increment based state enumeration method[J]. Applied Energy, 2018, 210: 1237-1250.
- [56] 侯恺. 电力系统可靠性评估方法改进与应用研究[D]. 天津: 天津大学, 2016.
- Hou Kai. Power system reliability assessment methodology improvement and its application[D]. Tianjin: Tianjin University, 2016(in Chinese).
- [57] Li B, Sansavini G. Effective multi-objective selection of inter-subnetwork power shifts to mitigate cascading failures[J]. Electric Power Systems Research, 2016, 134: 114-125.
- [58] Andersson G, Donalek P, Farmer R, et al. Causes of the 2003 major grid blackouts in North America and Europe, and recommended means to improve system dynamic performance[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2005, 20(4): 1922-1928.
- [59] Sforza M, Delfanti M. Overview of the events and causes of the 2003 Italian blackout[C]// IEEE PES Power Systems Conference and Exposition, Atlanta, GA, 2006: 301-308.

收稿日期: 2019-06-14; 修回日期: 2019-07-31。



林涛

作者简介:

林涛(1969), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统运行与控制、电力系统继电保护、新能源发电与智能电网、电能质量分析与控制, E-mail: tlin@whu.edu.cn。

毕如玉(1991), 女, 博士, 研究方向为电力系统运行与控制, E-mail: biruyu@sina.com。

杜蕙(1994), 女, 博士研究生, 研究方向为电力系统运行与控制, E-mail: duhui1994@hotmail.com。

徐遐龄(1980), 女, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行与控制, E-mail: xuxialing@foxmail.com。

(责任编辑 李锡)