电-气互联综合能源系统安全分析与优化控制研究综述

陈 胜[1],卫志农[1],孙国强[1],王 丹[2],臧海祥[1]
(1. 河海大学 能源与电气学院,江苏 南京 211100;2. 天津大学 智能电网教育部重点实验室,天津 300072)

摘要:综合能源系统为提高能源利用效率、多能互补及构建低碳可持续能源系统奠定了基础,然而值得注意的是,深度耦合的多能源系统亦面临着不可忽视的运行风险,尤其当耦合系统之间缺乏有效的协同安全控制策略。鉴于此,综述了电-气互联综合能源系统安全分析与优化控制研究,介绍了电-气互联综合能源系统稳态与暂态潮流模型,包括非线性、线性及凸松弛模型;介绍了电-气互联综合能源系统安全分析研究,包括状态估计、安全评估、可靠性分析及韧性分析;介绍了电-气互联综合能源系统优化控制研究,提出了多时段滚动预防与校正控制模型;展望了电-气互联综合能源系统安全分析与优化控制未来可深入研究的方向。

关键词:电-气互联综合能源系统;运行风险;稳态潮流模型;暂态潮流模型;安全分析;优化控制
中图分类号:TM 73;TK 01 **文献标志码:**A DOI:10.16081/j.epae.201908025

0 引言

当前世界范围内日益增长的能源需求与环境生态保护之间矛盾凸显,提高能源利用效率,寻求替代性新能源已成为世界各国能源变革的必经之路。美国能源信息管理局(EIA)发布的2019年世界能源展望[1]中提及2018—2050年间新能源发电占比将从18%增长至31%,燃气轮机发电占比将从34%增长至39%,而燃煤机组的发电占比将从28%下降至17%。因此,新能源与燃气轮机将在未来能源系统中承担更为关键的角色。值得注意的是,灵活的燃气轮机组为平抑间歇性新能源出力提供了保障;另一方面,对于电网难以消纳的新能源出力,可将其通过电转气(P2G)技术[2-5]转化为天然气/氢气大规模存储于天然气管道中。因此,新能源的大规模并网与燃气轮机/P2G逐步推广相辅相成。

在燃气轮机逐步并网与P2G的潜在应用的背景下,电力系统与天然气系统逐步呈现深度耦合的趋势。鉴于此,有必要打破二者之间传统独立规划与运行的模式,构建充分协同的电-气互联综合能源系统[6-10],以提高能源利用效率,实现系统间的灵活运行与多能互补。当前研究已定量验证了综合能源系统协同规划与运行的经济价值[11-15]。

综合能源系统给低碳可持续能源系统的构建带来了新的机会,然而值得注意的是,其也不可避免地造成了潜在的运行风险。下面笔者采用当前工业界中的3个案例阐述该运行风险。

收稿日期:2019-04-10;**修回日期:**2019-06-19
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51877071);江苏省自然科学基金资助项目(BK20171433)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51877071) and the Natural Science Foundation of Jiangsu Province(BK20171433)

(1)美国西南部德克萨斯州与新墨西哥州的大停气(电)事件(2011年2月)[16]:本次事故导致130万用户失去了电力供应,超过400万用户供电受到了影响,地区配气公司中断了超过5万户商业及居民的供气服务。事故发生时气负荷达到峰值,此时天然气系统安全裕度较小(气源供应达到上限值,储气罐和管道管存储量较少),恰好气井、管道发生了故障,导致大量气负荷(尤其是签订可中断供气合同的燃气轮机组)被切除,事故从气网蔓延至电网,大量电源的缺失进一步引发电网的切负荷,迫使电力驱动加压站退出运行,即事故又重新通过耦合元件传播至天然气系统,进一步加重天然气系统的故障,如此反复引发连锁故障。该事故本身起源于天然气系统,但由于电力系统与天然气系统之间的深度耦合,同时二者之间缺少协调统一的预防/校正控制策略,单一故障进一步引发了系统间的连锁故障。

(2)洛杉矶大规模燃气泄漏(2015年10月至2016年2月)[17]:洛杉矶在2015年10月至2016年2月间泄漏了10万吨天然气,导致洛杉矶盆地燃气电厂拉闸限电,影响数百万用户长达14 d;另一方面,南加州地区严重依赖燃气轮机组平抑间歇性新能源大范围波动,燃气轮机组在短时间内快速爬坡导致天然气管道压力低于最小阈值,进而引起气网设备故障。

(3)台湾地区最大规模停电事故(2017年2月)[18]:事故起源于中油人员误操作导致天然气中断,损失4 200 MW燃气轮机组(占总负荷的11.6%),导致668万用户供电受到影响,每轮停电1 h,部分用户停电2轮。

从上述3个案例可知,当天然气系统难以为燃气轮机提供可靠的天然气供应时(尤其在燃气轮机组签订可中断供应的情况下,即供气优先级最低的情况下),易导致电力系统失去大容量的电源供应,

进而威胁电力系统的安全；另一方面，当电力系统短时间内净负荷大范围波动（气负荷急剧增加）以及加压站电力供应中断（网络输气能力急剧降低）时，易导致系统末端节点的压力低于安全阈值，从而影响天然气系统安全运行。因此，当深度耦合的电力系统与天然气系统之间缺乏有效的协同运行与控制机制时，电-气互联综合能源系统将不可避免地面临较高的运行风险与挑战。在此背景下，电力系统与天然气系统之间协同统一的安全分析与优化控制不可或缺。

本文综述了电-气互联综合能源系统安全分析与优化控制的研究现状。首先介绍了电-气互联综合能源系统稳态与暂态潮流模型，然后对电-气互联综合能源安全分析与优化控制研究中存在的若干关键科学问题进行了剖析，需要说明的是，电-气互联综合能源系统潮流模型为后续安全分析的基础，而电-气互联综合能源系统安全分析则为后续的优化控制决策提供了参考，最后对未来研究进行了展望。

1 电-气互联综合能源系统稳态与暂态潮流模型

相较于电力系统，天然气系统的动态过程更为缓慢（通常持续数分钟甚至数小时）[19]。因此，对于综合能源系统运行分析，通常采用稳态电力潮流模型；而对于综合能源系统短期（日前/日内/实时）运行分析，需采用暂态天然气潮流模型。本文将侧重介绍稳态与暂态天然气潮流模型（包括非线性、线性和凸松弛模型），稳态电力潮流模型不再赘述。

1.1 天然气稳态潮流模型

天然气系统的稳态运行约束包括[20]：

$$\sum_{e\in\Psi_m^{\mathrm{L}}}F_e^{\mathrm{L}}-\sum_{w\in\Psi_m^{\mathrm{S}}}F_w^{\mathrm{S}}+\sum_{k\in C(m)}\theta_kF_k^{\mathrm{C}}+\sum_{n\in G(m)}F_{mn}+\sum_{k\in C(m)}F_k^{\mathrm{C}}=0 \tag{1}$$

$$F_{mn}\left|F_{mn}\right|/C_{mn}^2=\pi_m^2-\pi_n^2 \tag{2}$$

$$\pi_k^{\mathrm{in}}\rho_k^{\mathrm{C,min}}\leqslant\pi_k^{\mathrm{out}}\leqslant\pi_k^{\mathrm{in}}\rho_k^{\mathrm{C,max}} \tag{3}$$

$$0\leqslant F_k^{\mathrm{C}}\leqslant F_k^{\mathrm{C,max}} \tag{4}$$

$$0\leqslant F_w^{\mathrm{S}}\leqslant F_w^{\mathrm{S,max}} \tag{5}$$

$$\pi_m^{\mathrm{min}}\leqslant\pi_m\leqslant\pi_m^{\mathrm{max}} \tag{6}$$

其中，下标e为气负荷；下标w为气源；下标k为加压站；下标m、n为天然气节点；Ψ_m^{L}为与节点m相连的气负荷集合；Ψ_m^{S}为与节点m相连的气源集合；$G(m)$为与节点m相连的管道集合；$C(m)$为与节点m相连的加压站集合；F_e^{L}为气负荷e的需求量；F_w^{S}为气源w的供应量；F_k^{C}为加压站k的传输流量；F_{mn}为管道m-n的流量；θ_k为天然气驱动加压站k的能量转化效率；C_{mn}为管道m-n的Weymouth常数；π_m、π_n分别为节点m、n的压力值；π_k^{out}、π_k^{in}分别为加压站k出口、入口的压力值；$\rho_k^{\mathrm{C,max}}$、$\rho_k^{\mathrm{C,min}}$分别为加压站k加压比的最大值、最小值；$F_k^{\mathrm{C,max}}$为加压站k传输流量的上限值；$F_w^{\mathrm{S,max}}$为气源w的供应容量；π_m^{max}、π_m^{min}分别为节点m压力的上限值、下限值。

式(1)为节点m的流量平衡方程，式(2)描述了管道m-n流量与首末端压力值的非线性函数关系，式(3)和式(4)为加压站k的运行约束，式(5)为气源w的供应约束，式(6)为节点m压力值的安全约束。

1.2 天然气暂态潮流模型

在天然气暂态潮流模型中，天然气管道的动态过程由偏微分方程描述[21]：

$$\frac{\partial F}{\partial x}+K_1\frac{\partial\pi}{\partial t}=0 \tag{7}$$

$$K_2\frac{\partial\pi^2}{\partial x}+F\left|F\right|=0 \tag{8}$$

其中，x、t分别为空间维度、时间维度；K_1、K_2为暂态方程固定参数[21]。

采用隐式有限差分法，将偏微分方程式(7)和式(8)转化为代数方程[21]：

$$\left(F_{mn,t}+F_{nm,t}\right)/l_{mn}+K_1\left(\frac{\pi_{m,t}+\pi_{n,t}}{2}-\frac{\pi_{m,t-1}+\pi_{n,t-1}}{2}\right)/1=0 \tag{9}$$

$$K_2\left(\pi_{n,t}^2-\pi_{m,t}^2\right)/l_{mn}+\overline{F}_{mn,t}\left|\overline{F}_{mn,t}\right|=0 \tag{10}$$

其中，l_{mn}为管道m-n的长度；$\overline{F}_{mn,t}=\left(F_{mn,t}+F_{nm,t}\right)/2$。差分步长为$\Delta t=1$ h，$\Delta x=l_{mn}$。

进一步定义管道m-n在t时刻的管存量$L_{mn,t}=\frac{\pi_{m,t}+\pi_{n,t}}{2}l_{mn}$，则式(9)可等价转化为式(11)；定义管道$m$-$n$的Weymouth常量$C_{mn}=\sqrt{K_2/l_{mn}}$，则式(10)可等价转化为式(12)。

$$F_{mn,t}+F_{nm,t}=K_1\left(L_{mn,t}-L_{mn,t-1}\right) \tag{11}$$

$$\overline{F}_{mn,t}\left|\overline{F}_{mn,t}\right|/C_{mn}^2=\pi_{m,t}^2-\pi_{n,t}^2 \tag{12}$$

式(11)和式(12)构成了计及管道管存的准稳态模型。相较于严格的暂态模型（即偏微分方程式(7)和式(8)），该模型（代数方程）更易于数值求解，且计及了天然气系统的慢动态过程[22]。值得注意的是，天然气管道管存对于平抑短时间尺度净负荷波动至关重要。图1为管道m-n在t时刻管存量与首末端流量示意图。当净负荷在t时刻增大时，管道压力值降低，则管道管存量减少（即$L_{mn,t}<L_{mn,t-1}$），此时管道释放部分存储的天然气量抵消气负荷的增加；当净负荷在t时刻减小时，管道压力值升高，则管道管存量增大（即$L_{mn,t}>L_{mn,t-1}$），此时管道吸收部分天然气平抑气负荷的减小。

归纳而言，计及管道管存的天然气准稳态运行约束包括：

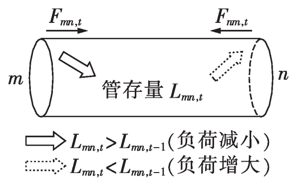

图1　管存量与首末端流量示意图

Fig.1　Schematic diagram of line-pack and gas flows at two ends of pipeline

$$\sum_{e\in\Psi_m^{\mathrm{L}}}F_{e,t}^{\mathrm{L}}-\sum_{w\in\Psi_m^{\mathrm{S}}}F_{w,t}^{\mathrm{S}}+\sum_{k\in C(m)}\theta_kF_{k,t}^{\mathrm{C}}+\sum_{n\in G(m)}F_{mn,t}+\sum_{k\in C(m)}F_{k,t}^{\mathrm{C}}=0 \tag{13}$$

$$F_{mn,t}+F_{nm,t}=K_1\left(L_{mn,t}-L_{mn,t-1}\right) \tag{14}$$

$$\overline{F}_{mn,t}\left|\overline{F}_{mn,t}\right|/C_{mn}^2=\pi_{m,t}^2-\pi_{n,t}^2 \tag{15}$$

$$\pi_{k,t}^{\mathrm{in}}\rho_k^{\mathrm{C,min}}\le\pi_{k,t}^{\mathrm{out}}\le\pi_{k,t}^{\mathrm{in}}\rho_k^{\mathrm{C,max}} \tag{16}$$

$$0\le F_{k,t}^{\mathrm{C}}\le F_k^{\mathrm{C,max}} \tag{17}$$

$$0\le F_{w,t}^{\mathrm{S}}\le F_w^{\mathrm{S,max}} \tag{18}$$

$$0\le F_{w,t}^{\mathrm{S}}-F_{w,t-1}^{\mathrm{S}}\le F_w^{\mathrm{S,ramp}} \tag{19}$$

$$\pi_m^{\min}\le\pi_{m,t}\le\pi_m^{\max} \tag{20}$$

其中,$F_w^{\mathrm{S,ramp}}$为气源w的爬坡上限值。

需要说明的是,当前对于天然气暂态潮流模型的研究不局限于上述基于管道管存的模型,如文献[23]提出了采用拉普拉斯变换将偏微分方程转化为有限差分方程,构建了描述天然气系统暂态过程的输入输出转移矩阵模型。

1.3　线性化模型

由于式(2)和式(15)为非线性等式方程,1.1节介绍的稳态天然气潮流模型与1.2节介绍的暂态天然气潮流模型均为非线性非凸模型。值得注意的是,式(2)和式(15)中非线性项为双线性项(包括$F_{mn}\left|F_{mn}\right|$、$\pi_m^2$和$\pi_n^2$),本节将介绍基于分段线性法(PWL)的稳态/暂态天然气潮流模型。

以双线性项$F_{mn}\left|F_{mn}\right|$为例,其PWL线性化如图2所示,数学模型为[21,24]:

$$\overline{h(F_{mn})}\approx h(F_{mn}(-n_{pl}))+\sum_{a=-n_{pl}}^{n_{pl}-1}\left[h(F_{mn}(a+1))-h(F_{mn}(a))\right]\delta_a \tag{21}$$

$$F_{mn}=F_{mn}(-n_{pl})+\sum_{a=-n_{pl}}^{n_{pl}-1}\left[F_{mn}(a+1)-F_{mn}(a)\right]\delta_a \tag{22}$$

$$\delta_{a+1}\le\varphi_a\le\delta_a\quad -n_{pl}\le a\le n_{pl}-1 \tag{23}$$

$$0\le\delta_a\le1,\ \varphi_a\in\{0,1\}\quad -n_{pl}\le a\le n_{pl} \tag{24}$$

其中,$h\left(F_{mn}\right)=F_{mn}\left|F_{mn}\right|$;PWL定义$2n_{pl}+1$个线性化点,即$F_{mn}(-n_{pl})$、$F_{mn}(-n_{pl}+1)$、…、$F_{mn}(n_{pl}-1)$、$F_{mn}(n_{pl})$,且$F_{mn}(-n_{pl})=-F_{mn}^{\max}$,$F_{mn}(n_{pl})=F_{mn}^{\max}$,对于$-n_{pl}<a<n_{pl}$,有$F_{mn}(a)=-F_{mn}^{\max}+F_{mn}^{\max}\left(a+n_{pl}\right)/n_{pl}$;$\varphi_a$为每个PWL区间引入的0–1整数变量。

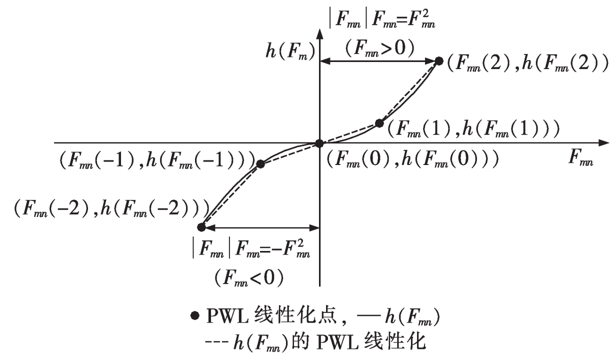

图2　双线性项$F_{mn}\left|F_{mn}\right|$的PWL线性化

Fig.2　PWL linearization of bilinear term $F_{mn}\left|F_{mn}\right|$

值得注意的是,PWL分段数越多,线性化拟合精度越高,同时计算复杂度越大(整数变量越多)。此外,稳态天然气潮流模型中双线性项π_m^2与π_n^2可采用压力平方值变量等效代替,无需采用PWL线性化,但该方法无法应用于暂态天然气潮流模型。因为管道管存量$L_{mn,t}$与管道压力值$\left(\pi_{m,t}+\pi_{n,t}\right)/2$呈线性关系,因此暂态天然气潮流模型PWL线性化难度高于稳态天然气潮流模型。

1.4　凸松弛模型

除了采用PWL线性化之外,另一种常用的方法是采用二阶锥(SOC)松弛式(2)和式(15)。以式(15)为例,假定$\overline{F}_{mn,t}>0$,则式(15)可转化为SOC约束式(25),式(26)为式(25)的标准SOC形式[25-26]。

$$\overline{F}_{mn,t}^2/C_{mn}^2+\pi_{n,t}^2\le\pi_{m,t}^2 \tag{25}$$

$$\left\|\begin{matrix}\overline{F}_{mn,t}/C_{mn}\\ \pi_{n,t}\end{matrix}\right\|\le\pi_{m,t} \tag{26}$$

进一步地,当需计及管道双向流量时,可引入0–1整数变量表示管道流量方向[25-27]。通常而言,对于短期运行(不计及管道故障),可假定管道流量方向固定;而对于中长期运行,需计及双向管道流量,以保证天然气系统的灵活性。

式(26)所示的SOC松弛未必严格,即取最优解处式(15)未必严格成立。为保证SOC松弛的严格性,文献[28]提出一种连续SOC松弛的方法,文献[29]提出一种计及双线性项凸包络的增强SOC松弛方法。此外,文献[30]提出一种基于半定规划(SDP)的天然气潮流模型。一般而言,相较于SOC松弛,SDP松弛更为严格,但计算复杂度也更高。

基于综合能源系统稳态/暂态潮流模型,可进一步开展计及随机能量流注入的概率潮流研究。文献[26]研究了风电功率日前预测误差对天然气系统节点压力的影响。文献[31]提出了计及网络参数不

确定性的综合能源系统概率-模糊潮流模型。

2 电-气互联综合能源系统安全分析研究

本节将从综合能源系统状态估计、安全评估、可靠性分析和韧性分析4个方面综述综合能源系统安全分析的研究现状。

2.1 电-气互联综合能源系统状态估计

作为现代电网能量管理系统(EMS)的核心,状态估计基于数据采集与监控系统(SCADA)的量测信息,为EMS后续安全分析与控制提供电网的实时状态感知信息。另一方面,基于实时的SCADA量测,天然气系统实时运行同样配置了状态估计功能[32]。然而值得注意的是,电力系统一般采用静态状态估计器[33],而天然气系统一般采用动态状态估计器[32]。

对于电力系统,SCADA量测通常包括节点注入有功/无功量测、线路首末端有功/无功量测及电压幅值量测,选取节点电压幅值与相角为状态量,采用某种估计准则(如加权最小二乘准则[34])求解;对于天然气系统,SCADA量测通常包括节点流量注入量测、首末端流量量测及节点压力量测,选取节点压力为状态量,采用动态估计器(如卡尔曼滤波[35])求解。

文献[36]和文献[37]基于加权最小二乘准则分别研究了电-热互联综合能源系统与电-气互联综合能源系统的状态估计。文献[38]研究了电-气互联综合能源系统的抗差状态估计问题,并提出一种双线性模型,提高了抗差估计器的计算效率。文献[39]提出了一种城市综合能源系统的区间状态估计模型,采用不确定性测度方法克服了区间状态估计的保守性。

需要说明的是,当前研究尚未充分考虑多能源系统多时间尺度状态估计问题(包括实时量测信息的不同步,状态估计执行周期的不同步)。鉴于此,本文提出了如图3所示的电力系统与天然气系统异步融合状态估计框架。图中,电力系统与天然气系统状态估计周期分别为5 min与15 min,当天然气系统执行状态估计时(即图3中的点A'与点D'),电力系统与天然气系统交互边界状态量信息;当仅电力系统量测更新时(即图3中的点B与点C),此时电力系统独立执行状态估计,天然气系统动态状态估计的预测步可提供边界状态量的预测值信息。

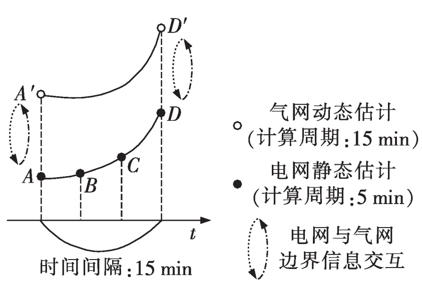

图3 电力系统与天然气系统异步融合状态估计

Fig.3 Asynchronous coordinated state estimation for power system and natural gas system

2.2 电-气互联综合能源系统安全评估

综合能源系统安全评估侧重于定量评估单个系统的扰动对本系统及耦合系统的安全性影响,其中扰动包括净负荷波动(小扰动)与系统设备故障(大扰动)等因素,通常采用综合能源系统稳态/暂态潮流分析某种扰动对系统运行的影响。

文献[40]提出了一种基于蒙特卡洛模拟的综合能源系统概率潮流分析方法,定量评估了风电功率注入与负荷功率不确定性对综合能源系统运行状态的影响。文献[41]概述了一种综合能源系统准动态仿真工具——SAInt,定量评估了加压站故障对天然气系统慢动态过程及电力/天然气安全供应的影响,并探讨了天然气储能对于支撑天然气系统故障后恢复的积极作用。文献[42]研究了综合能源系统的韧性,采用电力系统仿真工具EPfast与天然气系统仿真工具GPfast模拟了综合能源系统的连锁故障,并定量评估了连锁故障的影响。文献[43]研究了电-气耦合性对综合能源系统运行状态的影响,侧重分析了时变风电功率对天然气节点压力波动的影响,并进一步探讨了对管道安全运行及燃气轮机组燃料可靠供应的影响。文献[44]分析了天然气供应短缺对综合能源系统运行的影响,采用天然气系统时空暂态仿真模型刻画了天然气供应的可行域,定量评估了间歇性新能源功率注入对天然气系统可行域的影响。文献[45]分析了综合能源系统充裕性与安全性,采用天然气暂态潮流模型与电力系统连锁故障模型辨识了关键故障场景与极端运行场景,为综合能源系统在故障情况下的防御提供了参考。

文献[46]研究了计及天然气系统N-1故障的综合能源系统的静态安全问题,分析了能源集线器在耦合系统间的故障传播机理,辨识了系统的关键故障与薄弱环节。文献[47]提出了基于灵敏度矩阵的综合能源系统静态安全模型,定量分析了电力节点有功注入功率对天然气节点压力的影响,实现了综合能源系统的快速安全评估。文献[48]提出了一种综合能源系统鲁棒安全域模型,保证了安全域内运行点在任意风电功率注入下的安全性,并采用分段线性凸包络方法构建安全域边界,其精度高于传统超平面法。

2.3 电-气互联综合能源系统可靠性分析

文献[49]概述了计及能源集线器的综合能源系统可靠性评估研究现状,并归纳总结了可靠性评估模型、评估算法及评估指标等方向的研究展望。文献[50]提出了一种综合能源系统能源供应分析与可

靠性评估模型,定量分析了系统耦合对于保证能源可靠供应的正面价值。文献[51]提出了一种计及P2G的综合能源系统可靠性评估模型,建立了计及元件故障、负荷和风电功率随机性的多种可靠性指标。文献[52]以英国电力系统与天然气系统为例,提出了一种基于时序蒙特卡洛模拟的综合能源系统可靠性评估模型,定量评估了储气容量对综合能源系统可靠性的影响。文献[53]提出了一种基于智能体通信的综合能源系统可靠性评估模型,实现了系统状态量的分布式可靠性评估。文献[54]提出了一种基于一阶可靠性的方法估计综合能源系统的故障概率,定量评估了气源供应短缺对综合能源系统可靠性的影响,为综合能源系统改善薄弱环节的规划提供了参考。文献[55]提出了一种综合能源系统供电可靠性评估的解析性算法,定量评估了天然气系统故障与运行策略对供电可靠性的影响。文献[56]提出了一种基于分层最优切负荷的综合能源系统可靠性评估模型,该模型具备计算效率高、数值稳定性强及适用性强的优点,通过研究表明能源集线器类型与容量直接影响了综合能源系统的可靠性。

2.4　电–气互联综合能源系统韧性分析

韧性是指系统遭受严重的故障/灾害时,系统通过调整运行策略以尽可能降低故障过程损失以及尽快恢复正常状态的能力[57]。文献[58]提出了计及恶意数据攻击的一种综合能源系统鲁棒防御策略,构建了防御者–攻击者–防御者3层优化模型,辨识了综合能源系统的薄弱环节。文献[59]提出了从综合能源系统协同规划的角度出发提高电力系统韧性的方法。文献[60]针对多能源微网,提出了通过辨识薄弱环节提高系统韧性的方法。文献[61]构建了基于3层鲁棒优化的综合能源系统韧性运行模型,计及了多种故障类型与自然灾害。

3　电–气互联综合能源系统优化控制研究

当综合能源系统缺乏有效的协同控制措施时,单个系统的故障易造成耦合系统之间的耦合故障,如图4所示的美国西南部大停电/气事故[16]。

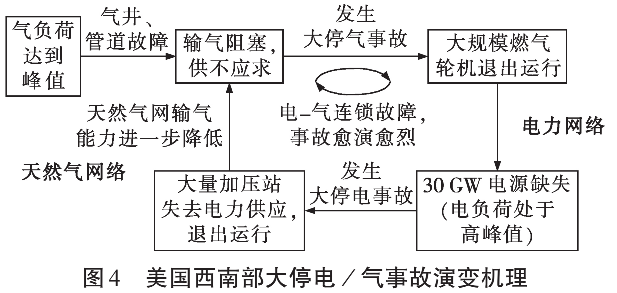

图4　美国西南部大停电/气事故演变机理

Fig.4　Mechanism of large-scale electricity/gas outage in southwestern USA

当前电力系统常用的优化控制策略包括预防控制[62-63]与校正控制[64-66],其数学模型分别如式(27)和式(28)所示。

$$\begin{cases}\min f\left(\boldsymbol{x}^0,\boldsymbol{y}^0\right)\\ \text{s.t.}\quad \boldsymbol{h}^0\left(\boldsymbol{x}^0,\boldsymbol{y}^0\right)=0\\ \qquad \boldsymbol{g}^0\left(\boldsymbol{x}^0,\boldsymbol{y}^0\right)\leqslant 0\\ \qquad \boldsymbol{h}^c\left(\boldsymbol{x}^c,\boldsymbol{y}^0\right)=0\quad \forall c\in C\\ \qquad \boldsymbol{g}^c\left(\boldsymbol{x}^c,\boldsymbol{y}^0\right)\leqslant 0\quad \forall c\in C\end{cases}\tag{27}$$

$$\begin{cases}\min f\left(\boldsymbol{x}^0,\boldsymbol{y}^0\right)\\ \text{s.t.}\quad \boldsymbol{h}^0\left(\boldsymbol{x}^0,\boldsymbol{y}^0\right)=0\\ \qquad \boldsymbol{g}^0\left(\boldsymbol{x}^0,\boldsymbol{y}^0\right)\leqslant 0\\ \qquad \boldsymbol{h}^c\left(\boldsymbol{x}^c,\boldsymbol{y}^c\right)=0\quad \forall c\in C\\ \qquad \boldsymbol{g}^c\left(\boldsymbol{x}^c,\boldsymbol{y}^c\right)\leqslant 0\quad \forall c\in C\\ \qquad \left|\boldsymbol{y}^c-\boldsymbol{y}^0\right|\leqslant \boldsymbol{y}^{\text{ramp}}\quad \forall c\in C\end{cases}\tag{28}$$

其中,上标0为基准场景;上标c为故障场景;C为故障场景集;$\boldsymbol{x}$为状态变量;$\boldsymbol{y}$为控制决策变量;$\boldsymbol{y}^{\text{ramp}}$为控制变量的最大爬坡量;$\boldsymbol{f}$为运行成本函数;$\boldsymbol{h}$为等式方程函数;$\boldsymbol{g}$为不等式方程函数。

由式(27)、(28)可知,预防控制保证了任意N–1故障后系统的安全运行,而校正控制计及了故障后控制变量的调整,即任意N–1故障下均存在可行的校正调整方案。相比而言,预防控制策略更保守安全,而校正控制策略经济性更优。

此外,文献[67]提出了一种预防–校正混合控制策略,其计及了各故障的概率特性,以预防控制成本与各故障后期望校正控制成本之和为控制目标。

值得注意的是,当前电力系统预防/校正控制措施仅计及当前运行断面,然而对于综合能源系统预防/校正控制,需计及天然气系统的慢动态过程。图5描述了一种综合能源系统多时段滚动最优控制框架。对于当前断面T_1的控制决策,计及多个断面的运行约束,以多个断面运行成本最优为目标,并执行T_1时段的控制策略;而对于运行断面T_2,基于实时更新的网络参数与运行状态信息重复多时段最优控制计算,并执行T_2时段的控制策略。上述多时段滚动最优控制框架一方面计及了天然气系统的慢动态

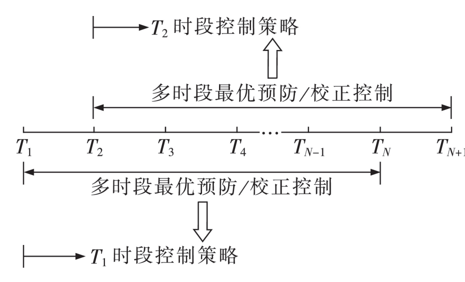

图5　综合能源系统多时段滚动最优控制框架

Fig.5　Multi-period optimal control framework for integrated energy system

过程,另一方面保证了预防/控制策略对于未来多个运行断面的适应性。

文献[68]提出了一种计及模型预测控制的综合能源系统多时段运行控制模型,计及了电力系统与天然气系统之间的能源集线器耦合与储能元件的动态特性。文献[69]提出了一种基于决策树的综合能源系统预防控制模型,其基于历史运行信息,采用决策树方法提供控制变量的运行域与边界,实现了控制策略的快速生成。文献[70]研究了综合能源系统的预防控制问题,计及了输电线路与天然气管道的故障,并提出了一种发生故障后的天然气线性潮流模型,保证了预防控制策略的时效性。文献[24]提出了一种计及有限控制量调整的综合能源系统校正控制模型,通过限制控制量调整数量保证了控制策略的可靠性,并提出了一种二阶段分段线性天然气潮流模型,提高了控制决策的计算效率。文献[71]提出了一种综合能源系统日前最优协同控制模型,将燃气轮机组处理为天然气系统中分布式需求侧响应资源,研究了天然气系统在时间与空间维度下的流量和压力控制,并定量评估了电力系统与天然气系统之间协同控制对于系统灵活性与经济性的积极作用。文献[72]提出了一种综合能源系统预防-校正协同混合控制模型,采用双层规划模型交替筛选关键集,提高了混合控制的计算效率,实现了电力系统与天然气系统之间的互补协同控制。文献[73]研究了综合能源系统的削峰填谷问题,计及了燃气轮机组与P2G协同运行控制,有效平抑了日前运行中净负荷的波动,保障了综合能源系统的安全稳定运行。值得注意的是,文献[68-70]采用了天然气稳态潮流模型,其优化控制策略更适用于中长期运行;而文献[71-73]计及了天然气系统的慢动态过程,适用于短期运行的优化控制。

4 结论与展望

本文综述了电-气互联综合能源系统安全分析与优化控制的研究现状。首先介绍了电-气互联综合能源系统的稳态与暂态潮流模型,该模型为综合能源系统安全分析与优化控制的基础;然后介绍了电-气互联综合能源系统安全分析中的状态估计、安全评估、可靠性分析及韧性分析问题;最后综述了综合能源系统优化控制中预防/校正控制的模型与研究现状。基于当前的研究现状,笔者认为该领域内有以下的内容值得深入研究。

(1)综合能源多运营主体下的安全分析与优化控制研究:当前对于综合能源系统安全分析与优化控制的研究大多假定综合能源系统由单个主体主营(过于理想的假设),而实际多能源系统之间的运营相对独立,系统之间交互的信息量十分有限。因此,如何在维持当前综合能源系统多主体运营机制的基础上,实现系统之间有限信息量交互下的综合能源协同安全分析与优化控制,值得深入研究。

(2)市场环境下的综合能源系统安全分析与优化控制:当前研究大多假定市场参与者真实边际成本已知,然而市场环境下的市场参与者以各自利益最大化为目标,其决策报价通常并非真实的边际成本;竞争的市场环境下易导致综合能源系统运行工况更为复杂(如输电阻塞)。因此,有必要在综合能源市场环境下,研究计及市场参与者的决策行为的综合能源系统安全分析与优化控制问题。

(3)综合能源系统实时动态安全域研究:动态安全域刻画了实时运行中功率注入空间(即决策变量)的可行空间,在实时运行中仅需判断当前运行点是否在安全域内,即可实现综合能源系统的快速安全分析与优化控制。当前研究已提出综合能源系统静态安全域概念[48](适用于中长期运行与规划),而计及不同能源系统之间多时间尺度特性的动态安全域问题,仍值得深入研究。

参考文献:

[1] U. S. Department of Energy. U. S. energy information administration. Annual energy outlook 2019[EB/OL]. (2019-01-24)[2019-04-10]. https://www.eia.gov/outlooks/aeo/pdf/aeo2019.pdf.

[2] 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.

[3] 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.

[4] 王业磊,赵俊华,文福拴,等. 具有电转气功能的多能源系统的市场均衡分析[J]. 电力系统自动化,2015,39(21):1-10,65.
WANG Yelei,ZHAO Junhua,WEN Fushuan,et al. Market equilibrium of multi-energy system with power-to-gas functions[J]. Automation of Electric Power Systems,2015,39(21):1-10,65.

[5] 杜琳,孙亮,陈厚合. 计及电转气规划的综合能源系统运行多指标评价[J]. 电力自动化设备,2017,37(6):110-116.
DU Lin,SUN Liang,CHEN Houhe. Multi-index evaluation of integrated energy system with P2G planning[J]. Electric Power Automation Equipment,2017,37(6):110-116.

[6] 孙宏斌,潘昭光,郭庆来,等. 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):1-9.
SUN Hongbing,PAN Zhaoguang,GUO Qinglai,et al. Energy management for multi-energy flow:challenges and prospects[J]. Automation of Electric Power Systems,2016,40(15):1-9.

[7] 王毅,张宁,康重庆. 能源互联网中能量枢纽的优化规划与运行研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报,2015,35(22):5669-5681.
WANG Yi,ZHANG Ning,KANG Chongqing. Review and prospect of optimal planning and operation of energy hub in energy internet[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(22):5669-5681.

[8] 邵成成,王锡凡,王秀丽,等. 多能源系统分析规划初探[J].

中国电机工程学报，2016，36(14)：3817-3829.
SHAO Chengcheng，WANG Xifan，WANG Xiuli，et al. Probe into analysis and planning of multi-energy systems[J]. Proceedings of the CSEE，2016，36(14)：3817-3829.
[9] 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 systems[J]. Automation of Electric Power Systems，2015，39(7)：198-207.
[10] 洪居华，刘俊勇，向月，等. 城市能源互联网初步认识与研究展望[J]. 电力自动化设备，2017，37(6)：15-25.
HONG Juhua，LIU Junyong，XIANG Yue，et al. Preliminary understanding and research prospect of urban energy internet[J]. Electric Power Automation Equipment，2017，37(6)：15-25.
[11] 熊文，刘育权，苏万煌，等. 考虑多能互补的区域综合能源系统多种储能优化配置[J]. 电力自动化设备，2019，39(1)：118-126.
XIONG Wen，LIU Yuquan，SU Wanhuang，et al. Optimal configuration of multi-energy storage in regional integrated energy system considering multi-energy complementation[J]. Electric Power Automation Equipment，2019，39(1)：118-126.
[12] 别朝红，王旭，胡源. 能源互联网规划研究综述及展望[J]. 中国电机工程学报，2017，37(22)：6445-6462，6757.
BIE Zhaohong，WANG Xu，HU Yuan. Review and prospect of planning of energy internet[J]. Proceedings of the CSEE，2017，37(22)：6445-6462，6757.
[13] CHEN S，WEI Z，SUN G，et al. Stochastic look-ahead dispatch for coupled electricity and natural-gas networks[J]. Electric Power Systems Research，2018，164：159-166.
[14] 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.
[15] 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.
[16] HIBBARD P J，SCHATZKI T. The interdependence of electricity and natural gas：current factors and future prospects[J]. Electricity Journal，2012，25(4)：6-17.
[17] FAIRLEY P. The troubled link between gas and electricity grids[J]. IEEE Spectrum，2016，53(6)：11-12.
[18] Taipei Times. Gas issues cause nationwide blackout[EB/OL]. (2017-08-16)[2019-04-10]. http://www.taipeitimes.com/News/front/archives/2017/08/16/2003676597.
[19] LIU C，SHAHIDEHPOUR M，WANG J. Coordinated scheduling of electricity and natural gas infrastructures with a transient model for natural gas flow[J]. Chaos：An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science，2011，21(2)：25102.
[20] MUNOZ J，JIMENEZ-REDONDO N，PEREZ-RUIZ J，et al. Natural gas network modeling for power systems reliability studies[C]//2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings. Bologna，Italy：IEEE，2003：1-8.
[21] SÁNCHEZ-MARTÍN P，CORREA-POSADA C M. Integrated power and natural gas model for energy adequacy in short-term operation[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2015，30(6)：3347-3355.
[22] 卫志农，梅建春，孙国强，等. 电-气互联综合能源系统多时段暂态能量流仿真[J]. 电力自动化设备，2017，37(6)：41-47.
WEI Zhinong，MEI Jianchun，SUN Guoqiang，et al. Multi-period transient energy flow simulation of integrated power and gas energy system[J]. Electric Power Automation Equipment，2017，37(6)：41-47.
[23] ZHOU Y，GU C，WU H，et al. An equivalent model of gas networks for dynamic analysis of gas-electricity systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2017，32(6)：4255-4264.
[24] CHEN S，WEI Z，SUN G，et al. Optimal power and gas flow with a limited number of control actions[J]. IEEE Transactions on Smart Grid，2018，9(5)：5371-5380.
[25] BENT R，BLUMSACK S，HENTENRYCK P R V，et al. Joint electricity and natural gas transmission planning with endogenous market feedbacks[J]. IEEE Transactions on Power Systems，2019，33(6)：6397-6409.
[26] CHEN S，WEI Z，SUN G，et al. Steady state and transient simulation for electricity-gas integrated energy systems by using convex optimization[J]. IET Generation，Transmission & Distribution，2018，12(9)：2199-2206.
[27] LIU F，BIE Z，WANG X. Day-ahead dispatch of integrated electricity and natural gas system considering reserve scheduling and renewable uncertainties[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy，2019，10(2)：646-658.
[28] 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.
[29] CHEN S，CONEJO A J，SIOSHANSI R，et al. Unit commitment with an enhanced natural gas-flow model[J/OL]. IEEE Transactions on Power Systems. (2019-04-02)[2019-04-10]. https://ieeexplore.ieee.org/document/8680015.
[30] OJHA A，KEKATOS V，BALDICK R. Solving the natural gas flow problem using semidefinite program relaxation[C]//2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting. Chicago，IL，USA：IEEE，2017：1-5.
[31] 赵霞，胡潇云，杨仑，等. 考虑参数不确定性的区域电-气联合系统的概率-模糊能流评估[J]. 电力自动化设备，2019，39(2)：135-142.
ZHAO Xia，HU Xiaoyun，YANG Lun，et al. Probabilistic-possibilistic energy flow evaluation of regional electricity-gas integrated system considering parameter uncertainties[J]. Electric Power Automation Equipment，2019，39(2)：135-142.
[32] JALVING J，ZAVALA V M. An optimization-based state estimation framework for large-scale natural gas networks[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research，2018，57：5966-5979.
[33] ABUR A，GOMEZ-EXPOSITO A. Power system state estimation：theory and implementation[M]. Boca Raton，Florida，USA：CRC Press，2004.
[34] 李碧君，薛禹胜，顾锦汶，等. 电力系统状态估计问题的研究现状和展望[J]. 电力系统自动化，1998，22(11)：53-60.
LI Bijun，XUE Yusheng，GU Jinwen，et al. Status and prospect of power system state estimation[J]. Automation of Electric Power Systems，1998，22(11)：53-60.
[35] AHMADIAN B H，BOOZARJOMEHRY R B. Modeling and state estimation for gas transmission networks[J]. Journal of Natural Gas Science and Engineering，2015，22：551-570.
[36] 董今妮，孙宏斌，郭庆来，等. 热电联合网络状态估计[J]. 电网技术，2016，40(6)：1635-1641.
DONG Jinni，SUN Hongbin，GUO Qinglai，et al. State estimation for combined electricity and heat networks[J]. Power System Technology，2016，40(6)：1635-1641.
[37] 董今妮，孙宏斌，郭庆来，等. 面向能源互联网的电-气耦合网络状态估计技术[J]. 电网技术，2018，42(2)：400-408.
DONG Jinni，SUN Hongbin，GUO Qinglai，et al. State estimation of combined electricity and gas networks for energy internet[J]. Power System Technology，2018，42(2)：400-408.

[38] 郑顺林,刘进,陈艳波,等. 基于加权最小绝对值的电-气综合能源系统双线性抗差状态估计[J/OL]. 电网技术.(2019-03-01)[2019-04-10]. https://doi.org/10.13335/j.1000-3673.pst.2018.2410.
[39] CHEN S,WEI Z,SUN G,et al. An interval state estimation for electricity-gas urban energy systems[C]//2017 IEEE Conference on Energy Internet and Energy System Integration(EI2). Beijing,China:IEEE,2017:1-5.
[40] 陈胜,卫志农,孙国强,等. 电-气混联综合能源系统概率能量流分析[J]. 中国电机工程学报,2015,35(24):6331-6340.
CHEN Sheng,WEI Zhinong,SUN Guoqiang,et al. Probabilistic energy flow analysis in integrated electricity and natural-gas energy systems[J]. Proceedings of the CSEE,2015,35(24):6331-6340.
[41] PAMBOUR K A,ERDENER B C,BOLADO-LAVIN R,et al. SAInt-a novel quasi-dynamic model for assessing security of supply in coupled gas and electricity transmission networks[J]. Applied Energy,2017,203:829-857.
[42] PORTANTE E C,KAVICKY J A,CRAIG B A,et al. Modeling electric power and natural gas system interdependencies[J]. Journal of Infrastructure Systems,2017,23(4):4017035.
[43] CHERTKOV M,BACKHAUS S,LEBEDEV V. Cascading of fluctuations in interdependent energy infrastructures:gas-grid coupling[J]. Applied Energy,2015,160:541-551.
[44] ZLOTNIK A,CHERTKOV M,TURITSYN K. Assessing risk of gas shortage in coupled gas-electricity infrastructures[C]//2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences(HICSS). Koloa,HI,USA:IEEE,2016:2519-2527.
[45] ANTENUCCI A,SANSAVINI G. Adequacy and security analysis of interdependent electric and gas networks[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part O:Journal of Risk and Reliability,2018,232(2):121-139.
[46] 马瑞,王大朔. 考虑天然气N-1的多能流系统静态安全耦合分析[J]. 中国电机工程学报,2019,39(6):1627-1636.
MA Rui,WANG Dashuo. Static security coupling analysis of multi-energy flow system considering natural gas system N-1 contingency[J]. Proceedings of the CSEE,2019,39(6):1627-1636.
[47] 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):35-41.
LUO Feng,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):35-41.
[48] CHEN S,WEI Z,SUN G,et al. Convex hull based robust security region for electricity-gas integrated energy systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2019,34(3):1740-1748.
[49] 李更丰,别朝红,王睿豪,等. 综合能源系统可靠性评估的研究现状及展望[J]. 高电压技术,2017,43(1):114-121.
LI Gengfeng,BIE Zhaohong,WANG Ruihao,et al. Research status and prospects on reliability evaluation of integrated energy system[J]. High Voltage Engineering,2017,43(1):114-121.
[50] KOEPPEL G,ANDERSSON G. Reliability modeling of multi-carrier energy systems[J]. Energy,2009,34(3):235-244.
[51] 余娟,马梦楠,郭林,等. 含电转气的电-气互联系统可靠性评估[J]. 中国电机工程学报,2018,38(3):708-715.
YU Juan,MA Mengnan,GUO Lin,et al. Reliability evaluation of integrated electrical and natural-gas system with power-to-gas[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(3):708-715.
[52] CHAUDRY M,WU J,JENKINS N. A sequential Monte Carlo model of the combined GB gas and electricity network[J]. Energy Policy,2013,62(9):473-483.
[53] LI G,BIE Z,KOU Y,et al. Reliability evaluation of integrated energy systems based on smart agent communication[J]. Applied Energy,2016,167:397-406.
[54] FU X,GUO Q,SUN H,et al. Estimation of the failure probability of an integrated energy system based on the first order reliability method[J]. Energy,2017,134:1068-1078.
[55] 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):59-66.
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):59-66.
[56] 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.
[57] BIE Z,LIN Y,LI G,et al. Battling the extreme:a study on the power system resilience[J]. Proceedings of the IEEE,2017,105(7):1253-1266.
[58] WANG C,WEI W,WANG J,et al. Robust defense strategy for gas-electric systems against malicious attacks[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(4):2953-2965.
[59] SHAO C,SHAHIDEHPOUR M,WANG X,et al. Integrated planning of electricity and natural gas transportation systems for enhancing the power grid resilience[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(6):4418-4429.
[60] MANSHADI S D,KHODAYAR M E. Resilient operation of multiple energy carrier microgrids[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2015,6(5):2283-2292.
[61] HE C,DAI C,WU L,et al. Robust network hardening strategy for enhancing resilience of integrated electricity and natural gas distribution systems against natural disasters[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(5):5787-5798.
[62] CAPITANESCU F,GLAVIC M,ERNST D,et al. Contingency filtering techniques for preventive security-constrained optimal power flow[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2007,22(4):1690-1697.
[63] PHAN D,KALAGNANAM J. Some efficient optimization methods for solving the security-constrained optimal power flow problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(2):863-872.
[64] CAPITANESCU F,WEHENKEL L. A new iterative approach to the corrective security-constrained optimal power flow problem[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2008,23(4):1533-1541.
[65] PHAN D T,SUN X A. Minimal impact corrective actions in security-constrained optimal power flow via sparsity regularization[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2015,30(4):1947-1956.
[66] WU X,CONEJO A J,AMJADY N. Robust security constrained ACOPF via conic programming:identifying the worst contingencies[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2018,33(6):5884-5891.
[67] XU Y,DONG Z Y,ZHANG R,et al. Solving preventive-corrective SCOPF by a hybrid computational strategy[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2014,29(3):1345-1355.
[68] ARNOLD M,NEGENBORN R R,ANDERSSON G,et al. Multi-area predictive control for combined electricity and natural gas systems[C]//2009 European Control Conference(ECC). Budapest,Hungary:IEEE,2009:1408-1413.
[69] COSTA D C L,NUNES M V A,VIEIRA J P A,et al. Decision tree-based security dispatch application in integrated electric power and natural-gas networks[J]. Electric Power Systems Research,2016,141:442-449.
[70] 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.

[71] CHIANG N Y,ZAVALA V M. Large-scale optimal control of interconnected natural gas and electrical transmission systems[J]. Applied Energy,2016,168:226-235.
[72] 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.
[73] 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.

作者简介:

陈　胜

陈　胜(1990—),男,江苏溧阳人,副研究员,博士,研究方向为市场环境下的综合能源系统规划与运行(**E-mail**:chensheng-hhu@163.com);

卫志农(1962—),男,江苏江阴人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为综合能源系统、电力系统运行与分析控制(**E-mail**:wzn_nj@263.net);

孙国强(1978—),男,江苏江阴人,副教授,研究方向为综合能源系统、电力系统运行与电力市场(**E-mail**:hhusun-guoqiang@163.com)。

Review on security analysis and optimal control of electricity-gas integrated energy system

CHEN Sheng[1],WEI Zhinong[1],SUN Guoqiang[1],WANG Dan[2],ZANG Haixiang[1]
(1. College of Energy and Electrical Engineering,Hohai University,Nanjing 211100,China;
2. Key Laboratory of Smart Grid of Ministry of Education,Tianjin University,Tianjing 300072,China)

Abstract:Integrated energy system positively contributes to the improved energy utilization efficiency,multi-energy complement,and the construction of a low-carbon sustainable energy system. However,it is notable that the deep interdependency among multiple energy systems creates significant operational risks. As such,the research on security analysis and optimal control of electricity-gas integrated energy system is reviewed. The steady-state and transient energy flow models of electricity-gas integrated energy system are introduced,which includes the exact nonlinear,linear,and convex models. Then,the security analysis of electricity-gas integrated energy system is introduced,in which the state estimation,security assessment,reliability analysis,and resilience analysis are discussed. Subsequently,the optimal control model of electricity-gas integrated energy system is introduced,in which the multi-period optimal preventive and corrective models are proposed. Finally,the promising research directions on security analysis and optimal control of electricity-gas integrated energy system are summarized.

Key words:electricity-gas integrated energy system;operational risk;steady-state energy flow model;transient energy flow model;security analysis;optimal control