

DOI: 10.16516/j.gedi.issn2095-8676.2019.01.001

# 天然气网络对含新能源电力系统短期调度运行影响

张夏平

(美国加利福尼亚州独立系统调度运行商, Folsom, California 95630, U. S. A)

**摘要:** [目的]随着新能源和天然气机组在电力能源系统的装机比例不断增长, 天然气系统对含大规模新能源电力系统的短期运行影响需要深入地研究。[方法]将天然气网络耦合至电力系统安全约束机组组合模型, 以最小化系统运行成本为优化目标, 同时考虑新能源接入系统, 运用 Benders 解耦方法求解非线性优化问题。[结果]六节点电力系统和六节点天然气网络的综合能源系统算例分析用于验证耦合的优化模型, 并表明燃气机组的高爬坡率可帮助电力系统有效地消纳新能源, 同时新能源系统可以缓解系统对天然气网络供气约束的依赖。[结论]两种能源的优化配置是未来能源系统发展的重要方向。

**关键词:** 天然气系统; 安全约束机组组合; 新能源; 电力系统优化; 短期经济调度

中图分类号: TM73; TU996

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2019)01-0001-07

## Impact of Natural Gas System on Short-term Scheduling with Volatile Renewable Energy

ZHANG Xiaping

(California Independent System Operator, Folsom, California 95630, U. S. A)

**Abstract:** [Introduction] In this paper, the impact of natural gas system on the short-term scheduling with high penetration of renewable energy is illustrated and analyzed. [Method] The natural gas infrastructure constraints were integrated into the security-constrained unit commitment model, which minimized the expected operation cost while considering the variable wind power generation. Benders decomposition was applied to solve the problem with non-linear natural gas network constraints. [Result] Illustrative examples with 6-bus power system with 6-node natural gas system demonstrate the effectiveness of the proposed approach for analyzing the impact natural gas system on system scheduling with volatile renewable energy. [Conclusion] An optimal electricity portfolio of renewable and natural gas will continue to be an important direction for future energy system development.

**Key words:** natural gas system; security-constrained unit commitment; renewable energy; power system optimization; short-term economic scheduling

## 0 引言

在过去 20 年美国电力系统中, 燃气机组所占装机容量从 17% 增长至 27%, 成为电力系统所占装机比例最高的能源。据美国 U. S. Energy Information Administration(EIA) 预测, 天然气发电量以及装机容量将会继续增长<sup>[1]</sup>。另一方面, 随着更为

完善严格的环保约束, 可再生能源仍然是目前及未来电力资源装机配置的最佳选择之一。美国风电装机容量在 2005 至 2012 年间增加了五倍, 达到 60 GW<sup>[2]</sup>。2018 年, 美国新增装机容量 32 GW, 其中燃气机组占 21 GW, 可再生能源占 2 GW, 如图 1 所示。可再生能源的波动性也给电力系统的运行带来了新的挑战。燃气机组优势在于灵活启停, 快速爬坡, 可以配合弥补可再生能源的波动性和随机性, 促进可再生能源大规模发展和系统消纳<sup>[3]</sup>。不同于其他形式的化石能源发电, 燃气发电更加依赖

于天然气网络系统的可靠输送和有效存储。因此天然气系统其他形式的实时负荷例如住宅, 商业负荷需求变化和燃气管道的可用性会直接影响到燃气机组一次能源的供给。因此, 天然气网络系统对电力系统, 尤其是对短期运行的影响值得进一步探讨和分析。

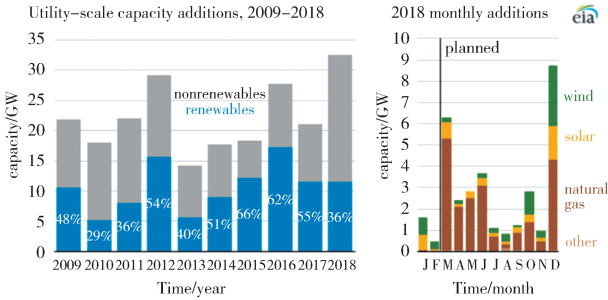


图1 美国2009—2018新增装机容量

Fig. 1 Electric capacity additions during 2009 to 2018 in U. S.

文章[4]讨论了天然气网络基础设施的架构, 供给日益增加的燃气机组以及天然气价格对发电调度的短期影响。文章[5]提出了一种综合模型, 用于评估电力和天然气网络相互依赖对电力系统安全运行的影响。通过对天然气管道, 子区域, 发电厂和发电机组的每日和每小时约束的天然气网络建模, 文章[6]提出了非线性的含天然气网络的安全约束机组组合模型(SCUC), 其中应用 Benders 解耦方法将天然气输送可行性子问题与每小时的机组组合问题分开求解。文章[7]中讨论了一种解决水力、热能发电系统季节性运行规划问题的方法, 其中部分热容量由能源供给受约束的燃气机组构成。

本文将天然气网络模型与电力系统短期经济调度运行问题相结合, 研究天然气基础设施对可再生能源一体化的短期调度的影响。考虑了天然气负荷的波动性和天然气网络输送特性, 分析了天然气系统对短期经济调度运行的影响。本文的其余部分内容如下: 第1节介绍了天然气网络系统的各个组成部分。综合能源调度运行模型详见第2节。第3节和第4节分别介绍了算例分析和结论。

## 1 天然气网络系统

在电力市场中, 独立系统调度运行商执行电力系统安全约束机组组合(SCUC), 以满足电网安全约束的最小发电成本为优化目标。基于 SCUC 的最

优调度计划考虑了电力系统的网络模型, 但并不考虑天然气网络的约束。天然气系统和电力系统之间的这种独立运行, 可能导致由于天然气生产, 传输约束的“不可行”的最优调度计划。因此, 将天然气网络约束引入电力系统优化运行中非常必要, 尤其是燃气机组作为理想的新增机组类型, 是电力系统弥补可再生能源的波动性最佳选择之一。天然气系统旨在通过各种天然气传输系统为最终用户提供稳定的供给<sup>[8]</sup>。天然气系统一般有三个主要部分: 天然气供应商从多个天然气气井或储存设施收集天然气, 通过远距离天然气输气管道(高压)输送天然气, 以及终端供气商将天然气配送给用户, 如图2所示。

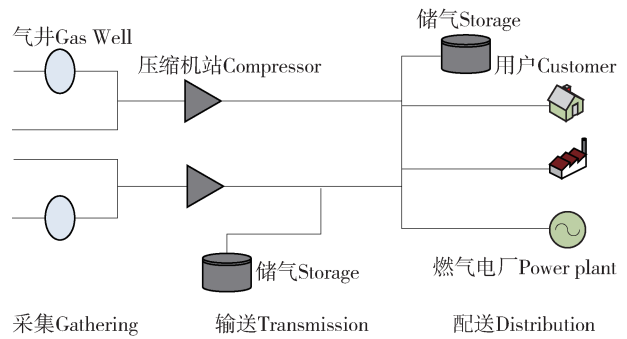


图2 天然气系统

Fig. 2 Natural gas system

美国天然气网络遍布本土48个州及阿拉斯加, 输气管道总长度约30.5万英里, 1400个压缩机站, 400个地下储气设施, 如图3所示。

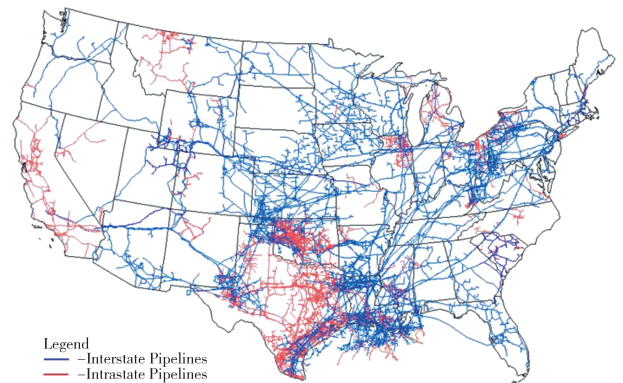


图3 美国天然气管道系统

Fig. 3 Natural gas pipelines in U. S.

天然气供应商运营天然气井或储气设施, 通过天然气网络提供天然气。天然气井通常位于远离负荷中心的位置。常见的天然气储存方式包括地下储

气设施, LNG / CNG 和丙烷 - 空气调峰储存。良好的天然气储存能力有利于供气商更好地利用管道容量, 例如它可以在非高峰负荷时段储气, 以缓解高峰时段的需求, 并且在系统发生故障时保证天然气输送管道的稳定的流量。远距离高压天然气输气管道将气井的天然气输送到负荷中心的终端供气商或直接向大型商业和工业用户供气。终端供气商是天然气输送链的最终环节, 也是天然气系统中最大的构成部分, 从城市枢纽站, 地下储气设施和其他不同容量的输气管道向工业, 商业和住宅用户提供天然气。相比远距离高压天然气输气管, 终端供应商的输气管道运行压力更低, 并通过气压调节设施为不同的客户提供不同气压的天然气。

类似于电力系统高压输电网母线有电压运行范围限制, 天然气系统也需调节每个高压输气网络节点的气压, 以保证终端用户的气压在合适范围内。天然气压缩机站的功能类似于电力系统中的升压变压器, 是天然气系统中必不可少的设施, 以维持天然管道中所需的压力水平。它通常沿输气管道安装(常见间隔 40 ~ 100 英里)。天然气管道中气体流量由管道两端压力差驱动, 取决于诸如管道长度, 直径, 运行温度, 压力, 天然气类型, 传输路径上的高度变化和管道粗糙度等多种因素。

作为天然气系统与电力系统之间的耦合和最大工业用户, 燃气发电厂通常直接连接到天然气高压输气管网, 并且出于经济性考虑, 选择可中断的天然气供气服务来满足燃料需求。可中断天然气服务类型具有最低优先级, 在天然气管道故障维修或负荷高峰时段可首先限制可中断服务。燃气发电厂一般只有在供气商有足够的天然气容量满足所有其他高优先级服务的情况下运行发电。随着电力和非电力天然气用户的用气量增加, 可中断天然气服务的可用性降低, 尤其在天然气需求高峰时期。

## 2 综合能源短期调度运行模型

本文将天然气网络耦合至电力系统安全约束机组组合模型, 以最小化系统运行成本为优化目标, 同时考虑新能源接入系统, 运用 Benders 解耦方法求解非线性优化问题。所提出的数学模型为混合整数编程(MIP)优化问题<sup>[9]</sup>。它可用于分析天然气系统对基于电力系统安全约束机组组合模型优化调度的系统的影响, 并考虑与可再生能源之间的协调优

化调度。

该模型优化目标是在满足各种系统约束的同时最小化系统运行成本。系统运行成本包括发电燃料成本, 机组启动和停机成本, 以及负荷卸载成本。目标函数的第一项是非燃气机组的发电成本, 包括燃料成本, 启动和停机成本。第二项是燃气机组的天然气购气成本。第三项是负荷卸载成本, 失负荷价值(VOLL)值以 \$/kWh 表示。

1) 约束条件

$$\min \left\{ \sum_t \sum_{i \in \text{GU}} [F_{c,i}(P_{it}) \cdot I_{it} + SU_{it} + SD_{it}] \right. \\ \left. + \sum_t \sum_{i \in \text{GU}} [W_{\eta t} + SU_{it} + SD_{it}] + \text{VOLL} \cdot \sum_{t=1}^{N_T} \sum_{b=1}^{N_B} DL_{b,t} \right\} \quad (1)$$

2) 电力系统平衡约束

$$\sum_{i \in \text{GU}} P_{it} \cdot I_{it} + \sum_{i \notin \text{GU}} P_{it} \cdot I_{it} = \sum_{b=1}^{N_B} (DE_{b,t} - DL_{b,t}) \quad (2)$$

3) 系统备用约束

$$\sum_{i \in \text{GU}} SR_{it} \cdot I_{it} + \sum_{i \notin \text{GU}} SR_{it} \cdot I_{it} \geq SR_t \quad (3)$$

4) 机组约束: 包括机组容量约束(4), 爬坡速率约束(5), 最小启动、停机时间约束(6)。

$$P_i^{\min} I_{it} \leq P_{it} \leq P_i^{\max} I_{it} \quad (4)$$

$$P_{it} - P_{i(t-1)} \leq [1 - I_{it}(1 - I_{i(t-1)})]$$

$$R_i^{\text{up}} + I_{it}(1 - I_{i(t-1)}) P_i^{\min}$$

$$P_{i(t-1)} - P_{it} \leq [1 - I_{i(t-1)}(1 - I_{it})]$$

$$R_i^{\text{dn}} + I_{i(t-1)}(1 - I_{it}) P_i^{\min} \quad (5)$$

$$(X_{i(t-1)}^{\text{on}} - T_i^{\text{on}})(I_{i(t-1)} - I_{it}) \geq 0$$

$$(X_{i(t-1)}^{\text{off}} - T_i^{\text{off}})(I_{it} - I_{i(t-1)}) \geq 0 \quad (6)$$

5) 电力系统潮流约束: 电力系统安全约束机组组合模型一般采用线性的直流潮流模型, 如式(7)~式(10)所示。系统支路潮流可表示为节点注入和输出功率的线性方程(7), 并由支路两端节点相角和支路电抗所决定(8)。系统任一支路潮流小于支路最大传输功率约束(9), 系统参考节点相角为零(10)。

$$E \cdot pf = C \cdot P_{it} - D \cdot (DE_t - DL_t) \quad (7)$$

$$pf_{br} = (\theta_j - \theta_k) / x_{jk} (j, k \in \text{br}) \quad (8)$$

$$|pf_{br}| \leq pf_{br}^{\max} \quad (9)$$

$$\theta_{\text{ref}} = 0 \quad (10)$$

6) 可再生能源约束: 每小时的风电出力受所预

测最大出力限制。如果没有足够的系统爬坡能力,弃风现象也可能会出现,使实际风电出力小于其可用风能。风电出力预测遵循风力涡轮机的功率曲线,在低于切入速率或高于切出速率时出力为零。

$$P_{wt} \leq P_{fw,t} \quad (11)$$

7) 负荷卸载约束:在不确定的风电出力情况下,负荷卸载可用于风电出力急剧下降,系统无法满足当前负荷需求的极端情况下提供可行解<sup>[10]</sup>。系统母线上的负荷卸载量不能超过设定上限。

$$DL_{b,t} \leq DL_{b,t}^{\max} \quad (12)$$

燃气机组的天然气供应合同为可中断服务类型。燃料成本取决于根据每小时出力的天然气消耗量以及天然气合同价格(13)。所有燃气机组天然气供应合同是天然气网络模型中的天然气负荷(14)。供气量不得超过天然气日的合同量(15)。对于每个天然气网络系统节点,注入的稳态天然气流量等于从系统析出的流量。天然气系统流量守恒方程确保天然气系统每个节点的平衡(19)。天然气管道流速方程(20~21),通过每个管道的气流是末端节点处的压力的二次函数,气流方向由管道两端气压差决定,管道常数取决于温度,长度,直径,摩擦和气体成分等特性。天然气系统不同节点的气压约束范围由式(22)表示。

8) 电力系统-天然气耦合约束

$$W_{\eta t} = (\rho_{\text{gas},\eta}) \cdot F_i^{\text{gas},\eta} \quad (13)$$

$$L_{it} = F_i^{\text{gas},\eta} \quad (14)$$

$$\sum_i F_i^{\text{gas},\eta} \leq F_{o,\eta} \quad (15)$$

9) 天然气供应和负荷约束

$$v_{sp}^{\min} \leq v_{sp} \leq v_{sp}^{\max} \quad (16)$$

$$L_l^{\min} \leq L_l \leq L_l^{\max} \quad (17)$$

$$V_{sr}^{\min} \leq V_{sr} \leq V_{sr}^{\max} \quad (18)$$

10) 天然气系统平衡约束

$$\sum_{sp=1}^{NGS} A_{msp} v_{sp} + \sum_{sr=1}^{NGSR} AS_{msr} [V_{sr(t-1)} - V_{sr(t)}] - \sum_{l=1}^{NGL} B_{ml} L_l - \sum_{n \in GC(m)} f_{mn} = 0 \quad (19)$$

11) 天然气管道流量约束

$$f_{mn} = \text{sgn}(\pi_m, \pi_n) \cdot C_{mn} \sqrt{|\pi_m^2 - \pi_n^2|} \quad (20)$$

$$\text{sgn}(\pi_m, \pi_n) = \begin{cases} 1 & \pi_m \geq \pi_n \\ -1 & \pi_m < \pi_n \end{cases} \quad (21)$$

$$\pi^{\min} \leq \pi \leq \pi^{\max} \quad (22)$$

如式(20)~式(22)所示,天然气管道流量是管道两端气压之间的非线性关系。此约束使上述优化问题成为非线性非凸优化问题。本文采用 Benders 解耦方法求解非线性优化问题,将其分解为混合整数线性规划(MILP)机组组合问题和天然气系统子问题。首先通过约束(2)~(12)求解线性机组组合问题,以获得最优机组组合调度,从而确定燃气机组的每小时用气量。基于燃气机组的用气需求,求解天然气系统子问题以确定当前出力下天然气供应的可行性。利用 Newton-Raphson 法求解天然气系统子问题。如天然气系统无法满足当前燃气机组出力燃料需求,则生成相应的天然气供气约束并将其反馈给主问题用于下一次计算迭代。代表天然气供应短缺的约束(Benders Cut)将会限制燃气机组的燃料消耗,调整燃气机组出力。该过程将重复求解直至天然气系统子问题获得可行解,即为主问题最终的最优解,包含所有燃气机组的启动,停机计划和出力曲线。

### 3 算例分析

本节采用的综合能源系统(如图4所示)是含有6节点的天然气系统和6母线的电力系统,以证明本文所提出模型的有效性。电力系统包含三台燃气机组(G1, G2, G3),和一个风电场(W),天然气系统由五条天然气管道,一个天然气管道压缩机站,两个天然气供应商和五个天然气负荷。天然气负荷1、

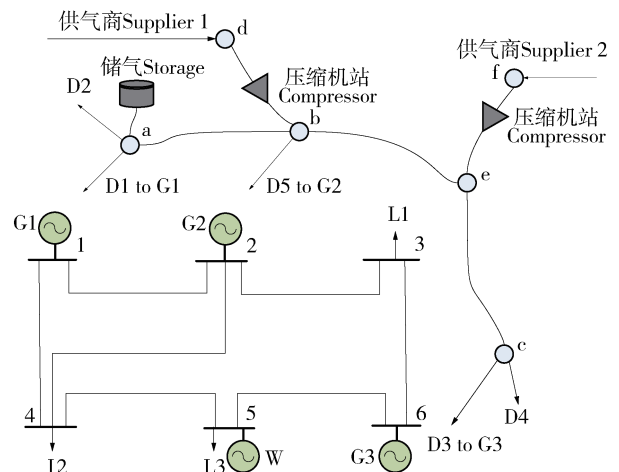


图4 6节点天然气系统和6母线电力系统组成的综合能源系统示意图

Fig. 4 6-bus power system with 6-node natural gas system

表 1 燃气机组数据  
Tab. 1 Generators data

机组	最大出力 $P_{\max}/\text{MW}$	最小出力 $P_{\min}/\text{MW}$	初始启停 状态/h	最小停机 时间/h	最小开机 时间/h	成本系数 (二次项)af	成本系数 (一次项)bf	成本系数 (常数项)Cf
G1	200	100	4	4	4	$4 \times 10^{-4}$	13.5	177
G2	80	10	-3	3	2	$1 \times 10^{-3}$	32.6	129
G3	20	10	-1	1	1	$5 \times 10^{-3}$	17.7	137

表 2 天然气系统数据(管道和负荷)  
Tab. 2 Parameters of gas pipeline and gas loads

管道	初始节点	终节点	C/ (kcf · Psig <sup>-1</sup> )	燃气负荷	负荷所在节点	燃气负荷类型
Pipe 1	1	2	50.6	1	1	机组 G <sub>1</sub>
Pipe 2	2	4	50.1	2	1	住宅负荷
Pipe 3	2	5	37.5	3	3	G <sub>3</sub>
Pipe 4	3	5	43.5	4	3	住宅负荷
Pipe 5	5	6	45.3	5	2	机组 G <sub>2</sub>

3、5 由燃气机组 1、2 的每小时发电计划确定。天然气负荷 2 和 4 代表所有非电力类天然气负荷，如住宅、商业等。燃气机组天然气系统参数的特征列于表 1~表 3 中。24 h 系统负荷和风力发电曲线如图 5 所示。风电总装机容量为 60 MW，占系统总装机容量的 17%。

表 3 天然气系统数据(供气商和气压)

Tab. 3 Gas supplier and transmission system data

节点	最低运行气压 $P_{\min}/\text{Psig}$	最高运行气压 $P_{\max}/\text{Psig}$
1	105	120
2	120	135
3	125	140
4	130	155
5	140	155
6	150	175

供气商	最低输出容量 $O_{\min}/(\text{kcf} \cdot \text{h}^{-1})$	最高输出容量 $O_{\max}/(\text{kcf} \cdot \text{h}^{-1})$
1	1 500	5 000
2	2 000	6 000

燃气机组灵活启停，快速爬坡的优势使其成为配合弥补可再生能源的波动性和随机性的最优新增机组选择之一，因此稳定的天然气供应对电力系统的稳定经济运行有举足轻重的作用。随着可再生能源所占的比例进一步增加，其电力输出

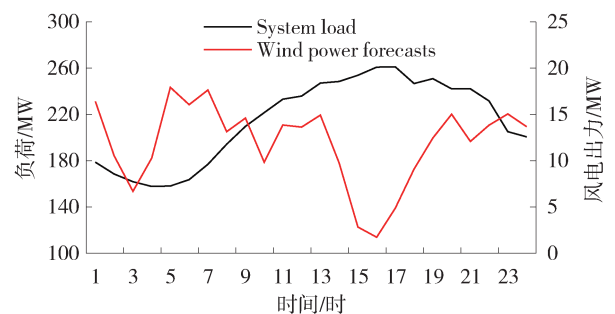


图 5 24 h 负荷和风电出力预测曲线  
Fig. 5 24 h load profile and wind power generation forecasts

的波动性需要更多灵活的燃气机组实时调节配合，才能满足电力系统调峰调频的需求。本文采用了三个不同的算例，用于分析天然气负荷，天然气存储设施和天然气输送管道容量等因素对含可再生能源的电力系统短期经济调度运行的影响，如表 1~表 3 所示。

### 3.1 算例 1：天然气负荷波动的影响

本算例考虑到天然气负荷波动的影响，不考虑天然气系统存储容量。燃气机组 G1 的出力和电力系统运行成本随着非电力类天然气负荷所变化的曲线如图 6 所示。随着天然气负荷 D2 的增加，最便宜的机组 G1 由于采用的供气合同为可中断的天然气服务，具有最低优先级而必须削减发电出力。例如，当天然气负荷增加 3.75% 时，燃气机组 G1 的

日发电量从 4.293 62 GWh 减少到 4.117 11 GWh。同时,其他更昂贵的机组将被系统调度出力,以满足系统负荷要求。因此,随着非电力类天然气负荷的增长,电力系统调度运行成本上升。在燃气机组发电所占比例较高的系统中,这种趋势将会更加明显,尤其是在非电力类天然气负荷峰值时段,例如冬季低温天气的情况下。因此,保持电力系统装机容量和发电形式的多样性,对于减少电力系统经济运行对某一种单一能源系统如天然气系统的依赖性非常关键。

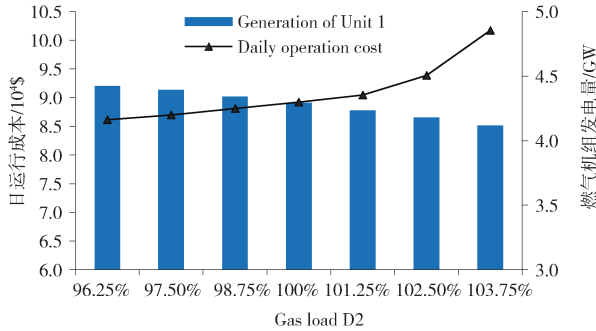


图6 电力运行成本与天然气负荷变化曲线

Fig. 6 Hourly operation cost and generation with different gas load

### 3.2 算例2: 天然气储存能力的影响

本算例考虑在天然气系统节点(a)处增加天然气存储设施。有效的天然气储存设施使得通过管道(b-a)的余量的天然气可以在天然气负荷非高峰时段储存,高峰时段供气。在非电力类天然气负荷(D2)同样增加3.75%的情况下,我们比较了系统的系统运行成本和燃气机组G1调度出力情况,如表4所示。在算例1中电力负荷高峰时段(16-17时之间),由于天然气不足以供给燃气机组发电需求,同时风力发电量急剧下降导致了9.48 MW的负荷卸载,从而增加了系统运行成本。总系统运行成本其中包括了单价1 000 \$/MWh的失负荷价值9 480 \$。然而在算例2中,由于新增了天然气系统节点(a)处的存储设施,当来自天然气管道的天然气供应不足时,燃气机组G1仍然可以通过存储设施获得足够的天然气以满足发电出力需求。天然气存储设施增加了天然气系统的向燃气机组输送天然气的确定性和灵活性,可有效地降低电力系统的安全经济调度成本特别指出的是,足够的天然气存储能力使得燃气机组对于补充可再生能源发电的不

确定性非常重要。

表4 算例1和算例2对照

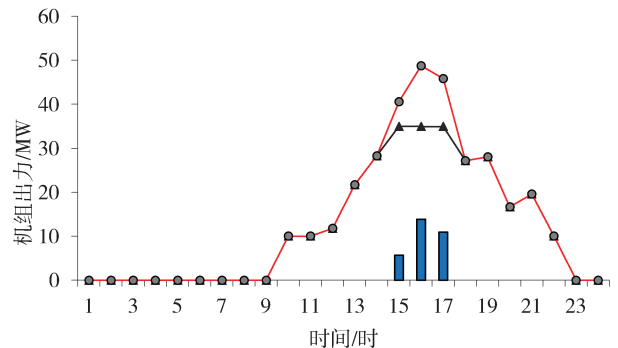
Tab. 4 Comparison of case1 and case2

算例	系统运行成本/\$	燃气机组G1出力/GW	负荷卸载量/MW
算例1	101 733.28	4.117 11	9.48
算例2*	86 146.61	4.423 16	0

注: \*代表含储气设施。

### 3.3 算例3: 天然气管道容量的影响

天然气的供气可用性与系统管道容量密切相关。燃气发电机组通过电力系统经济调度指令预估所需天然气用量,向天然气系统提交用气需求,同时天然气供气商按照“即时消耗”,基于不同供气服务的优先级等原则调度满足各种类型天然气负荷的供应。在一般情况下,天然气系统的大多数管道有足够的天然气容量供应,可用于依赖于低优先级可中断服务合同的燃气机组的发电用气需求。然而,在天然气系统故障,检修或用气负荷高峰情况下,系统可供天然气容量降低,通常首先限制可中断服务用气。如图7所示,当天然气管道(e-b)由于检修造成容量减少时,天然气供应商Supplier2无法满足燃气机组G2的用气需求,G2的发电出力被削减。天然气的短缺导致约30.3 MW的负荷卸载(15-17时之间),运营成本增加32.7%。这种情况表明,天然气系统的故障,检修等因素对系统电力系统短期经济调度成本具有重大影响,特别是在天然气季节性短缺的区域或非电力类天然气负荷高峰期。



注: —■— Load shedding (pipeline contingency)  
—▲— Generation of Unit 2 (pipeline contingency)  
—●— Generation of Unit 2 (normal)

图7 燃气机组G2的每小时出力与系统负荷卸载量

Fig. 7 Hourly dispatch of unit G2 and system load shedding

## 4 结论

本文将天然气网络模型与电力系统短期经济调度运行问题相结合,研究了天然气系统对可再生能源渗透率较高的电力系统短期经济调度的影响。采用综合能源系统算例分析。灵活启停,快速爬坡能力等优势使得燃气机组发电成为电力系统中配合调节大规模可再生能源的理想电力资源。然而,天然气负荷的波动性,供气系统输送容量的限制,天然气存储设施的有效配置等因素都将直接影响电力系统短期经济调度运行。在电力和天然气负荷峰值时段同时出现的极端情况下,可再生能源的波动性和天然气的短缺可能会造成电力系统负荷卸载。配置不同容量的天然气系统存储设施可以有效增加系统向燃气机组供应天然气的确定性,减少由于天然气负荷波动,管道设施检修带来的天然气不足的风险,优化短期调度成本。在当前系统新增装机中,燃气机组和可再生能源仍然保持较高的比例,天然气系统对电力系统的短期经济调度和安全运行的影响仍然值得进一步探讨和分析。

### 参考文献:

- [1] NERC. Accommodating an increased dependence on natural gas for electric power [EB/OL]. (2013-05-01) [2019-01-02]. <http://www.nerc.com>.
- [2] EIA. Annual energy outlook [EB/OL]. (2014-01-01) [2019-01-02]. <http://www.eia.doe.gov/emeu/aer/>.
- [3] LEE A, ZINAMAN O, LOGAN J. Opportunities for synergy between natural gas and renewable energy in the electric power and transportation sectors [R/OL]. [2019-01-02] U. S.; National Renewable Energy Laboratory, 2012. <http://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56324.pdf>.
- [4] 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.
- [5] LI T, EREMIYA M, SHAHIDEHPOUR M. Interdependency of natural gas network and power system security [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(4): 1817-1824.

- [6] LIU C, SHAHIDEHPOUR M, FU Y, et al. Security-constrained unit commitment with natural gas transmission constraints [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(3): 1523-1536.
- [7] SKUGGE G, BUBENKO J A, SJELVIGREN D. Optimal seasonal scheduling of natural gas units in a hydro-thermal power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1994, 9(2): 848-854.
- [8] ACHA S, HERNANDEZ-ARAMBURO C. Integrated modeling of gas and electricity distribution networks with a high penetration of embedded generation [C]//IEEE. Proc. CIRED Seminar 2008: Smart Grids for Distribution, Frankfurt, Germany, 23-24 June, 2008. U. S.; IEEE, 2008.
- [9] 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, 2015, 31(1): 592-601.
- [10] ALABDULWAHAB A, ABUSORRAH A, ZHANG X, et al. Coordination of interdependent natural gas and electricity infrastructures for firming the variability of wind energy in stochastic day-ahead scheduling [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2015, 6(2): 606-615.

### 作者简介:



ZHANG X P

张夏平(通信作者)

1984-, 女, 美国加州独立系统调度运行商(California ISO, <http://www.caiso.com>)电力工程师, 2015年毕业于美国伊利诺伊州理工大学, 获电气工程博士学位。曾任美国西部电网系统调度可靠性机构(Peak Reliability, <https://www.peakrc.com>)电力工程师。主要研究方向: 电力市场优化, 电力与天然气协同调度, 综合能源系统运行与规划, 可再生能源(e-mail) [zhangxiaping@gmail.com](mailto:zhangxiaping@gmail.com)。

(责任编辑 李辉)

## 广 告

广东省首座海上风电海上升压站吊装成功..... 封二

珠海国家“互联网+”智慧能源示范项目通过验收..... 封三