

# 考虑天然气传输特性的气电耦合系统的 联合运行与紧急过负荷控制研究

焦在滨, 马逢, 李宗博

(西安交通大学电气工程学院, 陕西省 西安市 710049)

## Study on Combined Operation of Gas-electricity Coupling System and Emergency Overload Control Considering the Characteristics of Natural Gas

JIAO Zaibin, MA Feng, LI Zongbo

(School of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, Shaanxi Province, China)

**ABSTRACT:** The coupling relationship between natural gas networks and power systems is increasingly tight. This paper first analysed two systems with precise mathematical models to model the key components, and simplifies the non-critical components. In the modeling process, restrictions of node pressure, gas well output, pipeline transmission, etc. of the natural gas network were taken into account. Based on the IEEE24-node power system and the Belgian 20-node natural gas network for gas-electric coupling joint operation simulation, an economical optimal scheme for gas-electricity combined operation considering natural gas transmission characteristics was obtained. On the basis of this, then the line overload of the power system was studied. Due to its high ramp rate, the gas turbine output can be quickly adjusted to eliminate the overload of the line, and the user's power consumption is not affected. Based on the gas-electricity coupling model, the optimization scheme was compared from the aspects of rapidity and economy. It is concluded that the insufficient gas quantity will affect the ramp rate of the gas turbine. If it is considered to solve the line overload problem at the fastest speed, it must sacrifice certain economic costs.

**KEY WORDS:** gas network; power system; combined operation; emergency overload control

**摘要:** 天然气网络与电力系统的耦合关系日益紧密。该文首先对2个系统进行分析,采用精确的数学模型对其中的关键部件进行建模,对非关键部件进行必要简化,在建模过程中计及天然气网络的节点压力、气井出力、管道传输等约束条件。基于IEEE24节点电力系统网络和比利时20节点天然气网络进行气电耦合联合运行仿真,得到考虑天然气传输特性的气电联合运行的一个经济性最优方案。在此基础上,研究电力系统发生线路过负荷时,利用燃气轮机启动快、爬坡率高的特点,快速调整燃气轮机出力,从而消除线路的过负

荷,并且保障用户用电不受影响。在气电耦合模型基础上,从快速性和经济性两方面对优化方案进行比较,得出:燃料量不足会影响燃气轮机的爬坡速度,若考虑以最快速度解决线路过负荷问题,必须牺牲一定的经济性指标。

**关键词:** 天然气网络; 电力系统; 联合运行; 紧急过负荷控制

## 0 引言

由于化石燃料的日益衰竭以及对环境造成的巨大负面影响,传统的能源生产和消费模式已经不再适应社会发展的需要,而能源互联网概念的提出正是为了解决这一问题<sup>[1]</sup>。美国学者里夫金最早在他的《第三次工业革命》一书中提出“能源互联网”的概念,主要由4个部分组成:电力系统、天然气网络、交通系统以及信息网络等<sup>[2]</sup>。

目前,对天然气网络和电力系统耦合关系的研究主要集中在两方面:气电网络的协调规划和联合运行<sup>[2]</sup>。协调规划即将天然气网络的规划和电力系统的规划协调统一起来,优化目标一般为2个系统的投资与运行成本之和最低,在其中考虑2个系统的相关约束和限制,目前针对这一方面的研究还处于起步阶段;联合运行需要在优化过程中将多种能源形式结合起来考虑,文献[3]提出耦合矩阵(coupling matrix)的概念,用于描述能源中心内不同能源之间的相互转化。耦合矩阵中的系数由不同能源之间的转化效率和调度系数(dispatch factor)得到,调度系数是决定能源如何相互转化的决策变量。文献[4]以电/气/热微型能源系统为对象,针对微型燃气轮机的建模、能源协调策略、统一潮流求

解和优化潮流等问题进行研究;文献[5]建立综合能源系统中电网、气网和热力的数学模型;针对目前存在的含压缩机的天然气网络建模的繁琐性问题,考虑不同的控制方式,提出改进的分析方法;文献[6]基于能源中心(energy hub)的概念,对以地区混合能源站为核心的互联环节进行分析,形成 REGHS 能量流综合求解模型。文献[7]提出以投资费用和运行费用最小为目标的电网和气网多阶段联合规划模型,采用增量分段线性化的方法将原模型转化为一个混合整数线性优化问题;文献[8]分别从技术和经济角度描述电网气网混合系统化问题,并进行天然气管网的动态建模,同时,给出考虑与管网相连燃气轮机动态过程的方法。

电力系统中的线路过负荷是另一个很需要被重视的问题,许多学者对这一问题做了大量研究。文献[9]针对安全稳定控制装置的过负荷判据,从电力系统和判据设计 2 个方面介绍过负荷判据增加防误判据的具体方法;文献[10]结合实际电网安全稳定控制系统的配置情况和运行要求,给出暂态稳定下最优紧急控制模型;文献[11]结合叠加定理和比例分配原则提出潮流跟踪新算法,并将其应用于线路过负荷紧急控制。目前对线路过负荷的探究还没有终结,随着能源互联程度的日渐增强,线路过负荷所带来的影响也越来越大,对这一问题我们还需要继续深入研究。

本文从气电联合运行、燃气轮机紧急过负荷控制等方面进行能源互联网优化运行研究。本文的主要工作包括以下几个方面:

1) 进行天然气网络与电力系统联合运行方案的研究,对气电耦合系统中的关键部件进行建模,以 IEEE24 节点网络和比利时 20 节点天然气网络为基础,利用 GAMS 软件对管道方程等非线性方程采用直接求解的方法,而不需要对非线性方程进行线性化,进行以联合运行成本最低为目标的研究。

2) 通过燃气轮机进行电网紧急过负荷控制。在建立的气电耦合系统的基础上,使用燃气轮机进行快速过负荷控制,以过负荷控制速度最快为目标进行仿真分析,并与传统的过负荷控制策略比较,体现考虑天然气的传输特性对能源互联网优化运行的重要性。

## 1 气电耦合网络联合运行

未来的能源互联网是天然气网络与电力系统高度耦合的产物。一个气电耦合系统由天然气网络

和电力系统组成,图 1 给出这一混合系统的主要组成部分。

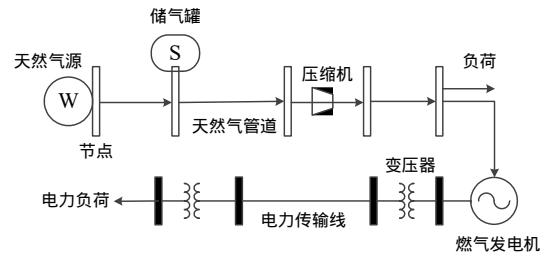


图 1 气电耦合网络构成图

Fig. 1 Components of gas-electricity combined system

天然气网络主要部件包括天然气源、储气罐、天然气管道、压缩机。电力系统主要部件包括发电机、变压器和输电线路。二者之间通过燃气发电机耦合在一起。2 个系统十分相似,都是讲能源从供端传输到消费端,但是天然气网络的传输速度相比于电力系统非常慢,具有很大的传输延迟;同时,天然气可以短时间内存储在输气管道中,而电能不能被有效存储起来<sup>[12]</sup>。

伴随着 2 个系统联系日益紧密,2 个系统的互相影响也不断增强。下文将对 2 个系统中的重要结构进行分析。

### 1.1 天然气网络模型

#### 1.1.1 天然气源与储气罐

天然气源与储气罐的作用如同电网中的电源与电池,是整个网络的能量来源,这里不再具体阐述。

#### 1.1.2 压缩机模型

压缩机的分类方法很多,按它们的驱动力,可以将实际天然气网络中的压缩机分为电压缩机和燃气压缩机 2 种。由于压缩机所消耗的能量很少,可以对压缩机数学模型进行简化,不考虑压缩机消耗的能量,只考虑压缩机进气和出气之间的压力关系。

#### 1.1.3 天然气网潮流

按照输气压力,天然气管网可分为 7 级<sup>[13]</sup>,如表 1 所示。

表 1 天然气管道分级

Tab. 1 Classification of gas pipelines

压力分级	A/MPa	B/MPa
高压燃气管道	2.5-4.0	1.6-2.5
次高压燃气管道	0.8-1.6	0.4-0.8
中压燃气管道	0.2-0.4	0.01-0.2
低压燃气管道	小于 0.01	

通常情况下,在天然气管网的工程设计中,将某一很短时间内的管道内气体看做恒定流动,即认为各个参数不随着时间变化。

通常城市里的天然气管道压力在 1.6MPa 以下，所以使用高、中压天然气管道的计算公式：

$$\frac{P_1^2 - P_2^2}{L} = 1.27 \times 10^7 f \frac{Q_0^2}{d^5} \rho_0 \frac{T}{T_0} \quad (1)$$

式中： $P_1$ 、 $P_2$  为管道入口、出口处的绝对压力，kPa； $L$  为管道的长度，km； $f$  为管道的摩擦系数； $Q_0$  为标准状态下管道的流量，N·m； $d$  为管道的内径，mm； $\rho_0$  为标准状态下天然气的密度，kg/N·m； $T$  为天然气的绝对温度，K； $T_0$  为标准状态下天然气的绝对温度，K。

### 1.1.4 节点气流平衡方程

天然气网络根据形状，可以分为枝状网络、环状网络和混合天然气网络。由于这里考虑的是 2 个系统稳定运行时的情况，所以气网的流量恒定，根据基尔霍夫第一定律，任一节点的流量代数和为零。即流入流出任一节点支路流量之和等于该节点的负荷。

### 1.2 电力系统模型

电力系统选取直流模型，将交流潮流方程按照 P-Q 分解法的简化条件进行简化，就能得到如下直流潮流方程<sup>[14]</sup>。

$$P_i = \sum_{j \in i} B_{ij} \theta_{ij} \quad (2)$$

表示成矩阵形式为：

$$P = B\theta \quad (3)$$

式中： $P$  为节点注入功率向量，其中元素  $P_i = P_{Gi} - P_{Di}$ ， $P_{Gi}$  和  $P_{Di}$  分别为节点  $i$  的发电机出力和负荷； $\theta$  为节点电压相角向量； $B$  为节点导纳矩阵的虚部。

同样，将 P-Q 分解法的简化条件代入支路潮流方程式，可以得到

$$P_{ij} = -B_{ij} \theta_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}} \quad (4)$$

将上式写成矩阵形式：

$$P_l = B_l \Phi \quad (5)$$

式中： $P_l$  为各支路有功功率潮流构成的向量； $\Phi$  为各支路两端相角差向量； $B_l$  为由各支路导纳组成的对角矩阵；设系统的支路数为  $l$ ，则  $P_l$  为  $l$  阶方阵。

### 1.3 气电耦合关系方程

燃气轮机是耦合天然气网络和电力系统的关键部分，是气电耦合的能量转换器之一。由于不考虑压缩机消耗的能量，所以 2 个系统只是通过燃气轮机耦合在一起的。对于燃气轮机来说，燃气流量和其所发出的有功之间的关系可用下式表示：

$$P = \mu(Q)QH = C_1 Q^3 + C_2 Q^2 + C_3 Q + C_4 \quad (6)$$

式中： $\mu(Q)$  为燃气轮机的效率，和进气量有关； $H$  为天然气的热值； $C_1$ 、 $C_2$  和  $C_3$  为燃气轮机性能系数。

### 1.4 优化目标及约束条件

本研究所提模型的优化目标是在满足天然气网络和电力系统的安全可靠运行条件下，实现 2 个网络的联合运行成本最低，具体的优化目标为

$$\min : \sum_i K_i G_{g,i} + \sum_j K_j G_{e,j} \quad (7)$$

式中： $K_i$  和  $K_j$  分别为燃气轮机和火力发电单位出力所需原料的价格； $G_{g,i}$  和  $G_{e,i}$  分别为燃气轮机和火力发电机的出力。

约束条件包括：

1) 天然气井的产出约束。

天然气被从气井开采出来，受到气井压力和设备容量等一系列条件的限制，使得单位时间里从气井产出的天然气量有上下限的约束：

$$W_w \leq p g_w \leq \bar{W}_w \quad (8)$$

式中  $W_w$  和  $\bar{W}_w$  分别是气井  $w$  出气量下限和上限。

2) 天然气网络节点压力约束。

天然气网络的各个节点的压力必须在合理安全的运行范围内，具有如下约束：

$$P_i \leq p_i \leq \bar{P}_i \quad (9)$$

式中  $P_i$  和  $\bar{P}_i$  分别是天然气网络节点  $i$  的压力下限和上限。

3) 储气罐出力限制。

在天然气网络发生故障或燃气负荷发生较大的波动时，储气罐可发挥天然气源的作用向天然气网络提供能源，保障天然气负荷的供应充足。气网储气罐受到存储容量的限制，同时受到天然气注入、输出流量的限制，其出气量限制如下：

$$S_s \leq \text{store}_s \leq \bar{S}_s \quad (10)$$

式中  $S_s$  和  $\bar{S}_s$  分别是储气罐  $s$  出气量的下限和上限。

4) 压缩机的限制。

压缩机的数学模型是反映其升压比例和能量消耗关系的表达式。由于本文的重点在于气电网络优化运行的讨论，而且压缩机所消耗的能量很少，可以对压缩机数学模型进行简化，不考虑压缩机消耗的能量，只考虑压缩机进气和出气之间的压力关系。认为压缩机有如下的限制：

$$1 \leq \bar{F} \leq \bar{F}_{co} \quad (11)$$

式中  $\bar{I}_{co}$  是压缩机  $co$  的压缩比上限。

5) 天然气管道潮流。

这里使用式(1)所述方程。

6) 节点气流平衡约束。

这里使用基尔霍夫第一定律。电力系统选取的是直流潮流模型,主要考虑的约束是发电机的出力限制和潮流约束:

7) 发电机出力限制。

电力系统中每台发电机的出力有一定的限制,约束条件如下:

$$\underline{G}_g \leq G_g \leq \bar{G}_g \quad (12)$$

式中  $\underline{G}_g$  和  $\bar{G}_g$  分别为发电机  $g$  的出力下限和出力上限。

8) 潮流方程及约束。

电力系统使用直流潮流模型,具体参见式(3)、(4)。电力传输线的容量受到本身线路参数的限制,使得流过的潮流受到一定的约束如下:

$$-\text{flow}_{\max} \leq P_{ij} = \frac{\theta_i - \theta_j}{x_{ij}} \leq \text{flow}_{\max} \quad (13)$$

式中  $\text{flow}_{\max}$  为输电线路的最大容量。

## 2 紧急过负荷控制

### 2.1 线路过负荷的发生及控制方法

事故发生前,由于各种原因导致线路退出运行,本应由被切除线路承担的潮流转移至电网其他的联络线上,加重其承担的负荷量,导致这些线路过负荷,同样地退出运行,进一步加重了系统的潮流转移的严重程度,从而引发一系列更加复杂的故障,最终系统由于电压、频率的崩溃无法继续正常运行而被迫解列,造成大面积停电。

输电线路过负荷的紧急控制,就控制措施或控制手段而言可以分为3类:1) 切机切负荷;2) FACTS 和 HVDC 控制;3) 矫正开关转换<sup>[15-17]</sup>。

### 2.2 紧急过负荷控制策略

在电网调峰中使用燃气轮机发电机组,具有以下一些优点:1) 建设周期短,用水量少;2) 机组结构简单紧凑,占地面积少,运行维护成本低;3) 机组启停简单、快速,灵活性强,适宜两班制运行;4) 环保性好,无灰渣粉尘等的排放<sup>[18]</sup>。

本文考虑使用燃气轮机进行线路过负荷的紧急控制。利用燃气轮机改变出力速度快的特点调整它们的出力,使线路过负荷情况以最快速度解决。

传统的过负荷控制仍以经济性为优化目标,具体是在一定时间(5min 或 10min)内能消除过负荷的前提下,保证新的稳定条件下的运行成本最低。本文通过燃气轮机快速地解决过负荷问题,这时目标函数不再是运行成本最低,而是调整时间最短,在最快的时间内消除过负荷情况。由于燃气轮机的爬坡率受到进气量的影响,当进气量不足时,燃气轮机的爬坡速度也会降低,并不能达到理想的状态,所以在本文考虑使用燃气轮机进行过负荷控制时,燃气轮机的爬坡率是一个很关键的因素。

此外,电力系统发生故障、故障切除以及紧急过负荷控制的时间很短,在这样一个极短的时间内,由于传输延迟性,天然气网络的状态几乎没有大的变化,即使调整节点压力、压缩机等也不能影响燃气轮机机组的进气量,可以认为此时燃气轮机机组的进气量是不变的,仍等于故障发生前天然气网络供给燃气轮机机组的进气量。

#### 2.2.1 考虑经济性的控制策略

对于传统的燃气轮机机组紧急过负荷控制策略,以调整后新的运行成本最低为优化目标,优化目标函数为:

$$\min: \sum_i K_i G_{g,i,\text{new}} + \sum_j K_j G_{e,j} \quad (14)$$

式中:  $K_i$  和  $K_j$  燃气轮机和火力发电单位出力所需原料的价格;  $G_{g,i,\text{new}}$  和  $G_{e,i}$  分别为调整后燃气轮机机组出力和调整前火力发电机的出力。

约束条件为:

1) 电力系统潮流方程。

这里依旧使用式(3)和(5)的直流潮流方程。

2) 燃气机组调整后,电网每条线路潮流小于潮流约束。

$$-\text{flow}_{\max} \leq P_{ij,\text{new}} \leq \text{flow}_{\max} \quad (15)$$

式中:  $P_{ij,\text{new}}$  为调整后每条输电线路的潮流;  $\text{flow}_{\max}$  为输电线路的最大容量。

3) 调整后燃气轮机机组出力小于发电机的最大出力约束。

$$G_{g,\text{new}} = G_g \pm \text{ramp\_rate} * t \quad (16)$$

$$\underline{G}_g \leq G_{g,\text{new}} \leq \bar{G}_g \quad (17)$$

式中:  $\text{ramp\_rate}$  为燃气轮机机组爬坡率;  $t$  为调整时间;  $G_{g,\text{new}}$  为调整后燃气轮机机组新的出力;  $\underline{G}_g$  和  $\bar{G}_g$  分别为燃气轮机发电机  $g$  的出力下限和出力上限。

4) 燃气轮机机组爬坡率小于最大爬坡率。

$$\text{ramp\_rate} \leq \text{ramp\_rate}_{\max} \quad (18)$$

式中  $\text{ramp\_rate}_{\max}$  为燃气轮机机组最大爬坡率。

5) 调整时间不超过 5min。

$$0 < t \leq 5 \text{ min} \quad (19)$$

### 2.2.2 考虑快速性的控制策略

对于使用最短时间消除线路过负荷的策略，显然目标函数为紧急过负荷调整时间最短，即

$$\min : t \quad (20)$$

约束条件与考虑经济性的控制策略的(1)–(4)约束相同。

## 3 算例仿真

### 3.1 气电网络联合运行

本课题以 IEEE24 节点电力系统和比利时 20 节点天然气网络为基础进行建模<sup>[19-20]</sup>，具体网络如图 2 所示。

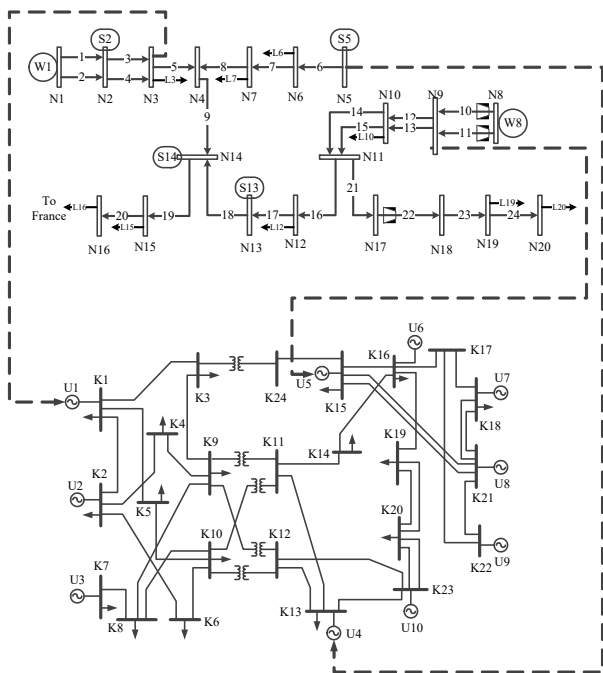


图 2 气电耦合网络图

Fig. 2 Gas-electricity combined system

通过在 GAMS 软件中建模，得到 2 个系统联合运行成本最低的运行方案，如表 2、3 所示。

### 3.2 紧急过负荷控制

当母线 1 与母线 2 之间的线路 TL1 发生故障时，保护动作，线路被切除，电力系统拓扑结构发生变化，潮流重新分布，假设在此极短时间内，所有发电机出力和负荷不变，经过计算，线路 TL3 发生线路过负荷，需要进行紧急过负荷控制。

本文针对该问题进行了 4 组仿真，对比 2 种控制策略，并在其中考虑天然气进气量的影响，即：4 组燃气轮机机组的进气量分别为充足、较充足、较不充足、不充足。

表 2 天然气网络运行方案

Tab. 2 Optimal operation plan of gas network

节点	气源出力/(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /天)	燃气负荷/(10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /天)	节点压力/10 <sup>5</sup> Pa
1	21.140	—	75.993
2	7.038	—	75.911
3	—	3.918	75.695
4	—	—	72.856
5	2.386	—	70.803
6	—	4.034	70.427
7	—	5.256	70.569
8	3.858	—	50.000
9	—	—	50.701
10	—	6.365	50.454
11	—	—	50.559
12	—	2.120	51.977
13	0	—	54.862
14	0	—	57.603
15	—	6.848	50.856
16	—	3.582	50.000
17	—	—	50.253
18	—	—	51.025
19	—	0.222	50.722
20	—	1.919	50.477

表 3 发电机出力

Tab. 3 Output of generators

发电机	发电机类型	出力/GW
U1	燃气	0.392
U2	火力	0.165
U7	火力	0.025
U13	燃气	0.391
U15	燃气	0.005
U16	火力	0.155
U18	火力	0.400
U21	火力	0.400
U22	火力	0.300
U23	火力	0.600

### 3.2.1 进气量充足

燃气轮机的进气量充足时，燃气轮机机组的爬坡率足够大，具体的爬坡率数值为：G1，±0.06 GW/min；G13，±0.06 GW/min；G15，±0.035GW/min。

分别以最快解决过负荷问题为目标，以及上文以新的稳定运行成本最低为目标，得到解决过负荷的方案如表 4 所示。

表4 进气量充足时过负荷控制方案  
Tab. 4 Control plan when gas is sufficient

内容	3个燃气轮机出力的变化			耗时/min
	G1/GW	G13/GW	G15/GW	
快速性	-0.033	0.033	0	0.55
经济性	-0.033	0.033	0	0.55

### 3.2.2 进气量较充足

当燃气轮机的进气量较充足时,此时3个燃气轮机的最大爬坡率分别为:G1:±0.04 GW/min, G13:±0.04 GW/min, G15:±0.035GW/min。同样,比较2个优化的结果如表5所示。

表5 进气量较充足时过负荷控制方案  
Tab. 5 Control plan when gas is nearly sufficient

内容	3个燃气轮机出力的变化			耗时/min
	G1/GW	G13/GW	G15	
快速性	-0.033	0.033	0	0.829
经济性	-0.033	0.033	0	0.829

### 3.2.3 进气量较不充足

当燃气轮机的进气量较不充足时,此时3个燃气轮机的最大爬坡率分别为:G1:±0.03 GW/min, G13:±0.04 GW/min, G15:±0.035GW/min。此时,2种优化目标得到的优化结果如表6所示。

表6 进气量较不充足时过负荷控制方案  
Tab. 6 Control plan when gas is nearly insufficient

内容	3个燃气轮机出力的变化			耗时/min
	G1/GW	G13/GW	G15/GW	
快速性	-0.032	0.043	-0.011	1.076
经济性	-0.033	0.033	0	1.1

### 3.2.4 进气量不充足

当燃气轮机的进气量不充足时,此时的燃气轮机爬坡率相比气量充足时较低,具体数值为:G1:±0.03GW/min, G13:±0.02 GW/min, G15:±0.035GW/min。同样,2组优化的结果如表7所示。

表7 进气量不充足时过负荷控制方案  
Tab. 7 Control plan when gas is insufficient

内容	3个燃气轮机出力的变化			耗时/min
	G1/GW	G13/GW	G15/GW	
快速性	-0.034	0.023	0.011	1.137
经济性	-0.033	0.033	0	1.65

从最快速度解决线路过负荷问题的角度,当燃气轮机的进气量充足时,燃气轮机可以在最短的时间内解决线路过负荷问题,同时达到新的运行成本最低;但是当燃气轮机的进气量不足时,经济性最好的方案并不是速度最快的方案,为了达到快速解

决过负荷问题的目的,需要牺牲一定的经济性,验证了传统气电耦合系统优化运行中的不考虑天然气供给的限制的方法并不完善,当天然气的传输受到管道、气井压力等限制时,燃气轮机的出力和爬坡率等会受到影响,进而改变气电耦合系统的运行方案。

## 4 结论

天然气网络与电力系统的耦合是能源互联网的重要组成部分,研究天然气的传输特性对气电耦合优化运行的影响对于电力系统有着非常重要的意义。

1) 从气电网络的联合运行和燃气轮机在电力线路紧急过负荷控制中的作用等方面重新审视天然气网络与电力系统的耦合关系,建立了气电耦合联合运行模型;

2) 以气网电网联合运行成本最低为优化目标,得到经济性最优的联合运行方案;

3) 研究使用燃气轮机进行电力系统输电线路紧急过负荷控制。当燃气轮机的进气量充足时,燃气轮机可以在最短的时间内解决线路过负荷问题,同时达到新的运行成本最低;但是当燃气轮机的进气量不足时,经济性最好的方案并不是速度最快的方案,为了达到快速解决过负荷问题的目的,需要牺牲一定的经济性。当天然气的传输受到管道、气井压力等限制时,燃气轮机的出力和爬坡率会受到影响,进而改变气电耦合系统的运行方案。

## 参考文献

- [1] 马钊,周孝信,尚宇炜,等.能源互联网概念、关键技术及发展模式探索[J].电网技术,2015,39(11):3014-3022.  
Ma Zhao, Zhou Xiaoxin, Shang Yuwei, et al. Exploring the concept, key technologies and development model of energy internet[J]. Power System Technology, 2015, 39(11): 3014-3022(in Chinese).
- [2] 董朝阳,赵俊华,文福拴,等.从智能电网到能源互联网:基本概念与研究框架[J].电力系统自动化,2014,38(15):1-11.  
Dong Zhaoyang, Zhao Junhua, Wen Fushuan, et al. From smart grid to energy internet: basic concept and research framework[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(15): 1-11(in Chinese).
- [3] Krause T, Andersson G, Frohlich K, et al. Multiple-energy carriers: modeling of production, delivery, and consumption[J]. Proceedings of the IEEE, 2010, 99(1):

- 15-27 .
- [4] 徐宪东. 电/气/热微型能源系统的建模、仿真与能量管理研究[D]. 天津: 天津大学, 2014 .  
Xu Xiandong . Modelling , simulation , and energy management research for electricity , gas , and heat based micro energy system[D] . Tianjin : Tianjin University , 2014(in Chinese) .
- [5] 王英瑞, 曾博, 郭经, 等. 电-热-气综合能源系统多能流计算方法[J]. 电网技术, 2016, 40(10) : 2942-2950 .  
Wang Yingrui , Zeng Bo , Guo Jing , et al . Multi-energy flow calculation method for integrated energy system containing electricity , heat and gas[J] . Power System Technology , 2016 , 40(10) : 2942-2950(in Chinese) .
- [6] 王伟亮, 王丹, 贾宏杰, 等. 考虑运行约束的区域电力-天然气-热力综合能源系统能量流优化分析[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(24) : 7108-7120 .  
Wang Weiliang , Wang Dan , Jia Hongjie , et al . Analysis of energy flow optimization in regional electricity-gas-heat integrated energy system considering operational constraints[J] . Proceedings of the CSEE , 2017 , 37(24) : 7108-7120(in Chinese) .
- [7] 胡源, 别朝红, 李更丰, 等. 天然气网络和电源、电网联合规划的方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1) : 45-53 .  
Hu Yuan , Bie Zhaohong , Li Gengfeng , et al . Integrated planning of natural gas network and composite power system[J] . Proceedings of the CSEE , 2017 , 37(1) : 45-53(in Chinese) .
- [8] 张义斌. 天然气—电力混合系统分析方法研究[D]. 北京: 中国电力科学研究院, 2005 .  
Zhang Yibin . Study on the methods for analyzing combined gas and electricity networks[D] . Beijing : China Electric Power Research Institute , 2005(in Chinese) .
- [9] 董希建, 杨海, 刘平, 等. 电力系统事故过负荷的识别及紧急控制[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(21) : 165-169 .  
Dong Xijian , Yang Hai , Liu Ping , et al . Criterion of accident overload and emergency control[J] . Power System Protection and Control , 2016 , 44(21) : 165-169(in Chinese) .
- [10] 任伟, 房大中, 陈家荣, 等. 基于最优控制原理的电力系统紧急控制及应用[J]. 电网技术, 2009, 33(2) : 8-13 .  
Ren Wei , Fang Dazhong , Chen Jiarong , et al . Optimal control theory based power system emergency control and its application[J] . Power System Technology , 2009 , 33(2) : 8-13(in Chinese) .
- [11] 任建文, 李莎, 严敏敏, 等. 基于潮流跟踪算法的线路过负荷紧急控制策略[J]. 电网技术, 2013, 37(2) : 392-397 .  
Ren Jianwen , Li Sha , Yan Minmin , et al . Emergency control strategy for line overload based on power flow tracing algorithm[J] . Power System Technology , 2013 , 37(2) : 392-397(in Chinese) .
- [12] Munoz J , Jimenez-Redondo N , Perez-Ruiz J , et al . Natural gas network modeling for power systems reliability studies[C]//Proceedings of 2003 IEEE Bologna Power Tech Conference Proceedings . Bologna , Italy : IEEE , 2003 .
- [13] 丁宇. 燃气管网系统模拟与运行分析[D]. 天津: 中国民航大学, 2014 .  
Ding Yu . Gas pipeline networks system simulation and operation analysis[D] . Tianjin : Civil Aviation University of China , 2014(in Chinese) .
- [14] 王锡凡. 现代电力系统分析[M]. 北京: 科学出版社, 2003 .  
Wang Xifan . Modern power system analysis[M] . Beijing : Science Press , 2003(in Chinese) .
- [15] Jiao Zaibin , Wang Xiaobing , Gong Heteng . Wide area measurement/wide area information-based control strategy to fast relieve overloads in a self-healing power grid [J] . IET Generation , Transmission & Distribution , 2014 , 8(6) : 1168-1176 .
- [16] Haddadi A M , Kazemi A . Optimal power flow control by rotary power flow controller[J] . Advances in Electrical and Computer Engineering , 2011 , 11(2) : 79-86 .
- [17] Lenoir L , Kamwa I , Dessaint L A . Overload alleviation with preventive-corrective static security using fuzzy logic[J] . IEEE Transactions on Power Systems , 2009 , 24(1) : 134-145 .
- [18] 田甜. 燃气电站在电网调峰中的技术经济性研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2015 .  
Tian Tian . Technical and economic analysis of gas power plants on power peaking[D] . Beijing : North China Electric Power University , 2015(in Chinese) .
- [19] De Wolf D , Smeers Y . The gas transmission problem solved by an extension of the simplex algorithm [J] . Management Science , 2000 , 46(11) : 1454-1465 .
- [20] Correa-Posada C M , Sánchez-Martín 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 .



焦在滨

收稿日期: 2018-12-21。

作者简介:

焦在滨(1976), 男, 博士, 副教授, 主要从事电力系统继电保护、能源互联网、直流配电技术等方面研究工作, jiaozabbin@mail.xjtu.edu.cn。

(责任编辑 邱丽萍)