

计及综合需求响应的电力天然气耦合系统经济调度

马伟哲, 程维杰, 龚晨, 翁毅选, 谷若雨

(深圳供电局有限公司, 广东 深圳 518000)

摘要: 为解决电力天然气耦合系统波动问题, 计及需求响应在耦合系统中的影响, 提出了基于需求响应的耦合系统经济调度。分析了天然气电力耦合系统的基本组成和能量流动, 建立了电力天然气联合系统的优化调度模型, 模型中考虑需求响应约束, 同时分别考虑天然气系统约束中的常规约束和压缩机约束, 提出电力天然气系统在含有需求响应时的可行域, 利用仿真分析说明需求响应在削减成本、电力负荷优化方面的作用。

关键词: 需求响应; 天然气系统; 耦合系统; 压缩机模型

Economic dispatch of power and natural gas coupling system considering comprehensive demand response

MA Weizhe, CHENG Weijie, GONG Chen, WENG Yixuan, GU Ruoyu

(Shenzhen Power Supply Bureau Co., Ltd., Shenzhen 518000, China)

Abstract: In order to solve the problem of random power sources in the trading mechanism of electricity and natural gas markets, a coupled market model considering random power sources is proposed. The dual market transaction price of electricity and natural gas is proposed, and the market clearing mechanism is designed, which is classified according to the coupling relationship between electricity and natural gas markets. The natural gas flow constraints and natural gas storage constraints are analyzed. According to the three established clearing models, different optimization models of power and natural gas systems are proposed. The simulation analysis of the proposed model verifies the rationality of the model is proposed.

Key words: demand response; natural gas systems; coupled systems; compressor models

0 引言

电力天然气耦合系统在天然气系统中占比逐渐增加, 该系统具有较高的运行效率, 电力天然气联合系统相比单独的天然气系统能够提升50%的效率, 并且能够以较低的排放水平运行, 灵活性显著提升。这类特点可以有效提升电力系统中可再生能源的渗透率。同时考虑到技术条件的不断进步, 天然气电力耦合系统投资也逐渐降低,

具有较高的经济性。但电力天然气耦合系统的快速发展给电力系统的规划运行带来一定挑战。天然气机组是天然气系统中的重要负荷, 天然气管道容量以及天然气储量的下降影响天然气系统以及天然气电力耦合系统。因此, 需要考虑电力天然气耦合系统运行规划, 考虑系统负荷的发展需求以及负荷需求响应, 通过场景对比, 说明电力天然气耦合系统的优势。

目前针对电力天然气耦合市场,文献[1]提出了电力及天然气系统中的产消者能量-备用协同优化方法。文献[2]对电力天然气耦合系统建模与规划运行研究进行了论述。文献[3]提出了电力天然气区域综合能源系统多能流计算及静态稳定性分析。文献[4]提出了基于多主体博弈的电力天然气综合能源系统联合规划方法。文献[5]分析了基于CCHP耦合的电力天然气区域综合能源系统优化方法。

针对电力和天然气耦合系统的研究较多,但均未对需求响应在耦合系统中的约束和应用进行分析和论证。

本文考虑电力系统和天然气系统的需求响应,同时考虑天然气系统的常规约束和压缩机约束,不再将压缩机约束作为简单模型处理,得到的模型利用可行域分析的方法进行求解,分析需求响应在耦合系统中的影响。

1 电力天然气耦合系统概述

电力系统和天然气系统组成的联合系统称为电气耦合系统,耦合机组称为气电耦合机组,通过燃气轮机和电转气技术,将传统独立的电力系统和天然气系统相互耦合,其中电转气技术将富余能源转化为天然气大规模存储,与燃气轮机构成闭环运行的综合能源系统。耦合系统的能量流关系如图1所示。

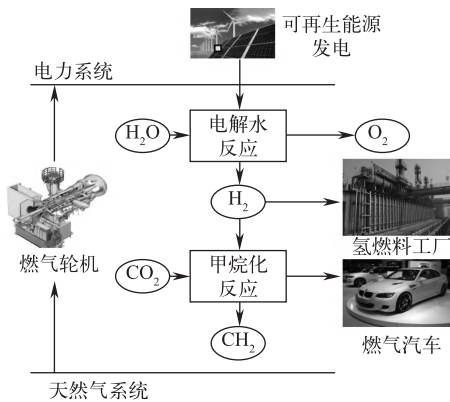


图1 能量流示意图

Fig. 1 Schematic diagram of energy flow

由于电力与天然气的负荷曲线不完全重合,

因此,可以通过电能转化的方式实现电力系统平稳运行,同时减少天然气的负荷波动。从图1中可以看出,电力系统与天然气系统的耦合关键为燃气轮机,通过对水进行电解,实现甲烷化化学反应,最终实现天然气和电力系统的耦合流动。

2 联合系统调度优化

2.1 目标函数

$$F = \min \left(\sum_{i \in G_i} k_i P_i + \sum_{i \in G_{GFP}} m_i P_i + \sum_{j \in N} \xi_i P_i^L (1 - \rho_j^E) + \sum_{v \in V} \psi_v q_v (1 - \rho_v^G) \right) \quad (1)$$

式中, k_i 和 m_i 分别为非天然气机组和天然气机组的成本系数; ξ_i 和 ψ_v 分别为电力和天然气负荷削减的成本系数; P_i 为机组有功出力; q_v 为节点天然气需求; ρ_j^E 和 ρ_v^G 为电力需求和天然气需求响应因子。

2.2 电力系统约束条件

(1) 功率平衡约束

$$P_i^{\min} \leq P_i \leq P_i^{\max} \quad (2)$$

式中, $P_i^{\min}$ 和 $P_i^{\max}$ 为有功出力下限和上限。

(2) 支路容量约束

$$|P_{kj}| \leq P_{kj}^{\max} \quad (3)$$

式中, P_{kj} 为支路潮流功率; $P_{kj}^{\max}$ 为支路功率限值。

(3) 含需求响应的平衡约束

$$\sum_{i: (i,j) \in C_G} P_i - \sum_{k: (k,j) \in C_T} P_{kj} - \sum_{CM: (c,j) \in V_g} E_{CM} = P_j^L \rho_j^E \quad (4)$$

式中, $\sum_{CM: (c,j) \in V_g} E_{CM}$ 为天然气压缩机消耗的总电能; ρ_j^E 为电能需求响应负荷削减因子; E_{CM} 为压缩机消耗电能。

(4) 直流支路潮流约束

$$P_{kj} = \frac{1}{x_{kj}} (\theta_k - \theta_j) \quad (5)$$

式中, x_{kj} 为支路电抗; θ 为节点电压相角。

(5) 气电耦合机组耗气量约束

$$F_i = f_i(P_i) \quad (6)$$

式中, F_i 为气电耦合机组消耗的天然气。

(6) 气电耦合机组总耗气量约束

$$\sum_{\forall i \in G_{GFP}} F_i = F_T \quad (7)$$

(7) 需求响应约束

需求响应项目可缓解线路过负荷、延缓备用投资成本。本文选择负荷转移作为主要的需求响应项目。

$$P_{b,t}^D = P_{b,t}^L + P_{b,t}^{dr+} - P_{b,t}^{dr-} \quad (8)$$

$$(1 - \rho^{\min}) P_{b,t}^L \leq P_{b,t}^D \leq (1 + \rho^{\max}) P_{b,t}^L \quad (9)$$

$$0 \leq \sum_{t \in T} (P_{b,t}^{dr+} - P_{b,t}^{dr-}) \leq E_b^{\max} \quad (10)$$

式中, $P_{b,t}^D$ 、 $P_{b,t}^L$ 分别为需求响应之后以及之前的负荷需求; $P_{b,t}^{dr+}$ 和 $P_{b,t}^{dr-}$ 为负荷移峰和填谷量; $\rho^{\min}$ 和 $\rho^{\max}$ 为需求响应容量占比的最小值和最大值; $E_b^{\max}$ 为需求响应最大削减容量, 若其值为0, 则总削减负荷完全转移至其他时段, 若其值大于0, 则该值表示削减负荷量。

3 天然气系统约束条件

3.1 常规约束

天然气管道中气体从高压侧流向低压侧, 与电力系统相似, 天然气网络由输气和配气系统组成, 天然气系统中的压缩机负责控制节点压力, 本文考虑约束条件如下。

(1) 流量约束

$$\sum_{s \in C_s} q_s - \sum_{u \in C_p} q_{uv} - \sum_{i \in I_g} F_i = q_v^D \rho_v^G \quad (11)$$

式中, $\sum_{i \in I_g} F_i$ 为气电耦合机组总耗气量; q_s 和 q_{uv} 分别为气源流量和管道内流量。

(2) 气源约束

$$q_s \leq q_s^{\max} \quad (12)$$

(3) 节点压力限值约束

$$p_v^{\min} \leq p_v \leq p_v^{\max} \quad (13)$$

式中, p_v 为节点压力; $p_v^{\min}$ 和 $p_v^{\max}$ 为节点压力下限和上限。

(4) 管道流量约束

$$q_{uv}^{\min} \leq q_{uv} \leq q_{uv}^{\max} \quad (14)$$

(5) 气体流速约束

$$v_{uv} = \frac{R_s T q_{uv}}{A_u p_u} z_{uv} \leq v_{uv}^{\max} \quad (15)$$

式中, R_s 为常数; T 为气体温度; A_u 为管道截面积; z_{uv} 为压缩因数; v_{uv} 为气体流速。

(6) 压力损失约束

$$p_v^2 - p_u^2 = \frac{L_{uv} \lambda_{uv} R_s z_{uv} T}{A_{uv}^2 D_{uv}} |q_{uv}| q_{uv} \quad (16)$$

其中

$$z_{uv} = 1 - \alpha p_r \exp(-\beta T_r) + \gamma p_r^2 + \exp(-\varepsilon T_r) \quad (17)$$

管道内平均压力计算式为

$$p_{uv}^m = \frac{1}{2} [\max(p_u^{\min}, p_v^{\min}) + \min(p_u^{\max}, p_v^{\max})] \quad (18)$$

管道损耗系数 λ_{uv} 计算式为

$$\lambda_{uv} = \left(2 \lg \frac{D_{uv}}{k_r} + 1.138 \right)^{-2} \quad (19)$$

式中, k_r 为粗糙度。

(7) 压缩机允许压力的限值约束为

$$p_{CM,u} - R_{CM}^{\max} p_{CM,v} \leq 0 \quad (20)$$

$$p_{CM,o} - R_{CM}^{\max} p_{CM,in} \leq 0 \quad (21)$$

式中, $p_{CM,o}$ 和 $p_{CM,in}$ 为压缩机输出和输入压力。

3.2 压缩机约束

天然气系统中的空气压缩机控制着管道中的压力, 目前大多数研究仅将空气压缩机的模型作为简单的输出输入比, 忽略其实际运行约束。

压缩机结构示意图如图2所示。

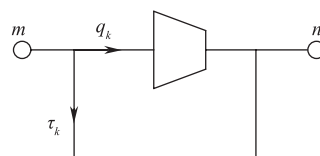


图2 压缩机结构示意图

Fig. 2 Compressor structure diagram

传统模型不能反映实际的运行约束, 因此, 得到的优化模型结果可能不满足空气压缩机运行范围。本文考虑空气压缩机的运行特性。压缩机运行区间如图3所示。

在图3中, 横坐标表示气体流量, 纵坐标表示压力比。空气压缩机的特性图利用历史量测数

据绘制得到,共包括四条曲线。图3中的上限和下限由最大和最小允许压缩速度构成。右侧区域称为石墙,气体速度达到音速,会损坏机组的运行。通过图3可以看出,可行的压缩机需要满足两个约束:第一个约束包括最小速度和石墙约束;第二个约束包括最大速度和喘振线约束。

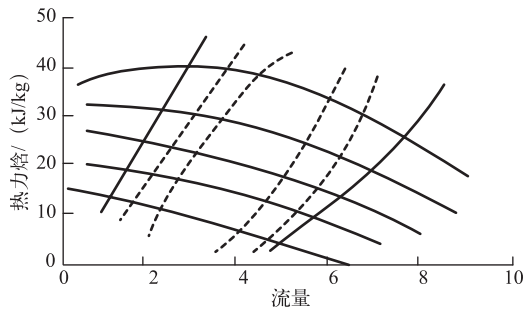


图3 压缩机运行区间示意图

Fig. 3 Compressor operation section

$$H_{CM} \geq \sigma_2 Q_{CM}^2 + \sigma_1 Q_{CM} + \sigma_0 \quad (22)$$

$$H_{CM} \leq \rho_2 Q_{CM}^2 + \rho_1 Q_{CM} + \rho_0 \quad (23)$$

式中, H_{CM} 为绝热焓的比热; ρ 和 σ 均为压缩机系数。

4 电力天然气系统可行域分析

针对联合系统的运行区域分析如图4所示。电力天然气耦合系统在不含有需求响应时的可行空间如图4a所示。单独考虑天然气负荷削减以及电力负荷削减时的可行区域如图4b、c所示。同时考虑电力负荷削减、天然气负荷削减的可行区域如图4d所示。图4b~d中虚线框表示不含有需求响应可行域。

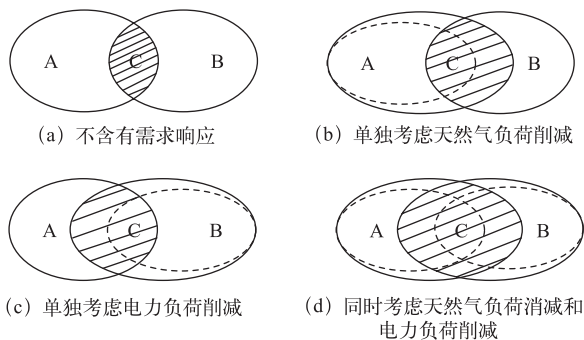


图4 可行域分析

Fig. 4 Feasible region analysis

从图4中可以看出,含有需求响应约束的可行域有所增加,说明网络中可调度机组的组合方式增加,即系统的灵活性有所增加。

5 仿真分析

利用6节点电力系统和7节点天然气系统进行仿真,包括5台发电机组、3个用电负荷、2个天然气供应商、4个天然气负荷和1处天然气储能。随机电源机组共2台。仿真系统接线如图5所示。风电出力不确定性由概率场景进行描述。具体预测出力曲线如图6所示。

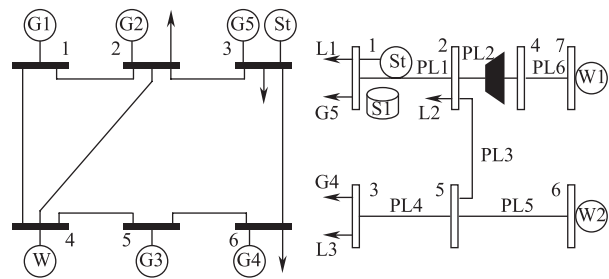


图5 仿真系统接线

Fig. 5 Simulation system wiring

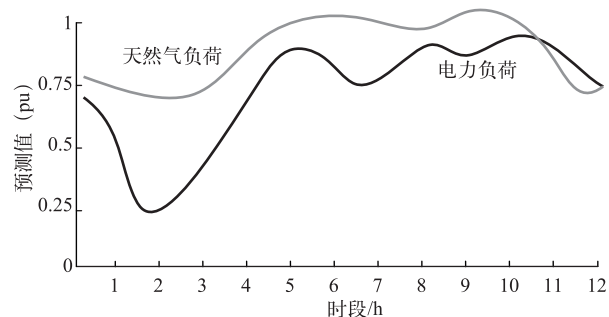


图6 预测曲线

Fig. 6 Prediction curve

$$\sum_{i(i,j) \in C_G} P_i - \sum_{k(k,j) \in C_T} P_{kj} - \sum_{CM \{c,j\} \in V_g} E_{CM} = \beta P_j^L \rho_j^E \quad (24)$$

$$\sum_{s(s,v) \in C_s} q_s - \sum_{u(u,v) \in C_p} q_{uv} - \sum_{i(i,v) \in I_g} F_i = \beta q_v^D \rho_v^G \quad (25)$$

同时考虑电力和天然气负荷增长,产生需求响应项目。成本变化如图7所示。从图7中可以看出,需求增长直接导致成本增加。另外还说明,对于某些 β 取值,联合优化模型不存在可行解。在基础情景中,可行点 β 为1.87,但是考虑需求响应项目之后,可行空间变为2.4,提升了

28%。

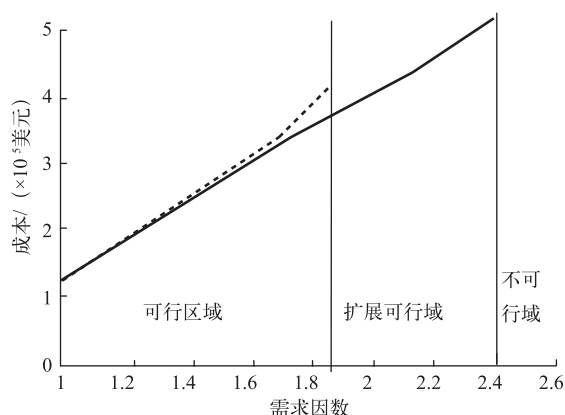


图7 成本曲线

Fig. 7 Cost curve

针对本文的仿真，给出了气电耦合机组发电、负荷削减和总成本的结果，见下表。从表中可以看出，利用本文提出的联合优化系统，考虑需求响应项目，相比基础情景的成本有所降低。另外，本文提出的模型中气电耦合机组发电水平较低，并且负荷增长一部分由需求响应项目进行补偿。

表 成本结果

Tab. Cost results

	成本 /\$	气电耦合机组 /MW	电力负荷削减 (pu)	天然气负荷 削减
不含 需求 响应	39 0758.6	4 825.8	0	0
需求 响应	35 2698.2	4 699.2	25.365	0

6 结束语

本文提出了计及需求响应的电力天然气互联

系统经济调度优化模型。建立了以电力天然气系统运行优化有目标的模型。通过仿真分析说明，在考虑天然气机组空气压缩机的运行约束条件下，相比传统约束模型更能体现系统实际运行成本。同时，考虑需求响应之后，电力负荷削减量有所增加，但总成本和机组出力有所下降。

参考文献

- [1] 徐立敏, 艾欣. 电力及天然气系统中的产消者能量-备用协同优化[J]. 现代电力, 2022, 39(1): 45-61.
- [2] 乔铮, 郭庆来, 孙宏斌. 电力-天然气耦合系统建模与规划运行研究综述[J]. 全球能源互联网, 2020, 3(1): 14-26.
- [3] 吴峰, 吕焱. 电力-天然气区域综合能源系统多能流计算及静态稳定性分析[J]. 广东电力, 2019, 32(10): 28-35.
- [4] 杨楠, 黄禹, 董邦天, 等. 基于多主体博弈的电力-天然气综合能源系统联合规划方法研究[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(22): 6521-6533.
- [5] 权超, 董晓峰, 姜彤. 基于CCHP耦合的电力、天然气区域综合能源系统优化规划[J]. 电网技术, 2018, 42(8): 2456-2466.

作者简介

马伟哲 (1982—), 男, 高级工程师, 主要研究方向: 电力系统运行控制。

(收稿日期: 2022-10-03)