

基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济运行

卫志农¹, 张思德¹, 孙国强¹, 许晓慧², 陈 胜¹, 陈 霜¹

(1. 河海大学能源与电气学院, 江苏省南京市 211100; 2. 中国电力科学研究院, 北京市 100192)

摘要: 燃气轮机等发电技术为低碳电力提供了一条有效途径,“能源互联网”的提出也使得天然气网络与电力网络的联系更加紧密。文中提出了一种电-气互联综合能源系统的联合经济运行模型,并引入碳交易机制,以综合能源系统发电能源成本与碳交易成本之和最小为目标函数,综合考虑了天然气网络和电力网络的安全约束。采用修改的 IEEE 30 节点电力网络与比利时 20 节点天然气网络进行算例分析,通过燃气轮机建立两个网络之间的耦合,分析比较了基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统和单纯火电机组电力系统低碳经济模型下的运行状态,验证了所提出模型的有效性。最后,分析了碳交易价格、天然气价格及天然气网络约束对系统运行的影响。

关键词: 能源互联网; 综合能源系统; 天然气网络; 低碳; 碳交易机制; 经济运行

0 引言

人类社会的发展至今,以化石燃料燃烧为主要形式的能源利用模式使得环境问题日益突出,如二氧化碳大量排放导致全球变暖,对人类构成严重威胁,低碳成为能源利用的必然趋势。作为能源消耗的重要行业,电力行业的二氧化碳排放量占全国总排放的比例将近 40%^[1],是节能减排的重要环节。因此,大力发展低碳电力对于低碳经济的实施与电力可持续发展具有重要意义^[2]。天然气由于其储量丰富、高效环保和易于存储等优点受到越来越多的关注,随着燃气轮机和联合循环轮机的发展,天然气发电的比例日益提高。同时,电转气技术为平抑新能源发电功率波动提供了可能,可有效促进新能源的并网。可见,天然气将在低碳电力中发挥重要作用。此外,“能源互联网”的内涵指出综合能源系统是电力网络与天然气网络等其他能源网络紧密耦合而形成的复杂多网流系统,使得未来能源系统成为电力网与天然气网高度耦合的产物^[3]。

随着天然气发电的快速发展及低碳可持续能源系统的构建,电-气互联综合能源系统逐渐引起国内外专家学者的广泛关注。文献[3-4]详细阐述了综合能源系统的基本概念和内涵,并概括了电-气互联系统的研究背景和研究框架。文献[5]给出了

基于“能源中心”的综合能源系统通用模型架构。文献[6]计及负荷和风电的不确定性,研究了综合能源系统的概率能量流。电力网与天然气网有多种耦合方式,文献[7]研究了能源中心耦合下的综合能源系统经济运行问题,而文献[8-9]则用燃气轮机联系电力网和天然气网,研究了其优化运行问题。对于综合能源系统规划与优化运行问题,文献[10]梳理了其研究现状和方法。现有电-气互联综合能源系统经济运行的研究多数是在电力网和天然气网的网络约束下,以总运行成本最低为目标函数。然而,能源生产过程中带来的附加环境成本并未得到充分考虑。

为了有效降低碳排放量,发展低碳电力,必须充分考虑碳排放因素。现有电力系统优化调度研究主要体现在系统规划^[11-12]和系统运行两个方面^[13]。文献[14]深入剖析了低碳电力调度的背景和内涵,建立了低碳电力调度决策的基本模型。文献[15]将二氧化碳排放量作为目标之一引入机组组合问题中,进行机组组合低碳优化。对于碳排放的处理,主要有包括碳排放最小目标的多目标模型、考虑碳排放经济惩罚成本的单目标模型和计及碳排放量约束等几种方法^[16-19]。这些方法虽然在减少碳排放方面有一定效果,但方式都过于简单,会增加高额发电成本,难以提高发电企业的积极性,为此需要引入更为合理的碳交易机制。

碳交易机制对高碳排放企业进行惩罚的同时给予节能环保企业奖励。文献[20-21]同时兼顾电力系统的经济性和低碳性,实现电力系统低碳经济运

收稿日期: 2015-11-09; 修回日期: 2016-05-16。

上网日期: 2016-06-30。

国家自然科学基金资助项目(51277052)。

行。文献[22]考虑了碳排放配额影响,建立了含风电系统的日前调度计划模型。文献[23]用碳排放交易来限制碳排放,研究了城市电力系统动态优化运行。上述文献均充分考虑了电力系统的低碳性,但鲜有文献研究天然气发电及天然气网络对低碳电力的影响。实际上,使用燃气轮机发电更加高效环保,将进一步减少碳排放,而天然气网络的约束也必然会对电力网运行产生影响。文献[24]虽然计及多能源形式能源系统的碳排放,但以多目标方式处理,并没有考虑碳交易机制。因此有必要研究基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统运行的低碳特性。

本文针对电-气互联综合能源系统,建立了基于碳交易机制的低碳经济模型。首先对天然气网络进行建模,电力网和天然气网通过燃气轮机耦合形成电-气互联综合能源系统。其次,本文考虑系统发电的能源成本和碳交易成本,分别建立了电-气互联综合能源系统和单纯火电机组电力系统的低碳经济模型,用现代内点法求解,着重比较了两种模型下的碳排放、系统发电总成本和运行状态,并分析了造成两种模型差异的原因。采用修改的 IEEE 30 节点电力网与比利时 20 节点天然气网络进行算例分析,分析结果验证了本文所提模型的可行性与有效性。最后,研究了碳交易价格、天然气价格以及天然气网络约束对综合能源系统运行的影响。

1 电-气互联综合能源系统

1.1 天然气网络模型

天然气网络中天然气从气源点注入,通过管道输送至负荷侧,安装在网络中的加压站用于补充能量传输过程中的压力损失。用于天然气网络建模的基本元素主要有管道、加压站和节点母线三个。

天然气管道流量方程与管道两端压力及管道诸多物理特性有关,并无通用的形式,特定情形下的气体流量通常用非线性方程描述。对于理想绝热输气管道 k ,其首末节点分别为 m 和 n ,其稳态流量 f_k 可表示为^[25]:

$$f_k = f_{k,mn} = S_{mn} c_{mn} \sqrt{S_{mn} (\pi_m^2 - \pi_n^2)} \quad (1)$$

$$S_{mn} = \begin{cases} 1 & \pi_m \geq \pi_n \\ -1 & \pi_m < \pi_n \end{cases} \quad (2)$$

式中: $f_{k,mn}$ 为第 k 条天然气管道由首节点 m 流向末节点 n 的流量值; c_{mn} 为与管道效率、温度、长度、内径、压缩因子等有关的常数; π_m 和 π_n 分别为节点 m 和 n 的压力值; S_{mn} 为反映管道流量方向的变量,为1时表示由首节点流向末节点,为-1时表示由末节点流向首节点。

为了可靠传输天然气和补偿由于摩擦阻力造成的天然气网络下游的压力损失,天然气网络中需要配置一定数量的加压站。加压站最主要的部分是增加天然气压力的压缩机。压缩机的运行需要消耗大量的能量,其与流过压缩机的流量和压缩比有关。在天然气网络中,驱动压缩机最经济的能量源是通过压缩机的天然气,可将其视为天然气网络中的负荷。图1为消耗天然气的压缩机模型示意图。

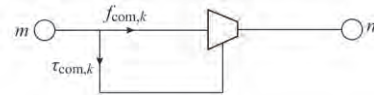


图1 消耗天然气的压缩机模型
Fig.1 Compressor model which consuming natural gas

图中: $f_{com,k}$ 为流过压缩机的流量; $\tau_{com,k}$ 为压缩机消耗能量的等效流量。压缩机 k 消耗的能量和等效流量可表示为:

$$H_{com,k} = H_{k,mn} = B_k f_{com,k} \left[\left(\frac{\pi_n}{\pi_m} \right)^{Z_k} - 1 \right] \quad (3)$$

$$\tau_{com,k} = \alpha_k + \beta_k H_{com,k} + \gamma_k H_{com,k}^2 \quad (4)$$

式中: $H_{com,k}$ 为压缩机消耗的能量; $H_{k,mn}$ 为位于首节点 m 和末节点 n 之间的压缩机 k 消耗的能量; B_k 为与压缩机效率、温度、天然气热值有关的常数; Z_k 为与压缩机压缩因子和天然气热值有关的常数; α_k , β_k , γ_k 为能量转换效率常数。

类似于电力网中的节点功率平衡,根据流量守恒定律可以列写出天然气网络中每个节点的流量平衡方程,用矩阵的形式表示为:

$$(A + U)f + w - T\tau = 0 \quad (5)$$

式中: A 为节点-管道关联矩阵; U 为节点-压缩机关联矩阵; T 为节点与压缩机能量消耗的关联矩阵; f 为管道及通过压缩机流量向量; τ 为压缩机消耗流量向量; w 为节点净注入天然气流量向量。

1.2 电-气互联综合能源系统耦合模型

电-气互联综合能源系统由天然气网和电力网组成。天然气网与电力网的耦合形式有多种,如燃气轮机、电力驱动的压缩机以及能源中心,本文主要考虑燃气轮机的耦合形式。也就是说,燃气轮机的天然气输入可视为天然气网的负荷,同时燃气轮机的电力输出是电力网的源,这样也就将天然气网和电力网紧密联系起来。天然气网与电力网的耦合关系可表示为:

$$\varphi_i(P_{GT,i}) = K_{2i} P_{GT,i}^2 + K_{1i} P_{GT,i} + K_{0i} \quad i \in \Omega_{GT} \quad (6)$$

式中: $\varphi_i(P_{GT,i})$ 为燃气轮机 i 消耗的天然气流量; $P_{GT,i}$ 为燃气轮机 i 有功出力; K_{2i} , K_{1i} , K_{0i} 为燃气

轮机 i 耗量系数; Ω_{GT} 为燃气轮机集合。

这样,式(5)中节点净注入天然气流量 w 可表示为:

$$w = w_g - w_l - \varphi(P_{GT}) \quad (7)$$

式中: w_g 为天然气气源点注入流量向量; w_l 为天然气负荷汲取流量向量; $\varphi(P_{GT})$ 为燃气轮机消耗天然气流量向量。

2 低碳经济模型

2.1 经济模型

电-气互联综合能源系统经济模型以系统发电能源成本最低为目标函数,同时考虑电力网与天然气网的安全约束,其模型描述如下。

1) 变量选取

电-气互联综合能源系统经济模型选取发电机有功、无功出力,气源点天然气供应量作为控制变量;选取电力网节点电压向量的实部和虚部,天然气网络节点压力和通过压缩机流量作为状态变量。

2) 目标函数

$$\min F_1 = \min \left(\sum_{i \in \Omega_{GF}} (a_i P_{GF,i}^2 + b_i P_{GF,i} + c_i) + \sum_{j \in \Omega_{GT}} g_j w_{T,j} \right) \quad (8)$$

式中: F_1 为系统发电能源成本; Ω_{GF} 为火电机组集合; a_i, b_i, c_i 为火电机组 i 耗量特性曲线参数; $P_{GF,i}$ 为火电机组 i 有功出力; g_j 为燃气轮机 j 消耗天然气成本系数; $w_{T,j}$ 为向燃气轮机 j 供应的天然气流量。

3) 等式约束

电-气互联综合能源系统经济模型的等式约束包括电力网功率平衡约束、平衡节点相角平衡约束和天然气网络节点流量平衡约束,其表达如下:

$$\begin{cases} P_{G,i} - P_{L,i} - e_i \sum_{j=1}^{n_b} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) - f_i \sum_{j=1}^{n_b} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0 \\ Q_{G,i} - Q_{L,i} - f_i \sum_{j=1}^{n_b} (G_{ij} e_j - B_{ij} f_j) + e_i \sum_{j=1}^{n_b} (G_{ij} f_j + B_{ij} e_j) = 0 \\ \tan \theta_{bal} - \frac{f_{bal}}{e_{bal}} = 0 \\ (A + U)f + w - T\tau = 0 \end{cases} \quad (9)$$

式中: $P_{G,i}$ 和 $Q_{G,i}$ 分别为发电机 i 有功、无功出力; $P_{L,i}$ 和 $Q_{L,i}$ 分别为节点 i 有功、无功负荷; e_i 和 f_i 分

别为节点 i, j 电压相量的实部; f_i 和 f_j 分别为节点 i, j 电压相量的虚部; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为导纳矩阵第 i 行第 j 列的实部和虚部; n_b 为电力网节点个数; θ_{bal} 为平衡节点电压相角; e_{bal} 和 f_{bal} 分别为平衡节点电压的实部和虚部。

4) 不等式约束

电-气互联综合能源系统经济模型的不等式约束包括电力网发电机出力约束、节点电压约束、线路功率约束、天然气网络气源点天然气供应量约束、节点压力约束及压缩机压缩比约束,其表达如下:

$$\begin{cases} P_{Gmin,i} \leq P_{G,i} \leq P_{Gmax,i} \\ Q_{Gmin,i} \leq Q_{G,i} \leq Q_{Gmax,i} \\ V_{min,i}^2 \leq e_i^2 + f_i^2 \leq V_{max,i}^2 \\ P_{lmin} \leq P_l \leq P_{lmax} \\ w_{gmin,i} \leq w_{g,i} \leq w_{gmax,i} \\ \pi_{min,m} \leq \pi_m \leq \pi_{max,m} \\ R_{min,k} \leq \frac{\pi_n}{\pi_m} \leq R_{max,k} \end{cases} \quad (10)$$

式中: $P_{Gmax,i}, P_{Gmin,i}, Q_{Gmax,i}, Q_{Gmin,i}$ 分别为发电机 i 有功出力上、下限和无功出力上、下限; $V_{max,i}$ 和 $V_{min,i}$ 分别为节点 i 电压幅值上、下限; P_l 为线路功率; P_{lmax} 和 P_{lmin} 分别为线路功率上、下限; $w_{gmax,i}$ 和 $w_{gmin,i}$ 分别为气源点 i 天然气供应量上、下限; $\pi_{max,m}$ 和 $\pi_{min,m}$ 分别为节点 m 压力上、下限; $R_{max,k}$ 和 $R_{min,k}$ 分别为压缩机 k 压缩比上、下限。

2.2 基于碳交易机制的低碳经济模型

为了实现低碳电力,需要将碳排放考虑到经济运行中来。本文忽略电-气互联综合能源系统中天然气在生产、传输过程中产生的碳排放,仅考虑发电机的碳排放。发电机的碳排放量与有功出力成比例,可表示如下:

$$E = \sum_{i \in \Omega_G} \delta_i P_{Gi} \quad (11)$$

式中: E 为发电机的碳排放量; δ_i 为发电机 i 单位有功出力碳排放强度; Ω_G 为发电机集合。

为了减少碳排放,可以对碳排放进行经济性惩罚,即给碳排放源分配一定的碳排放额度,向碳排放量超出额度的碳排放源收取一定的碳排放税。但收取碳排放税的方式对碳排放的处理过于简单,仅考虑经济性惩罚的措施不够科学合理。发电企业为了节能减排,不得不承担使用清洁发电技术带来的高额成本,积极性难以提高,为此需引入碳交易机制。

碳交易机制将碳排放视为一种可以自由交易的商品。监管部门为了控制碳排放总量向每个碳排放源分配碳排放额,如果碳排放源的实际碳排放量大于分配额则需要到碳交易市场购买超出的额度;反

之,当碳排放源的实际碳排放量小于分配额则可以在碳交易市场出售剩余的额度^[20]。这样,碳交易机制既对高碳排放企业进行了经济惩罚,又对节能环保部门给予了奖励,使得碳排放具有了巨大的经济价值。

碳排放源的碳排放额分配依然采用与发电机组有功出力成比例的模型,可表示如下:

$$D = \sum_{i \in \Omega_G} \eta P_{Gi} \quad (12)$$

式中: D 为发电机组分配的碳排放额; η 为发电机单位有功出力碳排放分配额。

根据碳交易价格 P_{CO_2} , 可计算碳交易成本 F_2 :

$$F_2 = P_{CO_2} (E - D) \quad (13)$$

由式(13)可知,发电机组的实际碳排放量大于分配额,即 $E > D$ 时,有 $F_2 > 0$, 产生碳排放成本;发电机组的实际碳排放量小于分配额,即 $E < D$ 时,有 $F_2 < 0$, 产生碳排放收益。当碳排放量 E 足够小而碳交易价格比较大时产生的碳交易收益将非常可观,甚至抵消采用燃气轮机等清洁发电技术带来的成本增加。这就充分调动了发电企业节能减排的积极性。

将碳交易成本加到电-气互联综合能源系统的发电能源成本得到基于碳交易机制的低碳经济模型,目标函数如下:

$$\min(F_1 + F_2) \quad (14)$$

由式(8)至式(14)建立的基于碳交易机制低碳经济模型为非线性规划问题,由于内点法在求解非线性规划问题方面具有收敛性好、鲁棒性强等优点,本文采用现代内点法予以求解。

3 算例分析

3.1 算例说明

本文将修改的 IEEE 30 节点电力系统和比利时 20 节点天然气系统通过燃气轮机耦合构造了一个电-气互联综合能源系统进行算例分析。

Matpower4.1 提供的 IEEE 30 节点系统有 6 台发电机、41 条输电线路,总装机容量 335 MW,有功负荷 189.2 MW,本文将负荷扩大 30%。设定发电机 G1 和 G2 为燃气轮机,与天然气网络节点 4 和 12 相连,燃烧的天然气由天然气网络供应。燃气轮机及火电机组的相关参数见附录 A 表 A1 和表 A2。发电机单位有功出力的碳排放分配额取为 $0.798 \text{ t}/(\text{MW} \cdot \text{h})^{[20]}$ 。

比利时 20 节点天然气系统包括 20 个节点、21 条输气管道、2 个加压站和 6 个气源点(包括 4 个储气设备),假设加压站压缩机消耗天然气网络中的

天然气,气负荷为 $46.298 \text{ Mm}^3/\text{d}$ 。该系统结构见图 2^[26],具体参数^[10,27] 见附录 A 表 A3 至表 A5。天然气网络气源点参数如表 1 所示,天然气价格取 2014 年美国天然气市场价格 16 万美元/ Mm^3 ^[28]。

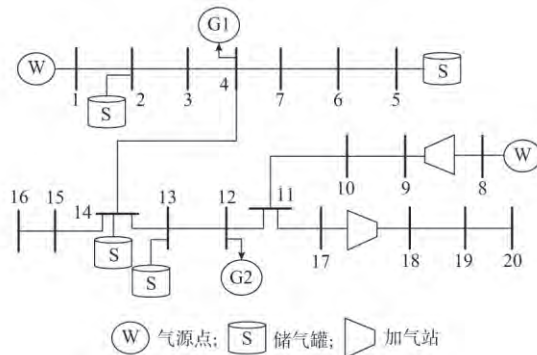


图 2 修改的比利时天然气系统结构图
Fig.2 Structure of modified Belgium natural gas transmission system

表 1 天然气网络气源点参数
Table 1 Parameters of gas production and storage point of natural gas network

气源点	天然气网节点	供应下限/ ($\text{Mm}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	供应上限/ ($\text{Mm}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)
W1	1	8.870	17.391
W2	2	0	12.600
W3	5	0	7.200
W4	8	20.344	33.018
W5	13	0	2.700
W6	14	0	1.440

3.2 不同模型对比分析

为说明基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济模型的有效性 with 优越性,这里研究两种模型。在碳交易机制下,模型一不考虑天然气网络,仅研究单纯火电机组的电力系统低碳经济模型;模型二为第 2 节建立的电-气互联综合能源系统低碳经济模型。目前碳交易价格在 35~50 美元之间波动^[20-21],首先取碳交易价格为 42 美元,分别对上述两种模型进行计算。两种模型下的系统发电成本、碳排放结果对比如表 2 所示,各发电机组的出力对比如图 3 所示。

表 2 不同模型下系统运行成本、碳排放量对比
Table 2 System operation cost and carbon emission comparison under different models

模型	碳排放量/t	能源成本/ 美元	碳交易成本/ 美元	发电总成本/ 美元
一	298.45	874.83	4 199.20	5 074.03
二	212.80	4 122.66	597.06	4 719.72

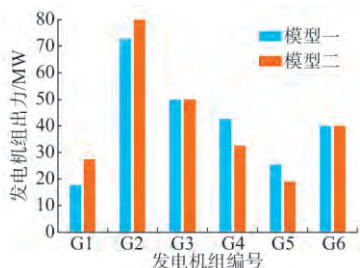


图3 不同模型下发电机组出力对比
Fig.3 Comparison of generators output under different models

分析比较表2中结果可知,模型一所有的发电机组均为火电机组,火电机组碳排放强度较大,为 $1.2 \text{ t}/(\text{MW} \cdot \text{h})$,产生较高的碳排放量,达到 298.45 t ;但是煤炭价格较低,所以能源消耗成本也很低;由于单位有功出力碳排放分配额为 $0.798 \text{ t}/(\text{MW} \cdot \text{h})$,小于火电机组碳排放强度,故需要去碳交易市场购买超出的碳排放额度,使得碳交易成本成为发电的主要成本,占总成本的 82.76% 。对于全为火电机组的情形,碳交易机制类似于2.2节中提到的收取碳税的方式。模型二加入了燃气轮机组,考虑了天然气网络,由于燃气轮机碳排放强度很小,加上碳交易机制的引导,碳排放量仅为 212.80 t ,比模型一减少了 28.70% ,有效降低了碳排放量。燃气轮机组产生的碳排放收益会部分补偿火电机组的碳排放成本,使碳交易成本很低,在碳交易价格合适的情况下,碳交易机制将给发电企业带来巨大的经济效益。目前天然气价格仍很高,使得电-气互联综合能源系统的发电能源成本代替模型一的碳交易成本成为主要成本,占总成本的 87.35% ,高额的天然气成本制约了天然气发电的快速发展。

对比图3可以发现,模型二发电机G1和G2的出力高于模型一,而发电机G3到G4的出力均低于模型一,这是由于模型一全为火电机组,碳排放强度较高,而模型二发电机G1和G2为燃气轮机,碳排放强度较火电机组低,还可以产生碳排放收益,所以发电机组出力向碳排放更少的燃气轮机组转移。

由上述分析可知,在碳交易机制下,考虑天然气网络的电-气互联综合能源系统较单纯火电机组电力系统不仅降低了发电总成本,还有效降低了碳排放量,验证了基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统低碳经济模型的有效性和优越性。

3.3 碳交易价格对系统运行影响分析

碳交易价格是基于碳交易机制低碳经济模型中低碳目标的权重,所以碳交易价格的变化会影响碳排放量、系统发电成本以及系统运行状态。为研究

碳交易价格对系统运行的影响,针对模型二,绘制了碳排放量、系统发电总成本及碳交易成本与碳交易价格的关系曲线,如图4和图5所示。

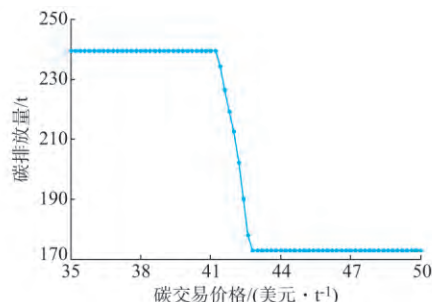


图4 碳排放量与碳交易价格关系曲线
Fig.4 Relation curve between carbon emission and carbon trading price

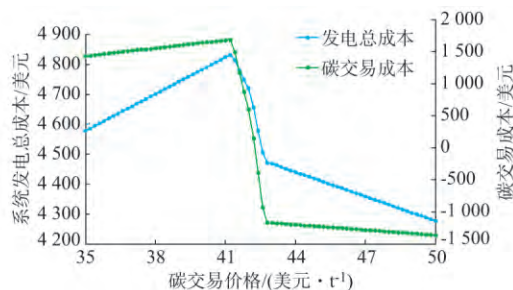


图5 系统发电成本及碳交易成本与碳交易价格关系曲线
Fig.5 Relation curves between generation cost, carbon trading cost and carbon trading price

分析图4和图5可知,在碳交易价格较低时,低碳目标的权重很小,碳排放量下降非常缓慢,系统运行以经济目标为主,但随着碳交易价格增加,碳交易成本和系统发电成本在缓慢增加;碳交易价格增加到 $41.3 \text{ 美元}/\text{t}$ 时,低碳目标开始起显著作用,发电机组出力开始向更环保的燃气轮机转移,所以碳排放量开始显著下降,碳交易成本和系统发电成本随之下降;碳交易价格增加到 $42.3 \text{ 美元}/\text{t}$ 时,碳交易成本下降到0,即此时系统碳排放量等于碳分配额,之后开始产生碳收益,使得碳排放量快速下降;碳交易价格大于 $43.2 \text{ 美元}/\text{t}$ 时,燃气轮机已经满发,碳排放量不再改变,碳交易成本和系统发电成本与碳交易价格成正比例缓慢下降。从以上分析可以看出基于碳交易机制的电-气互联综合能源系统运行状态对碳交易价格波动非常敏感。

3.4 天然气价格对系统运行影响分析

与碳交易价格相同,天然气价格的变化同样会影响系统的运行状态。对于模型二,目标函数为能源成本与碳交易成本之和,天然气价格的变化直接影响能源成本,进而改变了低碳目标的相对权重。

天然气价格较低时,低碳目标相对权重高,碳排放低,获得碳排放收益;天然气价格较高时,低碳目标相对权重低,碳排放高,产生碳排放成本。

由于天然气价格影响到低碳目标的相对权重,所以天然气价格与开始产生碳收益时碳交易价格息息相关。美国天然气市场价格在 2012 至 2014 年间由 10 万美元/ Mm^3 增加到 16 万美元/ Mm^3 ^[28]。考虑日后天然气价格的变化,当天然气价格由 10 万美元/ Mm^3 提高至 18 万美元/ Mm^3 时,计算得开始产生碳收益时的碳交易价格由 26.4 美元提高至 47.6 美元。开始产生碳收益时的碳交易价格与天然气价格几乎成正比,天然气价格越高,要想获得碳收益就需要提高碳交易价格。天然气价格主要由能源市场决定,而碳交易价格由相关监管部门根据政策需要及碳交易规则制定,那么监管部门就可以根据天然气价格制定合适的碳交易价格来调动发电企业节能减排的积极性,最终达到节能减排的目的。

3.5 天然气网络对系统运行影响分析

前面的分析都是基于天然气网络气源点天然气供应充足的情况,实际上,天然气网络往往会出现故障、检修等偶然事件,使得天然气无法充足供应,另外天然气网络的安全约束也会限制天然气的供应。将天然气网络气源点天然气供应上限减少为原来的 75%,同时增加气负荷,重新计算模型二,燃气轮机组出力及气源点天然气供应量如表 3 所示。

表 3 燃气轮机出力和气源点天然气供应量
Table 3 Gas-fired generator output and natural gas supply of production and storage point

燃气 轮机	机组出力/MW		气源 点	气源点气体供应量/($\text{Mm}^3 \cdot \text{d}^{-1}$)	
	有功 出力	有功出 力上限		天然气 供应量	供应 上限
G1	15.12	80	W1	13.04	13.04
G2	77.62	80	W2	9.45	9.45
G3	50.00	50	W3	5.40	5.40
G4	41.26	55	W4	24.76	24.76
G5	24.70	30	W5	2.03	2.03
G6	40.00	40	W6	1.08	1.08

由表 3 可知,天然气网络各气源点能源供应均已经达到上限,而燃气轮机 G1 的最大出力为 15.12 MW, G2 的最大出力为 77.62 MW,无法达到上限。此时系统产生的最小碳排放为 224.25 t,而在天然气供应充足时产生的最小碳排放为 198.59 t。如果继续减小天然气供应,程序将不收敛,即违反了天然气网络安全约束,系统无法运行。因而,碳交易机制下含燃气轮机组发电系统的低碳经济调度需充分考虑天然气网络的安全约束。

4 结论

本文针对电—气互联综合能源系统提出了一种基于碳交易机制的低碳经济运行模型,分析比较了电—气互联综合能源系统与单纯火电机组电力系统低碳经济模型的碳排放量和系统发电成本,并研究了碳交易价格及天然气价格对系统运行影响,所得结论如下。

1)与收取碳税等其他低碳方式相比,碳交易机制采取奖励低排放、惩罚高排放的经济调节手段,使发电企业主动采用清洁的生产方式来获得碳收益,更加合理、有效。在国内天然气价格仍高于煤炭等一次能源的背景下,碳交易机制为低碳电力的发展提供了一条有效途径。碳交易机制下,考虑天然气网络的电—气互联综合能源系统较单纯火电机组电力系统不仅能降低碳排放,在碳交易价格合适时还能有效降低系统发电总成本,显示了其优越性,具有良好的发展前景。

2)对于基于碳交易机制的低碳经济模型,碳交易价格和天然气价格都会影响低碳目标的相对权重,进而影响系统的运行状态。碳交易价格越高,碳排放越少,越容易获得碳排放收益,使得系统发电总成本越低;相反,天然气价格越高,碳排放越高,发电总成本也越高。另外,开始产生碳收益时碳交易价格与天然气价格近似成正比,可以为监管部门决策提供理论参考。

3)以往低碳电力研究少有考虑天然气网络的影响,但本文的研究指出了含燃气轮机发电系统低碳经济调度需考虑天然气网络安全约束的必要性。

附录见本刊网络版 (<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>)。

参考文献

- [1] 魏一鸣,刘兰翠,范英,等.中国能源报告(2008):碳排放研究[M].北京:科学出版社,2008.
- [2] 康重庆,陈启鑫,夏清.低碳电力技术的研究展望[J].电网技术,2009,33(2):1-7.
KANG Chongqing, CHEN Qixin, XIA Qing. Prospects of low-carbon electricity[J]. Power System Technology, 2009, 33(2): 1-7.
- [3] 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. DOI: 10.7500/AEPS20140613007.
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. DOI: 10.7500/AEPS20140613007.
- [4] 孙宏斌,郭庆来,潘昭光,等.能源互联网:理念、架构与前沿展望[J].电力系统自动化,2015,39(19):1-8. DOI: 10.7500/

- AEPS20150701007.
- SUN Hongbin, GUO Qinglai, PAN Zhaoguang, et al. Energy internet: concept, architecture and frontier outlook [J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(19): 1-8. DOI: 10.7500/AEPS20150701007.
- [5] KRAUSE T, ANDERSSON G, FROHLICH K, et al. Multiple — energy carriers: modeling of production, delivery, and consumption[J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 15-27.
- [6] 陈胜, 王志农, 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.
- [7] GEIDEL M, ANDERSSON G. Optimal power flow of multiple energy carriers[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2007, 22(1): 145-155.
- [8] UNSIHUAY C, LIMA J W M, DE SOUZA A C Z. Modeling the integrated natural gas and electricity optimal power flow [C]// IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA: 3955-3961.
- [9] AN S, LI Q, GEDRA T W. Natural gas and electricity optimal power flow [C]// IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, September 7-12, 2003, Dallas, TX, USA: 138-143.
- [10] 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. DOI: 10.7500/AEPS20141009011.
- 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. DOI: 10.7500/AEPS20141009011.
- [11] QIU J, DONG Z Y, ZHAO J H, et al. Low carbon oriented expansion planning of integrated gas and power systems[J]. IEEE Trans on Power Systems, 2015, 30(2): 1035-1046.
- [12] KAZEROONI A K, MUTALE J. Transmission network planning under security and environmental constraints [J]. IEEE Trans on Power Systems, 2010, 25(2): 1169-1178.
- [13] 姜素华, 卢斯煜, 吴耀武, 等. 低碳电力系统规划与运行优化研究综述[J]. 电网技术, 2013, 37(6): 1484-1490.
- LOU Suhua, LU Siyu, WU Yaowu, et al. An overview on low — carbon power system planning and operation optimization [J]. Power System Technology, 2013, 37(6): 1484-1490.
- [14] 陈启鑫, 康重庆, 夏清, 等. 低碳电力调度方式及其决策模型[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(12): 18-23.
- CHEN Qixin, KANG Chongqing, XIA Qing, et al. Mechanism and modelling approach to low — carbon power dispatch[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(12): 18-23.
- [15] 张晓花, 赵晋泉, 陈星莺. 节能减排多目标机组组合问题的模糊建模及优化[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 71-76.
- ZHANG Xiaohua, ZHAO Jinquan, CHEN Xingying. Multi — objective unit commitment fuzzy modeling and optimization for energy-saving and emission reduction[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 71-76.
- [16] 王志农, 向育鹏, 孙国强, 等. 计及碳排放含有碳捕集电厂电网的多目标动态最优潮流[J]. 电网技术, 2012, 36(12): 11-17.
- WEI Zhinong, XIANG Yupeng, SUN Guoqiang, et al. Carbon emission — considered multi-objective dynamic optimal power flow of power system containing carbon-capture plant [J]. Power System Technology, 2012, 36(12): 11-17.
- [17] 马瑞, 曾婷, 陈元新, 等. 考虑碳捕集电厂的电力系统多目标最优潮流及其碳流分析[J]. 电力科学与技术学报, 2015, 30(1): 14-21.
- MA Rui, ZENG Ting, CHEN Yuanxin, et al. Analysis of carbon capture power plants — considered multi-objective optimal power flow and carbon flow for power systems[J]. Journal of Electric Power and Technology, 2015, 30(1): 14-21.
- [18] TSAI M T, YEN C W. An improved particle swarm optimization for economic dispatch with carbon tax considerations [C]// IEEE International Conference on Power System Technology, October 24-28, 2010, Hangzhou, China: 6p.
- [19] WU Y, LOU S, LU S. A model for power system interconnection planning under low — carbon economy with CO₂ emission constraints [J]. IEEE Trans on Sustainable Energy, 2011, 2(3): 205-214.
- [20] 张晓辉, 闫柯柯, 卢志刚, 等. 基于碳交易的含风电系统低碳经济调度[J]. 电网技术, 2013, 37(10): 2697-2704.
- ZHANG Xiaohui, YAN Keke, LU Zhigang, et al. Carbon trading based low — carbon economic dispatching for power grid integrated with wind power system [J]. Power system Technology, 2013, 37(10): 2697-2704.
- [21] 姜素华, 胡斌, 吴耀武, 等. 碳交易环境下含大规模光伏电源的电力系统优化调度[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(17): 91-97. DOI: 10.7500/AEPS20140508005.
- LOU Suhua, HU Bin, WU Yaowu, et al. Optimal dispatch of power system integrated with large scale photovoltaic generation under carbon trading environment[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(17): 91-97. DOI: 10.7500/AEPS20140508005.
- [22] 张程飞, 袁越, 张新松, 等. 考虑碳排放配额影响的含风电系统日前调度计划模型[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2114-2120.
- ZHANG Chengfei, YUAN Yue, ZHANG Xinsong, et al. Day — ahead dispatching scheduling for power grid integrated with wind farm considering influence of carbon emission quota[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2114-2120.
- [23] ZHU Y, LI Y P, HUANG G H, et al. A dynamic model to optimize municipal electric power systems by considering carbon emission trading under uncertainty[J]. Energy, 2015, 88: 636-649.
- [24] SHABANPOUR-HAGHIGHI A, SEIFI A R. Multi — objective operation management of a multi-carrier energy system[J]. Energy, 2015, 88: 430-442.
- [25] LI Q, AN S, GEDRA T W. Solving natural gas load flow problems using electric load flow techniques [C]// Proceedings of the North American Power Symposium, October 20-21, 2003, Rolla, USA: 7p.
- [26] 孙国强, 陈霜, 王志农, 等. 计及相关性的电-气互联系统概率最

优潮流[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(21): 11-17. DOI: 10.7500/AEPS20150611006.

SUN Guoqiang, CHEN Shuang, WEI Zhinong, et al. Probabilistic optimal power flow of combined natural gas and electric system considering correlation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(21): 11-17. DOI: 10.7500/AEPS20150611006.

[27] MUNOZ J, JIMENEZ-REDONDO N, PEREZ-RUIZ J, et al. Natural gas network modeling for power systems reliability studies[C]// IEEE Bologna Power Tech Conference, June 23-26, 2003, Bologna, Italy: 20-27.

[28] MARIA H. World energy outlook 2014[M]. Paris, France;

International Energy Agency, 2014.

王志农(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要研究方向:电力系统运行分析与控制、输配电系统自动化。E-mail: wzn_nj@263.net

张思德(1992—),男,通信作者,硕士研究生,主要研究方向:综合能源网优化。E-mail: Ade_hhu@163.com

孙国强(1978—),男,博士,副教授,主要研究方向:电力系统分析与运行控制。E-mail: hhusunguoqiang@163.com

(编辑 万志超)

Carbon Trading Based Low-carbon Economic Operation for Integrated Electricity and Natural Gas Energy System

WEI Zhinong¹, ZHANG Side¹, SUN Guoqiang¹, XU Xiaohui², CHEN Sheng¹, CHEN Shuang¹

(1. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China;

2. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

Abstract: Some power generation technologies such as gas-fired generator provide an effective way for low-carbon electricity. Meanwhile, Energy Internet enables a deep interconnection between the natural gas network and the electric power network. This paper proposes a joint economic operation model for integrated electricity and natural gas energy system. Minimizing the sum of integrated energy system generation energy costs and carbon trading costs becomes the objective function of the model with the consideration of the carbon trading mechanism. The security constraints of the natural gas and electricity networks are considered simultaneously. The test case consists of the modified IEEE 30-bus electric network, the Belgian 20-bus gas network and the couplings of gas-fired generators. The effectiveness of the proposed model has been verified by analyzing and comparing the operation conditions of integrated electricity and natural gas energy system and power system with all coal-fired generators based low-carbon economic model. Finally, the effect of carbon trading price, the price of natural gas and natural gas network constraints on operation conditions has been further analyzed.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51277052).

Key words: Energy Internet; integrated energy system; natural gas network; low-carbon; carbon trading mechanism; economic operation

(上接第 8 页 continued from page 8)

Energy Management for Multi-energy Flow: Challenges and Prospects

SUN Hongbin^{1,2}, PAN Zhaoguang^{1,2}, GUO Qinglai^{1,2}

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

2. State Key Laboratory of Control and Simulation of Power System and Generation Equipments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Multi-energy flow coupling is one of the key features of the Energy Internet and integrated energy system distinguishing them from the smart grid. Energy management for multi-energy flow is faced with three main challenges, multiple-energy flow coupling, multi-time scale and multi-management body. This paper summarizes the research status and prospects of the research trends and focal points, namely, multi-energy flow real-time modeling and state estimation; multi-energy flow multi-time scale security analysis and security control; multi-energy flow hybrid-time scale optimization and scheduling; design, development and validation of energy management system (EMS) for multi-energy flow.

This work is supported by National Basic Research Program of China (973 Program)(No. 2013CB228203) and National Natural Science Foundation of China (No. 51537006, No. 51321005).

Key words: Energy Internet; integrated energy system; multi-energy flow; energy management system (EMS)