

含用能权的风电电力系统低碳经济调度

王秀云¹, 冯旭², 刘天琪², 兰月², 崔杨¹

(1. 东北电力大学电气工程学院, 吉林 132012; 2. 国网内蒙古东部电力有限公司电力科学研究院, 呼和浩特 010020)

摘 要: 将用能权(用能权是中国出台的用以缓解温室气体对环境影响的重要节能减排政策)引入经济调度模型中, 推导用能权数学模型, 利用该经济调度模型求解机组组合情况。通过对比2种低碳经济调度(用能权与碳排放权)的结果, 分析2种经济调度模型下同一时段机组出力的变化情况。针对不同类型电厂分别研究煤价对含用能权的系统发电成本的影响及用能权价格对用能权交易费用的影响, 并对不满足节能要求的电厂进行机组升级改造。IEEE 39节点算例仿真表明, 将用能权引入到经济调度中可有效降低煤耗量、降低发电成本和减少发电对环境的影响。

关键词: 风力发电; 粒子群优化; 空气污染; 用能权
中图分类号: TM76 **文献标志码:** A

0 引 言

“十二五”规划中我国提出要合理控制能源消费总量, 其结果是2015年我国能源消费总量增长1.5%, 是1998年以来的最低值, 其中煤炭消费总量同比降低1.5%^[1]。能源消费总量的降低是由于我国推出一系列节能减排的相关政策, 其中用能权作为控制一次能源消费总量的政策被提出^[2]。我国电力行业是煤炭需求量较大的行业, 因此用能权对电力行业的减排工作具有深远影响。与此同时我国大力开展可再生能源发电, 其中风力发电对我国节能减排工作起到积极的推进作用。综上所述, 电力行业低碳化已成为发展趋势, 许多专家学者对电力系统低碳经济调度也做了相关研究。文献[3-4]建立了以综合污染气体排放最少为目标的优化模型, 由此得到早期定义的低碳经济调度模型, 但该模型并未考虑电力系统中的碳排放量问题。部分研究学者考虑了碳排放因素对经济调度的影响, 文献[5]建立含碳交易的多目标经济调度模型, 该模型考虑发电成本和风电场的风险费用, 合理兼顾了电力系统的经济性和低碳性, 通过粒子群算法验证模型的正确性。文献[6]在目标函数中加入风电接纳成本、风电运行维护成本、风电出力偏差成本等来完善碳交易调度模型, 利用权重比确定低碳交易下风力发电渗入系统的适宜比例。

综上所述, 目前的低碳经济调度模型多是对电力系统末端进行治理, 对于源头的能源总量控制方向的研究较少。本文为达到电力系统经济性和低碳性的平衡, 提出一种含用能权的电力系统低碳经济调度模型, 实现从电力系统的源头控制一次能源的使用量。在满足电力系统的约束条件下实现目标函数的优化, 采用精英反向粒子群算法求解目标函数, 验证该模型的合理性和有效性。

1 含用能权的电力系统低碳模型建立

“十三五”规划中将用能权交易作为节能减排的重点政策, 用能权是指国内所有用能单位在规定的一个周期内获得允许可消耗的一次能源总量的权利。用能权交易是指用能单位一年之内可消费各类能源额度由有关部门分配, 针对不同类型的用能企业划分不同等级, 用能单位消耗完分配的用能权可在用能权交易市场中购买用能权。用能权指标一年清算一次, 隔年不累计。用能权有偿使用是采用市场价格的手段来优化配置一次能源等稀有资源的使用量。对企业设置使用能源的条件一方面可从源头上控制高耗能、高污染项目, 另一方面可倒逼企业节能降耗、升级改造。

1.1 用能权的优化目标

由于我国电力发展水平和能源结构决定了目前

收稿日期: 2017-07-07

基金项目: 国家自然科学基金(51777027)

通信作者: 冯旭(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事含风电场的电力系统经济调度方面的研究。fengxufighter@163.com

全国的主要发电形式仍以火电机组为主,所以电力系统对煤炭的需求量非常大,从源头对电厂进行耗煤量的控制是完成节能减排目标的主要方法之一。2016 年我国通过用能权交易来节约一次能源的使用量取得良好结果。本文将用能权引入到电力系统经济调度模型中,研究用能权对优化机组组合产生影响。本节以控制电力系统的耗煤量最小为优化目标,表达式为:

$$\min E_{\text{real}} = \min \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \theta_i(P_{G,i,t}) \quad (1)$$

式中, E_{real} ——电厂实际的用能权, t ; T ——研究周期时段数目, h ; N ——常规发电机组的数目; θ_i ——发电机组 i 的单位电量耗煤量, t/MWh ; $P_{G,i,t}$ ——单位时段 t 内常规发电机组 i 的出力, MW 。

1.2 用能权交易费用模型

本文在试点地区的用能权交易方案基础上建立用能权交易模型。根据电力系统的实际情况设定的用能单位是电厂,将电厂分为 A 类“绿色节能”电厂、B 类“黄色升级”电厂、C 类“红色改造”电厂,分别对这 3 类电厂分配初始用能权,若各类电厂在研究周期内消费的用能权超出初始分配量,则电厂在用能权交易市场产生申购费用,若各类电厂在周期内有剩余的用能权则在交易市场中出售获得盈利。各类电厂在用能权交易市场中的成交数量为 $C(E)$, $C(E) > 0$ 为电厂在用能权市场中的出售量, $C(E) < 0$ 为电厂在用能权市场中的申购量, $C(E)$ 的计算式为:

$$C(E) = E_{\text{dis}} - E_{\text{real}} \quad (2)$$

式中, E_{dis} ——初始分配的用能权, t 。

由以上分析可知,电厂在用能权交易市场中可进行出售用能权或申购用能权 2 种选择。当 $C(E) < 0$ 时,电厂需申购用能权,本文设定的这 3 类电厂在用能权市场中的申购价格标准不同,其标准分类为:各类电厂申购量的价格根据单位能耗 C_{unit} (即工业综合能耗与工业总产值之比)决定。A 类电厂中若 $C_{\text{unit}} \leq 0.51$,可零费用申购;若 $0.51 < C_{\text{unit}} < 0.75$ 则半价购买超额量;若 $C_{\text{unit}} \geq 0.75$,则依照原价购买,表达式为:

$$F_A'(E) = \begin{cases} 0, & C_{\text{unit}} \leq 0.51 \\ 0.5S_p \cdot C(E), & 0.51 < C_{\text{unit}} < 0.75 \\ S_p \cdot C(E), & C_{\text{unit}} \geq 0.75 \end{cases} \quad (3)$$

式中, $F_A'(E)$ ——第 i 类电厂超出分配用能权额度产生的费用, 万元; S_p ——用能权交易市场实时价格, ¥/t ; C_{unit} ——单位能耗, 吨标准煤/万元。

若 B 类电厂有超额量产生,则需按照原价的 1.5 倍

购买,表达式为:

$$F_B'(E) = 1.5S_p \cdot C(E) \quad (4)$$

C 类电厂由于单位能耗高,一旦发生超额情况需按原价的 2 倍购买,表达式为:

$$F_C'(E) = 2S_p \cdot C(E) \quad (5)$$

当 $C(E) > 0$ 时,电厂可在交易市场上出售剩余的用能权获得收益,本文设定的 A、B、C 这 3 类电厂在用能权市场中的出售价格相同,表达式为:

$$F''(E) = -S_p \cdot C(E) \quad (6)$$

式中, $F''(E)$ ——电厂在用能权交易市场中的收益费用, 万元。

由式(2)~式(6)可得,用能权交易费用的数学模型表达式为:

$$F_i(E) = F_i'(E) + F''(E) \quad (7)$$

为保证各类电厂可以达到节能减排的目标,制订规定:在研究周期内申购量超过初始分配量的 30% 时, A 类电厂产生的超额量全价购买, B 类电厂进行机组升级, C 类电厂进行机组改造,通过对机组的升级与改造实现减少耗煤量达到节能的要求。

2 含风电的电力系统模型建立

2.1 风电的不确定性处理

当大规模风电并网后,风电的随机性和波动性使系统的不确定因素增加。电力系统需考虑风电预测波动所带来的误差。风电出力为风电功率预测值与风电功率预测误差之和,其中风电预测误差的概率密度一般是服从期望为零、方差为 δ_w^2 的正态分布随机变量^[7],风电出力表达式为:

$$P_R = P_{w,j} + \xi_w \quad (8)$$

式中, P_R ——风电机组实际出力, MW ; $P_{w,j}$ ——风电机组预测出力, MW ; ξ_w ——风电机组出力偏差, MW 。

风功率预测误差处理方法是连续的风电功率预测误差的正态分布近似地离散化为 M 段 ($M=7$) 概率区间,如图 1 所示。每个区间的宽度为风电功率预测误差的标准偏差 $\varepsilon_{w,t}$,该区间的中间值对应风功率预测的误差值^[8],表达式为:

$$a_w = \mu_{w,t} + \left(w - \frac{M+1}{2}\right) \varepsilon_{w,t}, \quad w = 1, 2, 3, \dots, 7 \quad (9)$$

式中, a_w ——区间的中间值对应风电功率预测的误差值, MW ; $\mu_{w,t}$ ——风电功率预测的误差均值, MW ; $\varepsilon_{w,t}$ ——风电功率预测的误差标准偏差, MW 。

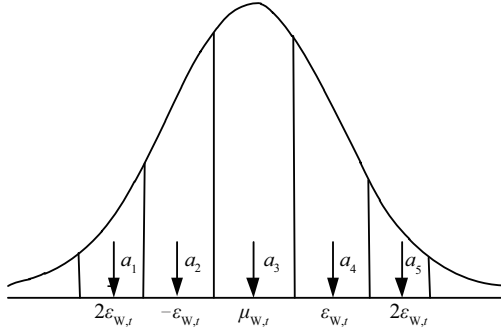


图1 风电功率预测误差的7区间近似概率分布

Fig. 1 Seven-interval approximation of probability distribution of wind power forecast error

2.2 风电并网发电量成本

风力发电属于清洁能源发电,对电力系统中的节能减排起到重要的推进作用。通过引入风力发电来减少火电机组出力,最终实现节能减排的目标。当风电场属于电网资产时,不产生电量发电成本;若风电场不属于电网资产,则会产生电量发电成本。本文对第2种情况建立风电场发电成本模型,即风电场发电成本可近似表示为与发电量成线性关系^[9]:

$$F_w = \sum_{j=1}^M C_w P_{w,j,t} \quad (10)$$

式中, F_w ——风电场发电成本,万元; M ——风电场中风电机组的数目; C_w ——风电机组在某时间段 t 的发电系数, $\times 10^4$ 元/MWh; $P_{w,j,t}$ ——单位时间段 t 内风电机组 j 的发电量, MWh。

2.3 常规机组发电成本

常规机组的发电成本为系统的燃料成本费,关系式为:

$$F(t) = \sum_{i=1}^T \sum_{i=1}^N (a_i + b_i P_{G,i} + c_i P_{G,i}^2) \quad (11)$$

式中, $F(t)$ ——燃煤成本,万元; a_i 、 b_i 、 c_i ——机组 i 的煤耗特性系数; $P_{G,i}$ ——发电机组 i 的有功出力, MW。

3 含用能权的风电电力系统经济调度模型

3.1 目标函数

本文的目标函数由用能权交易费用、风电并网发电成本和常规机组发电成本3部分组成。由式(7)、式(10)和式(11)可得目标函数,即用能权费用、风电并网发电量和燃料成本费之和,关系式为:

$$\min F_i = F_i(E) + F(t) + F_w \quad (12)$$

3.2 约束条件

1) 机组出力约束

$$P_{G,i,\min} \leq P_{G,i,t} \leq P_{G,i,\max} \quad (13)$$

$$P_{W,j} \leq P_{W,j,\max} \quad (14)$$

式中, $P_{G,i,\min}$ ——发电机组 i 的最小出力, MW; $P_{G,i,\max}$ ——发电机组 i 的最大出力, MW; $P_{W,j}$ ——计划安排风电机组出力, MW; $P_{W,j,\max}$ ——风电机组 j 的预测出力最大值, MW。

2) 火电机组爬坡约束

$$-R_{di} \leq P_{G,i,t} - P_{G,i,t-1} \leq R_{ui} \quad (15)$$

式中, R_{di} ——机组 i 的下降爬坡速率, MW/min; R_{ui} ——机组 i 的上升爬坡速率, MW/min。

3) 连续启停约束

$$\sum_{a=t}^{t+T_{i,on}-1} u_{ia} \geq T_{i,on} (u_{it} - u_{i(t-1)}) \quad (16)$$

$$\sum_{a=t}^{t+T_{i,off}-1} (1 - u_{ia}) \geq T_{i,off} (u_{i(t-1)} - u_{it}) \quad (17)$$

式中, $T_{i,on}$ ——机组最小连续运行时间, h; $T_{i,off}$ ——机组最小连续停运时间, h。

4) 系统功率平衡约束, 忽略网损

$$\sum_{i=1}^N P_{G,i,t} + \sum_{j=1}^M P_{W,j,t} - P_{L,t} = 0 \quad (18)$$

式中, $P_{L,t}$ ——第 t 时段的系统负荷值, MW; $P_{W,j,t}$ ——第 j 个风电场在第 t 时段的出力, MW。

4 精英反向学习粒子群算法

本文采取精英反向学习粒子群算法 (elite opposition-based PSO, EOPSO)^[10]求解目标函数, 采用精英反向学习策略 (elite opposition-based learning, EOBL) 生成精英粒子的反向解, 其中精英是指粒子群每次迭代产生的全局最优解, 通过对精英粒子进行反向多维学习可使该算法具有逃出局部最优解的能力。反向学习是指对精英解进行反向生成, 若反向解比精英解更优, 则替代精英解。本文采用的精英反向学习粒子群流程图如图2所示。

定义 $X_i = (x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ 是 D 维空间中的一个可行解, 其中每一维的 $x_{ij} \in [a_j, b_j]$, $j = 1, 2, \dots, D$, 那么在 D 维空间中可行解对应的反向点就被定义为 $X_i' = (x_{i1}', x_{i2}', \dots, x_{id}')$, 表达式为:

$$x_{ij}' = a_j + b_j - x_{ij} \quad (19)$$

利用迭代的最初猜测值 x 和对应的反向值 x' 反复寻求最优解的位置,此方式选择全局最优粒子进行反向学习可在很大程度上提高运算速度、缩短计算时间、简化计算难度。每次迭代后寻优范围逐渐减小,其原理是反向猜测值会最快地寻找到该取值范围内的最优值。因此每次迭代都使得初始的变量范围越来越小,最终迭代次数越多寻优越快,使种群快速地向最优解逼近。每次迭代之后计算适应度函数 $g(x)$ 与 $g(x')$, 若 $g(x) \geq g(x')$, 则 $g(x')$ 取代 $g(x)$ 成为新的最优值,并代入到下一次迭代中。

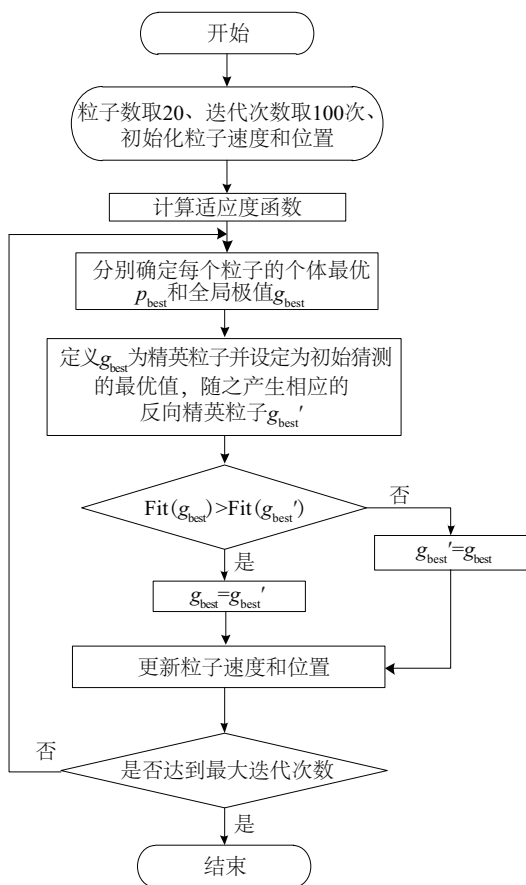


图2 精英反向学习粒子群流程图

Fig. 2 Flow chart of elite opposition-based particle swarm optimization

5 算例仿真

5.1 测试系统

本文采用 IEEE39 节点算例进行仿真计算,采用 10 机组系统^[11]验证本文所构建的模型正确性和合理性,负荷预测数据如图 3 所示。在本文算例中安装 250 MW 的

风电场,仿真的研究周期为 24 h。风电预测数据如图 4 所示,火电机组参数如表 2 所示,风电的发电成本单价为 57.2 ¥/MWh。

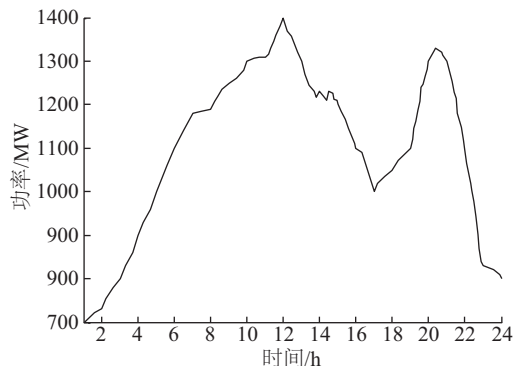


图3 负荷预测数据

Fig. 3 Load power forecast data

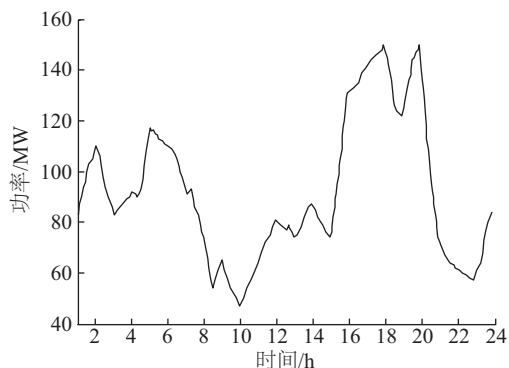


图4 风电预测数据

Fig. 4 Wind power forecast data

5.2 A类电厂机组优化组合分析

为实现我国节能减排的目标,推进清洁能源发电的政策,假定风力发电全额上网,本文构建的含用能权的电力系统经济调度模型可通过优化机组组合达到降低耗煤量的效果,以“绿色节能”的 A 类电厂为研究对象来说明含用能权的电力系统经济调度模型对各类电厂的机组组合分布所产生的影响。本文建立的含用能权的电力系统经济调度模型可对高耗煤机组限制出力,对低耗煤机组增加出力。如表 1 所示,与 G1 机组相比,G2 机组的煤耗量较低,负荷高峰时段的 G2 机组出力高于 G1 机组,同理,G5 机组的煤耗量低于同容量的 G4 机组,故在负荷高峰时段 G5 机组出力高于 G4 机组。因此,本文设定的经济调度模型在满足各种约束的前提下,最大程度兼顾电力系统的经济性和低碳性。

表1 考虑用能权后的A类电厂机组组合分布

Table 1 Optimized output of thermal units in class A considering right of using energy

时段	P_{G1}	P_{G2}	P_{G3}	P_{G4}	P_{G5}	P_{G6}	P_{G7}	P_{G8}	P_{G9}	P_{G10}
1	145.13	157.05	120.36	64.07	60.44	17.96	20.31	10.01	11.21	10.48
2	158.27	145.34	119.54	56.08	69.92	17.71	23.47	10.26	10.75	10.33
3	175.90	171.24	138.35	75.21	80.91	19.04	22.73	12.64	11.09	11.25
4	187.32	192.76	148.03	84.72	92.05	24.31	30.44	14.93	16.26	16.74
5	200.39	205.81	160.34	100.06	93.41	30.02	37.50	19.43	18.20	16.35
6	213.70	222.38	181.40	108.08	115.57	37.65	48.09	22.54	21.46	20.46
7	225.87	231.06	193.94	118.65	137.39	42.41	57.06	25.97	24.83	24.71
8	230.74	232.26	205.30	128.44	130.70	50.43	53.99	27.36	26.84	26.59
9	248.03	250.71	218.26	131.47	140.01	55.26	58.31	27.24	29.03	29.64
10	261.37	276.02	225.47	140.02	138.39	53.63	63.26	30.25	29.50	30.47
11	265.76	272.41	223.56	125.20	147.71	55.66	60.43	29.05	29.47	29.53
12	280.37	288.36	224.51	130.12	143.94	61.31	68.88	32.76	32.81	32.04
13	260.84	277.52	223.09	130.84	139.63	53.72	61.49	28.47	29.39	27.03
14	248.70	267.63	216.15	113.49	135.32	52.14	48.77	24.63	23.91	20.84
15	264.31	250.42	210.07	120.98	114.20	42.36	55.49	24.07	23.92	20.73
16	210.62	229.45	190.31	99.50	101.37	31.54	46.02	20.66	19.72	17.81
17	211.81	198.38	168.09	81.32	92.86	26.35	32.49	17.61	16.77	14.93
18	205.74	217.84	175.63	96.05	90.97	30.60	36.59	18.72	17.41	14.57
19	218.68	237.09	185.73	104.27	96.96	33.84	43.21	20.01	19.73	17.64
20	257.34	265.09	212.48	120.03	118.75	44.86	53.03	28.69	26.50	26.71
21	266.35	280.58	220.94	130.71	122.59	47.42	57.67	31.02	26.02	27.36
22	243.49	231.01	191.32	109.56	103.29	31.84	45.05	27.80	21.62	23.59
23	184.52	187.17	142.36	73.09	95.63	20.29	32.70	12.76	11.49	13.85
24	174.33	159.72	128.39	67.51	87.36	17.95	27.14	11.06	12.97	12.50

表2 火电机组参数						
Table 2 Parameters of thermal units						
机组	$P_{\max}/$	$P_{\min}/$	$a/$	$b/$	$c/$	$\theta/$
	MW	MW	$\text{¥}\cdot\text{h}^{-1}$	$\text{¥}\cdot\text{MWh}^{-1}$	$\text{¥}\cdot(\text{MW})^{-2}\cdot\text{h}^{-1}$	$\text{g}\cdot\text{kWh}^{-1}$
1	450	150	6596	117.36	0.01560	325.6
2	450	150	6800	110.10	0.00326	324.1
3	300	60	3060	133.96	0.02707	332.7
4	162	25	2788	144.16	0.01741	339.2
5	162	25	4331	93.29	0.00203	338.6
6	80	20	2516	151.36	0.04842	350.4
7	80	20	3264	188.63	0.00537	348.9
8	55	10	4488	176.25	0.02813	365.2
9	55	10	4522	185.42	0.01512	366.0
10	55	10	4556	188.97	0.01176	367.1

5.3 电厂升级前仿真分析

5.3.1 煤炭价格对各类电厂发电成本的影响

含用能权的电力系统经济调度模型仿真结果表明,该模型可减少各类电厂的耗煤量,从而达到降低系统发电成本的目标。如表3所示,各类电厂在考虑了用能权后,耗煤情况均有不同程度的减少,其中A类电厂的节约耗煤量最少,是因为A类已属于“绿色节能”型电厂,该机组的节能效果已趋近最优值,所以用能权对该电厂影响较小;而B、C类电厂的部分机组存在超出节能指标的情况,故用能权对优化机组组合有较大影响。从表3可得,B、C这2类电厂降低的煤量比A类电厂分别高2.893和10.456 t。煤耗量降低使发电成本降低,本文取标准煤价为760 ¥/t,由表3可知各类电厂每日节约发电成本效益可观。

表3 考虑用能权后各类电厂的节约耗煤量和成本
Table 3 Reduction of coal consumption and cost in various power plants considering the right of using energy

项目	A类	B类	C类
节约耗煤量/t·d ⁻¹	7.42	10.31	17.88
节约成本/元·d ⁻¹	5643.76	7842.44	13590.32

2016年内的煤炭价格波动在300元以内,本文随机选取一年内6种煤炭价格,研究各类电厂因煤炭价格的增长导致发电成本的变化情况。如图5所示,煤炭价格对各类电厂的发电成本影响较大,B、C类电厂发电成本随煤炭价格的增长而增加。煤炭价格越高,B、C类电厂与A类电厂的发电成本差距越大。因此,对于B、C类电厂减少耗煤量是控制系统发电成本的主要手段之一。

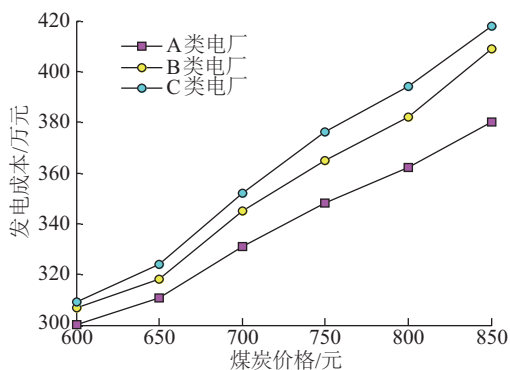


图5 煤价与各类电厂发电成本的关系

Fig. 5 Relationship between coal price and power generation cost in various power plants

5.3.2 用能权价格对用能权交易费用的影响

由以上分析可知,用能权可减少电厂的耗煤量,从而使电厂在用能权交易市场中的用能权费用发生变化。图6为电厂考虑用能权后各类电厂的用能权费与市场上用能权交易价格增长的关系。从图6可得出,A类电厂由于绿色低碳的特性在用能权交易市场出售多余的用能权,电厂处于收益模式,并且随着用能权价格的增长其收益也增长;B类电厂在用能权交易市场中的表现有售出和申购2种情况,一种情况是用能权价格较低时B类电厂申购用能权,为之后的超出份额进行储备,但购买量不能超出初始分配额度的30%;另一种情况是B类电厂一段时间内用能权有剩余,在市场中出售获得收益。对于C类电厂在用能权交易市场中绝大部分时间属于买入的情况,所以C类电厂在用能权费用方面处于亏损状态,影响最终收益。

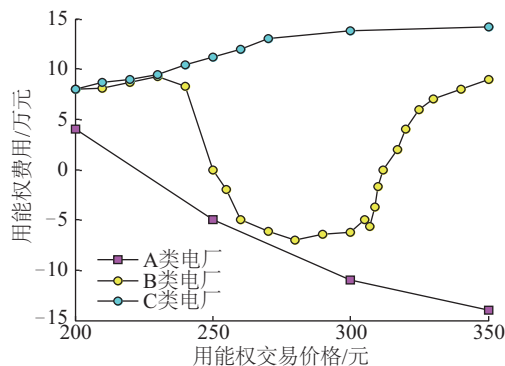


图6 用能权交易价格与用能权费用的关系

Fig. 6 Relationship between price and cost considering to right of using energy

5.4 电厂升级后仿真分析

本节之前分析的是用能权购买数量在初始配额的30%之内的情况,但我国电厂多数属于B类电厂,而B类电厂的申购用能权数量超过30%意味着不能满足节能减排的相关规定。因此,本文对B类电厂中的G3机组进行参数升级,这也符合本文定义的B类电厂“黄色升级”概念。升级以后的电厂在考虑用能权下的发电成本发生显著变化,满足机组低耗煤标准,对升级后的B类电厂进行仿真。

5.4.1 煤炭价格对升级后电厂发电成本的影响

以电厂一年运行时间6000h为例,通过对B类电厂中的G3机组升级后每发1 kWh电可节约15~25 g标准煤,日节约50.316 t标准煤。图7为B类升级前后的发电成本对比。考虑用能权下升级后的B类电厂发电成本明显降低,接近A类电厂的发电成本水平,但升级后的B类电厂发电成本与A类电厂发电成本的差额仍随煤价的升高而增大。

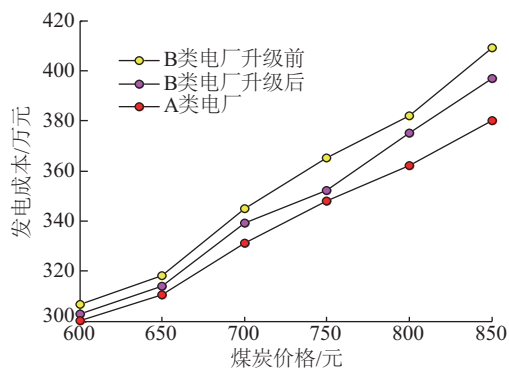


图7 升级后B类与A类电厂发电成本对比

Fig. 7 Generation cost comparison between class A and upgraded class B power plants

5.4.2 用能权价格对升级后电厂用能权费用的影响

本文对 G3 机组进行升级后,使 B 类电厂在用能权交易市场中的用能权费用产生变化,变化趋势如图 8 所示。图 8 中升级后的 B 类电厂用能权费用呈下降趋势,并且随用能权交易价格的升高,升级后的 B 类电厂用能权费用负增长明显,其原因为升级后节约的耗煤量在用能权交易市场中获得收益。本文建立的含用能权经济调度模型的系统发电成本也呈下降趋势。

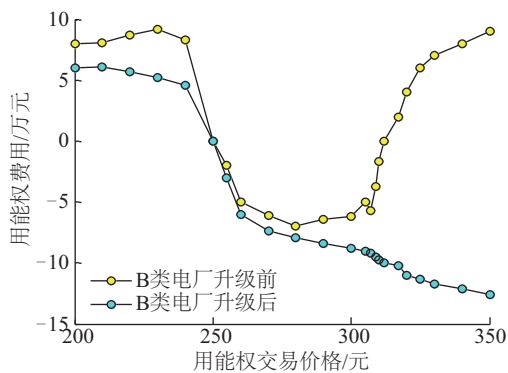


图8 升级前后B类电厂用能权费用对比

Fig. 8 Right of using energy cost comparison between the original and upgraded class B power plants

5.4.3 用能权对污染气体排放的影响

本文在电力系统中考虑了用能权,通过用能权优化机组组合达到节约煤耗的目的,也在源头上控制了污染气体排放量。

空气中 2 种主要的污染气体是 SO_2 和 NO_x ,《环境计算手册》中污染气体是根据燃烧 1 t 标准煤产生的 SO_2 排放量和 NO_x 排放量计算的,其中燃煤基本含硫率取 1.0%,燃煤流向烟气流的转化率取 0.9,燃煤中的 N 的 NO_x 转化率取 70%,燃料中的含氮率取 0.85%。根据计算可得 B 类电厂升级前后的污染气体排放量。从表 4 可得出,B 类电厂升级后的污染气体排放量显著减少,本文建立的用能权模型不仅可使电厂节约煤耗量,还可从源头控制污染气体的排放量。由以上分析可知,电厂在考虑用能权后的确可减少电厂的耗煤量和发电成本,尤其对 B 类电厂 300 MW 的亚临界机组升级后效果显著。

表4 升级前后的B类电厂污染气体排放量对比

Table 4 Polluted gas emissions comparison between the original and upgraded class B power plants

污染气体种类	升级前/kg	升级后/kg
SO_2	904.72	117.49
NO_x	562.31	83.07

5.5 2种低碳调度模型的机组出力对比

本文建立的含用能权经济调度模型能从源头控制能源的使用量,最终达到控制污染气体的排放量。文献[12]建立碳排放权的经济调度模型,该模型从末端直接治理污染气体排放。以上两者都属于低碳经济调度模型,本文对这 2 种调度模型分别在高峰和低谷 2 个时间断面进行分析,如表 5 所示。

表5 高峰和低谷负荷时间断面下2种模型机组出力变化量(MW)

Table 5 Output variation of two different models in peak and low load time (MW)

模型 考虑	$\Delta G1$		$\Delta G2$		$\Delta G3$		$\Delta G4$		$\Delta G5$		$\Delta G6$		$\Delta G7$		$\Delta G8$		$\Delta G9$		$\Delta G10$	
	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L	P	L
碳排放权	0	0	0	0	0	+3.81	0	-3.19	-4.17	-5.16	-3.03	+6.92	+7.31	-2.60	+2.89	0	+2.89	0	-1.78	0
用能权	-10.10	-4.3	+21.40	+11.20	-9.80	-5.10	-9.20	-6.20	+8.40	+4.30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

注:P代表高峰负荷时间断面;L代表低谷负荷时间断面。

6 结 论

1)将用能权引入经济调度模型中,推导含用能权的电力系统经济调度模型,分析用能权对 A 类电厂机组组合出力的影响,所构建的调度模型在研究周期内可减少高煤耗机组出力,减少的出力由其他低煤耗机组承担。该模型可通过用能权交易市场出售多余的用能权获得利润,因此该模型在研究周期内系统发电成本中有优势。

2)在含用能权的电力系统经济调度模型基础上将仿真分为 2 类:一类是各类电厂升级前对系统发电成本和用能权费用 2 方面进行仿真,结果表明本文建立的经济调度模型可有效减少煤耗量和发电成本,验证该模型的有效性;另一类是对 B 类电厂升级后的仿真,结果表明升级后的 B 类电厂在系统发电成本和用能权费用两方面都有较大幅度的降低,并且升级后的 B 类电厂可有效降低污染气体排放量。

[参考文献]

- [1] 黄刚. 我国区域煤炭消费动态变化分析--产业结构调整 and 新兴能源对煤炭消费的双重影响[J]. 中国煤炭, 2017(5): 22-26.
HUANG G. Analysis on regional coal consumption dynamics: dual influences of industrial structure adjustment and new thriving energy on coal consumption [J]. China coal, 2017(5): 22-26.
- [2] 国家发展改革委关于开展用能权有偿使用和交易试点工作的函[J]. 宁波节能, 2016(5): 9-12.
A letter have published by NDRC, which enterprise must pay the right using energy and piloting areas formulate the rules[J]. Ningbo jie neng, 2016(5): 9-12.
- [3] 江兴稳, 周建中, 王浩, 等. 电力系统动态环境经济调度建模与求解[J]. 电网技术, 2013, 37(2): 385-391.
JIANG X W, ZHOU J Z, WANG H, et al. Modeling and solving for dynamic economic emission dispatch of power system [J]. Power system technology, 2013, 37(2): 385-391.
- [4] 陈功贵, 陈金富, 段献忠. 考虑备用约束和阀点效应的电力系统环境经济优化调度[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(8): 8-22.
CHEN G G, CHEN J F, DUAN X Z. Environmental and economic dispatch with reserve constraints and valve-point effects [J]. Electric power automation equipment, 2009, 29(8): 18-22.
- [5] 张晓辉, 董兴华. 含风电场多目标低碳电力系统动态经济调度研究[J]. 电网技术, 2013, 37(1): 24-31.
ZHANG X H, DONG X H. Research on multi-objective scheduling for low-carbon power system with wind farms [J]. Power system technology, 2013, 37(1): 24-31.
- [6] 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 C F, YUAN Y, ZHANG X S, et al. Day-ahead dispatching scheduling for power grid integrated with wind farm considering [J]. Power system technology, 2014, 38(8): 2114-2120.
- [7] LIU G, TOMSOVIC K. Quantifying spinning reserve in systems with significant wind power penetration [J]. IEEE transactions on power systems, 2012, 27(4): 2385-2393.
- [8] 张刘冬, 殷明慧, 宋坤隆, 等. 基于净负荷分步建模的旋转备用优化确定风险分析方法[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(24): 16-22
ZHANG L D, YIN M H, SONG K L, et al. Risk analysing method of optimizing spinning reserve requirements based on multi-step modeling of net demand [J]. Automation of electric power systems, 2015, 39(24): 16-22.
- [9] 周玮, 孙辉, 顾宏, 等. 计及风险备用约束的含风电场电力系统动态经济调度[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(1): 47-55.
ZHOU W, SUN H, GU H, et al. Dynamic economic dispatch of wind integrated power systems based on risk reserve constraints [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(1): 47-55.
- [10] 周新宇, 吴志健, 王晖. 一种精英反向学习的粒子群优化算法[J]. 电子学报, 2013, 41(8): 1647-1652.
ZHOU X Y, WU Z J, WANG H. Elite opposition based particle swarm optimization [J]. Acta electronica sinica, 2013, 41(8): 1647-1652.
- [11] DHILLON J S, PARTI S C, KOTHARI D P. Fuzzy decision-making in stochastic multi-objective short-term hydrothermal scheduling [J]. IEE proceedings generation, transmission and distribution, 2002, 149(2): 191-200.
- [12] 周任军, 李绍金, 陈瑞先, 等. 采用模糊自修正粒子群算法的碳排放权交易冷热电多目标调度[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(34): 6119-6126.
ZHOU R J, LI S J, CHEN R X, et al. Combined cool and heat and power multi-objective scheduling considering carbon emissions wading using algorithm of fuzzy self-correction particle swarm optimization [J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(34): 6119-6126.

A LOW-CARBON ECONOMIC DISPATCHING FOR POWER GRID INTEGRATED WITH WIND POWER SYSTEM CONSIDERING RIGHT OF USING ENERGY

Wang Xiuyun¹, Feng Xu², Liu Tianqi², Lan Yue², Cui Yang¹

(1. School of Electrical Engineering, Northeast Electric Power University, Jilin 132012, China

2. State Grid Eastern Inner Mongolia Electric Power Research Institute, Huhhot 010020, China)

Abstract: The paper is the first time to introduce right of using energy (it is a key policy of energy-saving and emission-reduction, which could relieve the impact of greenhouse gas to environment). into the economic dispatch model, inferring a mathematical model, solving the question about unit commitment. Through contract with the different results, that two low-carbon economies dispatch models (the right of using energy and carbon trading) come into being analyze unit output changed at the same time period in two dispatch models. Depending on the type of power plant, researching the influence of coal price to system power generation cost and the price of right of using energy to cost of right of using energy. When a power plant does not fit conditions of energy-saving, it is envisaged to unit upgraded. The simulation example of IEEE 39 node shows that economic dispatch model include right of using energy could reduce coal consumption, generation cost and impact of power generation on the environment.

Keywords: wind power; particle swarm optimization; air pollution; right of using energy