

火电行业清洁生产评价体系提级优化研究<sup>\*</sup>

殷金桥<sup>1</sup> 钱 进<sup>1#</sup> 王 康<sup>2</sup> 邓传记<sup>2</sup> 宋其晖<sup>1</sup> 刘 凯<sup>3</sup> 郑 亿<sup>3</sup>

(贵州大学电气工程学院,贵州 贵阳 550025;2.国家电投集团贵州金元茶园发电有限责任公司,贵州 毕节 551700;  
 3.国家电投集团贵州金元股份有限公司纳雍电厂,贵州 毕节 551700)

**摘要** 火电是清洁生产审核的重点行业,《电力行业(燃煤发电企业)清洁生产评价指标体系》(以下简称“现行指标体系”)发布已超过 5 年,体系中的各项指标限值已明显滞后于火电技术的发展。结合碳达峰、碳中和背景下火电行业服务功能的转变,提出“现行指标体系”提级优化思路,优化了“现行指标体系”中的清洁生产定量和定性指标,建立了包含调峰深度与爬坡速率的机组供电煤耗修正计算方法,并以典型机组为对象验证了方法的合理性。

**关键词** 火电行业 清洁生产 评价体系 提级 优化

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2024.01.023

**Study on upgrading and optimization of clean production evaluation system in the thermal power industry** YIN Jinqiao<sup>1</sup>, QIAN Jin<sup>1</sup>, WANG Kang<sup>2</sup>, DENG Chuanji<sup>2</sup>, SONG Qihui<sup>1</sup>, LIU Kai<sup>3</sup>, ZHENG Yi<sup>3</sup>. (1. School of Electrical Engineering, Guizhou University, Guiyang Guizhou 550025; 2. State Power Investment Group Guizhou Jinyuan Chayuan Power Generation Co., Ltd., Bijie Guizhou 551700; 3. State Power Investment Group Guizhou Jinyuan Co., Ltd. Nayong Power Plant, Bijie Guizhou 551700)

**Abstract:** Thermal power is a key industry of clean production audit, “Clean production evaluation index system for the power industry (coal-fired power generation enterprises)” (hereinafter referred to as the “current index system”) has been released for more than 5 years, and the limit values of various indicators in the system have significantly lagged behind the development of thermal power technology. Based on the transformation of service functions in the thermal power industry under the background of carbon peaking and carbon neutrality, a upgrading and optimization idea of the “current index system” was proposed. The quantitative and qualitative indexes of clean production in the “current index system” were optimized. A calculation method for coal consumption correction of unit power supply, including peak shaving depth and climbing rate, was established, and the rationality of the model was verified with typical unit as the object.

**Keywords:** thermal power industry; clean production; evaluation system; upgrading; optimization

我国自 20 世纪 90 年代引入清洁生产概念,2002 年首次在《清洁生产促进法》中对其进行定义。为响应该法案和全面推进清洁生产,评价企业的清洁生产水平,2005 年首次发布了钢铁、氮肥、电镀 3 个行业评价指标体系<sup>[1]</sup>,迄今为止由各部门发布的评价指标体系已涵盖 70 多个行业,呈现行业多样化、评价体系规范化的特点。

火电行业因其生产性质而成为清洁生产重点评价对象,该行业的企业清洁生产水平关系到整个清洁生产事业的进程。火电行业的清洁生产评价体系历经《火电行业清洁生产评价指标体系(试行)》和《电力行业(燃煤发电企业)清洁生产评价指标体系》(以下简称“现行指标体系”)两次演变,主要包含定

性指标和定量指标的变化,定性指标变化是一级指标少 1 个、二级指标增加了 5 个,定量指标变化重点是新增加 5 个二级指标。该行业清洁生产体系中指标正是随火电行业技术和政策的改变而变化,这些新增或者优化,体现了体系演变趋于科学、合理化的特点。但“现行指标体系”已经执行超过 5 年,在碳中和背景下,新能源电源比例日益增加,火电行业在这种新型电力系统中的地位 and 作用正在发生变化,“现行指标体系”也应随之变化。因此,对火电行业清洁生产评价指标体系提级优化,有重要的意义。

1 火电行业清洁生产新挑战

电力行业为实现“双碳”(碳达峰、碳中和)目标,

第一作者:殷金桥,男,1998 年生,硕士研究生,主要从事热能利用与节能工程研究。<sup>#</sup> 通讯作者。  
<sup>\*</sup> 贵州省科技支撑计划项目(No.20202Y040);国家电投集团贵州金元茶园发电有限责任公司科技项目(No.CPCEC-ZCB-13-2022-16-11)。

需要构建以新能源为主体的新型电力系统,深化电力体制改革,持续推动能源高质量发展。这迫使火电机组由电量保证型的主体电源转变为调节型电源。

图 1 是 2011—2021 年全国发电设备利用小时数变化情况。近 10 年来,火电设备利用小时数总体呈下降趋势,而太阳能发电设备利用小时数总体呈上升趋势,火电机组需要做好“深度调峰”等辅助服务工作。与之相适应,火电行业清洁生产评价指标体系可能在以下两方面会有新的要求:①原有指标的评价基准值更加严苛;②需要新增与当前火电行业发展趋势相结合的指标。

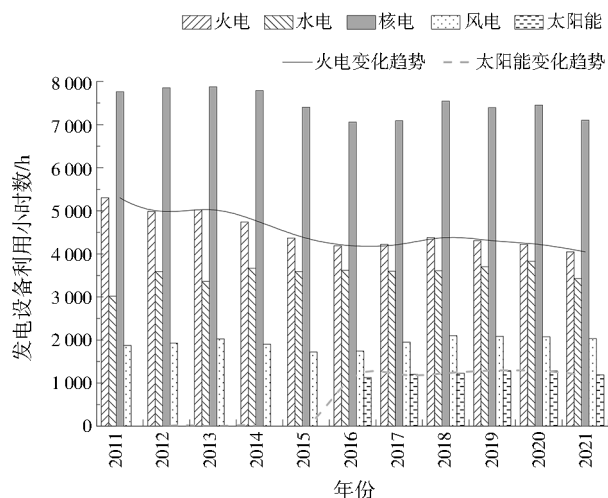


图 1 2011—2021 年发电设备利用小时数变化情况

Fig.1 Changes of power generation equipment utilization hours from 2011 to 2021

## 2 “现行指标体系”分析

分析“现行指标体系”的架构和指标设置要求可知:“现行指标体系”主要由一级指标和二级指标组成,每个一级、二级指标的选定需要依据《清洁生产评价指标体系编制通则(试行稿)》,对应指标的Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级基准值分别要参考国内 5%、20%和 50%的企业能够达到基准值要求进行设定。本研究将按照上述编制通则,对“现行指标体系”进行提级优化。

## 3 指标体系提级优化思路

### 3.1 供电煤耗指标

#### 3.1.1 与 2021 年竞赛先进值对比的基准值优化

对比“现行指标体系”中供电煤耗指标的基准值、中电联 2021 年公布的火电机组竞赛先进值<sup>[2-3]</sup>以及《常规燃煤发电机组单位产品能源消耗限额》(GB 21258—2017),发现“现行指标体系”的Ⅲ级基

准值已落后于 GB 21258—2017 基准值,且明显高出竞赛先进值中的前 50%机组的供电煤耗值,以纯凝湿冷 1 000 MW 超超临界机组为例,其现行Ⅲ级基准值为 290 g/(kW·h),而竞赛先进值前 50%的值为 280.89 g/(kW·h)。

中电联公布的竞赛先进值代表了当前火电机组的整体先进水平,依据中电联 2021 年公布的竞赛先进值和《清洁生产评价指标体系编制通则(试行稿)》中指标基准值设定原则选定初步基准值,取 GB 21258—2017 中供电煤耗基准值和初步基准值两者的中值作为新体系的供电煤耗基准值,循环流化床机组竞赛先进值只含有 150、300、350 MW 等级机组,其他等级机组因数据不足不做优化。对于纯凝类型机组,“现行指标体系”中未含 350 MW 等级机组,原因是统一放到了 300 MW 等级机组中,因此在与优化后的值做对比分析时,亚临界 350 MW 及 300 MW 等级机组都采用 300 MW 等级机组的基准值,而且“现行指标体系”中包含了直接空冷与间接空冷两种机组类型的评价基准值,但竞赛先进值中不含有直接空冷机组的数据,故优化冷却方式为空冷的纯凝机组基准值时采用的机组“现行指标体系”基准值为间接空冷方式的基准值,即分别在“现行指标体系”中纯凝湿冷同等级机组的基准值数值上增加“10”“10”和“12”;循环流化床机组的现行值是在同等级纯凝机组数值上增加“7”“8”和“12”。

图 2 为多型号不同等级的火电机组Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ级供电煤耗基准优化值(优化值=“现行指标体系”中评价基准值—优化后的评价基准值)与优化后的基准值对比,优化后的值降低幅度为 4.190~32.975 g/(kW·h)。

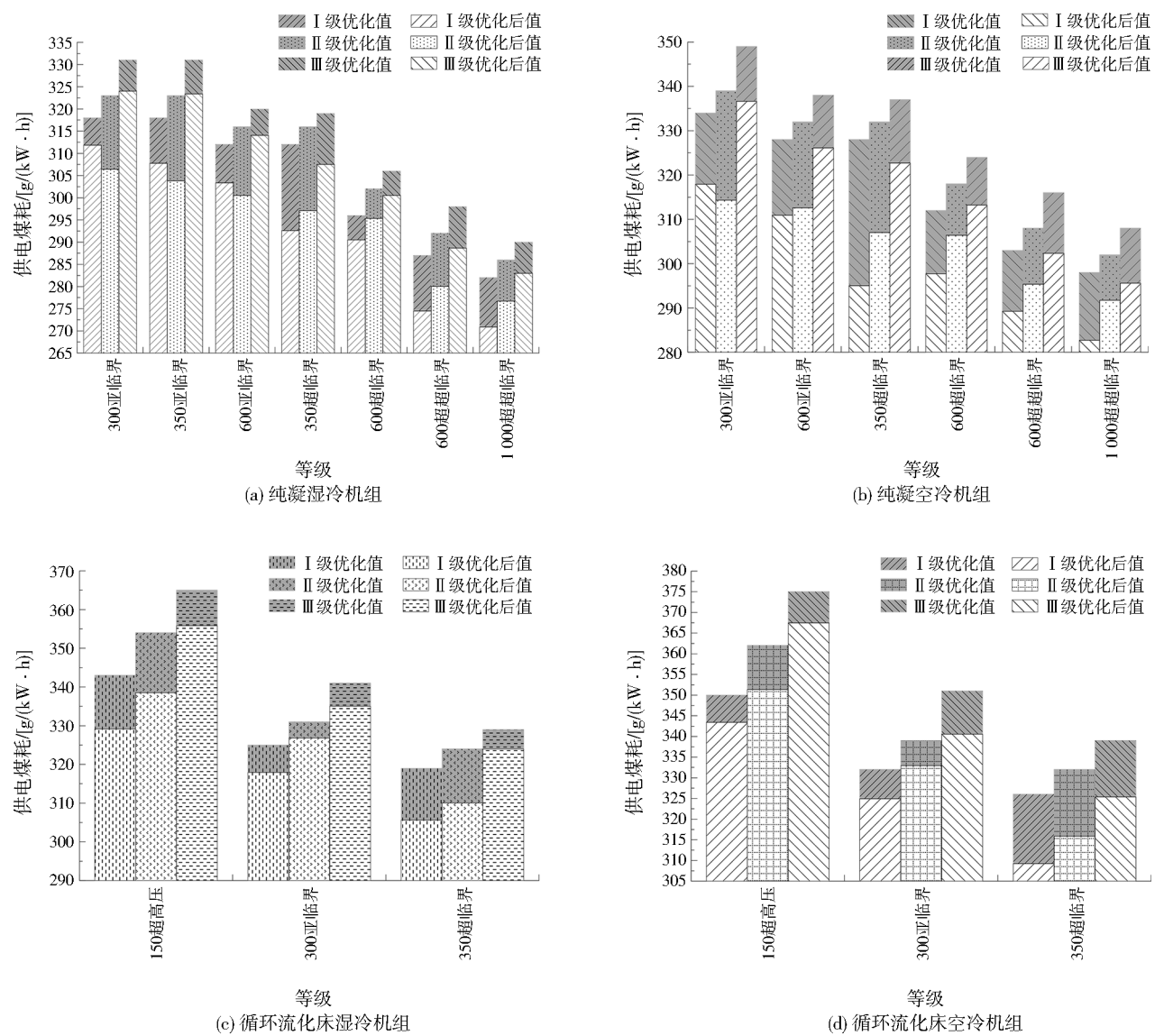
#### 3.1.2 供电煤耗修正方法

由于新型电力系统的构建迫使火电机组需要参与深度调峰以及爬坡辅助服务,机组的负荷率可能降低到 50%以下且机组爬坡速率易发生改变。“现行指标体系”中的供电煤耗修正方法为:机组负荷在 75%以下,每降低 5%,需要在修正系数上乘以 1.015。建议对标 GB 21258—2017,并参考电网对燃煤机组的深度调峰补偿方法<sup>[4]</sup>,采用调峰深度作为供电煤耗修正因子,供电煤耗修正系数计算方式如表 1 所示。

根据式(1)计算火电企业的供电煤耗修正值:

$$K' = K/m \quad (1)$$

式中: $K'$ 为供电煤耗修正值,g/(kW·h); $K$ 为实际供电煤耗,g/(kW·h)。



注:300 亚临界即亚临界 300 MW 等级机组,其余类推。

图 2 多型号不同等级机组供电煤耗基准值对比

Fig.2 Comparison of benchmark values of coal consumption for power supply of multi-model units with different grades

表 1 不同调峰深度的供电煤耗修正系数  
 Table 1 Correction coefficient of coal consumption for power supply with different peak-shaving depth

| 机组负荷率( $F$ )         | 修正系数( $m$ )                                      |
|----------------------|--------------------------------------------------|
| $F \geq 85\%$        | 1                                                |
| $80\% \leq F < 85\%$ | $1 + 0.001\ 4 \times (85 - 100 \times F)$        |
| $75\% \leq F < 80\%$ | $1.007\ 0 + 0.001\ 6 \times (80 - 100 \times F)$ |
| $50\% \leq F < 75\%$ | $1.015^{16 - 20 \times F}$                       |
| $40\% \leq F < 50\%$ | $1 + 0.10$                                       |
| $30\% \leq F < 40\%$ | $1 + 0.14$                                       |
| $F < 30\%$           | $1 + 0.20$                                       |

以文献[5]某超临界 600 MW 等级机组在额定负荷 40%运行为例对上述修正方法进行验证,机组负荷率  $> 85\%$  时的实际供电煤耗为  $297.70\text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ,机组负荷率为 40%时的实际供电煤耗为  $340.70\text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ,按表 1 和式(1)计算得出机

组负荷率为 40%时的供电煤耗修正值,如表 2 所示。与文献[5]中机组负荷率  $> 85\%$  时的实际供电煤耗 ( $297.70\text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ) 相比差值在  $1.16\text{ g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ,分析因为供电煤耗还受到机组爬坡速率等因素影响。

表 2 某机组供电煤耗修正值  
 Table 2 Correction value of coal consumption for a power supply unit

| 项目 | 机组负荷率/<br>% | 修正系数 | 供电煤耗修正值/<br>[ $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ ] |
|----|-------------|------|-------------------------------------------------------|
| 数值 | 40          | 1.14 | 298.86                                                |

为更客观地对供电煤耗进行修正,将爬坡速率修正因子纳入修正模型,包含爬坡速率的供电煤耗修正模型如式(2)所示:

$$K'' = K' - r \times t / H \times 100 \times n \tag{2}$$

式中: $K'$ 为调整后的供电煤耗修正值, $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ; $r$ 为爬坡速率, $\text{MW}/\text{min}$ ; $t$ 为爬坡时间, $\text{min}$ ; $H$ 为机组负荷, $\text{MW}$ ; $n$ 为机组负荷变化导致的供电煤耗变化值,依据文献[6]取合理值  $0.05\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ 。

采用式(2)计算得到调整后的供电煤耗修正值  $297.04\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$  更加接近文献[5]中的实测值  $297.70\text{ g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ,验证了此方法的合理性。综上,供电煤耗修正模型考虑了新型电力系统中火电机组的深度调峰和爬坡速率,更具科学性。

3.2 污染物排放指标

3.2.1 对现有排放指标的优化

截至 2022 年,10 万 kW 及以上的火电机组都做了超低排放改造,且“现行指标体系”二级指标的基准值依据标准是 2011 年发布的《火电厂大气污染物排放标准》(GB 13223—2011),现在部分地区的排放标准已经进行了更新,以河北省《锅炉大气污染物排放标准》(DB13/ 5161—2020)为参考,对这一项指标的基准值进行优化。根据上述两个排放标准的标准值在  $1/3\sim 1/2$  这个幅度范围内降低的规律优化了“现行指标体系”中对应的 3 个等级基准值,如表 3 所示。

3.2.2 新增二氧化碳排放量指标

二氧化碳属于非有毒气体,在“现行指标体系”中未作要求。但在“双碳”约束的新形势下,作为碳排放的重点行业,火力发电势必也会面临严格的碳排放考核。因此清洁生产评价体系中增加二氧化碳排放量指标势在必行。

该项指标的基准值依据以下方法进行计算:  
根据各机组的供电煤耗值、平均厂用电率,按式(3)计算得到发电煤耗。

$$P_d=K'\times(1-v)$$
 (3)

式中: $P_d$ 为发电煤耗, $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ; $v$ 为平均厂用电率,从竞赛先进值中获得。

依据《企业温室气体排放核算与报告指南 发电设施》中的燃煤发电企业碳排放核算公式推演得到

的式(4)、式(5),计算单位发电量二氧化碳排放量:

$$E=C\times O\times 44/12$$
 (4)

$$S_g=E\times N\times P_d$$
 (5)

式中: $E$ 为标准煤二氧化碳排放因子, $\text{t}/\text{GJ}$ ; $C$ 为标准煤单位热值含碳量,取合理值  $0.03\text{ t}/\text{GJ}$ ; $O$ 为标准煤碳氧化率,取  $0.99$ ; $S_g$ 为单位发电量二氧化碳排放量, $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ; $N$ 为标准煤低位发热量, $\text{GJ}/\text{t}$ 。

因竞赛先进值中未含有循环流化床机组和供热机组的厂用电率,故不对该类机组设定二氧化碳排放量基准值。表 4 是计算得出的纯凝湿冷、空冷机组的二氧化碳排放量基准值,机组的等级不同、类型不同,二氧化碳排放量也不一样。这与“现行指标体系”中污染物排放指标基准值设定有所区别,“现行指标体系”未区分机组,本研究提出的新增二氧化碳排放量基准值分机组实行。

3.3 新增定性指标

“双碳”背景下,除定量指标外还可能会增加关于火力发电企业是否自主实施辅助新能源消纳、生物质掺烧等相关定性指标,见表 5。“生产工艺及设备”下新增二级指标的基准值主要参考《新型储能并网运行及辅助服务管理实施细则》以及文献[7]、[8]设定,“清洁生产管理”下新增二级指标的基准值则是结合“双碳”背景设定。

3.4 定量指标向定性指标的转变

“现行指标体系”一级指标“资源综合利用”中的两项二级指标——“粉煤灰综合利用率”和“脱硫副产品综合利用率”为定量指标,其最低限值为  $70\%$ ,若任意一项指标不能达到该限值,企业即被评定为非清洁生产企业。在经济社会高质量发展、基本建设投资放缓的新形势下,火电行业依靠自身能力达到“现行指标体系”中的最低限值较为困难。建议这两项定量指标转变为定性指标,企业建立有相应的机构,努力拓展下游综合利用市场,能够去存量即达到Ⅰ级基准值;企业建立有相应的机构,努力拓展下游综合利用市场,综合利用率能够持续上升,即达到

表 3 污染物排放指标基准值优化  
Table 3 The optimization of benchmark value of pollutant emission index

| 项目   | 对应排放标准依据/( $\text{mg}/\text{m}^3$ ) |                 | 清洁生产评价基准值/[ $\text{g}/(\text{kW}\cdot\text{h})$ ] |           |           |           |           |           |
|------|-------------------------------------|-----------------|---------------------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|      | GB 13223—2011                       | DB13/ 5161—2020 | Ⅰ级<br>现行值                                         | Ⅱ级<br>现行值 | Ⅲ级<br>现行值 | Ⅰ级<br>优化值 | Ⅱ级<br>优化值 | Ⅲ级<br>优化值 |
| 烟尘   | 30                                  | 10              | 0.06                                              | 0.09      | 0.13      | 0.020     | 0.045     | 0.065     |
| 二氧化硫 | 100                                 | 35              | 0.15                                              | 0.22      | 0.43      | 0.053     | 0.073     | 0.151     |
| 氮氧化物 | 100                                 | 50              | 0.22                                              | 0.43      | 0.43      | 0.110     | 0.215     | 0.215     |

表 4 纯凝机组二氧化碳排放量基准值  
 Table 4 Carbon dioxide emission benchmark value of pure condensing unit

| 机组类型 | 机组等级          | 二氧化碳排放量基准值/[g/(kW·h)] |        |        |
|------|---------------|-----------------------|--------|--------|
|      |               | I 级                   | Ⅱ 级    | Ⅲ 级    |
| 湿冷机组 | 超超临界 1 000 MW | 652.05                | 666.04 | 681.04 |
|      | 超超临界 600 MW   | 659.11                | 672.52 | 693.24 |
|      | 超临界 600 MW    | 692.76                | 704.28 | 716.60 |
|      | 超临界 350 MW    | 698.07                | 708.76 | 733.63 |
|      | 亚临界 600 MW    | 720.09                | 713.39 | 745.51 |
|      | 亚临界 350 MW    | 727.62                | 718.25 | 764.56 |
|      | 亚临界 300 MW    | 733.97                | 721.23 | 762.56 |
| 空冷机组 | 超超临界 1 000 MW | 672.56                | 693.91 | 703.15 |
|      | 超超临界 600 MW   | 687.27                | 701.79 | 718.33 |
|      | 超临界 600 MW    | 696.96                | 717.23 | 733.28 |
|      | 超临界 350 MW    | 684.58                | 712.38 | 748.86 |
|      | 亚临界 600 MW    | 720.85                | 724.81 | 756.13 |
|      | 亚临界 300 MW    | 756.01                | 747.43 | 800.46 |

表 5 新增二级定性指标  
 Table 5 Newly added second-level qualitative indicators

| 项目   | 一级指标    | 新增二级指标            | I 级基准值                                                                      | Ⅱ 级基准值                                                         | Ⅲ 级基准值 |
|------|---------|-------------------|-----------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|--------|
| 定性指标 | 生产工艺及设备 | 面向新能源消纳及新能源发电设施配建 | 企业自主配建有新能源发电项目,并配建有新型独立储能电站,且储能电站可提供自动发电控制(AGC)辅助服务                         | 企业自主配建有新能源发电项目                                                 |        |
|      |         | 机组灵活运行技术          | 采用适应灵活运行的制粉系统优化控制技术;采用适应快速变负荷的供热机组多能源协同控制技术(仅限供热机组)                         |                                                                |        |
|      | 清洁生产管理  | 生物质掺烧技术           | 采用间接耦合生物质掺烧技术                                                               |                                                                |        |
|      |         | 碳排放监督管理体系         | 企业制定有年度降碳工作计划,有实时碳排放监测系统,设立有碳排放核算小组、依据实时检测数据形成碳排放月记录,有由具备资质的第三方出具的碳排放核查年度报告 | 企业制定有年度降碳工作计划,安全环保部门有专人负责碳排放核算,依据质量平衡法形成碳排放月记录,有自主编制的碳排放核查年度报告 |        |

Ⅱ级基准值;企业建立有相应的机构,努力拓展下游综合利用市场,综合利用率能够持续保持,即达到Ⅲ级基准值。

4 结 语

“现行指标体系”在“双碳”目标下必然会发生演变,本研究提出了相关优化思路如下:

1) 各容量机组的供电煤耗指标基准值比“现行指标体系”有所降低,火电行业未来向更低供电煤耗方向发展,3 个等级的基准值在现有基础上下降约 4.190~32.975 g/(kW·h)。新能源为新型电力系统中,建议引入体现火电机组服务能力的机组调峰深度和爬坡速率因子,以进一步完善和细化“现行指标体系”中的供电煤耗修正计算方法。

2) 污染物排放指标下的二氧化硫、氮氧化物和烟尘 3 个二级指标的基准值应进一步加严。二氧化碳排放量指标将会作为新的限值被纳入。

3) “现行指标体系”中定性指标应增加面向新能源消纳及新能源发电设施配建、机组灵活运行技术及生物质掺烧技术等二级评价指标。

4) 因条件约束,建议将火电企业自身难以实现的“粉煤灰综合利用率”和“脱硫副产品综合利用率”由刚性定量指标转变为相对弹性的定性指标。

参考文献:

[1] 国家发展改革委,国家环保总局.关于发布《钢铁行业清洁生产评价指标体系(试行)》、《氮肥行业清洁生产评价指标体系(试行)》、《电镀行业清洁生产评价指标体系(试行)》的公告[EB/OL]. [2023-02-08]. <https://zfxxgk.ndrc.gov.cn/web/iteminfo.jsp?id=19827>.

[2] 中电联.关于公示 2021 年度电力行业火电 1 000 MW、600 MW、300 MW 级机组能效水平对标及竞赛数据的通知[EB/OL].[2023-02-14].<https://pjzx.cec.org.cn/detail/index.html?3-308453>.

(下转第 144 页)