

# 基于 AHP-TOPSIS 算法的再热蒸汽系统稳定性综合评价

董竹雨<sup>1</sup>, 肖海平<sup>1</sup>, 彭家琪<sup>1</sup>, 白翎<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学 能源与动力机械工程学院, 北京 102206; 2. 北京国电电力有限公司, 北京 100176)

**摘要:**再热蒸汽系统的稳定性影响着燃煤机组的安全性和经济性。本文基于同一集团6台机组(A~F)的运行数据进行再热蒸汽系统的稳定性对标评价。通过 $3\sigma$ 准则对大数据进行清洗,并利用滑动窗格法进行稳定工况划分。基于过程能力指数 $C_{pk}$ 和变异系数 $C_v$ 分别对再热蒸汽温度和再热器减温水调节阀开度进行稳定性打分,并利用层次分析法-优劣解距离法对参数进行权重分配计算,完成不同机组在不同工况下的综合对标评价。结果表明:A~F机组中,E机组再热汽温对应的 $C_{pk}$ 值最大,为1.75,其稳定性最好;F机组再热器减温水调节阀开度对应的 $C_v$ 值最小,为0.56,其稳定性最好;A机组的再热蒸汽温度和再热器减温水调节阀开度的稳定性最差;A机组和C机组左右汽温偏差和再热器减温水调节阀开度差明显偏大,源于其采用四角切圆方式燃烧;300 MW的E机组再热蒸汽系统的稳定性最好,百万机组再热蒸汽系统的稳定性较差。

**关键词:**对标评价;稳定性评价;过程能力指数;变异系数;AHP-TOPSIS

中图分类号:TK221

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.01.014

[引用本文格式]董竹雨,肖海平,彭家琪,等.基于AHP-TOPSIS算法的再热蒸汽系统稳定性综合评价[J].热能动力工程,2023,38(1):112-119. DONG Zhu-yu, XIAO Hai-ping, PENG Jia-qi, et al. Comprehensive evaluation of reheat steam system stability based on AHP-TOPSIS algorithm[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(1): 112-119.

## Comprehensive Evaluation of Reheat Steam System Stability based on AHP-TOPSIS Algorithm

DONG Zhu-yu<sup>1</sup>, XIAO Hai-ping<sup>1</sup>, PENG Jia-qi<sup>1</sup>, BAI Ling<sup>2</sup>

(1. School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing, China, Post Code: 102206; 2. Beijing Guodian Power Corporation, Beijing, China, Post Code: 100176)

**Abstract:** The stability of reheat steam system of coal-fired unit affects the safety and economy of the system. Based on the operation data of 6 units (A to F) of the same group corporation, the stability benchmarking evaluation of reheat steam system was carried out in this paper. The big data was cleaned through the  $3\sigma$  criteria, and the stable working conditions were classified by using the sliding pane method. Based on the process capability index  $C_{pk}$  and coefficient of variance  $C_v$ , the stability of reheat steam temperature and desuperheating water regulating valve opening of reheater was scored respectively, and the weight distribution of parameters was calculated by analytic hierarchy process - technique for order preference by similarity to ideal solution (AHP-TOPSIS) to complete the comprehensive benchmarking evaluation of different units under different working conditions. The results show that in units A to F, the corresponding value of reheat steam temperature of unit E is the largest,  $C_{pk}$  is 1.75, and its stability is the best; the corresponding value of desuperheating water regulating valve opening of reheater of unit F is the smallest,  $C_v$

收稿日期:2022-05-18; 修订日期:2022-08-03

基金项目:国家重点研发计划项目(2018YFB060420103)

Fund-supported Project: National Key Research & Development Program of China (2018YFB060420103)

作者简介:董竹雨(1997-),女,华北电力大学硕士研究生。

通讯作者:肖海平(1978-),男,华北电力大学副教授。

is 0.56, and its stability is the best; the stability of reheat steam temperature and desuperheating water regulating valve opening of reheater of unit A is the worst. The left and right steam temperature deviation of unit A and unit C and the difference of desuperheating water regulating valve opening of reheater are obviously too large, which is due to its four-corner tangential combustion; the reheat steam system of 300 MW unit E has the best stability, and the reheat steam system of 1 000 MW unit has poor stability.

**Key words:** benchmarking evaluation, stability evaluation, process capability index, coefficient of variation, AHP-TOPSIS

## 引 言

生产对标活动对提高火电企业管理水平、促进技术进步和设备改造升级起到了重要的指导作用<sup>[1]</sup>,并可有效提高机组的运行水平。

再热器出口蒸汽温度是火力发电机组运行中最重要参数之一<sup>[2]</sup>。再热器出口汽温对机组负荷更加敏感,且汽温偏差对机组的安全性、稳定性和经济性有较大影响<sup>[3-9]</sup>。优质的再热汽温控制能使再热汽温在标准范围内波动,保证机组安全运行<sup>[10]</sup>。因此,再热蒸汽系统的稳定性对于机组的安全运行具有较大影响。

一些学者<sup>[11-16]</sup>使用层次分析法、模糊评价法、熵值法、基于数据挖掘的状态监测法等综合评价方法对机组进行对标评价。鲁松林等人<sup>[17]</sup>基于积分制对火力发电机组关键性能指标在线评分,进而求得得到机组的总体性能水平。Si 等人<sup>[18]</sup>利用层次分析法确定指标权重,应用模糊综合评价方法建立多指标综合能效评价体系。虞仕杰等人<sup>[19]</sup>建立火电厂数据挖掘和关键目标寻优的智能系统,通过稳定工况划分、运行参数聚类流程挖掘历史工况中有价值的信息,找到与当前实时运行工况近似的目标值及运行参数,为优化运行提供开环建议。孙志春等人<sup>[20]</sup>利用层次分析法和灰色关联度法对多

台燃煤发电机组的稳定性进行评价,并采用综合对标法进行排名。Wu 等人<sup>[21]</sup>提出一种混合综合评价模型,将灰色关联分析与层次分析法相结合,并将自助法和相关系数融入熵原理,获得指标的客观权重,进而评价机组性能。但传统的对标工作大多是对机组运行数据月度或日均值进行横向以及纵向对比,这样的方法相对单一,且对运行数据的利用不充分。

国内越来越多的大功率高参数机组在满足基本用电负荷的情况下都要承担调峰任务<sup>[22]</sup>,满足灵活性发电的需求,机组将频繁变换不同负荷,因此有必要分析不同负荷下再热蒸汽系统的稳定性。

本文基于再热蒸汽系统稳定性对机组进行对标打分,通过过程能力指数和变异系数对再热蒸汽温度和再热器减温水调节阀开度的稳定性进行打分,从运行指标的均值、分散度等角度对数据进行对比分析,并辅以层次分析法-优劣解距离法(AHP-TOPSIS)对不同机组进行综合对标评价。

## 1 数据预处理

### 1.1 设备简介

煤质的波动是不可控因素,并且会引起机组负荷、再热汽温等的波动,因此选取同一集团下的 6 台机组进行运行稳定性评价,以保证煤质的相对稳定。机组设计参数如表 1 所示。

表 1 机组设计参数

Tab. 1 Unit design parameters

机组	负荷/MW	燃烧方式	再热器进口汽温/℃	再热器出口汽温/℃	再热器进口蒸汽压力/MPa	再热器出口蒸汽压力/MPa
A	1 000	四角切圆	373	623	6.16	5.96
B	1 000	前后墙对冲	349	623	5.81	5.62
C	600	四角切圆	323	540	3.80	3.60
D	600	前后墙对冲	285	569	4.54	4.32
E	300	四角切圆	326	540	4.02	3.84
F	300	四角切圆	325	538	3.95	3.76

### 1.2 数据处理

电厂实时数据库(Plant information system, PI)实现了对生产数据的海量存储,针对再热蒸汽系统关键参数,从PI数据库中提取8个月的数据,采样频率为每分钟1个数据。

根据数据特点,主要处理原始数据中的离群点。考虑到采集系统的连续、实时和自动化,利用拉依达准则(3σ 准则<sup>[23]</sup>)剔除奇异值。设定超过区间(μ - 3σ, μ + 3σ)的误差属于粗大误差或异常值,对其进行剔除,即满足:

$$v_b = |x_b - \mu| > 3\sigma \tag{1}$$

式中:  $x_b$ —某一样本数据;  $\mu$ —样本均值;  $\sigma$ —样本标准差。

对于燃煤机组,关键参数在稳定负荷与变负荷下的运行规律不同,因此需要采用滑动窗格法<sup>[24]</sup>对数据进行稳态检测。对于时间序列连续的数据集,需预先设定窗口大小与标准差阈值比例  $R$ , 沿着时间序列滑动窗口,求取窗口内数据的平均值,满足:

$$s_t < |R \times m| \tag{2}$$

式中:  $s_t$ —窗口内数据的标准差;  $R$ —标准差阈值比例;  $m$ —窗口内数据的平均值。

最终确定窗口大小为 10, 标准差阈值比例  $R$  为 3。

### 1.3 稳定性评价数学模型

#### 1.3.1 过程能力指数评价

过程能力指数  $C_{pk}$  表示过程能力满足技术标准(例如规格、公差)的程度。在机组的稳定性评价中,  $C_{pk}$  越大, 则机组运行能力越好, 即越稳定。对于  $C_{pk}$  的计算, 有:

$$C_{pk} = \frac{T_{max} - T_{min}}{6\sigma}(1 - k) \tag{3}$$

式中:  $T_{max}$ ,  $T_{min}$ —样本数据的上、下限;  $k$ —偏移指数。

通过归一化方法, 定义  $C_{pk}$  稳定性得分  $Q_1$ , 折算为百分制:

$$Q_1 = \frac{0.4C_{pk} - C_{pk,min} + 0.6C_{pk,max}}{C_{pk,max} - C_{pk,min}} \times 100 \tag{4}$$

式中:  $Q_1$ —过热蒸汽温度和再热蒸汽温度稳定性得分;  $C_{pk,min}$ —稳定负荷下计算  $C_{pk}$  下限;  $C_{pk,max}$ —稳定负荷下计算  $C_{pk}$  上限。

#### 1.3.2 变异系数评价

变异系数  $C_V$  又称离散系数, 是概率分布离散

程度的归一化量度。通常用变异系数来表征数据的离散程度, 变异系数越小, 则数据的离散程度越小, 即越稳定。对于变异系数的计算, 有:

$$C_V = \frac{\sigma}{\mu} \tag{5}$$

式中:  $\mu$ —样本的均值。

通过归一化方法, 定义  $C_V$  稳定性得分  $Q_2$ , 折算为百分制:

$$Q_2 = \frac{0.4C_V - C_{V,max} + C_{V,min}}{C_{V,min} - C_{V,max}} \times 100 \tag{6}$$

式中:  $Q_2$ —开度的稳定性得分;  $C_{V,min}$ —稳定负荷下计算  $C_V$  下限;  $C_{V,max}$ —稳定负荷下计算  $C_V$  上限。

### 1.4 综合评价方法

层次分析法<sup>[25-26]</sup>是一种主观赋权法, 将因素按不同层次聚集组合, 利用主观意识对各项因素进行重要度对比, 然后确定各项因素权重。随后进行重要性排序计算, 根据判断矩阵, 求出其最大特征根  $\lambda_{max}$  所对应的特征向量  $w$ :

$$P = \lambda_{max} w \tag{7}$$

式中:  $P$ —由各项因素组成的判断矩阵;  $\lambda_{max}$ —最大特征根;  $w$ —最大特征根  $\lambda_{max}$  所对应的特征向量。

将  $w$  归一化后结合实际形成各评价因素的重要性排序, 即各关键参数的权重集合。权重系数组成的矩阵记为  $W$ :

$$W = \begin{bmatrix} w_1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & w_2 & \cdots & 0 \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ 0 & 0 & \cdots & w_n \end{bmatrix} \tag{8}$$

TOPSIS 方法<sup>[27-28]</sup>先确定 1 个最优解和 1 个最劣解, 根据有限个评价对象与最优解、最劣解的距离进行排序, 确定对最优解的贴近度。构建特征矩阵  $Z$ :

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} & \cdots & z_{1n} \\ z_{21} & z_{22} & \cdots & z_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ z_{m1} & z_{m2} & \cdots & z_{mn} \end{bmatrix} \tag{9}$$

计算加权之后的特征矩阵  $Z'$ :

$$Z' = Z \cdot W = \begin{bmatrix} z'_{11} & z'_{12} & \cdots & z'_{1n} \\ z'_{21} & z'_{22} & \cdots & z'_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ z'_{m1} & z'_{m2} & \cdots & z'_{mn} \end{bmatrix} \tag{10}$$

最后,得出评价对象得分值  $X_i$  :

$$X_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ + d_i^-} \quad (11)$$

式中:  $d_i^+$ ,  $d_i^-$ —第  $i$  个待评价对象与最优解之间的欧式距离及与最劣解之间的欧式距离。

## 2 机组的稳定性评价

### 2.1 关键参数的稳定性评价

#### 2.1.1 全周期内关键参数的稳定性评价

不同的燃烧方式下汽温稳定性存在差异。四角切圆燃烧方式下,燃烧器喷口倾角可以上下摆动,从而调整火焰中心位置,影响汽温稳定性。而前后墙对冲燃烧方式下,燃烧器喷口固定,不能摆动,火焰中心位置相对固定,对汽温的波动影响更小。

机组的负荷通常为额定负荷的 50% ~ 100%,一般要求机组再热汽温在设定值  $\pm 5$  °C 范围内,汽温过高会使金属材料的机械强度降低,导致设备的损坏或部件的使用寿命缩短;汽温过低会使汽轮机的效率降低,末级叶片工作状况恶化,若长期在低温下运行,会使叶片受到严重侵蚀。因此再热汽温的稳定很重要。利用  $C_{pk}$  来评价再热汽温的稳定性,  $C_{pk}$  的值越大越好,并计算得到稳定性得分  $Q_1$ 。

再热汽温的稳定性评价如图 1 所示。A, B, C 和 D 机组再热汽温的  $C_{pk}$  值在 0.87 ~ 1.33 之间,相差不大。E 机组的  $C_{pk}$  值为 1.75,再热汽温稳定性评分为 88.15 分,  $C_{pk}$  值和再热汽温稳定性评分较 A 机组分别高 77% 和 22%。E, F 机组采用汽包炉,其热惯性较大,因此负荷变化对汽温影响较小,再热汽温稳定性较好。A, B, C 和 D 机组采用直流炉,具有强对流特性,汽温对负荷的响应较为灵敏,因此其再热汽温波动较大,稳定性较差。

负荷是影响汽温的主要因素。一般而言,再热汽温呈现强对流特性,随负荷升高,再热汽温快速升高,因此负荷波动将影响再热汽温的稳定性。图 2 为机组按月负荷率变化。可以看出, D 机组的平均负荷率最低,仅为 54.92%,且月负荷率波动较大; F 机组的月负荷率最稳定,且平均负荷率较 D 机组提高 47%; E 机组的负荷波动较大且平均负荷率仅为 64.93%,但汽包炉负荷变化时引起汽温变化小。因此, E 机组的再热汽温稳定性同样较好。

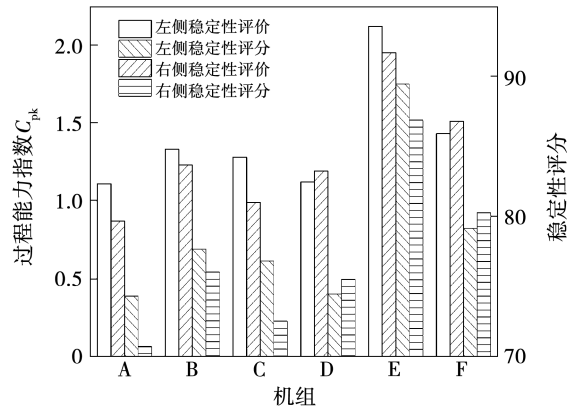


图 1 再热蒸汽温度稳定性评价

Fig. 1 Reheat steam temperature stability evaluation

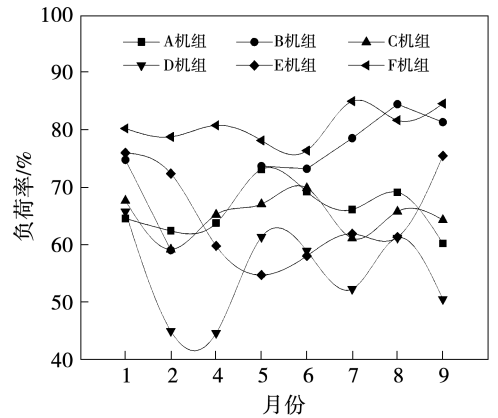


图 2 机组负荷率

Fig. 2 Unit load rate

再热器减温水调节阀开度的频繁调整将引起减温水量的变化,从而导致阀门、减温器等设备的老化、损坏,因此需保证再热器减温水调节阀开度的稳定。利用变异系数  $C_V$  来评价其稳定性,  $C_V$  的值越小越好,并计算得到稳定性得分  $Q_2$ 。

再热器减温水调节阀开度的稳定性评价如图 3 所示。由图 3 可知, A 机组再热器减温水调节阀开度稳定性较差,左右两侧  $C_V$  均值为 2.46,评分 61.29; F 机组动作的稳定性最好,安全性最高,  $C_V$  值仅为 0.56,评分较 A 机组提高 53%。

再热汽温的偏差和再热器减温水调节阀开度差都反映了再热器管组中各并列管子左右两侧工质的热偏差,热偏差的存在将对受热金属材料的安全性产生影响。不同燃烧方式下机组的热偏差不同。对于前后墙对冲燃烧方式而言,其炉内温度场高温区分布一般集中在前墙的中段,该部分为高温区域,因此对应的中间屏容易超温;四角切圆燃烧方式的炉

膛出口烟气残余旋转导致左、右两侧烟温偏差、汽温偏差和壁温偏差,容易引发再热器单侧超温爆管等安全性问题。

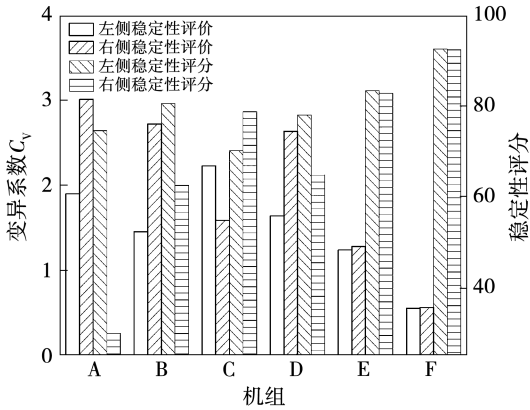


图 3 再热器减温水调节阀开度稳定性评价

Fig. 3 Stability evaluation of desuperheating water regulating valve opening of reheater

再热汽温偏差值和再热器减温水调节阀开度差值如图 4 所示。由图 4 可以看出, D 机组的再热汽温偏差为 1.23 ℃,再热器减温水调节阀开度差为 0.19; A 机组的再热汽温偏差达到 9.88 ℃,再热器减温水调节阀开度差为 5.69,偏差值分别为 D 机组的 8 倍和 30 倍。采用四角切圆方式燃烧的机组偏差明显大于采用前后墙对冲方式燃烧的机组,且机组容量越大,偏差越大。

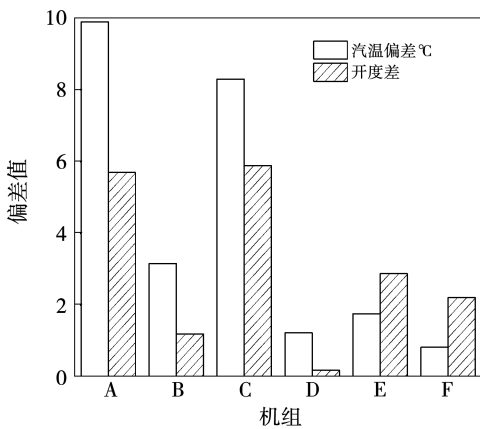


图 4 再热汽温偏差和再热器减温水调节阀开度差

Fig. 4 Reheat steam temperature deviation and desuperheating water regulating valve opening difference of reheater

2.1.2 稳定负荷下关键参数的稳定性评价

考虑不同负荷下机组的稳定性,按负荷率不同提取稳定负荷下的高、中、低负荷,定义高负荷为负

荷率高于 85%,中负荷的负荷率为 70% ~ 85%,低负荷为负荷率低于 70%。

不同负荷下再热汽温稳定性评分如图 5 所示。由图 5 可知, B 机组的再热汽温响应能力较差,无论高、中、低负荷,其再热汽温稳定性都较差。A 机组在高、中负荷下再热汽温稳定性较好,评分可达 80,但低负荷时汽温响应特性不好,再热汽温稳定性评分较高负荷下降 15%。E 机组的再热汽温稳定性最好,再热汽温稳定性评分最高可达 88。低负荷时再热汽温很难维持稳定,因此低负荷时仅 E 机组再热汽温稳定性较好,其余机组都较差。

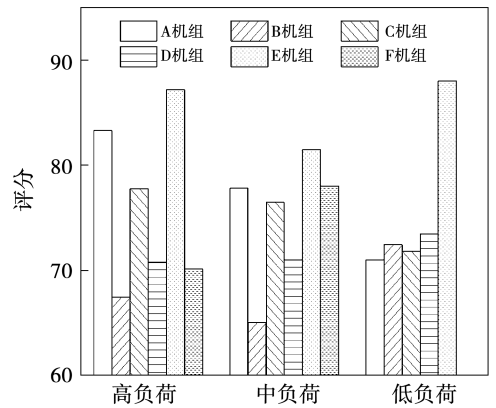


图 5 不同负荷下再热蒸汽温度稳定性评分

Fig. 5 Reheat steam temperature stability score under different loads

不同负荷下再热器减温水调节阀开度稳定性评分如图 6 所示。由图 6 可知,高、中负荷时机组的再热器减温水调节阀开度稳定性好于低负荷。高负荷下 B 机组、中负荷下 A 机组、低负荷下 C 机组的再热器减温水调节阀开度稳定性较差。

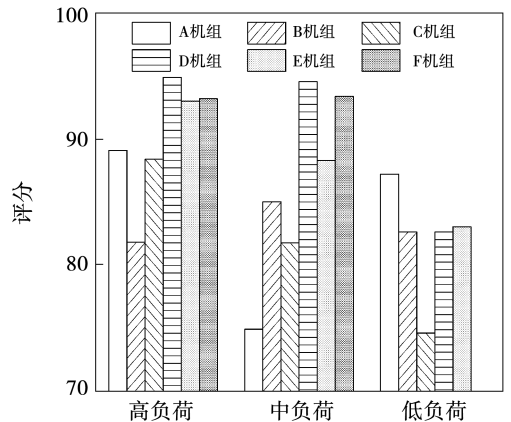


图 6 不同负荷下再热器减温水调节阀开度稳定性评分

Fig. 6 Stability score of desuperheating water regulating valve opening of reheater under different loads

采用四角切圆方式燃烧的机组烟温偏差较大,且容量越高机组的偏差越大。不同负荷下再热蒸汽温度偏差和再热器减温水调节阀开度差如图 7 和图 8 所示。由图 7 和图 8 可知,再热汽温偏差和再热器减温水调节阀开度差分别在高、中、低 3 种负荷下呈现相似的增减趋势,即各机组在不同负荷下表现出偏差规律的一致性:A 机组和 C 机组的偏差远大于其他机组,D 机组的偏差较小。低负荷时,再热汽温偏差较大,但所需的减温水量减少,因此再热器减温水调节阀开度差小于高、中负荷时的开度差。

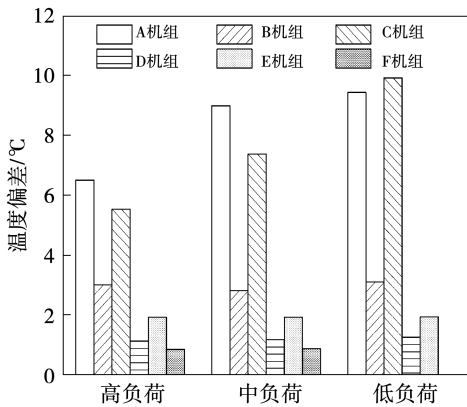


图 7 不同负荷下再热汽温偏差

Fig.7 Temperature deviation of reheat steam under different loads

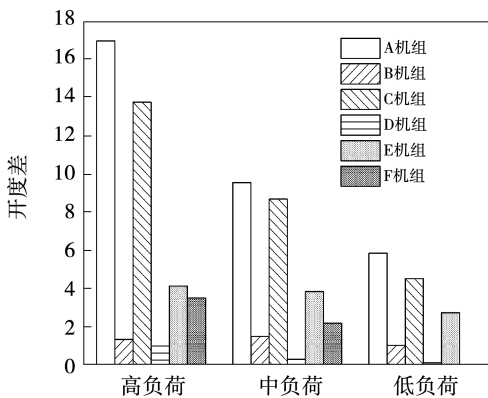


图 8 不同负荷下再热器减温水调节阀开度差

Fig.8 Difference of desuperheating water regulating valve opening of reheater under different loads

再热汽温的偏差随负荷的减小而增加。高负荷时 D 机组汽温偏差为  $1.13\text{ }^{\circ}\text{C}$ , A 机组汽温偏差是 D 机组的 5.75 倍;低负荷时 A 机组汽温偏差较高负荷升高 45%。

再热器减温水调节阀开度差随负荷的减小而减小。高负荷时 A 机组再热器减温水调节阀开度差达到 16.95, D 机组再热器减温水调节阀开度差仅有 1.00;低负荷时 A 机组再热器减温水调节阀开度差较高负荷下降 65%, D 机组再热器减温水调节阀开度差降为 0.13。

## 2.2 系统的稳定性评价

采用 AHP-TOPSIS 方法,将全周期以及稳定负荷下高、中、低负荷的关键参数的稳定性评分结合权重系数,分别加权计算 6 台机组在不同负荷下的整体稳定性得分,如表 2 所示。

表 2 不同负荷下各机组整体稳定性得分

Tab.2 The overall stability score of each unit under different loads

机组	全周期	高负荷	中负荷	低负荷
A	67.09	74.56	71.88	72.08
B	74.83	69.32	69.67	71.69
C	74.10	76.90	73.90	70.37
D	73.55	75.70	76.32	75.66
E	85.31	86.99	81.69	85.74
F	81.98	75.98	82.29	-

由表 2 可知,由于再热汽温偏差过大导致全周期下 A 机组在稳定性评价中表现较差,E 机组整体稳定性水平最高,稳定性得分比 A 机组高 27%。

在稳定负荷下,高负荷时 B 机组再热汽温稳定性和再热器减温水调节阀开度稳定性均较差,导致 B 机组的整体稳定性得分较低;中负荷时 B 机组再热汽温稳定性较差,但再热器减温水调节阀开度稳定性有所提高,因此 B 机组整体稳定性略优于高负荷时 B 机组的稳定性;低负荷时 B 机组再热汽温稳定性较差,C 机组的再热蒸汽温度偏差和再热器减温水调节阀开度差较大,因此 B 机组和 C 机组在低负荷时整体稳定性表现较差。

全周期包括了稳定负荷和变工况过程的数据,因此全周期下机组的稳定性与稳定负荷存在较大差异。A 机组稳定负荷下的高、中、低负荷相对集中,整体稳定性评分较好。但全周期内负荷波动较大,引起再热蒸汽稳定性降低,因此全周期下 A 机组的稳定性评分低于稳定负荷时的稳定性评分。B 机组

在高、中、低负荷下再热汽温稳定性均较差,且负荷分布较分散,导致机组整体稳定性评分较低。但全周期内 B 机组的负荷波动比高、中、低负荷波动小,且机组负荷率较高,因此全周期下 B 机组的稳定性评分高于稳定负荷。全周期评价与稳定负荷评价是从不同维度对机组进行综合评价。

### 3 结 论

(1) 通过  $3\sigma$  准则和滑动窗格法等预处理,有效剔除奇异值,并实现了全周期内稳定负荷的筛选,有利于对灵活性发电背景下机组的不同负荷状态进行稳定性分析。

(2) 利用过程能力指数  $C_{pk}$  和变异系数  $C_v$  分别对再热汽温和再热器减温水调节阀开度进行稳定性评价。全周期下,小机组再热汽温和再热器减温水调节阀开度的稳定性水平更高,对应的  $C_{pk}$  值和  $C_v$  值分别为 1.75 和 0.56。稳定负荷下,300 MW 机组的参数稳定性水平较高,高、中负荷时百万机组的稳定性表现较好,但低负荷时稳定性表现较差。采用四角切圆方式燃烧的机组左右蒸汽温度偏差和再热器减温水调节阀开度差明显大于前后墙对冲方式燃烧的机组,且机组容量越大偏差越大,机组参数稳定性越差。

(3) 利用 AHP-TOPSIS 方法,对不同机组不同负荷进行综合对标评价。综合对标评价表明,不同负荷下均为 300 MW 的 E 机组再热系统稳定性最好,百万机组再热系统的稳定性较差。

### 参考文献:

- [1] 白翎,廖高良,李杨,等.燃煤机组生产综合对标体系[J]. 热力发电,2018,47(9):128-132.
- [2] 蔡雨晴,杨平,陈欢乐,等.基于 MUEAIO 方法的再热汽温系统模型辨识[J]. 热能动力工程,2021,36(1):10-16.
- [3] 王小华,赵鹏,刘瑞鹏,等.东方百万机组锅炉管壁温度分布规律研究与应用[J]. 热能动力工程,2019,34(11):131-139,145.
- [4] 王小华,刘瑞鹏,丁奕文,等.660 MW 超超临界机组不同炉型高温再热器管壁温度分布规律研究[J]. 热能动力工程,2021,36(7):145-150.
- [5] 丁建良,于国强,罗建裕.深度调峰下超超临界机组再热汽温控制优化[J]. 中国电力,2020,53(5):143-149.
- [6] LI X, LIU J, WANG K, et al. Performance analysis of reheat steam temperature control system of thermal power unit based on constrained predictive control[J]. Complexity, 2019(11):9361723.
- [7] WANG C, QIAO Y, LIU M, et al. Enhancing peak shaving capability by optimizing reheat-steam temperature control of a double-reheat boiler[J]. Applied Energy, 2020, 260:9361723.
- [8] 周文台,王克,吕为智.深度调峰下的再热汽温偏差调整试验研究[J]. 动力工程学报,2019,39(9):700-704,730.
- [9] 姚建村,孟海洋,王新平,等.1 050 MW 超超临界一次再热锅炉 620 °C 再热汽温的运行调整[J]. 锅炉技术,2017,48(3):56-61.
- [10] 陈婷婷.基于神经网络的再热汽温特性建模与优化控制仿真研究[D].北京:华北电力大学,2021.
- [11] 董福贵,张也,尚美美.分布式能源系统多指标综合评价研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(12):3214-3223.

- prehensive evaluation of distributed energy system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(12): 3214–3223.
- [12] 秦子健,石季英,魏文辉,等. 中低压配电网综合效益评估方法研究[J]. 中国电力, 2019, 52(8): 34–44.  
QIN Zi-jian, SHI Ji-ying, WEI Wen-hui, et al. Research on comprehensive benefit assessment method of medium and low voltage distribution network[J]. Electric Power, 2019, 52(8): 34–44.
- [13] ZHOU S, YANG P. Risk management in distributed wind energy implementing analytic hierarchy process[J]. Renewable Energy, 2020, 150: 616–623.
- [14] FARHAD O, BUSHBY S T, WILLIAMS R D. Assessing the performance of residential energy management control algorithms: multi-criteria decision making using the analytical hierarchy process[J]. Energy and Buildings, 2019, 199: 537–546.
- [15] 李大中,许炳坤,常 城. 基于熵值法的大型风电机组运行状态综合评价[J]. 热能动力工程, 2016, 31(4): 1–5, 139.  
LI Da-zhong, XU Bing-kun, CHANG Cheng. Entropy-based comprehensive evaluation for the operating conditions of large-scale wind turbine[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2016, 31(4): 1–5, 139.
- [16] 许裕粟,张 静,李 柠,等. 基于数据挖掘的锅炉在线运行状态监测[J]. 热能动力工程, 2019, 34(2): 82–87, 115.  
XU Yu-li, ZHANG Jing, LI Ning, et al. Online operational state monitoring of boiler based on data mining[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2019, 34(2): 82–87, 115.
- [17] 鲁松林,代家元,周春蕾,等. 基于积分制的燃煤机组节能减排综合绩效评估方法与应用[J]. 江苏电机工程, 2016, 35(5): 90–93.  
LU Song-lin, DAI Jia-yuan, ZHOU Chun-lei, et al. Method and application of the comprehensive evaluation of the energy-saving emission reduction performance of coal-fired unit based on the integrating system[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2016, 35(5): 90–93.
- [18] SI T, WANG C, LIU R, et al. Multi-criteria comprehensive energy efficiency assessment based on fuzzy-AHP method: a case study of post-treatment technologies for coal-fired units[J]. Energy, 2020, 200: 117533.
- [19] 虞仕杰,蒋赢凯,尹贵豪,等. 燃煤电厂大数据挖掘和关键目标寻优智能系统研究[J]. 浙江电力, 2022, 41(2): 86–91.  
YU Shi-jie, JIANG Ying-kai, YIN Gui-hao, et al. Study on an intelligent system of big data mining and key target optimization for coal-fired power plant[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(2): 86–91.
- [20] 孙志春,林 琳,白 翎,等. 基于系统稳定性的燃煤发电机组综合对标评价方法研究与实践[J]. 热力发电, 2021, 50(3): 77–83.  
SUN Zhi-chun, LIN Lin, BAI Ling, et al. Comprehensive benchmarking evaluation method of coal-fired unit based on system stability: research and application[J]. Thermal Power Generation, 2021, 50(3): 77–83.
- [21] WU D, WANG N, YANG Z, et al. Comprehensive evaluation of coal-fired power units using grey relational analysis and a hybrid entropy-based weighting method[J]. Entropy, 2018, 20(4): 215.
- [22] 董竹林,牛玉广,董恩伏,等. 适应火电机组灵活运行的滑压曲线优化方法[J]. 动力工程学报, 2020, 40(3): 256–264.  
DONG Zhu-lin, NIU Yu-guang, DONG En-fu, et al. Sliding pressure curve optimization for flexible operation of thermal power units[J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2020, 40(3): 256–264.
- [23] GUO Y Y, SUN Y C, LI L B, et al. Reliability assessment for multi-source data of mechanical parts of civil aircraft based on the model[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2019, 33(7): 3205–3211.
- [24] 吕晓磊. 基于火电厂热力设备特征的大数据应用技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2021.  
LYU Xiao-lei. Research on application technology of big data based on characteristics of thermal equipment in thermal power plant[D]. Jinan: Shandong University, 2021.
- [25] 姚忠胜,钱 虹,吴文军,等. 基于多因素综合评价和改进灰色关联的供电可靠性研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(11): 28–34.  
YAO Zhong-sheng, QIAN Hong, WU Wen-jun, et al. Research on power supply reliability based on multi-factor comprehensive evaluation and improved gray relation[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(11): 28–34.
- [26] TIAN G D, ZHANG H H, ZHOU M C, et al. AHP, gray correlation, and TOPSIS combined approach to green performance evaluation of design alternatives[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, 2018, 48(7): 1093–1105.
- [27] 付志扬,王 涛,孔令号,等. 基于 AHP-TOPSIS 算法的重要电力客户用电状态评估[J]. 电网技术, 2022, 46(10): 1–8.  
FU Zhi-yang, WANG Tao, KONG Ling-hao, et al. Power consumption state evaluation of important power customers based on AHP-TOPSIS algorithm[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 1–8.
- [28] 曹 鹏. 基于 AHP-TOPSIS 的太仓电厂脱硫改造方案评价研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2017.  
CAO Peng. Evaluation research on desulfurization renovation project in Taicang power plant based on AHP-TOPSIS[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.