

深调峰工况下锅炉虚假水位预测

刘暑辉, 田亮

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 保定 071003)

摘要: [目的] 火电机组深调峰工况运行“虚假水位”现象严重影响机组安全运行, 准确预测虚假水位出现时刻和幅度能够优化控制系统设计。[方法] 研究思路为: 将实际水位看作真实水位和虚假水位两部分的叠加, 先根据能量平衡和物质平衡建立汽包水位模型计算出真实水位, 再用实际水位减真实水位得到虚假水位, 然后利用小波分析燃料量、汽包压力等信号与虚假水位信号在不同时间空间尺度下的相关性。[结果] 通过对某 600 MW 机组深调峰负荷段运行数据进行分析, 发现通过机理建模有效消除了给水流量和蒸汽流量对虚假水位信号波动的影响; 在 0.062 5 Hz 至 0.125 Hz 频段, 燃料量和汽包压力分别与虚假水位信号呈强相关性。[结论] 可以辅助判断虚假水位的产生及其波动幅度。

关键词: 小波变换; 虚假水位; 真实水位; 多尺度相关; 机理建模

中图分类号: TM611; TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2020)01-0070-06

Prediction of Boiler False Water Level Under Deep Peak Load Regulation Conditions

LIU Shuhui, TIAN Liang

(School of Control and Computer Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: [Introduction] The phenomenon of false water level in the operation of the thermal power unit deep-peak peak operation seriously affects the safe operation of the unit. Accurately predicts the timing and amplitude of the false water level can optimize the control system design. [Method] Research ideas: the actual water level was regarded as the superposition of the real water level and the false water level. Firstly, the water level model was established according to the energy balance and material balance to calculate the real water level, and then the actual water level was used to reduce the real water level to obtain the false water level, and then used wavelet to analyze the correlation between the fuel quantity, steam drum pressure and other signals and the false water level signal at different time and space scales. [Result] By analyzing the operation data of the deep peak load section of a 600 MW unit, it is found that the influence of feed water flow and steam flow on the false water level signal is effectively eliminated by mechanism modeling; in the frequency band of 0.062 5 Hz to 0.125 Hz, the fuel quantity and the steam drum pressure are strongly correlated with the false water level signal, respectively. [Conclusion] It can help determine the occurrence of false water level and its fluctuation range.

Key words: wavelet transform; false water level; real water level; multi-scale correlation; mechanism modeling

汽包水位是反映锅炉能量-工质平衡的关键信号, 其中包含“虚假水位”。火电机组深调峰工况运行“虚假水位”现象严重影响机组安全运行, 由于虚假水位产生和消失速度比较快, 并且在深调峰工况下波动幅度比较剧烈更加难以控制, 易造成水位过高或过低。过高易导致蒸汽品质恶化, 致使受热面结盐, 甚至损坏汽轮机叶片; 过低容易导致排污失效, 破坏炉水循环, 致使炉管爆破。

前人已经利用机理建模、数据分析、智能算法等方法对汽包水位和“虚假水位”现象进行了不同程度的研究^[1-10]。文献 [2] 根据能量平衡和物质平衡构建了汽包水位的软测量模型。文献 [3] 通过与分环节集总参数法相结合, 构建了汽包水位非稳态数学模型。文献 [4] 利用分形理论的时间序列的 R/S 数据分析方法, 根据负荷变化情况及汽包水位分形维数变化情况辨识虚假水位。文献 [5] 将 T-S 模糊神经网络模型应用于锅炉汽包水位对象的数学建模中。文献 [6] 中基于质量和能量守恒定律, 应用系统动力学原理, 以因果回路图和存量流量图为载体, 建立了汽包水位的系统动力学模型。文献 [7] 对传统建模思

收稿日期: 2019-07-14 修回日期: 2019-09-02

基金项目: 国家重点研发计划资助项目 (2017YFB0902100); 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2017MS132)

路进行了简化,对质量平衡方程和能量平衡方程进行修正,建立了能反映水位动态变化的模型;文献[1]在文献[7]的基础上进行改进,利用物质平衡和能量平衡构建了汽包水位动态模型。文献[8]设计了一种通用的非线性滤波器,可以对汽包水位脉动信号进行很好的滤波处理;以此为基础,文献[9]提出一种线性多尺度滤波和非线性死区滤波相结合的适应超低负荷运行的汽包水位滤波器。文献[10]通过建立汽包水位动态模型,对比分析了额定工况和超低负荷工况下汽包水位变化情况。以上研究基本着重在机理建模方面。机理建模方法复杂且建模困难,现在很多文献采用小波变换,卡尔曼滤波等数据分析的方法对所研究对象进行分析研究^[11-16]。本文着重从数据分析方面对虚假水位的产生进行分析。

本文将实际水位看作真实水位和虚假水位两部分的叠加,先根据能量平衡和物质平衡建立汽包水位模型计算出真实水位,再用实际水位减真实水位得到虚假水位,然后利用小波分析燃料量、汽包压力等信号与虚假水位信号在不同时间空间尺度下的相关性。比较不同频率尺度下频率分量间的相关性特征,从而发现信号间的影响关系。

1 真实水位剔除

1.1 机理分析

锅炉的汽水循环系统各设备有汽包、下降管及下降管联箱、省煤器和水冷壁。给水在以上设备中进行循环,最终以饱和蒸汽的形式流出汽包^[1]。

如图1所示,上述过程的汽水循环利用机理分析可简化为:给水(流量 q_f 、比焓 h_f)进入汽包,与汽包中的饱和蒸汽(流量 q_{s2} 、比焓 h_s)混合从而被加热成为饱和水(比焓 h_w)。然后与汽包内现存饱和水(流量 q_{w2})混合(流量 q_w)流入下降管和下降管联箱。被水冷壁有效吸热(Q_b)加热后其中一部分被加热成饱和蒸汽(流量 q_{w1})。饱和蒸汽(流量 q_s)中一部分(流量 q_{s2} 、比焓 h_s)与给水流量混合,其余(流量 q_{s1} 、比焓 h_s)流出汽包。

1.2 真实水位计算

如果将引起汽包水位变化的因素分为两种:物质不平衡引起和其他因素引起。则可将测得的水位变化分为两种成分:由物质不平衡引起的水位变化为真实水位,由其他因素引起的水位变化为虚假水位。由于汽包液面下气泡体积处于动态变化过程,

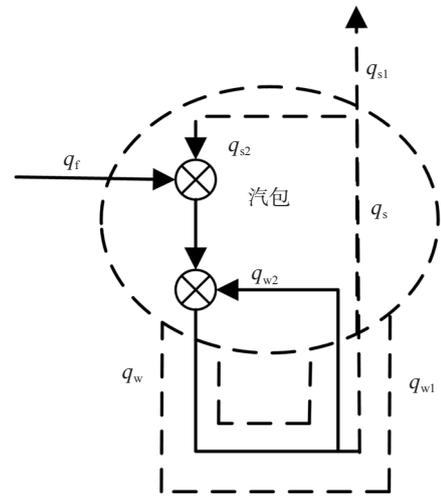


图1 汽水循环简化图

Fig. 1 Steam and water cycle simplified diagram

其体积受多种因素影响,与受热是否均匀,水质和管道布置均有关系。难以靠理论分析确定汽包水位动态模型相关参数。所以利用现有模型只可以准确计算出真实水位,无法定量描述虚假水位。

利用汽包内物质和能量守恒定律可得出以下公式:

$$q_f h_f + q_{s2} h_s = q_f h_w + q_{s2} h_w \quad (1)$$

$$Q_b = q_{w1} (h_s - h_w) \quad (2)$$

$$\frac{dM}{dt} = q_f + q_{s2} - q_{w1} \quad (3)$$

式中: M 为其中工质质量(kg);流量(kg/s),比焓(kJ/kg); Q_b 为锅炉有效吸热(kW)。其中 q_{w1} 为主蒸汽流量与过热器减温水总流量之差。

经过推导简化,得到其真实水位可由式(4)计算^[1]:

$$\frac{dl_{dw}}{dt} = K_1 [q_f (K_2 - h_f) - Q_b] \quad (4)$$

式中: l_{dw} 为真实水位(m); q_f 为给水流量(kg/s); h_f 为比焓(kJ/kg); Q_b 为锅炉有效吸热量(kW)。 K_1, K_2 认为是静态参数,随锅炉负荷-压力工作点变化。

2 虚假水位信号多尺度分析

2.1 多尺度分解

本文采用根据多分辨率(MRA)理论发展而来的小波分解与重构的快速算法(Mallat算法)。此方法可以在不损失信号能量的前提下处理复杂信号,利用正交小波基将信号分解为携带某一或某些频域信息特征的信号。

对于 $f(t) \in L^2(R)$, 其频谱为 $f(w)$ 。实际应用中, 信号的频谱总是有限的, 即只要选择足够大的 m 使得 $f(t) \in V_{m+1}$, $f(t)$ 就可用 V_{m+1} 中的标准正交基展开, 即

$$f(t) = \sum_n c_{m+1,n} \varphi_{m+1,n}(t) \quad (5)$$

式中: $\varphi(t)$ 为尺度函数; V_{m+1} 为尺度空间; $c_{m+1,n} = \langle f, \varphi_{m+1,n} \rangle$ 。

如果 $f(t) \in V_{m+1}$, 则上式正确, 否则上式的右边为 $f(t)$ 在 V_{m+1} 中的投影 $PV_{m+1}f$ 。另外, 由于 $V_{m+1} = V_m \oplus W_m$, 即 $V_m \perp W_m$, 因此, $f(t)$ 也可用 V_m 和 W_m 中的基共同来展开, 即

$$f(t) = \sum_k c_{m,k} \varphi_{m,k}(t) + \sum_k d_{m,k} \psi_{m,k}(t) \quad (6)$$

式 (6) 中, 右边第一部分为 $f(t)$ 的低频分量, 即 $f(t)$ 的近似轮廓部分, 第二部分为 $f(t)$ 的高频分量, 即 $f(t)$ 的细节部分, 其系数为:

$$\begin{aligned} c_{m,k} &= \langle f, \varphi_{m,k} \rangle = \langle \sum_n c_{m+1,n} \varphi_{m+1,n}, \varphi_{m,k} \rangle \\ &= \sum_l c_{m+1,n} \langle \varphi_{m+1,n}, \sum_l h_{l-2k} \varphi_{m+1,l} \rangle = \sum_n c_{m+1,n} h_{m-2k} \end{aligned} \quad (7)$$

同理可得:

$$d_{m+k} = \langle f, \psi_{m,k} \rangle = \sum_n c_{m+1,n} \overline{g_{m-2k}} \quad (8)$$

由式 (7) 和式 (8) 可知, 当大的子空间 V_{m+1} 中的系数 $c_{m+1,k}$ 已知, 可计算出小的子空间 V_m 和 W_m 中的系数 $c_{m,k}$ 和 $d_{m,k}$ 。对分解得到的小波系数进行单只重构可以得到对应频段分量。

从滤波器角度考虑, 信号通过一个高通滤波器和低通滤波器, 得到其高频分量和低频分量。重复使用一组高通滤波器和低通滤波器对所研究数据逐层进行分解, 即构成信号多尺度分解。其分解示意图如图 2 所示:

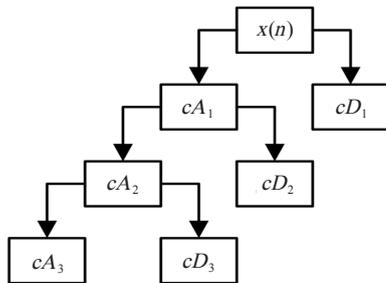


图 2 小波分解示意图

Fig. 2 Wavelet decomposition diagram

2.2 基于多尺度分解的相关分析

虚假水位的产生及波动与众多控制量的变化有关。具体反映到电厂采集的众多测点的数据上即体

现为曲线的波动相似性。由于现场所采集数据一般具有多尺度特性。在不同观测尺度上, 两组数据的波动相似性会产生较大差别。本文所研究尺度大小的不同是指不同频段的信号, 大尺度代表信号的低频部分, 小尺度代表信号的高频部分。因此本文利用小波分解对所采集的数据进行分析, 确定各相关信号和虚假水位信号的潜在联系。

相关分析是一种常用的数据分析方法, 可以定量描述两组不同数据的相关性, 频繁应用于数据分析方面。选用两组数据量为 N 的零均值信号 $x(k)$ 和 $y(k)$, 其相关系数计算公式为:

$$R = \frac{\sum_{k=1}^N x(k)y(k)}{\sqrt{\sum_{k=1}^N x^2(k) \sum_{k=1}^N y^2(k)}} \quad (9)$$

如图 3 所示, 利用小波多尺度分解特性, 将虚假水位信号及各信号分解为不同尺度下的信号, 分别在不同尺度下计算各信号与虚假水位信号的相关系数, 从而提取出在不同频段上波动相似的信号。

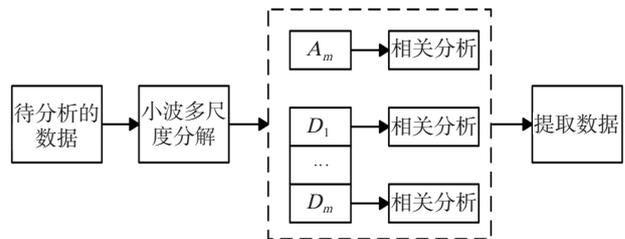


图 3 多尺度相关分析

Fig. 3 Multiscale correlation analysis

3 数据分析

采用某电厂 600 MW 机组运行数据进行分析。各负荷工况下对应参数 K_1 、 K_2 的值如表 1 所示, 研究时间段内机组 50% 负荷运行所采集的燃料量 (s_2)、给水流量 (s_3)、蒸汽流量 (s_4)、汽包压力 (s_5) 以及汽包水位 (s_1) 的数据变化曲线如图 4 所示。

表 1 典型工况下对应参数值

| Tab. 1 Corresponding parameter values under typical conditions | | |
|--|-----------------------|-------|
| 工 况 | K_1 | K_2 |
| 额定负荷 | 7.64×10^{-8} | 2 514 |
| 70% 负荷 | 4.26×10^{-8} | 2 602 |
| 50% 负荷 | 2.75×10^{-8} | 2 716 |
| 30% 负荷 | 1.97×10^{-8} | 2 805 |

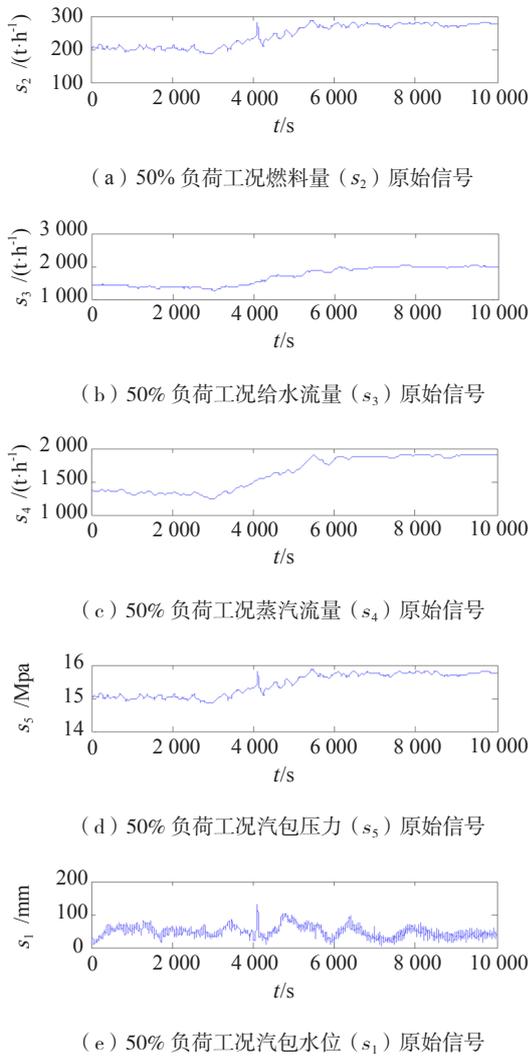


图 4 50% 负荷工况原始信号

Fig. 4 50% Load condition original signal original

真实水位变化由物质不平衡引起，利用式(1)计算得到汽包真实水位变化如图 5 所示。

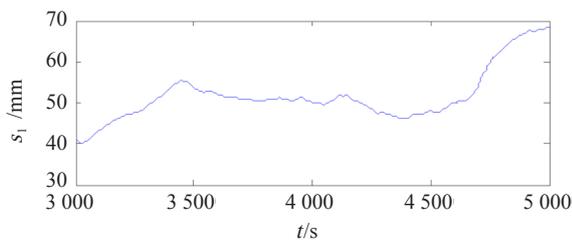


图 5 真实水位信号

Fig. 5 Real water level signal

从实际水位信号中剔除真实水位，剩余虚假水位 (s_1) 如图 6 所示。

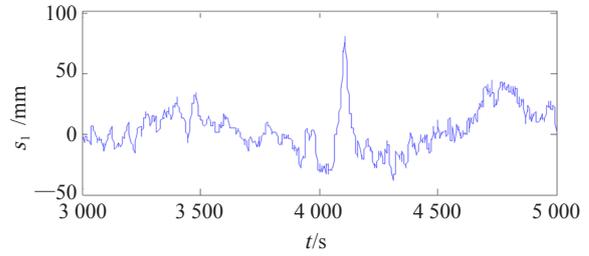


图 6 虚假水位信号

Fig. 6 False water level signal

对虚假水位信号做针对性数据分析。经过采用不同类型小波基进行实验对比分析发现，采用 sym2 小波基对本组数据进行分析效果最好。本文首先利用 sym2 小波基对原始数据进行五层小波变换，计算在不同尺度上燃料量、汽包压力、给水流量与蒸汽流量差值和虚假水位的相关性。其相关系数如表 1 所示。

结果如表 2 所示，第一列为原始数据相关系数计算，可以发现燃料量、汽包压力等信号的原始数据与虚假水位信号的相关系数的绝对值最大为 0.17，相关性较低。对比第一列和第二列的数据可看出小波分解得到的低频序列反映原始数据的概貌，故其相关系数类似，第一层高频分量相关系数很小，这是因为信号在采集和传输时，噪声及其它因素会对其产生影响，可在建模中滤去这些分量。

表 2 50% 负荷工况各尺度下相关系数

Tab. 2 Correlation coefficient at various scales of 50% load condition

| 编号 | s | a_5 | d_1 | d_2 | d_3 | d_4 | d_5 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2 | -0.11 | -0.12 | 0.01 | 0.42 | 0.76 | 0.46 | 0.19 |
| 3 | -0.17 | -0.2 | -0.02 | -0.15 | -0.07 | 0.13 | 0.15 |
| 4 | -0.15 | -0.17 | 0.01 | 0.05 | 0.11 | 0.14 | 0.13 |
| 5 | -0.16 | -0.17 | 0.03 | -0.37 | -0.79 | -0.31 | -0.25 |

观察给水流量和蒸汽流量与虚假水位信号经小波分解后各层分量的相关系数，发现给水流量和蒸汽流量的各层分量与虚假水位信号各层分量相关系数较小，均低于 0.2。同时观察其各层分量波动情况也发现给水流量和蒸汽流量的各层分量与虚假水位信号的各层分量波动基本无关。说明通过机理建模剔除真实水位，对虚假水位做针对性分析，有效剔除了给水流量，蒸汽流量对虚假水位信号波动的影响，增强了燃料量和汽包压力与虚假水位信号的相关性。

燃料量和汽包压力与虚假水位信号经小波分解后在第二层, 第三层和第四层高频分量相关系数较大, 其中在第三层高频分量相关系数最大, 说明在 0.062 5 Hz 至 0.125 Hz 频段燃料量和汽包压力与虚假水位信号的相关性较强。燃料量, 汽包压力和虚假水位信号分解所得的第三层高频分量分别如图 7 和图 8 所示。

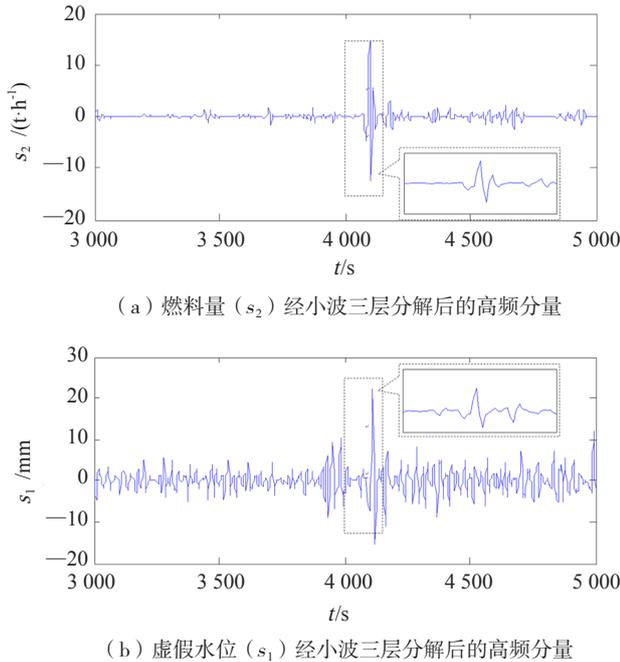


图 7 s_2 、 s_6 经小波三层分解后的高频分量

Fig. 7 High frequency components of s_2 and s_6 after wavelet three-layer decomposition

从图 7 可以看出利用 sym2 小波基在第三层分解尺度下, 对应 4 100 s 至 4 200 s 时刻燃料量与虚假水位的高频分量波动情况呈明显相关性。

从图 8 可以看出利用 sym2 小波基在第三层分解尺度下, 对应 4 100 s 至 4 200 s 时刻汽包压力与虚假水位的高频分量波动情况呈明显相关性。

在这一段时间燃料量出现快速扰动, 汽包压力随之快速变化, 造成波动幅度较大的虚假水位。在实际应用中可以通过判断这一尺度下燃料量和汽包压力的波动幅度来判别虚假水位是否产生及其波动幅度, 避免误操作。

另外选取机组额定负荷, 70% 负荷和 30% 负荷工况运行数据利用此方法进行数据分析, 得到其相关系数如表 3、表 4 和表 5 所示。

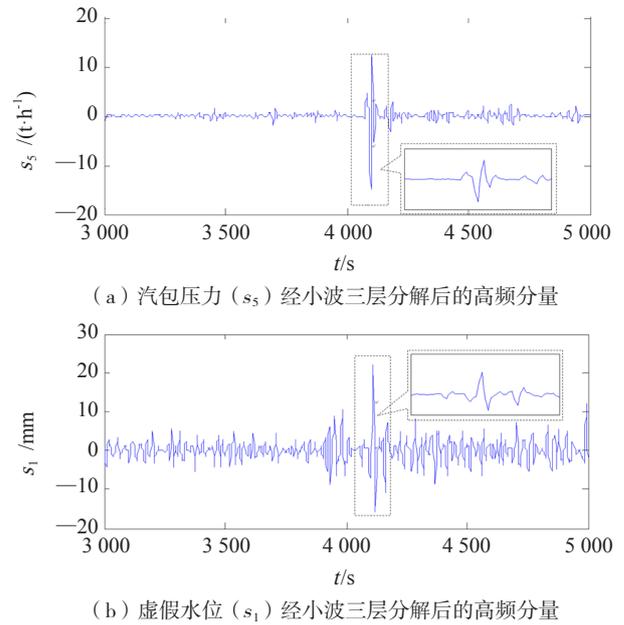


图 8 s_5 、 s_6 经小波三层分解后的高频分量

Fig. 8 High frequency components of s_5 and s_6 after wavelet three-layer decomposition

表 3 额定负荷工况各尺度下相关系数

Tab. 3 Correlation coefficient at various scales under rated load condition

| 编号 | s | α_5 | d_1 | d_2 | d_3 | d_4 | d_5 |
|----|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2 | -0.09 | -0.09 | 0.01 | 0.38 | 0.70 | 0.40 | 0.20 |
| 3 | -0.16 | -0.15 | -0.02 | -0.09 | -0.07 | 0.07 | 0.11 |
| 4 | -0.12 | -0.11 | 0.01 | 0.04 | 0.08 | 0.10 | 0.09 |
| 5 | -0.10 | -0.10 | 0.01 | -0.39 | -0.76 | -0.35 | -0.22 |

表 4 70% 负荷工况各尺度下相关系数

Tab. 4 Correlation coefficient at various scales of 70% load condition

| 编号 | s | α_5 | d_1 | d_2 | d_3 | d_4 | d_5 |
|----|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2 | -0.10 | -0.10 | 0.05 | 0.40 | 0.73 | 0.42 | 0.15 |
| 3 | -0.15 | -0.14 | -0.01 | -0.16 | -0.09 | 0.10 | 0.13 |
| 4 | -0.12 | -0.11 | 0.01 | 0.10 | 0.11 | 0.12 | 0.10 |
| 5 | -0.17 | -0.15 | 0.02 | -0.39 | -0.73 | -0.34 | -0.22 |

表 5 30% 负荷工况各尺度下相关系数

Tab. 5 Correlation coefficient at various scales of 30% load condition

| 编号 | s | α_5 | d_1 | d_2 | d_3 | d_4 | d_5 |
|----|-------|------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 2 | -0.12 | -0.14 | 0.12 | 0.45 | 0.79 | 0.47 | 0.23 |
| 3 | -0.18 | -0.2 | -0.03 | -0.17 | -0.11 | 0.14 | 0.19 |
| 4 | -0.17 | -0.16 | 0.03 | 0.05 | 0.14 | 0.16 | 0.17 |
| 5 | -0.19 | -0.17 | 0.09 | -0.47 | -0.78 | -0.41 | -0.28 |

根据表 3、表 4、表 5 中数据可以看出, 与表 2 所得结论一致, 在 0.0 625 Hz 至 0.125 Hz 频段燃料量和汽包压力与虚假水位信号的相关性较强。说

明此方法所得结论基本正确,适用于机组全部工况。深调峰工况下虚假水位现象严重,可以用此方法进行预测。

4 结论

1) 通过机理分析有效剔除真实水位的影响,消除给水流量,蒸汽流量对虚假水位信号波动的影响,增强燃料量和汽包压力与虚假水位信号的相关性。

2) 在 0.0 625 Hz 至 0.125 Hz 频段发现,燃料量和汽包压力分别与虚假水位信号波动明显相关。燃料量与虚假水位信号呈正相关性,汽包压力与虚假水位信号呈负相关性。实际操作中可以通过观测这一频段下燃料量和汽包压力的波动情况辅助判断虚假水位的产生及其波动幅度。

参考文献:

- [1] 刘鑫屏, 田亮, 刘吉臻. 锅炉汽包虚假水位特性研究 [J]. 中国电机工程学报, 2009, 29 (32): 1-5.
LIU X P, TIAN L, LIU J Z. Research on false water level characteristic of boiler drum [J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29 (32): 1-5.
- [2] 何钧, 曾德良, 陈彦桥. 锅炉汽包水位软测量模型研究 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2007, 34 (1): 41-43.
HE J, ZENG D L, CHEN Y Q. Soft-sensing model for drum level [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2007, 34 (1): 41-43.
- [3] 米梦龙, 吕玉坤. 锅炉汽包水位非稳态数学模型及水位控制策略的研究 [J]. 华北电力大学学报(自然科学版), 2009, 36 (2): 54-57.
MI M L, LV Y K. Study on unsteady state mathematical modeling of drum level and the method of level control [J]. Journal of North China Electric Power University (Natural Science Edition), 2009, 36 (2): 54-57.
- [4] ZHANG H, LU W, YANG J H, et al. Analysis model and application of time span numerical characteristics of the drum level [J]. International Journal of Digital Content Technology and Its Applications, 2012, 6 (18): 349-396.
- [5] 陈宇, 吴楠, 王志宇, 等. T-S 模糊模型在锅炉汽包水位建模中的应用 [J]. 自动化技术与应用, 2013, 32 (1): 111-113.
CHEN Y, WU N, WANG Z Y, et al. Application of T-S fuzzy model for boiler drum level modeling [J]. Techniques of Automation and Applications, 2013, 32 (1): 111-113.
- [6] 魏乐, 闫媛媛, 江效龙, 等. 锅炉汽包水位的系统动力学建模 [J]. 热力发电, 2016, 45 (1): 65-69.
WEI L, YAN Y Y, JIANG X L, et al. Modeling of drum water level in power plant based on system dynamics [J]. Thermal Power Generation, 2016, 45 (1): 65-69.
- [7] 田亮, 刘鑫屏, 刘吉臻. 汽包锅炉负荷-压力-水位简化非线性动态模型 [J]. 动力工程, 2009, 29 (10): 926-940.
TIAN L, LIU X P, LIU J Z. Simplified nonlinear dynamic model of load-pressure-water level for drum boiler [J]. Journal of Power Engineering, 2009, 29 (10): 926-940.
- [8] 张舒铠, 刘鑫屏. 一种非线性滤波器的设计 [J]. 广东电力, 2016, 29 (5): 11-14+41.
ZHANG S K, LIU X P. Design on one kind of nonlinear filter [J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29 (5): 11-14+41.
- [9] 白德龙, 刘鑫屏. 适应超低负荷运行的汽包水位滤波器 [J]. 热力发电, 2018, 47 (5): 131-135.
BAI D L, LIU X P. A filter of drum water level suitable for ultra-low load operation [J]. Thermal Power Generation, 2018, 47 (5): 131-135.
- [10] 陈翠琴, 田亮. 深度调峰工况下锅炉汽包虚假水位分析 [J]. 电力科学与工程, 2019, 35 (5): 48-53.
CHEN C Q, TIAN L. Analysis of false water level of drum boiler under deep peak regulation conditions [J]. Electric Power Science and Engineering, 2019, 35 (5): 48-53.
- [11] 郝祖龙, 刘吉臻, 常太华, 等. 基于小波变换的热工信号多尺度相关性分析 [J]. 中国电机工程学报, 2010, 30 (14): 109-114.
HAO Z L, LIU J Z, CHANG T H, et al. Analysis on multi-scale correlation of thermal signal based on wavelet transform [J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30 (14): 109-114.
- [12] 刘海喆, 田亮. 主汽压力控制品质与燃料量变化约束关系定量分析 [J]. 南方能源建设, 2018, 5 (3): 48-55.
LIU H Z, TIAN L. Quantitative analysis on the constraint relationship between the control quality of throttle pressure and the variation of fuel quantity [J]. Southern Energy Construction, 2018, 5 (3): 48-55.
- [13] 邓拓宇, 田亮, 刘吉臻. 供热机组锅炉储能与热网储能空间时间多尺度分析 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (2): 599-606.
DENG T Y, TIAN L, LIU J Z. Spatial and temporal multiscale analysis on energy storage in heat supply units' boiler and heat supply nets [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37 (2): 599-606.
- [14] 王桐, 田亮. 中速磨煤机临界堵塞状态识别方法 [J]. 热力发电, 2017, 46 (1): 17-24.
- [15] 洪雨楠, 刘鑫屏, 王桐. 基于多尺度滤波器的汽温控制前馈信号的选取 [J]. 电力科学与工程, 2016, 32 (8): 55-60.
- [16] 韩建伟. 电化学噪声技术的基本原理及其在腐蚀研究方面的应用 [J]. 南方能源建设, 2015, 2 (增刊1): 26-29.

作者简介:



刘暑辉

田亮

1976-, 男, 内蒙古磴口人, 博士, 华北电力大学副教授, 硕士生导师, 主要研究方向为热力发电过程建模、软测量及大机组智能优化控制。

刘暑辉 (通信作者)

1993-, 男, 河北沧州人, 在读硕士研究生, 主要从事发电系统建模、仿真与优化控制 (e-mail) 2028351795@qq.com。

(责任编辑 李辉)