

# 计及火电锅炉蓄热的互联系统频率暂态模型及解析分析

申家锴, 马世英, 谢 岩, 唐晓骏, 朱劭璇, 霍启迪

(中国电力科学研究院有限公司, 北京市 100192)

**摘要:** 高比例新能源接入电网挤占了火电机组的发电空间并带来了较强波动性,火电机组常处于深调状态且易受到扰动的侵扰,导致锅炉蓄热水平差,频率响应能力未达标称,威胁系统频率稳定性。文中针对火电机组蓄热动态变化的影响展开研究,基于直流潮流与经典锅炉模型,构建了计及锅炉蓄热动态的互联系统频率暂态分析模型;通过模型等值聚合、等效变换、解环与近似替代,降低了模型阶数;进一步,基于模型特点进行模态分解,推导两机等值模型的简单闭式解,并基于闭式解,分析了火电机组锅炉蓄热模型参数对互联系统频率暂态过程的影响。算例表明,所建模型与所提解析方法能够在频率暂态计算中准确计及锅炉蓄热对互联系统的影响,所得结果可为增强火电机组频率支撑能力提供参考。

**关键词:** 频率响应; 暂态分析模型; 频率稳定; 蓄热; 火电; 调峰; 解析分析; 互联系统

## 0 引言

随着“双碳”目标下新型电力系统的快速发展,新能源装机容量大幅提升<sup>[1]</sup>。在运行中,为保证新能源上网发电,传统火电机组的开机容量及发电功率被新能源发电挤占<sup>[2]</sup>,导致以常规火电机组为主体的有功扰动防御体系的抗扰能力下降,大功率扰动后的系统频率稳定问题突显<sup>[3-4]</sup>。随着新能源发电比例的不不断提升,系统功率波动增强,火电机组的发电空间将被极度压缩,高比例新能源与系统频率稳定之间的矛盾将愈发突出。

上述因素造成系统频率响应能力降低<sup>[5-6]</sup>,主要表现在3个方面:1)火电机组开机容量下降,新能源替代火电机组开机,系统可用调频资源减少,系统频率响应能力降低;2)火电机组发电功率水平降低,新能源发电功率替代火电机组发电功率,火电机组处于临界运行状态,机组频率响应能力减弱;3)火电机组受频繁扰动侵扰或处于滑压等工况下,机组调节能力耗尽,频率响应能力减弱。

关于火电机组开机容量下降导致的系统频率响应能力减弱的问题,目前已有较多研究<sup>[7]</sup>。文献[8]引入常规同步机发电系数反映发电比例的变化,通过解析推导频率暂态表达式指出:常规同步机发电

系数减小将削弱系统频率稳定性,制约新能源渗透率的提高。新能源参与调频可大幅缓解频率稳定压力,文献[9]建立了含新能源的频率聚合模型,解析分析了未来系统整体惯量和一次调频特性。受制于技术及市场因素,新能源调频仍未在实际运行中被大规模投运,系统频率稳定能力仍主要取决于火电机组。为了提升系统频率稳定能力,文献[10-11]通过在机组组合中构建含启停变量的频率安全约束,优化发电机开机容量,保证机组组合方案的频率安全。但上述研究未关注火电机组发电功率水平与工况对频率暂态特性的影响,火电机组发电空间压缩背景下对频率暂态描述不够准确,无法充分保证频率安全稳定运行的充裕性,可能引发系统失稳风险。

关于火电机组发电功率水平降低导致的机组频率响应能力减弱,目前虽然已逐渐被关注<sup>[12]</sup>,但机组功率水平与调频能力的关联关系仍不清晰,缺少必要的试验、模型与参数。关于火电机组受频繁扰动侵扰或处于滑压等工况造成的频率响应能力下降,目前已有认识<sup>[13]</sup>,但在建模分析等方面仍然缺乏深入的研究。准确描述系统频率暂态过程的关键在于计入造成频率响应能力降低的影响因素<sup>[14-16]</sup>。火电机组参与频率响应的本质均为锅炉蓄热与机电能的相互转化,故对于汽包锅炉或直流锅炉、背压运行或滑压运行、主汽阀调节或其他调节方式,计入火电机组锅炉蓄热的动态变化是准确描述其频率响应能力的关键之一。

频率暂态解析分析方法能够提供明确的机理关系及高效的计算方式,受到了广泛的关注。为了避

收稿日期: 2023-10-07; 修回日期: 2024-06-19。

上网日期: 2024-09-23。

国家自然科学基金联合基金资助项目(U22B20109); 中国电力科学研究院有限公司自筹基金项目(XT83-23-010)。

免高阶问题,传统频率暂态解析分析方法<sup>[17-18]</sup>忽略了网络结构与锅炉蓄热动态,无法计及上述因素影响。文献[19]基于系统频率响应(system frequency response, SFR)模型考虑了锅炉蓄热动态,提出了锅炉模型的线性化方法,推导了模型闭式解,但未考虑网络结构的影响。互联系统中,火电机组通常集中分布于送端区域,其调频能力降低将导致功频调节能力的大范围变化,影响系统潮流分布与频率暂态。为了计入网络结构,文献[20]基于SFR模型提出了考虑网络结构的互联电力系统频率暂态解析建模方法,推导了模型闭式解,但未考虑锅炉蓄热影响。考虑锅炉蓄热和网络结构会带来高阶耦合问题,其解析分析面临难题。

本文对此展开研究,聚焦蓄热动态对互联系统的影响,构建了计及蓄热动态的互联系统频率暂态分析模型,提出了基于模型降阶与两机等值模型的简单闭式解推导方法,分析了锅炉蓄热参数对互联系统频率暂态过程的影响,旨在为互联系统频率暂态过程的解耦描述提供解析证明,为频率暂态分析提供公式,为掌握新型电力系统背景下的系统频率安全稳定特性提供方法支撑。

## 1 计及蓄热动态的互联系统频率暂态过程

热是一个变化很慢的过程,当扰动发生后,在一次调频时间尺度内,无法通过增加燃料放热来增加输出功率,故额外输出的调频功率只能来源于机组里尚存的蓄热。蓄热动态变化引起一次调频降低的场景主要有:1)单次大频差扰动中,蓄热随火电机组调频动作而消耗,导致调频能力随时间下降;2)连续大频差扰动中,蓄热不能重新补足,蓄热条件下导致调频能力下降;3)在深度调峰、滑压运行等场景下,火电工况导致蓄热参数较差,调频能力降低。

结合文献[19,21]计及蓄热动态对互联系统频率暂态过程的影响,构建频率暂态分析模型框架,如附录A图A1所示。根据经典的扰动后功率分配三阶段理论,频率时空分布特征由惯量分布与初始功率分配的不匹配产生,随着调频动作引导机组按调差系数承担不平衡功率而平抑。因此,频率时空分布受初始功率分配与惯量分布的不匹配程度以及机组调节能力影响,则锅炉蓄热动态将通过影响机组调节能力而影响频率时空分布特征。

因此,调频能力降低场景对互联系统频率暂态过程的影响包括两个方面:一方面,锅炉蓄热动态引起的调频能力下降或持续下降,导致系统的频率最低点增大且准稳态频率难以维持;另一方面,锅炉蓄热状态变化导致系统潮流分布与调频能力变化,从而改变系统的频率时空分布特征。

考虑蓄热动态对互联系统频率暂态过程的影响,将功率分配理论扩展为4个阶段,如下所示:

阶段1:0+时刻,各发电机按照同步功率系数分担功率缺额,分担大小与功率缺额和同步功率系数成正比。

阶段2:汽轮机不能瞬时补足功率缺额,频率随转子释放动能而下降,初始下降速度与分担功率缺额成正比,与惯性时间常数成反比。

阶段3:由于各机组初始下降速度不同,频率不再一致,发电机之间产生功率振荡,引导功率缺额按照惯性比例分配,频率出现时空分布现象。

阶段4:调速器动作后,汽轮机增发功率,锅炉蓄热能量下降,功率缺额逐步按照调差系数分配,最终频率趋于统一,但频率稳态值不能恒定。

需要指出的是,根据系统电气联系强弱可知,当系统频率在阶段3实现统一时,锅炉蓄热将仅对互联系统的整体频率产生影响。否则,将同时对互联系统频率分布特征产生影响。

## 2 频率暂态模型建模

### 2.1 网络层面建模

为在系统建模中解析考虑锅炉蓄热影响,基于直流潮流描述网络结构。忽略无功功率-电压影响,扩展加入发电机暂态电抗,用恒定阻抗模型等效负荷节点,直流潮流网络扩展分析模型如图1所示。图中: $P_{g_i}$ 为与内电势虚拟节点 $g_i$ 相连发电机的发电功率; $P_{G_i}$ 为发电机母线节点 $G_i$ 处的注入功率,直流潮流中数值与 $P_{g_i}$ 相等; $\delta_{g_i}$ 为与内电势虚拟节点 $g_i$ 相连发电机的转子角; $P_{L_{d,i}}$ 为负荷节点 $L_{d,i}$ 处功率; $\theta_{G_i}$ 、 $\theta_{L_{d,i}}$ 分别为发电机母线节点 $G_i$ 、负荷节点 $L_{d,i}$ 处电压的相角; $X'_{d,1}$ 、 $X'_{d,2}$ 、 $\dots$ 、 $X'_{d,N}$ 为次暂态电抗,其中, $N$ 为发电机总数; $L$ 为负荷总数。

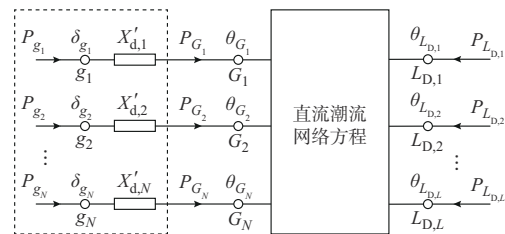


图1 直流潮流网络扩展分析模型

Fig. 1 Extended analysis model of DC power flow network

扩展直流潮流网络方程的表达式如下:

$$\begin{bmatrix} \Delta P_g \\ \Delta P_{S_{gl}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{g,g} & B_{g,S_{gl}} \\ B_{S_{gl},g} & B_{S_{gl},S_{gl}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_g \\ \Delta \theta_{S_{gl}} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: $P_g$ 为发电机节点注入功率 $P_{g_i}$ 组成的列向量;

$P_{\bar{S}_{GL}}$  为非发电机节点注入功率  $P_{\bar{S}_{GL},l}$  组成的列向量, 其中,  $\bar{S}_{GL}$  为发电机母线节点  $G_i$  和负荷节点  $L_{D,l}$  组成的非发电机节点集合;  $B_{g,g}, B_{g,\bar{S}_{GL}}, B_{\bar{S}_{GL},g}, B_{\bar{S}_{GL},\bar{S}_{GL}}$  为网络导纳矩阵中的分块矩阵;  $\delta_g$  为发电机转子角  $\delta_{g_i}$  组成的列向量;  $\theta_{\bar{S}_{GL}}$  为非发电机节点相角  $\theta_{\bar{S}_{GL},l}$  组成的列向量;  $\Delta$  表示对应变量的增量, 下同。

基于发电机具有惯性不能突变的特性, 对式(1)进行推导可得扰动后的非发电机节点相角变化为:

$$\Delta\theta_{\bar{S}_{GL}} = B_{\bar{S}_{GL},\bar{S}_{GL}}^{-1} (\Delta P_{\bar{S}_{GL}} - B_{\bar{S}_{GL},g} \Delta\delta_g) \quad (2)$$

将式(2)代入式(1)消去非发电机节点, 可得发电机的发电功率增量  $\Delta P_g$  的表达式:

$$\Delta P_g = B_S \Delta\delta_g + B_{\bar{S}_{GL}} \Delta P_{\bar{S}_{GL}} \quad (3)$$

式中:  $B_S$  为机间振荡矩阵;  $B_{\bar{S}_{GL}}$  为扰动功率分配矩阵。

$B_S$  和  $B_{\bar{S}_{GL}}$  的表达式如下:

$$\begin{cases} B_S = B_{g,g} - B_{g,\bar{S}_{GL}} B_{\bar{S}_{GL},\bar{S}_{GL}}^{-1} B_{\bar{S}_{GL},g} \\ B_{\bar{S}_{GL}} = B_{g,\bar{S}_{GL}} B_{\bar{S}_{GL},\bar{S}_{GL}}^{-1} \end{cases} \quad (4)$$

根据式(3)、式(4)可知, 发电机的电磁功率增量为机组的机间振荡和各机组分摊的负荷节点功率变化。其中,  $B_S$  包含发电机节点间的同步功率系数,  $B_{\bar{S}_{GL}}$  包含各负荷节点与各发电机节点间的功率分配系数。

## 2.2 机组层面建模

计入热动侧动态, 需要引入锅炉模块, 典型的锅炉模型具有复杂非线性<sup>[20-21]</sup>, 解析需进行合理简化。假定锅炉回水流量维持不变, 类比电路元件, 将锅炉模型抽象成电路形式, 得到频率响应时间尺度内锅炉蓄热动态的简化描述, 如图2所示。图中:  $\dot{m}_w$  为回水流率;  $\dot{m}_T$  为主蒸汽流率;  $\mu$  为阀门开度;  $C_D$ 、 $C_{SH}$  分别为汽包蓄热系数、过热器蓄热系数, 取值分别为 90~300 s 与 5~15 s, 二者相差较大。本文取  $C_D$  与  $C_{SH}$  之和为等效蓄热动态系数  $C_E$  来近似表征蓄热动态。

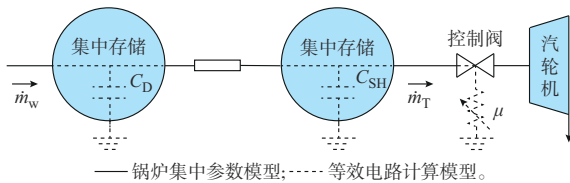


图2 汽包锅炉蓄热动态等效电路示意图

Fig. 2 Schematic diagram of equivalent circuit for heat storage dynamics of steam drum boiler

锅炉蓄热动态可以描述为:

$$C_E \frac{d\Delta P_T}{dt} = \dot{m}_w - \dot{m}_T \quad (5)$$

式中:  $P_T$  为主蒸汽压力。

假设突然扰动后, 回水流量保持不变, 则有:

$$\dot{m}_w = \dot{m}_{T,0} \quad (6)$$

式中:  $\dot{m}_{T,0}$  为  $\dot{m}_T$  的初始值。

主蒸汽流量与调速器阀门开度和主蒸汽压力的乘积呈比例关系, 具有非线性。为实现解析求解, 进行如下展开:

$$\dot{m}_T = \mu P_T \approx \mu_0 \Delta P_T + \Delta\mu \Delta P_{T,0} + \mu_0 P_{T,0} \quad (7)$$

式中:  $\mu_0$ 、 $P_{T,0}$  分别为  $\mu$  和  $P_T$  的初始值。

采用二阶发电机模型与低阶原动机-调速器模型描述转子动态, 忽略阻尼, 构建计入简化线性锅炉蓄热模型的低阶 SFR 模型转子运动方程:

$$\begin{cases} \Delta\delta_g s = 2\pi f_0 \Delta f = \omega_0 \Delta f \\ 2H \Delta f s = \Delta P_m + S_B S_N^{-1} \Delta P_d - S_B S_N^{-1} B_S \Delta\delta_g \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $s$  为拉普拉斯算子;  $f_0$  为系统额定频率;  $\Delta f$  为机组  $i$  的母线频率偏差  $\Delta f_i$  组成的列向量;  $\omega_0$  为额定发电机角频率;  $H$  为机组  $i$  的惯性时间常数  $H_i$  组成的对角阵;  $\Delta P_m$  为机组  $i$  的机械功率增量  $\Delta P_{m,i}$  组成的列向量;  $S_B$  为系统基准容量;  $S_N$  为机组  $i$  的额定容量  $S_{N,i}$  组成的对角阵;  $\Delta P_d$  为机组  $i$  的扰动功率增量  $\Delta P_{d,i}$  组成的列向量。

$\Delta P_d$  和  $\Delta P_m$  的具体表达式见式(9)。

$$\begin{cases} \Delta P_d = -B_{\bar{S}_{GL}} \Delta P_{\bar{S}_{GL},d} \\ \Delta P_m = -K_m R^{-1} (\mathbf{A} + F_H T_R s) (\mathbf{A} + T_R s)^{-1} \cdot \\ \Delta P_{T,0} C_E s (C_E s + \mu_0)^{-1} \Delta f \end{cases} \quad (9)$$

式中:  $\Delta P_{\bar{S}_{GL},d}$  为系统初始扰动功率  $\Delta P_{\bar{S}_{GL},d,l}$  组成的列向量;  $K_m$  为机组  $i$  的机械功率增益  $K_{m,i}$  (标么值换算系数) 组成的对角阵;  $R$  为机组  $i$  的调差系数  $R_i$  组成的对角阵;  $\mathbf{A}$  为单位对角矩阵;  $F_H$  为机组  $i$  的比例反馈系数  $F_{H,i}$  组成的对角阵;  $T_R$  为机组  $i$  的再热时间常数  $T_{R,i}$  组成的对角阵;  $C_E$  为机组  $i$  的等效蓄热动态系数  $C_{E,i}$  组成的对角阵;  $\mu_0$  为机组  $i$  的阀门开度的初始值  $\mu_{0,i}$  组成的对角阵;  $P_{T,0}$  为机组  $i$  的主蒸汽压力的初始值  $P_{T,0,i}$  组成的对角阵。

综上, 构建计及火电锅炉蓄热动态的互联系统频率暂态分析模型, 如图3所示。图中:  $B_{S,i,j}$  为  $B_S$  中第  $i$  行、第  $j$  列元素;  $B_{\bar{S}_{GL},l,k}$  为  $B_{\bar{S}_{GL}}$  中第  $l$  行、第  $k$  列元素;  $\Delta P_{L,i}$  为中/低压缸功率增量;  $\Delta P_{H,i}$  为高压缸功率增量。基于模型仿真, 可快速描述系统的动态频率响应过程。

## 3 模型简化与解析

### 3.1 模型等值聚合

实际电力系统网络连接了成百上千个发电机组与负荷, 故所建模型阶数较高, 一般不存在完美的解

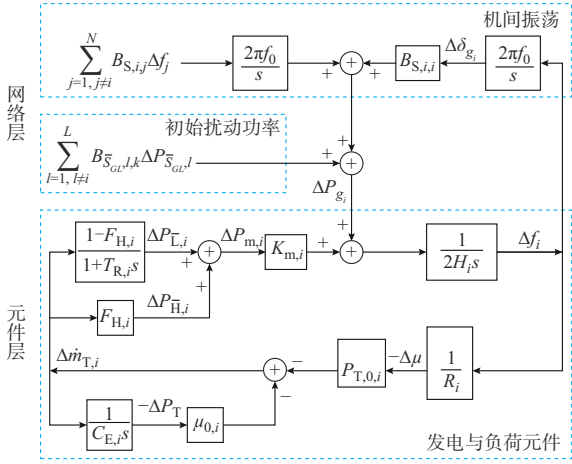


图3 计及火电锅炉蓄热动态的互联系统频率暂态分析模型  
Fig. 3 Frequency transient analysis model of interconnected system considering heat storage dynamics of thermal power boiler

析解。依据简化分析的常规做法,基于控制区与非控制区或扰动区与非扰动区的划分,可将系统划分为两机等值形式以降低解析难度。假设系统可被划为 $V_1^A$ 、 $V_2^A$ 两个区域系统,将每个区域等值为一个机组,则可获得考虑锅炉蓄热动态的两机等值频率响应模型(two-machine equivalent frequency response model considering boiler heat storage dynamics, TEFR-BD)。模型参数可由各区发电机聚合,具体如下。

定义 $X=\{H, R^{-1}\}$ , $Y=\{F_H, T_R, K_m, C_E, \mu_0, P_{T,0}\}$ 为多机模型参数; $X'$ 、 $Y'$ 为两机等值模型参数,则第 $k$ 个区域的两机等值模型参数 $X'_k$ 、 $Y'_k$ 的计算关系如下:

$$\begin{cases} X'_k = \sum_{i \in V_k^A} \frac{X_i S_{N,i}}{S_B} \\ Y'_k = \sum_{i \in V_k^A} \lambda_i^{TM} Y_i \end{cases} \quad (10)$$

式中: $k=1, 2$ ;  $X_i$ 、 $Y_i$ 分别为 $X$ 、 $Y$ 中的第 $i$ 个元素; $V_k^A$ 为第 $k$ 个区域的机组集合; $\lambda_i^{TM}$ 为机组 $i$ 的参数对等值系统参数的影响因子,其计算表达式见式(11)。

$$\lambda_i^{TM} = \frac{R_i^{-1}}{\sum_{i \in V_k^A} R_i^{-1}} \quad k=1, 2; i \in V_k^A \quad (11)$$

基于区域内部的统一频率描述,考虑区域间的相互影响,则网络参数可表示为:

$$B'_S = \begin{bmatrix} \sum_{i, \tau \in V_1^A} B_{S,i,\tau} & \sum_{i \in V_1^A, \tau \in V_2^A} B_{S,i,\tau} \\ \sum_{i \in V_2^A, \tau \in V_1^A} B_{S,i,\tau} & \sum_{i, \tau \in V_2^A} B_{S,i,\tau} \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$B'_{S_{gl,k,l}} = \sum_{i \in V_i^A} B_{S_{gl,i,l}} \quad k=1, 2; l=1, 2, \dots, N+L \quad (13)$$

$$W' = \begin{bmatrix} \omega' & -\omega' \\ -\omega' & \omega' \end{bmatrix} = \omega_0 B'_S \quad (14)$$

式中:上标“'”表示考虑区域间相互影响后对应的变量; $\omega'$ 为 $W'$ 中的元素。

通过上述等值聚合,TEFR-BD模型的数学方程可以表示为如下形式:

$$\begin{cases} \Delta \delta'_g s = \omega_0 \Delta f' \\ 2H' \Delta \delta'_g s^2 + W' \Delta \delta'_g = \omega_0 \Delta P'_m + \omega_0 \Delta P'_d \end{cases} \quad (15)$$

### 3.2 模型简化降阶

将式(9)代入式(15),可得关于功角的8阶方程组,见附录B式(B1)。对于该方程,采用常规的数学方法无法直接推得闭式解。根据TEFR-BD模型特点进行等效变换,可将机械功率反馈增量转化为比例反馈 $P'_p$ 、一阶惯性反馈 $P'_f$ 、二阶惯性反馈 $P'_s$ 这3个部分,见附录B式(B2)。经验证,保留 $P'_p$ ,而在 $P'_f$ 、 $P'_s$ 的频率反馈处解环,采用系统频率 $\Delta f_{sys}$ 组成的列向量 $\Delta f_{sys}$ 替代 $\Delta f$ ,所得 $P'_p$ 、 $P'_s$ 具有极高精度。据此,将 $P'_p$ 移至等号左侧,式(15)可改写为:

$$\begin{cases} \Delta \delta'_g s = \omega_0 \Delta f' \\ 2H' \Delta \delta'_g s^2 + K_m F_H \Delta P_{T,0} R^{-1} \Delta \delta'_g s + W' \Delta \delta'_g = \omega_0 \hat{P}'_f + \omega_0 \hat{P}'_s + \omega_0 \Delta P'_d \end{cases} \quad (16)$$

式中: $\hat{P}'_f$ 、 $\hat{P}'_s$ 分别为近似的一阶惯性反馈、二阶惯性反馈,具体表达式见式(17)。

$$\begin{cases} \hat{P}'_f = K'_m F'_H \mu'_0 \Delta P'_{T,0} (R')^{-1} (C'_E s + \mu'_0)^{-1} \Delta f_{sys} \\ \hat{P}'_s = -K'_m \Delta P'_{T,0} R'^{-1} C'_E s (\Lambda - F'_H) (\Lambda + T'_R s)^{-1} \cdot (C'_E s + \mu'_0)^{-1} \Delta f_{sys} \end{cases} \quad (17)$$

经过上述简化降解,方程可由8阶降为4阶。

### 3.3 模型解析求解

由式(16)可以看出,该4阶方程为典型的含有黏性阻尼的二阶二自由度强迫振动方程,可采用振动理论中的模态叠加法求解,求解步骤见附录C式(C1)~式(C9)。由求解结果可知,该式可转换为由模态坐标 $y_1$ 与 $y_2$ 表示的形式,见附录C式(C10)和式(C11)。由于模态坐标表达式均为线性方程,可根据叠加定理依次求解 $y_1(t)$ 与 $y_2(t)$ ,并按式(18)求得各等值机组的频率变化的时域表达式。

$$\begin{cases} \Delta f'_1(t) = y_1(t) - 2H'_2 y_2(t) \\ \Delta f'_2(t) = y_1(t) + 2H'_1 y_2(t) \end{cases} \quad (18)$$

求解附录C式(C10)和式(C11)有多种简化方式,闭式解亦可有多种表达。根据可被简化的元素,

为了便于分析,定义 $\chi_{C12}$ 、 $\chi_{C21}$ 分别为模态阻尼矩阵中的 $C_{12}$ 、 $C_{21}$ 忽略项, $\chi_F$ 、 $\chi_S$ 为等式右侧的激励项,即

$$\begin{cases} \chi_{C12} = -(2H_1' D_{eq,2}' - 2H_2' D_{eq,1}') \dot{y}_2(t) \\ \chi_{C21} = -(2H_1' D_{eq,1}' - 2H_2' D_{eq,2}') \dot{y}_1(t) \\ \chi_F = \omega_0 (2H_1' \hat{P}_{F,2}(t) - 2H_2' \hat{P}_{F,1}(t)) \\ \chi_S = \omega_0 (2H_1' \hat{P}_{S,2}(t) - 2H_2' \hat{P}_{S,1}(t)) \end{cases} \quad (19)$$

式中: $D_{eq,1}'$ 、 $D_{eq,2}'$ 为等效阻尼 $D_{eq}'$ 的元素; $\hat{P}_{F,1}(t)$ 、 $\hat{P}_{F,2}(t)$ 为 $\hat{P}_F(t)$ 的元素; $\hat{P}_{S,1}(t)$ 、 $\hat{P}_{S,2}(t)$ 为 $\hat{P}_S(t)$ 的元素。

当对求解精度要求极高且希望全面保留变化细节时,可仅忽略 $\chi_{C12}$ 项实现模态方程解耦,此时结果较为复杂,适合用于锅炉蓄热对系统频率暂态影响的解析分析研究;当希望获得简洁的解析结果时,可同时忽略式(19),此时适合快速的分析和计算。给出简洁的闭式解结果,如下所示:

$$\begin{cases} \Delta f_1'(t) = \frac{P_{step}}{2H_s C_{E,s} T_{R,s}} [K_1 + K_2 t + K_3 \rho e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_r t + \phi)] - 2H_2' \beta' e^{\zeta' \omega_n' t} \sin(\omega_r' t) \\ \Delta f_2'(t) = \frac{P_{step}}{2H_s C_{E,s} T_{R,s}} [K_1 + K_2 t + K_3 \rho e^{-\zeta \omega_n t} \sin(\omega_r t + \phi)] + 2H_1' \beta' e^{-\zeta' \omega_n' t} \sin(\omega_r' t) \end{cases} \quad (20)$$

式中: $P_{step}$ 为系统扰动功率;下标s表示系统的整体参量,各参量的具体表达式见式(21)~式(23)。

$$\begin{cases} K_1 = K_3 = \frac{1}{\omega_n^2} \left( C_{E,s} + \mu_0 T_{R,s} - 2 \frac{\mu_{0,s} \zeta}{\omega_n} \right) \\ K_2 = \frac{1}{\omega_n^2} \mu_{0,s} \\ \omega_n^2 = \frac{\Delta P_{T,0,s} C_{E,s} + 2H_s R_s \mu_{0,s}}{2H_s R_s C_{E,s} T_{R,s}} \\ \zeta = \frac{2H_s R_s C_{E,s} + 2H_s R_s \mu_{0,s} T_{R,s} + \Delta P_{T,0,s} C_{E,s} F_{H,s} T_{R,s}}{2(\Delta P_{T,0,s} C_{E,s} + 2H_s R_s \mu_{0,s})} \omega_n \\ \rho = \frac{1}{\omega_r} \sqrt{\omega_n^2 - 2\zeta \omega_n \frac{K_4}{K_3} + \left( \frac{K_4}{K_3} \right)^2} \\ \omega_r = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2} \\ \phi = \arctan \left( \frac{K_3 \omega_r}{K_4 - K_3 \zeta \omega_n} \right) \\ K_4 = \frac{2\zeta \omega_n (C_{E,s} + \mu_0 T_{R,s}) + \mu_{0,s} (1 - 4\zeta^2) - C_{E,s} T_{R,s} \omega_n^2}{\omega_n^2} \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \beta' = \frac{2H_1' \Delta P_{d,2}' - 2H_2' \Delta P_{d,1}'}{2H_1' H_2' \omega_n' (2H_1' + 2H_2')} \\ \omega_n' = \sqrt{\frac{\omega_r'}{2H_1'} + \frac{\omega_r'}{2H_2'}} \\ \omega_r' = \omega_n' \sqrt{1 - (\zeta')^2} \\ \zeta' = \frac{4(H_1')^2 D_{eq,2}' + 4(H_2')^2 D_{eq,1}'}{2\omega_n' (2H_1' + 2H_2')} \omega_n' \end{cases} \quad (23)$$

## 4 算例验证与分析

为验证所得解析模型的准确性,解析分析火电锅炉蓄热对互联系统频率暂态的影响,基于IEEE 2区4机系统,设置两个算例:算例1验证解析方法的准确性和稳定性;算例2分析火电锅炉蓄热对互联系统频率暂态的影响。

IEEE 2区4机模型结构如附录D图D1所示,数据来源于文献[17,20-21]。仿真模型通过Simulink平台搭建,解析模型采用MATLAB语言编写。假设在频率响应过程中,各机组均未达到出力上限。

### 4.1 误差分析

假设1s时区域1的7号母线发生负荷突增,造成200 MW功率缺额(占系统容量的11%)。以非线性锅炉蓄热动态模型为基准,对比分析动态频率响应(dynamic primary frequency response, DPFR)模型<sup>[17]</sup>、两机等值频率响应(two-machine equivalent frequency response, TEFR)模型<sup>[18]</sup>、TEFR-BD模型仿真曲线。区域1的惯性中心频率如图4(a)所示。可以看出,DPFR模型、TEFR-BD模型曲线频率的准稳态值不能恒定,说明随着蓄热的释放,系统调节能力逐步减小;TEFR模型、TEFR-BD模型的频率具有时空分布特征,但TEFR模型无法反映蓄热变化影响,稳态值偏高。综上,TEFR-BD模型可全面反映频率变化,具有最好的模拟效果。

以TEFR-BD仿真模型为基准,验证解析结果及简化忽略的正确性。设置5个对比方案,分别为忽略 $\chi_{C12}$ ,在忽略 $\chi_{C12}$ 的基础上忽略 $\chi_{C21}$ 、忽略 $\chi_F$ 、忽略 $\chi_S$ 以及忽略全部扰动项。各解析方案与基准曲线的对比结果如图4(b)所示。可以看出,忽略假设会导致解析精度的降低,所有方案产生的误差不大,与基准模型相比,所得解析闭式解均具有极高模拟效果。这说明一般情况下,可采用忽略所有简化因素的闭式解来描述频率暂态过程,该闭式解简洁对称、便于使用。结合式(20)可知,频率振荡主要由扰动功率产生。

为了更好地验证所建仿真模型及解析推导结果误差的稳定性,在模型参数取值范围内随机抽取

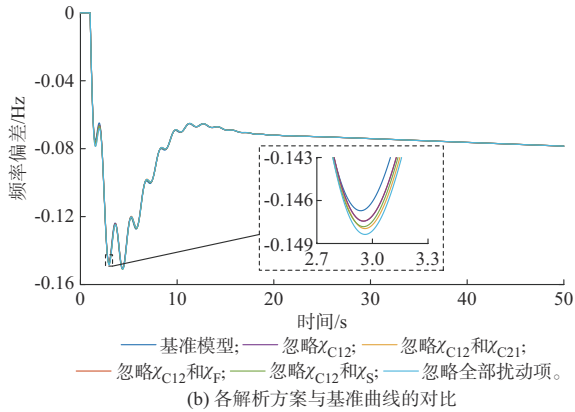
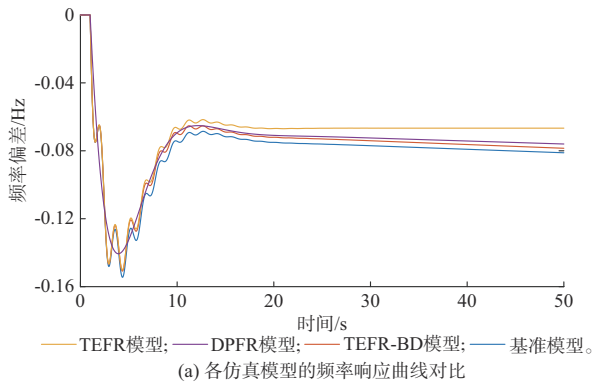


图4 频率响应曲线的对比

Fig. 4 Comparison of frequency response curves

100组参数组合,计算仿真与解析结果的频率误差最大值,分别绘制散点图,如图5所示。

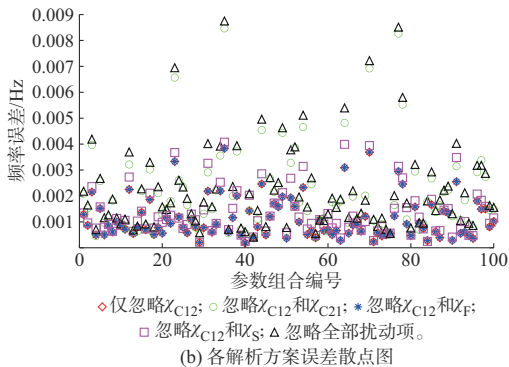
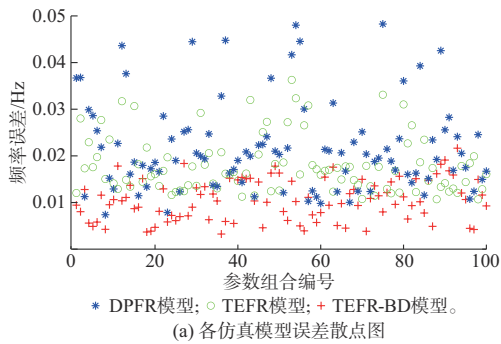


图5 各方案误差散点图

Fig. 5 Error scatter plot of each scheme

由图5(a)可以看出,DPFR、TEFR、TEFR-BD模型依次具有更高的精度以及更窄的带宽。其中,TEFR-BD模型可同时提升精度与误差带宽近50%,具有较好的精度与误差稳定性。由图5(b)可以看出,忽略 $\chi_{C12}$ 和 $\chi_F$ 、忽略 $\chi_{C12}$ 和 $\chi_S$ 、忽略 $\chi_{C12}$ 、忽略 $\chi_{C12}$ 和 $\chi_{C21}$ 以及忽略全部扰动项产生的误差依次增加,但误差水平均较低,说明解析结果具有稳定性。

#### 4.2 影响分析

根据简化锅炉蓄热动态模型可知,影响系统频率暂态过程的参量有3个,分别为 $C_E$ 、 $\mu_0$ 、 $P_{T,0}$ 。本节基于同样的扰动,通过在一定范围内等间距变化区域1中参量的取值进行灵敏度分析。为使解析分析结果更准确,保留除 $\chi_{C12}$ 外的所有因素,分析结果如图6所示。

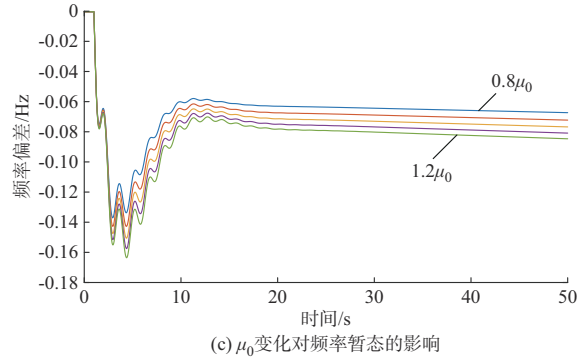
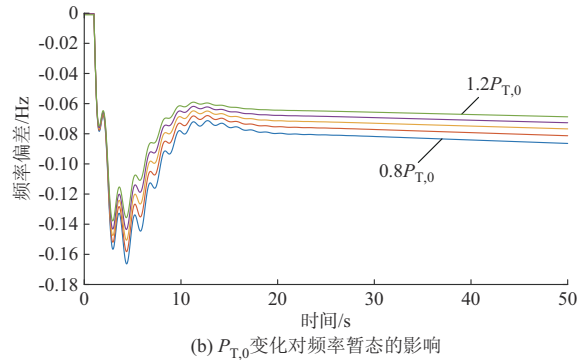
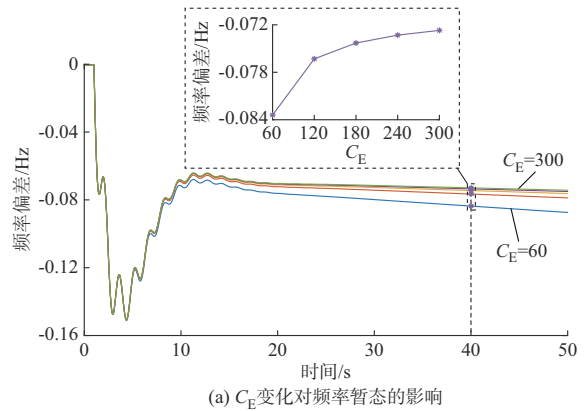


图6 参数对频率暂态的影响

Fig. 6 Effects of parameters on frequency transients

由图6(a)可以看出,系统频率响应能力随着等效蓄热系数 $C_E$ 的减小而降低,其中, $C_E$ 减小对频率最低点的影响较小,对准稳态值的影响较大。绘制40 s时 $C_E$ 与频率偏差的关系如图6(a)所示,可以看出准稳态值的下降速度随 $C_E$ 的减小而加快,呈现非线性关系。因此,维持一定的 $C_E$ 水平至关重要,当 $C_E$ 减小到一定程度时,频率调节能力将会呈现非线性的急速下降。

由图6(b)可以看出, $P_{T,0}$ 对频率最低点、准稳态值以及频率振荡均有影响,随着 $P_{T,0}$ 的增加,系统具有更强的调频能力,频率最低点及准稳态值均有较大幅度的提升,系统频率振荡有所减弱。由图6(c)可以看出, $\mu_0$ 同样对频率最低点、准稳态值以及频率振荡有影响,随着 $\mu_0$ 的减小,频率最低点及准稳态值均大幅增大,频率振荡有所减弱。 $\mu_0$ 与 $P_{T,0}$ 的乘积即为扰动前的发电机初始功率,故当功率一定时,可通过增大主蒸汽压力、减小阀门开度来提升运行火电机组的频率支撑能力。

为更好地体现参数变化对频率振荡的影响,以 $P_{T,0}$ 为例,绘制频率与惯性中心的偏差,如图7所示。可以看出在首摆之后,参数变化对频率振荡的影响更加显著,在频率最低点附近有着较大的影响。频率振荡与 $P_{T,0}$ 正相关, $\mu_0$ 与 $P_{T,0}$ 趋势相反,频率振荡与 $\mu_0$ 负相关。

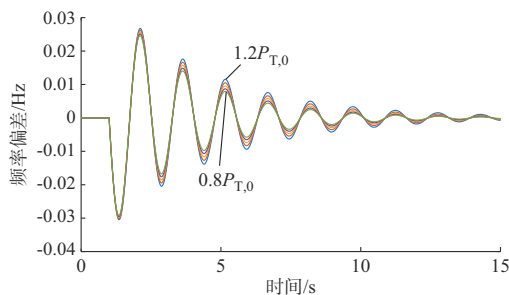


图7  $P_{T,0}$ 对频率振荡的影响  
Fig. 7 Effect of  $P_{T,0}$  on frequency oscillation

## 5 结语

本文针对高比例新能源电力系统,聚焦互联电力系统中火电机组发电空间压缩条件下锅炉蓄热变化对系统频率暂态的影响,建立了计及锅炉蓄热动态的互联系统频率暂态分析模型,提出了模型解析求解方法并推导了模型闭式解。所得结论如下:

1)所建模型能够描述互联系统中火电机组锅炉蓄热动态变化对频率暂态过程的影响,所提解析求解方法能够推得模型的简单闭式解,拓展了复杂场景下的频率暂态解析分析方法。

2)解析结果表明,计及锅炉蓄热动态后,系统频率振荡仍然主要由扰动功率带来的强迫输入引起,互联系统频率暂态过程可用系统惯性中心与频率振荡的叠加来描述。

3)影响分析表明, $C_E$ 和 $P_{T,0}$ 与机组频率调节能力成正比, $\mu_0$ 与频率调节能力成反比,维持一定的 $C_E$ 水平,增大主蒸汽压力并减小阀门开度可提升运行火电机组的频率支撑能力。此外, $P_{T,0}$ 与 $\mu_0$ 可对频率时空分布有显著影响。

下一步工作将围绕火电机组运行功率与调频能力的映射关系,考虑新能源影响的频率暂态解析模型和等值分析方法在3机及更多机系统中的应用,以及在广域网机组运行方式安排等方面展开进一步研究。

审稿过程中的有关讨论见附录E。

附录见本刊网络版(<http://www.aeps-info.com/aeps/ch/index.aspx>),扫英文摘要后二维码可以阅读网络全文。

## 参考文献

- [1] 卓振宇,张宁,谢小荣,等.高比例可再生能源电力系统关键技术及发展挑战[J].电力系统自动化,2021,45(9):171-191.  
ZHUO Zhenyu, ZHANG Ning, XIE Xiaorong, et al. Key technologies and developing challenges of power system with high proportion of renewable energy [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(9): 171-191.
- [2] 张程铭,柳璐,程浩忠,等.考虑频率安全的电力系统规划与运行优化研究综述与展望[J].电网技术,2022,46(1):250-264.  
ZHANG Chengming, LIU Lu, CHENG Haozhong, et al. Review and prospects of planning and operation optimization for electrical power systems considering frequency security [J]. Power System Technology, 2022, 46(1): 250-264.
- [3] 韩泽雷,鞠平,秦川,等.面向新型电力系统的频率安全研究综述与展望[J].电力自动化设备,2023,43(9):112-124.  
HAN Zelei, JU Ping, QIN Chuan, et al. Review and prospect of research on frequency security of new power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2023, 43(9): 112-124.
- [4] 刘家豪,王程,毕天姝.面向新能源电力系统频率时空动态的节点等效惯量指标及其应用[J/OL].中国电机工程学报:1-16 [2023-10-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220831.1105.004.html>.  
LIU Jiahao, WANG Cheng, BI Tianshu. Node equivalent inertia index for temporal-spatial frequency dynamics of renewable energy power system and its applications [J]. Proceedings of the CSEE: 1-16 [2023-10-07]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20220831.1105.004.html>.
- [5] 刘克天,王晓茹.电厂锅炉及辅机对电力系统动态频率影响的仿真研究[J].电力系统保护与控制,2014,42(13):53-58.

- LIU Ketian, WANG Xiaoru. Simulation study of influences of power plant's boiler and auxiliaries on power system dynamic frequency[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(13): 53-58.
- [6] 于国强,刘克天,胡尊民,等.火电机组参与深度调峰对电网频率特性的影响研究[J].可再生能源,2021,39(8):1124-1129.  
YU Guoqiang, LIU Ketian, HU Zunmin, et al. Study on the influence of thermal power units participating in deep peak load regulation on grid frequency characteristics [J]. Renewable Energy Resources, 2021, 39(8): 1124-1129.
- [7] 刘映尚,马骞,王子强,等.新型电力系统电量平衡调度问题的思考[J].中国电机工程学报,2023,43(5):1694-1705.  
LIU Yingshang, MA Qian, WANG Ziqiang, et al. Cogitation on power and electricity balance dispatching in new power system [J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(5): 1694-1705.
- [8] 张剑云,李明节.新能源高渗透的电力系统频率特性分析[J].中国电机工程学报,2020,40(11):3498-3506.  
ZHANG Jianyun, LI Mingjie. Analysis of the frequency characteristic of the power systems highly penetrated by new energy generation[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(11): 3498-3506.
- [9] 龚浩岳,周勤勇,郭强,等.高比例新能源接入场景电力系统频率分析模型改进与应用[J].电网技术,2021,45(12):4603-4611.  
GONG Haoyue, ZHOU Qinyong, GUO Qiang, et al. Improvement and application of frequency analysis modules for power system in high proportion of renewable energy situation [J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4603-4611.
- [10] 申家锴,刘洋,李卫东,等.考虑频率与区间接联功率安全约束的两区互联电力系统机组组合[J].电力自动化设备,2022,42(11):167-175.  
SHEN Jiakai, LIU Yang, LI Weidong, et al. Unit commitment considering safety constraints of frequency and inter-areal tie-line power in two-area interconnected power system [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(11): 167-175.
- [11] 蔡国伟,钟超,吴刚,等.考虑风电机组超速减载与惯量控制的电力系统机组组合策略[J].电力系统自动化,2021,45(16):134-142.  
CAI Guowei, ZHONG Chao, WU Gang, et al. Unit commitment strategy of power system considering overspeed load reduction and inertia control of wind turbine [J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(16): 134-142.
- [12] 郭亦文,刘茜,刘畅,等.火电机组深度调峰一次调频优化控制策略[J].热力发电,2018,47(11):135-139.  
GUO Yiwen, LIU Qian, LIU Chang, et al. Control strategy optimization for primary frequency regulation in depth peak load cycling of thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(11): 135-139.
- [13] 盛锴,邹鑫,邱靖,等.火电机组一次调频功率响应特性精细化建模[J].中国电力,2021,54(6):111-118.  
SHENG Kai, ZOU Xin, QIU Jing, et al. Refined modeling for power response characteristic of thermal power unit under primary frequency control [J]. Electric Power, 2021, 54(6): 111-118.
- [14] 爻建军,崔晓波,罗凯明,等.基于多模型预测控制的火电机组深度调峰一次调频控制策略[J].锅炉技术,2020,51(6):12-17.  
SHU Jianjun, CUI Xiaobo, LUO Kaiming, et al. Primary frequency modulation control strategy in deep peak load cycling state for thermal power units based on multi-model predictive control[J]. Boiler Technology, 2020, 51(6): 12-17.
- [15] CAO Y J, ZHANG H X, ZHANG Y, et al. Extending SFR model to incorporate the influence of thermal states on primary frequency response [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(19): 4069-4078.
- [16] RABBANIFAR P, AMJADY N. Frequency-constrained unit-commitment using analytical solutions for system frequency responses considering generator contingencies [J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2020, 14(17): 3548-3560.
- [17] LIU L, LI W D, SHEN J K, et al. Probabilistic assessment of  $\beta$  for thermal unit using point estimate method adopted to a low-order primary frequency response model [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 1931-1941.
- [18] SHEN J K, LI W D, LIU L, et al. Frequency response model and its closed-form solution of two-machine equivalent power system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(3): 2162-2173.
- [19] 沈硕,刘尧,李晓萌,等.基于简化导纳矩阵的快速频率响应分析方法[J].高电压技术,2018,44(10):3284-3290.  
SHEN Shuo, LIU Rao, LI Xiaomeng, et al. Fast frequency response analysis based on reduced admittance matrix [J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(10): 3284-3290.
- [20] Dynamic models for fossil fueled steam units in power system studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(2): 753-761.
- [21] ALI NAGHIZADEH R, VAHIDI B, BANK TAVAKOLI M R. Estimating the parameters of dynamic model of drum type boilers using heat balance data as an educational procedure [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(2): 775-782.

申家锴(1991—),男,通信作者,博士,工程师,主要研究方向:电力系统频率稳定分析与控制。E-mail: shenjiakai@epri.sgcc.com.cn

马世英(1969—),男,博士,教授级高级工程师,博士生导师,主要研究方向:电力系统分析与控制、电力系统仿真技术、交直流系统分析、源网协调技术等。E-mail:msy1969@163.com

谢岩(1990—),男,博士研究生,高级工程师,主要研究方向:电力系统分析与控制。E-mail:xieyan@epri.sgcc.com.cn

(编辑 鲁尔姣)



## Frequency Transient Model and Analytical Analysis of Interconnected System Considering Heat Storage of Thermal Power Boiler

*SHEN Jiakai, MA Shiyong, XIE Yan, TANG Xiaojun, ZHU Shaoxuan, HUO Qidi*  
(China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China)

**Abstract:** The high proportion of renewable energy has affected the generation of thermal units and brought strong volatility. Thermal units are often at deep regulation state and are susceptible to disturbances, resulting in poor boiler heat storage levels and insufficient frequency response capabilities, posing a threat to system frequency stability. This paper focuses on the impact of dynamic changes in heat storage of thermal power units. Based on DC power flow and classical boiler models, a transient analysis model for the frequency of interconnected systems considering heat storage dynamics of boilers is constructed. By means of model equivalence aggregation, equivalent transformation, solution loop and approximate substitution, the order of the model has been reduced. Furthermore, based on the characteristics of the model, modal decomposition is carried out to derive a simple closed-form solution to the two-machine equivalent model. Based on the closed-form solution, the impact of the parameters on the heat storage model of the thermal power boiler on the transient frequency process of the interconnected system is analyzed. The calculation example shows that the established model and the proposed analytical method can accurately take into account the impact of heat storage of boiler on interconnected systems in frequency transient calculations, and the results can provide references for enhancing the frequency support capability of thermal power units.

This work is supported by Joint Fund of National Natural Science Foundation of China (No. U22B20109) and Self-funded Project of China Electric Power Research Institute (No. XT83-23-010).

**Key words:** frequency response; transient analysis model; frequency stability; heat storage ; thermal power; peak shaving; analytic analysis; interconnection system

