

基于 Dymola 平台的超超临界二次再热机组切除 高压加热器动态仿真

庞力平,梁其缘,梁惠勋,段立强

(华北电力大学 能源动力与机械工程学院,北京 102206)

摘 要:为了分析某 660 MW 超超临界二次再热燃煤机组快速响应动态特性,基于 Modelica/Dymola 平台建立了高精度二次再热机组动态仿真模型。为了验证模型的可靠性和精确性,将仿真结果与不同负荷下设计数据进行比较发现,模型在不同负荷下的静态误差均在 $\pm 5\%$ 以内。针对目前灵活性运行对电网负荷快速响应要求,模拟机组在分别切除 4 个高压加热器后负荷的瞬态响应特性,并具体分析了切除 1 号高压加热器对汽轮机抽汽以及锅炉主要受热面烟气侧与蒸汽侧动态特性的影响,获得了切除高压加热器后汽轮机抽汽变化动态过程和发电功率快速响应情况,以及锅炉烟气侧与蒸汽侧的参数变化动态过程。模拟结果表明:切除 4 个高压加热器均可以有效增加机组瞬时电负荷,分别可以达到 29.8,15.6,8 和 6 MW,快速发电功率增加持续时间达到 1 100,100,130 和 250 s,说明切除高压加热器可以改善二次再热燃煤机组对电网自动发电控制(AGC)的快速响应特性。

关 键 词:超超临界燃煤机组;Modelica/Dymola;建模与仿真;切除高加;动态特性

中图分类号:TK123

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2023.01.015

[引用本文格式]庞力平,梁其缘,梁惠勋,等.基于 Dymola 平台的超超临界二次再热机组切除高压加热器动态仿真[J].热能动力工程,2023,38(1):120-128. PANG Li-ping, LIANG Qi-yuan, LIANG Hui-xun, et al. Dynamic simulation of ultra-supercritical double reheat unit based on dymola platform after HP feedwater heater bypass[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2023, 38(1):120-128.

Dynamic Simulation of Ultra-supercritical Double Reheat Unit based on Dymola Platform after HP Feedwater Heater Bypass

PANG Li-ping, LIANG Qi-yuan, LIANG Hui-xun, DUAN Li-qiang

(School of Energy, Power and Mechanical Engineering, North China Electric Power University, Beijing China, Post Code:102206)

Abstract: In order to analyze the rapid response dynamic characteristics of a 660 MW ultra-supercritical double reheat coal-fired unit, a high-precision double reheat unit dynamic simulation model was established based on Modelica/Dymola platform. In order to verify the reliability and accuracy of the simulating model, the static simulating results were compared with the design data under different working loads. It was found that the static error of the simulating model under different working loads was within $\pm 5\%$. Under the requirements of the flexible operation for the rapid response of the power grid currently, the transient response characteristics of the power unit loads after the bypass of four high-pressure (HP) heaters were simulated, and the influence of the bypass at No. 1 high-pressure heater on the dynamic characteristics of the steam turbine extraction and the flue gas and steam sides of the main heating surfaces of the boiler was analyzed in detail. The dynamic process of the steam turbine extraction change and the rapid response situation of the power generation after the bypass of four high-pressure heaters as well as the dynamic process of parameter changes on the flue gas and steam sides of the boiler were obtained respectively. The simulation results show that the bypass of four high-pressure heaters can effectively in-

收稿日期:2022-06-17; 修订日期:2022-10-30

基金项目:国家自然科学基金创新群体项目(51821004)

Fund-supported Project: Science Fund for Creative Research Groups of the National Natural Science Foundation of China(51821004)

作者简介:庞力平(1968-),男,华北电力大学教授。

crease the instantaneous power load of the unit to 29.8 MW,15.6 MW,8 MW and 6 MW respectively, and the duration of rapid power generation increment can reach 1 100 s,100 s,130 s and 250 s,indicating that the bypass of four high-pressure heaters can improve the rapid response characteristics of double re-heat coal-fired units to automatic generation control(AGC) requirement from power grid.

Key words: ultra-supercritical coal-fired unit,Modelica/Dymola platform,modeling and simulation,HP feedwater heater bypass,dynamic characteristics

引言

由于可再生能源的间歇性和不稳定性,当大规模可再生能源接入电网时,需要火电机组,尤其是煤电机组参与调峰和调频,这些方面均涉及动态特性模拟和仿真问题。

目前,关于电厂灵活性的研究已经在各大高校和研究院深入开展。陈晓利等人^[1]针对东北地区用电热矛盾,以该地区的某热电厂为例,利用 Ebsilon 软件基于高低压旁路、低压缸切除和高低压旁路供热+抽汽供热等技术对机组的深度调峰手段进行了对比分析。李桓宇^[2]针对某超临界一次再热 660 MW 电厂仿真计算了高压加热器(以下简称“高加”)旁路的负荷响应特性。孙玥^[3]对二次再热机组的结构进行分析并建立了高加旁路的静态模型,计算了机组不同运行工况下高加旁路给水后对汽轮机抽汽的影响和机组的升负荷能力,并对系统的经济性进行了评估。

研究动力设备动态特性普遍使用 Matlab/simulink 软件和各种专用软件,例如 ASPEN PLUS 和 APROS 等^[4-7],本文采用 Modelica/Dymola 软件来模拟机组的动态特性。该软件的特点是把常规电站、风能、太阳能、储能、燃料电池、储能电池和电网模拟应用于 Modelica 软件平台,这样可再生资源和常规能源的机组动态特性均可基于一个平台进行模拟,为今后源网荷储等不同尺度系统耦合仿真和模拟奠定基础。

Dymola 是首个应用 Modelica 语言的商用软件,该软件可以进行多领域建模仿真、3D 动画仿真、非因果建模等。笪凌云^[8]搭建了一个 600 MW 的超临界机组模型,在 Dymola 平台上研究机组中主要参数的动态响应特性。杨东勃^[9]基于国电泰州机组,利用 Dymola/Modelica 平台建立以汽轮机侧设备为主的仿真模型进行动态仿真。目前 Modelica/Dymola 软件在航空、汽车和制冷等领域取得了一系列重要

的进展^[10-12]。

本文针对国内某 660 MW 超超临界二次再热机组搭建了高精度全电厂系统的动态仿真模型,在验证动态模型的准确性后,针对电站高加切除提高机组负荷响应特性为研究对象,分析切除高加后机组锅炉和汽轮机侧各部件的动态相应特性,Dymola 动态仿真系统为锅炉灵活性改造和控制策略提升提供了有效手段。

1 机组概况和建模

1.1 机组概况

研究对象为某 660 MW 超超临界二次再热机组,锅炉为上海锅炉厂生产的超超临界变压直流锅炉,型号为 SG-1903/32.45-M6101,汽轮机型号为 N660-31/600/620/620。汽轮机回热系统采用“4 高 5 低 1 除氧”的 10 级抽汽加热布置,2 号和 4 号高加抽汽侧布置了外置式蒸汽冷却器,提高机组的循环热效率的同时减少抽汽的过热度。各级加热器均采用疏水自流方式,逐级流入除氧器和凝汽器,机组的汽轮机排汽压力 0.004 65 MPa。二次再热机组系统如图 1 所示。

机组燃用的煤种为高挥发分的烟煤,其着火和燃尽特性均较好。设计煤种如表 1 所示。

表 1 设计煤种煤质分析
Tab.1 Ultimate analysis on designed coal

参数	数值
收到基全水分 $M_{ar}/\%$	11.90
收到基灰分 $A_{ar}/\%$	28.25
收到基碳 $C_{ar}/\%$	47.40
收到基氢 $H_{ar}/\%$	3.24
收到基氧 $O_{ar}/\%$	7.21
收到基氮 $N_{ar}/\%$	0.80
收到基全硫 $S_{t,ar}/\%$	1.20
变形温度 DT/ $^{\circ}\text{C}$	1,100
软化温度 ST/ $^{\circ}\text{C}$	1,140
流化温度 FT/ $^{\circ}\text{C}$	1,220
收到基低位发热量 $Q_{net,var}/\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$	18,443

模型可以模拟燃煤机组的全面热力系统,使用约 3 万个方程和未知量,涉及的热力参数超过了实际热控系统监测的模拟量,可以为机组提供全负荷下热力参数和内部参数的动态变化情况。这些数据有助于运行和热工人员理解整个热力系统的内部动态变化特征,将这些参数传输到专用的数据库中,可以与实际运行数据进行比较和分析。

1.3 机组动态模型的可靠性验证

为了验证机组动态模拟的可靠性,依据动态过

程模型通用的处理方法,将该二次再热机组模拟出的稳态数据和机组设计工况下的稳态数据作比较。选择 75% THA 和 100% THA 负荷下模型的仿真数据与机组热力系统设计稳态参数进行对比,具体对比结果如表 2 和表 3 所示。由表 2 和表 3 可知,模型在整个模拟过程中,无论是在 100% THA 还是 75% THA 负荷下,设计值与模拟值的误差都是在 5% 以内,均满足工程实际要求。

表 2 二次再热机组 100% THA 和 75% THA 负荷下锅炉模拟与设计参数对比

Tab.2 Comparison of boiler simulation and design parameters under 100% THA and 75% THA of the double reheat unit

参数	100% THA			75% THA		
	设计值	模拟值	误差/%	设计值	模拟值	误差/%
省煤器进口压/MPa	35.34	35.57	0.65	26.02	25.18	-3.23
省煤器进口温度/℃	324	320.3	-1.14	303	303.5	0.17
主蒸汽压力/MPa	32.14	32.51	1.15	23.72	22.82	-3.79
主蒸汽温度/℃	605	605.5	0.08	605	607.2	0.36
主蒸汽流量/kg·s ⁻¹	470.6	470	-0.12	338.9	339	0.03
一次再热机组进口压力/MPa	10.31	10.57	2.52	7.62	7.24	-4.99
一次再热机组进口温度/℃	418	417.8	-0.05	423	418.9	-0.97
一次再热机组蒸汽流量/kg·s ⁻¹	415.6	418.3	0.66	305.3	306.4	0.37
一次再热机组出口压力/MPa	10.11	10.11	0.00	7.47	7.19	-3.75
一次再热机组出口温度/℃	623	619.5	-0.56	623	616.3	-1.08
二次再热机组进口压力/MPa	3.24	3.3	1.85	2.41	2.35	-2.49
二次再热机组进口温度/℃	444	445.8	0.41	447	446.1	-0.20
二次再热机组蒸汽流量/kg·s ⁻¹	359.7	363.3	1.00	268	271	1.12
二次再热机组出口压力/MPa	3	3.06	2.00	2.22	2.21	-0.45
二次再热机组出口温度/℃	623	625.5	0.40	623	614.4	-1.38
排烟温度/℃	118	116.7	-1.10	111	108.8	-1.98
发电量/MW	660	666.6	1.00	495	490	-1.01

表 3 二次再热机组 100% THA 和 75% THA 负荷下汽轮机模拟与设计参数对比

Tab.3 Comparison of steam turbine simulation and design parameters under 100% THA and 75% THA of the double reheat unit

参数	100% THA			75% THA		
	设计值	模拟值	误差/%	设计值	模拟值	误差/%
1 号加热器出口水温/℃	314.7	312	-0.86	293.4	292	-0.48
2 号加热器出口水温/℃	272.6	269.8	-1.03	254.3	250.4	-1.53
3 号加热器出口水温/℃	238.8	233.5	-2.22	223.1	222.9	-0.09
4 号加热器出口水温/℃	209.5	206.3	-1.53	195.9	196	0.05
除氧器出口水温/℃	183.3	183.3	0.00	172.9	175.7	1.62
6 号加热器出口水温/℃	161.6	159.5	-1.30	151.5	149.8	-1.12
7 号加热器出口水温/℃	138.8	136.2	-1.87	130	124.7	-4.08
8 号加热器出口水温/℃	105.6	104.7	-0.85	98.2	95.4	-2.85
9 号加热器出口水温/℃	70.97	70.7	-0.38	65.2	63	-3.37
10 号加热器出口水温/℃	53.06	53	-0.11	48.9	46.5	-4.91

2 动态特性分析

2.1 发电量变化的动态过程

燃煤机组运行的过程中,调峰方式有节流、附加阀、给水旁路、凝结水节流和增加燃煤量等。切除高加可以短时间提高机组负荷响应,是有效提高燃煤机组自动发电控制(AGC)响应特性的一种方式。切除高加主要是针对某一级的高加抽汽,将其阀门关闭,不允许该级抽汽进入到回热加热器中加热给水,从而使进入汽轮机做功的蒸汽量短期增加,汽轮机的发电量增加,满足调峰的要求。

在稳定运行 100% THA 负荷下,分别切除 1~4 号高加,分析切除不同高加时的机组汽轮机侧和锅炉侧主要部件的动态响应特性。分析发现,正常运行的汽轮机功率为 666.5 MW,在切除 1 号高加时,负荷的增量最大,为 29.8 MW,往后负荷增量依次递减,分别是 15.6、8 和 6 MW。切除 1 号高加调峰的能力几乎为其余 3 个高加切除负荷增加之和。造成这种情况主要是因为 1 号高加的抽汽流量大,此部分减少了的抽汽转而去汽轮机里做功,比其他高加抽汽去汽轮机做功能力强。

图 3 为切除 1~4 号高加后机组负荷输出的瞬态过程。表 4 为切除 1~4 号高加后负荷瞬态特性。结合图 3 和表 4 可以看出,在切除不同高加时,机组达到最大负荷增量的瞬时动态特性不同,与负荷增量恰恰相反,切除 4 号高加达到负荷最大增量的时间最短,在 10 s 左右;切除 1 号高加达到最高负荷用时最长,在 65 s 左右,但负荷增幅最大。同时,还可以看到,切除 2~4 号高加时负荷增加的持续时间较短,不能满足较长时间的调峰的要求。而切除 1 号高加时负荷增量的时间可以达到 1 100 s 左右。在此期间,可以采取其他措施来保证机组负荷的持续增加,避免切除高压加热器后随着运行时间的增加负荷降低。这是因为在切除高加后给水温度降低,给水的平均吸热温度降低,从而使机组的循环热效率降低,发电量下降。

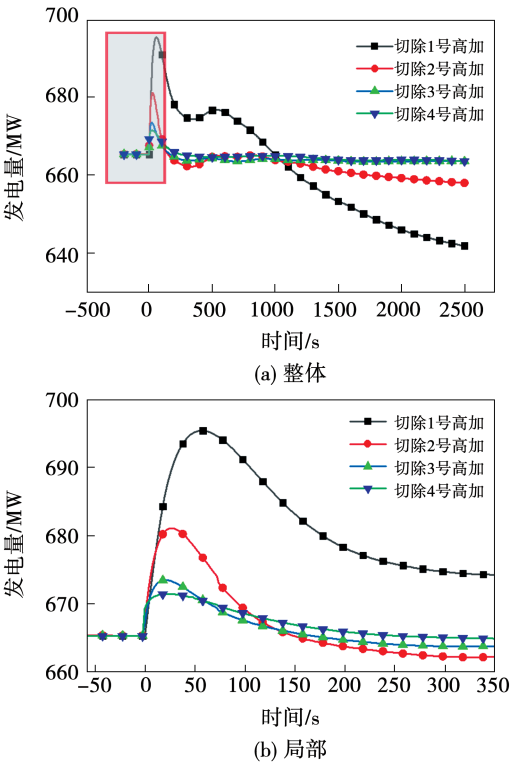


图 3 分别切除 1~4 号高加抽汽后发电量的动态特性
Fig. 3 Dynamic characteristics of power generation after the bypass of No. 1 to No. 4 high pressure heater extraction steam respectively

表 4 切除 1~4 号高加后负荷瞬态特性

Tab.4 Transient characteristics of load after the bypass of No. 1 to No. 4 high pressure heaters

方法	负荷峰值大致	负荷增量大致
	对应时间/s	持续时间/s
切除 1 号高加抽汽	65	1 100
切除 2 号高加抽汽	25	100
切除 3 号高加抽汽	20	130
切除 4 号高加抽汽	10	250

2.2 1 号高加抽汽切除对各级给水加热器的动态影响

以在 100% THA 负荷下切除 1 号高加为例,说明高加切除时汽机侧和锅炉侧的主要部件的动态特性。

图 4 给出了切除高加时各给水回热加热器抽汽流量的动态特性。从图 4 可以看出,在 1 号高加切除后,其抽汽流量从 51 kg/s 左右瞬间变为零,而剩

余加热器和除氧器抽汽流量都有不同程度的增加。因为在切除了 1 号高加后,给水的温度会有大幅度下降,为了避免给水温度降低过多给机组带来危险,并降低机组的热效率,其余加热器会增加抽汽量来抑制给水温度的降低。

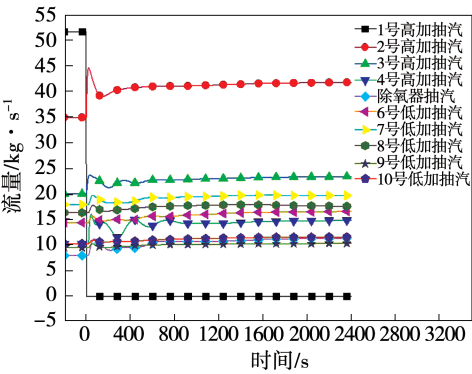


图 4 高加抽汽切除时各给水回热加热器抽汽流量的动态特性

Fig.4 Dynamic characteristics of extraction steam flow of each feed water regenerative heater after the bypass of high pressure heater extraction steam

图 5 给出了切除 1 号高加后各给水加热器抽汽压力的动态变化过程图。在切除 1 号高加后,此时没有抽汽流经 1 号高压给水加热器,加热器的抽汽压力迅速下降,而其他给水加热器和除氧器的抽汽压力都有不同程度的增加。因为,切除 1 号高压加热器导致进入后续汽轮机的蒸汽流量增加了,使得后续抽汽的压力随之升高。

2.3 1 号高加抽汽切除对流经锅炉侧的汽水动态影响

高加切除研究建立在 100% THA 负荷下稳定运行时,所以在分析高加切除对汽水侧的影响时,取 1 号高加出口给水、高温过热器出口蒸汽(以下简称主蒸汽)、一次高温再热器热段出口蒸汽(以下简称一再出口蒸汽)和二次高温再热器热段出口蒸汽(以下简称二再出口蒸汽)作为代表,主要研究了高加出口给水、主蒸汽、一再出口蒸汽和二再出口蒸汽的流量和温度的动态变化。

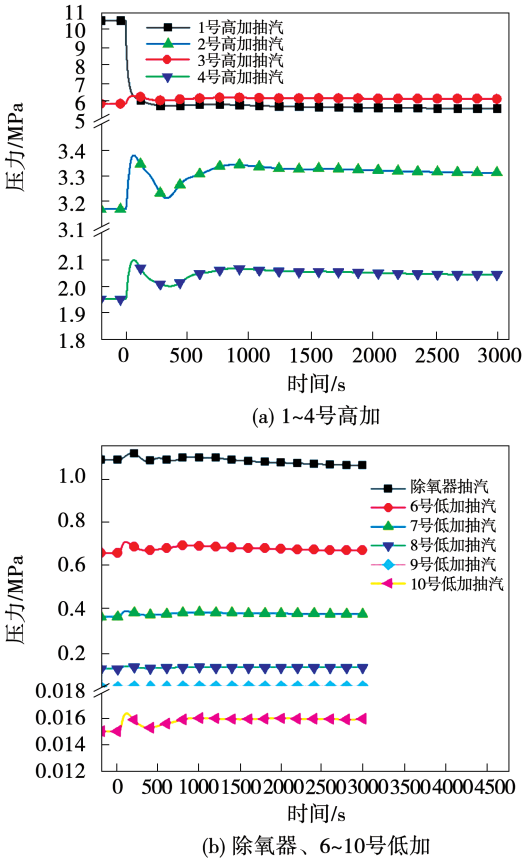


图 5 切除高加、除氧器和低加时抽汽压力的动态特性

Fig.5 Dynamic characteristics of extraction steam pressure of each feed water regenerative heater after the bypass of high pressure heater, deaerator and low pressure heater

图 6 为 1 号高加切除时,汽水侧流量的具体动态特性。由图 6 可知,在切除 1 号高加抽汽时,高加出口给水的流量先降低后增加,因为切除了 1 号高加抽汽会导致进入除氧器的疏水量降低,即使后续 3 个高加的抽汽量增加,也不能弥补 1 号高加减少的抽汽量造成的给水流量下降。但随着运行时间的增加,切除的抽汽做功后经冷凝器逐级流到高加出口,整个循环的水量不会发生变化,回到了未切除高加之前的状态。

对于主蒸汽,给水由高加出口经过省煤器、水冷壁等诸多受热面到达高温过热器后加热变成主蒸汽进入超高压缸做功,主蒸汽先减少再增加。同时,时间的滞后性比高加出口给水明显,因此达到最后稳

定状态的时间很长,但最终稳定值等于高加出口给水的稳定值。从主蒸汽与高加出口给水两个峰值之间的时间差也可以推算出给水从高加出口经各受热面变成主蒸汽的大致时间。

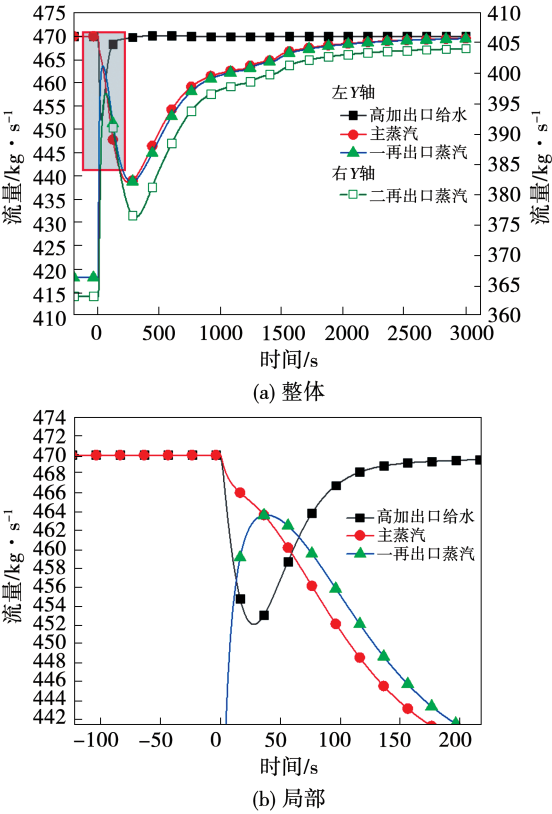


图 6 1 号高加抽汽切除时汽水流量的动态特性

Fig. 6 Dynamic characteristics of steamwater flow after the bypass of No. 1 high pressure heater extraction steam

对于一再出口蒸汽,未切除 1 号高加时,一部分超高压缸出口蒸汽被用于加热 1 号高加的给水,剩余部分经管道导回到锅炉形成一再出口蒸汽。在切除 1 号高加后,主蒸汽在超高压缸做功后全部返回到锅炉中,所以一再出口蒸汽先升高,随后与主蒸汽的变化趋势保持一致。

对于二再出口蒸汽,由图 1 可知,一再出口蒸汽在 3 号高压缸做完功后,一部分加热 3 号高加,剩余部分回到锅炉里形成二再出口蒸汽。切除 1 号高加对二再出口蒸汽的影响源于 2 号和 3 号高加抽汽流量数值的增加,因此二再出口蒸汽流量要小于一再出口蒸汽,但是整体变化趋势保持一致。

图 7 为 1 号高加切除时汽水温度的动态特性。从图中可以看到,在 1 号高加切除后给水温度开始下降,最后高加出口给水温度保持稳定。这是由于切除 1 号高加后,虽然后续各级给水加热器的抽汽流量都有一定程度的增加,但是仍然不能弥补 1 号高加切除带来的影响,缺少一级给水回热器加热,温度自然下降。

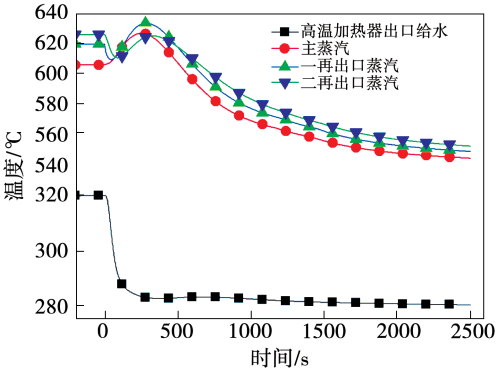


图 7 1 号高加抽汽切除时汽水温度的动态特性

Fig. 7 Dynamic characteristics of steam water temperature after the bypass of No. 1 high pressure heater extraction steam

切除 1 号高加后,流量从高加出口到高温过热器的变化趋势是先减少后增加,逐步达到未切除时的稳定值。因此,主蒸汽的温度是先升高然后降低,最后逐步达到稳定值。且因为给水温度的降低,最终的稳定值小于未切除高加时的主蒸汽温度。

一再出口蒸汽流量先增加后减少,最后又增加达到稳定值。同时,一再出口蒸汽的温度受到主蒸汽温度变化的影响先减少后增加,再减少,最终达到稳定值。

由于二再出口蒸汽温度变化趋势与一再出口蒸汽流量相同,同时又受到主蒸汽和一再出口蒸汽温度的影响,所以最终其变化趋势与一再出口蒸汽温度基本相同。虽然主蒸汽温度、一再出口蒸汽温度和二再出口蒸汽温度的变化趋势大致相同,但是主蒸汽温度最先变化,一再出口蒸汽温度次之,二再出口蒸汽温度最晚,这也符合蒸汽的流动顺序。

2.4 烟气侧主要受热面的瞬态特性

1 号高加抽汽切除后,高温过热器、一次高温再热器热段、二次高温再热器热段和省煤器出口烟气的动态特性如图 8 所示。由图 8 可知,高温过热器出口烟气温度先上升,大约在切除高加 300 s 左右达到峰值后开始下降,最终达到稳定值。主要原因是:在高加切除后给水温度逐渐下降,使整个锅炉受热面的吸热量增加。同时,主蒸汽流量先减少后增加的时间与烟气温度先增加后减少的时间基本一致。在流量和温度的共同作用下,高温过热器出口烟气温度的变化呈现先增大后减小的趋势。

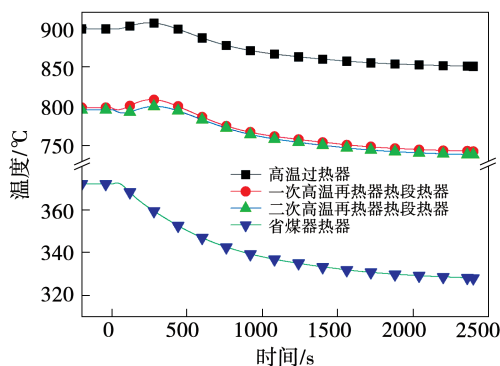


图 8 1 号高加抽汽切除时主要烟气受热面的动态特性

Fig.8 Dynamic characteristics of main flue gas heating surface after the bypass of No.1 high pressure heater extraction steam

对于一次高温再热器热段、二次高温再热器热段出口烟气,由于二者蒸汽流量和烟气温度变化趋势基本一致,因此只解释其中一个。由于一再出口蒸汽的流量先增加后减少,最后再增加,直到达到稳定,所以一再出口烟气侧的温度先下降后增加,再减少,直到达到稳定值。

省煤器出口烟气的温度是先稍微的上升,然后逐渐下降,最终达到稳定值。原因是高温过热器出口烟气温度在开始阶段上升,但一次高温再热器和二次高温再热器出口烟气温度下降,造成下游的省煤器出口烟温在开始阶段略微上升。后期给水流量增加、给水温度继续下降,随后省煤器前各级受热面

烟气温度逐渐下降,省煤器出口烟气温度也逐渐下降,最终达到稳定值。

3 结 论

针对 660 MW 超超临界二次再热机组利用 Dymola 软件进行了动态建模仿真,搭建了超超临界二次再热机组全范围高精度仿真模型,在验证机组动态模型准确性后,对机组在 100% THA 负荷下切除 4 个高加的动态特性进行了研究,得出结论如下:

(1) 利用 Dymola 平台建立的复杂动态过程仿真模型可以用于高精度建模的动态仿真过程,动态仿真的精度满足工程要求,动态仿真结果具有广泛的应用前景,为各种电站机组动态过程模拟提供了可以交互应用和修改的模型,适合熟悉电站动态过程模拟的专业人员应用;

(2) 电站机组切除 4 个高加后的动态过程表明,切除高加可以有效提高机组发电负荷的瞬时响应特性,在切除 1 号高加时,发电增量最大,持续的时间最长,有利于调整燃煤机组调频和调峰响应;

(3) 高加切除也会对汽轮机侧、锅炉侧(烟气侧和汽水侧)主要部件造成不同程度的影响,最终的仿真结果与静态的仿真相对应,该方面的研究为燃煤机组今后的灵活性调控、控制参数及控制策略的制定提供了定量数据。

参考文献:

[1] 陈晓利,高继录,郑 飞,等. 多种深度调峰模式对火电机组性能影响分析[J]. 热能动力工程,2020,35(12):26-30.

CHEN Xiao-li,GAO Ji-lu,ZHENG Fei,et al. Comparative analysis of various deep peak regulation modes for thermal power units[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35(12):26-30.

[2] 李桓宇. 660 MW 机组回热系统负荷响应特性静态分析[D]. 杭州:浙江大学,2018.

LI Huan-yu. Static analysis of load response characteristics of 660 MW unit regenerative system[D]. Hongzhou:Zhejiang University,2018.

[3] 孙 玥. 二次再热机组高加给水旁路节流建模及控制策略研究[D]. 北京:华北电力大学,2019.

SUN Yue. Modeling and control strategy research of feedwater by-pass throttling for high pressure heater of double reheat unit[D]. Beijing:North China Electric Power University,2019.

[4] 周 丹. 火电厂热力系统经济性诊断的逻辑矩阵算法研究.[D]. 济南:山东大学,2008.

ZHOU Dan. Research on logic matrix algorithm for economic diagnosis of thermal system in thermal power plant[D]. Jinan; Shandong University,2008.

[5] 卢绪祥,李录平,胡念苏. 汽轮机组回热系统故障诊断知识的模糊处理及诊断研究[J]. 热能动力工程,2003,18(1):1-4.

LU Xu-xiang, LI Lu-ping, HU Nian-su. Study on fuzzy processing and diagnosis of fault diagnosis knowledge of steam turbine regenerative system[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power,2003,18(1):1-4.

[6] JANKY F, FABLE E, TREUTTERER W, et al. Simulation of burn control for DEMO using ASTRA coupled with Simulink[J]. Fusion Engineering and Design,2017,123(7/8):555-558.

[7] ZHAO Yong-liang, WANG Chao-yang, LIU Ming, et al. Improving operational flexibility by regulating extraction steam of high-pressure heaters on a 660 MW supercritical coal-fired power plant: a dynamic simulation[J]. Applied Energy,2018,212:1295-1309.

[8] 笪凌云. 超临界机组 Modelica 建模与多模型预测控制方法研究[D]. 南京:东南大学,2015.

DA Ling-yun. Research on Modelica modeling and multi model predictive control method for supercritical units [D]. Nanjing: Southeast University,2015.

[9] 杨东勃. 基于 Modelica/Dymola 的汽轮机系统建模与仿真[D]. 北京:华北电力大学,2010.

YANG Dong-bo. Modeling and simulation of steam turbine system based on Modelica/Dymola [D]. Beijing: North China Electric Power University,2010.

[10] 代定强,蔡 景,黄 艳. 基于 Modelica 仿真的 RAT 作动筒故障原因分析[J]. 南京航空航天大学学报,2021,53(1):136-141.

DAI Ding-qiang, CAI Jing, HUANG Yan. Cause analysis of RAT actuator failure based on Modelica simulation[J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2021, 53(1):136-141.

[11] 朱 涛. 基于 Dymola 的电动车热管理系统模块化建模与集成仿真[D]. 长春:吉林大学,2017.

ZHU Tao. Modularized modeling and integrated simulation of thermal management systems of electric vehicles based on Dymola [D]. Changchun: Jilin University,2017.

[12] SCHWEIGER G, LARSSON P O, MAGNUSSON F, et al. District heating and cooling systems-framework for Modelica-based simulation and dynamic optimization [J]. Energy, 2017, 137:566-578.

(刘 颖 编辑)