

DOI: 10.19666/j.rlfed.202210223

供热储能和深度调峰工况下火电机组 旁路供热自动控制策略研究与应用

邢智炜^{1,2}, 康静秋^{1,2}, 刘磊^{1,2}, 杨振勇^{1,2}, 尤默^{1,2}

(1. 国网冀北电力有限公司电力科学研究院, 北京 100045;

2. 华北电力科学研究院有限责任公司, 北京 100045)

[摘要] 针对旁路供热改造后机组运行过程中存在控制难点, 提出旁路供热工况下完整控制策略, 实现供热工况下的旁路自动控制, 同时满足机组供热调节的需求。针对供热工况下对旁路的投退及工况扰动对汽轮机运行稳定性的影响, 以及机组安全边界的改变, 提出一套包含旁路闭锁及超驰的逻辑设计方案, 有效保障机组的安全稳定运行。针对旁路供热状态下汽轮机通流特性、以及锅炉温度压力响应特性的变化特点, 提出协调修正的优化策略, 通过对原有逻辑的少量改动实现机组自动及协调控制效果的优化, 提高机组的涉网控制品质。此外, 针对旁路事故关闭的工况, 提出旁路快速减负荷 (run back, RB) 的控制策略, 使机组具备在旁路发生故障后的自稳定及自恢复能力。提出的控制方案在超临界直流炉机组中进行了应用, 经验证能够实现旁路系统的自动化控制, 协调变负荷的控制效果良好, 旁路 RB 动作后机组能够平稳过渡, 实现了旁路供热工况下机组的自动、安全控制。

[关键词] 深度调峰; 旁路供热; 自动控制策略; 快速减负荷

[引用本文格式] 邢智炜, 康静秋, 刘磊, 等. 供热储能和深度调峰工况下火电机组旁路供热自动控制策略研究与应用[J]. 热力发电, 2023, 52(2): 136-145. XING Zhiwei, KANG Jingqiu, LIU Lei, et al. Research and application of automatic control strategy for bypass heating of thermal power units under deep peak shaving and heating storage conditions[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(2): 136-145.

Research and application of automatic control strategy for bypass heating of thermal power units under deep peak shaving and heating storage conditions

XING Zhiwei^{1,2}, KANG Jingqiu^{1,2}, LIU Lei^{1,2}, YANG Zhenyong^{1,2}, YOU Mo^{1,2}

(1.State Grid Jibei Electric Power Research Institute, Beijing 100045, China; 2.North China Electric Power Research Institute Co., Ltd., Beijing 100045, China)

Abstract: Based on the control difficulties in the operation process of the unit after the bypass heating alteration, a complete control strategy was proposed under the bypass heating condition, which realizes the bypass automatic control under the heating condition and meets the needs of the unit heating regulation at the same time. Aiming at the influence of bypass switching on and off and working condition disturbance on the operation stability of steam turbine under the heating condition, as well as the change of unit safety boundary, a set of logic design scheme including bypass blocking and overriding was proposed, which effectively guarantees the unit's safety and stability. Aiming at the changing characteristics of the steam turbine flow characteristics and the boiler's response to temperature and pressure characteristics in the state of bypass heating, an optimization strategy for coordination correction was proposed, which improved the quality of network-related control of the unit. The control scheme proposed in this paper has been applied in the supercritical once-through furnace unit. It has been verified the control strategy can realize the automatic control of the bypass system, and the control effect of the coordinated variable load is good. After the bypass RB acts, the unit can transition smoothly, realizing the bypass supply Automatic and safe control of the unit under thermal conditions.

Key words: deep peak shaving; bypass heating; automatic control strategy; run back

收稿日期: 2022-10-06 网络首发日期: 2022-11-24

基金项目: 国网冀北电力有限公司科技项目: 大规模火电机组灵活性改造和供热背景下调节支撑能力分析的提升研究 (52018K22001F)

Supported by: Science and Technology Project of State Grid Jibei Electric Power Co., Ltd. (52018K22001F)

第一作者简介: 邢智炜 (1988), 男, 高级工程师, 主要研究方向为火电机组热工自动控制, xingzhiwei1914@163.com。

为促进电网系统对新能源消纳,当前对火电机组的调峰能力和运行灵活性的需求越来越高^[1-3],尤其在北方地区冬季供暖季,这一需求更加迫切。供热机组在“以热定电”运行方式下受到严重制约,调峰能力较差,参与深度调峰的幅度受限,导致电网弃风、弃光现象严重。因此需要探索在冬季供热工况下,同时稳定热网储能及提高火电机组深度调峰能力的技术途径,从而更好地适应新能源战略发展的需求,提升火电机组深度调峰能力和灵活性^[4-7]。热网储能的方式,既可以保障冬季供热需求,同时可以实现火电机组负荷的阶梯利用,促进电网中新能源占比的提高。

在未来的一段时间内,大量的火电机组面临灵活性改造以及深度调峰改造需求。因此,研究电-热综合存储系统的优化运行、机组的热力动态特性对供热系统的影响以及如何保障火电机组在灵活性改造过程中维持热源稳定性,都具有重要的意义。

近年来,国内外学者不断对深度调峰、热电耦等相关内容进行研究探索。为确保深度调峰能力提升的同时保障机组的安全运行,各发电企业也都在进行不同技术路径的探索和机组改造^[8-9]。目前,常用的热电耦技术有高中压缸旁路供热^[10-12]、储热罐供热^[13-15]、电锅炉供热^[16-19]、低压缸零出力供热^[20-23]等。这其中,汽轮机高低压旁路联合供热改造方案利用汽轮机旁路将高参数蒸汽减温减压后对外供热,改造方案成熟,改造投资小,成为很多电厂选择的改造方案。旁路系统早期是为配合机组启动过程配置的系统,其控制思路简单有效;但是近几年才刚刚应用到机组热电耦机组上,大部分是后期改造完成的,其设计、施工、运行经验方面都还在探索阶段,因此实际投运过程中存在大量问题。例如旁路供热投运后,汽轮机高、中压缸通流量、压比以及轴位移等重要参数的变化,与常规运行方式发生了本质改变,因此需要运行人员手动控制,一方面无法满足涉网性能的要求,另一方面增加了运行人员操作强度。当工况发生异常变化时,运行人员无法准确判定异常原因迅速做出合理有效的干预手段,对机组安全运行带来了巨大隐患。

与此同时,旁路供热与原有机组抽汽供热模式的匹配、切换,供热需求与AGC负荷控制的匹配,锅炉热负荷与汽轮机电负荷、旁路热负荷之间匹配,以及旁路故障快关后的自动控制调节等都是亟待解决的控制问题。因此研究旁路供热的优化控制策略对机组、电网本质安全起到至关重要的作用。

本文针对旁路供热改造后的机组,设计了完整的旁路自动控制策略,以及超驰、闭锁控制方案,并对协调控制系统进行优化,同时设计了完整的旁路快速减负荷(run back, RB)控制逻辑。全方位提高了旁路供热机组的自动控制品质及机组的安全稳定性。本方案在超临界机组旁路改造后进行了应用,通过试验验证了方案的可行性和有效性。

1 机组设备概况

某电厂2号机组为直流炉超临界350 MW机组,于2017年投入商业运行。汽轮机为东方汽轮机厂生产的超临界、一次中间再热、间接空冷、抽汽凝汽式汽轮机。锅炉为北京巴威锅炉厂生产的超临界、一次中间再热、前后对冲式、II型直流炉。

2号机组原设45%BMCR高低压二级串联旁路,主要用于机组的启动和停机。为响应国家关于新能源消纳、提高火电机组运行灵活性的政策要求,通过对机组进行灵活性改造,在保证对外供热能力不变的前提下,提高机组的调峰能力。

改造过程更换原高压旁路(高旁)阀,使更换后的高旁阀具有和原45%BMCR容量高旁阀一样的启动和停机功能。高旁阀减温水调节阀组(减温水电动调节阀和电动隔离阀)使用现有阀门,不做更换。新增1套低压旁路(低旁)减温减压阀,与原低旁并列布置。新增低旁减温减压阀仅需满足机组深度调峰供热工况的需要,使之具有长期连续稳定的旁路阀供热的能力。现有低旁阀组继续保留,主要用于机组的启动和停机。图1为机组旁路供热改造系统示意。

2 旁路供热控制策略

2.1 旁路自动控制及流量计算

由于高旁更换后容量未改变,需要同时用作汽轮机启停与旁路供热,因此对高旁控制方案进行优化改造,利用旁路供热状态对高旁的调节回路进行切换。旁路供热状态未投入时,高旁作为启动旁路,控制汽轮机前主蒸汽压力。旁路供热状态投入时;高旁作为供热旁路,调节高旁前主蒸汽流量。

在旁路供热工况下,通过低旁供热流量控制高旁的开度,从而保障工质的平衡,因此高旁的设定值等于低旁蒸汽流量减去高旁减温水流量再加上运行人员设置偏置;同时,采用低旁阀开度作为高旁阀控制的前馈,优化调节效果。

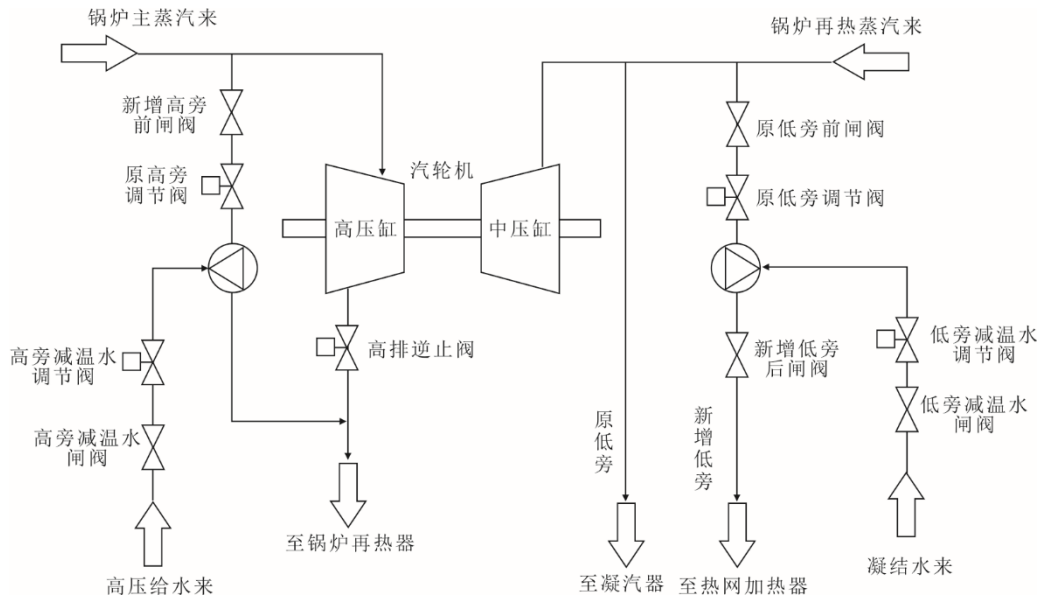


图 1 旁路系统改造示意

Fig.1 Schematic diagram of the bypass system modification

高旁阀调节的被调量为高旁前蒸汽流量。为保证高旁调节被控对象可靠、防止流量突变，同时引入高旁计算流量，通过实测值与计算值加权得到供热高旁被调量。对于高旁前流量，由能量平衡可知：

$$Q_1 H_1 + Q_3 H_3 = (Q_1 + Q_3) H_2 \quad (1)$$

由式(1)计算得到：

$$Q_1 = Q_3 \frac{H_2 - H_3}{H_1 - H_2} \quad (2)$$

式中： Q_1 为高旁前流量； H_1 为高旁前焓值（由高旁前温度和压力得到）； Q_3 为高旁减温水流量； H_3 为高旁减温水焓值（由减温水温度和压力分别取中得到）； H_2 为高旁后焓值（由高旁后温度和压力得到）。

2.2 旁路闭锁逻辑

供热工况下高低旁闭锁逻辑如图 2、图 3 所示。

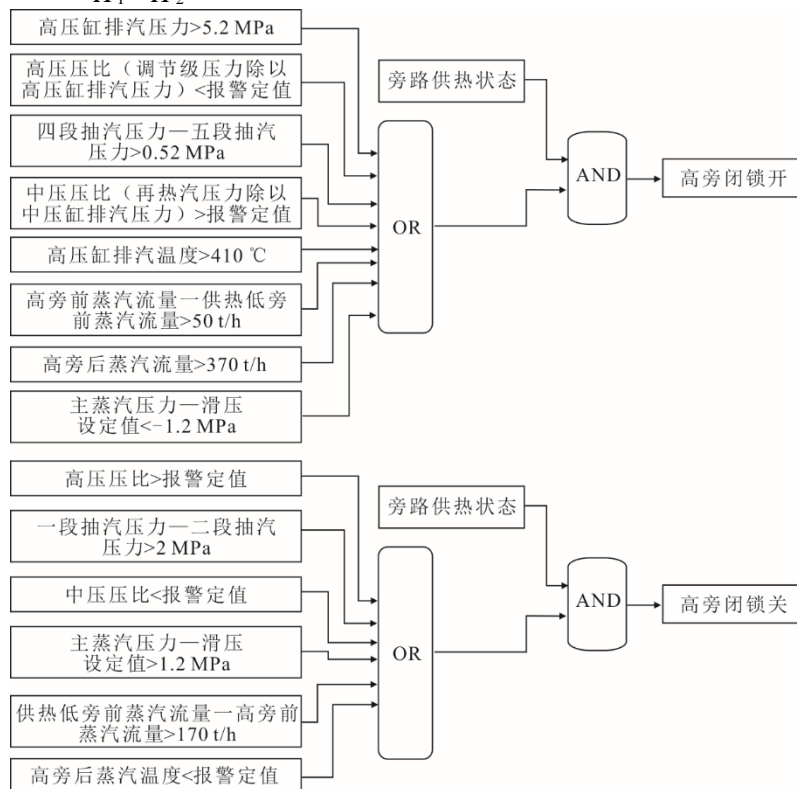


图 2 供热工况下高旁闭锁逻辑

Fig.2 Locking logic of high-pressure bypass under heating conditions

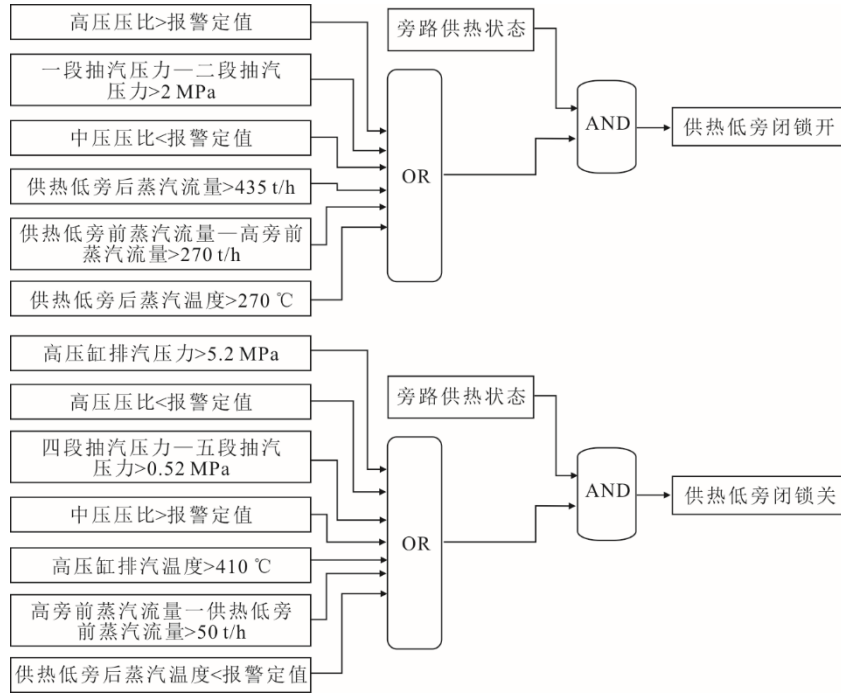


图 3 供热工况下低旁闭锁逻辑

Fig.3 Locking logic of low-pressure bypass under heating conditions

在旁路的调节过程中，通过分级设置旁路的闭锁、超驰逻辑，在旁路保护动作之前实现对旁路调节性能的分级控制，保障机组的运行安全。闭锁与超驰逻辑的设计原则为：优先触发闭锁逻辑；在闭锁动作

后控制效果依然不理想的情况下，触发超驰逻辑。

2.3 旁路超驰逻辑

旁路的超驰控制策略如图 4 所示。

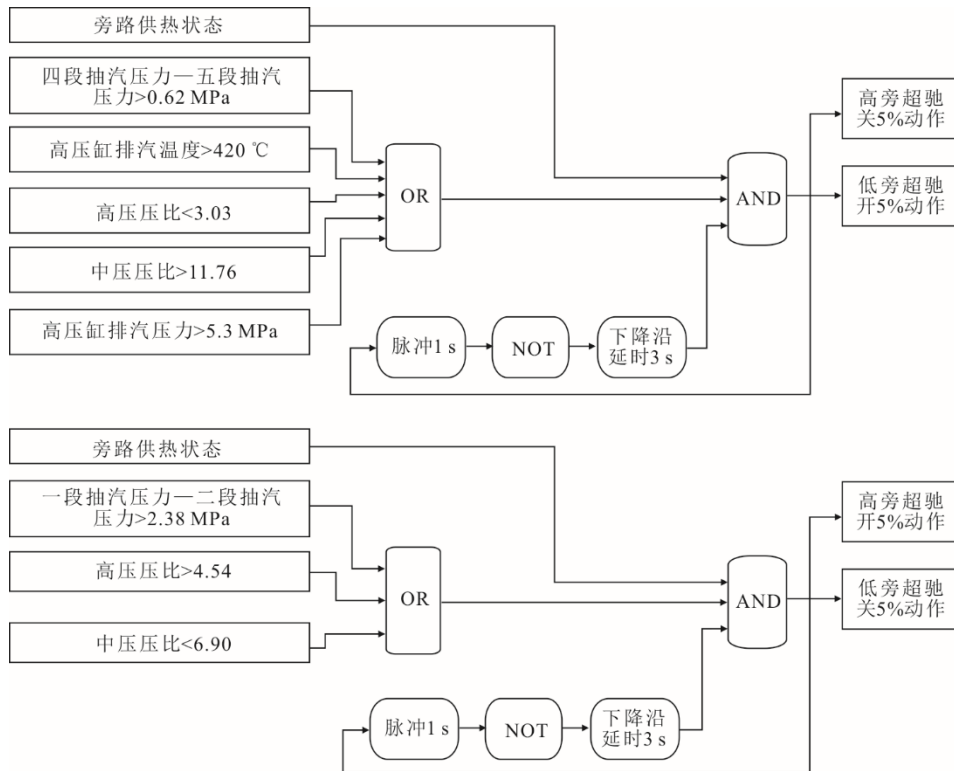


图 4 供热工况下旁路超驰逻辑设计

Fig.4 Bypass override logic design under heating conditions

对于旁路供热工况，由于汽轮机的运行工况发生变化，机组的安全运行受到一定影响，需要根据机组保护逻辑优化高旁控制策略，增加超驰逻辑。通过抽汽压力差，高压缸排汽温度、压力，高、中压压比，高排压力等边界调节进行超驰逻辑设置。超驰逻辑触发后，同时动作高、低旁路 5% 的开度，避免触发旁路保护动作，降低机组扰动，保障机组安全。

2.4 旁路温度自动控制策略

在高旁和供热低旁初始开启，投入旁路供热的工况下，由于主蒸汽与高压缸排汽混合后进入锅炉再热器，为保证蒸汽混合的热经济性，对高旁减温水调节的逻辑设置进行优化。在初投自动前 20 min 内，其设定值跟踪高压缸排汽温度；20 min 后切换成可由运行人员手动输入调整。

供热低旁减温水调节阀的控制对象为新增低旁后温度测点。由于供热低旁开启后，低旁供热蒸汽与五段抽汽供热蒸汽共同进入热网加热器。为减少二者温差，对低旁减温水的自动控制进行优化。在低旁减温水初投自动前 20 min 时，被控对象切换为汽轮机中低压缸联通管温度，利用其表征中压缸排汽温度。通过本文中控制策略的设计，能够控制低旁后温度与五段抽汽供热蒸汽温度接近。

3 协调控制优化策略

对于机组协调控制策略，原逻辑采用“炉跟机方式”的协调模式，由汽轮机调节阀调节负荷，动态响应电网 AGC 指令及调频需求；由锅炉对主蒸

汽压力进行调整，采用锅炉主控前馈、燃料主控前馈等方式进行动态过程调节。

在机组处于常规运行方式时未开旁路，锅炉产生的主蒸汽全部进入汽轮机高压缸进行做功；当投入旁路供热方式后，大部分主蒸汽仍然进入汽轮机高压缸，少部分主蒸汽经过高低旁路减温减压，与汽轮机抽汽共同进入热网加热器。此时汽轮机调节阀对负荷的调节效果、锅炉煤水对压力的动态响应特性均发生变化。因此需要对原有的协调控制策略进行优化，改善调节品质。

在本文的控制策略中，引入旁路供热协调优化系数，对汽轮机主控、锅炉主控等前馈量进行修正。

旁路供热状态下进入汽轮机的主蒸汽流量与高旁主蒸汽流量叠加得到机组主蒸汽流量。其中汽轮机主蒸汽流量的计算可以利用弗留格尔公式，通过调节级压力、调节级温度、高压缸排汽压力，根据汽轮机厂家提供说明书计算获得，如式(3)所示：

$$\frac{G_1}{G_0} = \sqrt{\frac{p_{01}^2 - p_{g1}^2}{p_0^2 - p_g^2}} \sqrt{\frac{T_0}{T_{01}}} \quad (3)$$

式中： G_1 、 G_0 为变化前后的主蒸汽流量； p_{01} 、 p_0 为变化前后的调节级压力； p_g 、 p_{g1} 为变化前后的高压缸排汽压力； T_{01} 、 T_0 为变化前后的调节级温度。

利用机组总的主蒸汽流量与进入汽轮机的主蒸汽流量相除，获得旁路供热工况下协调修正系数。考虑旁路流量测点可能出现的突变，对修正系数增加速率限制。旁路供热修正系数如图 5 所示。

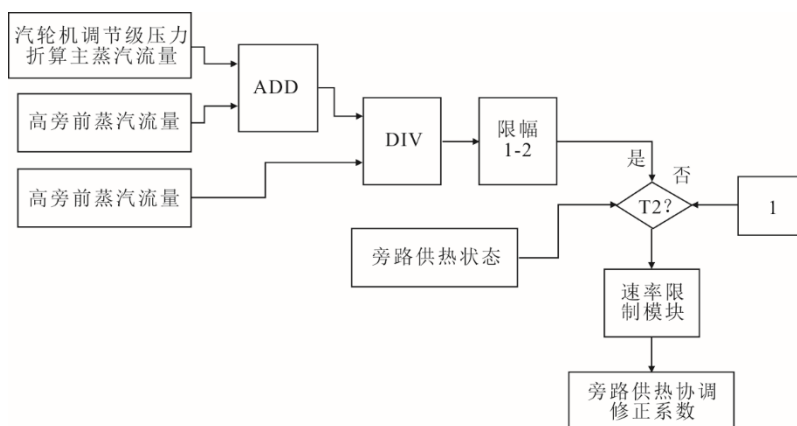


图 5 旁路供热工况协调系统修正逻辑

Fig.5 Coordinated system correction logic under bypass heating condition

协调修正系数需同时用于修正锅炉主控主前馈、负荷微分前馈、燃料主控负荷微分前馈、给水

主控微分前馈、脱硝微分前馈、总风量微分前馈、一次风压微分前馈等相关逻辑。

通过增加协调修正系数的方式对逻辑进行优化后,开展机组变负荷试验,负荷变动量为35 MW (10%Pe),控制效果如图6所示。

由图6可见,在主蒸汽压力跟随滑压设定值由16.3 MPa变化至18.1 MPa过程中,主蒸汽压力的最大控制偏差为0.4 MPa。在变负荷过程中,运行人员同时调整旁路开度改变供热流量,供热低旁流量的设定值由138 t/h变化至71 t/h,供热低旁流量与设

定值最大偏差在8 t/h左右;高旁流量的设定值由96 t/h变化至36 t/h,高旁流量与设定值最大偏差在6 t/h左右。

在整个变负荷的过程中,机组负荷、主蒸汽压力、旁路供热流量的控制效果良好。从控制效果可以看出,通过在逻辑中增加协调修正系数的方式,可以简单、便捷地优化旁路供热工况下协调系统的调节品质。

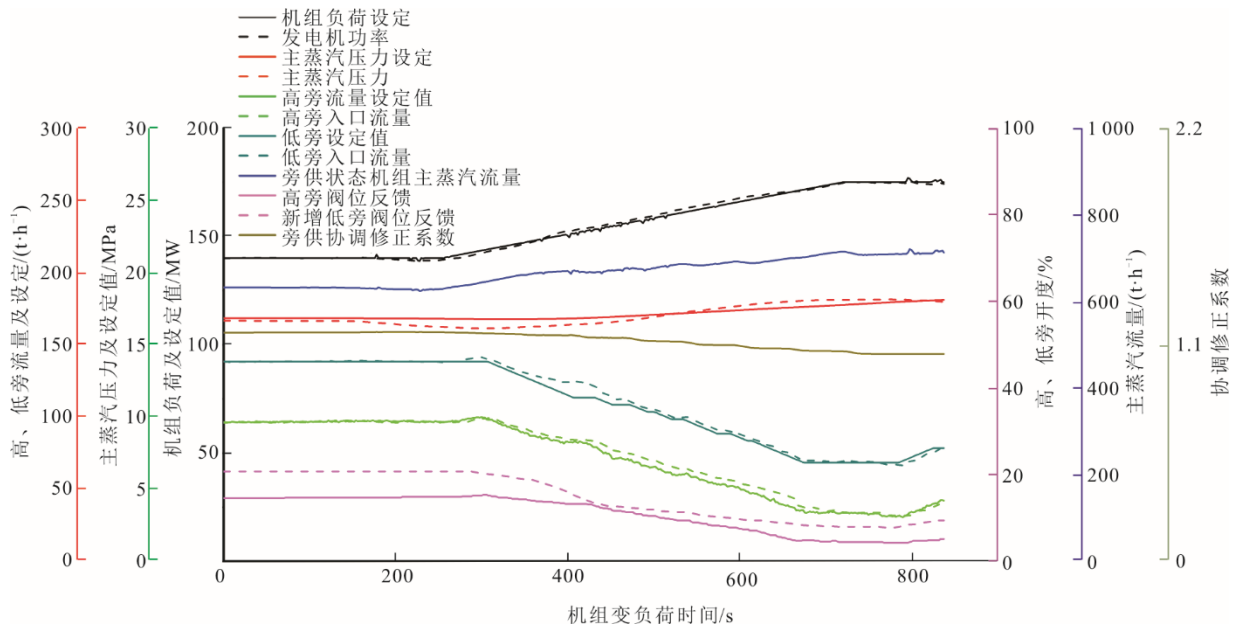


图6 协调控制优化后机组变负荷控制效果

Fig.6 Control effect of load changing after optimization of coordinated control system

经过对旁路自动控制回路、协调控制系统的逻辑及参数优化后,在保障供热能力的前提下(热网疏水流量在300 t/h以上),机组的最低调峰负荷可达到120 MW (35%Pe)。与改造前(供热期最低电负荷可降至60%Pe)相比,机组实现了热电解耦,大幅降低了负荷下限。

4 旁路供热 RB 控制策略

当旁路投入供热后,由于供热期间旁路管道的长期高流速、高温冲刷,容易出现设备的故障;旁路后温度、压力的快速变化或控制不理想,容易触发旁路超温保护及汽轮机高、中压比的保护;此外,高低旁路供热流量的不匹配也容易造成汽轮机轴向推力的不平衡问题、再热器超压等问题。因此当旁路出现故障或者保护关闭后,原旁路蒸汽瞬间进入汽轮机,会造成汽轮机进汽量的瞬间增加及负荷突增,主蒸汽压力快速升高,容易造成锅炉上水

困难,导致锅炉跳闸,以及造成轴瓦温度升高、汽轮机轴位移变化等重大安全问题。

在火电机组 RB 的相关标准中,《火力发电机组快速减负荷控制技术导则》(GB/T 31461—2015)和《火力发电机组辅机故障减负荷技术规程》(DL/T 1213—2013)对锅炉风机 RB、空气预热器 RB、给水泵 RB 等类型进行了定义,并且给出了相关的试验方法。但针对火电机组深度调峰工况的旁路系统供热改造,相关技术方案尚不成熟,旁路快关动作后如何保障机组安全运行的控制方案也有待进一步研究和设计^[24]。

因此当供热旁路系统故障快速关闭后,需要考虑并设计旁路故障跳闸后的 RB 控制方案,保障机组能够自动恢复并稳定运行。通过触发 RB 动作,自动控制降低锅炉热负荷,匹配旁路快关带来的汽轮机负荷及增加,同时对汽轮机调节阀的动作进行限制,保障汽轮机安全。

4.1 旁路 RB 控制策略设计

机组在旁路供热工况且处于协调模式，当高旁流量高于定值且高旁快关保护或低旁快关保护触发后，旁路 RB 触发。定义机组主蒸汽流量（汽轮机蒸汽流量与旁路蒸汽流量叠加）高于 60% 时，旁路 RB 动作。旁路 RB 的复位通过主蒸汽流量降低至 50% 以下或手动复位。

旁路 RB 动作后，按照从上到下的顺序间隔 10 s 跳闸上层磨煤机，保留下层 3 台磨煤机。根据当前主蒸汽流量对应的煤量，按照目标主蒸汽流量

（设置为 50%）给出目标煤量，送至锅炉主控进行煤量控制。

由于 RB 触发后协调控制方式切换至汽轮机跟随方式，通过汽轮机调节阀控制汽轮机前压力，旁路 RB 动作后，目标压力给出为根据负荷折算定值。对于旁路 RB 后的压力控制，基于温度和控制锅炉上水阻力的考虑，对旁路 RB 触发后的压力变化速率进行分段设置，在前 30 s 为某一速率，在 30 s 后设置为另一速率。

旁路 RB 的控制目标煤量及压力如图 7 所示。

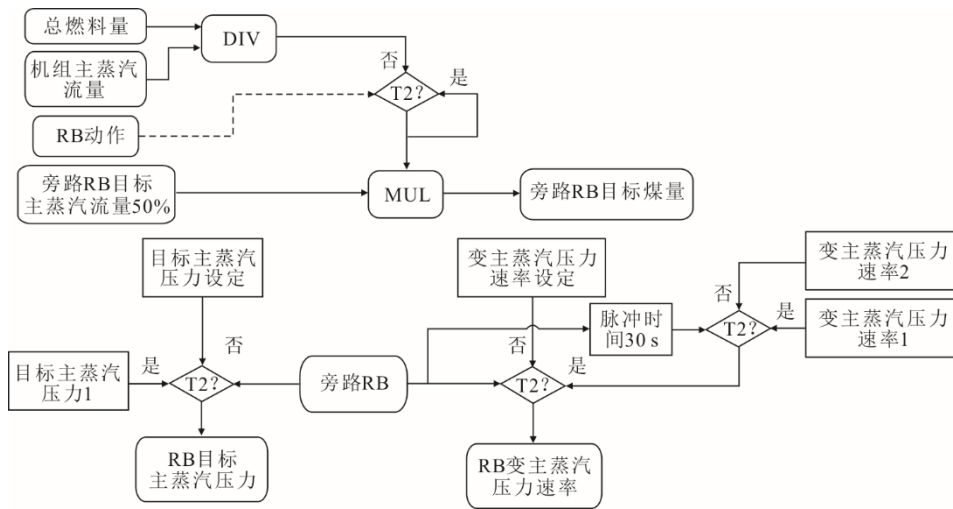


图 7 旁路 RB 目标煤量及目标压力设定

Fig.7 Target coal volume and target pressure setting of bypass RB

4.2 旁路 RB 触发后对汽轮机调节阀的控制策略

旁路 RB 动作后，机组控制方式切换至汽轮机跟随方式，由汽轮机调节阀对主蒸汽压力进行控制。当旁路快关触发旁路 RB 后，旁路中的主蒸汽流量会瞬间进入汽轮机进行消纳，造成负荷及主蒸汽压力瞬间增高。汽轮机调节阀快速开启，会对汽轮机轴向推力造成影响。因此需要对汽轮机阀位开启速率进行一定限制。

图 8 为旁路 RB 触发后汽轮机阀位的控制策略。由图 8 可见：当旁路 RB 动作期间，汽轮机阀位限速率使能端为 0，速率限制块进行速率限制，阀位限速率设置为 20%/min；当旁路 RB 动作结束且速率限制功能块前后偏差小于 3 后，汽轮机阀位限速率使能端为 1，速率限制块取消速率限制。通过对汽轮机阀位开启速率限制，保障汽轮机安全运行。

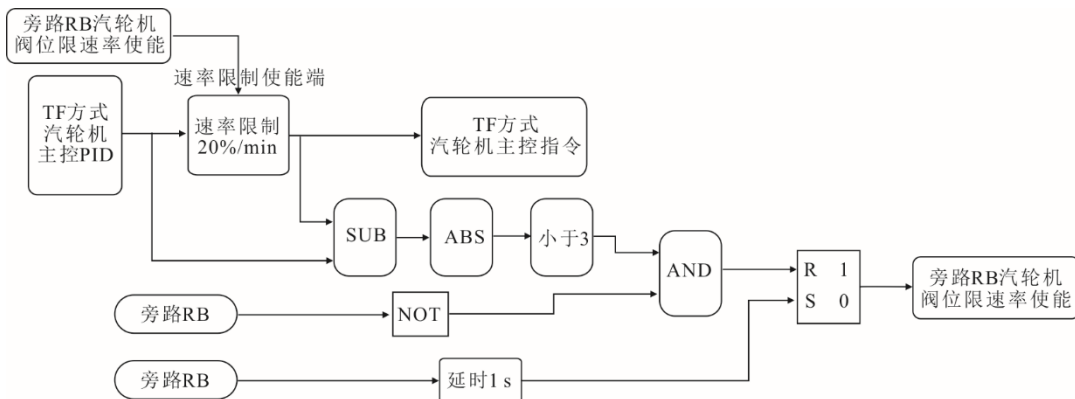


图 8 旁路 RB 动作后汽轮机阀位控制策略

Fig.8 Control strategy of turbine valve after the bypass RB action

4.3 旁路 RB 试验过程控制效果

图9中给出了旁路快关后,旁路RB动作的主要参数控制效果。RB触发时,机组负荷170MW,主蒸汽压力17.5MPa,给水流量697t/h,总煤量107t/h,主蒸汽流量625t/h,汽轮机综合阀位83.7%。RB动作后,上层磨煤机迅速跳闸;总煤量迅速降至87t/h

并维持稳定;给水流量随煤量按惯性时间下降,50s后稳定至583t/h。由于旁路故障后的快速关闭,主蒸汽流量迅速升高至654t/h,之后缓慢下降至532t/h并维持稳定。按照本文中的控制策略,对汽轮机调节阀指令进行速率限制,RB触发后汽轮机综合阀位缓慢开至85.2%,最终缓慢降至79.1%并维持稳定。

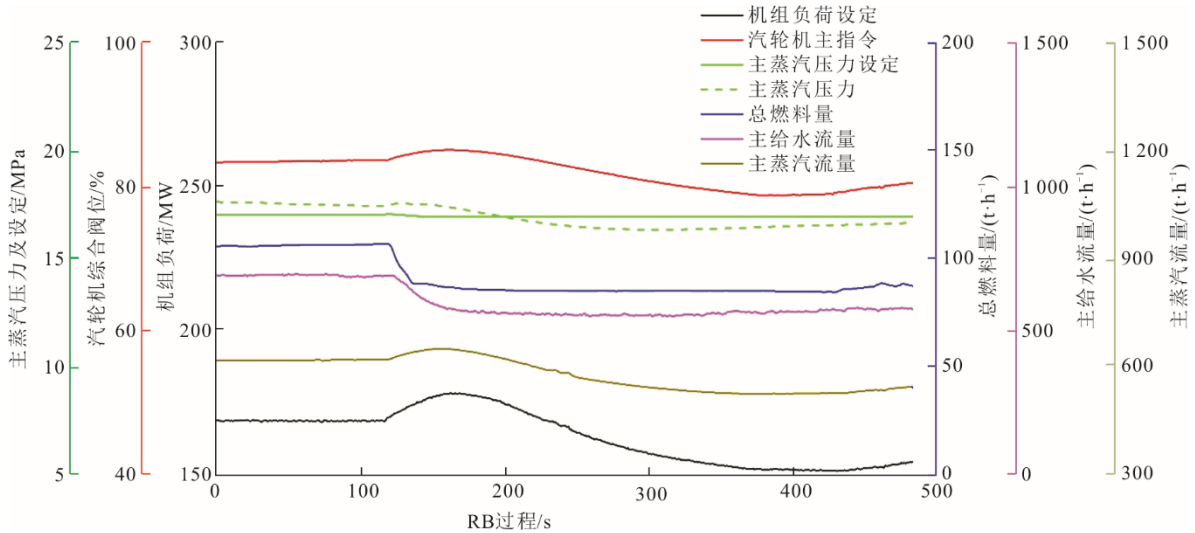


图9 旁路RB动作后机组主要参数控制效果

Fig.9 Control effect of main parameters after the bypass RB action

从图9可以看出,机组能够自动降负荷适应旁路快关的工况,燃料及给水流量匹配下降,过程主蒸汽压力、给水流量、总风量等主要参数能够平稳过渡,汽轮机的振动、轴位移、胀差等主要参数未发生明显变化,逻辑中新增的高中压缸压比、汽轮机抽汽差压等参数维持稳定。因此通过旁路RB控制策略的应用,可以保障供热旁路故障关闭后,机组能够稳定、安全降负荷。旁路RB动作后的主蒸汽压力变化采用变压力速率控制,同时考虑了机组主蒸汽温度和上水能力,实现了主蒸汽压力的柔性控制^[25-26]。旁路RB动作后,机组负荷和主蒸汽压力瞬间增高,汽轮机调节阀在一定的限制范围内快速开启,调节主蒸汽压力的快速增高。

综上所述,本文的控制方案中,通过设计汽轮机阀位的变化速率限制,有效保障了汽轮机的安全及锅炉的上水能力。

5 结论

1) 针对供热储能背景下火电机组的旁路供热调峰技术路线,本文基于旁路供热改造后的机组,设计了旁路自动控制,超驰、保护控制策略,协调控制优

化方案,以及旁路快关后的旁路RB控制策略,并在超临界直流炉机组的旁路改造中进行了实际应用。

2) 针对旁路供热投退及过程调节的特性,设计了旁路自动调节的控制策略,以及超驰、闭锁等逻辑,实现了旁路的全过程自动控制,多层次有效保障了机组的运行安全;通过协调优化系数的设计,并对相关逻辑进行优化,解决了旁路改造后蒸汽分配及锅炉动态特性改变对协调控制品质的影响问题;通过设计旁路RB逻辑方案,实现了供热旁路保护快关后自动降低锅炉煤量、给水流量、主蒸汽压力,汽轮机阀门在受限范围内快速开启,适应旁路快关对机组带来的扰动,保障机组的安全运行,同时减少运行人员的操作压力。

3) 对于供热火电机组来说,在保障其作为供热热源稳定性的基础上,通过本文中的研究内容,能够有效实现机组的热电解耦,大幅降低机组供热期的电负荷,提高机组的灵活性,保障旁路供热调峰方式下机组的安全、自动、稳定运行。

[参考文献]

- [1] 冯伟忠,李励.“双碳”目标下煤电机组低碳、零碳和负碳化转型发展路径研究与实践[J].发电技术,2022,

- 43(3): 452-461.
FENG Weizhong, LI Li. Research and practice on development path of low-carbon, zero-carbon and negative carbon transformation of coal-fired power units under "Double Carbon" targets[J]. Power Generation Technology, 2022, 43(3): 452-461.
- [2] 甘益明, 王昱乾, 黄畅, 等. "双碳"目标下供热机组深度调峰与深度节能技术发展路径[J]. 热力发电, 2022, 51(8): 1-10.
GAN Yiming, WANG Yuqian, HUANG Chang, et al. Development path of deep peak-shaving and deep energy conservation technology for cogeneration units with "Dual Carbon" target[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(8): 1-10.
- [3] 王月明, 姚明宇, 张一帆, 等. 煤电的低碳化发展路径研究[J]. 热力发电, 2022, 51(1): 11-20.
WANG Yueming, YAO Mingyu, ZHANG Yifan, et al. Study on low-carbon development path of coal-fired power generation[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(1): 11-20.
- [4] 史普鑫, 史沛然, 王佩雯, 等. 华北区域电力调峰辅助服务市场分析与运行评估[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(20): 175-184.
SHI Puxin, SHI Peiran, WANG Peiwen, et al. Analysis and operation evaluation of power peak-shaving ancillary service market in North China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(20): 175-184.
- [5] 苏鹏, 王文君, 杨光, 等. 提升火电机组灵活性改造技术方案研究[J]. 中国电力, 2018, 51(5): 87-94.
SU Peng, WANG Wenjun, YANG Guang, et al. Research on technology to improve the flexibility of thermal power plants[J]. Electric Power, 2018, 51(5): 87-94.
- [6] 侯玉婷, 李晓博, 刘畅, 等. 火电机组灵活性改造形势及技术应用[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 8-13.
HOU Yuting, LI Xiaobo, LIU Chang, et al. Flexibility reform situation and technology application of thermal power units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 8-13.
- [7] 周怀春, 邓磊, 李德波. "新型电力系统规划下燃煤电厂深度调峰及快速调频技术" 专刊特约主编寄语[J]. 广东电力, 2022, 35(7): 1-2.
ZHOU Huaichun, DENG Lei, LI Debo. Development of coal-fired power plant boiler units under new power system planning[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(7): 1-2.
- [8] 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 Xiaoli, GAO Jilu, 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.
- [9] 居文平, 吕凯, 马汀山, 等. 供热机组热电解耦技术对比[J]. 热力发电, 2018, 47(9): 115-121.
JU Wenping, LYU Kai, MA Tingshan, et al. Comparison of thermal-electric decoupling techniques for heating units[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(9): 115-121.
- [10] 刘畅, 耿林霄, 王珩, 等. 高低旁路联合供热改造控制策略研究[J]. 热力发电, 2020, 49(11): 126-132.
LIU Chang, GENG Linxiao, WANG Heng, et al. Control strategy in transformation of high and low pressure bypass combined heat supply[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(11): 126-132.
- [11] 蒋春雷, 刘永利. 330 MW 汽轮机高低压旁路联合供热应用探究[J]. 黑龙江电力, 2020, 42(6): 555-559.
JIANG Chunlei, LIU Yongli. Application on combined heating of HP-LP bypass in 330 MW steam turbine[J]. Heilongjiang Electric Power, 2020, 42(6): 555-559.
- [12] 王占洲, 曹丽华, 司和勇. 汽轮机低压缸旁路供热的电出力调节能力分析[J]. 汽轮机技术, 2021, 63(4): 297-299.
WANG Zhanzhou, CAO Lihua, SI Heyong. Analysis on power output regulation ability of steam turbine of low pressure cylinder bypass heating[J]. Turbine Technology, 2021, 63(4): 297-299.
- [13] 吕泉, 陈天佑, 王海霞, 等. 配置储热后热电厂调峰能力分析[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(11): 34-41.
LYU Quan, CHEN Tianyou, WANG Haixia, et al. Analysis on peak-load regulation ability of cogeneration unit with heat accumulator[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(11): 34-41.
- [14] 金国强, 高耀岩, 张丽霞. 储热罐改造对供热机组热电解耦及调峰能力的影响研究[J]. 汽轮机技术, 2021, 63(2): 133-136.
JIN Guoqiang, GAO Yaokui, ZHANG Lixia. Research on the effect of heat storage tank reconstruction on decoupling and peaking capacity of CHP units[J]. Turbine Technology, 2021, 63(2): 133-136.
- [15] 王智, 郭良丹, 付静, 等. 供热系统加储热后的调峰灵活性分析[J]. 汽轮机技术, 2019, 61(4): 311-314.
WANG Zhi, GUO Liangdan, FU Jing, et al. Analysis of peak shaving flexibility in heating system after installing heat storage[J]. Turbine Technology, 2019, 61(4): 311-314.
- [16] 崔杨, 陈志, 严干贵, 等. 基于含储热热电联产机组与电锅炉的弃风消纳协调调度模型[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4072-4081.
CUI Yang, CHEN Zhi, YAN Gangui, et al. Coordinated wind power accommodating dispatch model based on electric boiler and CHP with thermal energy storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4072-4081.
- [17] 刘圣冠, 乔磊, 翟鹏程, 等. 蓄热电锅炉供热技术及工程应用[J]. 热力发电, 2020, 49(8): 91-96.
LIU Shengguan, QIAO Lei, ZHAI Pengcheng, et al. Technology and engineering application of heating with thermal storage electric boiler[J]. Thermal Power Generation, 2020, 49(8): 91-96.
- [18] 吕泉, 姜浩, 陈天佑, 等. 基于电锅炉的热电厂消纳风电方案及其国民经济评价[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(1): 6-12.
LYU Quan, JIANG Hao, CHEN Tianyou, et al. Wind power accommodation by combined heat and power plant with electric boiler and its national economic evaluation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(1): 6-12.
- [19] 毕庆生, 田春光, 吕项羽, 等. 大型供热机组深度参与电网调峰的一种新模式[J]. 汽轮机技术, 2014, 56(1): 69-71.
BI Qingsheng, TIAN Chunguang, LYU Xiangyu, et al. A new model of large heating units deeply involved in the peak regulation of power network[J]. Turbine Technology, 2014, 56(1): 69-71.
- [20] 李展, 尤默, 邢智炜, 等. 某新建火电机组低压缸零切除控制策略分析及设计[J]. 电力与能源, 2021, 42(2): 219-222.

- LI Zhan, YOU Mo, XING Zhiwei, et al. Analysis and design of zero-cut control strategy for a low-pressure cylinder of a newly built thermal power unit[J]. *Power & Energy*, 2021, 42(2): 219-222.
- [21] 左启尧, 唐震, 李慧勇, 等. 电网调峰背景下汽轮机低压缸零出力技术现状综述[J]. *发电技术*, 2022, 43(4): 645-654.
- ZUO Qiyao, TANG Zhen, LI Huiyong, et al. Overview on the current situation of steam turbine low-pressure cylinder zero-output technology under background of power grid peak regulation[J]. *Power Generation Technology*, 2022, 43(4): 645-654.
- [22] 鄂志君, 张利, 杨帮宇, 等. 低压缸零出力实现热电联产机组热电解耦与节能的理论研究[J]. *汽轮机技术*, 2019, 61(5): 383-386.
- E Zhijun, ZHANG Li, YANG Bangyu, et al. Theroretical study on heat-electricity decoupling and energy saving of low-pressure cylinder zero output renovation of heat and power cogeneration units[J]. *Turbine Technology*, 2019, 61(5): 383-386.
- [23] 王骥, 刘亚南, 刘网扣. 某600 MW机组汽轮机低压缸切除改造[J]. *发电设备*, 2019, 33(5): 366-370.
- WANG Qi, LIU Yanan, LIU Wangkou. Application of LP cylinder cutting technology in a 660 MW steam turbine unit[J]. *Power Equipment*, 2019, 33(5): 366-370.
- [24] 邢智炜, 刘磊, 尤默, 等. 火电机组非常规RB及核心控制策略研究与应用[J]. *广东电力*, 2022, 35(7): 161-169.
- XING Zhiwei, LIU Lei, YOU Mo, et al. Research and application of unconventional RB and core control strategy for thermal power unit[J]. *Guangdong Electric Power*, 2022, 35(7): 161-169.
- [25] 邢智炜, 骆意, 王立, 等. 超超临界机组柔性快减负荷控制策略的研究与应用[J]. *中国电机工程学报*, 2020, 40(增刊1): 204-210.
- XING Zhiwei, LUO Yi, WANG Li, et al. Research and application of flexible RB control strategy for the ultra-supercritical unit[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2020, 40(Suppl.1): 204-210.
- [26] 高奎, 谭祥帅, 郭三虎, 等. 超超临界机组辅机故障减负荷过程重要运行参数控制优化[J]. *热力发电*, 2021, 50(7): 91-99.
- GAO Kui, TAN Xiangshuai, GUO Sanhu, et al. Control and optimization of important operation parameters in RB process of ultra supercritical units[J]. *Thermal Power Generation*, 2021, 50(7): 91-99.

(责任编辑 刘永强)