

doi: 10.11835/j.issn.1000-582X.2026.02.002

引用格式:吴礼云, 郑忠, 陈素君, 等. 临海钢厂水电共生海水淡化系统的安全控制策略研究[J]. 重庆大学学报, 2026, 49(2): 19-33.



临海钢厂水电共生海水淡化系统的安全控制策略研究

吴礼云^{1,2}, 郑忠¹, 陈素君^{1,2}, 于悦波², 陈德磊², 张开天¹

(1. 重庆大学 材料科学与工程学院, 重庆 400044; 2. 首钢京唐钢铁联合有限责任公司, 唐山 063200)

摘要:以临海钢铁企业的水电共生海水淡化新技术系统为对象,针对该系统以汽轮机乏汽作为低温多效蒸发海水淡化的热源,汽轮发电机组与海水淡化机组耦合紧密,联合安全控制难度大、技术缺乏的问题,从优先考虑设备安全运行的角度,设计了适合水电共生工艺的启动逻辑、设备故障下的设备安全联锁保护逻辑、汽轮机低负荷场景下海水淡化装置的模式切换保护逻辑等安全控制策略,可实施对汽轮发电机组和海水淡化装置的双向联锁保护。该技术方案在某沿海钢铁厂的实际运用结果表明,所设计的水电共生安全控制策略,可实现整个系统的安全有序启动;在设备故障场景下能够实现主设备系统的双向安全联锁停机,具备既可在汽轮发电机组故障时连停海水淡化装置,也可以在海水淡化装置故障时连停汽轮发电机组;同时,安全策略能适应钢厂煤气大负荷调节的需要,安全运行效果明显。

关键词:临海钢厂;水电共生;海水淡化;联锁保护;启停逻辑;大负荷调节

中图分类号:TK323

文献标志码:A

文章编号:1000-582X(2026)02-019-15

Research on safety control strategy for a hydropower-seawater symbiosis system in coastal steel plants

WU Liyun^{1,2}, ZHENG Zhong¹, CHEN Sujun^{1,2}, YU Yuebo², CHEN Delei², ZHANG Kaitian¹

(1. College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, P. R. China;
2. Shougang Jingtang United Iron& Steel Co., Ltd., Tangshan, Hebei 063200, P. R. China)

Abstract: Focusing on a hydropower-seawater desalination symbiosis system implemented in a coastal steel enterprise, this study addresses the challenges of using exhaust steam from a steam turbine as the heat source for low-temperature multi-effect desalination. In this highly coupled configuration between the steam turbine generator set and the desalination unit, coordinated safety control remains difficult and lacks mature technical solutions. To ensure equipment safety, this paper proposes a set of safety control strategies tailored to the symbiosis process, including start-up logic, equipment safety interlock protection under failure conditions, and mode-switching protection for the desalination unit under low steam turbine load. These strategies establish

收稿日期:2024-07-08

基金项目:国家科技支撑计划资助项目(2015BAB10B01)。

Supported by National Science and Technology Support Program (2015BAB10B01).

作者简介:吴礼云(1972—),男,教授级高工,博士研究生,主要从事钢铁企业能源环保系统的节能低碳研究,(E-mail) 20220989003@stu.cqu.edu.cn。

通信作者:郑忠,女,教授,博士生导师,(E-mail)zhengzh@cqu.edu.cn。

bidirectional interlock protection between the steam turbine generator set and the desalination unit. Application of the proposed control scheme in an actual coastal steel plant verifies its effectiveness. The strategy enables safe and orderly start-up and achieves bidirectional emergency shutdown when either subsystem fails, allowing desalination shutdown induced by turbine failure and vice versa. Concurrently, it accommodates large-scale load fluctuations in the plant's gas supply, significantly enhancing operational safety.

Keywords: coastal steel plant; hydropower-desalination symbiosis; seawater desalination; interlock protection; start-stop logic; high-load regulation

钢铁长流程生产中的烧结、炼铁、炼钢、连铸和轧钢等主要工序需要大量的电力^[1],高炉、连铸、加热炉、热轧等多工艺过程的冷却过程也需要大量用水^[2],因此,钢铁厂对于电力和水资源的稳定供应有着强烈需求。同时,焦化、炼铁、炼钢过程还产生大量的煤气资源和余热资源^[3],为钢铁厂利用余热余能进行自发电和自产水提供了可行性。利用钢铁厂的富余高炉煤气进行煤气-蒸汽-电力的转换,探究发电与海水淡化装置相结合的集成模式,是钢铁冶金技术发展的研究热点和重点,也是企业降本增效,低碳减排^[4-5]的必经之路。

汽轮发电机组与海水淡化装置的集成系统在提高能源利用效率和水资源获取能力方面具有显著优势^[6-9]。因发电机组与海水淡化装置集成方式的差异,其联合安全控制策略对系统的稳定运行至关重要,不仅能够预防潜在的运行风险,保障人员和设备的安全,也有利于发挥设备的生产能力,减少运行维护成本。特别是随着环境法规和安全标准的日益严格,深入研究安全控制策略有助于系统在满足安全要求的同时,提升整个集成系统的可靠性、适应性。

汽轮发电机组与海水淡化装置系统的安全控制策略主要包括安全启动逻辑、安全联锁保护逻辑及负荷变化安全控制逻辑。在安全启动逻辑方面,朱启勇等^[10]针对汽轮发电机组的工艺需求,按照启动准备、锅炉点火、升温升压、冲转并网和升负荷的顺序设计了1套机组启动逻辑,提高了启动过程的安全可靠性。易雪东^[11]将汽轮发电机组启动逻辑划分为机组启动准备、锅炉上水及真空建立、锅炉点火及升温升压、汽机冲转、机组并网。赵俊杰等^[12]基于 ICS(intelligent control system)平台开发火电机组的启动逻辑,在某发电机组应用实践表明,所设计的启动逻辑可以实现火电机组的顺利启动,减少运行人员的操作强度。

在安全联锁保护逻辑方面,胡晓花^[13]针对火电厂低温多效海水淡化装置及其控制系统,明确减温减压后蒸汽为主要控制对象,设计海水淡化装置的主要安全联锁条件。李捍华等^[14]针对汽轮发电机组的安全联锁逻辑,设计了冷凝器的跳闸逻辑,实现了冷凝器的安全停止。彭军等^[15]针对汽轮机控制逻辑组态问题,结合实际案例,改进逻辑组态细节,减少了机组误动作几率。冯斌等^[16]根据循环流化床(circulating fluidized bed,CFB)锅炉燃煤发电机组的结构及燃烧特性,介绍了CFB锅炉主燃料跳闸(main fuel trip,MFT)的联动设备以及复位条件,稳定运行3 a的数据证明了逻辑优化的有效性和可行性。齐温圣等^[17]分析了某300 MW燃煤发电机组机因热控测点损坏造成的停机事故,改进汽轮机紧急跳闸系统(emergency trip system,ETS)逻辑,有效减少了热控单点损坏造成误动作的可能,提高了火电机组安全运行的稳定性。陈节涛等^[18]针对汽轮发电组 MFT 逻辑存在的网络通信故障引发的测点状态跳变风险等故障情况,重新对 MFT 产生的逻辑进行设计,有效避免了安全问题。Li 等^[19]研究了 CFB 锅炉燃煤发电机组 MFT 过程,实验结果表明, MFT 下,由于巨大的热惯性存在,床温和蒸汽温度的下降速度较慢。王帆^[20]以贵州西电电力股份有限公司黔北发电厂 4×300 MW 机组为例,介绍了 MFT 保护逻辑优化的实施,对火电机组的 MFT 保护逻辑设计与优化具有借鉴和参考意义。

在应对负荷变化安全控制策略方面,袁世通^[21]针对汽轮发电机组低负荷时给水再循环阀位开启,导致锅炉上水不足,汽包液位过低导致触发 MFT 停机的问题,重新设计了再循环阀的开启逻辑,一定程度上解决了

低负荷导致发电机组跳机的问题。高林等^[22]针对火电机组低负荷运行局限性,对MFT关键信号实行3取3,增加触发条件的交叉参考确认条件,通过逻辑优化避免低负荷下误跳机,同时,设计煤质波动校正和配风校正,增加低负荷燃烧稳定性。通过优化,汽轮发电机组可以在25%以上稳定运行。陆陆等^[23]针对汽轮发电机组低负荷单侧送引风机跳闸导致炉膛压力不稳定触发MFT的问题,重新对送引风机的控制逻辑进行优化,一定程度上解决了单侧送引风机跳闸造成炉膛压力不稳定触发停机的情况。付昱等^[24]通过先进的检测技术和仪器,提高了汽轮发电机组负荷调整的宽度,实现了20%~100%负荷调整,同时,尽可能减少了煤耗,但是负荷过低时,停机依然无法避免。

上述文献研究表明,对于水电联产技术的安全控制研究,主要是集中于火电机组的启动和安全保护逻辑。由于汽轮发电机组与海水淡化装置通常分区设置,通过长距离的蒸汽管网相连接,过程长、惯性大,发生故障时,有充足的调整时间,一般是沿用了发电机组的保护逻辑,因此,常规水电联产少见有专门研究其安全控制策略的论文。在启动逻辑方面,可以概括为:辅助设备准备、锅炉点火升温升压及凝汽器抽真空、汽机冲转、升负荷;其中,凝汽器抽真空有些学者合并到其他步骤。保护逻辑包括系统层面的,如MFT、ETS;也包括设备层面的,如给水泵、外置蒸汽冷却器、点火枪等。其本质上是火电机组的安全保护逻辑,对于极低负荷的场景虽然能够通过多种技术手段缓解跳机事故,但负荷过低时,跳机还是不可避免。

传统的水电联产海水淡化技术是利用汽轮机级间抽汽进行减温减压来作为海水淡化热源,热损失大,且凝汽器还存在冷源损失导致的热能浪费,为提高能源利用效率降低碳排放,某临海钢铁企业创新了一种水电共生的海水淡化新技术^[25-26]。该技术将汽轮机乏气直接作为海水淡化的热源,用海水淡化装置的首效来替代汽轮机发电机组的凝汽器,可大幅度提高系统的热能利用效率。但这种水电共生技术,汽轮发电机组与海水淡化装置直接相连,耦合紧密,取代凝汽器的海水淡化装置与汽轮机发电装置的启动和安全保护逻辑密不可分,系统惯性小,故障时,没有充足时间调整;同时,由于集成后工艺范围扩大,原来水电联产方式下发电系统的启动、保护逻辑无法适配于水电共生系统的安全保护需求。必须设计新的保护逻辑和策略。

因此,笔者首先针对水电联产模式下的启动逻辑空白与水电共生技术不匹配的问题,设计水电共生技术的启动逻辑;然后,针对水电共生系统集成后设备数量增加,海水淡化与汽轮发电机组联锁逻辑不匹配的问题,设计设备故障场景下的双向安全保护逻辑;再针对汽轮机极低负荷下海水淡化装置产水受限或被迫停机问题,设计一种模式切换逻辑,解决了大负荷调节场景下的安全性问题;最后,利用安全控制逻辑在工程实践中的实际生产历史数据,进行安全控制逻辑和策略的实例验证,来证明安全控制策略的正确性和有效性。

1 水电共生工艺与水电联产安全控制策略的不兼容性

1.1 水电共生海水淡化新技术的工艺特征与水电联产系统的比较

水电共生系统与传统水电联产的区别为:传统水电联产的方式中,海水淡化的热源为汽轮机高品质抽汽经减温减压处理,存在热能浪费,同时,直接排放的汽轮机乏汽也存在大量冷源损失,二者均会造成热能利用效率的大幅度降低。在水电共生的海水淡化系统中,汽轮机的乏汽温度和压力与海水淡化系统是匹配的,汽轮机乏汽是饱和蒸汽,其温度和压力有唯一对应关系,真空度由海水淡化装置真空泵提供,维持真空值为-70 kPa,该真空值下,温度恒定,满足海水淡化装置需要,汽轮机乏汽可以直接进入海水淡化装置中作为热源。图1为水电联产和水电共生系统耦合方式差异的示意图。从图中可直观发现,水电共生系统中,发电机组的凝汽器作用被海水淡化首效所替代,不但能够极大提高系统的整体热能利用效率,还可以减少建设初期凝汽器的投资成本。

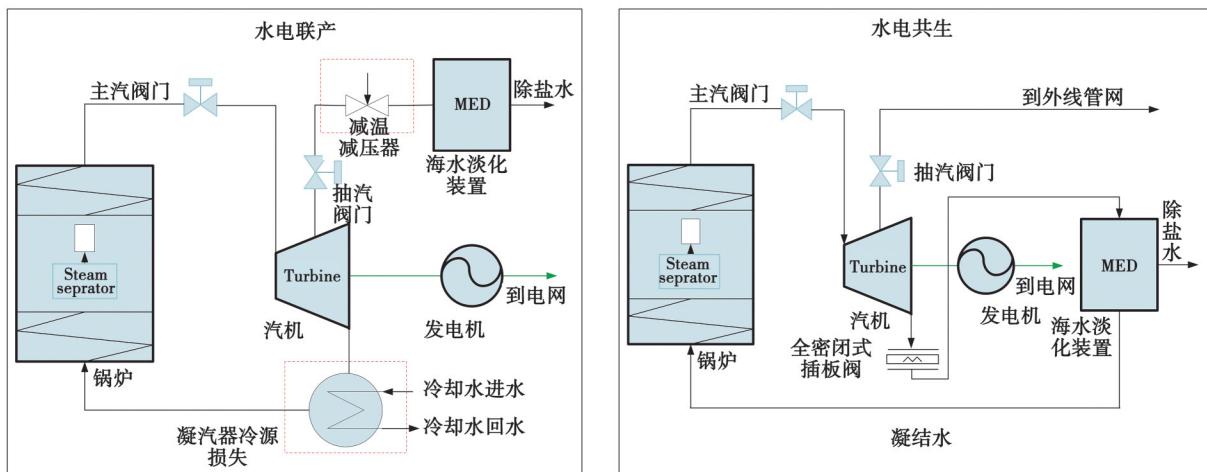


图 1 水电联产与水电共生耦合方式差异

Fig. 1 The differences between coupled methods of hydropower cogeneration and hydropower symbiosis

1.2 传统水电联产安全运行整体策略

传统水电联产安全运行模式的整体策略如图 2 所示,包括启动、正常运行与停机策略 3 方面。启动时,汽轮发电机组、海水淡化装置顺序启动。汽轮发电机组满足启动条件,开始启动,启动完成并网发电投入抽汽,抽汽温度压力满足海水淡化要求,海水淡化允许启动。正常运行时,由于汽轮机抽汽温度和压力较高,设置减温减压器对抽汽的温度和压力进行控制,以使之满足海水淡化装置产水对蒸汽的要求。其中凝汽器真空及减温减压器控制对系统安全稳定运行尤为重要。同时汽轮发电机组与海水淡化装置相互独立,独自设计故障的安全保护系统,二者之间通过调度系统沟通,人工调整汽轮机抽汽,系统故障时手动发出停机指令,不涉及自动联锁安全控制。

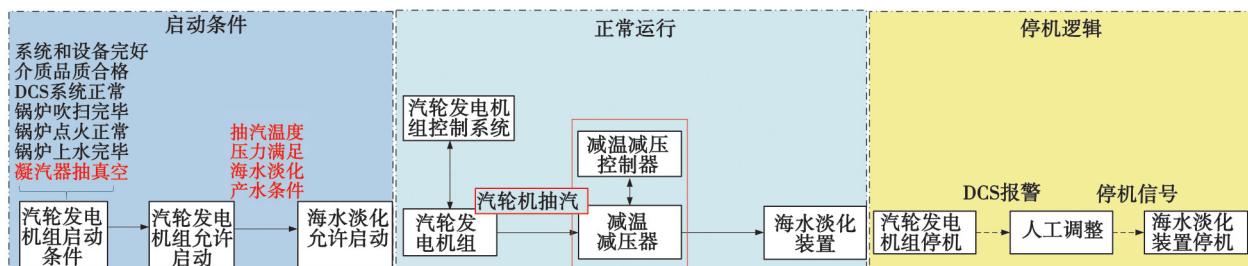


图 2 传统水电联产安全运行整体策略

Fig. 2 Overall strategy for the operational safety of traditional hydropower cogeneration

2 水电共生控制系统启停和运行调控的保护逻辑设计

2.1 水电共生系统的启动逻辑

根据图 1 的水电共生技术的工艺图可知,水电共生系统将汽轮机乏汽直接作为海水淡化热源,用低温多效海水淡化装置的首效取代了传统汽轮发电机组的凝汽器,取消凝汽器及减温减压器,考虑两者在系统启动过程中的重要作用,基于水电联产启动逻辑改进设计了水电共生启动逻辑如图 3 所示。启动逻辑的顺序一致,均为辅助设备准备、锅炉上水、锅炉吹扫、点火、升温升压。为满足水电共生系统汽轮发电机真空度要求及海水淡化装置热源条件,对启动逻辑的第 5 步及第 8 步进行了重新设计,分别为将凝汽器抽真空改为海水淡化抽真空、减温减压器启动改为乏汽流量作为海水淡化热源投入。

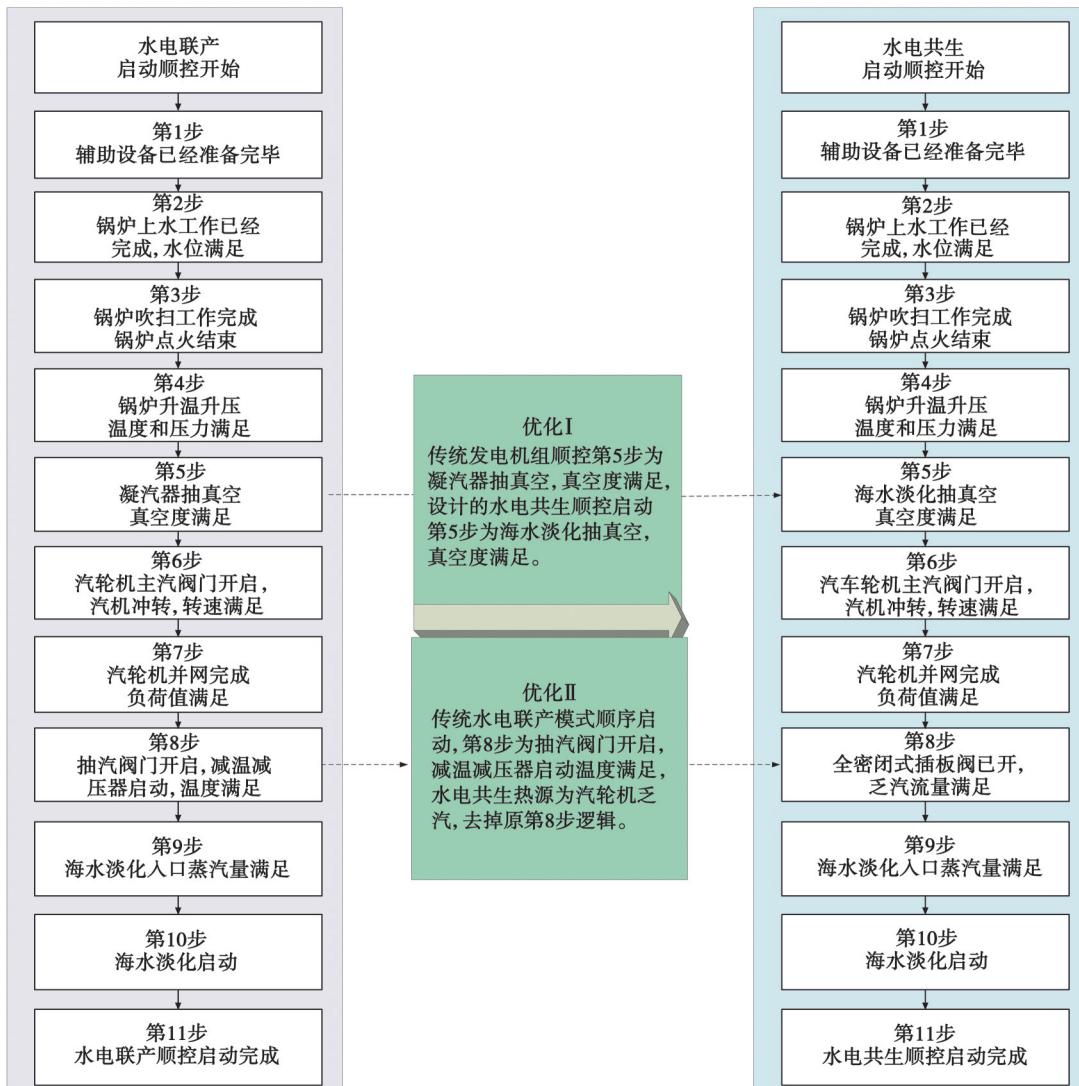


图3 水电共生系统的启动逻辑示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the startup logic for a hydropower symbiosis system

2.1.1 海水淡化抽真空控制逻辑设计

汽轮发电机升温升压后需要维持真空，因此海水淡化装置必须提前抽真空，使汽轮机的汽路通畅，为后续冲转及并网发电和产水做准备。海水淡化抽真空逻辑参数包括海水淡化真空泵运行、真空度测量值满足条件，二者同时满足条件后，控制系统逻辑认定真空度合格，顺序启动汽轮发电机组。其中，海水淡化真空泵运行为真空泵运行的反馈信号，真空度测量值通过真空度检测仪表进行测量。真空度检测仪表共3套，安装在海水淡化首效的不同位置，用于检测系统真空度的情况。真空度检测满足条件设计为3选2逻辑，即3个真空度测量值中，任意2个真空测量值满足条件(-70 kPa)，可判断真空度合格。

真空度的控制逻辑计算公式采用逻辑与(AND)公式，为

$$\text{Logic}_{\text{and}} = F(\mathbf{x}) = \begin{cases} 1, & \sum_{i=1}^n \forall x_i = 1, \\ 0, & \sum_{i=1}^n \exists x_i = 0, \end{cases} \quad (1)$$

式中： $\text{Logic}_{\text{and}}$ 为布尔量，逻辑与的输出； \mathbf{x} 为条件的集合向量； n 为条件个数； x_i 为第*i*个条件；对于集合 \mathbf{x} ，所有条件均为1， $F(\mathbf{x})$ 结果才为1；存在条件为0时， $F(\mathbf{x})$ 结果为0。

真空度选择逻辑3选2,有2块仪表测量值满足真空度要求即可,其表达式为

$$\text{Logic}_{3\text{sel}2} = G(x) = \begin{cases} 0, & \text{if } n < 2, \\ 1, & \text{if } n \geq 2, \end{cases} \quad (2)$$

式中: $\text{Logic}_{3\text{sel}2}$ 为布尔量,3选4的输出; n 为现场仪表测量值满足真空度的个数, $n \in [0, 3]$;当有2块以上仪表测量值满足时,真空度判断合格, $\text{Logic}_{3\text{sel}2}$ 输出为1;否则,认为真空度不满足, $\text{Logic}_{3\text{sel}2}$ 输出为0。

2.1.2 海水淡化热源投入控制逻辑设计

海水淡化装置启动之前需要合格的热源,水电共生系统海水淡化热源为汽轮机乏汽。海水淡化装置热源投入控制逻辑参数包括汽轮机至海水淡化装置控制全密闭式插板阀已开、乏汽流量检测值满足条件,二者同时满足条件后,控制系统逻辑认定海水淡化热源投入,顺序启动海水淡化装置。

海水淡化热源投入控制逻辑公式为

$$H(x) = \begin{cases} 1, & \text{if } (f > f_{\min}) \cap (v = 0), \\ 0, & \text{else,} \end{cases} \quad (3)$$

式中: f 为乏汽流量测量值; f_{\min} 为海水淡化装置启动所需最小乏汽流量值,定值; v 为全密闭式插板阀的状态,0为关状态,1为开状态。

2.2 水电共生系统的安全联锁保护逻辑

2.2.1 水电共生系统安全运行的主要影响因素

由水电共生技术的工艺特征,可知影响水电共生系统安全运行的主要影响因素包括汽轮发电机组主体及辅助设备故障、海水淡化装置故障,以及汽轮发电机组低负荷运行3方面,如图4所示。

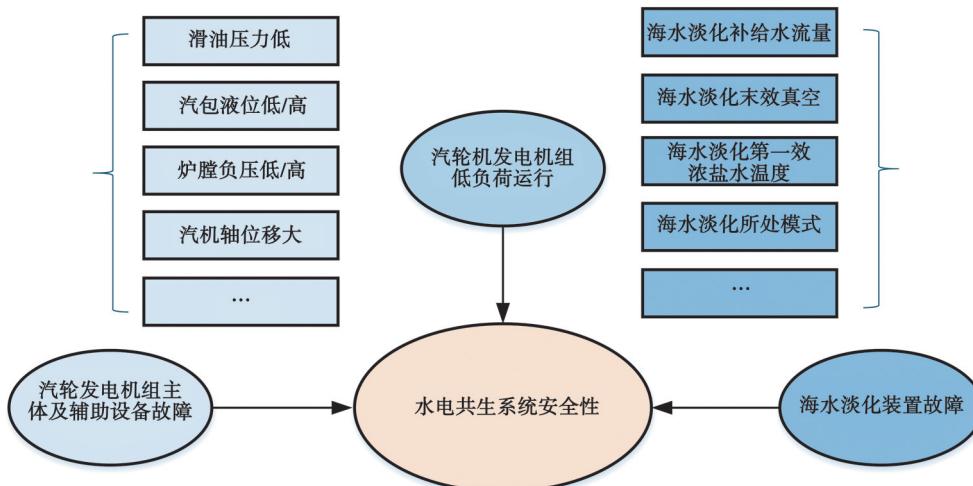


图4 水电共生系统安全运行的主要影响因素

Fig. 4 Key influencing factors for the operational safety of a hydropower symbiosis system

1)汽轮发电机组主体及辅助设备故障:此时汽轮发电机组主体及辅助设备故障时,汽轮发电机组必须停机以保证故障范围的可控,而汽轮发电机组的停机会导致海水淡化热源丧失。

2)海水淡化装置故障:此时海水淡化装置承担着维持凝汽器真空以及汽轮机乏汽冷却的功能,会导致汽轮机乏汽排汽受阻,且汽轮发电机组的水循环出现问题,严重危害系统安全。

3)汽轮发电机组低负荷运行:正常情况下,当汽轮发电机组常规调整负荷时,可以通过调整抽汽阀门的开度变化来维持乏汽流量,确保海水淡化高效产水,水电共生系统处于安全高效运行。但当汽轮发电机组负荷调整范围超出抽汽调节阀门开度的调整极限时,即出现极低负荷运行时,轻则会影响海水淡化产水量,重则会导致海水淡化被迫停机,威胁水电共生系统设备安全。

2.2.2 水电共生系统设备故障场景下安全联锁保护逻辑

水电共生系统设备故障场景安全联锁保护逻辑如图5所示。对于海水淡化装置故障的情景,海水淡化

故障信号进入ETS,联锁汽轮发电机组停机。海水淡化进入ETS的关键信号包括:海水淡化所处模式、海水淡化补给水流量、海水淡化末效真空、海水淡化第一效浓盐水温度等,从而实现海水淡化装置故障时,汽轮发电机组联锁控制及事故保护。

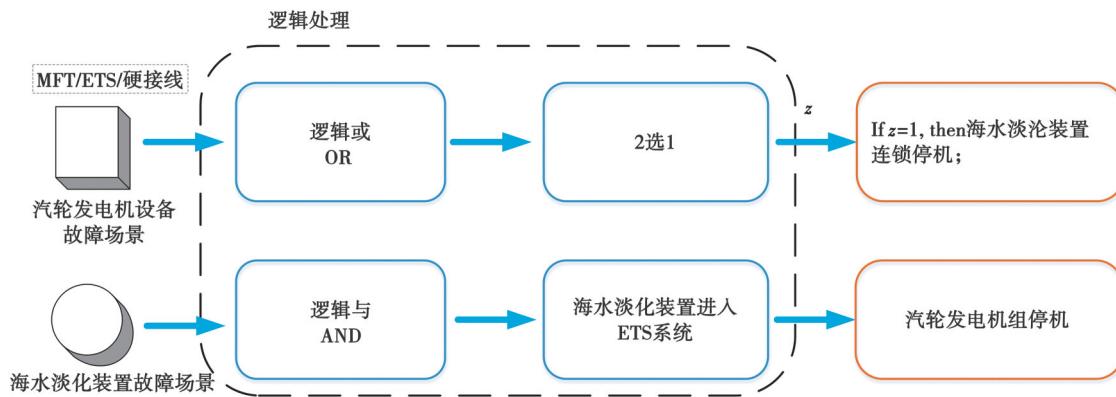


图5 水电共生系统设备故障场景及低负荷场景下安全联锁保护逻辑

Fig. 5 Safety interlock protection logic under equipment failure and low load conditions in a hydropower symbiosis system

对于汽轮发电机组运行出现问题的情况,现场设备故障通过MFT、ETS、急停按钮传入汽轮发电机组安全联锁保护系统,触发汽轮发电机主体及辅助设备故障。此信号进入2选1模块,与汽轮发电机组故障跳机信号维持设定时间,输出海水淡化的未来决策。若汽轮发电机组故障跳机信号维持设定时间以上,则海水淡化装置联锁停机,若汽轮发电机组故障跳机信号仅仅是突变,则海水淡化装置维持原状态。

急停按钮作用为:当实际运行时,为了应对一些极端情况的出现,避免因部分传感器故障导致的保护逻辑不动作的情景,需要在就地和集控室设计急停按钮以供运行人员使用。当停机按钮按下时,汽轮发电机组便会紧急停机。ETS及MFT故障联锁条件如表1所示,包括汽轮机转速、润滑油压过低、引风机跳闸等信号,共计19项。

表1 ETS和MFT故障联锁条件
Table 1 Fault conditions causing ETS and MFT

| ETS故障联锁条件 | MFT故障联锁条件 |
|-------------|--------------------|
| 汽轮机转速>110% | 送风机均跳闸 |
| 汽轮机轴向位移过大 | 引风机均跳闸 |
| 润滑油压过低(3取2) | 给水泵全部跳闸 |
| 支撑轴承温度过高(或) | 炉膛压力高越限(3取2) |
| 真空度过低(3取2) | 炉膛压力低越限(3取2) |
| 发电机故障 | 全炉膛燃料丧失 |
| 手动停机保护 | 全炉膛火焰丧失 |
| 汽轮机胀差大 | 火检冷却风丧失(3取2) |
| 汽轮机排汽压力高 | 汽包水位高越限 汽包水位低越限 |

图5中汽轮发电机组故障联锁海水淡化装置停机设置2选1模块,其作用为防止汽轮发电机组设备故障场景信号跳变引起海水淡化装置误停机。2选1模块对故障场景信号进行分析,当汽轮发电机组MFT或ETS持续一小段时间以上时,2选1模块发出停机指令,海水淡化装置连锁停机,否则海水淡化装置不动作,具体如式(4)所示。

$$z=f(p)=\begin{cases} 0, & p < t, \\ 1, & p \geq t, \end{cases} \quad (4)$$

式中: p 为MFT或ETS持续时间; t 为设定值; t 的值根据经验设定,默认值为10 s。当MFT或ETS持续 t s以上时,海水淡化装置停机,此模块的作用为避免MFT或ETS跳变引起的误动作。

2.3 汽轮发电机组低负荷场景下的安全保护逻辑设计

对于汽轮发电机组低负荷运行场景,设计汽轮机乏汽出口总管联锁密闭式插板阀控制,来实现汽轮发电机组极低负荷场景下海水淡化装置的E模式、T+E模式、T模式转换。相对于蝶阀在开启时阀板会受到流体的冲刷、闸阀开启时阀座的密封部件会受冲刷,均容易影响密封性,不适合用于严密隔绝的特点,密闭式插板阀在密封性上具有显著优越性。具体表现在密闭式插板阀通过插入盲板并施加夹紧力来实现密封,开启时只需释放压紧力并抽出盲板即可,整个过程都在密封的阀壳内完成,与外界隔绝。因此,基于其密封性强的特点,选择其作为汽轮发电机组和海水淡化装置之间的有效隔断装置。

通过边界判断模块判断汽轮发电机组负荷是否超出抽汽调节阀门调整边界。当汽轮发电机组负荷正常调整时,汽轮发电机组正常运行,海水淡化装置模式设定为E模式,即为水电共生模式,E模式下,全密闭式插板阀开启,海水淡化采用汽轮机乏汽作为热源;T+E模式下,乏汽流量低,无法满足海水淡化装置热源要求,增加外管网蒸汽作为补充,抽汽阀门开启,海水淡化采用乏汽和外部蒸汽减温减压后的蒸汽作为汽源实现海水淡化装置满负荷产水;汽轮发电机组负荷过低时,汽轮发电机组停机,海水淡化装置切换为T模式,全密闭式插板阀关闭,海水淡化采用外部蒸汽管网的蒸汽减温减压作为热源;汽轮发电机组低负荷下的安全保护逻辑设计如图6所示。

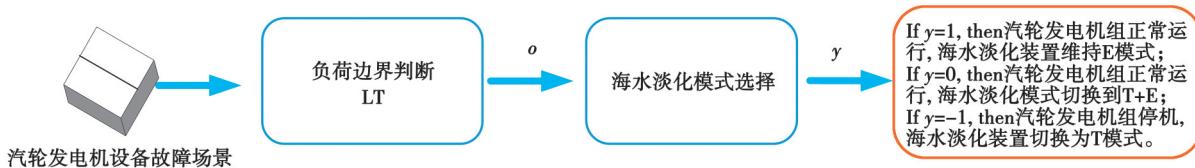


图6 低负荷下的安全保护逻辑
Fig. 6 Security protection logic under low load

1) 负荷边界判断。实际运行过程中,汽轮发电机组负荷的调整范围是有限的,当汽轮发电机组负荷调整超出其所能调整的范围时,无法维持系统稳定运行,存在安全隐患,而汽轮发电机组和海水淡化装置紧密结合。因此,必须先进行边界判断,为后续海水淡化装置策略制定奠定基础,具体为

$$o=f(x)=\begin{cases} 0, & x < a, \\ 1, & x \geq a, \end{cases} \quad (5)$$

式中: o 为边界模块的输出,布尔量; x 为发电机组的负荷值。 a 为负荷边界,常数,边界由抽汽阀门开度0~100引起的乏汽流量变化与海水淡化装置正常运行所需要的最小乏汽流量确定。

2) 海水淡化模式选择及能效计算。海水淡化装置可选择的运行模式为E模式、T+E模式、T模式3种,如图7所示。海水淡化装置运行模式的切换规则是系统负荷调节的核心。任一时刻,只允许在3种模式中选择1种进行设定。当汽轮发电机组负荷高于临界值 b 时,汽轮发电机组正常运行,海水淡化装置模式选择为水电共生的E模式;当汽轮发电机组负荷高于 a 且低于 b 时,汽轮发电机组能正常运行,海水淡化装置切换为T+E模式,T+E模式是汽轮发电机组无法维持E模式时,介于E模式和T模式之间的模式,在保证海水淡化高效运行的基础上,可以充分利用汽轮机的乏汽。当边界判断模块输出为0时,即汽轮发电机组负荷值低于 a 时,汽轮发电机组只能停机,海水淡化装置切换为T模式;具体如式(6)所示。

$$y=f(o, p)=\begin{cases} -1 & o=0, \\ 1, & x \geq b \\ 0, & a \leq x < b \\ -1, & x < a \end{cases} \quad (6)$$

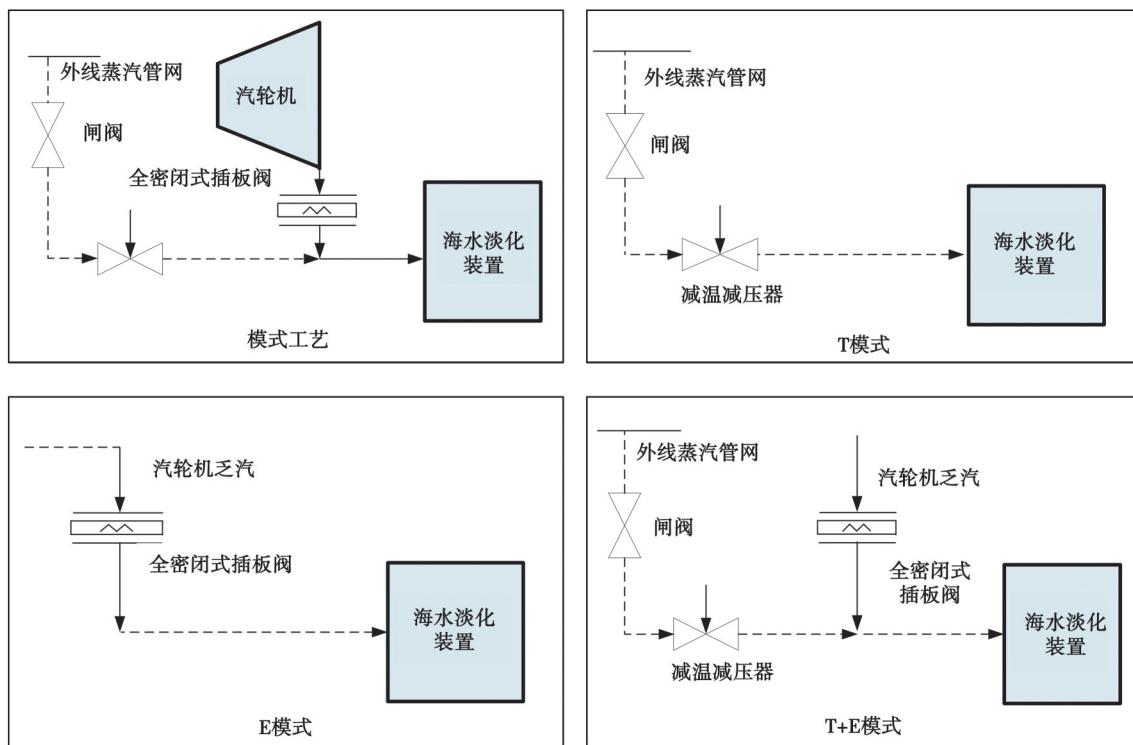


图7 海水淡化装置模式

Fig. 7 Modes of desalination units

式中: y 为海水淡化模式选择模块的输出; b 为维持E模式所需最小乏汽流量时对应的负荷值,根据实验确定。 a 为海水淡化的负荷边界,常数,边界由抽汽阀门开度0~100引起的乏汽流量变化与海水淡化装置正常运行所需要的最小乏汽流量确定。

水电共生系统的能量利用率和能量耗散率可表示为

$$\eta = \frac{Q_{\text{useful}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{Q_i^c + Q_i^u}{Q_i^g + Q_i^w} \times 100\%, \quad (7)$$

式中: η 为系统的能量利用率; Q_{useful} 为系统的有用能; Q_{in} 为系统的输入能量; Q_i^c 为抽汽、发电和产水带出的能量; Q_i^u 为系统的回收的能量; Q_i^g 为外界供给的能量; Q_i^w 为物料自身携带的能量。

$$\lambda = 1 - \frac{Q_{\text{useful}}}{Q_{\text{in}}} = \frac{Q_i^g + Q_i^w - Q_i^c - Q_i^u}{Q_i^g + Q_i^w} \times 100\% = \frac{Q_i^w}{Q_i^g + Q_i^w} \times 100\%, \quad (8)$$

式中: λ 为能量耗散率; Q_i^w 为耗散到环境的能量。

某临海钢厂配置汽轮发电机组容量为25 MW/h、海水淡化装置容量为1.25万t/d。在E模式下,海水淡化装置满负荷产水,连续稳定运行24 h,按照汽轮发电机组满负荷运行时系统参数计算, Q_i^g 为33.46 kgce/t水、 Q_i^w 为1.31 kgce/t水、 Q_i^c 为17.47 kgce/t水、 Q_i^u 为0.95 kgce/t水,热能利用效率可达到53.0%。在T模式下,汽轮机不提供热源,维持海水淡化满负荷产水,按照汽轮发电机组满负荷运行时系统参数计算, Q_i^g 为33.46 kgce/t水、 Q_i^w 为1.42 kgce/t水、 Q_i^c 为7.11 kgce/t水、 Q_i^u 为1.42 kgce/t水,热能利用效率仅为24.5%。T+E模式介于T模式与E模式之间,热能利用效率在24.5%~53.0%之间。由水电共生系统的能量利用率和能量耗散率计算公式可以分析发现,E模式可以极大提高热能利用效率,降低能量损失。

2.4 水电共生系统的安全控制策略特点

水电共生系统的安全控制策略的特点如图8所示,针对水电共生系统用海水淡化首次取代传统水电联产系统凝汽器造成启动逻辑空白无法启动的问题,设计了一套适配水电共生系统的启动逻辑,在实现系统正常启动的同时,通过逻辑优化还可以有效减少系统的启机时间。在设备故障场景下,实现了保证设备人身安全的保护逻辑的创新设计,可以实现设备故障场景下水电共生系统的安全停机,同时通过将海水淡化的关键

信号与汽轮机的ETS系统进行联锁，并将ETS信号引入海水淡化保护系统中，增强了系统的安全性。针对汽轮发电机组的低负荷运行场景，通过设计了T模式、E模式、T+E模式3种模式的切换逻辑，有效解决了低负荷下海水淡化装置被迫停机的安全问题。

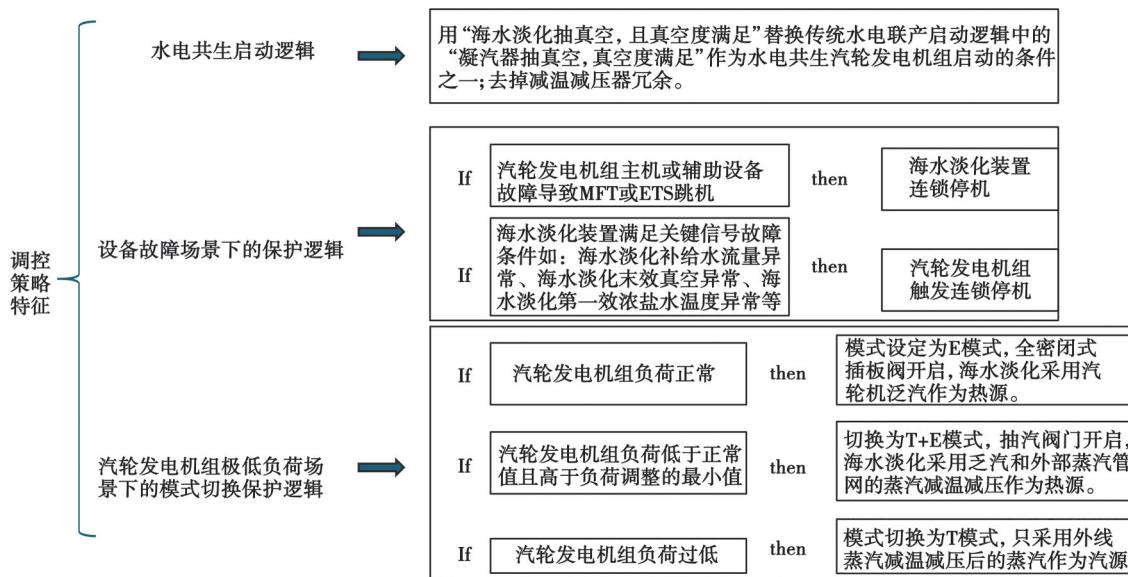


图8 水电共生系统安全控制策略的特点及其应用场景

Fig. 8 Characteristics and application scenarios of safety control strategies for hydropower symbiosis systems

3 工程应用案例

本控制逻辑已经应用于某沿海钢铁厂水电共生系统中，通过实际运行数据对安全控制逻辑进行验证。选取3种场景进行控制逻辑的有效性验证。第1种场景为水电共生系统的启动场景，并与传统水电联产系统启动场景进行对比；第2种场景为水电共生系统设备故障场景，从汽轮机侧和海水淡化装置侧分别进行，验证设备故障下，安全控制策略的有效性；第3种场景为汽轮发电机组低负荷场景，验证汽轮发电机组低负荷情况下，安全逻辑的有效性。

3.1 水电共生系统正常启动逻辑案例及效果验证

该钢厂建有水电联产与水电共生的2套不同系统，部署为2组平行的装置，平行装置的设备机组容量大小完全一致。2套系统水电联产与水电共生系统的启动过程均选取了2023年10月9日10:46—14:46的实际启动过程数据。数据比较如图9所示。

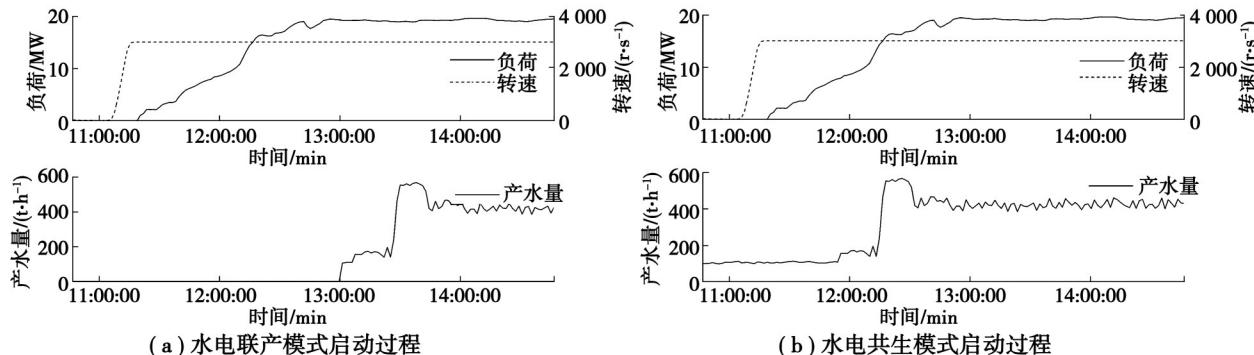


图9 水电联产与水电共生启动过程对比

Fig. 9 Comparison of startup processes between hydropower cogeneration and hydropower symbiosis

从图9(b)可知,提出的水电共生系统启动逻辑可以实现水电共生系统的顺利启动。通过图9(a)与(b)的对比可知,水电联产启动时间大概为3 h,而水电共生启动时间仅为2 h左右,大幅度减少了启动时间。因为改变了原第8步的逻辑,在水电联产技术下,汽轮发电机组需满负荷后抽汽品质达到要求方可启动海水淡化装置,而在水电共生系统启动逻辑下,乏汽产生后即可启动海水淡化装置,可使启动时间明显缩短。

3.2 设备故障场景下系统安全保护逻辑案例

3.2.1 汽轮机设备故障下水电共生系统安全保护逻辑案例

选取2023年3月23日19:00—23:00由于汽轮机轴故障引起安全保护停机的实际运行数据进行验证,数据如图10所示。由图10可知,在汽轮机发生故障的21:46时,汽轮机轴位移突然增大,达到1.137 9 cm,正常运行的轴位移运行范围要求为[-1.5 cm, 0.5 cm],显然此时轴位移超过上限值,表明汽轮发电机组存在故障,汽轮发电机组触发ETS保护停机,发电机组立刻解列,同时转速开始从3 000 r/s开始减少,发电机组有序停机,海水淡化产水量随之从495 t/h缓慢减小,由于管道内水短时间内无法完全排除,流量显示未达到0 t/h,最后减小到106 t/h左右,表明海水淡化已经停机完毕。实践数据表明提出的控制逻辑能够在汽轮发电机组设备故障场景发生时使汽轮发电机组和海水淡化装置有序停机。

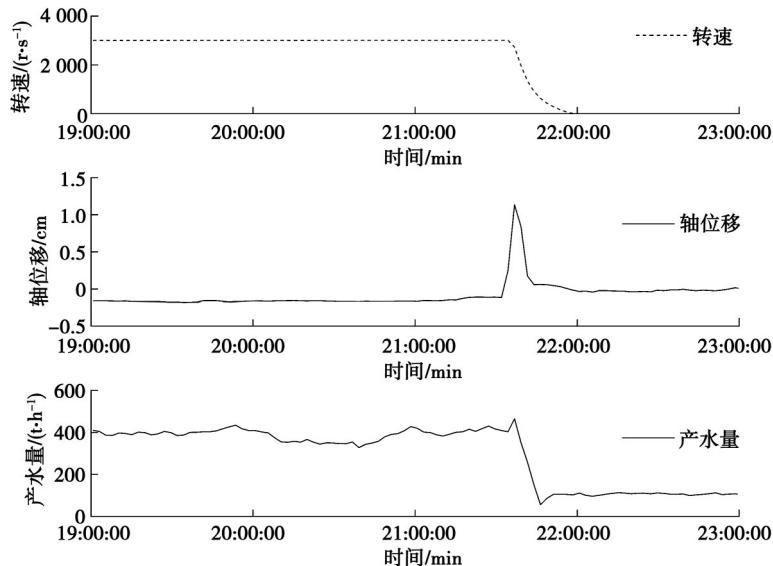


图10 汽轮机设备故障引起停机
Fig. 10 Turbine equipment failure causing shutdown

3.2.2 海水淡化设备故障下水电共生系统安全保护逻辑案例

选取以2023年10月9日7:00—11:00由海水淡化冷凝水泵故障引起安全保护停机的实际运行数据进行验证,数据如图11所示。由图可知,当10:06时,冷凝水泵电流信号由正常运行范围90 A左右突变至115 A,超过其安全范围[85 A, 110 A]的高限110 A,电流的增大表征冷凝水泵出现故障,由于海水淡化发生故障信号,海水淡化装置联锁停机,产水量从495 t/h缓慢减少到0 t/h,由于管道内水短时间内无法完全排出,流量显示未达到0 t/h,最后减小到106 t/h左右,这表示海水淡化已经停机完毕。海水淡化装置保护停机瞬间,联锁汽轮发电机组触发ETS逻辑,汽轮发电机组同时保护停机,汽轮发电机组瞬间解列,其转速从3 000 r/s缓慢减小为0 r/s,此时间段内,轴位移处于正常范围内,表征汽轮发电机组轴状态正常,汽轮发电机组安全停机,避免了设备故障范围的扩大和人身财产损失。图11的案例数据显示,提出的安全保护控制逻辑能够在海水淡化装置设备发生故障时使汽轮发电机组和海水淡化装置有序停机。

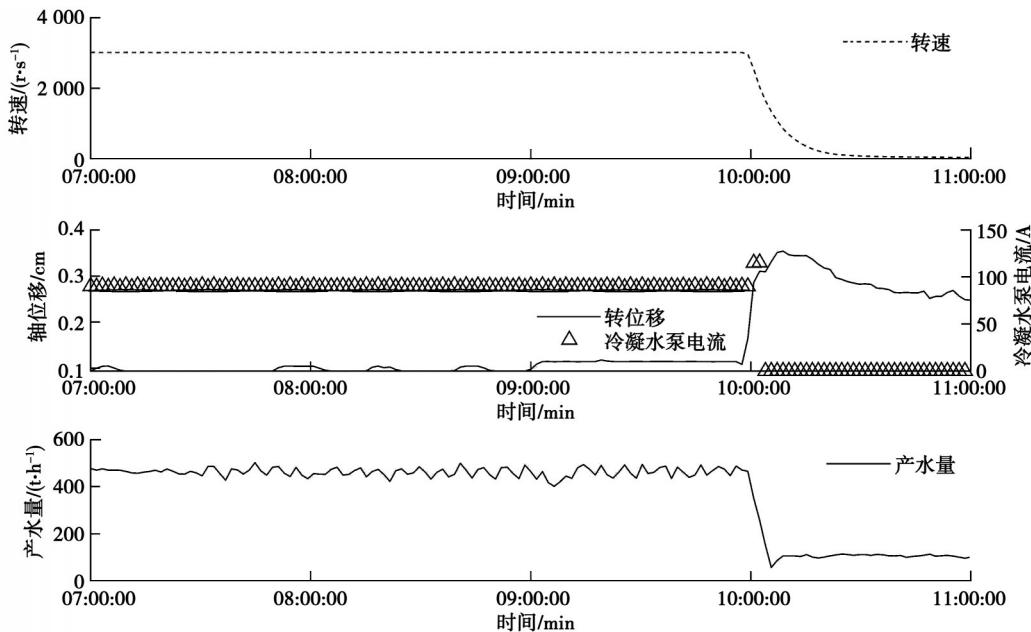


图 11 海水淡化装置故障引起停机

Fig. 11 Seawater desalination unit failure causing shutdown

3.3 汽轮机极低负荷运行海水淡化模式切换逻辑案例

选取以 2023 年 1 月 5 日 9:55—13:55 分和 2023 年 2 月 14 日 14:45—18:45 的实际运行数据, 进行汽轮发电机组低负荷下海水淡化模式切换的验证。由图 12(a)可知, 11:38 时, 汽轮发电机组发电量由 25 MW 缓慢下降, 12:14 时, 发电量降低到 15 MW, 达到海水淡化模式切换条件, 海水淡化切换为 T+E 模式, 产水量维持稳定。由图 12(b)可知, 16:49 时, 汽轮发电机组由 15 MW 缓慢下降, 到 17:06 时, 发电量降低到 12 MW, 海水淡化切换到 T 模式。所提出的控制逻辑能够在汽轮机发电机组低负荷运行期间, 海水淡化装置可以通过模式切换, 依然保持海水淡化装置以及水电共生系统的稳定高效运行。

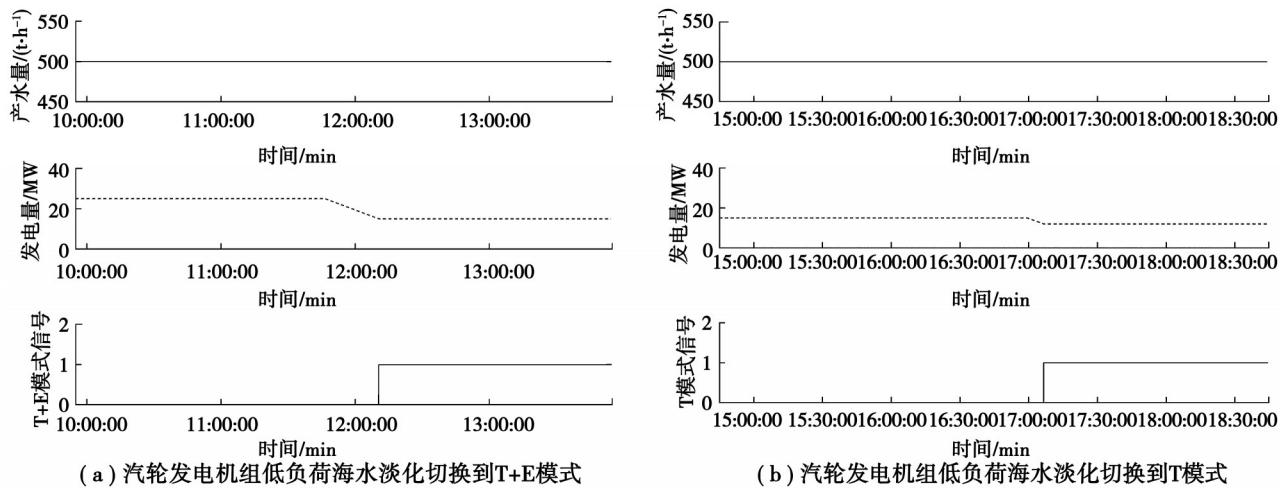


图 12 汽轮发电机组低负荷海水淡化模式切换

Fig. 12 Low-load seawater desalination switch to T mode for steam turbine generator units

3.4 水电联产与水电共生故障案例对比

选取水电联产模式下, 与上述水电共生故障案例相似的事故案例进行对比, 结果如图 13(a)(b)所示。图 13(a)展示了 2022 年 5 月 12 日 15:13—19:13 汽轮发电机组由于轴位移过大导致的停机场景; 图 13(b)展示了

2022年9月24日9:26—13:26海水淡化装置冷凝水泵电流大导致的海水淡化停机场景。通过对图13(a)(b)与图10~11可知,水电联产模式和水电共生模式在故障停机时存在差异:水电共生模式下,汽轮发电机组停机时,海水淡化装置接收到汽轮发电机组停机信号可同时联锁停机,而水电联产模式下,汽轮发电机组停机后,当产水量出现明显下降时,运行人员才发现问题,手动停机,增加了海淡辅助设备故障风险。水电共生模式下,海水淡化装置停机时,由于设计的安全控制逻辑作用,汽轮发电机组同时停机,而水电联产模式下,汽轮发电机组不停,转速一直维持在3 000 r/s,由于海淡的停机,用汽量迅速减小,导致抽汽管网压力逐渐升高,当运行人员发现过高时,关闭抽汽阀门,其压力才缓慢下降,这个过程增加了抽汽管网爆管风险,且受限于水电共生工艺,若如水电联产一样保持汽轮发电机组不停,会导致尾部憋压,严重损坏汽轮机的安全。这也从另一个角度验证了提出的安全逻辑的优越性。

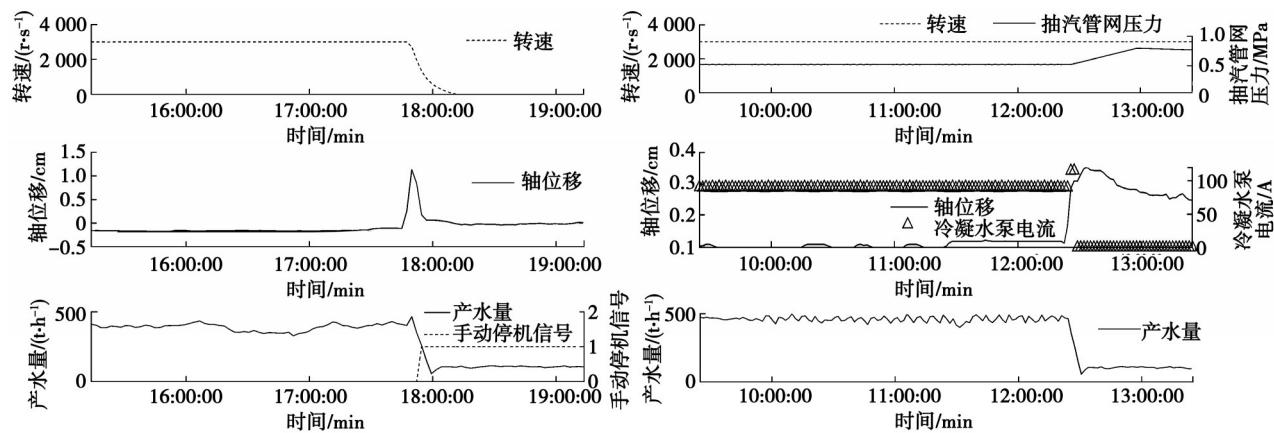


图13 水电联产模式下用于对比的故障案例

Fig. 13 Fault case in hydropower cogeneration mode

4 结束语

1) 针对临海钢铁企业采用水电共生海水淡化新技术的系统,研究适合水电共生系统的启动逻辑,重点设计了海水淡化抽真空及海水热源投入控制逻辑,弥补了传统水电联产启动控制的逻辑空白,实现水电共生系统的安全启动。系统投入5 a时间,共经历5次年修,每次检修完成后,均可实现安全有序启动。

2) 设计水电共生系统的设备故障情况下的联锁保护逻辑,可以在汽轮发电机组或者海水淡化装置的设备故障发生时,实现汽轮发电机组和海水淡化装置的安全保护停止。同时安全联锁有效,在任一侧发生设备故障时,均可实现另一侧的安全停止。投运的5 a中,相关故障场景共出现9次,均避免了安全事故,安全保护联锁投入率达100%,既可以有效保护系统设备,也避免造成人身安全事故。

3) 设计汽轮机低负荷场景下海水淡化装置的模式切换逻辑,可实现发电机组大范围负荷调控场景下,尤其当汽轮发电机组处于极低负荷时,通过全密闭式盲板阀的控制,实现海水淡化装置模式切换,将水电共生由E模式切换到T+E模式或T模式。汽轮发电机组负荷在12~15 MW时,海水淡化装置T+E模式满负荷产水;12 MW以下时,海水淡化装置T模式稳定运行,以外网的热源输入保证海水淡化的正常产水。投运期间年均模式切换6次,有效保证水电共生系统的安全稳定运行。

参考文献

- [1] 张朝,张欣欣.基于Stackelberg博弃的钢铁企业余热余压发电的上网电价策略[J].工程科学学报,2023,45(4):643-653.
Zhang C, Zhang X X. Feed-in tariff strategy of waste heat and residual pressure power generation in steel enterprises based on the Stackelberg game[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(4): 643-653. (in Chinese)
- [2] 郑馨竺.钢铁行业水-能协同节约的可行空间与技术选择[D].北京:清华大学,2018.

- Zheng X Z. Feasibility analysis and technology choice for water-energy conservation synergy in the iron and steel sector[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018. (in Chinese)
- [3] 石春艳, 张国帅, 李益, 等. 碳中和背景下的钢化联产发展趋势[J]. 过程工程学报, 2022, 22(10): 1317-1324.
- Shi C Y, Zhang G S, Li Y, et al. Development trend for co-production of steel and chemical in the context of carbon neutrality[J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2022, 22(10): 1317-1324. (in Chinese)
- [4] 李毅仁, 邢奕, 孙宇佳, 等. 钢铁工业低碳绿色发展路径与实践[J]. 工程科学学报, 2023, 45(9): 1583-1591.
- Li Y R, Xing Y, Sun Y J, et al. Low-carbon green development path and practice of the iron and steel industry[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(9): 1583-1591. (in Chinese)
- [5] 潘崇超, 王博文, 侯孝旺, 等. 基于 LMDI-STIRPAT 模型的中国钢铁行业碳达峰路径研究[J]. 工程科学学报, 2023, 45(6): 1034-1044.
- Pan C C, Wang B W, Hou X W, et al. Carbon peak path of the Chinese iron and steel industry based on the LMDI-STIRPAT model[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(6): 1034-1044. (in Chinese)
- [6] Kronenberg G, Lokiec F. Low-temperature distillation processes in single- and dual-purpose plants[J]. Desalination, 2001, 136(1/2/3): 189-197.
- [7] Darwish M A, Alotaibi S, Alfahad S. On the reduction of desalting energy and its cost in Kuwait[J]. Desalination, 2008, 220(1/2/3): 483-495.
- [8] 姚洋, 陈志莉, 郑宏飞, 等. 带肋片多效管式海水淡化装置的实验研究[J]. 太阳能学报, 2016, 37(2): 511-515.
- Yao Y, Chen Z L, Zheng H F, et al. Experimental study of multi-effect tubular desalination still with fins[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2016, 37(2): 511-515. (in Chinese)
- [9] 郑涛杰, 陈志莉, 杨毅. 膜蒸馏技术应用于海水淡化的技术分析与研究进展[J]. 重庆大学学报, 2017, 40(12): 71-78.
- Zheng T J, Chen Z L, Yang Y. A review and technical analysis about membrane distillation for desalination[J]. Journal of Chongqing University, 2017, 40(12): 71-78. (in Chinese)
- [10] 朱启勇, 曹文浩. 火力发电机组一键启停功能设计与实施[J]. 自动化博览, 2023, 40(3): 76-79.
- Zhu Q Y, Cao W H. Design and implementation of automatic plant start and stop in thermal power plant[J]. Automation Panorama, 2023, 40(3): 76-79. (in Chinese)
- [11] 易雪东. 燃煤火电机组自启停控制系统研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2023.
- Yi X D. Research on automatic startup and shutdown control system for coal-fired thermal power units[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2023. (in Chinese)
- [12] 赵俊杰, 冯树臣, 田景奇, 等. 基于燃煤智能发电 ICS 的主辅机一键启停 APS 技术应用分析[J]. 能源科技, 2021, 19(1): 41-45.
- Zhao J J, Feng S C, Tian J Q, et al. Application analysis of one-button start-up & shut-down technology of APS for main and auxiliary machines based on ICS for coal-fired power generation[J]. Energy Science and Technology, 2021, 19(1): 41-45. (in Chinese)
- [13] 胡晓花. 火电厂低温多效海水淡化装置及其控制系统[J]. 热力发电, 2009, 38(8): 122-124.
- Hu X H. The low-temperature and multi-effect seawater desalting plant in thermal power stations and control system thereof[J]. Thermal Power Generation, 2009, 38(8): 122-124. (in Chinese)
- [14] 李捍华, 郑卫东, 梁海腾, 等. 1 000 MW 火电机组外置蒸汽冷却器及控制保护逻辑[J]. 浙江电力, 2016, 35(1): 46-49.
- Li H H, Zheng W D, Liang H T, et al. External steam cooler of 1 000 MW thermal power units and its control and protection logic[J]. Zhejiang Electric Power, 2016, 35(1): 46-49. (in Chinese)
- [15] 彭军, 黄中华, 方侃, 等. 火电机组 DCS 系统逻辑组态细节优化[J]. 青海电力, 2014, 33(1): 32-37.
- Peng J, Huang Z H, Fang K, et al. Optimization of DCS system logic configuration details for thermal power[J]. Qinghai Electric Power, 2014, 33(1): 32-37. (in Chinese)
- [16] 冯斌, 王浩, 周新洋, 等. 循环流化床机组锅炉主保护系统特点分析及逻辑优化[J]. 华北电力技术, 2016(11): 49-52.
- Feng B, Wang H, Zhou X Y, et al. Development and research of CFB protection system[J]. North China Electric Power, 2016(11): 49-52. (in Chinese)
- [17] 齐温圣, 许崇江, 于仁朋. 燃煤发电机组汽机保护逻辑优化探讨[J]. 冶金设备, 2018(S1): 91-92, 69.
- Qi W S, Xu C J, Yu R P. Discussion on the protection logic optimization of coal-fired generator set[J]. Metallurgical Equipment, 2018(S1): 91-92, 69. (in Chinese)

- [18] 陈节涛, 吴尔夫, 张林, 等. 火电厂 FSSS 系统 MFT 硬回路优化与控制逻辑完善[J]. 电站系统工程, 2022, 38(5): 64-66, 69.
Chen J T, Wu E F, Zhang L, et al. MFT hard loop optimization and control logic perfection of FSSS in TPP[J]. Power System Engineering, 2022, 38(5): 64-66, 69. (in Chinese)
- [19] Li G, Tao X Y, Zhang Z L, et al. Dynamic simulation of MFT and BT processes on a 660 MW ultra-supercritical circulating fluidized bed boiler[J]. Energies, 2023, 16(5): 2309.
- [20] 王帆. 锅炉 MFT 保护逻辑优化的研究[J]. 自动化应用, 2023(8): 111-115.
Wang F. Research on logical optimization of MFT protection for boilers[J]. Automation Application, 2023(8): 111-115. (in Chinese)
- [21] 袁世通. 超(超)临界机组低负荷时 MFT 动作原因分析及优化策略[J]. 华电技术, 2017, 39(7): 48-51, 79.
Yuan S T. Super(ultra) critical unit low load MFT cause analysis and improvement strategy[J]. Huadian Technology, 2017, 39(7): 48-51, 79. (in Chinese)
- [22] 高林, 王林, 刘畅, 等. 火电机组深度调峰热工控制系统改造[J]. 热力发电, 2018, 47(5): 95-100.
Gao L, Wang L, Liu C, et al. Thermal control system retrofit for deep peak load regulation of thermal power unit[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(5): 95-100. (in Chinese)
- [23] 陆陆, 韩峰, 钟文晶, 等. 大型火电机组低负荷运行辅机跳闸控制策略研究[J]. 自动化仪表, 2020, 41(11): 70-75.
Lu L, Han F, Zhong W J, et al. Research on auxiliary equipment trip control strategy for large capacity units under low load operation[J]. Process Automation Instrumentation, 2020, 41(11): 70-75. (in Chinese)
- [24] 付昱, 何金起, 林锴翔. 基于先进检测的锅炉低负荷安全运行控制系统[J]. 中国安全科学学报, 2022, 32(S2): 94-99.
Fu Y, He J Q, Lin K X. Safety operation control system for boilers under low load based on advanced detection[J]. China Safety Science Journal, 2022, 32(S2): 94-99. (in Chinese)
- [25] 唐智新, 吴礼云, 梁红英. 低温多效蒸馏海水淡化蒸发器替代汽轮机凝汽器可行性及应用[J]. 水处理技术, 2015, 41(10): 113-115.
Tang Z X, Wu L Y, Liang H Y. The research and application of LT-MED seawater desalination evaporator substitute for steam turbine condenser[J]. Technology of Water Treatment, 2015, 41(10): 113-115. (in Chinese)
- [26] 唐智新, 吴礼云, 张岩岗, 等. 密闭式插板阀在前置发电海水淡化系统中的应用[J]. 水处理技术, 2017, 43(10): 37-39.
Tang Z X, Wu L Y, Zhang Y G, et al. Application of closed type gate valve in pre-generation seawater desalination system[J]. Technology of Water Treatment, 2017, 43(10): 37-39. (in Chinese)

(编辑 郑洁)