

1 000 MW 超超临界机组凝结水泵变频优化 试验及应用

曾海波,李 铭,陈节涛

(国电汉川发电有限公司,湖北 汉川 431614)

摘 要:为了进一步降低凝结水泵运行的厂用电率占比,解决超超临界机组参与电网深度调峰工况下凝结水泵变频控制节能效果受限的问题,通过在1 000 MW 超超临界机组上开展现场试验并获取特性数据,针对当前运行现状提出一种适合深度调峰且机组热力系统安全的凝结水泵变频控制策略,并加以实施和变工况验证。优化运行结果表明:该控制策略在保证机组安全稳定运行的前提下,能有效降低凝结水泵的功耗,凝结水泵耗电率由0.218%下降至0.152%;在低负荷阶段节能效果更为显著,在500 MW 工况下,凝结水泵功耗由1 057 kW下降至633 kW,下降了40.1%;在400 MW 工况下,凝结水泵功耗由1 035 kW下降至512 kW,下降了50.5%。

关 键 词:超超临界机组;凝结水泵;变频;控制策略;厂用电率;水位调节

中图分类号:TK323

文献标识码:A

DOI:10.16146/j.cnki.rndlgc.2022.06.023

[引用本文格式]曾海波,李 铭,陈节涛.1 000 MW 超超临界机组凝结水泵变频优化试验及应用[J].热能动力工程,2022,37(6):169-175. ZENG Hai-bo, LI Ming, CHEN Jie-tao. Frequency conversion optimization test and application of condensate pump of 1 000 MW Ultra Supercritical Unit[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2022, 37(6):169-175.

Frequency Conversion Optimization Test and Application of Condensate Pump of 1 000 MW Ultra Supercritical Unit

ZENG Hai-bo, LI Ming, CHEN Jie-tao

(Guodian Hanchuan Power Generation Co., Ltd., Hanchuan, China, Post Code:431614)

Abstract: In order to further reduce the proportion of auxiliary power consumption of condensate pump operation and solve the problem of limited energy-saving effect of condensate pump frequency conversion control under the condition of ultra supercritical unit participating in power grid deep peak regulation, through carrying out field test and obtaining characteristic data for 1 000 MW ultra supercritical unit, a frequency conversion control strategy of condensate pump suitable for deep peak regulation and unit thermal system safety was proposed, implemented and verified for the current operation status. The optimized operation results show that the control strategy can effectively reduce the power consumption of the condensate pump on the premise of ensuring the safe and stable operation of the unit, and the power consumption rate of the condensate pump is reduced from 0.218% to 0.152%. The energy saving effect is more significant in the low load stage. Under the 500 MW working condition, the power consumption of condensate pump is decreased by 40.1% from 1 057 kW to 633 kW; under the 400 MW working condition, the power consumption of condensate pump is decreased by 50.5% from 1 035 kW to 512 kW.

Key words: ultra supercritical units, condensate pump, frequency conversion, control strategy, service power consumption rate, water level regulation

引 言

近年来国内新能源并网装机容量和发电量高速增长,大规模新能源接入电网后,电力系统的电力电能时空平衡难度将显著增大,越来越多的超超临界机组参与到电网的深度调峰^[1-3],机组主辅机运行参数已明显偏离设计的高效区域。1 000 MW 超超临界机组全年 500 MW 以下负荷时间段占比达到 30%,低负荷下具有更优的经济性显得尤其重要。因此,深度挖掘凝结水泵节能空间仍然是各发电企业重点研究方向之一^[4-5]。

针对凝结水泵变频技术运行应用,国内已有较多的相关研究。徐江等人^[6]分析了二次再热机组制约凝结水泵变频的原因,提出对热力系统进行改造和优化。王小龙等人^[7]分析了除氧器水位调节阀和凝结水泵变频器的性能特点,提出了一种控制策略,来消除除氧器水位控制和凝结水母管压力控制回路之间的相互耦合。林琳等人^[8]分析了中低负荷段凝结水系统运行特性,探索了凝结水泵最低运行频率。关于凝结水泵变频技术应用的相关研究多针对变频技术应用后的能耗计算^[9-11]。对于结合除氧器上水调节阀和凝结水泵固有特性的凝结水系统运行分析以及机组在 40% 负荷以下对凝结水系统进行系统性优化的相关研究较少。

本文将凝结水泵节能作为系统性的问题进行分析,考虑除氧器上水调节阀流量特性、凝结水泵本体振动特性、低负荷下工频备用泵联启和凝结水用户需求安全性的问题。以某超超临界 1 000 MW 机组为研究对象,分析了凝结水系统全负荷段及恶劣工况切换的运行特性,提出了一种适合深度调峰且机组热力系统安全的凝结水泵变频控制策略,并加以实施和变工况验证,获得了显著的节能效果。

1 设备概况及运行现状

该 1 000 MW 机组的凝结水系统配置 2 台 100% 容量的 TDM-VB5 型的立式多级筒袋形离心泵。2 台凝结水泵电机共用 1 套智能高压变频调速系统,1 台变频方式运行,1 台工频方式备用。轴封加热器出口处设置 1 台 100% 流量的气动主调节

阀、1 台 30% 流量的气动副调节阀和 1 台 100% 流量的旁路电动截止阀。主要设计工况参数如表 1 所示。

表 1 凝结水泵及电机设计参数
Tab. 1 Design parameters of condensate pump and motor

设备参数	数值
水泵流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	2 205
扬程/m	322
转速/ $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$	992
水泵效率/%	83
最小流量/ $\text{t} \cdot \text{h}^{-1}$	551
关闭压头/m	412
电机额定功率/kW	2 700
额定电压/kV	6
额定电流/A	303
电机效率/%	95

机组配置低温省煤器系统,凝结水由 8 号低压加热器出水口引水至低温省煤器系统,经过烟气换热加热后,回水至 7 号低压加热器入口,低温省煤器系统压损约为 0.2 MPa。前期为实现凝结水泵变频高效运行,在给水泵密封水管道上增加了 2 台额定功率 45 kW 的给水泵密封水增压泵,运行时 1 运 1 备。

优化前采用除氧器上水调节阀控制除氧器水位,凝结水泵变频控制凝结水母管压力。凝结水母管压力在负荷 500 MW 及以下时控制在 2.0 MPa,负荷 750 MW 时控制在 2.5 MPa,负荷 1 000 MW 及以上时控制在 3.0 MPa。该机组凝结水系统在各负荷段的主要运行参数及目前国内优秀水平的运行参数如表 2 所示。

由表 2 可知,该机组在各负荷段的凝结水系统节流损失(压损)、凝结水母管压力和凝结水系统耗电量均高于同类型机组的国内优秀水平值。分析运行数据可知,该机组主要存在以下问题:(1) 未采用节流损失较小的控制策略,即凝结水泵变频控制除氧器水位,除氧器上水调节阀控制凝结水母管压力;(2) 受限于凝结水泵振动特性未知,凝结水泵变频控制最低频率设置为 37 Hz,导致在 550 MW 以下变频无调节余量,水位调节阀开度减小,节流损失更

大;(3) 受限于给水泵密封水增压泵入口压力需求, 凝结水杂用水母管压力低于 1.2 MPa 以及低压旁路
凝结水母管最低压力设置为 2.0 MPa;(4) 受限于 保护关逻辑限制。

表 2 凝结水系统运行参数
Tab.2 Operating parameters of condensate system

负荷/MW	该机组运行水平				国内优秀值水平			
	凝结水母管	水位调节	系统压损/MPa	凝结水系统	凝结水母管	水位调节	系统压损/MPa	凝结水系统
	压力/MPa	阀开度/%		耗电率/%	压力/MPa	阀开度/%		耗电率/%
1 000	3.0	55	1.5	0.22	2.2	100	0.7	0.15
800	2.7	45	1.4	0.22	2.0	100	0.7	0.15
600	2.2	34	1.3	0.22	1.5	100	0.6	0.15
400	2.0	26	1.2	0.22	1.3	100	0.5	0.15

2 凝结水系统运行特性试验及分析

实现凝结水系统节能降耗,最终的目标是最大限度降低凝结水泵运行频率。运行频率的降低对泵本体振动^[12-14]、给水泵密封水调节控制以及工频备用泵联锁启动对系统的冲击作用都会产生较大影响。因此在改造前对凝结水系统设备及运行参数进行专项试验分析,得出凝结水系统运行的安全运行边界条件,对改造凝结水系统尤其重要。

2.1 凝结水泵结构振动试验及分析

凝结水泵变频运行后常引发结构共振,影响机组安全经济运行。文献[15]通过共振机理分析,得出了变频改造后凝结水泵的主要振源频率范围和影响结构或其组合的固有频率相关因素,全面考虑现场条件、频谱特性、放大系数、共振频率范围和检修周期等因素。对该机组采用手动低频运行实测方法,获取凝结水泵振动数据,如表 3 所示。由表 3 可知,该机组 2 台凝结水泵在 28 Hz 以上频率运行时,轴承处的振动值均小于 50 μm 的运行临界值。

2.2 给水泵密封水增压泵运行特性试验与分析

给水泵密封水系统的绝对安全性是凝结水系统节能改造中必须考虑的。该机组配置的给水泵组为 KSB CHTD7/5 – YNKN300/680 型,给水泵和前置泵均由小汽轮机拖动。给水泵密封水调节阀控制给水泵密封水回水与进水温差小于 8 ℃,给水泵全工况要求压力为 2 ~ 4.05 MPa,流量为 3.65 ~ 16.6 t/h。

表 3 凝结水泵变频运行振动值(μm)

Tab.3 Frequency conversion operation vibration values of condensate pump(μm)

频率/Hz	A 凝结水泵振动值		B 凝结水泵振动值	
	水平方向	垂直方向	水平方向	垂直方向
40	21	14	22	25
38	20	17	25	22
36	19	14	20	17
34	15	13	16	19
32	14	11	17	16
30	10	11	12	15
29	9	10	14	11
28	8	9	10	8

试验选取 4 个典型负荷,手动逐步减小凝结水泵运行频率,凝结水母管压力随之降低,除氧器水位调节阀逐步自动全开,稳定后记录给水泵密封水增压泵及密封水调节阀运行参数,如表 4 所示。

表 4 典型负荷下给水泵密封水系统运行参数

Tab.4 Operating parameters of seal water system of feed pump at typical loads

机组负荷/MW	凝结水母管压力/MPa	密封水增压泵出口压力/MPa	密封水增压泵功率/kW	给水泵进水端密封水调节阀开度/%	给水泵出水端密封水调节阀开度/%
1 000	2.37	4.19	28.6	34	36
800	1.88	3.75	26.6	26	27
600	1.37	3.31	25.2	21	20
400	1.09	3.11	24.2	16	13

由表 4 可知,给水泵密封水增压泵出口压力随着凝结水母管压力降低而降低,但均在给水泵密封水设计压力以上;给水泵密封水增压泵功率随着凝结水母管压力降低而降低,均在其额定功率以下;给水泵进出水端密封水调节阀开度均在 40% 开度以下,调节余量大。

2.3 除氧器上水调节阀节流特性试验与分析

国内同类型机组采用凝结水泵变频控制除氧器水位时,除氧器上水调节阀最常见有两种控制方式:(1) 由调节阀控制凝结水泵母管压力;(2) 调节阀直接超驰开度至 100%。方式一调节阀仍然存在较大的节流损失,方式二虽然调节阀节流损失最小,但出现凝结水泵工频备用泵联锁启动或除氧器水位调节阀切至控制除氧器水位等极端工况下,调节阀从 100% 开度下降到需求开度往往需要 20 s 以上,除氧器水位调节需要人为干预。

采用凝结水泵变频控制除氧器水位策略时,将除氧器水位调节阀限制在一个理想位置,一方面,在需要时可以快速地参与凝结水流量调节,另一方面,使调节阀节流损失较小。在给水泵密封水增压泵运行特性试验的基础上,用手动方式缓慢关闭除氧器上水调节阀。典型工况下除氧器上水调节阀开度对凝结水节流的影响如图 1 所示。

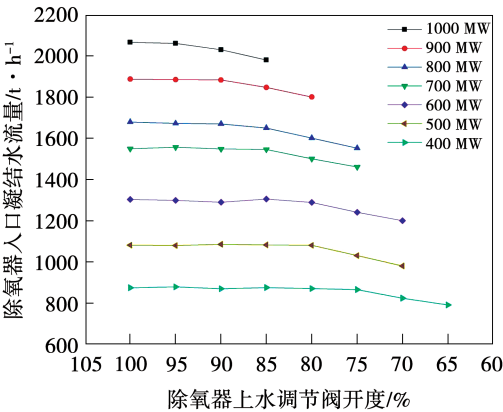


图 1 典型负荷下除氧器上水调节阀开度与凝结水流量的关系曲线

Fig. 1 Relation curve between opening of water supply regulating valve of deaerator and condensate flow at typical loads

由图 1 可知,随着负荷的降低,凝结水流量降低,让除氧器上水调节阀能发挥节流作用需要更小开度。1 000 MW 对应临界节流开度约在 90% 处,400 MW 对应临界节流开度约在 70% 处。

3 凝结水泵变频优化策略

通过试验获取到凝结水泵及电机低频运行安全、给水泵密封水系统全工况稳定和除氧器上水调节阀最优开度等基础数据。结合数据分别对凝结水泵变频器、除氧器上水调节阀及部分涉及系统安全的控制逻辑进行修改优化。

3.1 除氧器水位控制方式切换逻辑

考虑机组在启停阶段或凝结水泵工频运行工况下控制需求,保留原有除氧器上水调节阀控制除氧器水位,凝结水泵变频控制凝结水母管压力的方式,增加凝结水泵变频控制除氧器水位方式投入的控制逻辑。当同时满足以下条件时投入凝结水泵变频控制除氧器水位方式:(1) 机组负荷大于 300 MW(死区 50 MW);(2) 任一凝结水泵变频运行;(3) 2 台凝结水泵均未工频运行;(4) 给水泵密封水系统无异常;(5) 高压旁路、低压旁路减压阀指令均小于 3%,延时 600 s;(6) 除氧器上水主调节阀或除氧器上水辅调节阀开度大于 30%(死区 10%);(7) 值班员手动投入操作。

3.2 凝结水泵变频控制优化

在保留原有凝结水泵变频控凝结水母管压力控制逻辑的基础上,增加以下控制逻辑及控制要点:(1) 增加凝结水泵变频控除氧器水位的传统串级三冲量控制逻辑;(2) 增加切换逻辑,当以凝结水泵变频控除氧器水位方式投入时,切换至凝结水泵变频控除氧器水位 PID 输出;(3) 利用控制算法的跟踪功能,在方式切换上实现无扰切换;(4) 当给水泵密封水系统异常或者任一低压旁路减压阀指令大于 3% 时,超驰凝结水泵变频指令至 45 Hz;(5) 凝结水泵变频控制除氧器水位方式下,除氧器液位测点品质坏时,凝结水泵变频控制切手动;(6) 根据凝结水泵变频运行振动值,变频最低频率设置为 28 Hz;(7) 凝结水泵变频控制母管压力时,对压力设定值分段函数进行修改优化,400 MW 对应 1.4 MPa,1 000 MW 对应 2.5 MPa;(8) 凝汽器水位低于

-200 mm(死区 80 mm)时,凝结水泵变频指令禁止升。

3.3 除氧器上水调节阀控制优化

保持原有除氧器上水调节阀控制除氧器水位的单冲量/三冲量控制逻辑,不新增除氧器上水调节阀控凝结水母管压力控制策略,仅对除氧器水位设定值部分进行逻辑修改。在切换至凝结水泵变频控除氧器水位方式时,按照设定速率在除氧器水位设定值基础上叠加 50 mm 作为除氧器上水调节阀的设定值。例如,除氧器水位设定值为 0 mm,凝结水泵变频控制逻辑接收的设定值为 0 mm,将实际水位控制在 0 ± 20 mm 范围内,此时除氧器水位调节阀控制逻辑接收的设定值为 50 mm,阀门将缓慢开大。当系统出现异常时可通过除氧器上水调节阀将水位控制在 50 ± 20 mm 范围内。

除氧器上水调节阀全开会导致在凝结水泵工频备用泵联锁启动或凝结水泵变频控除氧器水位方式退出等极端工况下,调节阀从 100% 开度下降到需求开度所需时间过长,不利于系统稳定。根据试验获取的除氧器上水调节阀的节流特性,增加在不同负荷下对调节阀设置最大开度控制逻辑,其中,允许调节阀最大开度为负荷的分段函数,400 MW 对应 70%,1 000 MW 对应 90%,该值与 PID 输出进行小选作为调节阀指令。

3.4 其他辅助逻辑控制优化

随着凝结水母管压力大幅度降低,对相关逻辑

及定值进行修改,主要包括:(1) 给水泵密封水增压泵出口压力低,联锁启动备用泵定值由 3.7 MPa 修改为 2.9 MPa;(2) 凝结水泵变频运行方式下,凝结水母管压力低联锁启动备用工频泵由 1.7 MPa 修改为负荷对应的分段函数,400 MW 对应 0.8 MPa,1 000 MW 对应 1.7 MPa;(3) 凝结水精处理装置入口压力低全开旁路门定值由 1.5 MPa 修改为 0.8 MPa;(4) 凝结水泵变频运行方式下,工频备用泵联锁启动时,联锁打开凝结水精处理装置旁路门;(5) 取消凝结水母管压力低于 1.2 MPa 触发低旁快关逻辑。

4 凝结水泵变频优化效果

凝结水泵变频控制策略实施后,机组运行中多次对 PID 参数进行调整,在变负荷阶段除氧器水位控制稳定。机组从 800 MW 连续降负荷至 400 MW 运行曲线如图 2 所示。由图 2 可知:在负荷降至 420 MW 之前,除氧器上水调节阀保持大开度,通过凝结水泵变频控制将水位控制在 0 ± 10 mm 范围内;在负荷降至 420 MW 后,凝结水泵变频控制指令抵达设定的下限值 28 Hz,此时给水流量继续减小,除氧器入口凝结水流量不减,导致除氧器水位上升,当水位大于 50 mm 时,除氧器上水调节阀开始节流参与水位调节,经过一个周期调节,最终通过除氧器上水调节阀将水位控制在 50 ± 10 mm 范围内。

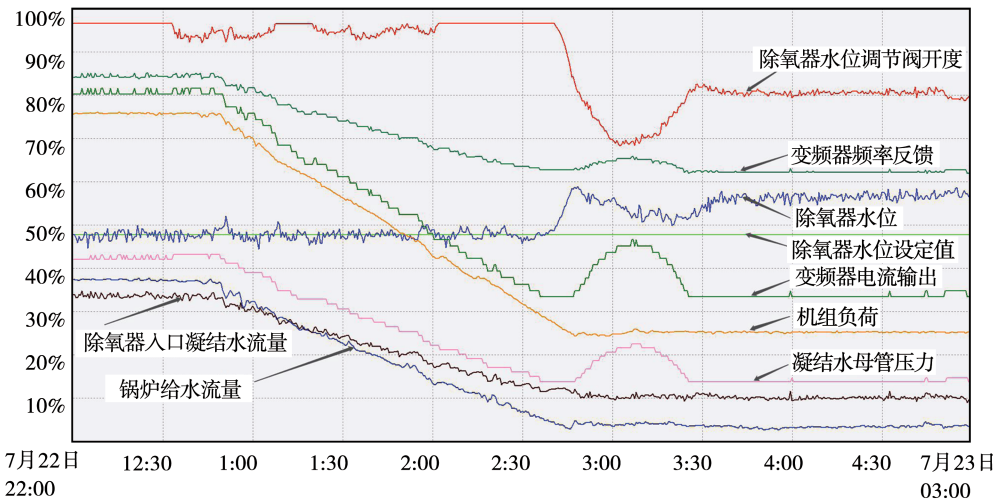


图 2 机组降负荷至 400 MW 凝结水系统运行曲线

Fig. 2 Operation curves of condensate system at unit load from 800 MW to 400 MW

选取 400 ~ 1 000 MW 区间不同负荷点对优化前后主要参数进行比对,如表 5 所示。由表 5 可知,优化后凝结水泵变频器指令、变频器输出电流、凝结水母管压力和凝结水泵功率均大幅降低。除氧器上水调节阀在变频控制指令未抵下限前维持在较大开度,节流损失小。在低负荷阶段节能效果更为显著,

在 500 MW 工况下,凝结水泵功耗由 1 057 kW 下降至 633 kW,下降了 40.1%;在 400 MW 工况下,凝结水泵功耗由 1 035 kW 下降至 512 kW,下降了 50.5%。选取优化前后 1 个月的能耗数据,凝结水泵耗电量由 0.218% 下降至 0.152%,节能效果显著。

表 5 变频控制优化前后参数对比
Tab.5 Comparison of parameters before and after optimization of frequency conversion control

负荷/MW	凝结水泵变频指令/Hz		变频器输出电流/A		凝结水母管压力/MPa		上水调节阀开度/%		凝结水泵功率/kW	
	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后	优化前	优化后
1 000	47.2	43.1	281	248	3.00	2.36	54.4	90.0	2 342	1 960
900	45.7	41.1	258	227	2.90	2.11	49.7	86.7	2 170	1 633
800	44.0	37.9	239	195	2.70	1.89	46.3	83.3	1 882	1 320
700	41.2	35.1	208	170	2.40	1.59	40.5	80	1 525	1 008
600	39.5	32.8	188	151	2.20	1.41	33.7	76.7	1 260	850
550	38.3	31.2	177	139	2.10	1.32	30.9	75.0	1 160	742
500	37.0	30.1	163	132	2.00	1.21	29.7	73.3	1 057	633
450	37.0	28.8	158	125	2.00	1.12	26.1	71.0	1 040	552
400	37.0	28.0	152	118	2.00	1.08	24.5	63.0	1 035	512

5 结 论

分析了凝结水系统电耗量偏高的多方面原因。优化前对凝结水系统设备及运行参数进行专项试验分析,得出凝结水系统运行的安全运行边界条件,提出了一种适合深度调峰且机组热力系统安全的凝结水泵变频控制策略,取得了良好的节能效果,其控制策略具有广泛的推广价值。

(1) 凝结水泵耗电量由优化前的 0.218% 下降至优化后的 0.152%;在低负荷阶段凝结水泵节能效果更为显著,在 500 MW 工况下,凝结水泵功耗由 1 057 kW 下降至 633 kW,下降了 40.1%;在 400 MW 工况下,凝结水泵功耗由 1 035 kW 下降至 512 kW,下降了 50.5%。

(2) 在负荷低于 420 MW 工况下,受凝结水泵低频运行结构共振及凝结水泵变频器最低频率限值影响,节能效果受限。在对凝结水泵结构共振进行综合治理后,对降低凝结水泵变频运行最低频率的控制方式有待进一步研究。

参考文献:

[1] 王亚欧,蔡 亮,胡忠旭,等. 燃煤机组深度调峰运行下 SCR 入口烟温预测方法研究[J]. 热能动力工程, 2020, 35 (8): 96 - 103.
WANG Ya-ou, CAI Liang, HU Zhong-xu, et al. SCR inlet gas temperature prediction technique under deep peak load regulation of thermal power generator units[J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2020, 35 (8): 96 - 103.

[2] 杨志平,李柯润,王宁玲,等. 大数据背景下燃煤发电机组调峰经济性分析[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39 (16): 170 - 180.
YANG Zhi-ping, LI Ke-run, WANG Ning-ling, et al. Economic analysis of peaking regulation of coal-fired generating units under big data[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39 (16): 170 - 180.

[3] 郑冬浩,曹志华,董勇卫,等. 660 MW 超超临界机组低负荷下凝结水系统控制优化[J]. 浙江电力, 2017, 36 (7): 20 - 23, 42.
ZHENG Dong-hao, CAO Zhi-hua, DONG Yong-wei, et al. Optimization control of condensate water system of 660 MW ultra-supercritical unit under low load[J]. Zhejiang Electric Power, 2017, 36 (7): 20 - 23, 42.

[4] 张广才,周 科,鲁 芬,等. 燃煤机组深度调峰技术探讨[J]. 热力发电, 2017, 46 (9): 17 - 23.

ZHANG Guang-cai,ZHOU Ke,LU Fen,et al. Discussions on deep peaking technology of coal-fired power plants[J]. Thermal Power Generation,2017,46(9): 17-23.

[5] 周 骋,许 尧,石 磊. 1 000 MW 二次再热机组凝泵深度变频优化改造[J]. 电力科技与环保,2018,34(6):50-51.

ZHOU Cheng,XU Yao,SHI Lei. Condensate pump transformation of deep frequency conversion at 1 000 MW secondary reheat unit [J]. Electric Technology Environmental Protection,2018,34(6): 50-51.

[6] 徐 江,梁海山,薛小宇. 1 000 MW 二次再热机组凝结水泵深度变频改造优化[J]. 华电技术,2019,41(8):70-73.

XU Jiang,LIANG Hai-shan,XUE Xiao-yu. Optimization of deep frequency conversion transformation for condensate pump in 1 000 MW secondary reheat unit[J]. Huadian Technology,2019, 41(8):70-73.

[7] 王小龙,瞿七九. 1 000 MW 机组凝结水泵变频解耦控制在节能改造中的应用[J]. 浙江电力,2021,40(2): 112-118.

WANG Xiao-long,QU Qi-jiu. Application of variable frequency de-coupling control for condensate pump of 1 000 MW units in energy saving reconstruction[J]. Zhejiang Electric Power,2021,40(2): 112-118.

[8] 林 琳,刘 锋,王宏武,等. 1 000 MW 机组凝结水系统低负荷运行特性分析及综合优化[J]. 热力发电,2021,50(3): 152-157.

LIN Lin,LIU Feng,WANG Hong-wu,et al. Low-load operation characteristic analysis and comprehensive optimization of condensate system of a 1 000 MW unit[J]. Thermal Power Generation, 2021,50(3):152-157.

[9] ADIBHATLA S,KAUSHIK S C. Energy and exergy analysis of a super critical thermal power plant at various load conditions under constant and pure sliding pressure operation[J]. Applied Thermal Engineering,2014,73(1): 51-65.

[10] SAMUEL G R,SAVETH K J. Optimal design of progressing cavity pumps (PCP) [J]. Journal of Energy Resources Technology, 2006,128(4): 275-279.

[11] COLONNA P,VANPUTTEN H. Dynamic modeling of steam power cycles,part I: modeling paradigm and validation[J]. Applied Thermal Engineering,2007,27: 467-480.

[12] 陈统钱,杨建明. 660 MW 机组凝结水泵变频运行的振动分析与处理[J]. 发电技术,2019,40(S1):68-72.

CHEN Tong-qian,YANG Jian-ming. Vibration analysis and treatment for condensate pump of 660 MW unit in variable-frequency operation zone[J]. Power Generation Technology,2019,40(S1): 68-72.

[13] 邓 佳,王红宇,居文平,等. 深度调峰工况下凝结水泵节能优化[J]. 热力发电,2018,47(11): 109-113.

DENG Jia,WANG Hong-yu,JU Wen-ping,et al. Energy saving optimization of condensate pump under deep peak load regulation [J]. Thermal Power Generation,2018,47(11): 109-113.

[14] 李伟林,张海峰. 超超临界 660 MW 机组凝结水泵变频振动治理[J]. 江苏电机工程,2015,34(4): 76-78.

LI Wei-lin,ZHANG Hai-feng. Frequency conversion vibration control of condensate pump for ultra supercritical 660 MW unit [J]. Jiangsu Electrical Engineering,2015,34(4): 76-78.

[15] 何国安,龚 伟,李志强,等. 立式泵组结构共振分析及治理 [J]. 热力发电,2015,44(11):94-97.

HE Guo-an,GONG Wei,LI Zhi-qiang,et al. Structure resonance of vertical pump unit: fault analysis and countermeasures [J]. Thermal Power Generation,2015,44(11): 94-97.

(姜雪梅 编辑)