

# 大坡度、双母管循环水系统节能改造和并泵运行

郭力<sup>1</sup>, 蔡晓铭<sup>1</sup>, 陈正建<sup>1</sup>, 范新宇<sup>1</sup>, 陈鹏程<sup>2</sup>, 杨星<sup>2</sup>

(1. 深圳能源集团股份有限公司东部电厂, 广东 深圳 518120;

2. 广州粤能电力科技开发有限公司, 广东 广州 510080)

**摘要:**为了提高燃气-蒸汽联合循环机组循环水系统的经济性,降低两班制运行机组每日启停循泵,循环水系统正负水锤的安全风险,以及克服计算循环水泵工作点的局限性。文章分析DB电厂350 MW大型燃机的大坡度、双母管循环水系统的特殊性,以及设计工况和实际二班制调峰运行工况的差异,得出该系统有较大节能空间且采用变频调速是最佳节能改造方案。本工程根据不同频率下循环水泵的特性曲线,和拟合的系统管路阻力曲线,用作图法计算水泵并列运行工作点,相比解析法直观反映水泵并列情况,并且计算简单,试验结果证明了计算的正确性。改造后达到了预期的经济性目标,同时优化了系统控制逻辑,提高了安全性。

**关键词:**大坡度双母管循环水系统;变频调速;节能改造;并列运行;作图法

**文章编号:**2096-4633(2018)01-0026-06 **中图分类号:**TK26 **文献标志码:**B

燃气-蒸汽轮机联合循环发电机组效率高;机组启动快,启动成功率高;既可带基本负荷运行,又可用于调峰;由于排放污染小,宜于接近负荷中心;占地面积小,耗水少,因此燃机的高效,洁净等方面的优势使其成为我国能源结构调整的一个良好补充<sup>[1]</sup>。

DB电厂一期工程建设3台M701F单轴联合循环发电机组,每台发电机组采用“1+1+1+1”单轴配置型式,即安装1台燃气轮机、1台余热锅炉、1台蒸汽轮机和1台发电机,燃气轮机、蒸汽轮机同轴推动一台发电机的单轴联合循环,输出功率400 MW,燃气轮机发电机组以每日启停(白天启机,晚上停机)的调峰方式运行。循环水泵(以下简称循泵)是火电厂中耗电量较大的辅机之一,消耗的电能约占发电量的1-1.5%<sup>[2-3]</sup>。目前循环水泵采用双速泵运行的机组很多<sup>[4]</sup>,大型燃机电厂循泵主流配置为多台工频泵结合部分变频泵的方式,例如P电厂配6台1100kW循泵,1台机运行时启动2台循泵,2台机运行时启动3台循泵,3台机运行时启动4或5台循泵,四台机运行时启动6台循泵,其中有2台循泵采用变频,晚上机组停机后破坏真空,将循泵全部停运。

## 1 循环水系统改造的背景

### 1.1 大坡度双母管循环水系统基本情况

DB电厂循环水系统为双母管、大坡度(坡顶

14.3 m)、大流量(DN3200,3台7.05 m<sup>3</sup>/S水泵)、长距离(1.2 km)输送循环水系统。为配合电厂两班制运行需每日启停循泵,在启停过程中,循环水流量大幅波动,面临正负水锤的威胁,安全风险极大。根据水力科学院的水力瞬变流计算结果,循环水从水泵出口后经过800 m的爬坡段,至最高点(和水泵出口有9 m高差),后下降至凝汽器入口(标高2 m,凝汽器水侧最高点标高14.3 m),采取了准调压室消除水锤影响<sup>[5]</sup>,但对操作要求很高。而且母管制循环水管网复杂且难以分解,其计算模型和求解是母管制循环水系统经济运行的关键。

循环冷却水系统(以下简称系统)由海水直流供水,系统采用两条循环水母管,三套联合循环机组配套三套循环水泵,三套虹吸井,循环水母管间设有联络管。循环水泵额定流量为7.05 m<sup>3</sup>/s,扬程23 m,循环水泵出口均安装有液控式缓闭蝶阀,减小水锤风险。单台循环水泵电机2200 kW,电压6 kV。根据设计说明,循环水量按照冬季工况50倍循环倍率,夏季65倍循环倍率确定<sup>[6]</sup>。

### 1.2 循环冷却水系统改造优化的条件

循环水冷却水系统改造优化前厂用电率2.57%(其中循环水系统占厂用电33%),比区域内同类机组平均水平落后0.02%。经过对系统原设计条件和运行方式的分析,可通过改造优化,使厂用电率达到区域内同类机组先进水平。系统的节能潜

力来自三个方面。

(1)按原设计,DB电厂夏季工况3台循泵供三台机组,冬季工况下2台循泵供三台机组。但实际统计冬季工况仅有1天是3台机组同时运行,与设计运行条件差异很大。因此,一台机组或两台机组冬季运行时,可以减少循环水量降低过冷度,实现节能。

(2)由于循环水输送坡度大,距离长,管道直径大,即使发电机组停机,出于安全考虑,夜间至少需要维持1台循泵运行,使循环水越过14.3 m的坡顶,而此时机组对循环水需求量非常小,可以减少流量节能。

(3)由于深度调峰,负荷减少时,凝汽量减少,运行机组所需循环水流量减少,特别是相对于夏季

工况<sup>[7]</sup>,冬季海水温度低,机组运行所需循环水流量更少,节能潜力更为显著。例如:在1机1泵负荷387 MW时对凝汽器性能进行试验,结论为:“A、B侧凝汽器端差8.23℃、7.59℃,大于设计值(2.8℃),总体传热系数小于设计值”。

### 1.3 节能的方法

实施节能的方法包括:变频调速方式、双速电机调速方式和小泵调速方式。分析发现,只有变频调速能满足多工况下连续调节循环水量,优化冷端,实现凝汽器以真空度为控制目标的经济运行方式<sup>[8-11]</sup>。DB电厂通过对系统安全、运行的灵活性、场地条件和经济性的综合对比,对1号和3号循泵进行变频调速改造,2号循泵保留工频运行。表1为系统改造后的各种运行方式。

表1 系统改造后运行方式

Tab.1 Running models of the circulating water system by the retrofit

运行方式	3台机停运	1台机运行	2台机运行	3台机运行
1台循泵变频运行	√	√		
2台循泵变频并行运行			√	√
2台循泵变频和1台泵工频并行运行				√

### 1.4 节能量分析和估算

泵的轴功率按照  $P = (Q * H * \rho * g) / \eta$ , 式中  $Q$  是流量,  $H$  是扬程,  $\rho = 1025 \text{ kg/m}^3$  是海水密度,  $g = 9.8 \text{ g/S}^2$  是重力加速度,  $\eta$  是泵的效率。

经过统计 DB 电厂运行年三种运行方式的运行时间,以及估计不同方式下循泵的运行频率,1年节电量,见表2。冬季时,降低频率节能效果很好,年节电量超过675万度。

表2 节能量估算表

Tab.2 Assessment table of energy-saving

变频运行方式	频率(HZ)	压头(m)	流量( $\text{m}^3/\text{s}$ )	泵效率	轴功率(kw)	输入功率(kw)	年节电量 $10^4 \text{ Kwh}$
停机1台泵	37.5	14.3	4.36	0.85	746	785	285
1台机1台泵	38.6	15	4.67	0.84	837	882	223
2台泵	39.2	15.7	9.33	0.83	887	934	167
合				计			675

## 2 水泵调速后的并行运行

循环水系统是电厂重要的辅机系统,DB电厂循环水系统存在独特性,循环水是双母管设计,而且需要爬坡,在系统的优化改造过程中,存在以下难点。

(1)循泵变频后能否并行运行、能否翻过坡顶、能否保证坡顶一直充水。

(2)系统改造优化后,如何确定系统安全运行边界和经济运行方式,主要体现在如何确定循环水系统最佳真空。

### 2.1 系统管路水力特性曲线的拟合

循环水泵的特性曲线和系统管路的水力特性决定了运行工作点,循环水泵的特性曲线一般由实测数据用最小二乘法拟合得到或由样本曲线得到<sup>[12]</sup>,即:

$$H = a_0 + a_1 Q_1 + a_2 Q_1^2 \quad (1)$$

简化管路扬程方程:

$$H = H_{ST} + s_1 Q_1^2 + s_2 Q^2 \quad (2)$$

用解析法求流量和工作点。

$H$  为泵扬程,  $Q_1$  为单泵流量,  $Q$  为并行运行总流量,  $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  为泵扬程拟合系数,  $s_1$  为单泵管

路等效的阻力系数； $s_2$  为母管管路等效的阻力系数。

本工程循泵调速特性曲线由制造厂提供<sup>[13]</sup>。为了确定循泵单泵以及并联运行的工况点和流量调

$$H = H_{ST} + s_1 \left( \frac{Q}{m} \right)^2 + s_2 Q^2 = H_{ST} + \left( \frac{s_1}{m^2} + s_2 \right) Q^2 \quad (3)$$

其中  $H_{ST}$  为设计值，取 7.86m，通过试验用流量计测取并列运行的典型运行数据（见表 3），将数据代入公式（2），由两组方程可解出管路的近似阻力系数  $S_1 = 0.222$  和  $S_2 = 0.08$ ，这样公式（2）就变成：

$$H = 7.86 + \left( \frac{0.222}{m^2} + 0.08 \right) Q^2 \quad (4)$$

这样作图求出 1 台泵、2 台泵和 3 台泵并联运行的管路阻力特性曲线。

表 3 循环水系统运行数据

Tab.3 Service data of circulating water system

机组数量	循泵数量	总流量(m <sup>3</sup> /s)	压力(m)
2	2	12.744	20.25
3	3	18.21	22.9

## 2.2 工作点计算

### 2.2.1 最小流量确定

(1) 为了防止由于循环水泵的转速下降，流量

节特性，本工程通过试验取得大量数据确定单管阻力系数和母管阻力系数。

由于系统采用双母管，循泵并联运行时， $Q_1 = Q/m$ ，所以式（2）变化成：

下降后导致泵的叶轮汽蚀，循泵制造厂提出的流量 4.2 m<sup>3</sup>/s，运行频率 33 Hz 的最低安全要求。

(2) 机组全停工况时需要 1 台循环水泵运行，而系统对冷却水量需求非常少。为防止水锤风险，循环水扬程达到最大爬坡点，同时使循环水管道充满水，扬程为 14.2 m，流量为 4.36 m<sup>3</sup>/s，水泵电机频率为 37.5 Hz，系统安全运行的最低安全要求。

(3) 冬季 1 台机组 50% 负荷运行时，计算工作点低于设备的最低安全要求，按照最低运行频率 37.5 Hz 运行。

### 2.2.2 冬、夏季并泵运行的计算

下图是根据制造厂提供循泵调速特性曲线，拟合的 1 台泵、2 台泵和 3 台循环水泵并列运行系统管路阻力特性曲线，根据不同工况下需要的最小流量，以及满足安全运行的最小扬程，可以通过查图法找到最合理最节能的泵的运行频率<sup>[14-15]</sup>。

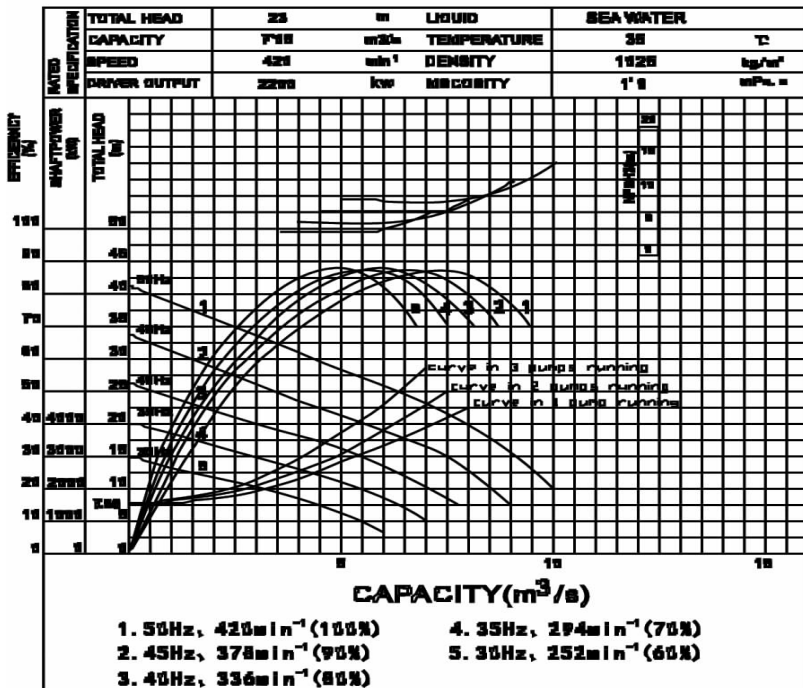


图 循环水泵并泵运行的计算工作点

Fig.1 Calculation working point of under parallel pump operation of circulating water pump

表4为冬、夏季不同负荷时并泵运行的计算结果,这个计算结果将指导DB电厂日常不同工况下

运行人员对循泵运行频率的设定,以取得最优运行方式。

表4 冬、夏季不同负荷时并泵运行的计算结果

Tab.4 Calculation results of parallel pump operation at different loads in winter and summer respectively

工况	负荷	流量 $\text{m}^3/\text{s}$	扬程 m	运行频率 Hz
冬季1台循泵运行	100%	5.65	17	42
	75%	4.67	15	39
	50%	4.36	14	37.5
冬季2台循泵并列运行	100% 负荷	5.65	18	43
	75% 负荷	4.67	16	39
	50% 负荷	4.36	14.5	37.5
夏季1台循泵运行	100% 负荷	7.05	20	50
	75% 负荷	5.65	17	42
	50% 负荷	4.67	15	39
夏季2台循泵运行	100% 负荷	7.05	23	50
	75% 负荷	5.65	18	43
	50% 负荷	4.67	15	38.5
夏季3台循泵运行	100% 负荷	7.05	23	50
	75% 负荷	5.65	21	46
	50% 负荷	4.67	17.5	40

### 3 变频改造控制逻辑

每台水泵的出口配置液控蝶阀(以下简称蝶阀),关阀启动,根据厂家意见直立混流泵要求建压后迅速开阀,避免憋泵。

循环水泵改造前,电动机直接启动,系统的启动和停止控制,仅考虑水泵和液控蝶阀间的配合,启动时间固定(40 s内),蝶阀的开启时间固定。循泵变频改造后,由于变频器启动时间比直接启动时间延长(启动时间约210s,停止时间300s),而且升速过程中压力的建立没有现成数据参考,因此需要重新评估启停过程和蝶阀开启时间。经过采取措施和多次试验,DB电厂设计控制逻辑能够满足要求,具体顺控逻辑如下:

#### 3.1 顺控启动变频器

- (1)变频装置上高压电,等预充电过程完成后得到“准备就绪”反馈;
- (2)启动变频器,频率从0上升至35Hz;
- (3)判断频率反馈达到33 Hz或出口压力到达0.12MPa,快开蝶阀至15°开度,再慢开至90°;

iv. 继续升转速至设定值。

#### 3.2 顺控停变频器

- (1)变频泵降频率至35 Hz;
- (2)当频率降至35 Hz时,发指令关蝶阀,快关至15°开度;
- (3)收到15°开度反馈时发出变频泵停泵指令,同时继续关蝶阀开度至0。

试验证明,采用这种控制策略可以很好解决变频泵启停过程中憋泵和海水倒流问题。另外2号工频泵在2泵同时运行时作为备用泵,当变频泵故障时联启工频泵。

### 4 调试结论

循环水变频系统改造后调试,证明了工作点计算的正确性<sup>[16-17]</sup>。同时,为了进一步保障安全,定义了运行安全边界,结论如下:

- (1)改造优化后,二班制运行机组的循环水系统可以调节运行在最佳真空状态(冬季-98 KPa,夏季-95 KPa)<sup>[18-25]</sup>。
- (2)夜间机组全停时,维持一台循泵变频运行,



频率维持 38Hz, 回水阀开度分别为 25%、20%、20%, 经验证此时母管压力 0.72 MPa, 流量也满足要求。

(3) 冬天工况(循环水进水温度不大于 20℃), 一台机一台泵运行时, 任何负荷下都将变频泵频率调至 39 Hz, 运行机组的回水阀开度调至 35%, 其他两台机组 10%。

(4) 冬天工况, 两台机两台泵运行时, 任何负荷下, 都可将变频泵频率调至 39 Hz, 运行机组的回水阀开度调至 55%, 其他一台机组 10%。当 1 号泵频率为 40 HZ 时, 3 台泵运行在 39 HZ 时, 此时机组运行性能最佳, 凝汽器真空为 4.70 kPa。

(5) 冬天工况, 三台机运行时, 用两台变频泵运行, 经济工况点如表 5。

表 5 两台变频泵运行经济工况点

Tab. 5 Economic operating point of two frequency conversion pump operating

负荷	变频泵频率	运行机组回水阀开度
720 MW ~ 840 MW	39Hz	35%
840 MW ~ 960 MW	42Hz	40%
960 MW ~ 1 170 MW	44Hz	45%

(6) 夏季时, 1 台、2 台和 3 台机组运行, 均按照最佳真空 -95 KPa 来调节频率<sup>[26-30]</sup>。

## 5 结论

(1) 循环水系统改造后, 年节省电量 900 万 kW·h, 厂用电率降低到 2.19%。投资 290 万元, 回收期约 10 个月, 经济效益显著。按天然气折算标煤, 每年减排 CO<sub>2</sub> 约 5 400Ton, 减排 NO<sub>x</sub> 约 81Ton, 取得了显著的环保效益。

(2) 优化运行方式, 降低了水锤风险。将原来通过大流量, 分多次启/停循环充水空母管的运行操作, 优化为变频连续小流量空充母管的启动方式。

(3) 二班制运行机组的循环水系统改造优化后, 具备手段控制和调节机组真空, 使机组运行在经济状态。

(4) 机组的冷端优化是一项应用实践科学, 需要大量的运行和试验数据作为支撑(如: 机组的不同负荷, 海水的不同温度, 循环泵的不同组合, 回水阀的不同开度等), 改造项目采集和积累了大量试验数据, 对燃气-蒸汽联合循环机组具有积极的借鉴

意义, 同时为进一步实现经济运行的闭环控制建立了基础。

### 参考文献:

- [1] 崔屹, 周建, 薛亚林, 等. 30kW 微型燃气轮机发电系统抗负荷波动仿真研究[J]. 广东电力, 2016, 29(8): 22-26.
- [2] CUI Yi, ZHOU Jianping, XUE Yalin, et al. Simulation research on anti-load fluctuation of generation system of 30 kW micro gas turbine[J]. Guangdong Electric Power, 2016, 29(8): 22-26.
- [3] 黄新元, 赵丽, 安越里, 等. 火电厂单元制循环水系统离散优化模型及其应用[J]. 热能动力工程, 2004, 19(3): 302-305.
- [4] HUANG Xinyuan, ZHAO Li, AN Yueli. A discrete optimized model for the monobloc configured circulating water system of a thermal power plant and its applications [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy & Power, 2004, 19(3): 302-305.
- [5] 孟飞. M701F 燃机冷却空气系统运行优化[J]. 贵州电力技术, 2016, 19(5): 83-85.
- [6] Meng Fei. Operation optimization on cooling air system of M701F gas turbine[J]. Guizhou Electric Power Technology, 2016, 19(5): 83-85.
- [7] 周颜, 李顺才, 李伟. 火力发电厂循环水泵双速节能改造[J]. 发电设备, 2007, vol. 21(5): 21-24.
- [8] ZHOU Yan, LI Shuncai, LI Wei, et al. Revamping a fossil fired power plant's circulation pump for energy saving by dual speed operation[J]. Power Equipment, 2007, 21(5): 383-385.
- [9] 王念慎, 孙高升, 郑大琼. 单向调压室在长距离输水工程中的应用[J]. 中国给水排水, 2010, 26(10): 113-115.
- [10] WANG nianshen, SUN Gaosheng, ZHENG Daqiong. Application of one-way surge tank in long-distance water transfer project [J]. China Water & Waste Water, 2010, 26(10): 113-115.
- [11] 孙兰英. 深圳市东部电厂工程施工图设计循环水系统设计总说明[Z]. 北京: 北京国电华北电力工程有限公司, 2005.
- [12] M. wakimoto. Shenzhen eastern power plant performance test procedure for condenser, 32-34479[R]. Takasago: Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. 2004.
- [13] 顾乡, 贵州常用节能技术措施分析[J]. 贵州电力技术, 2014, 17(12): 57-59.
- [14] Gu xiang, The analysis of common used energy-saving technical measures in Guihou [J]. Guizhou Electric Power Technology, 2014, 17(12): 57-59.
- [15] 夏林, 刘德有, 王丰, 等. 考虑气象条件变化的火电厂循环泵优化运行[J]. 排灌机械工程学报, 2013, 31(6): 490-495.
- [16] Xia Lin, Liu Deyou, Wang Feng, et al. Optimal operation of circulating water pump in thermal power plant under different weather conditions [J]. Journal of drainage and irrigation machinery engineering. 2013, 31(6): 490-495.
- [17] 王攀, 王泳涛, 王宝玉. 汽轮机冷端优化运行和最佳背压的研究与应用[J]. 汽轮机技术, 2016, 58(1): 55-60.
- [18] WANG Pan, WANG Yongtao, WANG Baoyu. Optimization operation

- of steam turbine cold end and the best back pressure research and application[J]. Turbine Technology, 2016, 58(1): 55-60.
- [19] 李尔堪,高林,童博,等. 汽轮机冷端运行自动优化控制技术研究[J]. 汽轮机技术, 2017, 59(3): 224-226.
- [20] LI Erkan, GAO Lin, TONG Bo, et al. Research on automatic optimal control on steam turbine cold end operation [J]. Turbine Technology, 2017, 59(3): 224-226.
- [21] 汪建华,汪禹. 同型号离心泵并联运行相关问题的探讨[J]. 机械研究与应用, 2012(01): 57-59
- [22] Wang Jianhua, Wang Yu. Research on relevant problem of same type pumps operation in parallel [J]. Mechanical Research & Application, 2012, (01): 57-59.
- [23] T. Enokido, Shenzhen Eastern Power Plant Performance Curve for Circulating Water Pump, Q-443322-12015/1-CV[R]. Torishima Pump Mfg Co., Ltd, 2015.
- [24] 张永秋,张晚霞,雷鹏帅,等. 同型号泵并联运行工况点确定的简便方法[J]. 兰州交通大学学报, 2008, 27(4): 73-74.
- [25] ZHANG Yongqiu, ZHANG Xiaoxia, LEI Pengshuai, et al. A simplified method to determine the operating point of type pumps in parallel[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2008, 27(4): 73-74.
- [26] 刘吉臻,王玮,曾德良,等. 火电机组定速循环水泵的全工况运行优化[J]. 动力工程学报, 2011, 31(9): 682-688
- [27] LIU Jizhen, WANG Wei, ZENG Deliang, et al. Operation optimization of constant-speed circulating water pumps in a thermal power plant under full conditions [J]. Journal of Chinese Society of Power Engineering, 2011, 31(9): 682-688.
- [28] 陈鹏程. 深圳东部电厂循环水系统优化试验报告[R]. 广州:广州粤能电力科技开发有限公司, 2016.
- [29] 杨星等. 深圳东部电厂循环水泵变频器调试报告[R]. 广州:广州粤能电力科技开发有限公司, 2016.
- [30] 黄煦. 基于综合成本煤耗率最小的循环水系统优化运行[J]. 广东电力, 2017, 30(9): 41-44.
- HUANG Xu. Optimized operation of circulating water system based on minimum comprehensive coal consumption rate [J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(9): 41-44.

收稿日期: 2017-12-06

作者简介:



郭力(1968),男,本科,高级工程师,主要从事燃机电厂设备检修和管理工作。

(本文责任编辑:范斌)

## Energy-save retrofit and parallel pump operation for big gradient double parent pipe circulating water system

GUO Li<sup>1</sup>, CAI Xiaoming<sup>1</sup>, CHEN zhengjian<sup>1</sup>, FAN Xinyu<sup>1</sup>, CHEN Pengcheng<sup>2</sup>, YANG Xing<sup>2</sup>

(1. Shenzhen Energy Group Limited by Share Ltd Easton Power Plant, Shenzhen 518120 Guangdong, China;

2. Guangzhou Yueneng Power Technology Development Co., Ltd., Guangzhou 510080 Guangdong, China)

**Abstract:** In combined circle gas turbine units (CCGT), in order to raise economic benefits and reduce the non-normal water hammer risk occurred during operation for daily start stop unit (DSS) of circulating water system, and furthermore, intend to overcome the limitation of other methods, which be used to calculate the pumps working points. This paper analyses both physical features and differences between design conditions and the practical two-shift operation model, which the big gradient piping-main circulating water system cater for a grade of 350 MW CCGT units in DB power plant. Base on the analysis, there are a number of energy-saving potentials and the best retrofit method would be to adopt frequency conversion. In accordance with a set of pump performance curves in various frequencies provided by manufactory and three kinds of parallel system curves simulated through experimental data, line chart method is used to calculate the work point. Compared with analytic method, line chart method is simple and intuitive and validity has been proved by serials of trials. After retrofit, conserving energy target is obtained; both system safety and controlling logic have been optimized further. On another hand this project also provides means for economical operation of unit.

**Key words:** big gradient double parent pipe circulating water system; frequency conversion; conserving energy retrofit; parallel running; graphing method