

华能玉环电厂 4x1000MW 机组 凝结水泵深度变频节能优化分析

聂 冶 白培强 （华能玉环电厂）

摘要: 华能玉环电厂本着建设“高效、节能、绿色、环保”国际一流发电厂的宗旨，在节能减排、降本增效方面进行了一系列有益的探索，其中对凝结水泵节能变频及优化改造是在节能降耗方面取得的一个成功案例。本文对华能玉环电厂 4x1000MW 机组凝泵深度变频及节能优化改造过程中出现的问题进行了深入的分析 and 阐述。

关键字: 凝泵 变频 汽动给水泵 密封水 节能

前言: 凝结水泵变频运行能较大幅度地降低机组厂用电率，提高机组的经济性。华能玉环电厂根据本厂凝结水系统的特点对凝结水泵先后进行了两次变频改造，最终实现了凝结水泵的深度变频运行。在凝结水泵投入变频运行后，笔者针对运行中出现的新问题，通过分析系统及设备结构特点，提出了切实可行的节能改进建议，消除了深度变频的制约因素，优化了系统，进一步提高了机组的安全性和经济性。

一、设备概况

华能玉环电厂 1000MW 超超临界机组设有两台 100%容量的凝结水泵，正常时一台运行、一台备用。同时配备两台 50%容量汽动给水泵及一台 25%容量电动给水泵。凝结水泵为立式筒型泵级离心泵。型号为 BDC 500-510，额定流量为 1840t/h，额定扬程为 316m，并配用额定功率为 2700kW 的电机，额定电压 6000V，额定电流 294.8A，额定转速 1490rpm。凝结水泵制造厂家为 SULZER 公司，设备规范详见表 1。

(表 1) 凝结水泵设备规范

项 目	制 造 厂	型 号	型 式	进 口 压 力	进 口 流 量	出 口 压 力	设 计 扬 程	转 速	轴 功 率	效 率
技 术 规 范	SULZER	BDC 500-510	立 式 筒 型 泵	15kPa	1840 t/h (TMCR 工况) 2215 t/h (110%VWO 工况)	3.10 MPa	316 m	1490 r/min	2340 kW	81.5%

二、凝结水泵变频改造历程

华能玉环电厂凝结水系统原设计方案中，凝结水泵保持工频定速运行，除氧器水位完全依靠除氧器上水调门节流调节，因此，凝结水泵工频运行时不仅能耗大，而且长时间运行还存在阀门磨损、管道振动大等系统安全问题，因此在 2007 年初华能玉环电厂对凝结水泵进行了初步变频改造，改造后正常运行时，一台凝泵变频运行，另外一台凝泵工频备用。但是考虑到华能玉环电厂汽动给水泵密封水取自凝结水，而凝结水压力的变化对汽动给水泵的安全运行可能会产生不利影响，所以第一次变频改造后凝结水泵出口压力最低只降至 2.1MPa。

近几年随着节能减排意识的日益增强，华能玉环电厂在 2012 年初计划在原有变频改造的基础上对凝结水泵再进行深度变频改造，并就此课题进行了广泛的调研。最终提出以下改造方案：

- (1) 正常运行时全开除氧器上水主调门，除氧器水位完全由凝泵变频器来控制。
- (2) 凝结水增加汽动给水泵密封水升压系统，共设置两台密封水升压泵，正常运行时，一台运行，一台备用，汽动给水泵密封水由凝结水升压泵来供给。
- (3) 修改并完善机组控制逻辑，以满足机组在异常工况下，对除氧器水位、汽动给水泵密封水的调节要求。

由于增加了密封水升压系统来满足汽动给水泵密封水压力，故机组相关控制逻辑修改如下：

1、当两台凝泵运行或者汽动给水泵密封水系统异常（密封水泵全停或密封水泵出口压力均低于 1.75MPa），立即切除凝泵变频液位控制模式，凝泵变频控制将切换为压力控制，迅速提升凝泵出口压力至 2.2MPa，而同时除氧器上水主调门超驰控制至预设阀位（凝泵工频运行时的开度）并切至手动方式，5 秒后，切为水位控制模式，用上水主调门来控制除氧器水位。

2、当两台凝泵同时运行、任一低旁后温度大于 100℃、低旁快开，上述任一条件满足时，变频凝泵立即转入工频运行。

2012 年 3 月，凝泵深度变频改造如期完成，并投入试运行。

三、凝结水深度变频试运行期间产生问题分析

凝泵深度变频改造后，除氧器上水主调门始终保持全开，机组负荷在 500MW 时，凝泵出口压力最低降至 1.4MPa，凝泵运行电流大幅下降，机组经济性得到较大提高。如果单纯从变频改造结果来看，似乎取得了较大的成果，但是进一步观察也发现其有明显的缺点和不足，即为了保证汽动给水泵的稳定运行，在凝泵深度变频改造中增加了密封水升压系统。随着该

升压系统的投运，不仅增加了设备投资及检修、运行的维护成本，而且大大增加了系统的复杂性，尤其是控制逻辑变得更为复杂，特别是汽动给水泵的安全运行更多维系在密封水升压系统是否稳定上，从而增加了系统运行风险，导致机组安全可靠性的下降。

四、解决方案可行性探讨

鉴于这种情况，针对增加汽动给水泵密封水升压系统的必要性，笔者从玉环电厂凝结水系统用户以及汽动给水泵密封结构的特点上进行了深入分析：

（一）凝结水系统用户分析

华能玉环电厂凝结水系统主要作用是将凝结水升压后送入除氧器，同时还向汽动给水泵提供密封水，向低压旁路、高低压疏水扩容器、磨煤机消防蒸汽提供减温水，向闭冷水、真空泵、发电机定冷水等系统提供补给水，这些用户对凝结水压力的要求按其重要性可分为以下三类：

1、汽动给水泵设置密封水回水温度高跳闸保护，凝结水作为给水泵的密封水，其压力降低能否满足运行要求，则显得至关重要。

2、低旁减温水为凝结水，在机组启停及异常工况时，凝结水压力需满足低旁减温要求。

3、除此之外其它用户对凝结水压力无特殊要求。

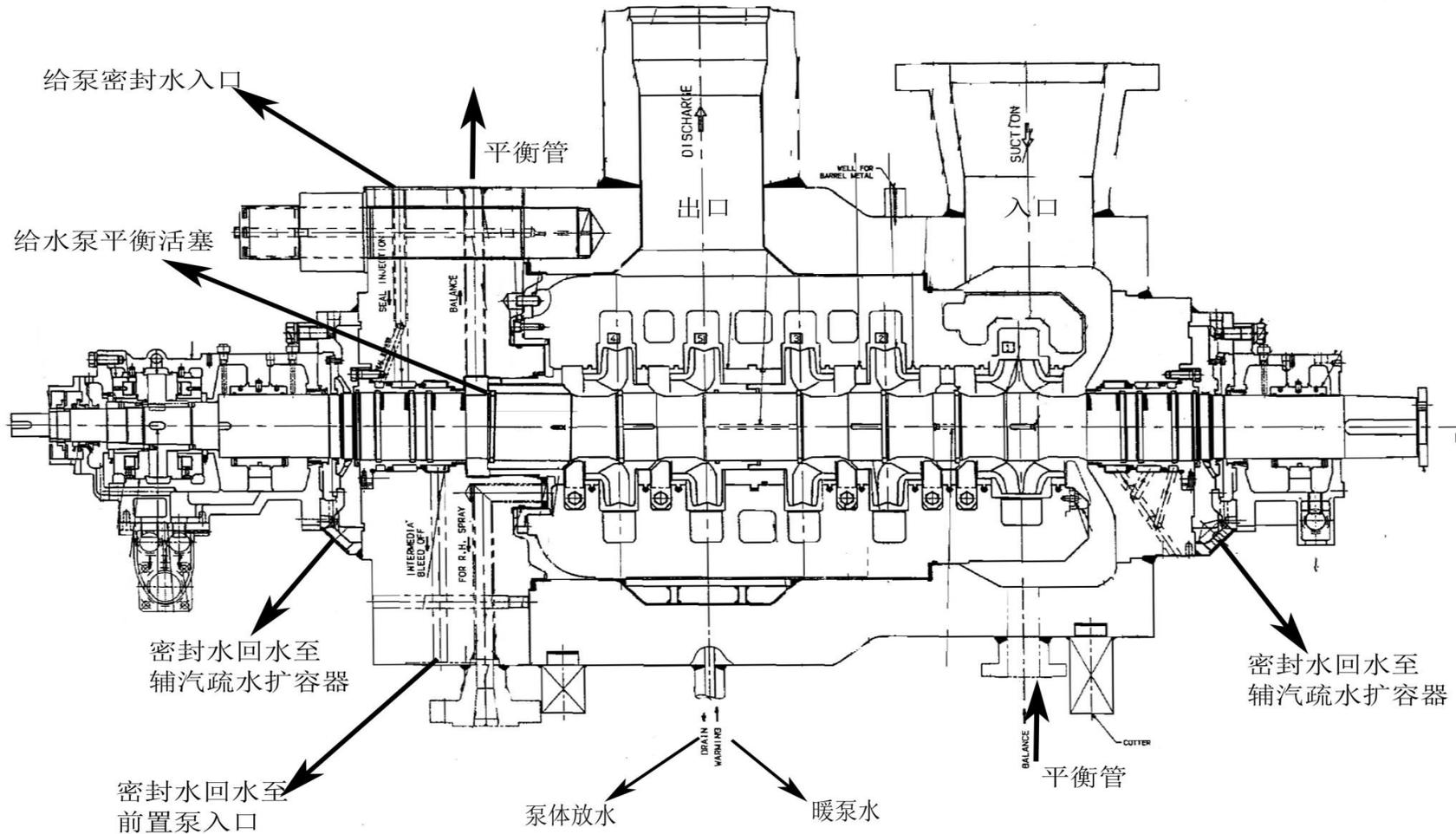
由上可知，保证汽泵密封水的供给是凝结水压力降低的最大制约因素，那么满足汽动给水泵安全运行的凝结水最低压力可以降低至多少？就现有系统而言，目前密封水升压系统是否确有存在的必要？是否存在优化的可能？

（二）取消密封水升压系统的可行性分析

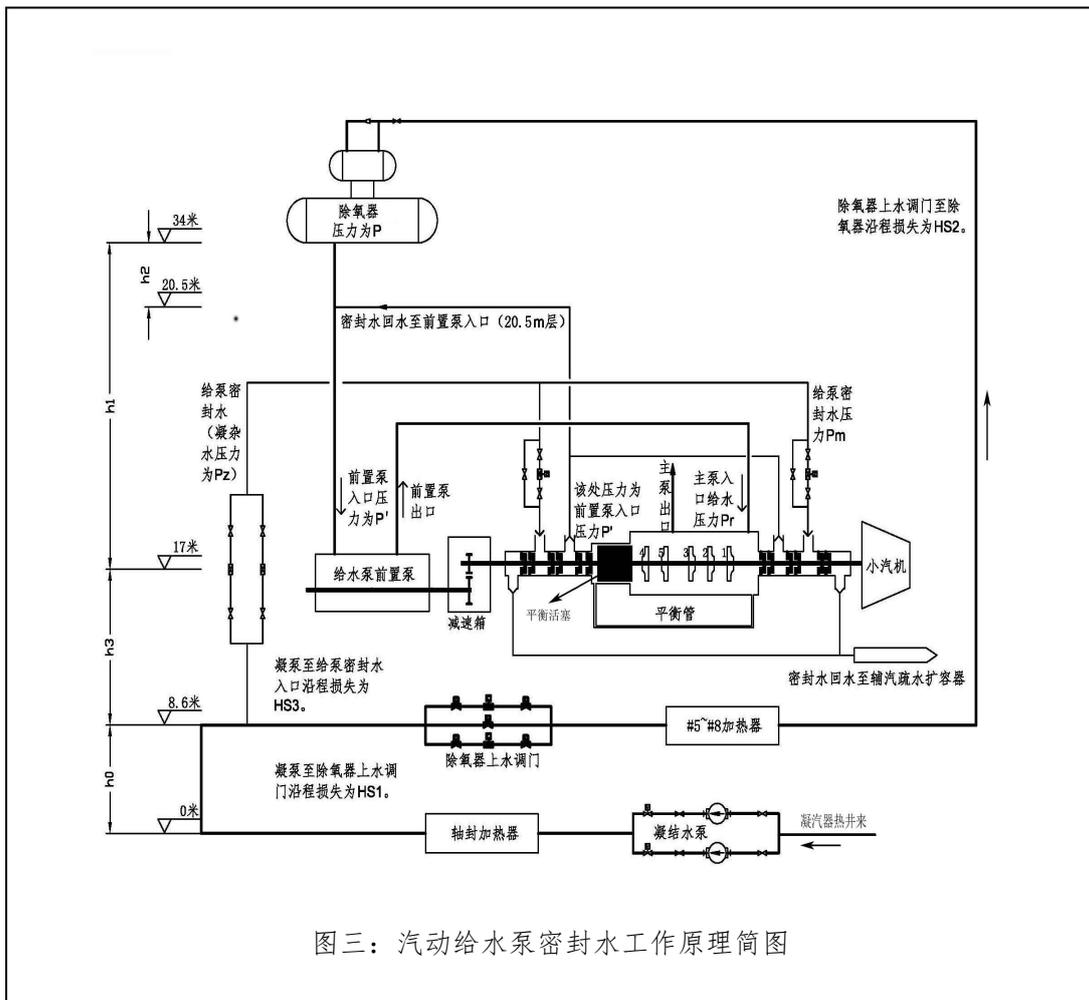
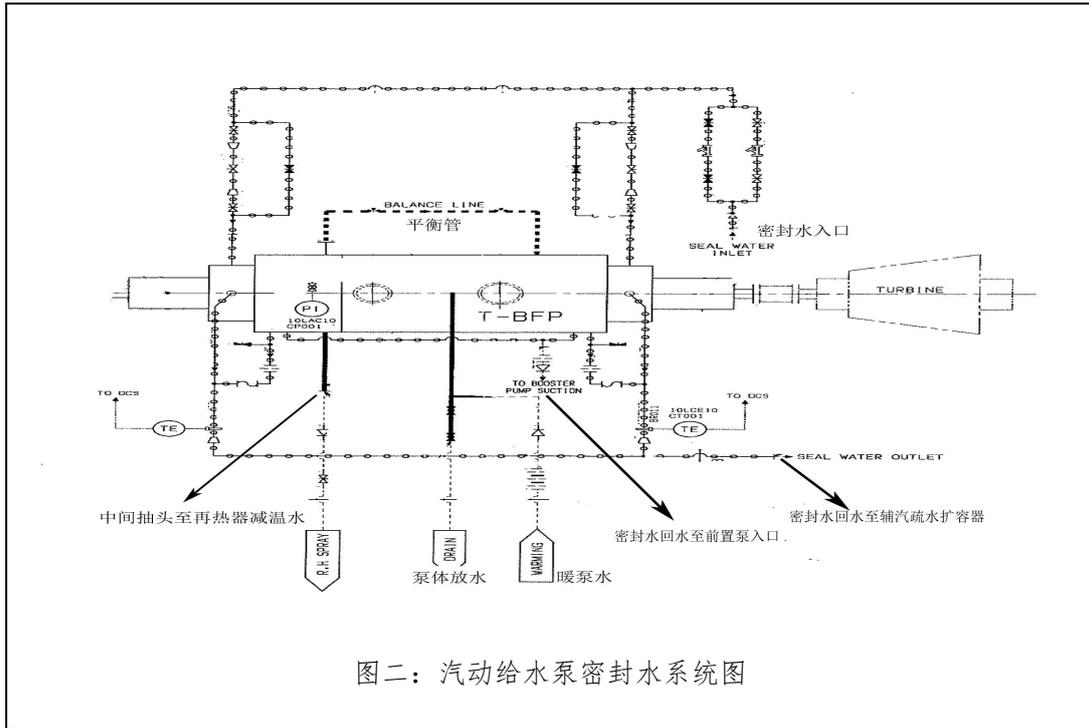
1、汽动给水泵密封结构及工作原理简图：

华能玉环电厂汽动给水泵轴端采用迷宫式密封形式（如图一所示），其设计的基本工作原理并非是将泵体内的高温给水完全密封，而是首先将泄漏的高温给水经过迷宫密封的卸荷腔室由管道引回至前置泵入口，随后再通过调节密封水与剩余的泄漏热水混合降温后排入辅汽联箱疏水扩容器中（如图二、图三所示），最终回收至凝汽器热井，这也是为什么运行维护说明书中要求将密封水回水温度控制在 50℃ 的原因。

因此，华能玉环电厂汽动给水泵正常运行时，其密封水采取控制回水温度的策略是有别于以往比较常见的控制密封水与卸荷腔差压的策略，同时密封水回水也未采用传统的水封筒形式来回收至凝汽器，正因为如此，也就为取消汽动给水泵密封水升压系统进行优化改造提供了实现的可能性。



图一：汽动给水泵内部结构图



2、可行性分析：

如上图三所示，现假定除氧器压力为 P 、前置泵入口压力为 P' 、给水泵密封水压力为 P_m 、凝结水压力为 P_z 、凝结水泵至除氧器上水调门管道沿程损失为 H_{s1} 、除氧器上水调门至除氧器管道沿程损失为 H_{s2} 、凝结水泵至给水泵密封水管道沿程损失为 H_{s3} 、凝结水泵出口至除氧器上水调门高度为 h_0 、除氧器上水调门至除氧器高度为 h_1 、前置泵入口至除氧器高度为 h_2 、除氧器上水调门至给水泵高度为 h_3 。

因此，要保证汽动给水泵密封水运行正常的充分必要条件是需满足 $P_m > P'$ 。

根据华能玉环电厂凝结水系统运行特点：

$$P_z = P + H_{s1} + H_{s2} + \rho g h_0 + \rho g h_1 \quad (1) \quad (\text{除氧器上水管路压力公式})$$

$$P' = P + \rho g h_2 \quad (2)$$

$$P_z = P_m + H_{s3} + \rho g h_0 + \rho g h_3 \quad (3) \quad (\text{给水泵密封水管路压力公式})$$

将公式 (1)、(2) 代入公式 (3) 得出：

$$P_m = P' + H_{s1} + H_{s2} - H_{s3} + \rho g h_1 - \rho g h_3 - \rho g h_2 \quad (4)$$

$$P_m - P' = (H_{s1} + H_{s2}) - H_{s3} + \rho g h_1 - (\rho g h_3 + \rho g h_2) \quad (5)$$

$$\text{因为 } h_1 > h_2 + h_3 \quad (6)$$

$$H_{s1} + H_{s2} > H_{s3} \quad (7)$$

故 $P_m - P' > 0$ ，即 $P_m > P'$

上述等式在任何情况下恒成立，故在任何情况下，只要凝结水压力可以满足除氧器上水要求，则汽动给水泵密封水即可保持正常运行。

3、初步结论：

(1) 凝结水泵采用深度变频，在主调阀开度达 100% 之后，凝泵出口压力最低也必须要满足除氧器上水的要求。根据汽泵轴端密封的原理可以得出：在凝结水泵深度变频的情况下，即使汽泵密封水升压系统停运，凝结水压力也可以满足汽泵密封水需求，并且还有一定的安全裕度。

(2) 根据上述可行性分析可得出，凝结水压力需满足公式 (1)，即克服沿程阻力和高度所带来的静压即可将凝结水输送至除氧器，即使今后进行烟气余热利用改造，加装低温省煤器后导致凝结水管道沿程阻力增加，也会迫使凝结水泵继续提高出口压力来满足上水要求，而凝结水压力的提高会使汽泵密封水压力相应增大。因此，更加提高了系统的安全裕度。

因此，汽泵密封水升压系统停运或取消从理论上讲是完全可行的，而且这样做就可以将

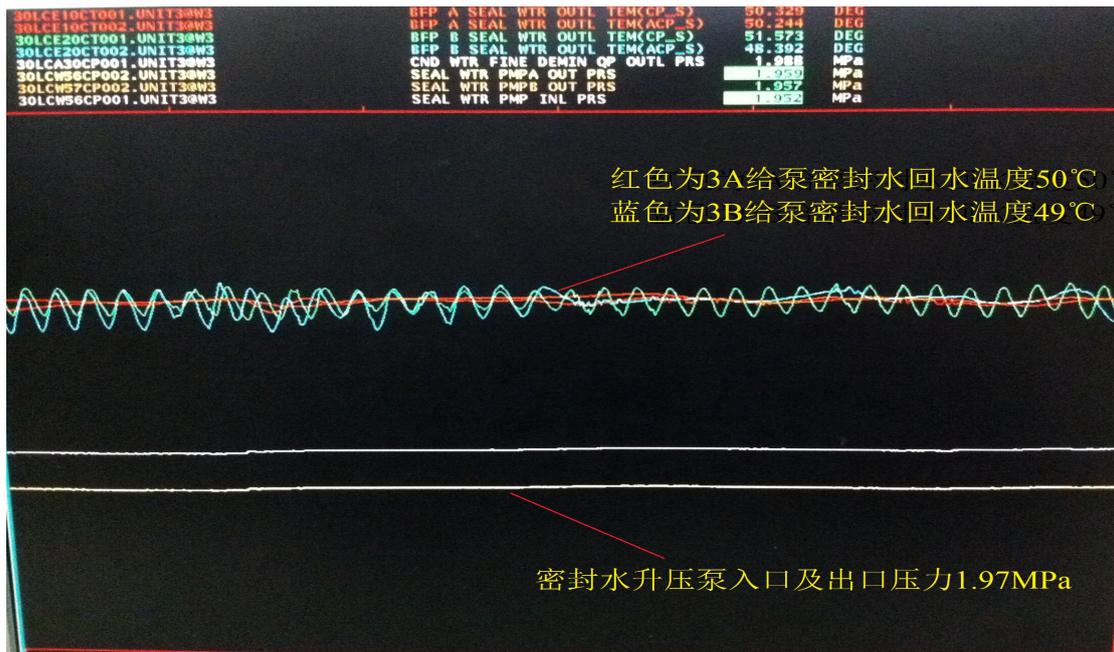
密封水升压系统同凝结水系统的控制关系彻底断开，不仅使凝结水系统得控制逻辑变得更加简化可靠，从而也增加了机组运行的安全可靠。

五、实际工况验证

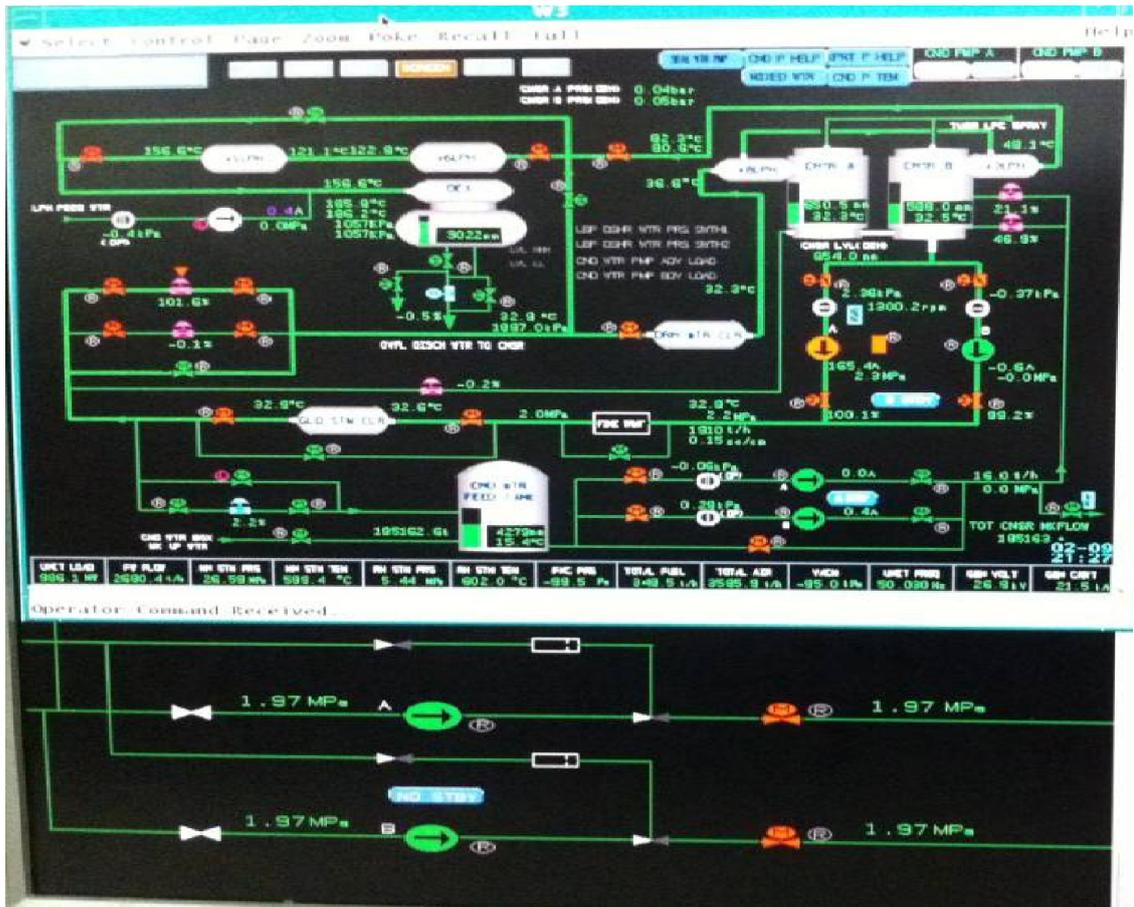
在得出较为可靠的结论后，将密封水升压泵停运，在机组不同负荷下对初步结论进行实际验证，相关试验数据如下：

汽泵密封水升压泵停运前、后工况对比								
状态	机组负荷 (MW)	密封水压力 (MPa)	汽泵 A 密封水调门%	汽泵 A 密封水回水温度 1 (°C)	汽泵 A 密封水回水温度 2 (°C)	汽泵 B 密封水调门%	汽泵 B 密封水回水温度 1 (°C)	汽泵 B 密封水回水温度 2 (°C)
停运前	500	2.6	45	50	50	55	50	50
停运后		1.07	66	50	50	77	50	50
停运前	620	2.6	45	50	50	55	50	50
停运后		1.27	64	50	50	72	50	50
停运前	700	2.6	45	50	50	55	50	50
停运后		1.5	62	50	50	69	50	50
停运前	800	2.65	45	50	50	54	50	50
停运后		1.6	60	50	50	69	50	50
停运前	900	2.81	44	50	50	53	50	50
停运后		1.7	59	50	50	68	50	50
停运前	1000	2.97	43	50	50	50	50	50
停运后		1.97	57	50	50	66	49	49

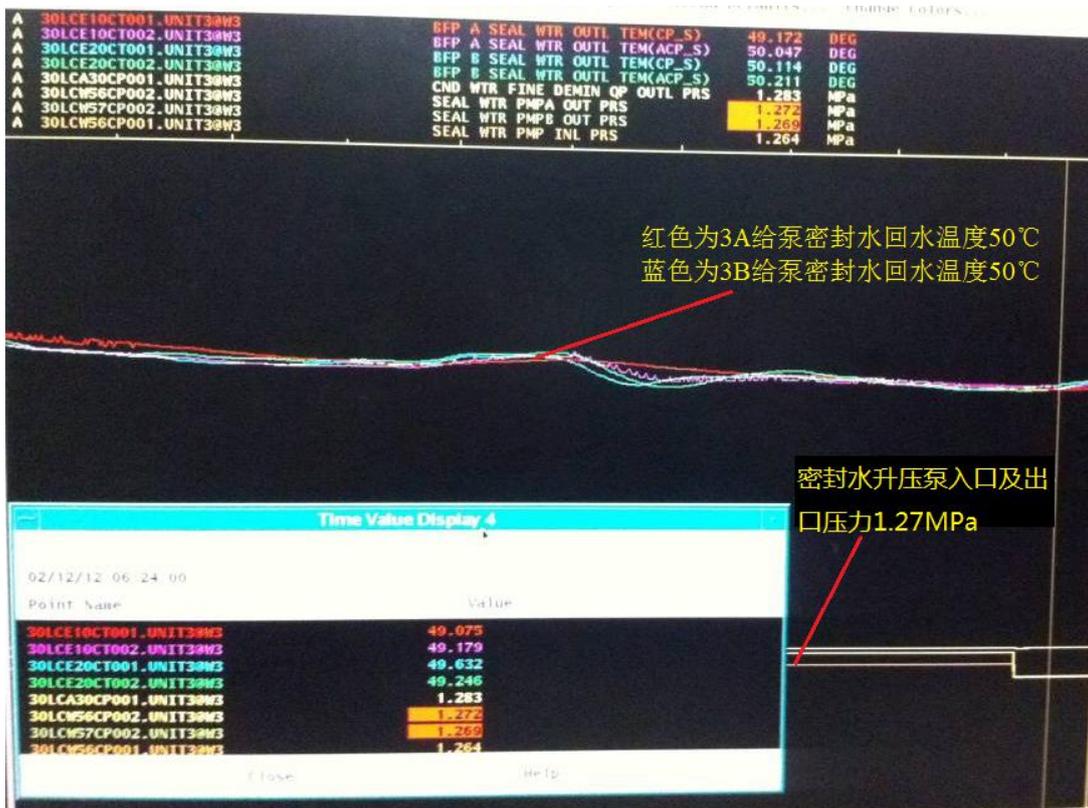
汽泵密封水升压泵停运后，给水泵密封水及凝结水系统相关参数曲线如下：



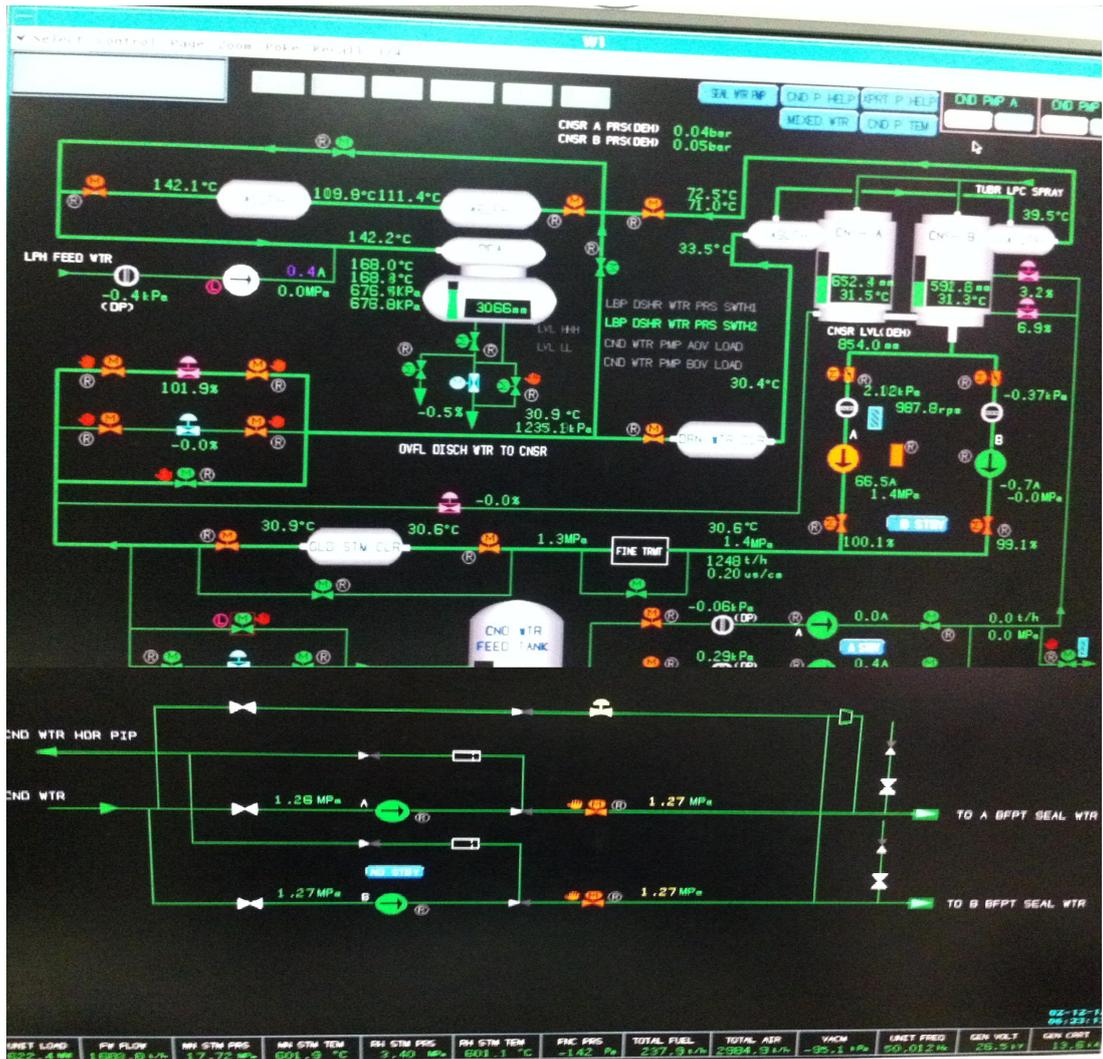
1000MW 工况下汽动给水泵密封水温度、压力曲线



1000MW 工况下凝结水系统参数曲线



620MW 工况下汽动给水泵密封水温度、压力曲线



620MW 工况下凝结水系统参数曲线

六、系统优化后的安全性与经济性对比

- 1、凝结水系统控制逻辑得到简化，有效地提高了控制系统的可靠性和安全性
- 2、密封水升压系统从凝结水系统剥离后，其系统复杂性大为降低，系统的故障点有效减少，从设备维护角度来讲提高了系统运行的安全性。
- 3、进一步挖掘了机组节能降耗潜力，提高了机组的经济性。
- 4、一台机组汽泵密封水升压系统生产及安装所需费用约为 80 万元（其中不包括日常维护费用），少安装三台机组共计节约费用约 240 万元。
- 5、如果全年四台机组密封水升压泵停运，节约了厂用电，导致厂用电率降低，则进一步提高了凝泵深度变频所带来的经济效益。密封水升压泵电机的额定功率为 30KW，那么四台机组一年因停运密封水升压系统所产生的直接经济效益为：

$30(\text{kW}) \times 0.85(\text{效率}) \times 24(\text{小时}) \times 350(\text{天}) \times 4(\text{台}) \times 0.45(\text{元/度}) = 38.556(\text{万元})$

结束语:

华能玉环电厂凝泵深度变频改造的瓶颈及最大制约因素在于如何保证给水泵密封水的供应,但从汽动给水泵的轴端密封结构来看,只要满足除氧器正常上水即可满足汽泵密封水的压力需求。即凝泵采用深度变频后,汽泵密封水压力是可以得到保证的,汽泵密封水回水温度也可以控制在正常范围内,且回水调门还有一定的富裕开度。另外即使今后在凝结水系统中加入烟气回热利用,其汽动给水泵密封水压力仍然能满足要求,而且还更加提高了系统的安全裕度,这也为进一步实施节能技术改造提供了理论依据和可靠保障。

作者简介:

聂 冶: 华能玉环电厂 运行部 工程师 值长组组长 浙江省玉环县大麦屿经济
开发区下青塘 邮编317604 电子邮箱 1013cjy@163.com 电话
0576-87177391 手机13656567391

白培强: 华能玉环电厂 运行部 工程师 副值长 浙江省玉环县大麦屿经济开
发区下青塘 邮编317604 电子邮箱 qiangqiangb@tom.com 手机
13656567196

参考资料:《玉环电厂给水泵安装运行、操作维护手册》 --- 日本株式会社荏原制作所