

# 徐州华润2×1000MW 超超临界机组无电泵启动方式的探索与实践

单龙辉

(徐州华润电力有限公司 江苏省徐州市华润路 1 号 221000)

**摘 要：**本文介绍了无电泵启动方式在徐州华润电力有限公司的运用，详细阐述了无电泵启动方式的给水控制策略；同时对其经济性进行了定量及定性分析，对超超临界机组全程汽泵启动过程的经济性进行了计算；提出了无电泵启动方式在实际给水控制中，所遇到难点以及相应的解决方法，以及对辅汽压力、给水泵转速控制、逻辑和汽机设备的相关要求。

**关键词：**超超临界；无电泵启动；给水控制；节能效果

## 1 概述

徐州华润电力有限公司 2×1000MW 超超临界机组汽轮机设计参数为 26.25Mpa/600℃/600℃，锅炉在 BMCR（最大连续蒸发量）工况下，最大蒸汽流量达 3044t/h，锅炉允许的最小给水流量为 801.36t/h，锅炉为超超临界塔式直流炉。在锅炉启动初期，原设计是使用电动给水泵进行锅炉上水、冷态冲洗及热态冲洗，在机组并网后再切换到汽动给水泵运行。若采用这种启动方式，首先，当机组冷态启动时，从启动电泵到机组并网带上初负荷（停电泵）需要至少 10 个小时，在这段时间内，电泵将消耗大量的电能；其次，汽泵启动暖机需要一定的时间，在并网前，若电泵发生故障，汽泵不能立即投运，则势必造成锅炉给水中断，从而耽误启机节点。因此，掌握百万机组全程汽泵启动的控制策略及特点，能够降低启动能耗，实现机组的快速、安全、经济启动，在能源日益匮乏、环境逐渐恶化的今天显得尤为重要。

## 2 设备概况

给水系统简介：本机组给水系统的主要功能是将除氧器中的凝结水通过给水泵提高压力，经过高压加热器进一步加热后，输送到锅炉的省煤器入口，作为锅炉的给水。此外，给水系统还向锅炉再热器的减温器、过热器的一、二级减温器以及汽轮机高压旁路装置的减温器提供减温水。

系统配置 2×50 %B-MCR 的汽动给水泵，一台汽动泵工作时，保证机组负荷 50%B-MCR 的给水量，两台汽动泵工作时，保证机组负荷 100%B-MCR 的给水量。给泵汽轮机共有三路汽源，一路高压汽源来自冷再热蒸汽，二路低压汽源分别来自四段抽汽和辅助蒸汽。正常运行时，给泵汽轮机由四抽接带，冷再及辅汽作为备用汽源。配置一台最大容量为 1044.7t/h 的电泵，在机组启动时向锅炉连续供水并向锅炉过热器、再热器及汽轮机高压旁路提供减温水。此电泵在正常运行时不作为备用。

表 1 电泵及配用电机相关参数表

名称	电动给水泵	电泵前置泵
制造厂	上海电力修造总厂有限公司	上海电力修造总厂有限公司
型式	卧式多级筒式泵	卧式双吸泵
型号	HPT300-330-4S	HZB253-640
容量（t/h）	1044.7	1153.3（1060）
扬程（mH <sub>2</sub> O）	1006.35	141.8
效率（%）	83.1%，	85.4
轴功率（kW）	3322.21	479.3
额定转速（r/min）	4442	1490
电泵配用电机参数		
制造厂	上海电机厂	

型号	YKS710-4
功率 (kW)	4400
转速 (r/min)	1492
电流 (A)	485
电压 (kV)	6
功率因素	

### 3 无电泵启动方式的给水控制策略

由于机组冷态启动的给水控制具有典型意义，因此以我厂冷态启动过程为例介绍其给水控制策略。

(1) 机组冷态启动时，不再启动电泵上水，而是启动汽泵前置泵(扬程为172.49mH<sub>2</sub>O)向锅炉上水，利用给水旁路调节阀控制上水速度

(2) 锅炉冷态清洗时，前置泵已无法满足锅炉大流量冲洗的要求，此时仍然不启动电泵，直接利用辅汽冲转第一台小机,利用低速暖机的机会（800rpm）进行冷态冲洗

(3) 锅炉起压后，利用给泵汽轮机中速暖机的机会（1800rpm）进一步提高给水压力，利用给水旁路调节阀来调整给水量，以满足锅炉供水的需要

(4) 贮水箱压力上升至1Mpa以上，将第一台给水泵冲转至2850rpm，由于给水泵已度过临界转速区，可以投入遥控，由DCS控制给泵转速。此后，由给泵转速和给水旁路调节阀共同调节给水流量及给水压力，以满足锅炉升温升压的要求

(5) 当负荷升至150MW后利用辅汽冲转第二台给泵，并尽早投入小机高压汽源暖管。当负荷升至400MW后，将两台给泵汽源切至四段抽汽接带直至满负荷。

(6) 在启动初期，贮水箱压力低于8MPa时，电泵始终处于备用状态。由于其启动速度快，故在开机过程中，可保证给水系统的可靠性。

### 4 无电泵启动方式的节能效果

#### 4.1 能量传递途径及定性分析

A. 电泵能量流动途径: 燃料中的能量→锅炉蒸汽能量→汽轮机机械能→发电机电能→电泵电动机→电动给水泵

B. 汽泵能量流动途径: 燃料中的能量→锅炉蒸汽能量→汽泵小汽轮机→汽动给水泵

从以上流程可以看出，使用汽泵其能量转换的环节要少于使用电泵，从定性角度分析，转换环节越少，能量的损失越少，使用汽泵要比电泵节能。

#### 4.2 定量分析

我们可以通过对比电泵与汽泵在出力相同（即相同给水流量和泵出口压力）的情况下，单位时间内所消耗的能量（即功率）来衡量两种启动方式的能耗大小，从而得出两种启动方式在能耗上的优劣。

##### 4.2.1 能耗对比方法的介绍

(1) 电泵启动方式的能耗: 设电泵流量为  $q$  时，其电动机电流为  $I$ ，电压为  $U$ ，功率因数为  $\cos\phi$ ，此种方式的能耗为  $E$

$$E = \sqrt{3}UI \cos \phi \quad (1)$$

(2) 汽泵启动方式的能耗: 设汽泵流量为  $q$  时，汽泵所消耗的蒸汽流量为  $Q$ ，汽泵进口蒸汽的比焓值为  $h_1$ ，汽泵排出蒸汽的比焓值为  $h_2$ ，根据热力学第一定律，1Kg 蒸汽在给水泵汽轮机做的功  $w=h_1-h_2$ ，即在单位内时间  $t$  内，流量为  $Q$  的做的功  $W$  为

$$W = Q \cdot t \cdot w = Q \cdot (h_1 - h_2) \cdot t \quad (2)$$

给水泵汽轮机的功率  $S=W/t$

所以

$$S = Q \cdot (h_1 - h_2) \quad (Q \text{ 的单位要使用 kg/s}) \quad (3)$$

(3) 两种启动方式的能耗对比公式：设汽泵与电泵的能耗比为 K，则

$$K = \frac{S}{E} = \frac{Q \cdot (h_1 - h_2)}{\sqrt{3}UI \cos \phi} \quad (4)$$

如果  $K < 1$ ，则说明汽泵启动方式较经济，如果  $K > 1$ ，则说明电泵启动方式较经济。

#### 4.2.2 两种启动方式实际能耗计算

下面选取我厂电泵及汽泵实际运行中记录的两组数据来进行计算

##### 4.2.2.1 工况一

电动给水泵：流量 556t/h 给水泵压力 8.1MPa 电泵电机电流 261 A，电压 6.2kV，功率因数  $\cos \phi$  为 0.92。

汽动给水泵：流量 563t/h 给水泵压力 8.18MPa（与电泵接近），汽泵进汽压力 0.476MPa，进汽温度 282℃，排汽压力 0.006 MPa，温度 83℃，蒸汽流量为 21.7 t/h (换算为 6.03 kg/s)

查水蒸气的焓熵图得出  $h_1=3027.02\text{KJ/Kg}$ ,  $h_2=2655.17\text{kJ/kg}$ 。

将以上数据代入公式(4)得  $K=0.874$

则可以得出结论，在此工况下选择汽泵运行可以比电泵运行节约 12.6%的能量。

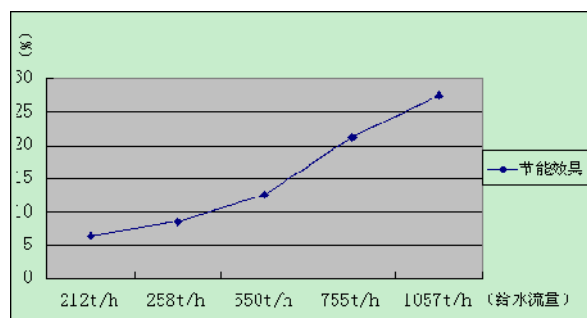
##### 4.2.2.2 工况二

由表 1 可知，电泵在达到最大出力时电机的功率接近额定值 4400KW,此时电泵流量为 1044.7t/h，压力为 10.06MPa，额定电流为 486A；而在相似的流量和压力下，记录的汽泵的的运行数据为：汽动给水泵流量 1057t/h，给水泵压力 10.46MPa，（与电动给水泵最大值接近）汽泵汽轮机进汽压力 0.454MPa，进汽温度 302℃，排汽压力 0.005 MPa，温度 43℃，蒸汽流量 为 25.596 t/h(换算为 7.11 kg/s)，查水蒸气的焓熵图得  $h_1=3068.88\text{kJ/kg}$ ,  $h_2=2579.72\text{kJ/kg}$ 。

将以上数据代入公式(4)  $K=0.725$

则可以得出结论，在此工况下选择汽泵运行可以比电泵运行节约 27.5%的能量。利用上述方法，可以得出不同给水流量下，汽泵与电泵的能耗比 K 值，并相应可以计算出其节能效果，如图 1 所示。

图 1 不同给水流量下无电泵启动方式的节能效果



由图 1 可以看出，随着给泵流量和压力的增加，使用汽泵启动的节能效果也更加明显。由表 1 中电泵相关参数可以计算，假设在一次启机过程中，给水泵在 100%出力下运行 10h。若选择全程汽泵启动方式，一次启机将节约比原运行方式约  $4400 \times 10 \times 0.275 = 12100\text{kWh}$  的下网电量。我厂启动变下网电价为 0.602 元/kwh，则一次启机过程直接经济效益至少可达 7284.2 元。若启机过程因其他辅机故障耽误启机节点，锅炉需持续上水时间延长，此项经济效益将会随之递增。

## 5 无电泵启动方式运行中的难点及注意事项

### 5.1 辅汽压力的选择

#### 5.1.1 存在的问题

辅汽在自身参数调节方面手段有限，使用辅汽冲转一台小机并使机组带上一定负荷，会使辅汽用量大幅度增加。若辅汽压力不足，辅助蒸汽温度过低时，首先会造成冲转蒸汽的过热度裕度不足，以至于给水泵汽轮机末级蒸汽湿度过大，这会对高速旋转的给水泵汽轮机末级叶片造成很大伤害，严重时危及机组的安全运行；其次会造成除氧器加热用汽压力下降，引起给水温度降低。若辅汽压力偏高于给泵设计的进汽压力，又有可能造成相关法兰漏汽、管道损坏。因此，能够提供合适的辅汽压力是选择无电泵启动方式的前提条件。

5.1.2 运行调整方式

表 2 #51 汽泵冲转后的相关参数

辅汽压力 /MPa	辅汽温度 /℃	小机低调阀 开度/%	汽泵转速/rpm	汽泵出口压 力/MPa	汽泵出口流 量/(t/h)
0.47	238	3.4	600	2.5	220
0.48	242	4.0	800	3.0	230
0.5	272	10.5	1800	6.5	270
0.46	282	24.8	2850	13.2	402.9

表 2 为 2014 年 3 月 4 日#5 炉启动时，辅汽带#51 汽泵时的各项参数。由于当时邻机未运行，辅汽来自本厂二期辅汽母管（300MW 机组），因此辅汽压力偏低，但从低调阀的开度可以看出，辅汽压力在 0.5MPa 左右时冲转一台给水泵，汽泵转速升至 2850rpm 后，低调阀开度仅为 24.8%，还有较大的裕度，且汽泵各项参数良好。

综上所述，选择合适的辅汽压力对于无电泵启动方式至关重要，对于 1000MW 机组，辅汽压力选择在 0.5MPa-0.8MPa 之间既能满足锅炉上水的要求，又能使辅汽参数不偏离给泵汽轮机低压进汽压力设计值（0.8MPa）过多。实际运行中应注意以下几点：

（1）锅炉启动时，尽可能维持邻机负荷稳定，确保辅汽压力足够冲转一台小机，并且满足锅炉上水要求。

（2）在小机冲转前，尽早对小机进行暖管，以期疏水充分，获得更高的蒸汽温度，保证汽泵安全稳定运行。

（3）严密监视汽泵运行中进汽压力、进汽温度、排汽压力、排汽温度、振动等相关参数。

5.2 汽泵转速的选择

5.2.1 存在的问题

锅炉上水完成后给水旁路调节阀后静压达到 0.35MPa，进入冷态水冲洗阶段，汽泵前置泵出力不能满足冷态大流量水冲洗需求，必须使用汽泵向锅炉供水。而汽泵出口压头较高，且在 2850rpm 转速以下无法线性调节，有可能造成给水旁路调节阀前后压差过大导致阀芯汽蚀。为保证给水旁路调节阀的安全运行，该阀前后压差应符合表 3 的规定。

表 3 给水旁路调节阀前后压差限值 MPa		
阀后压力	阀前压力	差压限值
0.3	3.5	3.2
0.35	4.5	4.15
0.4	5.5	5.1
0.5	7	6.5
0.6	8	7.4
0.7	9	8.3
0.8	11	10.2
1	14	13

由于小机受临界转速范围的影响，可调转速范围被限制在 2850r/min 以上，此时汽泵出水压力达到 13.2 MPa 以上。从表 3 可以看出，当阀后压力为 0.35 MPa 时，阀前压力限值为 4.5MPa。若汽泵仍采用原设计的 2850r/min 运行转速向锅炉供水，将造成给水旁路调节阀阀芯严重汽蚀。因此，在锅炉冷态清洗、热态清洗及升温升压阶段，给水旁路调节阀后压力较低的情况下，必须降低给水泵的运行转速。

在锅炉启动初期，给水泵转速的选择是锅炉启动成败的关键。

5.2.2 运行调整方式

(1) 在锅炉冷态清洗阶段及热态清洗初期，由小机电液控制系统控制汽泵转速在 800rpm 定速运行，由给水旁路调节阀控制给水流量。由表 2 可知，此时给泵出口压力为 3.0MPa 左右。

(2) 锅炉起压后，利用给泵汽轮机中速暖机的机会（1800rpm）进一步提高给水压力，利用给水旁路调节阀来调整给水量，以满足锅炉供水的需要。由表2可知，此时给泵出口压力为6.5MPa左右。

(3) 贮水箱压力上升至 1MPa 后，将第一台给水泵冲转至 2850rpm。由表 2 可知，此时给泵出口压力为 13.2Mpa 左右。

这种运行方式的选择，可以保证给水旁路调节阀前后压差值在允许汽蚀压差范围内。汽泵在规定的转速范围运行时，既可避开小机临界转速区域，又可确保给水旁路调节阀不被汽蚀，保证了设备的安全运行，使启机节点得以顺利推进。

5.3 给水系统逻辑优化

5.3.1 存在的问题

无电泵方式，需要在锅炉点火前冲转一台小汽轮机，但锅炉点火前 MFT 信号仍然在，这将导致小汽轮机无法挂闸。

同时，在锅炉点火之后，机组经常会因电气保护、试验、汽机走步不畅等原因触发 MFT，逻辑显示锅炉 MFT 将触发两台汽动给水泵跳闸。这就会产生以下三个问题：

(1) 汽泵频繁联跳，会对小汽轮机造成一定的冲击

(2) 汽泵重新冲转需要一定的时间，将会耽误启机节点

(3) 锅炉升压之后，若发生 MFT 触发高旁快开，汽泵同时跳闸将导致高旁减温水中断，使高旁阀后温度超限。

5.3.2 逻辑优化

MFT 联跳两台小机的保护，是为了防止锅炉在高负荷情况下发生 MFT 后，大量的冷水进入锅炉，造成锅炉水冷壁承受过大的热应力而发生变形甚至爆管。因此，在锅炉启动初期，设置该保护并不是必要的。

因此，若锅炉采用无电泵方式启动，汽动给水泵冲转前，需经总工程师批准强制两点逻辑：

(1) 解除 MFT 联跳两台小机的保护，在汽轮机冲转至 3000rpm 之后复位

(2) 强制 MFT 信号，汽轮机冲转之后复位。

5.4 小机排汽温度的控制

表 4 #51 小机各转速下排汽温度及排汽压力

汽泵转速/rpm	排汽温度/℃	排汽压力/kPa
600	90	-89
800	89	-90
1800	86	-94
2200	83	-95
2850	43	-95

由上表 4 数据可知，小机在较低转速运行时排汽温度较高，实际运行中 1800rpm 时，排汽温度达到 86℃。这是因为转速低时进入小机的蒸汽流量很小，不易带走排汽区鼓风摩擦产生的热量。小机排汽温度高将对小机末级叶片造成损害，严重影响小机的安全稳定运行。

因此，在小机冲转前应严格控制冲转参数在规定的范围内，确保给水泵汽轮机的后缸减温喷水工作正常。冲转后应尽量缩短小机低转速运行的时间，及时投用排汽减温水，当排汽温度持续升高时必须增大小机进汽流量。可采取适当加大汽泵出水流量或提升小机转速的方法，将小机排汽温度尽量控制在 90℃ 以下。运行中，一旦参数超限，要果断停止小机冲转，避免设备损坏。

5.5 小机低压汽源切换

### 5.5.1 存在的问题

小机低压汽源有两路汽源，一路为辅汽，一路为四段抽汽。机组负荷升至 400MW 后，为防止辅汽压力不足以满足给水流量及给水压力的要求，应尽快安排小机低压汽源切换。实际运行中，小机低压切换时存在以下两个扰动：

- (1) 由于辅汽与四抽压力不匹配，造成切换时小机转速波动大
- (2) 由于辅汽与四抽温度不匹配，造成切换时小机振动增大

### 5.5.2 运行调整方式

小机低压汽源切换一般安排在四抽压力达到 0.6 MPa 左右时进行，低压汽源切换前四抽压力需与辅汽压力接近，这样可避免切换时小机转速波动太大。

小机低压汽源切换前应对四抽至小机管道充分疏水暖管，以期提高蒸汽参数，同时避免管道振动。切换时，两台给水泵均投用给水自动控制，先缓慢打开四抽至小机电动门直至全开，然后缓慢关闭辅汽至小机进汽电动门。实际切换过程中，若操作得当，小机转速波动不大，最大波动 45 r/min 左右，对这个扰动转速，MEH 转速控制器立即进行补偿调节，小机低压调门将迅速响应。由于此时两台小机都投用给水自动控制，另一台小机也会立即做出响应，以补偿给水流量的变化。

由于在启机初期，辅汽母管汽源一般来自邻机，在汽源切换时，容易造成本机四抽温度与辅汽温度不匹配的情况。此时可提前将辅汽的一部分汽源切至四抽接带，这样可以很好促进辅汽温度与四抽温度相匹配。

为保证锅炉安全稳定运行，整个小机低压汽源切换过程中，应确保锅炉总给水流量无明显变化。

## 6 结束语

无电泵启动方式在 1000MW 超超临界机组的运用是充分挖掘设备潜力，不断提升运行水平的体现。其节能降耗方面的优势已明显展露，但对设备可靠性及运行操作水平也提出了一定的挑战。徐州华润电力有限公司自 2009 年 6 月投产以来，通过不断的摸索尝试，优化运行操作，克服了启动初期不启电泵运行时给水流量难以控制的技术难题。目前，对于无电泵启动过程中的给水控制，总结出了一套完整的运行经验。这项技术的掌握削弱了机组启动初期对电泵的依赖，不仅增强了机组启动的灵活性，加快了启机节点的推进，还减少了启机过程中下网电量的消耗，提高了机组启动的经济性。在今后的机组设计中，若取消电动给水泵系统，可减少建设投资近 3000 万元，同时可缩短机组建设周期及机组启动的时间，具有较大的推广意义。

### 参考文献：

- [1] 徐州华润电力有限公司2×1000MW运行规程锅炉部分[Z].江苏：徐州华润电力公司,2009.
- [2] 徐州华润电力有限公司2×1000MW运行规程汽机部分[Z].江苏：徐州华润电力公司,2009.
- [3] 徐生荣. 工程热力学[M].南京：东南大学出版社,2004.
- [4] 武云鹏.1000MW 机组纯汽泵启动的节能分析和给水系统改进方案[A].浙江：华能玉环电厂.

### 作者简介：

单龙辉（1987-），男，助理工程师，从事发电运行工作 6 年。

注：（作者联系方式：江苏省徐州市徐州/徐州华润电力有限公司发电部单龙辉，邮箱 403192891@qq.com，电话 051683425165，手机 13775895608）