

大型火电机组凝结水泵变频技术深度节能策略研究

温新宇

(1 神华国华(北京)电力研究院有限公司, 北京, 010025)

Research on Deep Energy-Saving Strategies of Condensate Pump Frequency Technology in Large Thermal Power Units

WEN Xinyu

(1.Shenhua Guohua (Beijing) Electric Power Research Institute CO.,Ltd., Beijing 010025, China;2. China Energy)

ABSTRACT: Condensate Pump Frequency technology of the Large Thermal Power Unit is mature, and it is widely used, but there is a big difference in depth saving energy. In this paper, to realize the depth of energy-saving inverter technology Condensate Pump, equipment selection, system design, the key parameter setting, control logic optimization and other multi-pronged approach should be considered. At the Infrastructure stage, condensate pump selection, condensate system design, selection of frequency devices, motor and bearing selection and other energy efficiency are the necessary condition to realize the depth of saving energy. At the commissioning phase, to determine the condensate pump minimum flow, the minimum outlet pressure value, the minimum speed the setting are the key parameter to achieve the depth of saving energy. At the operational phase, a reasonable set of deaerator water level control logic and condensate pump trip logic depth saving is necessary.

KEY WORD: Condensate Pump frequency conversion energy saving

摘要

大型火电机组凝结水泵变频技术成熟、得到广泛应用,但节能深度差异较大。本文提出实现凝结水泵变频技术深度节能,需要从设备选型,系统设计,关键参数设定,控制逻辑优化等多方面着手。基建阶段凝结水泵,变频装置,电机及轴承的选型、凝结水系统的设计是实现深度节能的必要条件,调试阶段凝结水泵最小流量、最低出口压力、最低转速的设定是实现深度节能的关键环节,运行阶段合理设置除氧器水位控制逻辑和凝结水泵跳闸逻辑对深度节能十分必要。

关键词: 凝结水泵 变频 运行 节能

引言

目前,600MW、1000MW 等级大容量高参数火力发电机组已经成为我国电网的主力机型。凝结水泵在机组变负荷过程中的出力特点决定了其成为电动机变频技术应用的首选对象。由于可有效降低机组厂用电率,凝结水泵变频技术在新建机组和运行机组技术改造中得到广泛应用。大容量火电机组调峰运行机会不断增加;凝结水泵变频技术在实际应用中,存在不同程度的应用缺陷,节能效果差异较大。

国内目前尚缺乏从系统设计、设备选型、运行控制等环节综合考虑的深度节能策略和方案。本文结合凝结水泵变频技术现场实际应用情况,在提高技术应用安全性的前提下,提出凝结水泵变频技术深度节能策略和方案,对挖掘同类型机组节能潜力具有十分重要的意义。

1 现状和问题

1.1 设备选型

目前新建大容量高参数凝汽式汽轮机通常按照《大中型火力发电厂设计规范》GB50660-2011 中要求设计 $2 \times 100\%$ 或 $3 \times 50\%$ 凝结水泵,分别按照一运一备和两运一备的方式运行。其中 $3 \times 50\%$ 凝结水泵配置更能适应机组宽负荷变化和低负荷运行方式,但凝结水泵启停次数增加,对凝结水系统管道和设备冲击较大。

由于变频技术本身具有较好的负荷适应性,针对采用变频方式的凝结水泵配置,无论是新建还是改造机组 $2 \times 100\%$ 配置较 $3 \times 50\%$ 的配置在技术经济、运行方式、节能效果方面更有优势。

国内部分300MW、600MW等级机组进行了

凝结水泵取掉一级叶片的改造，改造后仍能满足全工况的运行要求。

表 1：某 300MW 机组凝结水泵取一级叶片前后节能效果对比（%）

机组负荷率	凝泵耗电率		节电率
	取一级叶片后	取一级叶片前	
70.0	0.39	0.44	11.36
74.7	0.35	0.43	18.60
79.3	0.345	0.38	9.21
82.3	0.34	0.39	12.82

1.2 系统配置

机组运行中凝结水系统流量需满足除氧器水位的需要，凝结水泵工频运行方式下除氧器上水调节阀节流调节是唯一手段。随着机组容量的增加，为了降低节流损失，将除氧器上水调阀设置分为 30%流量调阀和 70%流量调阀，或 30%流量调阀和 100%流量调阀（图 1），简称双阀系统。凝结水泵变频运行方式下除氧器上水调阀作为辅助调节手段，在变频器故障或机组低负荷等情况下使用。除氧器上水调阀一般设置 100%容量一路（图 2），简称单阀系统。现场实际也有变频方式采用两路除氧器上水调阀的情况，而在现役机组凝结水泵变频改造后大多没有进行相应系统的变更和改造。

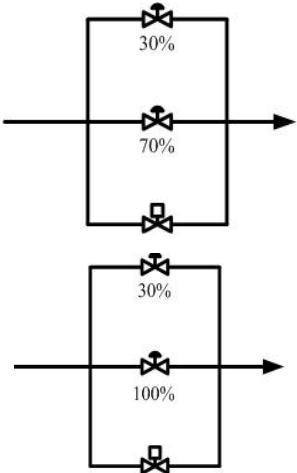


图 1：双阀系统

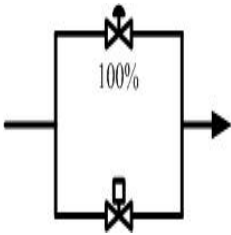


图 2：单阀系统

1.3 节能效果

实际运行中凝结水泵变频方式下仍然存在除氧器水位调节阀开启不足、节流剧烈的现象非常普遍。不同发电机组凝结水泵变频与工频运行相比较，节能效果差异较大。

表 2：600MW 等级机组凝结水泵变频节能率比较（%）

厂别	50%THA	75%THA	100%THA
A厂	64.44	58.14	36.84
B厂	35.5	32.7	23.2
C厂	71.97	60.50	28.47

2原因分析

2.1 凝结水泵设计选型偏大

造成选型偏大的主要原因有：

- 1) 凝结水泵的设计扬程裕量较大，最大凝结水量计算中包括凝结水系统阻力时加10%-20%裕量。在不存在凝结水泵老化裕量的的情况下，考虑如此大的扬程裕量显然偏大。
- 2) 凝结水泵的设计容量比机组正常工况凝结水量大10%，在10%的流量裕量中，其中大约一半是考虑了在凝结水系统中不存在的流量——凝结水泵老化裕量。
- 3) 辅机制造厂提供的低压加热器和轴封冷却器的保证压降偏大。
- 4) 大容量机组除氧器采用滑压运行，其实际工作压力低于凝结水泵确定扬程采用的最大工作压力。

2.2 凝结水泵变频改造的同时未对凝结水系统和控制逻辑进行相应改进和优化。

2.3 给水泵密封水压力、汽轮机低压旁路减温水等参数是制约凝结水泵出口压力最低允许值的主要因素。

2.4 变频装置、电机等设备性能导致凝结水泵低频率或某特定频率下运行受限。

3变频方式下系统设计与选型

3.1 凝结水泵的选型

- (1) 大容量、高参数机组凝结水流量大，相对于小机组凝结水流量的增幅远远大于除氧器压力的增幅，应该选择P-Q 曲线更为平缓的凝结水泵。
- (2) 考虑凝结水泵变频运行的需要，选择在部分负荷段有较高效率的凝结水泵十分必要。
- (3) 由于空冷机组背压变化幅度大，凝结水温度高，凝结水泵汽蚀的可能性大。所以对于空冷机组选择汽蚀余量较小的凝结水泵更为安全。

3.2 凝结水系统的设计

3.2.1 除氧器上水调节阀优先选用 100%容量单阀系统或 30%与 100%容量配合的双阀设计，有效降低系统阻力。但应满足小开度下的流量特性满足调节要求。

3.2.2 根据同容量同型号的低压加热器和轴封加热器水侧实际运行阻力修正计算阻力。

3.3 变频装置的设计与选型

3.3.1 系统设置

凝结水泵变频系统通常设计有一拖一、一拖二两种型式。在凝结水泵变频技术发展初期，一拖二凝结水变频系统由于初投资低、可实现两台凝结水泵中的任何一台变频运行而被新建机组广泛采用。但随着技术成熟，国内高压变频器的价格已大幅下降，相比一拖二系统切换过程的复杂和运行风险，采用一拖一凝结水泵变频系统更为可靠和灵活，可提高变频装置的可靠性，提高变频运行时间，减少耗能量。

3.3.2 容量选择

凝结水泵变频装置由多个功率单元容量组成，变频器 0~50hz 的频率变化速率是变频器的重要运行指标，变频器功率单元容量越大允许的频率变化速率越快。频率变化速率过慢，则不能满足热力系统的需要，频率变化速率过快，容易导致变频器功率单元过流或过压。

建议按照凝结水泵电机容量的 1.2 倍选择变频器容量，如：某凝结水泵电机功率为 2600KW，变频装置设置 9 个功率单元共

3250KVA。

3.4 电机及轴承的选型

凝结水泵电机及轴承应能满足工频和变频运行要求。国内多家电厂出现在某频率区间由于凝结水泵轴承或电机振动大，无法满足变频全程运行的缺陷。为了满足凝结水泵能在不同频率下运行，在配套电机和轴承时需考虑设备组合体的固有频率躲开共振频率的要求。

4凝结水泵变频技术深度节能策略

4.1 凝结水泵最小流量的选取

一般情况下凝结水泵厂家仅提供凝泵工频运行时的最低允许流量，现场可以根据相似定律计算出不同转速下凝泵的最低允许流量（式 1），现场实际中为了保证凝结水泵在不同工况下安全运行，凝结水泵最小流量设定值按计算流量的 1.06 倍设定，表 2 为某 660MW 超临界空冷机组凝结水泵最小流量计算值与设定值数据，现场经过 2 个大修周期运行证明能够满足凝结水泵安全运行需要。

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{f_1}{f_2}$$
（式 1）

其中：Q 为凝结水泵流量，n 为凝结水泵转速，f 为凝结水泵电机运行频率。

表 3：某 660MW 超临界空冷机组凝结水泵最小流量计算值与设定值

频率 (HZ)	25	30	35	40	45	50
计算值 (t/h)	235	282	329	376	423	470
设定值 (t/h)	250	300	350	400	450	500

4.2 凝结水泵最低出口压力的确定

凝结水泵出口压力控制参数以满足机组常规运行工况（如：40%~100%THA）除氧器水位压力要求、满足杂项用户压力需要为目的，即两者选大。针对制约凝结水泵出口压力的制约因素如：给水泵密封水压力、汽轮机低压旁路减温水、轴封蒸汽减温水采取针对性的措施

4.2.1 针对凝结水泵变频运行的特点, 给水泵密封水系统的设计可采用以下方式:

(1) 制造厂提供的给水泵密封水压力要求值一般都留有较大裕量, 可以通过试验适当降低。

(2) 建立给水泵密封水回水温度与凝结水泵变频装置的连锁逻辑, 在出现给水泵密封水回水温度快速升高或达到一定值时, 及时提升凝结水泵出口压力。

(3) 通过增加给水泵密封水管道泵等措施, 消除给水泵密封水压力对凝结水泵最低出口压力的要求。

4.2.2 旁路减温水常常在机组启动或事故工况下使用, 高压缸启动的机组尤为如此, 此时可以通过提高变频凝结水泵转速或启动工频凝结水泵来保证旁路减温水的需要。660MW超临界机组凝结水泵出口最低压力选择在1.0 Mpa左右。经现场多种运行工况验证可行, 节能效果较好。

4.3 凝结水泵最低转速的设定

最低转速的确定即最低频率设置的确定。凝结水泵最低频率设置一般以满足热力系统最低允许压力、流量参数需要为目标, 既可以在变频器上设置, 也可以在DCS热控控制回路进行设置, 现场通过试验确定。最低频率设定后变频器启动会自动加速或减速至最低频率。一般最低频率设定在25HZ及以下可以获得较大的节能深度。

4.4 除氧器水位自动控制方案确定

不同电厂在凝结水变频改造后除氧器水位自动调节中采用了不同的方式, 总体思路是, 在保证满足凝结水泵出口最小压力要求与除氧器水位量的前提下, 除氧器水位调节阀全开所对应的负荷点, 称为平衡点。负荷在平衡点以上时, 可以单纯依靠增加凝结水泵转速来增加凝结水流量, 以满足机组运行需要。负荷在平衡点以下时, 凝结水流量调节须结合除氧器水位调节阀的开度进行。

平衡点可以通过现场试验获得。在满足需要的情况下, 手动降低凝结水泵转速, 缓慢开大除氧器水位调节阀, 直到该阀全开, 可以获得平衡点。平衡点是凝结水泵变频运行后除氧器水位控制方式切换的拐点, 标示着凝结水泵变频改造节能潜力的深度, 平衡

点工况流量越低, 变频方式整体节能效果越好。影响平衡点确定的主要因素有: 凝结水泵最低出口压力和凝结水泵跳闸连锁控制方式。

具体控制方式应简洁, 实用。正常运行中凝结水泵变频器投自动跟踪调节除氧器水位, 凝结水主调阀投自动保持凝结水系统压力不低于定值压力, 以满足凝结水系统用户的需求。变频自动因故切手动后, 控制逻辑自动转换为凝结水主调阀自动跟踪调节除氧器水位, 机组启停阶段因低压旁路减温水需要的压力较高, 可手动调整凝结水泵频率在较高的定值, 由凝结水主调阀自动调节除氧器水位。

4.5 凝结水泵事故跳闸联动方案

除氧器水箱的容积能够满足不小于5min最大锅炉蒸发量的, 随着火电机组自动控制技术的提高, 大大提高了机组的响应速度, 除氧器的有效容积基本能够满足机组各种异常工况给水系统的蓄水量。凝结水泵事故跳闸是影响凝结水系统安全运行的最严重事故, 因此, 凝泵的事故联动方案选择尤为重要。凝结水泵事故跳闸联动方式分为工频联动和变频联动两种。

由于机组大部分运行工况下凝结水泵变频运行时除氧器上水调阀处于全开位置, 凝结水泵工频联锁启动后会造成凝结水流量大幅上升, 600MW等级以上机组低负荷时凝结水流量突升在1000t/h以上, 易出现凝结水泵超出力运行、电动机过载甚至跳闸, 更严重的后果导致除氧器水位快速上升, 进而引发除氧器水位高事故。解决方案是变频凝结水泵跳闸, 备用凝结水泵工频启动后, 除氧器上水调阀快速参与流量控制, 除氧器上水调阀保护关至一定阀位(试验确定, 如660MW超临界机组为30%阀位和原阀位的60%两者取小值), 然后自动跟踪调节除氧器水位, 同时快开凝结水再循环阀门。

变频联动对凝结水系统和除氧器水位扰动小。一拖一方式的凝结水泵变频装置可实现变频联动。由于变频启动需要一定时间, 可以通过备用泵指令跟踪运行泵频率, 启动后自动升至高于原频率3~5HZ运行,

然后进入常规除氧器水位调节模式的方案解决。

4.6 与凝结水一次调频技术的配合

凝结水一次调频技术已经成功应用于国内大型火电机组中，凝结水泵的变频装置的设计应提前考虑凝结水一次调频功能。从变频装置的容量、频率变化速率和范围上更好的满足一次调频的需要。

5 凝结水泵变频深度节能效果

采用行之有效的措施，可以大大提升凝结水泵节能的效果。表 3 为某 660MW 超临界空冷机组凝结水泵节电率数据，在全国范围内属于领先水平。

表 4：某 660MW 超临界空冷机组凝结水泵节电率

负荷 (MW)	凝结水 流量 (t/h)	工频电 功率 (kW)	变频电 功率 (kW)	节电 率(%)
660	1604	2055	1470	28.47
600	1470	1975	1180	40.25
550	1349	1920	994	48.23
500	1240	1859	843	54.65
450	1158	1810	715	60.50
400	997	1743	603	65.40
350	902	1690	529	68.70
300	788	1627	456	71.97

6 结论

采用凝结水泵变频技术是今后大型火电机组经济运行的需要，技术成熟可靠。做到深度节能需要从设备选型，系统设计，关键参数设定，控制逻辑优化等多方面入手。

- 1) 目前凝结水泵优先选择 2×100%配置，变频装置宜采用一拖一方式，除氧器上水调阀宜采用单阀系统。
- 2) 凝结水泵的设计选型应符合现场实际，避免选型过大运行中经济性

下降。

- 3) 凝结水泵变频装置选型应有一定富裕容量，控制凝结水泵最低出口压力、最低频率、频率变化速率等关键指标可以提升凝结水泵变频技术的节能效果。
- 4) 凝结水泵最小流量、最低出口压力值、最低转速的设定是变频技术深度节能的关键参数，应结合现场实际确定。
- 5) 优化除氧器水位控制逻辑和凝结水泵跳闸逻辑可有效提高凝结水泵变频技术的节能效果。
- 6) 凝结水泵变频改造项目应对系统进行相应改造和逻辑变更，达到深度节能的目的。

参 考 文 献

[1] 刘颖华, 石英. 超超临界机组凝结水泵变频调节方案经济性分析 [J] 神华科技 2009 年第 02 期

[2] 张宗桐 现代工业自动化技术应用丛书：变频器应用与配套技术 2008 年

[3] 邢国清 流体力学泵与风机 中国电力出版社 2009 年 2 月

[4] 李仕敏. 600MW 火电厂凝泵变频调节[J]. 贵州电力技术

[5] 范葵香, 毛建民. 火电厂凝泵变频控制改造的能效[J]. 上海电力

[6] 高建民, 郭岩, 梁双印, 等. 600 MW 机组凝结水泵运行状况及节能改造分析 [J] . 电力科学与工程,

[7] 张鹏, 王国成, 杨茜. 凝泵变频控制方案 [J] . 自动化应用

[8] 周珠峰, 林爱荣. 1000 MW 机组凝结水泵变频控制策略的研究与应用[J]. 浙江电力

[9] 俞振华. GW 级机组凝结水泵变频运行性能分析[J]. 中国电力

[10] 程伟良, 徐寿臣. 电厂凝结水泵变频调节方式的经济性分析[J]. 华东电力

作者简介:温新宇(1977~) 男 山西祁县人 硕士 高级工程师 从事火电厂设计优化工作
联系方式: 办公电话 010-85957136, 手机 18132768306, 邮箱 494418726@qq. com,
通讯地址: 北京市朝阳区建国路 75 号神华国华(北京)电力研究院设计技术室