

# 液偶调速电动给水泵节能改造方案解析

## ——行星齿轮变矩调速器与变频器方案对比

欧卫海

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

**摘要:** 当前火力发电厂锅炉给水泵普遍采用液力耦合器作为调节装置,但是由于液力耦合器的机械结构和调节方式的限制,液力耦合器调节方式存在效率较低和可调范围较小等不足,随着科技发展和技术创新,多种新型调节装置可用于锅炉给水泵调节。介绍了行星齿轮变矩调速器(VORECON)与变频器(VFD)两种新型调节装置的原理、性能、改造方案和费用,通过实际改造案例详细对比了两种方案的改造后实际效果和费用,得出变频器改造方案优于行星齿轮变矩调速器方案的结论。

**关键词:** 给水泵调节方式;行星齿轮变矩调速器;变频器

中图分类号: TM621

文献标志码: A

文章编号: 2095-8676(2016)S1-0022-05

## Bolier Feedwater Pump Hydraulic Coupler Energy Saving Retrofit Scheme

### —Compare of Planetary Gear Torque Speed Solution and Variable Frequency Drive Solution

OU Weihai

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., GuangZhou 510663, China)

**Abstract:** At present, Boiler feedwater pump in thermal power plant is generally adopts hydraulic coupler as adjusting device; However, due to the limitations of the mechanical structure and regulation of hydraulic coupling, hydraulic coupler is low efficiency with small adjustable range. With the development of science and technology, a variety of new regulating device can be used as adjusting device for boiler feedwater pump. This paper mainly introduces principle, performance, renovation plan and cost for the planetary gear torque speed (VORECON) and Variable Frequency Drive (VFDS); The detailed comparison of effect and cost of two solutions is given by actual cases. Through a series of contrast analysis, this paper consider that Variable Frequency Drive solution is better than the planetary gear torque speed solution.

**Key words:** feedwater pump regulate; VORECON; variable frequency drive

自上世纪八十年代以来,国内 100 MW 以上火力发电燃煤机组的锅炉如果配置电动给水泵,基本上都是采用液力耦合器(以下简称“液偶”)作为调速装置,给水泵组原理如图 1 所示。

## 1 液力耦合器节能的空间

液力耦合器能实现给水泵 20% ~ 100% 转速范

围内的无级调速,相比在给水泵出口安装调节阀利用节流方式控制给水流量具有节能 30% 的效果,但随着科学技术的进步,更新型、更加节能调节设备的出现,突显了电动给水泵液力耦合器调速的节能潜力,主要表现在以下三个方面:

1) 根据液力耦合器的工作原理,伴随调速过程而产生滑差热损耗,以 300 MW 等级机组为例,每台液力耦合器的工作油损耗热量在 2 GJ 左右,折合功率损耗不少于 250 kW,一台机组要运行两台液力耦合器,一年损耗的电量超过 300 万度(kWh)。

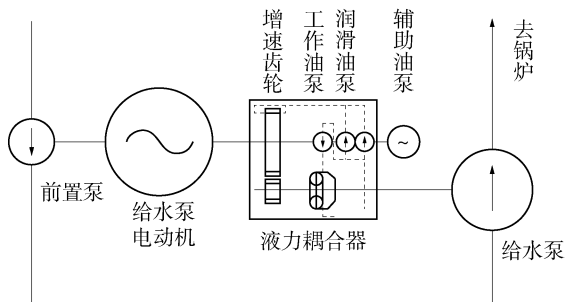


图 1 液力耦合器调速给水泵示意图

Fig. 1 Schematic diagram of hydraulic coupler speed regulating feedwater pump

2) 给水泵电动机由于长期偏离最佳运行经济点而产生能量损耗。按国内火电机组设计规范，给水泵的设计点工况基本上是机组 ECR 工况的 1.2 倍，给水泵电动机的额定容量则根据给水泵设计点工况轴功率来确定，这决定了给水泵电动机的额定容量比机组 ECR 工况高出了 20%。另一方面，因各机组供电负荷的不同，机组的年平均负荷可能在 65%~90% ECR 之间，给水泵电动机经常在远离额定负荷的工况下运行，而电动机运行额定负荷下才有最高的效率。

3) 调节方式存在能量损耗。液力耦合器的调速方式为液力滑差间接调速，给水泵转速的变化不是由给水泵电动机直接产生，所以，泵与风机相似性原理的第三条“功率和转速的三次方成正比”对给水泵电动机的高效运行并不适用，在液力耦合器调速的方式下，给水泵电动机始终在恒速运转，损耗了一定的功率<sup>[1]</sup>。

## 2 选择合适的设备替换液力耦合器

需要消除上述三方面的损耗，则需节省给水泵组的能量消耗。那么，应选择合适的设备，对于电动给水泵驱动和调节，“合适设备”的衡量标准就是具备高效的能量传递，高品质的转速调节，高性价比的投资费用。

本文主要对两种设备展开分析和讨论。一种是变频器 (VFD)，已经在国内应用较多且时间长，但在给水泵节能改造项目中还是个较新的领域。另外一种是采用液力耦合器，火力发电厂中德国福伊特 (VOITH) 公司在我国推介的新型液力耦合型调速器 VORECON 使用较为普遍。

## 3 液力耦合器

### 3.1 液力耦合器简介

变速型液力耦合器的结构主要有：泵轮、涡轮、工作、勺管、主油泵、油箱、进油室和回油室、有的可能还有辅助油泵。各生产厂家在设计制造时结构上可能有所差异。

液力耦合器的工作原理，以液体为工作介质的一种非刚性联轴器，又称液力联轴器。液力耦合器的泵轮和涡轮组成一个可使液体循环流动的密闭工作腔，泵轮装在输入轴上，涡轮装在输出轴上。电动机带动输入轴旋转时，液体被离心式泵轮甩出。这种高速液体进入涡轮后即推动涡轮旋转，将从泵轮获得的能量传递给输出轴。最后液体返回泵轮，形成周而复始的流动。液力耦合器靠液体与泵轮、涡轮的叶片相互作用产生动量矩的变化来传递扭矩。它的输出扭矩等于输入扭矩减去摩擦力矩，所以它的输出扭矩恒小于输入扭矩。液力耦合器输入轴与输出轴间靠液体联系，工作构件间不存在刚性联接<sup>[1]</sup>。

火力发电厂使用较多的 VORECON“液压耦合变矩、行星齿轮传动”的调速装置，主要由行星变速齿轮+液力变矩器有机组合而成，调速装置有其独到之处。始于 1985 年，使用也有 30 年的历史，产品已经相对成熟。

### 3.2 相比液力耦合器 VORECON 的节能效果

根据 VOITH 公司的介绍，目前应用在给水泵上的 VORECON，通过齿圈传递了 75% 的功率，25% 的功率经液力变矩器传送。从这点上看，VORECON 相比液力耦合器肯定要节能，见图 2。

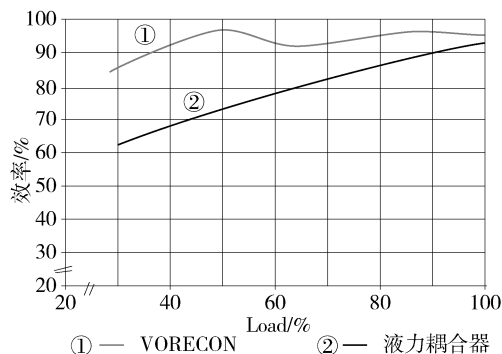


图 2 VORECON 和液力耦合器效率

Fig. 2 Efficiency of VORECON and hydraulic coupling

### 3.3 VORECON 与液力偶合器调速性能对比

传递能量无疑是液力偶合器和 VORECON 的重要功能, 且是调节给水泵转速或是液力偶合器和或是 VORECON 才能调速, 从而调节给水量。与液力偶合器相比, VORECON 的调速能力又怎样呢? 也是根据 VOITH 公司的介绍资料, VORECON 的调速范围是 55% ~ 100%, 而液力偶合器的调速范围是 20% ~ 100%。假定给水泵的最高转速是 6 000 rpm, 液力偶合器可以从 1 200 rpm 起步, 而 VORECON 启动就是 3 300 rpm, 这一运行方式, 以目前国内在运行的未作技术改造的给水泵组(给水系统给水泵的最小流量阀和再循环管道如果未作全面的改造), VORECON 几乎无法应用。道理很简单, 为了保护给水泵, 在给水泵出口设计有再循环管道和阀门, 发电厂称再循环阀为“最小流量阀”, 一般给水泵再循环管道最大容量按给水泵额定流量的 25% 左右配备, 对应的给水泵转速在 2 500 rpm 左右, 而 VORECON 起步就是 3 300 rpm, 显然是太高了。影响最大的还是在机组低负荷运行时, 如液偶调速电动给水泵能在 15% ECR 工况下正常运行, 而 VORECON 大概在低于 40% ECR 工况下就失去了给水流量的调节能力。

当然, VOITH 生产的 VORECON 有各种型号, 其中也有宽调节范围的, 由液力偶合器 + 液力变矩器 + 行星齿轮 + 离合器复合组成, 相当于一台完整的液力偶合器串联一台 VOREKON。不过, 在节能改造方面能否选用这种宽范围调节的 VORECON, 决定因素不是技术, 而是投资与收益的性价比确定。

### 3.4 选择 VORECON 的性价比

根据目前 VOITH 公司提供给国内用户的 VORECON 继续进行节能改造的分析。不可回避的是如果采用 VORECON 用于锅炉给水泵节能改造, 需要多少钱? 比如 300 MW 机组, 3 台 50% MCR 的给水泵组, 运行方式两用一备。据广东某电厂的资料, 与 5.5 MW 给水泵电动机匹配的 VORECON, 每台 1 000 万元人民币, 改两台就是 2 000 万元, 但这不是最终的项目总价, 仅仅是 VORECON 的设备价格, 还有因采用 VORECON 而产生的附加成本大概有以下三个方面:

第一, 因型号不同液力偶合器输入轴和输出轴的轴心距在 400 mm (R16K400M)、512 mm

(R17K2E) 不等, 所以, 目前给水泵组的电动机 + 前置泵和给水泵不在一条轴线上。而 VOREKON 输入/输出轴同心, 在一条轴线上, 而且, VOREKON 的长度与给水泵电动机差不多, 宽度要比液偶宽许多, 其垂直投影比给水泵电动机的面积还要大, 比现有的液力偶合器大了至少 2 倍。如果改造, 必须对给水泵组的基础动大手术进行处理, 给水泵组的基础属重载基础, 内里密布钢筋, 深度一般在 5 ~ 7 m, 这笔开销需要仔细核算, 钢筋混凝土基础拆旧建新的工期也应慎重安排, 估计机组 A 级检修工期不能完成。

第二, 无论处理给水泵还是电动机(前置泵)的基础, 都涉及到高压水管路的改造, 同样需要较多的费用。

第三, 长期的维修费用并不低, 生产厂一般认为 VORECON 的检修周期为 8 年。但市场经济中, 由于液力偶合器用量较少, VORECON 比液力偶合器还要稀缺设备的商品价格就比广泛应用的设备价格要高很多, VORECON 结构比液力偶合器也复杂得多, 设备单价估计超过液力偶合器的 5 倍, 液力偶合器的检修周期是 5 年, 综合 VORECON 的性价比就不是那么高了, 因而未能得到广泛的应用<sup>[1]</sup>。

## 4 选用变频器

### 4.1 变频器的特点

随着电力电子技术的发展, 近年来高压变频器技术已经成熟, 主要优点有:

- 1) 速度控制范围宽, 1% ~ 100%。
- 2) 调节精度高,  $\pm 0.5\%$ 。
- 3) 整机效率 97%, 功率因数不低于 0.95。

### 4.2 液偶调速电动机给水泵变频改造方案

广州智光节能公司设计的液偶调速电动机给水泵变频改造方案见图 3 和图 4。

1) 方案说明有另文详述, 本文所强调是将液力偶合器改为增速箱具备了节能的最大公约数, 主要是拆除了液力偶合器的泵轮和涡轮, 用新设计的齿型联轴器挠性连接小齿轮轴和输出轴, 拆除液偶工作油系统及其附属冷油器, 这些措施消除了液偶调速存在的第一项损耗。

2) 为给水泵电动机增配高压变频器, 给水泵转速由液力偶合器调节改为电动机变频调节。能有效地拾升给水泵电动机的运行效率, 消除了液偶调速

存在的第二项损耗。

3) 取消液力耦合器并把液偶改成机械直连的增速箱以及给水泵电动机增配变频器两项技术改进措施把原来的液偶调速存在的第三项损耗也消除了。

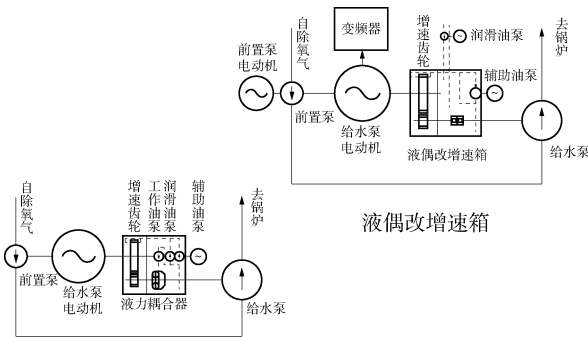


图 3 增速箱调速给水泵示意图

Fig. 3 Schematic diagram of speed-up gear box speed regulating feedwater pump

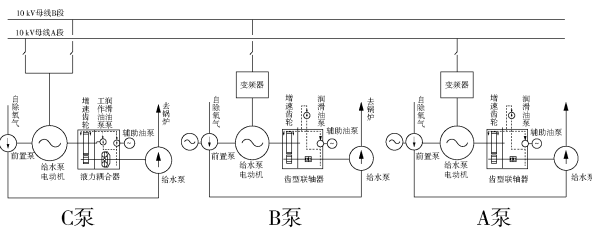


图 4 给水泵组改造项目示意图

Fig. 4 Schematic diagram of feedwater pumps group renovation project

## 5 VORECON 与变频器应用于液偶调速电动给水泵节能改造的比较

### 5.1 改造项目投资

#### 5.1.1 变频器

以 300 MW 等级的机组为例，对 3 台锅炉给水泵组中的两台进行节能改造，根据智光节能公司已经完成的 18 台给水泵（电机 5 500 kW）的决算价，项目（交钥匙工程，其中包含了提供 2 台变频器、加盖变频器室、增配变频器的空、水冷装置、工程安装、控制系统 DCS 增加测点和组态、液力耦合器改为增速箱、给水前置泵的改造、增配前置泵电机、系统的试验和调试等）平均造价为 1 000 万人民币（下同）左右。

#### 5.1.2 VORECON

同比计算，仅设备采购需要花费 2 000 万元，给水泵组基础、高压给水管道改造费用 200 万元左

右，冷油器、联轴器等附件 200 万元左右。总价不低于 2 400 万元（根据目前现有的资料估算，如果有更确切的数据，需要重新核算）。

#### 5.1.3 点评

变频器改造方案在投资方面绝对优于 VORECON。

### 5.2 调速性能

#### 5.2.1 变频器

变频器调速范围 1% ~ 100%（完全满足给水泵转速变化 20% ~ 100% 的要求）。调节品质，全程线性。

#### 5.2.2 VORECON

调速范围 55% ~ 100%，不能满足机组低负荷运行的调节要求。调节品质，非线性。

#### 5.2.3 点评

VORECON 与液力耦合器相比，在调速性能方面已经缺少了 35% 的调节能力，这种能力的缺失一定会引发给水系统在工艺上更多的改造，继续增加投资费用，同时增加了运行操作的复杂性。变频器良好的调节性能提升了锅炉给水调节回路的调节品质。

在火力发电厂节能改造中，就发电厂锅炉给水泵转速调节而论，VORECON 与变频器后者为强，进一步讲变频器在技术上、经济上更能满足锅炉给水泵转速调节的实际要求。

### 5.3 长期检修和维护费用

#### 5.3.1 变频方案

变频器是电力电子设备，只要依照电子设备的标准给 VFD 提供运行环境，实践证明，变频器的日常维护也只需例行检查、定期扫尘清滤网而已，长期检修随机组大修即可。变频器相对薄弱的元件是电容器，一般的电容器工作寿命是 8 年，质量好的金属膜电容能达到 15 年。单元体的寿命都在 15 年以上。这些电子元器件都是随机更换的，所以电子元器件的长期检修费用应该按平摊费用计算，当前由于变频器被广泛应用，该设备的价格已是市场化性价比较好。

#### 5.3.2 VORECON

VOITH 公司资料介绍 8 年一次大修。一般是指整机的大修，日常维护大概与液偶也差不多，如日常连工作油、润滑油品质的检查。如果 VORECON 是 8 年一次检修，检修也要由 VOITH 公司的技术

人员来完成, 根据经验, 无论人工和设备的备品、备件费用均属昂贵。

### 5.3.3 点评

以目前的技术发展水平看, VFD 已经被广泛应用, 而 VOREKON 相对减少。如此估算, VFD 长期的检修、维护费用不会比 VOREKON 为高。

### 5.4 节能效果

以下分别是某 A 电厂和某 B 电厂给水泵变频改造的节能曲线, 其它电厂的节能曲线也相近。

1) 某 A 电厂 2 号机组全年运行 7 200 h, 可利用小时 5 400 h, 年平均负荷率 75%, 综合相对节电率 23%。两台给水泵变频改造后全年节电超过 1 378.16 万度。

2) 某 B 电厂 2 号机组全年运行 7 900 h, 可利用小时 5 950 h, 年平均负荷率 75%, 年平均节电率 26%。两台给水泵变频改造后全年可节电 1 795 万度。

经过电厂节能技术改造案例的对比节能效果变频器调速器优于 VOREKON 更优于普通的液力偶合器。

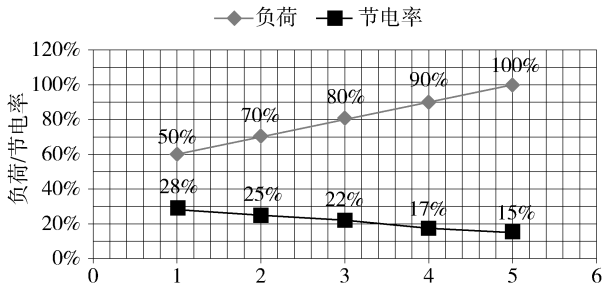


图5 A 电厂机组年平均负荷/变频给水泵节电率

Fig. 5 A power plant unit annual average load/variable frequency feedwater pump power saving rate

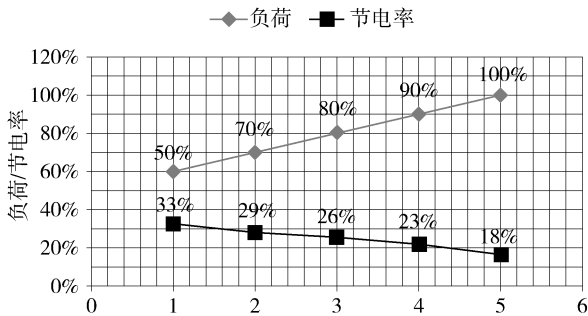


图6 B 电厂机组年平均负荷/变频给水泵节电率

Fig. 6 B power plant unit annual average load/variable frequency feedwater pump power saving rate

在机组 75% 负荷工况下 VORECON 比液偶提高效率 14.32%, 变频调速比液偶调速节能 25% (多个 300 MW 等级电厂给水泵变频改造项目的综合平均值), 变频调速比 VORECON 多节能 10%。受资料匮乏的限制, 不能进行更多的数据比较, 但对有限的资料分析也能确认变频调速要比 VOREKON 节能效果至少高出 10%。在对 VOREKON 进行节能分析时, 不要忽略了 VOREKON 工作油的热损耗, 虽然液力变矩器只传递了 25% 的动力, 但变矩器泵轮和涡轮的滑差比液偶还要高, 例如让行星齿轮架相对于电动机保持静止, 电动机的转速是 1 490 rpm, 变矩器就得反向旋转 1 490 rpm, 两者相加就是涡轮和泵轮的滑差 2 980 rpm, 已经相当于液偶 50% 的速比了, 如果让 VOREKON 的转速持续调低, 变矩器涡轮与泵轮的滑差还会更大。滑差即摩擦, 摩擦生热而产生能量损耗<sup>[3]</sup>。

## 6 结论

1) 在满足给水泵的调速性能方面, 变频器优于 VOREKON。

2) 变频器节能效果比 VOREKON 至少高出 10%。

3) 投资费用变频器低于 VOREKON。

4) 在火力发电厂中, 锅炉液偶调速电动给水泵的节能改造采用变频器比选用 VOREKON 更为合适。

### 参考文献:

- [1] 江树基. 液力偶合器制造技术及使用维护指南 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.  
JIANG S J. Hydraulic coupler manufacturing technology and maintenance guide [M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [2] 倚鹏. 高压大功率变频器技术原理与应用 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2008.  
YI P. High voltage large power variable frequency drive technology principle and application [M]. Beijing: Post & Telecom Press, 2008.
- [3] 穆为明. 泵与风机的节能技术 [M]. 上海: 上海交通大学出版社, 2013.  
MU W M. Energy saving technology for pump and fan [M]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University Press, 2013.