

不同负荷工况下超超临界机组凝结水泵 深度变频优化研究

练义虎

(淮沪煤电有限公司田集发电厂)

摘要：针对超超临界机组在不同负荷工况下凝结水泵能耗高、控制难度大的问题，开展凝结水泵深度变频逻辑设计与控制方式优化研究。通过深入分析机组启、停、载等工况下的需求，设计一套精细化的深度变频逻辑，实现了凝结水泵转速与负荷变化的精准匹配。通过引入先进的控制算法与多级变频调节策略，对深度变频控制方式进行优化。通过优化前后对比分析证明，该优化方案不仅有效降低了凝结水泵的电流和功率，还显著提高了机组整体运行的灵活性与经济性，为实现超超临界机组的节能减排与高效运行提供了有力支持。

关键词：负荷；机组；水泵；凝结；超超临界；深度；变频

0 引言

在现代电力工业中，超超临界机组作为高效、环保的发电设备，已在全球范围内得到广泛应用。这类机组通过提高蒸汽的压力和温度，显著提升了热效率，对于缓解能源压力、减少碳排放具有重要意义。然而，随着机组容量的增大和运行参数的提升，其辅机系统的能耗问题也日益凸显，尤其是凝结水泵（Condensate Pump, CP）作为热力循环中的关键组件，其能耗占整个辅机系统能耗的较大比例^[1]。因此，如何在保证机组安全稳定运行的前提下，通过技术手段降低凝结水泵的能耗，成为提升超超临界机组整体能效的关键问题之一。

凝结水泵的主要作用是将汽轮机排汽凝结成的水从凝汽器热井中抽出，并升压输送至除氧器或其他用水点，维持热力系统的水循环。传统上，凝结水泵的

运行调节多采用节流调节方式，即通过改变阀门开度来控制流量，但这种方式往往导致泵效率下降，能耗增加。随着变频技术的成熟与普及，凝结水泵的变频调速已成为实现节能降耗的有效途径^[2]。变频调速不仅能根据负荷变化灵活调整泵的输出功率，减少不必要的能量损耗，还能改善泵的运行工况，延长设备寿命，提高系统的稳定性和可靠性。

然而，不同负荷工况下，超超临界机组的热力系统特性复杂多变，凝结水泵的变频优化策略需综合考虑多方面因素，包括机组负荷需求、凝结水系统压力与温度的变化、泵的特性曲线以及变频器的效率等。因此，开展不同负荷工况下超超临界机组凝结水泵深度变频优化研究，旨在探索适应于各种负荷条件的最佳变频控制策略，以实现凝结水泵能耗的最小化，为超超临界机组的能效提升和节能减排提供科学

依据和技术支撑。

1 超超临界机组凝结水泵深度变频逻辑设计

在超超临界机组凝结水泵的深度变频逻辑设计中,核心目标是在维持除氧器水位稳定、确保凝结水出口压力及给水泵密封水压力满足要求的前提下,通过优化凝泵变频调节技术,进一步降低凝泵电流并减少节流损失。为此,提出一种创新的工艺方案,并对其针对性的改进。关键控制点包括:

除氧器水位的有效控制:在除氧器主汽门全开状态下,需精确调控除氧器水位。

凝结水出口压力的合理设定:在低温工况下,避免凝结水泵出口压力过低。

凝结水供给的保障:确保在各种工况下,用户都能获得稳定的凝结水供应。

其中,除氧器水位调节阀与凝水泵转速是核心控制变量,分别以除氧器水位和凝结水压力作为控制指标,而给水泵密封水压力则需另行设计解决方案^[3]。当机组进入自动发电控制(AGC)模式时,根据负荷区段的不同,将原有的除氧器水位调节阀调节除氧器水位、凝泵变频调节压力的策略,改为凝泵变频直接调节除氧器水位,而除氧器水位调节阀则用于调节凝结水流量^[4]。这一调整的数学表达可以简化为:

$$\Delta f_{\text{pump}} = k_1 \cdot \Delta H_{\text{deaerator}} \quad (1)$$

$$\Delta V_{\text{valve}} = k_2 \cdot \Delta Q_{\text{condensate}} \quad (2)$$

式中, Δf_{pump} 为凝泵变频频率的变化量; $\Delta H_{\text{deaerator}}$ 为除氧器水位的变化量; k_1 为相应的控制增益; ΔV_{valve} 为除氧器水位调节阀开度的变化量; $\Delta Q_{\text{condensate}}$ 为凝结水流量的变化量; k_2 为相应的控制增益。

在凝水泵深度变频操作中,各负荷区段均可实现主汽门自动、副阀手动全开,完全依靠凝水泵变频调节,从而消除了阀门的节流损失,即当 $V_{\text{main}} = \text{全开}$,

且 $V_{\text{aux}} = \text{全开}$ 时, $P_{\text{loss}} = 0$ 。其中, P_{loss} 为节流损失; V_{main} 为主汽门的开度; V_{aux} 为副阀的开度。

为确保凝泵变频跳闸或变频切换时除氧器水位基本稳定,当除氧器水位过高时,主汽门会自动联动并迅速关闭,避免除氧器满水。随后,当除氧器水位开始平稳下降时,主汽门会自动超驰5s至某个位置。通过上述优化措施,实现超超临界机组凝结水泵深度变频逻辑的有效设计,进一步提升了机组的能效和稳定性。

2 深度变频控制方式优化

针对超超临界机组在启动、停机及不同负载工况下对凝结水管道需求的差异性,实行分区控制成为必要措施^[5]。具体而言,凝水泵的深度变频调节分为二级调节与多段式控制两类策略^[6]。在凝水泵的深度变频二级调节策略下,控制逻辑较为直观,异常工况时需人工介入以维持除氧器水位稳定^[7]。设除氧器水位目标值为 H_{target} ,实际水位为 H_{actual} ,则手动控制可表达为调整泵的频率 f 使得 $H_{\text{actual}} \approx H_{\text{target}}$ 。

相比之下,采用凝水泵深度变频多阶段控制策略则更为复杂多变,能在非正常状态下更有效地调控除氧器水位,但这一策略的高效实施需与先进的分布式控制系统(DCS)集成,如结合电动阀、气动阀等执行机构,并配备高性能设备以确保控制指令与执行动作的一致性,否则可能导致系统控制与执行间的脱节^[8]。数学上,可以构建多段控制函数 $C(f, H_{\text{actual}})$ 来动态调整泵的频率 f ,使得水位迅速趋近于目标值,即最小化:

$$\min d = |H_{\text{actual}} - H_{\text{target}}| \quad (3)$$

式中, $\min d$ 为水位最小化目标。近年来,我国新建的600MW及以上,特别是660MW以上的超超临界机组,广泛采用多级凝泵变频调速技术,以提升能效与运行灵活性^[9]。对于老旧且参数较低的机组,

则多采用简化的二级凝泵变频调速方案，以适应其既有工艺与控制逻辑的需求^[10]。表1记录不同机组凝结水泵变频调速方式对比。

表1 不同机组凝结水泵变频调速方式对比

机组类型	超超临界机组 (新)	参数较低机组 (旧)
投入使用年限	近五年	五年以上
凝结水泵变频调速方式	多级变频调速	二级变频调速 (简化逻辑)
控制逻辑复杂度	高	中低
执行机构需求	先进 DCS, 电动/气动门	基本执行机构

表1中，“控制逻辑复杂度”这一指标是基于实施难度与自动化水平的综合考量而进行的相对评估。它反映了不同控制方式在实际应用中的复杂程度与对技术要求的高低。

通过对超超临界机组凝结水泵深度变频控制方式的优化，旨在实现机组在运行过程中的节能降耗目标。这一优化过程不仅涉及对控制逻辑的精细调整，还包括对变频技术的深入应用与改进。通过引入先进的控制策略与算法，成功地降低控制逻辑的复杂度，提高自动化水平，从而确保机组在各种负荷工况下都能保持高效、稳定地运行。这一优化成果不仅显著提升机组的能效，还为实现节能减排、推动绿色发展做出了积极贡献。

综上所述，深度变频控制方式的优化是实现超超临界机组节能降耗目标的关键途径之一。

3 优化前后对比分析

3.1 设备概况与运行现状

以某电厂二期2×660MW超超临界机组为例，应用本文提出的优化方法对其进行凝结水泵深度变频优化。在该机组中，装备了两套660MW容量的发电机组，型号为N700-27/600/620的E195型超超临界汽轮机发电机组，这些机组是上海汽轮机厂与德国西门子子公司联合研发的E195系列产品。每个发电单元

均配置了两台具备100%工作能力的垂直管袋式离心式凝结水泵。其中，标记为A的凝结水泵采用变频驱动，实行一对一（一拖一）的控制模式，并配备有专门的变频器。而另一台标记为B的凝结水泵则运行在工频状态下，作为备用泵使用。在常规运行条件下，A泵保持变频运行以优化能耗，而B泵则处于待机状态，随时准备在需要时启动。表2中记录该凝结水系统运行相关数据。

表2 凝结水系统运行相关数据

序号	项目/工况	660MW 负荷	330MW 负荷
(1)	凝结水母管压力	≥1.9MPa	≥1.9MPa
(2)	凝结水泵频率下限	34Hz	34Hz
(3)	凝结水泵转速	1013r/min	1013r/min
(4)	除氧器上水主调门开度	约50%	约35%
(5)	除氧器上水副调门开度	约50%	约35%

针对该电厂二期2×660MW超超临界机组，即上述不同工况，进行凝结水泵深度变频优化。为更直观验证本文优化方法的应用可行性，对比优化前后凝结水泵电流和优化前后凝结水泵功率。

3.2 凝结水泵深度变频优化效果

3.2.1 优化前后凝结水泵电流对比

优化前后凝结水泵电流对比结果如图1所示。

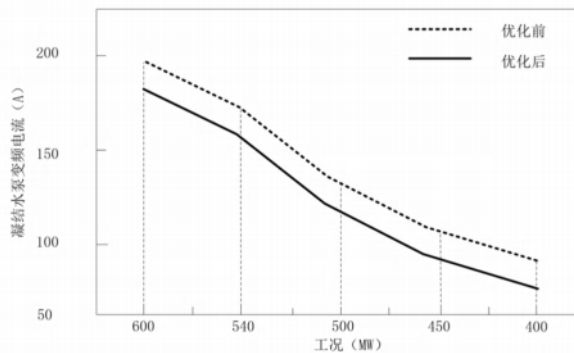


图1 优化前后凝结水泵电流对比结果

可以清晰地观察到，在采纳本文所阐述的优化方案后，凝结水泵的变频电流实现了显著地降低。不论是在何种工况之下，优化后的变频电流均一致地低于

优化前的水平。这一结果有力地证明了所提出的超超临界机组凝结水泵深度变频优化方案在实际应用中的可行性和有效性。

该优化方案不仅降低变频电流，还带来多方面的积极影响。首先，变频电流的降低意味着电能的消耗减少，从而实现节能降耗的目标。这对于提高机组的整体能效和降低运营成本具有重要意义。其次，随着变频电流的减小，凝结水泵的运行更加平稳，减少了机械磨损和故障发生的可能性，延长了设备的使用寿命。最后，该优化方案还有助于提升机组的稳定性和可靠性，为电力生产的连续性和安全性提供了有力保障。

3.2.2 优化前后凝结水泵功率对比

优化前后凝结水泵功率对比结果如图 2 所示。

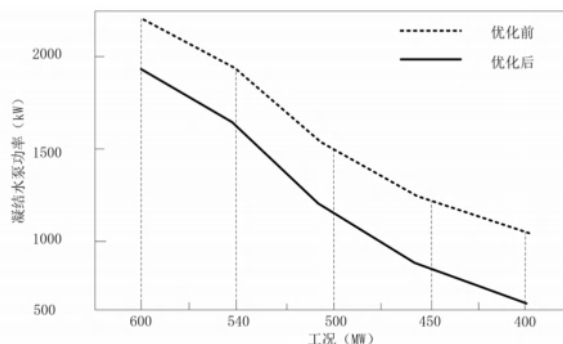


图 2 优化前后凝结水泵功率对比结果

可以发现，这两条功率变化曲线与优化前后的凝结水泵电流曲线呈现出高度一致的变化趋势。具体来说，无论处于何种工况条件下，优化后的凝结水泵功率曲线均显著地位于优化前曲线的下方，表明功率消耗得到了有效降低。

这一发现进一步强化了之前关于凝结水泵深度变频优化效果的论证。它不仅验证了优化措施在减少电能消耗方面的显著成效，还揭示了优化策略对于提升整个热力系统能效的潜在价值。由于凝结水泵是热力循环中的关键组件，其功率的降低将直接有助于减少整个机组的能耗，从而提升机组的整体能效水平。

4 结束语

综上所述，通过对不同负荷工况下超超临界机组凝结水泵的深度变频优化研究，不仅揭示变频调速技术在降低凝结水泵能耗方面的巨大潜力，还提出一系列基于实际运行数据的优化控制策略。本研究通过理论分析与实验验证相结合的方式，深入探究凝结水泵变频优化的关键技术和挑战，包括负荷预测模型的建立、变频控制算法的优化以及系统动态响应特性的评估等。结果表明，采用先进的变频控制策略，超超临界机组在宽负荷范围内均能维持凝结水泵的高效运行，显著提高了机组的能效水平。未来，随着人工智能、大数据等先进技术的不断发展，凝结水泵的变频优化将更加智能化、精细化。通过构建基于数据驱动的预测模型，实现更加精准的负荷预测和变频控制，将进一步挖掘节能潜力，推动超超临界机组能效的持续提升。同时，本研究也为其他类型发电设备的辅机系统节能改造提供了有益参考，对促进整个电力行业的可持续发展具有重要意义。

参考文献

- [1] 王胜虎, 董春森, 周向阳, 等. 2*660 MW 火电机组变频调速循环水泵建模与优化控制研究 [J]. 工业控制计算机, 2024, 37 (8): 151-153.
- [2] 牛梦涵, 崔红社, 周腾德, 等. 并联变频永磁同步电机水泵在制冷机房中的节能性研究 [J]. 青岛理工大学学报, 2024, 45 (3): 95-102.
- [3] 蒋启东. 降低 660 MW 超超临界机组凝结水泵变频电耗研究 [J]. 设备管理与维修, 2024 (9): 182-184.

(下转第 76 页)