

VVER 机组核电生产计划精细化管理研究

赵雅珣

江苏核电有限公司

DOI : 10.32629/jpm.v7i9.9032

[摘要] 针对国内 VVER 压水堆核电机组受俄系设备设计架构、设备服役寿命限值、俄标技术体系差异化影响，普遍存在生产管控模式粗放、预防性维护工单匹配度低、大修窗口期资源调度冲突等实际运维难题。本文围绕 VVER 机组专属生产调度管控、预维工单精准落地、机组负荷协同规划三大核心业务场景，系统剖析现有计划管理体系存在的标准适配性差、层级联动脱节、运维资源调度失衡等关键问题。结合 VVER 机组热力系统运行特性、安全级设备俄标设计准则，搭建分层分级的精细化生产计划管控体系，搭建适配俄标设备体系的预维周期动态修正模型，构建负荷调度、预维作业、大修窗口三位一体的协同管控机制。工程实践结果表明，该精细化管理方案可将 VVER 机组预防性维护工单延期率降低 28.6%，大幅缩短 4.2% 的大修关键路径工期，机组非计划停机时长减少 31.3%，有效解决俄系堆型与国内通用核电管理体系的适配性难题，可为国内同类型 VVER 核电机组的生产运维精细化管理提供工程参考与技术支持。

[关键词] VVER 机组；核电厂；生产调度；精细化管理；预防性维护；资源优化调度

Research on Fine-Grained Management of Nuclear Power Production Scheduling for VVER Units

Zhao Yaxun

Jiangsu Nuclear Power Co., Ltd.

[Abstract] Given the challenges faced by domestic VVER pressurized water reactor nuclear power units—stemming from differences in the design architecture of Russian-origin equipment, variations in equipment service life limits, and disparities in Russian standard technical frameworks—common operational and maintenance (O&M) issues include crude production control models, low alignment rates of preventive maintenance work orders, and resource scheduling conflicts during overhaul windows. This study focuses on three core operational scenarios—tailored production scheduling and control for VVER units, precise implementation of preventive maintenance work orders, and coordinated load planning for reactor units—to systematically analyze key shortcomings of existing planning and management systems, such as poor standard compatibility, disconnection between hierarchical levels, and imbalanced allocation of O&M resources. By integrating the operational characteristics of the thermal systems of VVER units with Russian design criteria for safety-grade equipment, this research establishes a hierarchical and granular refined production planning and control framework, develops a dynamic adjustment model for preventive maintenance cycles compatible with the Russian equipment standards, and constructs a tripartite collaborative control mechanism encompassing load scheduling, preventive maintenance operations, and overhaul window management. Engineering practice results demonstrate that this refined control strategy reduces the delay rate of preventive maintenance work orders by 28.6%, significantly shortens the critical path duration of overhauls by 4.2%, and decreases unplanned outage time for reactor units by 31.3%. Consequently, this approach effectively addresses the compatibility challenges between Russian reactor types and domestic nuclear power management systems, providing practical engineering references and technical support for refined O&M control of similar VVER nuclear power units in China.

[Key words] VVER units; nuclear power plants; production scheduling; refined control; preventive maintenance; resource optimization scheduling

1 VVER 机组生产计划与预维管理差异化特性

1.1 设备技术体系差异化特征

VVER 机组核心系统依据俄罗斯 Г О С Т 标准设计建造，与国内 NB/T 核电标准体系存在本质区别，这也决定了其生产计划与预维管理具备专属化特性。其一，主设备服役寿命限值不同，VVER 机组蒸汽发生器、主循环泵、稳压器等核心设备设计服役寿命达 60 年，设备定期校验周期较欧美堆型延长 15%~20%，通用化检修频次易造成冗余运维作业；其二，安全级设备管控逻辑存在差异，俄标对专设安全设施季度功能性试验的覆盖范围、判定标准与国内规范不同，通用预维计划易出现试验漏项或重复检测问题；其三，备件供应链体系特殊，VVER 机组核心专属备件依赖中俄跨境供应链，采购、清关、运输全流程周期较国产备件平均延长 45 天，必须前置纳入生产计划推演环节。

1.2 现行生产计划管理架构

国内 VVER 核电厂现行生产计划采用三级管控架构，分别为年度计划、月度计划、周/日计划。其中年度计划主要统筹机组大修窗口期、重大技术改造、合规性试验等核心工作；月度计划负责拆解落实预维工单、备件到货核验、负荷调度分解等任务；周/日计划落地具体检修作业、运行操作与设备巡检工作。该管理架构照搬欧美堆型管控模式，未嵌入 VVER 机组俄标专属参数与检修阈值，三级计划之间的数据联动依赖人工对接，智能化、精细化管控水平偏低，是各类计划冲突、运维滞后的主要诱因。

1.3 精细化管理核心应用场景界定

结合 VVER 机组俄标设计特性与现场运维痛点，本文将精细化管理聚焦三大核心应用场景：一是多级计划层级联动场景，实现年度大修、月度预维、日间负荷调度的数据互通与冲突提前预判；二是定制化预维工单管控场景，基于俄标设备参数修正专属检修周期，实现工单精准匹配、合规落地；三是跨境备件资源调度场景，将俄系专属备件跨境供应链周期嵌入生产计划推演，规避物资滞后引发的运维延误问题。

2 VVER 机组现行生产计划管理突出问题及成因分析

2.1 标准适配性不足导致预维计划精度偏低

标准体系适配缺失是 VVER 机组运维管理最突出的特性问题。目前国内核电企业普遍采用国标通用预维模板编制运维工单，未结合俄标 Г О С Т 规范修正设备检修周期参数，忽视了 VVER 机组设备结构、运行工况与欧美、国产堆型的本质差异，通用化参数体系无法适配俄系机组专属运维逻辑。通过对某在运 VVER-1000 机组运维数据统计可知，约 32% 的旋转机械类预维工单周期设置偏短，设备未达到实际检修阈值即开展拆解检修，不仅造成人力、物资资源浪费，频繁拆装还易引发设备密封磨损、装配精度偏差等次生故障隐患；另有 18% 的安全级仪表校验周期设置偏长，不符合俄标合规管控要求，导致仪表测量精度无法保障，存在合规风险与机组运行安全隐患。与

此同时，VVER 机组一回路硼酸浓度调控、堆芯物理参数监测等专属运维项目未纳入标准化计划体系，相关核心运维工作完全依托运维人员经验开展，无固定周期、无标准化流程约束，极易出现运维漏项、巡检不到位等问题，直接影响堆芯运行稳定性与机组运行安全性。

2.2 多级计划层级割裂引发运维资源冲突

现有年度大修、月度预维、日间运行三类计划相互独立，存在严重的数据孤岛问题，各管理模块缺乏统一的数据同步、联动校核机制，计划编制各自独立、互不衔接，整体运维统筹管控能力薄弱。年度大修划定的核心设备检修窗口期末与月度预维工单同步联动，经常出现同一运维班组、专用检修工具在同一时段被多项作业占用的资源冲突问题，迫使部分检修任务临时调整、仓促实施，大幅降低检修作业质量与工作效率。此外，日间机组负荷调整未关联在运预维作业任务，机组深度调峰工况叠加设备检修扰动，易造成系统热力参数波动超标，触发机组运行联锁保护。2023 年某 VVER 机组发生的 2 次非计划降功率事件，均由计划层级割裂、作业资源冲突导致，不仅破坏机组供电稳定性，还增加了机组启停损耗与应急运维成本。

2.3 跨境备件推演缺失造成工期延误频发

VVER 机组高压安注阀、堆芯监测探头等核心专属备件无国产替代方案，完全依赖中俄跨境进口供应链，该供应链受国际物流、跨境清关、运输管控等多重因素影响，周期波动大、不确定性强。但现行生产计划仅按照常规国产备件、通用进口备件的固定周期机械排程，未结合俄系专属备件的供应链特性开展前置推演，未预留物流运输、清关抽检的缓冲周期。现场运维过程中频繁出现预维工单已下达、作业人员就位，但核心备件未按期到货的情况，造成工单被迫暂停、延期，严重打乱整体运维节奏。据统计，VVER 机组预维工单延期事件中，41% 的问题源于跨境备件计划预判不足，长期物资滞后问题易导致设备带缺陷运行，持续累积机组安全运行风险。

2.4 考核指标未适配机型专属特性

电厂现行计划考核体系沿用欧美堆型通用考核标准，考核规则、阈值参数均为通用化设置，未针对 VVER 机组长周期设备特性、跨境供应链短板、俄标专属运维规范制定差异化考核机制，考核体系与现场实际运维场景严重脱节。VVER 机组多数核心设备检修周期、备件更换周期显著长于欧美堆型，且跨境备件到货周期存在不可控性，但当前备件到货及时率、工单闭环时效等核心考核指标采用统一标准，未结合机型特性差异化调整。这种一刀切的考核模式无法客观反映 VVER 机组计划管理的真实水平，考核结果失真失效，同时无法倒逼计划编制人员优化俄系设备专属排程逻辑，导致预维计划粗放、适配性差的问题长期无法整改，形成运维管理恶性循环。

3 VVER 机组生产计划精细化管理体系构建

3.1 基于俄标适配的预维计划基准修正

依托 VVER 机组原始设计资料与俄标 Г О С Т 标准数据库，

重构适配俄系堆型的预维计划基准库,从源头解决标准错配问题。首先,对全厂设备进行分类分级梳理,将设备划分为俄标专属安全级、俄标通用非安全级、国产替代设备三大类别,针对不同类别设备差异化设定检修周期、试验项目与验收判定准则;其次,搭建预维周期动态修正模型,结合设备实际运行时长、热力腐蚀速率、历史缺陷台账数据,对固定预维周期进行动态微调,摒弃一刀切的排程模式;最后,梳理补充 VVER 机组专属运维清单,将一回路硼表校准、俄式控制棒驱动机构润滑等特有运维项目纳入月度强制计划,彻底杜绝合规性运维漏项问题。

3.2 三级联动一体化生产计划架构优化

打破原有各层级计划数据孤岛问题,搭建“年度统筹-月度耦合-日间联动”的一体化精细化计划管控架构。年度计划层面,精准锁定大修核心作业路径、长周期技术改造项目与跨境备件采购关键节点,划定全年高风险预维作业禁止窗口期;月度计划层面,以年度计划边界条件为依据,智能拆解预维工单,同步校核人力配置、专用工具、设备运行状态的资源适配性,提前预判并规避作业冲突;日间计划层面,联动机组 DCS 负荷调控指令,将预维作业任务避开机组深度调峰、堆芯参数扰动敏感时段,实现机组运行与设备检修的协同适配。各层级计划实时同步更新,计划变更后自动触发上下游节点联动校核,保障整体计划衔接顺畅。

3.3 嵌入跨境备件管控的计划推演机制

针对 VVER 机组跨境供应链专属特性,建立物资管控与生产计划双向联动推演机制。搭建俄系跨境备件专属台账数据库,精准录入各类专属备件的采购周期、清关时长、库存安全阈值等核心参数;在计划编制阶段,系统自动匹配工单所需备件的库存状态,针对库存不足物资自动触发前置采购流程,预留 30 天物流缓冲周期,规避物资延误风险;设置备件库存预警机制,当专属备件存量低于安全阈值时,自动冻结非紧急预维工单,杜绝无效排程作业。同时将备件到货进度、物资匹配准确率纳入生产计划考核体系,实现物资管控与生产计划深度融合。

3.4 适配 VVER 机组的专属精细化考核体系

摒弃通用化考核模式的弊端,定制适配 VVER 机组运维特性的专属 KPI 考核体系。新增俄标设备预维合规率、跨境备件计划预判准确率、三级计划冲突规避率三项核心考核指标;优化工单延期考核评判标准,区分国产备件、跨境备件引发的延期责任,解决考核不公、结果失真的问题;将机组可利用因子、非计划停机时长与计划编制质量深度挂钩,强化精细化排程的管理导向,倒逼计划管理体系持续优化。

4 工程应用与效果分析

将本文构建的精细化管理体系应用于国内某 VVER-1000 机组,开展为期 12 个月的工程试点应用,选取同区域、同机型、采用传统管理模式的机组作为对标样本,试点应用成效如下:

(1) 预维管理合规性大幅提升。通过俄标适配优化,机组俄标设备预维合规率由 79.4% 提升至 98.2%,过度维修工单数量同比减少 30.7%,安全级设备试验漏项问题彻底清零,完全满足中俄双重核电监管规范要求。

(2) 计划执行效率显著优化。机组预维工单延期率由 15.3% 降至 10.9%,其中跨境物资滞后引发的工单延期事件减少 41.5%;三级计划资源冲突次数全年下降 67.8%,现场无效作业、重复作业大幅减少,运维作业效率显著提升。

(3) 机组运行可靠性持续提升。大修关键路径工期缩短 4.2%,机组非计划停机时长减少 31.3%,机组可利用因子提升 1.87 个百分点,有效提升机组稳定发电能力,新增发电经济效益显著。

(4) 运维经济成本有效管控。设备冗余检修带来的人力、物资消耗降低 22.3%,跨境备件库存周转率提升 19.5%,在严格保障机组运行安全的前提下,实现了运维经济性最优。

5 结论

本文针对 VVER 机组俄标技术体系、跨境专属供应链、差异化运维逻辑的独有特征,系统梳理了传统通用生产计划管理体系在该机型应用中的四大核心问题,明确问题根源为标准适配不足、计划层级割裂、物资推演缺失、考核体系通用化。通过搭建俄标适配的预维基准库、三级联动一体化计划架构、跨境物资协同推演机制及机型专属考核体系,形成了全覆盖、可落地的 VVER 机组生产计划精细化管理方案。工程应用结果表明,该方案可有效弥补俄系堆型与国内通用管理体系的适配短板,显著提升生产计划执行精度与机组运行可靠性。后续研究可结合数字孪生、大数据智能预测技术,嵌入设备劣化趋势预判模块,推动核电生产计划由被动排程向主动预判、智能调控升级,进一步提升 VVER 核电机组运维的智能化与精细化水平。

【参考文献】

- [1]王建军,李青松.WER-1000 核电机组设备运维标准适配性优化[J].核动力工程,2022,43(03):186-191.
- [2]张磊,刘钊.核电企业生产计划三级联动管理模式构建[J].中国核电,2023,16(02):221-226.
- [3]陈曦,周明远.基于全生命周期的核电机组预防性维护计划优化[J].热力发电,2022,51(08):103-108.
- [4]赵文博.WER 机组跨境备品备件供应链管控策略[J].核电工程与技术,2023(01):45-50.
- [5]黄伟,林浩.压水堆核电机组生产计划精细化管理实践[J].电力安全技术,2024,26(05):36-40.
- [6]李明,王浩宇.俄标 WER 机组与国标运维体系差异及整改路径[J].核科学与工程,2022,42(04):567-573.
- [7]刘天宇.核电厂预防性维护工单资源冲突预判模型[J].计算机仿真,2023,40(07):312-317.
- [8]孙凯.基于设备劣化数据的核电生产计划动态调整方法[J].能源工程,2024(03):78-83.