

孤立电网工况下汽轮机控制优化研究

王潜博, 李 涛, 郭永飞, 张荣彬

中广核研究院有限公司, 广东 深圳

收稿日期: 2025年11月4日; 录用日期: 2025年11月17日; 发布日期: 2025年12月19日

摘要

本文针对孤立电网工况下核电机组的汽轮机控制系统开展研究。研究设计并提出了一套适用于孤立电网汽轮机控制的优化方案, 该方案在强干扰工况下, 能显著提升汽轮机控制系统在大范围、快速负荷变化运行过程中的控制性能。

关键词

孤立电网, 汽轮机控制, 负荷变化

Research on Optimization of Steam Turbine Control under Isolated Grid Condition

Qianbo Wang, Tao Li, Yongfei Guo, Rongbin Zhang

China Nuclear Power Technology Research Institute Co., Ltd., Shenzhen Guangdong

Received: November 4, 2025; accepted: November 17, 2025; published: December 19, 2025

Abstract

This study focuses on the steam turbine control system of nuclear power systems operating under isolated grid conditions. An optimization scheme tailored to steam turbine control in isolated grids is proposed, which markedly enhances the control performance of the steam turbine control system during large-range and rapid load changes, particularly under high-interference scenarios.

Keywords

Isolated Grid, Steam Turbine Control, Load Change

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着全球能源结构的转型与对能源供应多样性、安全性需求的日益增长，孤立电网作为一种独特的电力系统形态，其重要性正日益凸显。孤立电网泛指与主网无电气连接、靠内部电源自平衡的局域电力系统，常见于海岛、偏远矿区、核动力舰船及小型堆供热供汽场景。根据国际原子能机构(IAEA) 2023 年报告，全球在建及规划的小型堆中 42% 拟采用孤网或孤网 - 联网双模式运行，以提升能源自主性与安全冗余[1]。然而，孤网“惯量小、负荷密度低、扰动大”的天然属性，使频率稳定问题成为其能否安全经济运行的首要瓶颈。在这些场景下，大电网的覆盖成本过高或技术不可行，孤立电网成为保障当地能源命脉的关键。然而，孤网运行与并网运行在动态特性与控制需求上存在本质差别，这给发电机组的稳定运行带来了严峻挑战。具体而言，这些挑战主要体现在以下几个层面[2]：

- 1) 孤网的自平衡能力差，负荷的扰动对孤网的影响较并网运行明显，频率会发生较大变化，容易导致发电机组保护动作而使孤网崩溃。
- 2) 仅靠机组的一次调频功能难以稳定电网频率。
- 3) 机组的负荷控制模式难以满足电网负荷波动要求。
- 4) 孤网容量难以估计，对机组调节能力提出新的挑战。

因此，为了确保核电机组在孤立电网下安全、稳定、高效地运行，其汽轮机控制系统必须进行针对性地优化与升级。它需要具备前所未有的快速响应能力和充足的调节裕度，以保证在负荷不断变化的动态过程中，机组出力能够实时、精准地跟随负荷变化，从而牢牢维持电网频率的稳定。美国西屋公司在 APS1000 示范堆采用“Fast Load Rejection”逻辑，将 OPC 延时由 3 s 缩短至 0.5 s，但未解决小扰动误动[3]。国内清华大学提出基于模型预测控制(MPC)的“反应堆 - 汽轮机”协同策略，仿真效果良好，但计算量巨大，工程化受限[4]；还有研究通过协调控制策略提升孤网机组稳定性，但在强干扰场景下适配性不足[5]；自适应 PID 等传统算法优化方案虽降低了计算复杂度，但孤网动态响应速度仍有提升空间[6]。

本研究深入剖析了孤立电网工况下核电机组，并系统性地提出了一套汽轮机控制系统的综合优化方案。该方案从保护逻辑、硬件架构和软件算法三个维度入手，通过放宽 OPC 保护定值以适应孤网频率的正常波动，采用高实时性硬件模块以提升响应速度，并设计独立的快速孤网逻辑以减轻计算负荷，共同构建了一个能够适应孤网“快、准、稳”控制需求的先进汽轮机控制系统。

2. 汽轮机控制系统优化方案

反应堆和汽轮发电机组共同维持外部负荷需要，同时保证内部运行参数稳定。机组的输出电功率与负荷要求是否一致反映了机组与外部电网之间能量供求的平衡关系，在以转速控制为主的汽轮机控制方式下，汽轮机的转速是反映机组与外部电网之间能量供求的平衡关系的重要指标之一。主蒸汽压力反映了机组内部反应堆与汽轮发电机之间能量供求的平衡关系。汽轮机控制系统接收电网(或能量管理系统)的调节指令，响应外界负荷变化，改变汽轮机调节汽门的开度以改变进汽量，使机组输出的功率与外界负荷需求相适应，维持汽轮机的转速的稳定。此时机前压力会随着响应外界负荷变化而偏离设定值，反应堆则根据二回路的负荷，通过调整棒组来调节平均温度恒定和功率，以跟踪汽轮机的负荷变化，维持机前压力稳定，达到新的能量平衡[7]。

在孤网运行方式下，机组启动达到额定转速后可并网，并网后控制电网频率，在负荷变化时自动保

持电网频率稳定，实现一次调频功能。运行人员关注的核心问题并非负荷调整，而是通过操作汽轮机调节系统的给定值调整孤网频率，使之维持在额定频率附近，完成二次调频。根据 IEEE 相关标准要求，孤网运行的分布式电源需具备更高的控制灵敏度与抗扰动能力[8]，这与孤网“容量小、扰动强”的特性高度契合。由于孤网容量较小，汽轮机调节系统应具有更高的灵敏度、更小的迟缓率和更快的动态响应，减小调频死区可有效改善机组频率调节的动态性能[9]。

电网运行过程中要求电网频率在 50 Hz 运行，但由于电网负荷的改变等因素影响，因此电网的周波不可能一直稳定在 50 Hz 稳定运行， ΔP 为负荷的变化量， δ 为转速不等率， $\delta\Delta P$ 的作用是在电网供求关系发生不平衡时，为了快速维持电网频率的稳定而做的转速调节修正。在频率调节回路中，此修正值转化为转速值，与二次调频给定的转速设定值相减，这就构成了实际的转速设定值。孤网运行的负荷是由实际所需负荷决定，所以在孤网运行中，汽轮机控制系统的控制对象应为转速(或频率)，使得孤网的频率稳定在 50 Hz，频率越稳定说明汽轮机控制系统的调节效果越好。孤网运行方式的汽轮机控制系统要求响应速度更快，因此和并网下汽轮机控制系统相比较需要进行以下优化，具体见图 1：

1) 超速保护控制 OPC 优化

机组孤网运行时，电网容量较小，容易产生振荡，为了防止振荡的发生，需要放宽 OPC 保护定值。电网频率在一定范围内发生振荡时，应保证机组不至于 OPC 动作。

2) 硬件方面

传统调速系统不能适应孤网的要求，消除了上述设计思路的偏差。还有控制系统实时性较差的问题。因此，需采用高实时性的快速调频模块接管传统 DEH 的核心控制功能，提高硬件模块的控制周期。

3) 软件方面

使用合理的孤网逻辑优化控制逻辑加快运算速度，由于传统的汽轮机控制系统中包含很多控制逻辑，这样就增加了控制器的负荷，需增加单独的快速孤网逻辑，只负责孤网部分的运算，这样该系统的负荷就会大大降低，提高运算速度。

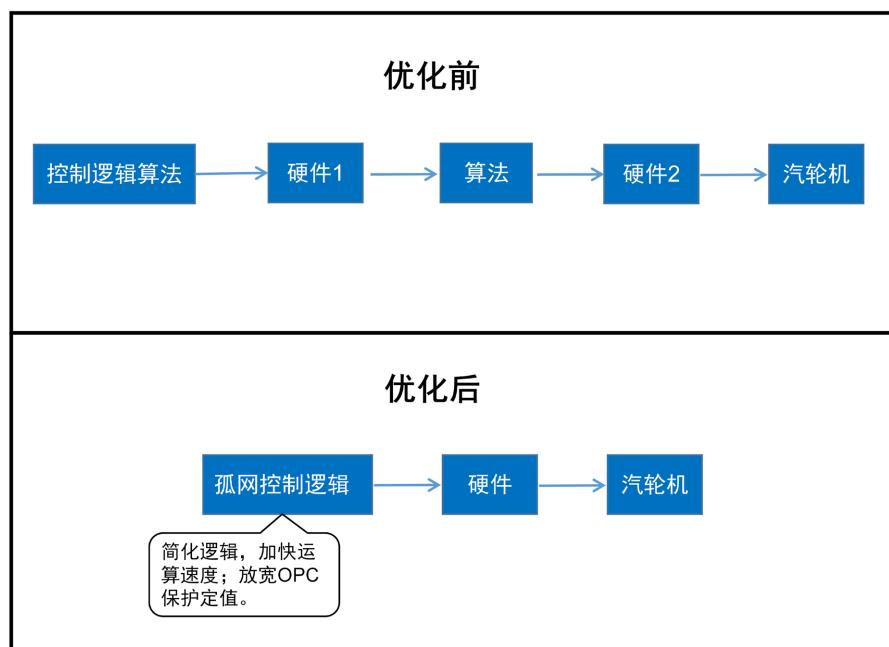


Figure 1. Comparison of steam turbine control system optimization

图 1. 汽轮机控制系统优化对比

3. 仿真验证

为验证上述优化方案的有效性, 本研究构建了核电机组全范围动态仿真平台, 并设计了两个典型的孤网运行工况进行测试: 一是正常运行中的负荷突增, 二是严重事故下的甩厂用电。

3.1. 30%功率平台突增 10%FP 负荷

该工况模拟了机组在 30%额定功率(FP)稳定运行时, 电网侧突然接入一个占机组额定功率 10%的大负荷。这是对汽轮机控制系统正向调节能力的直接考验。具体见图 2~4:

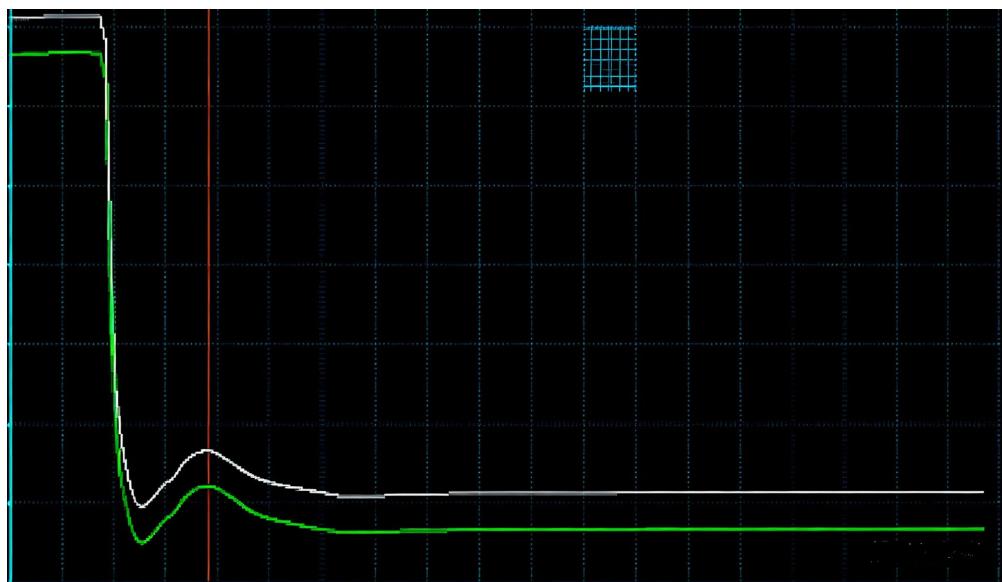


Figure 2. Steam turbine speed

图 2. 汽轮机转速

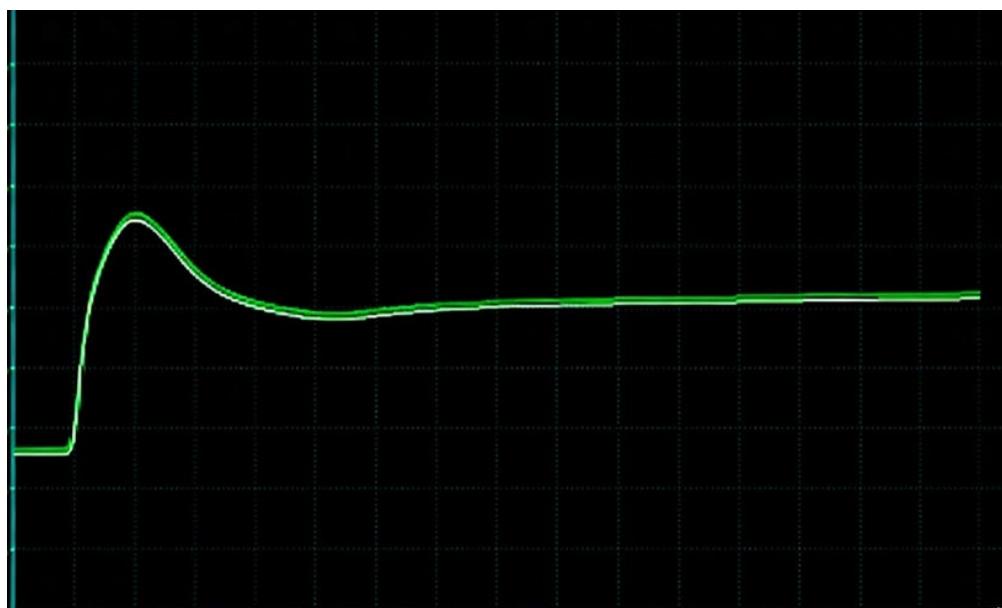


Figure 3. Steam flow rate

图 3. 蒸汽流量



Figure 4. Opening degree of steam turbine regulating valve
图 4. 汽轮机调节阀开度

3.2. 甩厂用电

甩厂用电是孤网运行中最为严酷的动态工况之一，指机组与外部负荷突然断开，仅带自身厂用电设备运行。此时，机组负荷瞬间大幅下降(通常从高功率降至极低功率)，对汽轮机控制系统是一个巨大的反向冲击。具体见图 5~7：

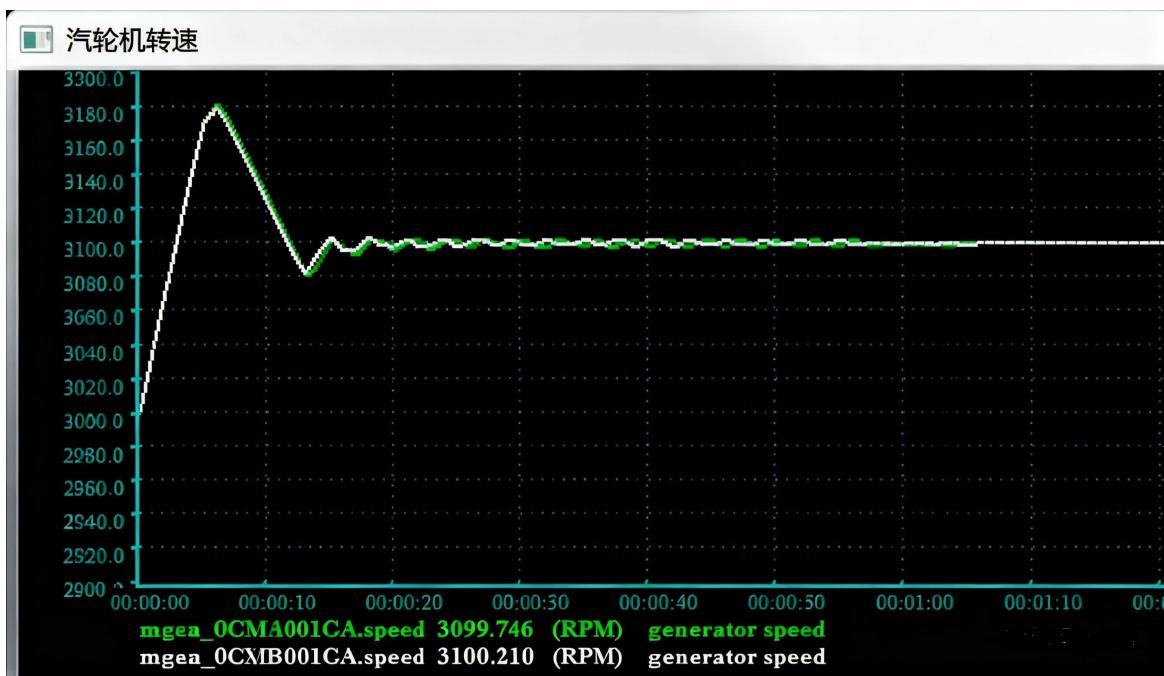


Figure 5. Steam turbine speed
图 5. 汽轮机转速

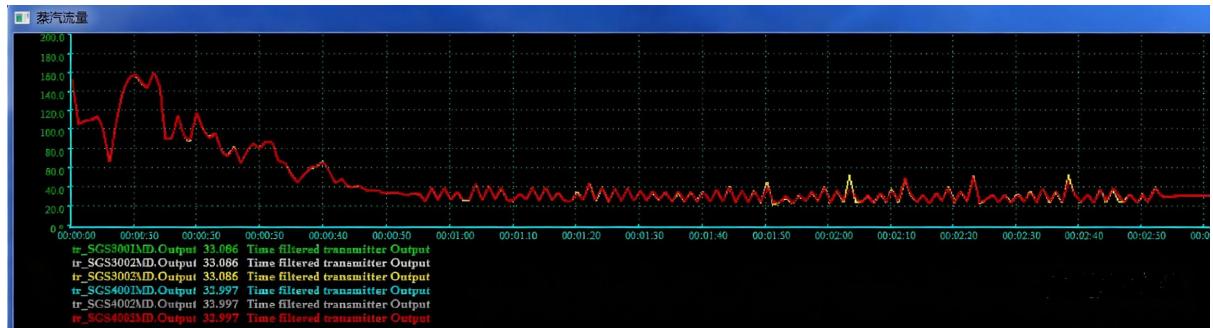


Figure 6. Steam flow rate

图 6. 蒸汽流量



Figure 7. GCT flow rate

图 7. GCT 流量

3.3. 仿真分析

通过仿真验证表明，在核电机组发生 10%FP 以内的负荷波动或甩厂用电时，汽轮机控制性能处于可接受范围。与滑模控制等鲁棒性优化方案相比[10]，本方案在保证抗干扰能力的同时，进一步提升了动态响应速度，更适配孤网快速负荷变化需求。

4. 总结与展望

本研究的意义不仅在于解决了一个具体的技术难题，更在于它为先进核能技术的多元化应用场景扫清了障碍。随着技术的发展，其在偏远地区供电、海岛开发、海水淡化等领域的应用前景广阔。而这些场景往往伴随着孤立电网的运行环境。因此，本研究的成果将直接提升在这些特殊场景下的适应性和市场竞争力，为构建更加灵活、坚韧的未来能源体系贡献关键力量。

展望未来，本研究仍有进一步深化的空间。首先，可考虑在半实物仿真平台甚至真实的试验机组上对优化方案进行进一步的验证与迭代，以更全面地评估其在复杂真实环境中的表现。其次，可以探索将自适应控制、预测控制等更先进的智能算法融入孤网控制逻辑，使系统能够根据电网特性的变化进行在线自整定，进一步提升其智能化水平和鲁棒性。最后，该优化思想也可推广应用于其他类型的发电机组，

如燃气轮机或风力发电，在孤网或微网中实现多能互补的协同控制，这将是未来能源系统控制领域一个富有价值的研究方向。

参考文献

- [1] IAEA (2023) Small Modular Reactor Technology Roadmap. IAEA.
- [2] 国家能源局. NB/T 25046-2015 核电机组孤网运行导则[S]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [3] Westinghouse Electric Company (2021) AP1000 Load Rejection Test Report. Westinghouse Electric Company.
- [4] 张昊, 陈曦, 李萌. 基于 MPC 的核电机组孤网协同控制[J]. 自动化学报, 2023, 59(4): 789-799.
- [5] 刘吉臻, 田亮, 曾德良. 孤网运行机组协调控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(12): 3845-3854.
- [6] 张承慧, 崔纳新, 吴剑. 基于自适应 PID 的汽轮机转速控制优化及孤网适配[J]. 控制理论与应用, 2021, 38(5): 689-696.
- [7] 王潜博, 李涛. 核电机组孤网频率控制策略研究[J]. 核动力工程, 2022, 43(5): 178-183.
- [8] IEEE (2022) IEEE Std 1547.8-2022 Standard for Control Requirements of Distributed Power Sources in Isolated Grid Operation. IEEE.
- [9] 李明, 王建华, 赵宇. 小型核电机组孤网调频硬件在环仿真试验[J]. 核动力工程, 2023, 44(3): 156-162.
- [10] Chen, Y., Li, H. and Zhang, C. (2022) Robust Control of Steam Turbine in Isolated Grids Based on Sliding Mode Control. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, **37**, 1103-1112.