

Research on Fault-tolerant Control Technology of Monitoring and Protection Linkage for Unit Operation in Xinzhai Gang Hydropower Station

Lin Zhu

Yunnan Branch of Guangdong Hydroelectric Power Bureau No.2, Mengzi, Yunnan, 661100, China

Abstract

To address the challenges of complex operational conditions in hydropower units and the poor coordination between traditional independent monitoring and protection systems, this paper proposes an integrated fault-tolerant control technology for operational monitoring and protection linkage. By establishing a data-driven intelligent fault-tolerant control model, the technology achieves precise detection and rapid identification of abnormal conditions. A hierarchical collaborative linkage strategy is designed to establish a closed-loop decision-making process from monitoring alerts to protection execution. Experimental results on the OPAL-RT real-time simulation platform demonstrate that this technology significantly enhances system adaptability under non-ideal conditions such as sensor failures and communication anomalies. Compared to traditional solutions, the fault identification and protection response speed improves by over 60%, effectively ensuring the safe and stable operation of hydropower units.

Keywords

hydroelectric generating unit; operation monitoring; protection linkage; fault-tolerant control; intelligent diagnosis; real-time simulation

新寨电站机组运行监测与保护联动的容错控制技术研究

朱林

广东水电二局云南分公司, 中国·云南 蒙自 661100

摘要

针对水电机组运行工况复杂、传统独立监测与保护系统协同性差的问题, 本文提出了一种面向水电机组的运行监测与保护联动一体化容错控制技术。该技术通过构建数据驱动的智能容错控制模型, 实现了对机组异常状态的精准感知与快速识别; 并设计了分级协同的联动策略, 打通了从监测告警到保护执行的决策闭环。基于OPAL-RT实时仿真平台的实验表明, 该技术能显著提升系统在传感器故障、通信异常等非理想工况下的适应能力, 故障识别与保护响应速度较传统方案提升60%以上, 有效保障了水电机组的安全稳定运行。

关键词

水电机组; 运行监测; 保护联动; 容错控制; 智能诊断; 实时仿真

1 引言

本文旨在打破水电机组监测与保护间的壁垒, 研究如何将实时运行监测数据深度融入保护决策过程, 构建具备容错控制能力的智能联动体系。研究重点包括:

- (1) 分析水电机组对监测—联动—容错一体化的特定需求;
- (2) 设计适用于机组多源异构数据的容错控制模型;
- (3) 构建基于状态评估的保护联动策略;
- (4) 通过仿真验证该一体化方案在提升机组运行韧性方面的有效性。

2 技术需求分析

水电机组运行具有强非线性、工况多变、机电耦合紧密等特点。现有运行监测系统虽能采集大量数据, 但对早期隐性故障(如轴承轻微磨损、绝缘缓慢劣化)的预测能力不足, 且监测数据未能有效服务于保护决策。传统保护装置动作逻辑固化, 无法区分暂态扰动与真实故障, 易造成误动(如甩负荷)或拒动, 影响电网稳定。

因此, 新一代水电机组控制系统亟需具备以下容错与联动能力:

- (1) 深度状态感知: 融合电气、机械、水力等多维度运行监测信息, 实现对机组健康状态的综合感知。

【作者简介】朱林(1999-), 男, 中国云南曲靖人, 本科, 助理工程师, 从事电气工程及其自动化研究。

(2) 智能故障诊断：在传感器数据异常、部分信息丢失等情况下，系统仍能进行可靠的状态估计与故障判别，体现容错控制核心价值。

(3) 自适应保护联动：保护动作的触发不应仅依赖于单一参数越限，而应基于对运行监测信息的综合分析，实现保护策略与实时工况的联动匹配。

(4) 快速闭环响应：从异常识别到保护指令执行的整个联动链条需高度协同，响应延迟须满足电力系统暂态稳定的毫秒级要求。

3 监测 – 联动 – 容错一体化控制策略设计

3.1 容错监测模型

为实现可靠的容错控制，首先需建立一个能容忍数据异常、并能准确反映机组状态的监测模型。本文设计了一个混合监测模型，其核心是数据驱动与机理模型的融合。

(1) 输入层：整合水电机组关键监测变量，包括电气量（电压、电流、功率、频率）、机械量（轴振、摆度、键相）及状态量（导叶开度、水头）。

(2) 容错核心：模型内置一个“虚拟传感器”网络，当某个物理传感器发生漂移或失效时，系统可调用相关变量通过“虚拟传感器”估算出该测点的可靠值，实现监测功能的容错。

(3) 输出层：不仅输出各参量的最优估计值，还输出一个“健康度指数”及“置信水平”，为后续的联动决策提供量化依据。

3.2 保护联动机制

本研究的核心创新在于建立了一个以运行监测输出的“健康度”与“置信水平”为输入的、动态的保护联动逻辑。

联动触发逻辑：改变传统“越限即动作”的简单逻辑。保护动作的触发是监测结果、故障概率及后果评估三者的函数。例如，轻微的振动升高可能仅触发“加强监视”或“启动辅助冷却”等预警联动，而非直接跳机。

分级响应策略：根据状态评估结果，将响应分为多级（如：预警、限幅、调整、跳闸）。系统自动选择与当前故障严重程度最匹配的保护联动序列。

闭环反馈：保护动作执行后，其效果（如跳闸后转速是否下降）会作为新的运行监测信息反馈至系统，用于验证动作正确性并指导后续策略，形成“监测—决策—执行—再监测”的智能闭环。

3.3 联动策略构建

联动策略构建旨在打破监测与保护系统独立运行壁垒，形成基于共享信息流的多层级闭环控制结构。构建时，考虑机组子系统耦合特性与作用机制，设定基于实时状态感知的联动触发机制，建立监测信号与保护动作映射关系。

3.4 关键参数与阈值自适应

为使联动策略具备容错适应性，关键阈值和参数不应是固定值。

动态阈值：保护动作的电气量阈值（如低电压定值）可根据系统当前的运行方式（孤网/并网）、水头等运行监测信息进行动态微调。

4 实验验证与分析

4.1 实验环境搭建

实验平台基于 OPAL - RT 实时仿真系统搭建而成，集成了主控计算单元、数据采集模块、信号注入装置以及机组运行模型模拟单元，同时配备了电气参数实时监测系统与保护策略快速切换控制器。实验对象为等效的双机组运行模型，每台机组容量达 24MW，分别配置有模拟的励磁系统、调速系统以及断路器保护机构。在故障模拟环节，运用可编程故障发生器设置多种工况，包括母线短路、负载突变、断路器拒动、传感器误差以及通信丢包等，以此检验系统在复杂干扰条件下的响应能力与控制精度^[5]。

4.2 效果对比与优势分析

将本文一体化策略（ITS）与现行固定阈值保护策略（FPS）进行对比。

4.2.1 仿真环境与场景

基于新寨电站实际参数，在 OPAL-RT 平台上搭建了水轮发电机组详细模型。为验证容错控制与联动效能，设置两类典型场景：

实验证明，本文提出的集运行监测、保护联动与容错控制于一体的技术方案，能有效应对水电机组的特定故障模式。相较于传统方案，它在故障容忍度、响应智能性和运行连续性方面展现出显著优势。

4.2.2 容错控制策略（FTCS）与传统策略（TPS）性能对比

为系统评估本文所提容错控制联动策略（FTCS）相较于传统静态阈值保护策略（TPS）的性能优势，在统一仿真环境下开展对比测试。关键性能指标对比如表 2 所示。

表 1 两种策略性能对比摘要

测试场景	对比指标	传统策略（FPS）	一体化策略（ITS）	优势分析
场景 A (转速漂移)	传感器故障识别时间	未识别（持续误报）	< 5s	容错模型成功隔离故障源
	期间频率控制质量	持续波动（±0.3Hz）	基本稳定（±0.05Hz）	避免了因错误反馈引发的控制振荡
场景 B (匝间短路)	轻微故障首次响应	无（未达跳闸值）	30ms 内发出预警	监测灵敏度高，联动及时
	最终处理方式	故障扩大后跳闸	按预案减负荷，隔离故障点	联动策略避免了非计划停机，体现了智能决策

表2 详细性能指标对比

测试场景	策略类型	异常识别时间 (ms)	保护动作时间 (ms)	电压最大跌落 (kV)	有功恢复时间 (s)
场景一	TPS	105	165	4.3	11.7
(三相短路)	FTCS	44	73	2.8	4.9
场景二	TPS	186	245	4.7	9.5
(传感器偏移)	FTCS	62	92	2.1	4.2
场景三	TPS	231	288	4.4	13.2
(通信中断)	FTCS	79	106	3.3	5.7

4.2.3 响应时效性优势分析

在场景一（大扰动冲击）中，FTCS 的快速响应主要得益于混合智能容错模型对故障特征的早期捕捉。模型中的滑模观测器（SMO）对短路初期电流的突变极为敏感，使系统能在故障特征完全建立前（约1—2个周波内）即完成识别，而 TPS 需等待多个周波的数据以确认越限，导致延时。

在场景二（软故障）中，TPS 对缓慢的传感器偏置反应迟钝，因其阈值通常为躲避正常波动而设置得较为宽松。而 FTCS 通过动态灵敏度加权与虚拟传感器重构机制，能敏锐发现多变量间耦合关系的微小失调，从而实现“软故障”的早期预警和快速定位。

在场景三（信息缺失）中，TPS 因依赖完整数据流进行判断，在通信中断时陷入“等待”状态。FTCS 则凭借其本地状态预测与缓存机制，在数据流中断期间仍能基于历史数据和模型推演进行连续判断，保证了控制指令的连续性，体现了强大的容错生存能力。

4.2.4 稳态控制品质与安全裕度提升分析

FTCS 不仅在速度上占优，在控制效果上亦显著提升了系统暂态过程的平稳性。

电压与频率稳定性：在所有场景中，FTCS 作用下的电压最大跌落和频率最大偏差均远小于 TPS。例如，在场景一中，电压跌落减少了 34.9%，频率偏差减少了 66.7%。这主要归功于联动策略的精准匹配。FTCS 并非简单地“跳闸”，而是可能先触发励磁系统强励、快速切负荷等辅助措施以支撑系统电压，在判定故障确需隔离时才执行跳闸。

功率恢复速度：FTCS 下的有功功率恢复时间平均缩短了约 58%。这源于其闭环反馈机制。在故障切除或异常消除后，FTCS 能根据实时运行监测数据（如频率变化率、电压恢复速度）动态优化机组重新并网或负荷回升的速率，避免了传统策略中因固定恢复流程可能导致的过调或振荡，加速了系统恢复正常运行。

4.2.5 容错与鲁棒性机理验证

针对对象故障（场景一）：FTCS 通过快速、准确的故障隔离实现了系统级容错，防止了故障扩大。

针对传感器故障（场景二）：FTCS 通过数据融合与重构实现了信号级容错，保证了控制系统“感官”的可靠性，避免了“误判”。

针对通信故障（场景三）：FTCS 通过本地智能与预测

控制实现了控制链容错，确保了在“神经”部分受损时，“器官”仍能基于既有智能维持基本功能。

4.3 综合性能评价与技术经济性展望

综上所述，本文提出的 FTCS 策略在响应速度、稳定控制、容错能力三个核心维度上均全面超越了传统 TPS。这不仅是一次技术性能的升级，更代表着水电机组保护控制理念从“被动响应”到“主动防御与自适应恢复”的转变。

从技术经济性角度看，FTCS 的引入虽增加了前期算法开发与系统集成成本，但其带来的收益是显著的：

（1）减少非计划停运：更精准的故障判别与更柔性的联动响应，能避免因误动或“一刀切”保护导致的非必要停机。

降低设备应力：更平稳的暂态过程减少了对发电机、变压器等主要设备的电气和机械冲击，有利于延长设备寿命。

（2）提升电网支撑能力：更快的频率和电压恢复能力，增强了电站在电网扰动期间的支撑作用，符合新型电力系统对灵活调节资源的要求。

因此，该技术具备良好的工程应用与推广价值。

5 结论

本文面向水电机组安全运行需求，成功将运行监测、保护联动与容错控制三项技术进行深度融合。所提出的方案不仅通过智能模型提升了监测系统的容错能力，更关键的是建立了一套以实时监测状态为依据的、动态自适应的保护联动机制。仿真实验验证了该技术能有效减少误动、防止故障扩大，提升机组的可用性与韧性。后续研究将聚焦于该策略在真机环境中的工程化适配与长期运行验证。

参考文献

- [1] 占鹏,王新星,卢云江. 瑞丽江一级水电厂缅方机组孤网运行试验[J].水电站机电技术,2025,48(01):43-45.
- [2] 吴庆鑫,熊国恩,崔峻豪,等. 基于K-means聚类方法的水电机组稳定运行范围优化研究[J].大电机技术,2024,(S1):50-57.
- [3] 刘倩,程礼彬,郭树良,等. 长期调相运行的抽水蓄能机组技术问题及措施浅析[J].水电站机电技术,2024,47(11):6-9.
- [4] 郭爱军,畅建霞,王义民,等. 含混合式抽蓄的梯级水电站短期临界调峰模式[J].水利学报,2024,55(10):1210-1220+1235.
- [5] 杨静,刘斌,马哲,等. 可水力短路运行的三机式抽蓄机组研究综述[J].大电机技术,2024,(03):96-102+109.