

新型电力系统下火电机组深度调峰一次 调频特性分析和监测提升关键技术研究

国网江西省电科院 何钧

2025年1月



目录

ontents

一、背景和存在问题

二、研究路线及关键技术

三、研究成果和成效

四、下一步研究计划

01

背景和存在问题

江西缺煤、少油、乏气，可再生能源禀赋较弱

随着新型电力系统建设加速推进，新能源占比快速提高、更多特高压直流、柔性电力电子设备接入。

01

高比例新能源是江西新型电力系统根本基础

江西风电资源为五类地区，光伏资源为三类地区。新能源利用小时数普遍**低于全国水平**，等量替代化石能源所需建设规模更大，占比极高。

02

高比例电力电子化是新型电力系统必然趋势

清洁能源发电、特高压常规/柔性直流、电动汽车、直流微电网、新型储能并网等大规模采用**电力电子设备**。

03

高比例外来电是江西新型电力系统必要条件

江西地处中部**能源洼地**，水电及陆上风电**开发殆尽**，未来五年将新增闽赣灵活互济及腾格里~江西特高压直流等重点工程。

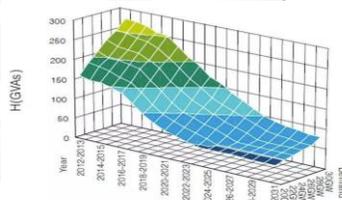


江西新型电力系统具有显著的“**三高**”特征!

研究背景

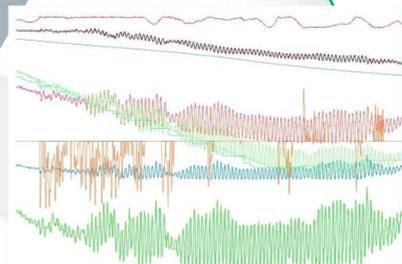
新型电力系统下火电机组面临深度调峰运行新常态

近年来，随着**新能源发电渗透率上升**，常规电源开机占比下降，抑制频率快速变化能力的转动惯量减少，**江西电网频率稳定发生新的变化**，有时甚至出现**长周期的高频状态**



系统惯量下降趋势

火电机组参与**调频的压力增大**，火电机组需要连续参与调频，导致**机组运行稳定性能下降**



机组低频振荡趋势

自2023年11月起，江西电网发生**多起机组功率波动事件**，江西统调火电机组九江神华电厂、丰城电厂、抚州大唐电厂、华能安源电厂依次发生**低频振荡事故**



江西电网发生多起机组功率波动事件

江西电网功率波动事件如下表所示：

序号	时间	机组	波动功率值	振荡频率值
1	2023.10.20	浔阳电厂#1、#2 机组	20MW	0.74Hz
2	2023.12.6	丰城三期#7机组	20MW	0.76Hz
3	2024.1.27	抚州电厂#1机组	100MW	0.19Hz
4	2024.3.6	浔阳电厂#1机组	100MW	0.25Hz
5	2024.4.21	安源电厂#1机组	22MW	0.23Hz
6	2024.12.17	黄金埠电厂#2机 组	19MW	0.18Hz

国网江西电力调度控制中心

调源发〔2024〕3号

国网江西省电力有限公司电力调度控制中心

关于加强江西电网统调火电机组调频

性能管理的通知

各统调火电厂：

自2023年11月起，江西电网发生多起火电机组功率波动事件（见附件1），触发国、网、省三级调度机构低频振荡告警。江西省调组织国网江西电科院对上述事件开展了详细分析，提出了加强江西电网统调火电机组调频性能管理的措施。

一、近期江西电网火电机组功率波动事件

1.2023年10月20日浔阳电厂#1、#2机组功率波动，波动幅度约20MW，振荡频率0.74Hz。

2.2023年12月6日丰城三期#7机组功率波动，波动幅度约20MW，振荡频率0.76Hz。

3.2024年1月27日抚州电厂#1机组功率波动，波动幅度

以上事件触发了国、网、省三级调度机构低频振荡告警！

神华九江电厂
黄金埠电厂



调速系统相关阀门试验过程中没有，没有履行报批手续，没有退出一次调频功能，**阀门固有特性与调频性能不匹配**

在**阀门切换**过程中叠加调频功率，因**调速系统**处于不稳定区域，**造成机组功率波动**

赣能丰城电厂



机组一次调频**采用汽机转速信号，信号精度小于0.1转/分**；一次调频优化过程中增加了小频差增强信号辅助逻辑，**放大了机组在小频差的调频动作量**

调节主控参数设置过强，**易导致机组功率过调**

大唐抚州电厂



机组CCS协调控制**调节性能弱，机炉解耦能力不强**，调节过程中易造成主汽压力波动大；**修改汽机主控变比例系数**

机组功率呈现**逐步发散的低频振荡**

华能安源电厂



修改后**机组主控参数过强**；提升滑压运行参数后，引起**调阀前后差压大导致阀门抖动**

增强的一次调频负荷变化量等因素叠加**诱发机组功率波动**

火电机组一次调频性能管理要求进一步细化，技术研究需要进一步深化



认知问题

火电机组灵活性改造、供热改造、宽负荷运行成为常态后，**不同工况下调频特性差异较大**，边界工况的**调频指标及评价方法尚未有效建立**。



源侧问题

机组常规工况一次调频性能不断提高，但是深度调峰**工况一次调频性能达标**仍然困难，对机组**调频综合优化**需求紧迫。



网侧问题

火电机组深度调峰工况调频面临严峻的安全挑战，调频过程需要保障机组运行安全，不发生**低频振荡和设备异常**事故。机组**运行安全与调频性能**之间矛盾日益凸显。

02

研究路线及关键技术

总体思路和项目设置

问题分析

- 火电机组深度调峰发展面临的问题



建模与仿真

- 形态演化与建模仿真
- 振荡机理分析
- 机组涉网热力特性



关键装备技术

- 煤电机组一次调频性能综合提升策略
- 调频性能在线评价评估平台



标准化设计与展示

- 省级煤电机组网源协调集成化信息评估诊断平台

建模与仿真

能力提升

运行及综合应用

总体目标

综合提升深度调峰、大频差工况下火电机组**调频性能**和以负荷振荡为代表的**调频安全**，促进电源与电网友好互动，实现灵活调节能力有效配置、支撑电网安全稳定运行。

深度调峰机组调频模型研究及机理分析

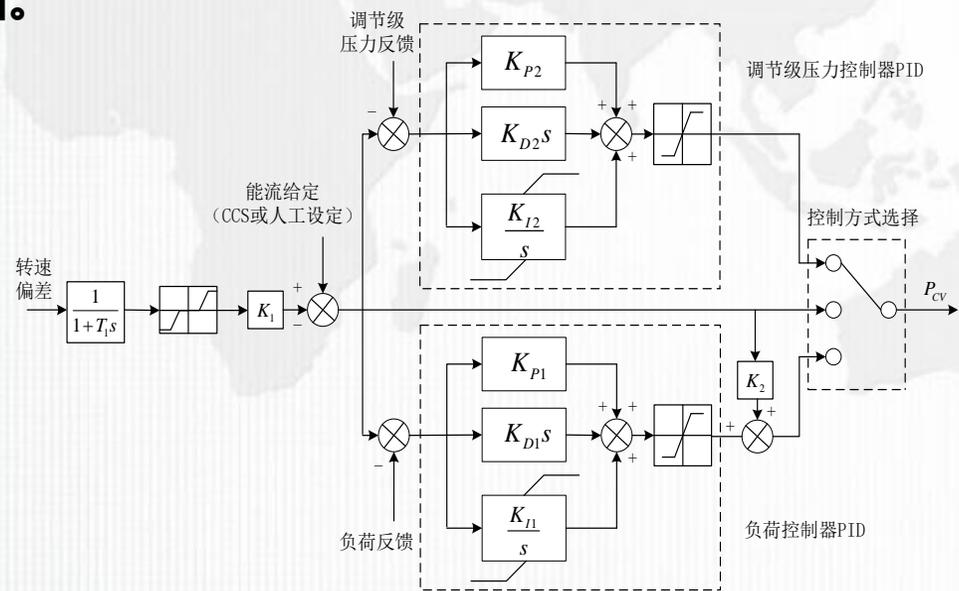
开展调频性能在线评价评估

建立网源一体安全稳定综合评价体系

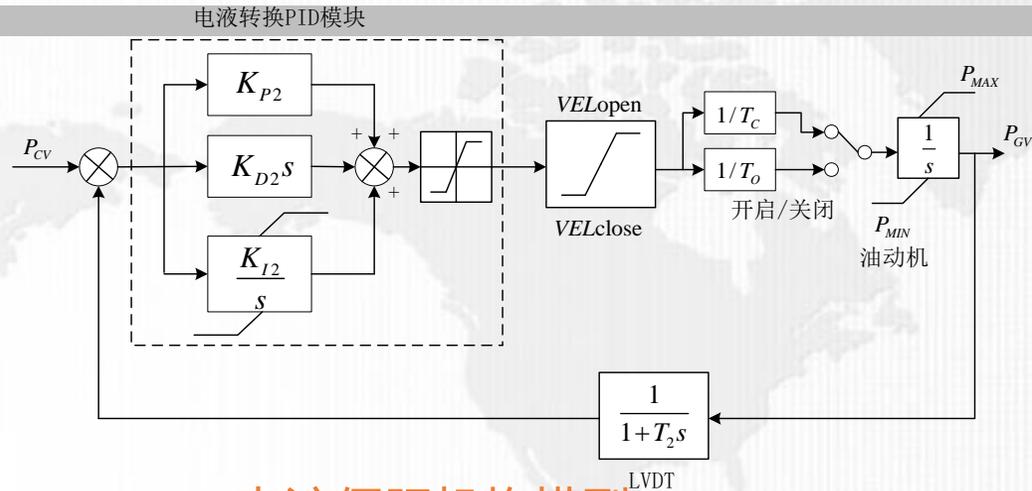
促进新型电力系统健康有序发展

调频模型构建及机理分析

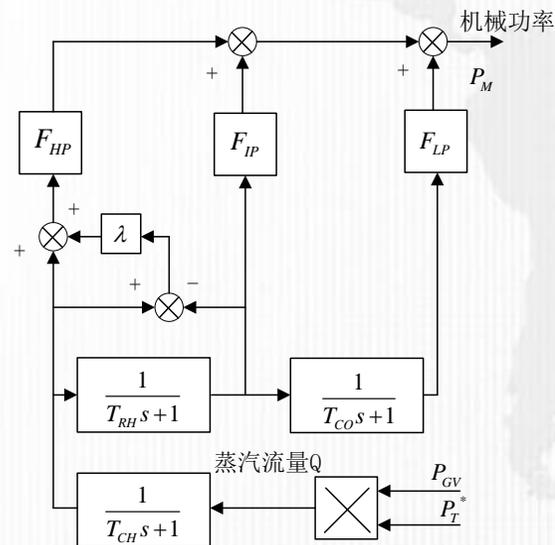
主要由调节控制系统、电液伺服机构和汽轮机模型构成。其中，汽轮机做功动态特性对调频过程负荷响应的影
 响最大，**汽轮机模型参数**在不同负荷下的变化特性也是引起深度调峰工况下一次调频动态产生偏差的主要原因。



调节控制系统模型



电液伺服机构模型



汽轮机本体模型

多容量全工况机组汽机本体参数辨识结果

- ▶ 机组负荷**越低**，机组一次调频负荷响应越迟缓，机组调频能力越弱。
- ▶ 机组容量**越大**机组响应越快，机组的稳定时间越短。

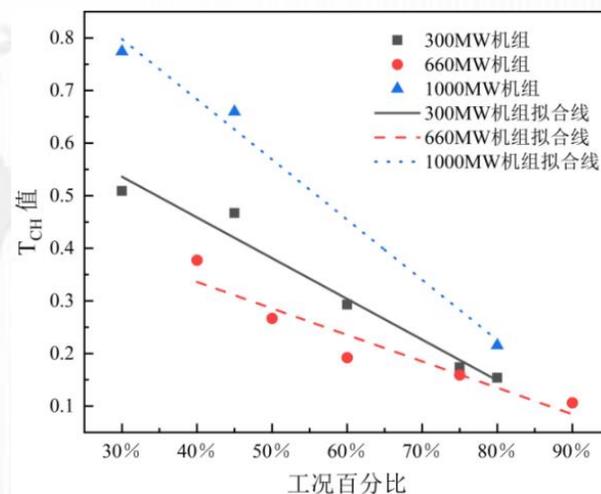
660MW机组参数辨识结果

参数	40%工况	50%工况	75%工况	90%工况
高压汽室容积时间常数	0.3969	0.3757	0.3654	0.3429
再热器时间常数	14.3696	13.9717	12.3198	11.2717
连通管时间常数	2.8647	2.8548	1.9198	1.7323
高压缸功率自然过调系数	1.2829	1.2805	1.3876	1.2848

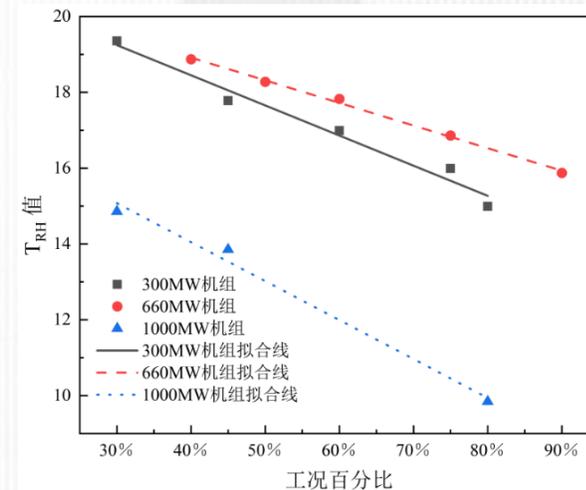
多工况机组参数辨识结果

典型机组75%工况参数辨识结果

参数	300MW	660MW	1000MW
高压汽室容积时间常数	0.4501	0.3654	0.2531
再热器时间常数	14.4670	12.3198	11.2797
连通管时间常数	2.8647	1.9198	1.7323
高压缸功率自然过调系数	1.2829	1.3876	1.1148



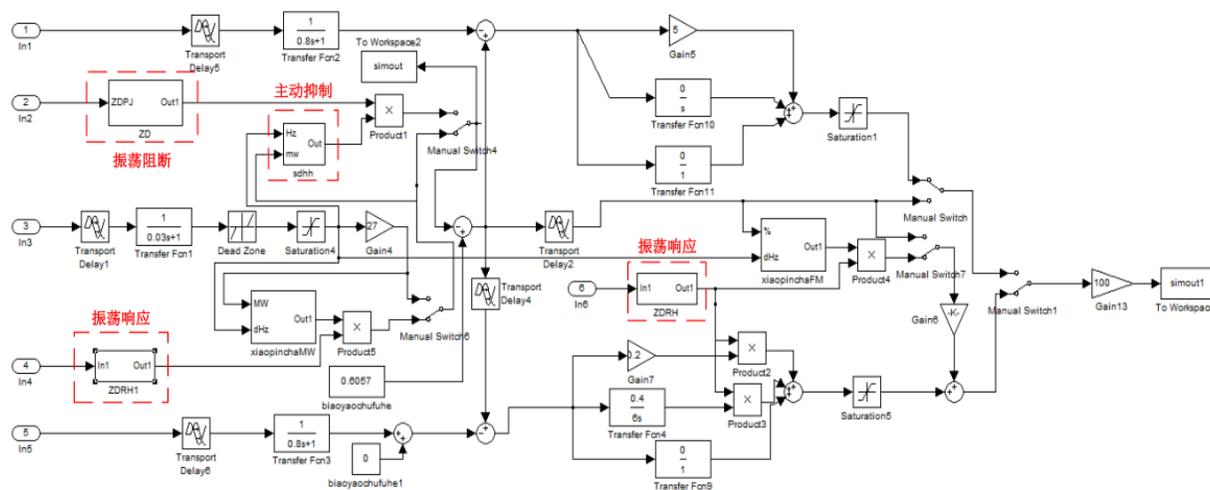
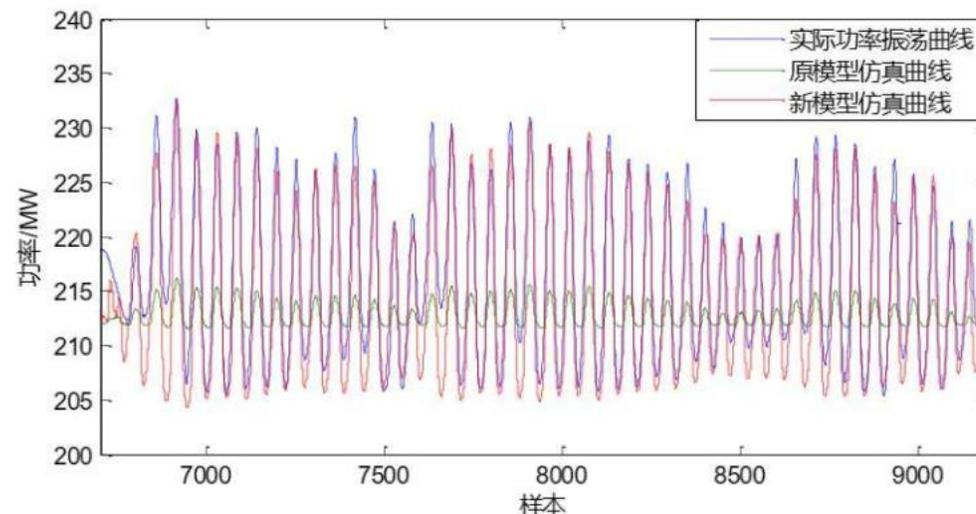
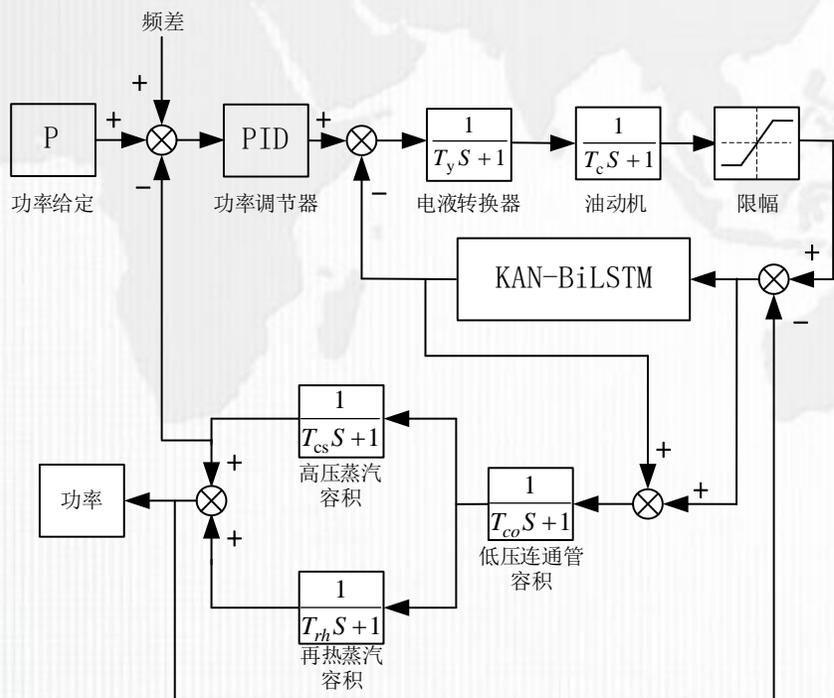
高压缸容积时间常数变化特性



再热器容积时间常数变化特性

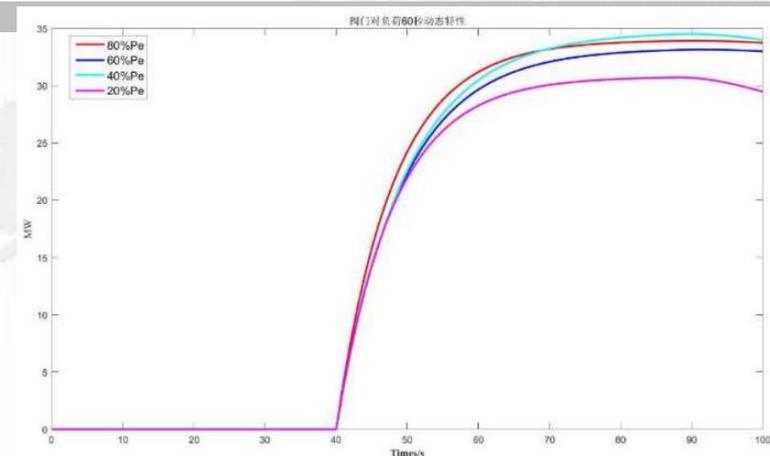
调频整体模型与仿真

结合调速系统模型及国内因调速系统引发的低频振荡案例，开展**调速系统**引发的低频振荡原因及机理研究、**低频振荡监测与辨识模型及仿真**、抑制低频振荡控制策略及仿真的相关研究。

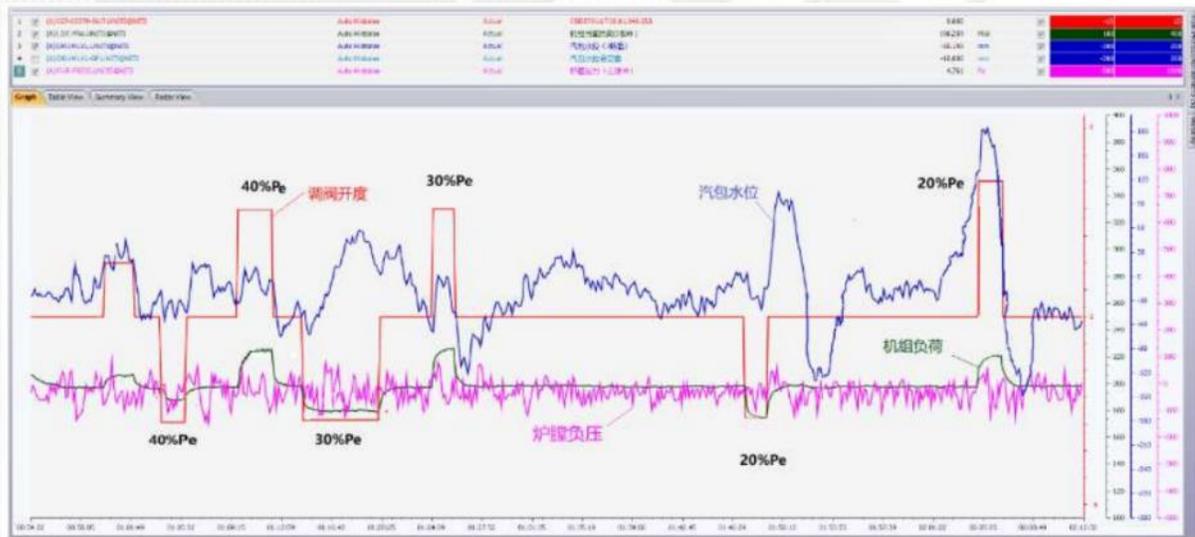


深度调峰工况调频安全在线辨识结果

- 亚临界机组的安全风险，在于**汽包水位**波动；
- 超临界机组的安全风险，在于锅炉**水动力**的不足，体现在**干湿态**的转换期间，蒸汽参数的频繁波动；
- 总体说，随着负荷的降低，一次调频**安全风险**显著增大。



不同负荷工况下机组调门对负荷60秒动态特性



深度调峰工况下炉膛负压和汽包水位波动图

序号	机组负荷 (MW)	主汽压力(MPa)	主汽温度(°C)	主蒸汽流量(t/h)	综合阀位(%)
1	250	15.9	540	1280	91
2	210	14.6	537	964	82
3	170	11.9	528	643	69
4	105	8.2	518	421	59

不同负荷机组主参数变化图

现场试验数据验证

- 随着机组调峰深度增加，若不进行机组的涉网参数及运行方式优化，机组**一次调频能力逐渐减弱**。
- 机组无法避免深度调峰运行时，需做好低负荷率与一次调频备用容量的平衡，保证电力系统的安全性。

负荷工况	频差扰动/Hz	15s负荷变化量/MW	稳定后负荷变化量/MW	速度不等率设定值/%	实际速度不等率值/%
50% Pe	-0.067	13.88	14.14	5	4.71
50% Pe	-0.1	24.94	27.72	5	4.81
40% Pe	-0.1	22.69	24.44	5	5.45
30% Pe	-0.1	20.98	22.73	5	5.86

深度调峰工况下一次调频性能指标



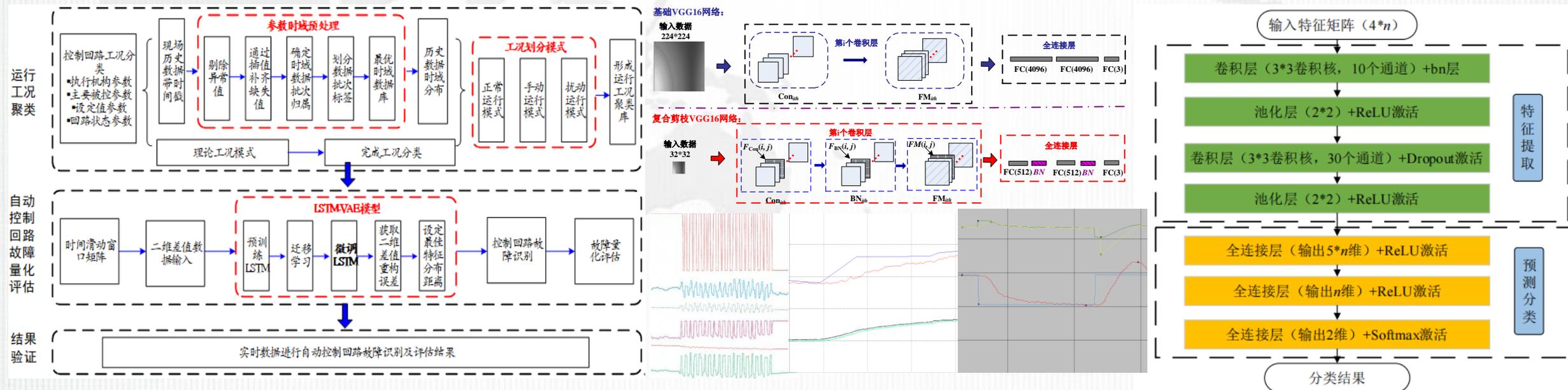
46%Pe频差-0.1Hz曲线



46%Pe频差+0.1Hz曲线

煤电机组控制回路实时监测评估方法

为实现火电机组控制回路的异常检测，提出了一种基于聚类和迁移学习的自动控制回路故障诊断方法，该方法使用 **DBSCAN聚类算法** 对控制回路运行工况进行聚类划分；使用 **VAE-LSTM模型** 提取二维差值序列的潜在特征，构造源域模型结构并对其训练调试，通过最小化损失函数来优化模型参数，并通过监控训练集和验证集的指标来评估模型性能，得出最佳的源域故障诊断模型。通过迁移的方式微调VAE-LSTM模型的网络参数，生成基于 **深度迁移学习** 的自动控制回路故障诊断模型，实现自动控制回路实时监测和故障诊断。



电液伺服机构模型特性实时监测评估方法

存在问题

现有汽轮机流量特性整定试验原理含混不清，调门重叠度设定缺少广谱适用的技术标准，导致流量特性整定工作作业不规范，实施效果不理想，最大进汽流量控制偏差 $\geq 5\%$ ，使得机组功率振荡时有发生，难以达到电网涉网运行管理要求且无法保障阀点滑压经济运行。

研究内容

通过专业性能软件的二次开发，研发机组调门运行特性仿真模型、开展汽轮机组变工况热力特性深度仿真研究，构建“以调门指令为核心”的多元汽轮机组广域运行特性图谱，实现调门流量特性在线监测和评估优化。

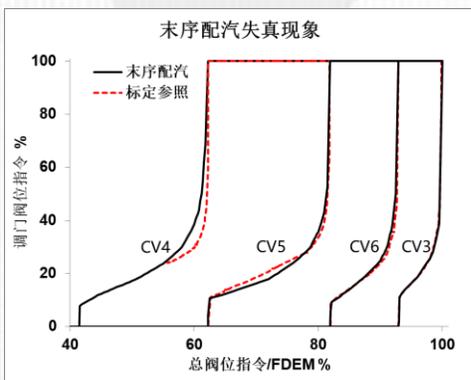
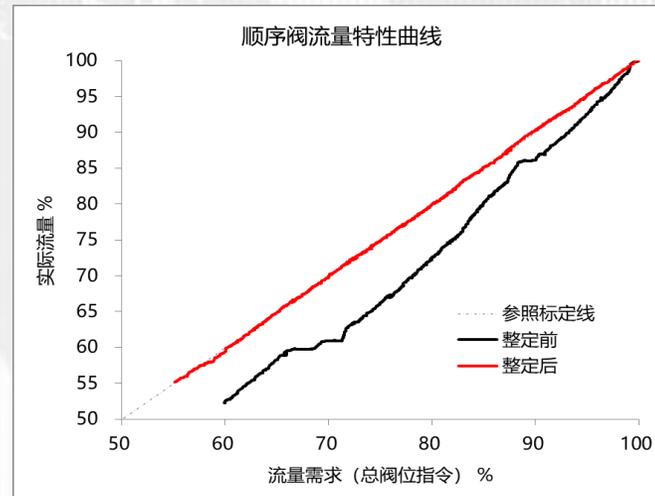


图1 末序配汽的失真现象

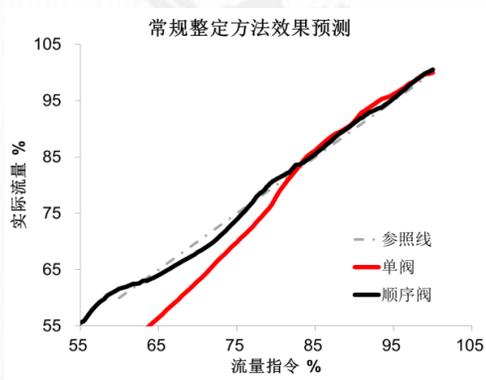


图2 常规方法实施效果

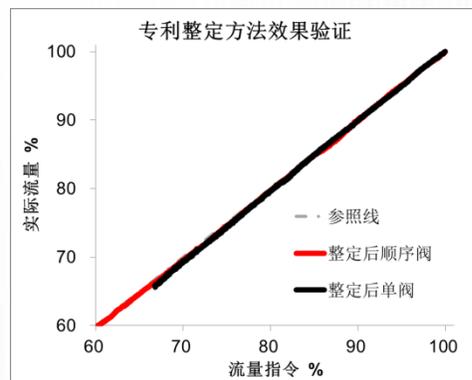
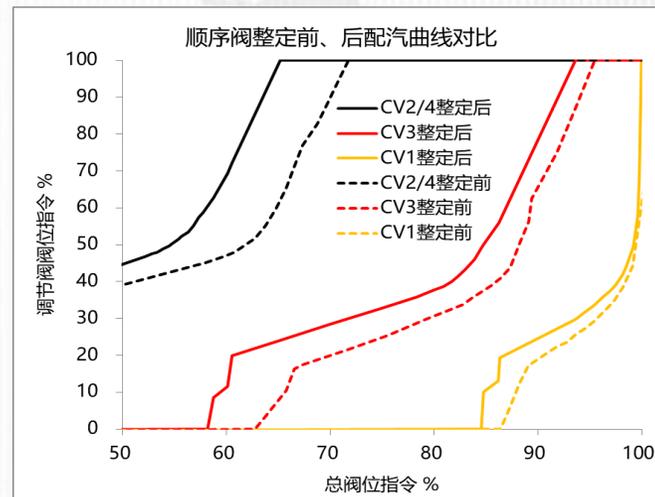


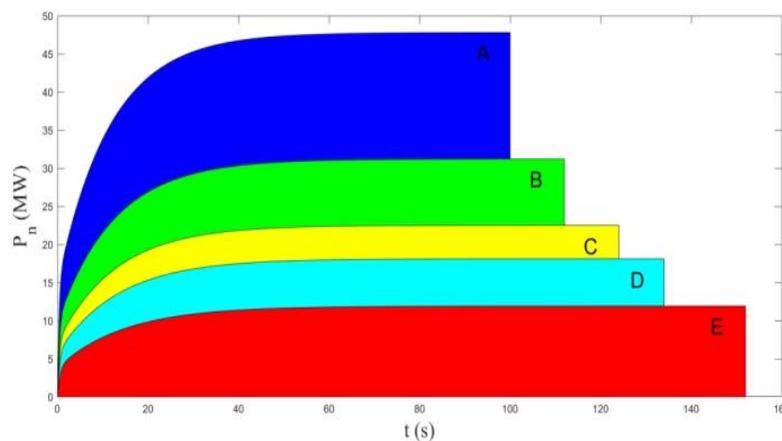
图3 本项目实施效果



整定前后对比

一次调频能力实时监测评价方法

- 通过试验获取机组各典型工况下一次调频试验数据信息以及机组热力特性数据分析汇总信息，与电网调度侧统计得出的监测数据进行并行分析，修正和完善机组一次调频性能实时评估方算法。
- 将既定配汽方式与阀门开启顺序下的机组功率、**锅炉蓄热余量**、**机组变负荷情况**以及**主蒸汽压力变化**等热力参数按照机组功率为索引，依据对实际调频效果的影响，计算机组实际工况偏离试验合格工况的综合修正因子系数。



各工况下一次调频极限响应评估结果





03

研究成果和成效

现阶段已完成工作

建立了高比例新能源背景下深度调峰机组性能评价指标体系，解决了煤电机组灵活性改造后达标验收的标准化和规范化问题、构建了基于**模型辨识**和**试验信息**的煤电机组燃烧安全及调频调峰综合分析方法，率先研发了**煤电机组机网协调性能监测与评估分析系统**，实时掌握全网机组燃烧安全及调频动态指标，在新型电力系统快速演进过程中，实现了对发电机组**灵活调节能力**的数字化在线监测，为优化电网调度运行提供重要支撑，保障电网安全稳定运行。

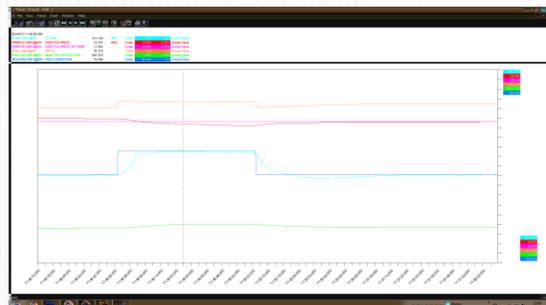
江西省能源局文件

赣能运行字〔2022〕65号

江西省能源局关于做好燃煤发电机组灵活性改造及深度调峰能力认定工作的通知

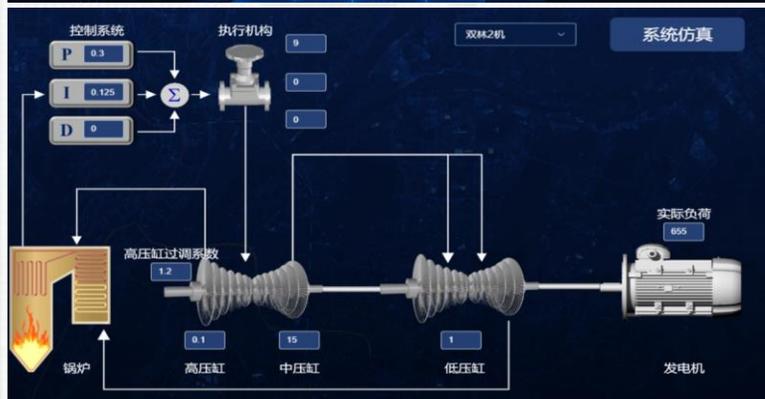
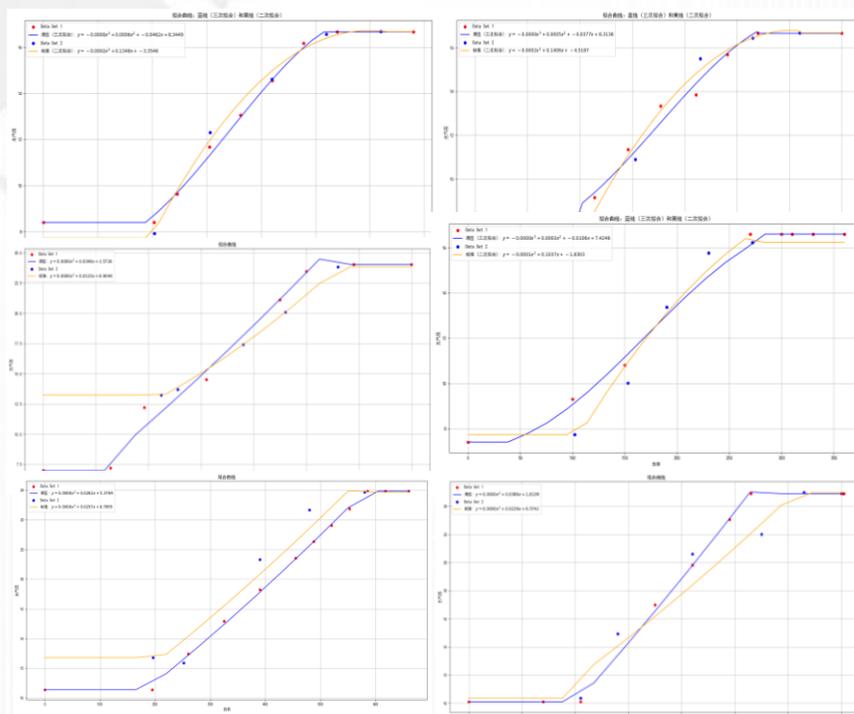
国网江西省电力有限公司、国家电投江西公司、国家能源集团江西公司、华能江西分公司、大唐江西分公司、华电江西发电有限公司、省投资集团公司，各有关单位、企业：

为有效提升我省燃煤发电机组调峰能力，促进新能源消纳，保障全省电力系统安全稳定运行，根据《国家发展改革委 国家能源局关于开展全国煤电机组改造升级的通知》（发改运行〔2021〕1519号）文件精神及《全国煤电机组改造升级实施方案》工作要求，结合我省实际，开展全省燃煤煤电机组灵活性改造及深度调峰能力认定工作，经省能源局局长办公会审议通过



□ 现阶段已完成工作

- 初步开发完成燃煤机组调频调峰综合性能评估模块，通过机组各典型工况下**调频调峰试验数据**信息获取以及机组**热力特性数据**分析信息汇总，实现了**涉网热力参数异常报警**、发电机组调频能力实时**预估**、火电机组**调速控制系统稳定性分析**。2024年为发电企业提供了9台次调速系统在线建模和协调控制稳定性分析，有效防止了机组盲目开展调频控制优化导致的机组异常。



04

下一步研究计划

□ 下一步研究方向

- 分析火电机组在**宽负荷运行工况**下参与频率控制过程中的频率响应特性，探析火电机组在宽负荷工况下调频特性的**变化规律**，实现一次调频评估模型**自校正自趋优**。
- 加强电源全过程统计分析，建立**常规电源数据库、新能源出力数据库、可调节负荷数据库**，分析不同新能源占比和火电机组开机容量条件下电网调频支撑需求，定量评估大规模火电机组深度调峰运行下**电网一次调频安全裕度**。
- 考虑电网调频需求与单台火电机组能量状态无法高效协同的难题，以**汽轮机调速系统**为枢纽，探究火电机组**多调频资源协调互补优化机理**，通过涉网参数巡检管理、故障问题在线分析、涉网数据异常报警等监测预警功能，研究基于频率调节需求和动态工况蓄热计算的源网互动多台机组自适应调频调控策略，实现多台机组**协调配合**调频，增强电网频率安全性。