

联合循环机组 FCB 功能改造的系统建模与动态控制策略研究

李凯

深圳大唐宝昌燃气发电有限公司 158000

DOI: 10.12238/ems.v8i1.17681

[摘要] 本文针对 F 级燃气蒸汽联合循环机组缺乏 FCB 功能等问题, 提出基于系统建模与动态控制协同优化的 FCB 改造方法。首先建立动态能量平衡模型, 构建燃机—汽机—余热锅炉多变量耦合控制体系, 设计时序逻辑实现燃机出口断路器与主变高压侧同期点自适应切换。仿真结果表明, 该方法能在电网故障解列后 500ms 内完成负荷切除与能流重构, 具备安全可靠的 FCB 运行能力, 为提升机组安全性与韧性提供技术参考。

[关键词] 联合循环机组; 快速甩负荷; FCB; 动态控制; 系统建模; 能量平衡

1 引言

在能源系统清洁化与安全并重背景下, 燃气蒸汽联合循环发电机组因高效率、低排放, 在电力系统调峰与应急支撑中愈发重要。但随着电网运行复杂性增加, 传统机组在孤网条件下安全性成薄弱环节。快速甩负荷 (FCB) 功能可在机组与电网解列时切除外送负荷、保持厂用电运行, 防止热冲击与保护误动, 还能快速恢复并网, 其核心是机组能量平衡。国外已将 FCB 与黑启动模块集成, 确保机组过渡与再并网。国内钰湖、台山和横琴电厂进行 FCB 改造成效显著, 但多数联合循环机组 FCB 实现条件不足, 问题有: 同期点设置与保护配合不完善, 电气切换难; 二次系统信号冗余不足, 缺快速闭环反馈; 控制系统响应滞后, 易引发汽机逆功率等风险。为此, 本文提出系统化 FCB 改造方案, 通过机组建模、时序控制策略优化和保护逻辑重构, 实现快速能流重构与安全厂用电运行, 为大型燃气电厂安全韧性提升提供理论依据与工程参考。

2 FCB功能机理与系统需求建模

2.1 FCB 工况的系统特征

在电网解列时, 联合循环机组的燃气轮机、余热锅炉与汽轮机能量耦合被打破, 导致燃机转速上升和排温骤增。FCB 功能需在数百毫秒内完成以下动作: 快速切除外送负荷并转为厂用电; 燃机燃料控制系统 (TCS) 降低燃料率, 稳定功率至厂用电需求; 汽机控制系统 (DCS) 调节旁路与抽汽, 维持汽包水位与蒸汽压力; 保护系统与控制逻辑协同闭锁, 防止主保护误动; 并网条件恢复后自动准同期并网。这些操作跨越电气、热工与机械子系统, 涉及能量守恒、控制延迟与热惯性, 需建立动态模型。

2.2 系统能量平衡方程建模

在电网解列时刻 t_0 , 机组满足瞬时能量守恒关系:

$$\frac{dE_s}{dt} = P_f - P_g - P_{loss}$$

其中 E_s 为系统储能 (主要表现为转子动能与蒸汽系统热储), P_f 为燃料输入功率, P_g 为电功输出功率, P_{loss} 为机械与热损失。

解列后 $P_g \rightarrow P_{load}$ (仅厂用电负荷), 系统转速变化可表示为:

$$J \frac{d\omega}{dt} = P_f - P_{load} - P_{loss}$$

式中 J 为转动惯量, ω 为燃机转速。为防止燃机超速, 需快速降低 P_f , 其动态过程受燃料伺服滞后与燃烧动态影响, 响应延迟通常为 100 - 200 ms。

余热锅炉侧能量平衡可简化为:

$$C_{sh} \frac{dT_{sh}}{dt} = h_g(T_g - T_{sh}) - h_s(T_{sh} - T_{steam})$$

其中 T_g 为烟气温度, T_{sh} 为过热器壁温, T_{steam} 为蒸汽温度, h_g 、 h_s 为传热系数, C_{sh} 为等效热容。汽包水位变化方程为:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{1}{\rho_w A} (G_{in} - G_{out})$$

其中 H 为汽包水位, ρ_w 为水密度, A 为横截面积, G_{in} 、 G_{out} 分别为蒸发与抽汽流量。

通过上述方程组可建立 FCB 过程中的系统动态方程, 描述机组在能流重构阶段的瞬态响应特征。

2.3 控制与保护协同需求分析

FCB 系统通过动态协调控制与保护, 确保能量渐变和安

全。燃机控制子系统 (TCS) 在电网解列后 50-100ms 内削减燃料率, 稳定燃烧室温度; 汽机控制子系统 (DCS) 稳定蒸汽系统, 确保水位偏差 $< \pm 50\text{mm}$ 、汽压波动率 $< 0.2\text{MPa/s}$; 电气保护与同期系统切除主变高压侧开关, 闭锁发电机出口 GCB, 防止电气冲击。FCB 设计包括五个时序阶段, 系统需求包括快速性、协调性、可靠性、自适应性与可恢复性。

3 控制逻辑体系与保护协调优化

3.1 FCB 控制逻辑总体架构

FCB 功能核心是实现“故障快速识别—能流平衡调整—保护协同闭环”全过程动态控制。控制体系由检测层、执行层和协调层构成。检测层监测母线电压、频率等, 判断是否触发 FCB; 执行层包括燃机、汽机控制系统, 按时序执行动作; 协调层由厂级协调控制与 DCS 逻辑组成, 负责跨系统信号协调。三层结构形成闭环, 确保机组在毫秒级完成电气解列与能量平衡调整。

阶段	时间范围 (ms)	主要动作	控制目标
I	0 - 50	故障检测与逻辑确认	识别解列信号, 锁定 FCB 模式
II	50 - 150	跳开主变高压侧断路器	隔离电网负荷, 转入厂用电运行
III	150 - 300	燃料削减与转速控制	降燃料率, 抑制超速与排温上升
IV	300 - 500	汽机旁路与水位调节	启动旁路阀, 稳定蒸汽压力与水位
V	500 - 800	系统稳态维持	燃机出力维持厂用负荷, 保护闭锁解除
VI	>800	再并网准备	准同期检测, 等待电网恢复

在燃机控制环节中, 燃料流量调节方程为:

$$\frac{dF}{dt} = -K_f(F - F_{\min})H(t - t_0)$$

其中 K_f 为削减系数, F_{\min} 为最小燃烧流量。汽机侧通过旁路流量反馈控制蒸汽压力 P_s :

$$\frac{dP_s}{dt} = K_p(G_{in} - G_{out})$$

当 P_s 超过设定上限时, 旁路控制阀按比例积分 (PI) 律开启, 以实现蒸汽缓释。

实验表明, 若燃料削减滞后超过 200 ms, 燃机转速将超限 2.5%; 若旁路延时超过 0.5 s, 汽包水位波动可达 80 mm, 易引起保护误动作。因此, 动作时间窗协调是 FCB 逻辑的关键。

3.4 保护定值优化与协调策略

FCB 动作期间, 保护系统需调整定值防误跳机。频率保护将频率上限从 51.0 Hz 调至 51.5 Hz, 延时 0.5s; 逆功率保护在汽机甩负荷阶段将门限从 -5% 调至 -10%, 延时 0.4s; 低压保护将厂用母线电压跌落至 0.85 pu 时的保护延时设为 0.3s; 燃机超速保护保留 110% 速限动作, 延时 0.2s。且所有

3.2 FCB 触发判据与信号冗余机制

为防止误触发, FCB 逻辑设计遵循“三取二 (2oo3) 冗余原则”和“多条件确认”策略。触发判据如下:

$$FCB_{trigger} = [(\Delta f > f_{lim}) \vee (U < U_{lim}) \vee (GCB_{open})]_{2/3}$$

其中, Δf 为频率偏差, U 为母线电压, f_{lim} 、 U_{lim} 分别为设定阈值。判定条件采用硬接点冗余采信, 即任意两路判定成立即触发。

为确保 FCB 逻辑可靠、可诊断, 关键触发信号配备健康状态检测与防抖处理 (延时 20 ms), 并通过 CRC 校验与周期性投票确保逻辑一致。软件防误方面, FCB 有手动靶标确认机制, 操作员需执行“靶标置位 + 模式选择 + 触发确认”三步操作, DCS 设置硬闭锁防止误触发。

3.3 动作时序与能流控制逻辑

FCB 触发后, 系统的动作时序被划分为六个阶段, 每个阶段内子系统并行响应, 但总体时间不超过 600 ms。

定值调整需经仿真验证和现场试验, 确保保护、控制与执行时间窗匹配。

3.5 安稳装置与 FCB 逻辑的协同关系

FCB 系统需兼容“安稳装置投入”和“未投入”两种工况。当安稳装置投入时, 其频率/电压触发优先级高于 FCB 逻辑; 当未投入时, FCB 逻辑独立判定并执行甩负荷过程。系统采用双判据互斥逻辑:

$$FCB_{enable} = (\neg STAB_{ON}) \vee (STAB_{ON} \wedge FCB_{ready})$$

即当安稳装置投运但处于待命状态时, FCB 仍保持可用。当安稳装置主触发条件满足, FCB 接管执行通道, 实现自动甩负荷。

3.6 控制逻辑可靠性与防误设计

为确保 FCB 系统可预测性与可验证性, 设计了防误机制: 双重闭锁机制, 软件逻辑与硬件继电器闭锁, 未解除时不可执行; 手动确认逻辑, 操作员需三步确认防止误操作; 健康状态监测, I/O 点自检, 信号丢失或延迟超 100ms 自动报警; 安全冗余电源, 双路 UPS 供电, 提高系统抗扰度。这些设计确保了 FCB 系统在复杂电气环境下的高可靠性与安全性。

4 动态响应特性与仿真实验

4.1 仿真平台与建模方法

为验证本文提出的FCB功能改造方案的动态性能与安全裕度,基MATLAB/Simulink与电厂实际参数构建了联合循环机组快速甩负荷仿真平台。模型包括燃机模块、余热锅炉模块、汽机模块、电气系统模块及控制/保护子系统,各模块之间通过热力与电气方程相互耦合。

燃机模块采用修正的非线性传递函数,输入为燃料流量 $F(t)$,输出为转速 $\omega(t)$ 、功率 $P_g(t)$ 和排气温度 $T_{ex}(t)$ 。燃料伺服滞后建模为:

$$F(t) = F_0 + K_f(1 - e^{-t/\tau_f})\Delta F$$

其中 τ_f 为燃料动态延迟常数(0.12 s)。

汽机与锅炉模块根据能量守恒方程与蒸汽储能模型建立动态响应方程:

$$C_{steam} \frac{dP_s}{dt} = G_{in}h_{in} - G_{out}h_{out} - Q_{loss}$$

G_{in}, G_{out} 分别表示蒸发与抽汽流量, h_{in}, h_{out} 为焓值。

锅炉壁温惯性由一阶迟滞模型描述。

工况	最大转速上升 (%)	排气温升 (°C)	汽包水位偏差 (mm)	电压跌落 (pu)	稳定时间 (s)
100%	1.8	+40	+45	0.85	0.6
75%	1.3	+32	+38	0.88	0.5
50%	1.0	+25	+28	0.90	0.4

结果表明,FCB功能在全负荷范围内均表现出优良的稳定性和可重复性。系统最大转速上升低于2%,汽包水位波动控制在±50 mm内,表明改造后的控制策略有较好。

4.4 仿真结果与实测对比

为验证模型精度,选取一次工程试验动态数据对比。结果显示,仿真模型预测的燃机转速峰值、排气温度变化和汽包水位波动与实测数据误差分别为4.3%、3.8%、5.1%,验证了模型在FCB瞬态阶段高精度。同时,对比FCB功能启用前后系统动态,燃机超速峰值降低约48%,汽包水位波动幅度降低约55%,再并网时间由180 s缩短至40 s,热冲击应力估算降低约30%。以上结果证明该FCB控制策略在动态响应与设备保护方面优势显著。

5 结论

本文提出基于系统建模与动态控制的FCB改造策略,解决联合循环机组缺乏快速甩负荷(FCB)功能问题。主要结论包括:1)建立燃机—汽机—锅炉—电气系统耦合动态模型;2)提出三层协同控制逻辑和2oo3冗余防误机制;3)仿真显示500ms内完成负荷切除与能流重构;4)工程验证改造后机

电气模块模拟机端电压、电网阻抗及断路器动态行为。

FCB触发时,主变高压侧断路器延时60 ms, GCB闭锁延时80 ms,母线电压按仿真模型动态变化。控制与保护子系统根据第3章逻辑实现,涵盖燃料削减、旁路控制及保护延时逻辑。仿真初始条件为机组100%负荷稳定运行,厂用电占3.5%, $t=0$ 时电网失压,FCB系统自动触发。

4.2 动态过程分析

FCB信号触发后50ms, TCS开始燃料削减,燃料流量200ms降至18%,燃机功率从336 MW降至25 MW,转速超速1.8%,500ms恢复稳定,排气温度升高40°C,均在容许范围。汽机响应中,余热锅炉烟温骤降,蒸汽压力3s内下降0.8 MPa,DCS旁路控制系统接管,汽包水位2s恢复正常。电气系统中,母线电压跌至0.85 pu,厂用电持续供电,GCB未动作,电气切换180ms内完成,系统稳定,未发生误动作。

4.3 多工况仿真实验

为验证FCB系统在不同负荷与环境条件下的稳定性,分别选取100%、75%、50%负荷三种典型工况进行仿真。主要结果见表1。

组响应时间缩短35%,再并网时间减少70%;5)为提升电力系统安全性与韧性提供技术路径。

[参考文献]

- [1]王立军,郭金富.联合循环机组动态特性建模与控制策略研究[J].热能动力工程,2021,36(5):57-64.
- [2]张建国,陈涛.燃气轮机快速甩负荷特性分析[J].电力科技与环保,2022,38(3):44-51.
- [3]李晓峰,孙成斌,等.燃机控制系统在电网故障条件下的响应分析[J].中国电机工程学报,2020,40(24):6985-6994.
- [4]Liu H., Zhang Y. Dynamic modeling and adaptive control of gas turbine combined cycle under fast load rejection[J]. Applied Energy, 2023, 342: 121013.
- [5]国家能源局南方监管局.南方区域电力辅助服务管理实施细则[Z].监能市场(2022)91号,2022.
- [6]GB/T 7713-1987.科学技术报告、学位论文和学术论文的编写格式[S].北京:中国标准出版社,1987.