

火储联合调频改造后火力发电机组运行优化研究

潘友国 王超 盛伟斌 寇明鑫 宋国权
(华能(浙江)能源开发有限公司长兴分公司)
DOI: 10.65285/GCJSYGL.V2I4.006

摘要: 火储联合调频改造显著提升了机组电气功率响应速度, 但锅炉燃烧过程响应远慢于储能, 二者功率不匹配导致主蒸汽压力波动加剧。本文提出基于功率指令低频分解、储能功率前馈和主蒸汽压力偏差补偿的协调控制优化策略, 并给出理论论证。分析表明, 该策略可降低锅炉给煤量波动幅度, 减小主蒸汽压力偏差, 同时保持机组电气功率快速响应能力。

关键词: 火储联合调频; 协调控制; 储能功率前馈; 主蒸汽压力; 运行优化

Research on Operation Optimization of Thermal Power Units After Thermal-storage Combined Frequency Regulation Retrofit

Youguo Pan, Chao Wang, Weibin Sheng, Mingxin Kou, Guoquan Song
Changxing Branch, Huaneng (Zhejiang) Energy Development Co., Ltd.

Abstract: Thermal-storage combined frequency regulation retrofit can significantly improve the power response speed of thermal power units. However, the response of boiler combustion is far slower than that of the energy storage system, and the power mismatch aggravates the fluctuation of main steam pressure. This paper proposes an optimized coordinated control strategy based on low-frequency decomposition of power commands, energy storage power feedforward, and main steam pressure deviation compensation, with corresponding theoretical verification. The results show that the proposed strategy can reduce the fluctuation range of boiler coal feed rate, lower main steam pressure deviation, and maintain the fast power response performance of the unit.

Keywords: thermal-storage combined frequency regulation; coordinated control; energy storage power feedforward; main steam pressure; operation optimization

前言

新型电力系统下火电机组定位发生根本改变, 快速变负荷与一次调频能力成为核心竞争力。大量机组实施火储联合调频改造, 在厂用电系统接入蓄电池, 利用储能毫秒级响应特性快速改变上网功率。但储能只能改变电气功率, 不能改变锅炉输入热量, 若沿用原协调控制逻辑, 储能和锅炉可能对同一功率偏差重复响应, 造成给煤量过调、主蒸汽压力剧烈波动。因此, 火储联合调频改造后协调控制必须同步优化。

一、火储联合调频后机组运行特性分析

常规火电机组协调控制系统以锅炉主控和汽机主控为核心。功率指令经负荷速率限制后, 汽机侧通过调门开度快速改变进汽量, 锅炉侧通过给煤量、风量调节主蒸汽压力。锅炉燃烧过程存在较大迟延和惯性, 典型燃煤机组锅炉等效时间常数 T_b 约为 120 ~ 300 s, 纯延迟时间 τ_d 约为 20 ~ 60 s, 而机组最大爬坡速率一般为额定功率的 1% ~ 3%/min。变负荷时主蒸汽压力偏差不可避免。

火储联合调频改造后, 储能系统响应时间通常小于 100 ms, 远快于锅炉燃烧过程。储能功率一般为机组额定功率的 3% ~ 10%, 可在数秒内完成满功率充放电切换。机组

总上网功率由汽轮机功率和储能功率共同构成:

$$P_{\text{total}}(t) = P_{\text{tur}}(t) + P_{\text{storage}}(t)$$

其中, P_{total} 为机组总功率, P_{tur} 为汽轮机功率, P_{storage} 为储能功率(放电为正, 充电为负)。储能快速动作后, 锅炉侧热负荷未同步变化, 锅炉主控若仍按总功率指令调节, 将产生错误响应。储能放电时, 锅炉误以为需要增加给煤量, 导致锅炉供热量过剩; 储能充电时则相反。这种双重调节加剧了锅炉热负荷扰动。

从能量平衡角度看, 储能放电时向厂用电系统注入功率, 相当于减少了汽轮机需要承担的电气功率, 锅炉供热量本应不变或少量增加。因此, 优化协调控制的核心是重新划分储能与锅炉的功率响应频段, 并将储能功率作为前馈信号引入锅炉主控。

二、优化思路与功率指令分解

将机组总功率指令 $P_{\text{total}}(t)$ 分解为低频分量 $P_{\text{boiler}}(t)$ 和高频分量 $P_{\text{storage}}(t)$ 。低频分量由锅炉和汽机协调承担, 高频分量由储能承担。采用一阶低通滤波器实现:

$$P_{\text{boiler}}(t) = \text{LPF}(P_{\text{total}}(t), T_f)$$

$$P_{\text{storage}}(t) = P_{\text{total}}(t) - P_{\text{boiler}}(t)$$

其中, T_f 为滤波时间常数, 其取值应大于锅炉燃

烧过程等效时间常数。典型取值为 T_b 的 1 ~ 2 倍, 即 120 ~ 600 s。锅炉侧协调控制仅跟踪 $P_{\text{boiler}}(t)$, 储能功率指令 $P_{\text{storage}}(t)$ 送给储能变流器。这样锅炉给煤量变化率大幅降低, 储能承担大部分快速功率波动。

储能功率指令受荷电状态 SOC 约束。当 SOC 接近上限时, 储能不能继续充电; 接近下限时不能继续放电。此时高频分量中超出储能能力部分应转由汽机侧承担, 并相应调整锅炉侧指令。实际实现时可在 $P_{\text{storage}}(t)$ 后设置限幅和 SOC 管理逻辑。

三、协调控制优化策略

(一) 锅炉主控前馈重构

储能放电时向厂用电系统注入功率, 机组电气功率增加, 但汽轮机功率未增加, 需要在锅炉主控中引入储能功率前馈, 将储能放电功率从锅炉功率需求中扣除。设储能放电功率为正, 充电为负, 则锅炉侧有效功率需求可表示为:

$$P_{\text{boilerReq}}(t) = P_{\text{total}}(t) - P_{\text{storageCmd}}(t) - P_{\text{aux}}(t)$$

其中, $P_{\text{aux}}(t)$ 为厂用电及其他辅助功率变化。该前馈信号应在储能功率指令变化后立即进入锅炉主控回路, 且不经锅炉侧负荷速率限制, 以保证前馈的快速性。

前馈通道传递函数可设为:

$$G_{\text{ff}}(s) = 1 / (T_{\text{ff}} s + 1)$$

其中, T_{ff} 为前馈滤波时间常数, 典型取值为 0.5 ~ 2 s, 用于平滑储能功率指令中的高频毛刺, 避免给煤量指令频繁抖动。 T_{ff} 不宜过大, 否则前馈作用滞后, 无法有效抵消储能功率对锅炉的误扰动。

(二) 主蒸汽压力偏差补偿

储能快速充放电改变了汽轮机进汽量需求。当储能放电时, 机组电气功率增加但汽轮机功率未变, 主蒸汽压力可能因锅炉蓄热释放而下降; 当储能充电时, 压力可能上升。主蒸汽压力偏差 $\Delta P_t(t)$ 应作为修正信号, 适当调整储能功率指令, 防止锅炉蓄热过度波动。

压力偏差定义为:

$$\Delta P_t(t) = P_{\text{set}}(t) - P_t(t)$$

其中, P_{set} 为主蒸汽压力设定值, P_t 为主蒸汽压力实际值。在储能功率指令中叠加压力偏差补偿项:

$$P_{\text{storageCmd}}(t) = P_{\text{storageBase}}(t) + \Delta P_{\text{storage}}(t)$$

$$\Delta P_{\text{storage}}(t) = K_p \Delta P_t(t) + K_i \int \Delta P_t(t) dt$$

其中, K_p 为比例增益, K_i 为积分增益。该补偿使储能在压力偏低时减少放电或增加充电, 在压力偏高时增加放电或减少充电, 起到保护锅炉蓄热的作用。积分项用于消除稳态压力偏差, 但需设置限幅, 防止积分饱和。

压力偏差补偿增益 K_p 的选取需要兼顾快速性和稳定性。 K_p 过大可能引起储能功率振荡, K_p 过小则补偿作用不足。理论上 K_p 应与锅炉蓄热时间常数匹配, 典型取值范围为 0.05 ~ 0.3 MW/MPa, K_i 可取 K_p 的 1/10 ~ 1/5。

(三) 变负荷速率自适应

机组实际变负荷速率仍受锅炉响应能力限制。储能参与后, 虽然电气功率可以快速变化, 但锅炉侧热负荷仍需

缓慢跟随。应根据储能荷电状态 SOC(t) 和主蒸汽压力偏差动态调整锅炉侧功率指令的变化速率限幅。当 SOC 充足且压力偏差较小时, 可适当提高锅炉侧变负荷速率; 当 SOC 接近限值或压力偏差较大时, 降低锅炉侧变负荷速率, 防止储能过放或过充, 同时减少锅炉蓄热消耗。

锅炉侧功率指令的速率限幅可通过变速率函数实现:

$$V_{\text{boiler}}(t) = V_{\text{max}} \cdot f(\text{SOC}(t), \Delta P_t(t))$$

其中, V_{max} 为锅炉最大允许变负荷速率, 典型值为额定功率的 1.5% ~ 3%/min。修正函数 f 可设计为:

$$f = \min(1, \max(0, 1 - k_1 |\text{SOC}(t) - \text{SOC}_{\text{mid}}| / \text{SOC}_{\text{range}} - k_2 |\Delta P_t(t)| / \Delta P_{\text{max}}))$$

其中, SOC_{mid} 为 SOC 目标中值, 典型取 50%; $\text{SOC}_{\text{range}}$ 为 SOC 允许运行范围, 典型取 20% ~ 80%; ΔP_{max} 为允许的最大压力偏差, 典型取 0.5 ~ 1.0 MPa; k_1 、 k_2 为权重系数, 典型取 0.5 ~ 1.0。当 SOC 处于正常区间且压力偏差小于设定值时, f 接近 1; 当 SOC 接近限值或压力偏差超限时, f 逐渐减小至 0。

(四) 汽机主控与储能协调

汽机主控仍负责跟踪锅炉侧功率指令 $P_{\text{boiler}}(t)$, 储能功率指令由总指令高频分量和压力偏差补偿确定。两者之和等于机组总功率响应, 可保证电网侧功率快速准确跟踪。汽机侧功率设定值可表示为:

$$P_{\text{turSet}}(t) = P_{\text{boiler}}(t) - \Delta P_{\text{storage}}(t)$$

该式表明, 储能压力补偿量会反向调整汽机功率设定值, 以维持总功率平衡。例如, 储能因压力偏低而减少放电时, 汽机侧应相应增加功率, 补偿储能功率减少量。

汽机调门动态较快, 可近似为一阶惯性环节:

$$G_{\text{tur}}(s) = 1 / (T_{\text{tur}} s + 1)$$

其中, T_{tur} 为调门执行机构时间常数, 典型取 2 ~ 5 s。储能功率响应可近似为:

$$G_{\text{storage}}(s) = 1 / (T_{\text{storage}} s + 1)$$

其中, T_{storage} 为储能变流器响应时间常数, 典型小于 0.1 s。由于 T_{storage} 远小于 T_{tur} 和 T_b , 储能可近似视为瞬时响应, 总功率跟踪性能主要由汽机和储能共同决定。

四、理论论证

(一) 简化动态模型

设锅炉供热量 $Q_b(t)$ 与给煤量近似成正比, 汽轮机功率 $P_{\text{tur}}(t)$ 与主蒸汽压力 $P_t(t)$ 和调门开度有关。忽略汽机调门动态, 汽轮机功率可近似为:

$$P_{\text{tur}}(t) = P_t(t) \cdot \mu(t)$$

其中, $\mu(t)$ 为调门开度等效系数。锅炉侧能量平衡可用一阶惯性加纯延迟近似:

$$T_b dP_{\text{tur}}(t)/dt + P_{\text{tur}}(t) = Q_b(t - \tau_d)$$

其中, T_b 为锅炉等效时间常数, τ_d 为纯延迟时间。储能功率响应速度快, 可近似认为 $P_{\text{storage}}(t)$ 立即跟随指令。机组总功率为:

$$P_{\text{total}}(t) = P_{\text{tur}}(t) + P_{\text{storage}}(t)$$

当总功率指令变化时, 若储能承担高频分量, 锅炉侧

跟踪低频分量, 则 $P_{tur}(t)$ 的偏差主要由低频分量未跟踪部分和压力波动引起。由于储能补偿高频分量, 总功率跟踪误差显著减小。

(二) 储能功率前馈的作用

若不引入储能功率前馈, 锅炉主控按总功率指令调节给煤量, 则储能放电时锅炉同时增加给煤量, 造成锅炉供热量过剩。设储能放电功率为 ΔP_s , 锅炉误响应引起供热量增加 ΔQ_b , 则主蒸汽压力偏差近似为:

$$\Delta P_t \approx (\Delta Q_b - \Delta P_s) / C_b$$

其中, C_b 为锅炉蓄热系数, 典型值为 50 ~ 150 MJ/MPa。引入储能功率前馈后, ΔQ_b 与 ΔP_s 相互抵消, 压力偏差减小。从能量平衡角度看, 前馈相当于使锅炉侧仅跟踪扣除储能功率后的净功率需求, 避免了双重调节。

(三) 稳定性条件

储能功率指令中引入压力偏差反馈后, 构成闭环。设储能功率响应时间常数远小于锅炉时间常数, 系统稳定性主要取决于 K_p 与锅炉蓄热特性的匹配。将压力偏差反馈回路与锅炉动态联立, 闭环特征方程可近似为:

$$1 + K_p C_b / (T_b s + 1) = 0$$

由劳斯判据可知, 系统稳定的必要条件为 $K_p > 0$ 且 $T_b > 0$, 进一步满足:

$$K_p < 2 / T_b$$

其中, T_b 为锅炉等效时间常数。 K_p 过大会引起储能功率振荡, K_p 过小则压力偏差补偿效果不足。实际选取时, K_p 可取 T_b 的倒数同数量级。例如 T_b 为 200 s 时, K_p 理论上限为 0.01, 结合工程裕度可取 0.005 ~ 0.008。积分增益 K_i 的引入会改变闭环特性, 需满足:

$$K_i < K_p / (4 T_b)$$

以保证足够的阻尼比, 避免压力补偿回路振荡。

(四) 与常规协调控制对比

常规协调控制下, 锅炉跟随总功率指令, 给煤量频繁变化, 主蒸汽压力波动大。设机组总功率指令波动幅值为

ΔP_{total} , 频率为 ω 。常规控制下锅炉侧功率指令波动幅值约为 ΔP_{total} , 优化后锅炉侧功率指令波动幅值约为:

$$|\Delta P_{boiler}| = |\Delta P_{total}| / \sqrt{1 + (\omega T_f)^2}$$

当 $\omega T_f > 1$ 时, 锅炉侧功率波动幅值显著衰减。例如 $T_f = 300$ s, 负荷波动周期为 60 s 时, $\omega T_f \approx 31.4$, 锅炉侧波动幅值仅为总波动的 3.2%。储能承担了绝大部分高频功率波动, 锅炉给煤量变化率大幅降低, 主蒸汽压力偏差和煤耗均有望改善。

结语:

本文针对火储联合调频改造后锅炉燃烧滞后与储能快速响应之间的矛盾, 提出基于功率指令低频分解、储能功率前馈和主蒸汽压力偏差补偿的协调控制优化方法。理论分析表明, 该方法能够降低锅炉给煤量波动幅度, 减小主蒸汽压力偏差, 同时保持机组电气功率快速响应能力。本文仅进行理论研究和策略设计, 未包含现场试验数据, 后续可通过仿真和现场验证进一步优化参数, 并结合具体机组特性完善控制方案。

参考文献:

- [1] 刘吉臻. 热工过程自动调节 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2008.
- [2] 李青, 王学军. 火电厂燃煤掺烧技术及应用 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2015.
- [3] 周强, 等. 火储联合调频系统控制策略研究 [J]. 电力系统自动化, 2020, 44(12): 156-162.
- [4] 张华, 等. 火电机组协调控制系统优化研究 [J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(5): 1420-1428.
- [5] 陈海生, 等. 储能技术在火电调频中的应用分析 [J]. 储能科学与技术, 2021, 10(3): 890-898.

作者简介: 潘友国 (1987 年 9 月 -)、男、汉族、浙江长兴人、工程师、本科学历、研究方向: 火电厂运行优化。