

# 自抗扰控制技术的电网控制系统稳定性研究

李琛<sup>1</sup> 杨路勇<sup>2\*</sup>

1 国网山东省电力公司德州供电公司

2 国网山东省电力公司禹城市供电公司

DOI:10.32629/etd.v7i2.18924

**[摘要]** 针对电厂热工控制系统易受现场电磁干扰、传感器噪声、负荷波动等扰动影响的问题,本文基于实际参建项目,系统阐述自抗扰控制(ADRC)技术的应用价值。通过构建扩张状态观测器,实时估计并补偿总扰动,有效提高系统鲁棒性;采用改进型ADRC控制器,科学优化参数整定策略,增强动态响应精度;同步实施接地线平衡、屏蔽连接措施,从硬件层面抑制共模干扰。该三位一体技术路径大幅度改善热控系统在复杂工况下的稳定性,为火电机组安全高效运行提供可靠保障。

**[关键词]** 自抗扰控制技术; 电网控制系统; 稳定性

中图分类号: U665.12 文献标识码: A

## Research on Power Grid Control System Stability Using Active Disturbance Rejection Control Technology

Chen Li<sup>1</sup> Luyong Yang<sup>2\*</sup>

1 State Grid Shandong Electric Power Company Dezhou Power Supply Company,

2 Yucheng Power Supply Company, State Grid Shandong Electric Power Company

**[Abstract]** To address the susceptibility of thermal control systems in power plants to disturbances such as electromagnetic interference, sensor noise, and load fluctuations, this paper systematically elucidates the application value of Active Disturbance Rejection Control (ADRC) technology based on an actual construction project. By constructing an Extended State Observer (ESO) to estimate and compensate for total disturbances in real time, system robustness is effectively enhanced. An improved ADRC controller is employed to scientifically optimize parameter tuning strategies, thereby improving dynamic response accuracy. Simultaneously, grounding balance and shielding connection measures are implemented to suppress common-mode interference at the hardware level. This three-pronged technical approach significantly improves the stability of thermal control systems under complex operating conditions, providing reliable assurance for the safe and efficient operation of thermal power units.

**[Key words]** Active Disturbance Rejection Control Technology; Power Grid Control System; Stability

### 引言

热工控制系统长期受到复杂电磁干扰侵蚀,严重降低其运行稳定性。干扰源主要包括公共地线阻抗耦合引发的共模电压、设备绝缘劣化产生的漏电流、静电感应、雷电瞬态脉冲,以及强弱电回路间电磁感应形成的串扰,该类干扰信号通过信号电缆屏蔽层缺陷,致使温度、压力、流量等关键测点出现漂移,直接干扰PID调节器的输入基准,造成执行机构误动作。在负荷快速变动、启停机等关键工况下,系统调节功能持续退化,甚至触发保护误动,严重威胁机组安全稳定运行。传统滤波、屏蔽手段无法应对多源、宽频、时变干扰的叠加效应,亟须引入具备较强扰动抑制能力的先进控制策略,自抗扰

控制技术凭借其“总扰动”的在线观测、实时补偿能力,为解决上述问题提供有效路径,有助于保障热控系统在高干扰环境下的可靠运行。

### 1 自抗扰控制在电网控制系统稳定性中的作用

自抗扰控制(ADRC)技术在高海拔多雷击环境下大幅度提高了热工控制系统的抗干扰能力。针对双汽机布置电厂中差模干扰、共模干扰耦合问题,ADRC通过扩张状态观测器(ESO)将系统内部未建模动态、传感器噪声、负荷扰动、雷击瞬态脉冲统一建模为“总和扰动”,该观测器集成非线性跟踪微分器,具备快速响应纳秒级电磁脉冲的能力。当机组负荷发生±15%阶跃变化时,ESO可在20ms内精准辨识由公共阻抗耦合引发的1.2V级差模

干扰,并通过前馈补偿通道将其抑制至200mV以下,有效保障了锅炉燃烧、汽温调节等关键回路的控制精度,从根本上缓解了地电位差、信号串扰产生的系统误动风险。

在重型燃气轮机转速控制中,ADRC进一步拓展为有限时间误差自抗扰控制策略。该方法基于质量、动量守恒定律,构建健全的部件级机理模型,设计具备有限时间收敛特性的扩张状态观测器,实时估计负荷突变、燃料波动、机械摩擦等复合扰动。控制器通过动态补偿机制,将转速跟踪误差在预设时间窗口内强制收敛至零邻域,成功打破了传统渐近稳定局限,不仅提高了系统抗扰鲁棒性,更实现转速动态响应的快速性、精确性协同优化,大幅度增强机组在电网调频工况下的适应能力。通过分析两项应用,验证ADRC在复杂电力控制系统中具有高精度、强鲁棒、快响应等应用优势,为热控系统在强干扰环境下的安全稳定运行提供核心技术支撑(见图1)。

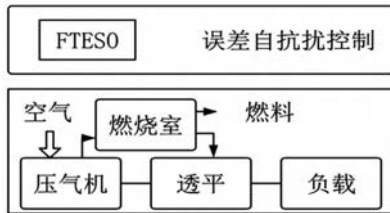


图1 重型燃气轮机转速有限时间误差自抗扰控制机制

## 2 自抗扰控制在电网控制系统稳定性的应用要点

### 2.1 解决多类型现场干扰

自抗扰控制在电厂热控系统中的应用优势是统一处理多样化干扰的能力。针对现场存在的可测干扰(雷击瞬态、漏电阻耦合)和未知干扰(未建模动态、随机负荷波动),该技术通过构建系统输出、扰动的耦合关系模型,实现差异化抑制策略。对于可测干扰,采用降阶状态空间模型提取关键动态特征,设计基于误差预报的前馈补偿机制;针对未知干扰,则利用扩张状态观测器,构建健全的“虚拟干扰模型”,将内外扰动等效为总和扰动进行实时估计及补偿。该方法成功解决了传统控制对精确数学模型的依赖,在高噪声工业环境中大幅度提高系统控制精度。

自抗扰控制系统基本模型为:

$$\dot{y} = f(y) + bu + d + w \quad (1)$$

其中:  $y$  为热控系统实际输出值;  $f(y)$  为系统未知非线性动态(含未建模特性);  $b$  表示控制输入增益系数;  $u$  为控制器输出的控制量;  $d$  表示外部环境扰动;  $w$  为系统内部不确定状态。

跟踪误差动态方程:

$$e = y - y_r \quad (2)$$

其中:  $e$  表示输出跟踪误差;  $y_r$  为给定参考输入(设定值);  $y$  为系统实际输出。该误差信号驱动扩张状态观测器对总扰动  $d+w+f(y)$  进行实时重构。

降阶干扰模型状态空间表达:

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + Bu \\ y_m = CX + Du \end{cases} \quad (3)$$

其中:  $X$  表示降阶模型状态变量;  $u$  为输入变量(控制指令);  $y_m$  对应模型输出值;  $A, B, C, D$  为和热控系统负荷工况相关的常数矩阵,通过系统辨识获得。通过上述模型协同,自抗扰控制分层处理热控系统中多类型干扰,可测干扰通过模型前馈主动抑制,未知干扰通过ESO在线估计被动补偿,将二者进行相互融合,构成闭环鲁棒控制架构,为电网控制系统在复杂干扰环境下的稳定运行提供坚实技术保障<sup>[1]</sup>。

### 2.2 配置改进型自抗扰控制器

为了提高自抗扰控制器在高干扰环境下的运行可靠性,本项目构建“硬件抗扰—信号隔离—动态补偿”为一体的协同防护体系。该体系并不是简单叠加防护措施,而是将自抗扰控制算法作为核心,通过分级浪涌保护、复合屏蔽、智能隔离、动态滤波等硬件手段,为扩张状态观测器(ESO)提供高信噪比输入信号,从源头上降低总扰动估计难度,全面提高扰动补偿精度。

表1 结构化技术改进项

技术改进项	抗干扰机理	关键参数设计	实施位置	干扰抑制效果对比
分级浪涌保护系统	利用箝位效应抑制瞬态过电压	AMT40 断路器 (63A, 10kA 分断); TVS 二极管响应时间 $\leq 1\text{ns}$	烟囱区/脱硫区电源进线	雷击过电压抑制率 $\geq 92\%$
复合屏蔽体系	电磁屏蔽与静电屏蔽双重机制降低辐射干扰	保护层 $\geq 1.5\text{mm}$ 镀锌钢板; 电缆屏蔽覆盖率 $\geq 85\%$ ; 接地电阻 $\leq 0.5\Omega$	变送器/联锁系统	高频干扰衰减 $\geq 40\text{dB}@10\text{MHz}$
智能隔离模块	光电隔离阻断地环路干扰	隔离电压 $\geq 2500\text{Vrms}$ ; 共模抑制比 $\geq 120\text{dB}@60\text{Hz}$	I/O 回路/仪表电源	共模电压由 8.8V 降至 0.5V
动态滤波组件	RC 滤波网络抑制特定频段传导干扰	压敏电压 $430\text{V} \pm 10\%$ ; 截止频率 $f_c = 1/(2\pi RC)$ , 可调 $1\text{kHz} \sim 10\text{MHz}$	PLC 模块电源端	电磁干扰纹波系数 $\leq 0.3\%$
协同防护架构	构建“空间屏蔽—线路滤波—终端保护”三级体系	防护等级 IP55; 电磁兼容满足 IEC 6100045 Level 14	整个热控系统	综合抗扰度提升 3 个等级

该架构在标高48m汽机房72小时抗扰测试中验证有效,雷击模拟符合IEC 623051标准,分级浪涌保护将瞬态能量逐级泄放,复合屏蔽抑制空间电磁耦合,智能隔离消除地电位差引起的共模干扰,动态滤波精准滤除PLC电源端高频纹波,为自抗扰控制器提供洁净信号环境,有效降低ESO对总扰动的估计误差,大幅度热控系统在强电磁环境下的稳定性<sup>[2]</sup>。

### 2.3 实现接地线平衡抑制连接

#### 2.3.1 接地线连接技术

接地系统作为热控抗干扰体系的底层支撑,其设计质量直接影响自抗扰控制器对共模干扰的抑制能力<sup>[3]</sup>。不合理的接地容易形成地环路,积极引入电位差噪声,干扰传感器微弱信号传输,无形中降低扩张状态观测器的扰动估计精度。本项目针对屏蔽电缆、非屏蔽电缆、复合屏蔽电缆,采用差异化接地策略,屏蔽层在雷击高风险区实施等电位两端接地,复合屏蔽层则采用“一点+两点”混合接地,具有低频屏蔽效能、高频谐振抑制等作用;非屏蔽电缆依托金属管道埋地形成低阻抗泄放路径。室内外接地网严格分设,室外采用240mm<sup>2</sup>裸铜绞线埋深0.8m,接地电阻  $< 0.2\Omega$ ,室内水平极间距  $\geq 5\text{m}$ ,避免发生电位耦合。接地线敷设间距按方向精细化控制,全面提高电气连续性。完工后检测

接地线与屏蔽层间绝缘电阻 $>1\text{M}\Omega$ ,防止意外短接,有利于保障屏蔽完整性。

接地导体最小截面计算公式:

$$S_g = \frac{I_g \sqrt{t_g}}{c} \quad (4)$$

其中: $S_g$ 为接地导体最小截面积( $\text{mm}^2$ ),决定热稳定承载能力; $I_g$ 表示流过接地导体的最大接地故障不对称电流有效值(A),由系统短路容量决定; $t_g$ 为接地故障等效持续时间(s),通常取继电保护动作时间,本项目按照0.5s计; $c$ 为接地导体热稳定系数,铜导体取 $245(\text{A} \cdot \text{s}^{1/2}/\text{mm}^2)$ ,反映材料耐热特性。

该公式依据IEC 60364标准,确保接地导体在故障电流热效应下不熔断,维持接地系统完整性,并结合现场实测低接地电阻和高绝缘隔离,有效消除地电位差干扰源,为自抗扰控制提供稳定参考零电位,大幅度提高热控系统在复杂电磁环境下的运行可靠性<sup>[4]</sup>。

### 2.3.2 平衡抑制技术

本项目采用双绞线作为核心传输介质,利用其对称绞合结构,自抵消电磁干扰,不同绞合比例与线径组合对应差异化噪声衰减能力,141:1超密绞合(直径25.4mm)可达到43dB衰减,显著优于常规14:1结构(23dB)。针对电厂高海拔雷击频发区,优先选用高绞合比线缆,大幅度提高共模干扰抑制水平;在负荷快速波动区域,则布设智能绞距调节装置,依据电流变化率动态优化绞合密度,保证差模干扰实时衰减率不低于95%<sup>[5]</sup>。

该技术打破了传统经验选型的局限性,建立导线几何参数、噪声衰减度的量化关联模型,形成强干扰区、动态调节区、普通区域选型准则<sup>[6]</sup>。同时,将物理层的平衡抑制、自抗扰控制器的扩张状态观测器(ESO)进行融合,构建“前级抵消—后级补偿”双闭环抗扰架构平衡抑制不仅提高信号完整性,更为自抗扰算法提供高信噪比输入,大幅度增强系统在复杂电磁环境下的可靠性<sup>[7]</sup>。

## 3 结语

本研究通过构建集算法、硬件、接地为一体的自抗扰控制体系,有效解决了复杂电力系统中多样化干扰问题。通过扩张状态观测器,高精度重构未知扰动,分级浪涌保护、复合屏蔽、智能隔离为算法提供高信噪比输入,接地线平衡设计消除共模噪声源。实证表明,该集成方案显著提高系统在雷击、负荷突变等强扰动下的稳定性,为高可靠性热控系统提供了可行性的抗干扰新模式。

### [参考文献]

[1]吴向阳,何梨梨,李杨,等.弱电网下电网阻抗与PLL耦合效应对并网MMC系统稳定性的影响分析[J].电工技术学报,2025,40(4):1236-1253.

[2]黄浪尘,王炜.电网频率控制系统的时滞相关稳定性分析[J].湖南工业大学学报,2024,38(6):29-35.

[3]刘瑞松.主从控制系统中的直流微电网稳定性分析[J].集成电路应用,2024,41(1):310-311.

[4]潘艳,赵伟,徐鹏,等.考虑动态电压稳定性的新能源受端电网规划模型[J].太阳能学报,2024,45(10):242-248.

[5]宋沅桦.含微燃机的生光风储孤岛微电网控制策略及控制系统开发[D].吉林:东北电力大学,2024.

[6]阚鹏.基于混合势理论的配电网中SOP的大信号稳定性分析研究[D].贵州:贵州大学,2024.

[7]陈泽凡.电网调度控制系统数据库间同步故障分析及对策[J].通信电源技术,2024,41(2):231-233.

### 作者简介:

李琛(1985—),男,汉族,山东省德州市人,国网山东省电力公司德州供电公司,研究生,正高级工程师,计算机科学与技术。

杨路勇(1995—),男,汉族,山东省德州市人,国网山东省电力公司禹城市供电公司,研究生,中级工程师,电气工程。