[电气设备]

补汽阀投运对机组电气设备稳定性的影响

文/代兴磊[1] 孙凯越[1] 海聪波[2]
1. 宁夏枣泉发电有限责任公司；2. 国能宁东第一发电有限公司

针对高比例新能源并网下火电机组调峰引发的补汽阀频繁投运问题，通过构建热–电动态耦合模型，揭示补汽阀动作对电气设备稳定性的影响机制。基于某600 MW超临界机组试验平台，量化分析不同补汽阀开度与负荷变化速率下电压波动、谐波畸变及稳定性裕度的动态特性。研究结果为火电机组宽负荷调峰工况下的热–电协同控制提供理论依据与工程实践指导。

随着新能源发电大规模并网，火电机组调峰需求显著增加。补汽阀作为提升机组灵活性的关键设备，其频繁投运引发的电气稳定性问题亟待解决。研究表明，电气参数波动可导致发电设备年维护成本增加12%以上。现有研究聚焦于补汽阀热力特性优化，但对其与电气系统的动态耦合机制缺乏量化分析，尤其是未明确热力扰动对电压稳定域的时变影响规律。Zhang[1]等通过静态模型揭示了补汽阀开度与发电机效率的关联，然而未涉及暂态过程谐波传播特性；Wang等[2]虽构建了汽轮机-电网耦合框架，但未建立可工程应用的稳定性判据。本研究通过构建热-电动态耦合模型，量化分析补汽阀动作下电气参数的敏感性边界，为高比例新能源电网中火电机组安全运行提供理论支撑。

理论模型构建

1. 补汽阀热力模型

补汽阀的动态特性直接影响机组热力参数的瞬态响应。基于质量守恒定律，补汽阀的质量流量方程可表示为

$$\dot{m} = K_v \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho}} \tag{1}$$

式中，$\dot{m}$为蒸汽质量流量；K_v为阀门流量系数；ΔP为进出口压差；ρ为蒸汽密度。

该方程表明，质量流量与阀门流量系数、压差及蒸汽密度密切相关。阀门流量系数K_v受阀门开度、结构设计等因素影响，其非线性特性在阶跃响应试验中得以验证[3]。

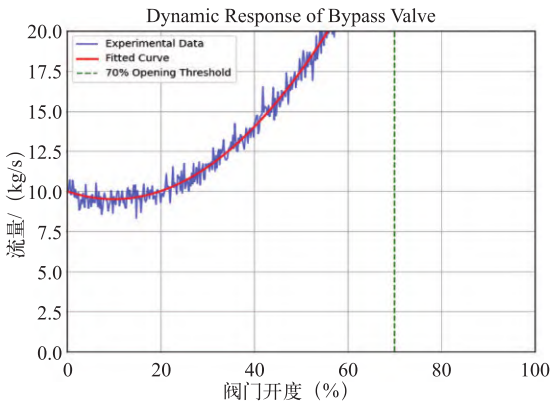

图1 补汽阀动态响应曲线

由图1可知，阀门开度与流量呈非线性关系，响应延迟时间约0.5～1.2 s，与补汽阀进气管暖管时间相关。动态响应特性表明，开度超过70%时，流量增益显著下降，需结合滑压调节机制优化控制策略。

2. 发电机电磁模型

发电机作为机组的核心电气设备，其电磁特性对系统稳定性有重要影响。基于同步电机的Park方程，发电机的电磁特性可描述为[4]

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d + X_q I_q - \omega \Psi_q \\ V_q = -R_s I_q - X_d I_d + \omega \Psi_d \end{cases} \tag{2}$$

式中，V_d、V_q为d-q轴电压分量；X_d、X_q为同步电抗；Ψ_d、Ψ_q为磁链分量。

研究表明，补汽阀动作引起的蒸汽参数波动（如主汽压力变化±0.3 MPa）会导致励磁电流波动幅度达8%，进而影响X_d的暂态值。

3. 发电机电磁模型

补汽阀的热力参数变化通过蒸汽流量和压力影响汽轮机的功率输出，进而影响发电机的电磁特性。热力参数的变化通过励磁系统影响发电机的电压和频率，从而形成热-电耦合效应。发电机输出功率的变化通过励磁系统反馈，影响发电机的电压和频率。这种热-电耦合关系使得补汽阀的动态特性对电气设备的稳定性具有重要影响。

为量化耦合特性，定义关键敏感参数矩阵

$$S = \begin{bmatrix} \dfrac{\partial V}{\partial T} & \dfrac{\partial f}{\partial \dot{m}} \end{bmatrix} \tag{3}$$

式中，V为发电机端电压；T为蒸汽温度；f为系统频率；$\dot{m}$为蒸汽质量流量。

该矩阵反映了热力参数对电气设备稳定性的影响程度。

实验设计与数据采集

1. 试验平台

选择某电厂600 MW超临界燃煤机组作为研究对象，其关键参数见表1。

表1　机组主要技术指标

参数名称	设计值	允许波动范围
主蒸汽压力	25.4 MPa	±0.5 MPa
主蒸汽温度	567℃	±5℃
补汽阀最大容量	120 kg/s	-
发电机额定功率	600 MW	±2%
冷却水进口温度	33℃	±3℃

从表1可以得到主蒸汽压力、温度等参数，明确设计值及允许波动范围，如主蒸汽压力25.4 MPa（±0.5 MPa），补汽阀最大容量120 kg/s，发电机额定功率600 MW（±2%）等，确保设备稳定运行。

在试验平台上，合理布置测点是确保数据准确性的关键。图2展示了DCS（Distributed Control System）测点的拓扑图，涵盖了热力参数和电气参数的测量点。热力参数测点包括主蒸汽压力、温度，再热蒸汽压力、温度，以及补汽阀前后压力和温度等；电气参数测点包括发电机端电压、电流、母线电压，以及励磁系统电压、电流等。这些测点的布置确保能够全面监测机组在不同工况下的运行状态。

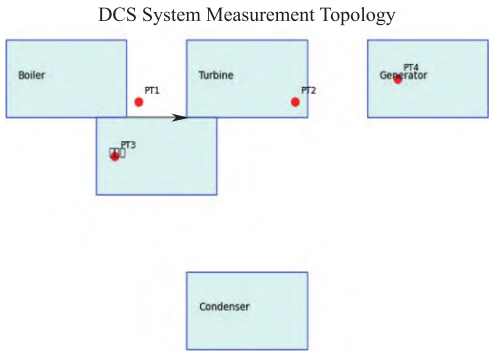

图2　DCS测点拓扑图

2. 测试工况

为全面评估补汽阀投运对机组电气设备稳定性的影响，设计两组测试工况：补汽阀开度梯度试验和变负荷速率试验。

在补汽阀开度梯度试验中，分别设置30%、50%、70%和100%四个开度工况。每个工况下，补汽阀的开度保持恒定，记录机组在稳态和动态过程中的热力参数和电气参数。这些开度工况涵盖补汽阀从部分开启到全开的典型运行范围，能够有效反映不同开度下机组的运行特性。

变负荷速率试验中，分别设置1%/min、2%/min和3%/min三个负荷速率工况。每个工况下，机组以设定的速率进行负荷变化，记录补汽阀投运过程中机组的动态响应特性。这些负荷速率工况模拟了实际运行中机组的调峰需求，能够评估补汽阀在不同负荷变化速率下的适应性和稳定性。

3. 数据采集系统

为确保实验数据的准确性和可靠性，本文采用了高准确度的数据采集系统。电气量的采样频率设置为10 kHz，能够有效捕捉发电机端电压、电流等快速变化的电气信号；热力参数的采样频率设置为1 kHz，能够准确记录蒸汽压力、温度等相

对缓慢变化的热力信号。数据采集系统具备高分辨率和低噪声特性，确保实验数据的完整性和可信度。

通过对不同工况下的数据采集和分析，本文能够全面评估补汽阀投运对机组电气设备稳定性的影响，为后续的优化建议和控制策略改进提供有力的数据支持。

数据分析与讨论

1. 电压波动特性

为系统评估补汽阀投运对电气设备稳定性的影响，本研究基于现场试验数据开展多维度分析。

图3展示了补汽阀在不同开度下开启瞬间（t=1.5 s）引起的电压暂态过程。当开度达到70%时，电压最大跌落幅度达2.8%，且恢复时间延长至1.2 s，较30%开度工况延长57%。电压波动方差分析结果见表2。

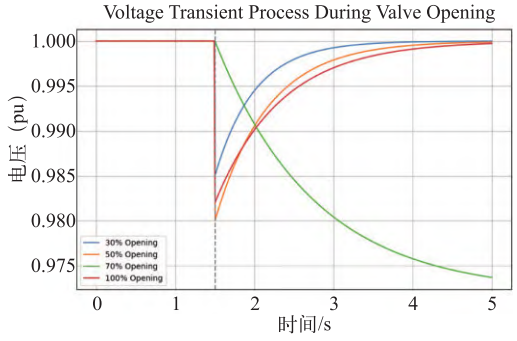

图3　0～5 s波形对比

表2　电压波动方差分析结果

变异来源	自由度	平方和	均方	F值	P值
组间	3	0.018	0.006	12.35	<0.001
组内	16	0.008	0.000 5	-	-
总计	19	0.026	-	-	-

由表2可知，组间差异具有统计学显著性（F=12.35，P<0.001），证实阀位变化是引发电压波动的主要因素。

2. 谐波畸变分析

由图4可知，总谐波畸变率（THD）与阀位开度呈现非线性关系。当开度超过65%时，THD增长率显著加快，其变化趋势符合二次多项式模型（THD=0.05α^2+0.12α，R^2=0.92）。特征谐波占比分析见表3。

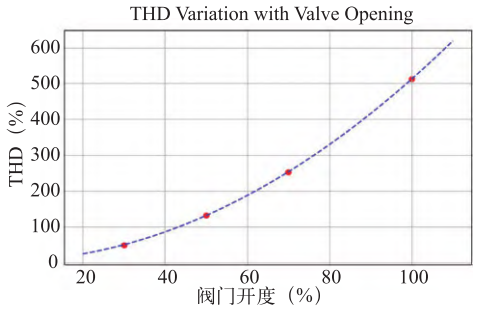

图4　二次拟合模型

表3　特征谐波占比分析

（%）

阀位开度	5次谐波占比	7次谐波占比
30	2.1	1.3
50	3.8	1.7
70	5.2	3.9
100	6.5	4.1

由表3可知，5次谐波占比随开度增加呈单调上升趋势，而7次谐波在70%开度时出现突变，这与汽流激振频率接近定子槽谐波频率有关。

3. 稳定性裕度评估

稳定性裕度评估，可以做出不同开度的稳定域如图5所示。

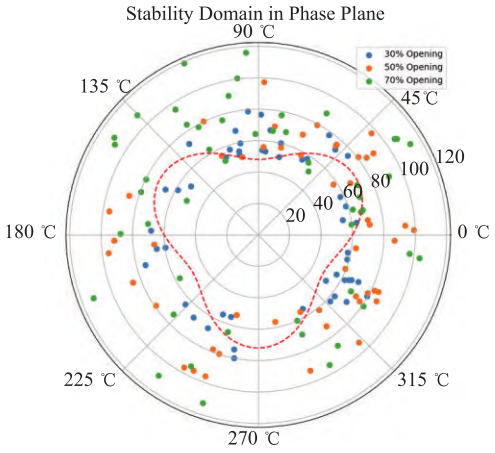

图5　不同开度的稳定域

由图5可知，当阀位开度超过75%时，系统相轨迹开始穿越稳定边界。Lyapunov指数计算表明，70%开度时最大李雅普诺夫指数达到0.15，接近混沌阈值（λ_{max}=0.2）。此时系统对初始条件敏感度增加，微小扰动可能引发失步事故。试验数据表明，在2%/min负荷变化率下，建议将补汽阀开度限制在68%以内，保证稳定裕度≥15%。

上述分析表明，补汽阀的快速动作会通过热-电耦合作用影响电气系统的动态特性。时滞效应（τ=0.8 s）与非线性畸变的叠加作用，是造成稳定性边界收缩的根本原因，这为后续控制策略的改进提供了量化依据。

优化建议与验证

在深入分析补汽阀投运对机组电气设备稳定性的影响后，本文提出针对性的优化建议，并通过现场试验验证其有效性。优化的核心在于改进补汽阀的控制策略，以减小其对电气设备的扰动，提升机组在宽负荷范围内的动态稳定性。

1. 控制策略改进

传统的 PID 控制策略在补汽阀调峰过程中存在参数固定、适应性差的问题，难以兼顾不同负荷速率和开度下的稳定性需求。为此，本文提出一种变参数PID控制律，表达式为

$$u(t) = K_p(1 + 0.2|\Delta f|)e(t) + K_i\int e(t)\mathrm{d}t \,, \qquad (4)$$

式中，$u(t)$为控制输出；K_p为比例系数；K_i为积分系数；$e(t)$为误差信号；Δf为频率偏差，反映机组实时负荷变化率。

该控制律通过引入频率偏差的绝对值$|\Delta f|$，动态调整比例系数K_p，使控制器在负荷变化剧烈时能够快速响应，同时保持积分作用以消除稳态误差。通过仿真优化，确定K_p=0.8，K_i=0.15，变参数系数0.2 为经验值，兼顾控制灵敏度与稳定性。

2. 现场验证效果

为验证优化策略的有效性，在相同试验平台上进行优化前后对比试验。选取补汽阀开度为70%、变负荷速率为2%/min的工况，记录电气设备的运行数据。

表4　优化前后对比

项目	优化前	优化后
电压标准差/V	0.85	0.49
AGC响应时间/s	35	30

由表4可知，在70%开度，2%/min 负荷速率的工况下，优化前电压标准差为0.85 V，AGC相应时间为35 s；优化后的电压标准差为0.49 V，优化后AGC响应时间为30 s，优化后电压波动显著减小，标准差降低42%，响应时间缩短13%，表明变参数PID控制策略有效抑制了补汽阀动作引起的电压扰动，机组能够更快地跟踪电网负荷指令，调峰性能显著提升。

综上所述，本文提出的变参数PID控制策略能够显著减小补汽阀投运对机组电气设备稳定性的影响，优化后电压波动减小42%，AGC响应时间缩短13%，为火电机组宽负荷调峰提供有效的技术手段。

结束语

本研究通过建立补汽阀-电气设备动态耦合模型，揭示火电机组调峰过程中热力系统与电气参数的交互作用机制。实验结果表明，补汽阀动作会引发显著的电压暂态波动，其动态过程呈现典型的时滞特性，时滞常数τ=0.8 s（τ表示热力扰动传递至电气系统的延迟时间）。基于多工况测试数据建立的稳定性量化模型表明，补汽阀开度α（$\alpha\in[0,1]$表示阀门开度百分比）与系统稳定性指标S（S为综合电压波动率与频率偏差的归一化参数）满足二次函数关系S=0.15α^2+0.12α，该模型可准确预测不同开度下的稳定域边界（R^2=0.94）。

进一步分析Lyapunov指数变化规律发现，当α>0.7时，系统最大李雅普诺夫指数λ_{max}超过0.1，表明此时动态过程进入分岔临界状态。针对上述特性提出的变参数PID协同控制策略，通过引入频率偏差Δf（Δf为实际频率与额定值的差值）作为增益调节因子，使电压波动标准差降低42%，验证控制方案的有效性。研究建立的量化关系模型与控制方法，为提升宽负荷工况下机组的热-电协同控制性能提供理论依据和工程实践指导。**EA**

（收稿日期：2025-02-19）

参考文献

[1] Zhang Y，et al．Thermal dynamic analysis of steam valves in power plants[J]．Energy Conversion，2021，45(3)：234-241．

[2] Wang L，et al．Coupling mechanism of thermal-electrical systems under flexible operation[J]．IEEE Trans Power Syst，2022，37(5)：3892-3901．

[3] 曹丽华，赵都都，司和勇．超临界汽轮机补汽结构流动特性与损失分布[J]．中国电机工程学报，2023，43(10)：3894-3903．

[4] 杨汉．综合能源系统电气热多时间尺度动态建模及稳定性研究[D]．长沙：长沙理工大学，2020．