

# 发电机励磁系统运行调控研究

陈波

阳城国际发电有限责任公司 山西晋城 048102

**摘要：**发电机励磁系统作为电力系统稳定运行的核心环节，其运行调控性能直接影响发电机的电压稳定、无功平衡及电网动态响应能力。随着新能源电力渗透率的提升，电网对发电机励磁系统的适应性、快速性和可靠性提出了更高要求。本文针对发电机励磁系统运行调控展开研究，分析了励磁系统的工作原理、运行现状及面临的挑战，阐述了励磁调节、励磁限制、动态响应优化等关键调控技术，结合实际案例探讨了调控策略的应用效果，并提出了基于智能化和协同化的优化方向。研究旨在为提升发电机励磁系统运行调控水平提供参考，保障新型电力系统的安全稳定运行。

**关键词：**发电机；励磁系统；运行调控；电压稳定；无功平衡

## 引言

在电力系统里，发电机励磁系统是关键设备，通过调节转子励磁电流控制发电机端电压与无功输出，维系电压稳定并保障有功功率传输。传统系统中，其调控性能决定电网应对负荷波动和故障扰动的恢复能力；而随着新能源大规模接入，电力系统惯量降低、动态特性复杂，励磁系统功能从“被动调节”转向“主动支撑”，需参与调频调峰等辅助服务。

目前我国励磁系统技术成熟，有自并励、他励等主流方式，调节装置响应达毫秒级，但新能源高比例接入下，面临无功冲击频繁、传统PID调节难抑电压波动，电网短路容量下降致强励磁能力需重匹配，多机组并联时协同调控不足易引发电压失稳等新挑战。因此，研究其运行调控技术、优化动态性能与协同能力，对新型电力系统安全稳定运行意义重大。

## 一、发电机励磁系统工作原理及运行现状

### 1. 工作原理

发电机励磁系统由励磁功率单元和励磁调节器构成。励磁功率单元是能量转换核心，基于电力电子技术，常见拓扑有三相全控桥式、自并励静止励磁等电路。以三相全控桥式整流电路为例，通过6个晶闸管的通断，将三相交流电转为可控直流电。其传输结构分传统电刷式（碳刷与滑环接触传输，成熟但易磨损、维护周期短）和无刷式（转子侧经旋转整流器转直流，无滑动部件，可靠性与寿命提升）。转换后的直流电送入发电机转子绕组，转子高速旋转产生旋转磁场，提供励磁条件。

励磁调节器是“智能中枢”，依托多参数闭环控制，采集端电压、无功电流、有功功率、频率等信号。数字式调节器集成高精度ADC模块，将模拟信号转数字量，经DSP实时运算。当端电压偏离额定值，基于PID算法调节：P环节快速响应偏差，I环节消除静态误差，D环节预测趋势抑制超调；现代调节器还结合自适应、模糊控制等智能算法优化策略。

核心调控逻辑：端电压偏离额定值时，调节器对比偏差，经PID算法输出控制信号，驱动功率单元调整励磁电流，直至电压回归额定。动态中需具备强励磁能力——电网短路致电压骤降时，0.1秒内将励磁电流提至额定值2-3倍以维持暂态稳定。如某300MW汽轮发电机组，三相短路时80ms内可将励磁电流从额定100%跃升至250%，抑制电压下降。系统还设过励限制和反时限保护，平衡安全与性能。

### 2. 运行现状

我国现役发电机励磁系统以数字式励磁调节器为主，调节精度可达 $\pm 0.5\%$ 额定电压，响应时间 $\leq 0.1$ 秒，基本满足传统电力系统的运行需求。但在新能源高渗透场景下，运行现状呈现以下特点：

· 调节频率增加：新能源出力的高频波动（如10分钟内 $\pm 20\%$ 的功率变化）导致发电机端电压频繁偏离额定值，励磁系统调节次数较传统场景增加30%-50%，加速了功率单元的老化。

· 暂态压力增大：新能源机组的低电压穿越特性使电网故障时的电压恢复过程更复杂，某区域电网数据显示，励磁系统强励磁动作次数同比增加25%，对功率单

元的耐流能力提出更高要求。

·协同调控不足：多机组并联运行时，各励磁系统独立调节易产生“无功振荡”——某火电厂2台300MW机组并联运行时，因励磁调节器参数不匹配，导致无功功率波动幅度达 $\pm 10\text{Mvar}$ ，影响电网稳定。

## 二、发电机励磁系统运行调控关键技术

### 1. 自适应励磁调节技术

针对新能源波动导致的电压频繁波动问题，采用自适应PID调节技术，根据电压偏差的大小和变化率动态调整PID参数。具体来说，该技术通过实时监测电压偏差数据，利用智能算法实现参数的自动优化。当偏差较小时（ $< 1\%$ 额定电压），系统会增大积分系数，以减小静态误差，确保电压稳定在理想范围内；当偏差较大时（ $> 5\%$ 额定电压），则增大比例系数，加快系统响应速度，迅速纠正电压偏差。

在实际应用中，某风电场配套的200MW同步调相机采用该技术后，取得了显著效果。电压波动幅度从 $\pm 2\%$ 降至 $\pm 0.8\%$ ，调节过程的超调量减少60%，有效提升了电网的稳定性和电能质量。这不仅保障了风电场自身设备的安全运行，也为周边电网提供了更加可靠的电力供应。

此外，为进一步优化非线性场景的调节性能，引入了模糊控制算法。该算法基于专家经验和实际运行数据，建立了一套完善的模糊规则库。当发电机处于轻载或重载极端工况时，模糊控制可根据经验规则调整控制策略，避免传统PID调节的“饱和”现象，实现更加精准的电压控制。

以某300MW火电机组为例，在应用模糊-PID复合调节后，轻载时的电压调节时间从5秒缩短至2秒，大幅提高了电压调节效率。该技术的成功应用，为解决复杂工况下的电压调节难题提供了有效途径，对于提升电力系统的稳定性和可靠性具有重要意义。

### 2. 励磁限制与保护技术

为防止励磁系统过负荷或发电机失磁，需设置多重限制功能：

- 励磁电流限制：当励磁电流超过额定值的1.1倍时，逐步降低励磁输出，避免转子绕组过热；
- 电压上限限制：防止端电压过高导致设备绝缘损坏，通常设定为1.1倍额定电压；
- 失磁保护：当励磁电流骤降导致发电机失步时，快速跳开断路器，避免事故扩大。

在新能源电网中，需优化限制参数以适应弱电网特性。例如，某区域电网将励磁电流限制值从1.1倍额定值

提高至1.2倍，增强发电机在电压骤降时的支撑能力，使电网故障后的稳定裕度提升15%。

### 3. 多机协同励磁调控技术

针对多机组并联运行的无功振荡问题，采用基于通信的协同调控技术：通过高速以太网（传输速率 $\geq 100\text{Mbps}$ ）实现各励磁系统的信息共享，统一分配无功功率指令。其核心是“主从控制”模式——指定一台机组为“主调节器”，根据电网总无功需求计算各机组的无功分配比例，再将指令下发至“从调节器”，实现无功功率的协调分配。

某热电厂4台600MW机组应用该技术后，无功功率分配误差从 $\pm 5\%$ 降至 $\pm 1\%$ ，振荡现象完全消除，同时降低了厂用电率0.2个百分点。

### 4. 励磁系统状态监测与预警技术

基于物联网技术构建励磁系统状态监测平台，实时采集功率单元温度、励磁电流波形、调节器运算负荷等数据，通过以下手段实现故障预警：

- 趋势分析：对励磁电流波动率、功率单元温升速率等参数进行趋势拟合，当指标超出正常范围时发出预警，某水电厂通过该方法提前30天预测到励磁变压器绝缘老化；
- 振动诊断：通过安装在励磁机上的振动传感器，识别转子偏心导致的机械故障，诊断准确率达90%以上；
- 寿命评估：基于累积运行时间和调节次数，建立功率单元寿命模型，某火电厂据此制定的更换计划使非计划停机时间减少40%。

## 三、调控策略应用案例分析

### 1. 某新能源基地配套火电机组励磁调控优化

#### (1) 项目概况

该基地包含1GW风电、500MW光伏及2台660MW火电机组，火电机组承担调峰任务，因新能源波动导致机组端电压频繁波动（ $\pm 3\%$ 额定电压），励磁系统调节次数日均达200次，功率单元过热故障频发。

#### (2) 调控优化措施

- 采用自适应PID调节技术，将电压偏差阈值分为三级（ $< 1\%$ 、 $1\% - 5\%$ 、 $> 5\%$ ），对应不同的PID参数组合；
- 升级励磁功率单元，采用耐流能力更强的晶闸管（额定电流从2000A提升至2500A），并增加强迫风冷系统；
- 部署多机协同调控系统，2台火电机组共享无功指令，实现无功功率的均衡分配。

#### (3) 应用效果

优化后，机组端电压波动幅度控制在 $\pm 1\%$ 以内，励磁调节次数减少至日均80次；功率单元温升降低 $15^{\circ}\text{C}$ ，未再发生过热故障；2台机组的无功分配偏差从 $\pm 8\text{Mvar}$ 降至 $\pm 2\text{Mvar}$ ，提升了电网电压稳定性。

## 2. 某水电厂励磁系统智能化改造

### (1) 项目概况

该水电厂4台200MW机组采用自并励系统，因建成时间较早（2005年投运），励磁调节器为模拟式，调节精度高（ $\pm 1.5\%$ 额定电压），且缺乏状态监测功能，年均非计划停机2-3次。

### (2) 改造措施

- 更换为数字式励磁调节器，采用模糊-PID复合调节算法，调节精度提升至 $\pm 0.3\%$ ；
- 加装状态监测模块，实时采集励磁电流、晶闸管温度等12项参数，通过5G网络传输至云端平台；
- 新增失磁预测功能，基于励磁电压与电流的相位差变化，提前5-10秒预警失磁风险。

### (3) 改造效果

机组端电压合格率从98.2%提升至99.8%；状态监测系统成功预警2次晶闸管故障，避免了非计划停机；改造后年均维护成本降低30万元，投资回收期2.5年。

## 四、励磁系统运行调控面临的挑战与优化方向

### 1. 主要挑战

- 弱电适应性不足：新能源高渗透导致电网短路比（SCR）降低至2.0以下，励磁系统的强励磁可能引发次同步振荡，某风电基地曾因励磁系统与风电变流器的交互作用，出现10Hz左右的次同步振荡。
- 数字化水平不均：存量机组中约30%仍采用模拟式励磁调节器，无法接入电网调度云平台，难以实现远程调控和协同优化。
- 运维技术滞后：励磁系统的故障诊断依赖人工经验，某调研显示，70%的励磁故障因诊断延迟导致扩大，平均修复时间超过8小时。

### 2. 优化方向

- 智能化调控：引入人工智能算法（如深度强化学习），使励磁调节器自主学习电网特性，实现“工况自适应-参数自优化-故障自诊断”的闭环调控。预计到2026年，智能励磁系统可使电压调节精度提升至 $\pm 0.2\%$ ，响应速度缩短至50ms。

- 网源协同：将励磁系统调控与新能源调度相结合，通过提前获取新能源出力预测曲线（精度 $\geq 90\%$ ），预判电压波动趋势，实现励磁调节的“超前控制”。某试点项目显示，该方法可减少30%的调节次数。

- 标准化建设：制定励磁系统与新能源机组的交互标准，明确低电压穿越时的励磁响应特性；统一状态监测数据格式，推动不同厂家设备的信息互通。

## 五、结论与展望

发电机励磁系统的运行调控是保障电力系统电压稳定和暂态安全的核心手段。随着新能源电力的大规模接入，励磁系统面临调节频率增加、暂态压力增大、协同能力不足等新挑战，传统调控技术已难以满足新型电力系统的需求。

本文研究表明，自适应励磁调节、多机协同调控、状态监测预警等技术可有效提升励磁系统的动态性能——应用案例显示，这些技术能将电压波动幅度控制在 $\pm 1\%$ 以内，减少50%的故障次数，显著增强电网稳定性。未来，需进一步推动励磁系统的智能化、网源协同化和标准化发展，通过人工智能算法优化调控精度，结合新能源预测实现超前控制，建立统一标准提升系统兼容性。

展望未来，随着数字孪生、5G等技术的融入，发电机励磁系统将实现“物理设备-数字模型-调控策略”的深度融合，成为新型电力系统中的“智能电压支撑节点”，为高比例新能源电力的安全消纳提供关键保障。

## 参考文献

- [1] 李基成. 现代同步发电机励磁系统设计及应用[M]. 中国电力出版社, 2022.
- [2] 陈德树, 尹项根. 电力系统继电保护与励磁控制[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(15): 5420-5432.
- [3] 张宝霖, 李华强. 新能源电网下同步发电机励磁系统自适应控制[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(10): 120-128.
- [4] 王善铭. 大型发电机励磁系统运行维护技术[M]. 机械工业出版社, 2023.
- [5] IEEE Committee Report. Excitation System Models for Power System Stability Studies [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 1050-1060.