

# 发电快速频率响应研究

杨 东

辽宁龙源新能源发展有限公司 辽宁 沈阳 110000

**摘要：**随着新能源大规模并网与电力系统向高比例可再生能源转型，电网频率稳定性面临前所未有的挑战。本文围绕发电快速频率响应展开研究。阐述其基本概念与响应原理，剖析面临的响应速度与调节能力不足、协调控制困难、经济性与可靠性平衡以及标准规范不完善等问题。提出优化电源结构与布局、改进调速系统与功率调节装置、加强通信与控制系统建设、推动储能技术应用、完善标准规范、加强国际合作交流等提升策略，为发电快速频率响应的发展提供理论与实践参考，助力电力系统稳定运行。

**关键词：**发电；快速频率；响应研究

引言：在电力系统运行中，频率稳定是确保电力可靠供应的关键要素。发电快速频率响应对于维持电力系统频率稳定至关重要。然而，随着电力系统规模的不断扩大和新能源的大量接入，发电快速频率响应面临诸多挑战。本文旨在深入研究发电快速频率响应，先明确其基本概念与原理，再分析面临的问题，进而提出相应的提升策略，为电力系统实现高效、稳定运行提供有力支持，推动电力行业的可持续发展。

## 1 发电快速频率响应的基本概念与原理

### 1.1 基本概念

发电快速频率响应是电力系统稳定运行的关键技术保障，指的是当电力系统频率因负荷波动或发电设备故障等原因发生变化时，发电机组能够迅速感知频率偏差，并快速调整自身输出功率，以维持系统频率稳定在规定的范围内的能力。在电力系统中，电能的生产与消耗需实时平衡，频率作为衡量这种平衡的关键指标，其稳定与否直接影响电力系统的安全可靠运行。快速频率响应涵盖响应速度和调节精度两个核心要素，响应速度体现发电机组从频率变化信号出现到开始调整功率的及时性，调节精度则关乎功率调整量与系统实际需求的契合度。具备良好快速频率响应能力的发电机组，能够在系统频率出现微小波动时就快速介入，通过精准的功率调节，确保电力系统频率稳定，保障各类用电设备的正常运行和电力系统的稳定供电。

### 1.2 响应原理

发电快速频率响应的原理基于电力系统的动态平衡机制与发电机组的自动化控制技术。当系统频率降低时，说明系统发电功率小于负荷功率，此时发电机组的调速系统通过频率测量装置检测到频率下降，迅速触发控制指令，增加原动机（如汽轮机、水轮机）的进汽量

或进水量，进而提高原动机的机械功率输出，带动发电机增加电磁功率，使输出电能增加，逐步恢复系统功率平衡，抬升频率。反之，当系统频率升高，表明发电功率大于负荷功率，调速系统会减少原动机的动力输入，降低发电机输出功率，使频率回落至正常水平。此外，现代电力系统还借助自动发电控制（AGC）系统，依据全网频率偏差和各机组运行状态，通过通信网络向各发电机组发送精确的功率调节指令，实现多机组协同调节，确保电力系统频率稳定在标准范围内，保障电力系统安全、稳定、高效运行<sup>[1]</sup>。

## 2 发电快速频率响应面临的问题

### 2.1 响应速度与调节能力不足

随着电力系统中新能源大规模接入，其出力的间歇性与波动性使系统频率调节难度剧增。传统发电机组受机械惯性、调速系统限制，从接收频率变化信号到显著调整功率，耗时较长，难以快速应对突发频率波动。如早期并网风机，监控系统频率响应时间长，无法契合国家及行业标准。新能源发电方面，风电依赖风速、光伏依赖光照，其功率输出不能像常规电源一样灵活调节，在频率突变时调节能力有限。且部分机组在高负荷运行时，功率已接近上限，调节裕度小，当频率变化需要增减功率时，无法提供足够调节量，导致系统频率稳定面临挑战。

### 2.2 协调控制困难

电力系统内各类电源特性差异大，火电机组调节相对缓慢但功率稳定，水电可快速启停与调节，新能源随机性强，这使得协调控制复杂。不同类型发电机组响应速度、调节范围和控制逻辑不同，在频率变化时难以协同动作。在多区域互联电网中，联络线功率易受负荷及机组出力动态变化影响而大幅波动，区域间负荷变化不

同步，一侧负荷陡升时，另一侧可能调节能力不足，系统响应缺乏“爆发力”，难以快速满足负荷增长需求，导致联络线功率调控困难，影响系统频率和联络线功率稳定。

### 2.3 经济性与可靠性平衡问题

提升发电快速频率响应性能，需在设备改造、技术升级等方面投入大量资金。例如为增强新能源机组调频能力，需安装额外快速频率响应设备、优化控制系统，但这增加了发电成本。在保障可靠性过程中，提高机组备用容量虽可提升频率稳定性，却使发电设备利用率降低，浪费资源，增加发电成本。若过于注重经济性，削减备用容量、减少设备维护投入，又会使系统在面对频率大幅波动时可靠性降低，易引发停电事故等严重后果。因此，如何在提升发电快速频率响应可靠性的同时，合理控制成本，实现经济性与可靠性的平衡，是亟待解决的难题。

### 2.4 标准与规范不完善

目前，发电快速频率响应相关标准与规范尚存在诸多空白与不足。在响应指标方面，不同地区、不同类型电源的快速频率响应具体要求缺乏统一、细致标准，导致各发电主体在实施过程中无所适从，难以精准衡量自身响应性能是否达标。对于参与快速频率响应的设备技术标准，也不够清晰明确，使得设备选型、安装调试缺乏有效指导，影响系统整体响应效果。在考核机制上，现有规范对发电主体未按要求提供快速频率响应服务的惩罚措施不明确，激励机制也不完善，无法充分调动发电企业提升快速频率响应能力的积极性，不利于电力系统频率稳定保障工作的长期有效开展。

### 2.5 加强国际合作与交流面临的问题

加强国际合作与交流存在技术壁垒、文化差异与利益分歧问题。技术壁垒方面，发达国家对核心技术严格保密，限制技术转让，我国在引进先进发电快速频率响应技术时面临诸多障碍，难以获取关键技术与核心知识产权。文化差异导致合作过程中沟通效率低下，不同国家在技术研发理念、项目管理模式、商业习惯等方面存在差异，增加了合作项目的管理难度与决策成本。利益分歧上，国际合作项目中各方对技术成果归属、收益分配等问题存在争议，不同国家和企业的发展目标与利益诉求不一致，难以达成长期稳定的合作协议，影响国际合作与交流的深度与广度，限制了我国从国际合作中获取先进经验与技术的效果<sup>[2]</sup>。

## 3 提升发电快速频率响应的策略

### 3.1 优化电源结构与布局

优化电源结构与布局是提升发电快速频率响应能力的基础举措。在电源结构方面，需加大具有快速响应能力电源的占比。一方面，适度发展燃气发电，燃气机组启停速度快、调节灵活，能在系统频率波动时迅速调整出力，其从启动到满负荷运行的时间远短于传统燃煤机组，可有效弥补新能源出力的间歇性和波动性。另一方面，合理规划水电开发，充分发挥水电快速启停和功率调节优势，在丰水期利用水电的灵活性承担更多调频任务，枯水期则协调水电与其他电源共同维持频率稳定。在电源布局上，应充分考虑区域负荷特性和能源资源分布。在负荷密集地区，合理配置分布式电源，如分布式光伏、小型燃气轮机等，实现就近供电和快速频率响应，减少长距离输电带来的功率损耗和响应延迟。同时，加强跨区域电网互联，优化联络线布局，提升区域间功率互济能力。通过合理规划电源结构与布局，形成多种电源协同互补的格局，增强电力系统整体的快速频率响应能力。

### 3.2 改进发电机组调速系统与功率调节装置

发电机组调速系统与功率调节装置是实现快速频率响应的核心设备，对其进行改进至关重要。对于传统火电机组，可采用先进的数字电液控制系统（DEH）替代原有的机械液压调速系统，提高调速系统的响应速度和控制精度。新系统能够更快速地感知频率变化信号，并精准控制汽轮机进汽量，缩短从信号接收到功率调整的时间。同时，优化功率调节装置的控制逻辑，引入智能控制算法，如模糊控制、神经网络控制等，使机组在不同工况下都能更合理地调整功率，避免因调节过度或不足影响系统稳定性。对于新能源发电机组，需针对其特性改进功率调节装置。如在风电机组中，优化变桨距控制系统和功率跟踪算法，使其在风速变化时既能保证发电效率，又能快速响应频率调节指令。在光伏电站，研发具备快速功率调节能力的逆变器，实现对光伏输出功率的快速控制。通过对发电机组调速系统与功率调节装置的改进，提升各类机组的快速频率响应性能，保障电力系统频率稳定。

### 3.3 加强通信与控制系统建设

高效的通信与控制系统是实现发电快速频率响应的关键支撑。在通信建设方面，需构建高速、可靠的电力专用通信网络。采用5G、光纤等先进通信技术，提高频率信号、控制指令等数据的传输速度和稳定性，减少通信延迟和数据丢失。同时，建立统一的数据传输标准和协议，确保不同类型发电机组、变电站、控制中心之间的信息能够准确、及时交互。在控制系统建设上，完

善自动发电控制（AGC）系统功能。引入大数据、云计算等技术，提升AGC系统对海量电力数据的处理和分析能力，实现对系统频率变化趋势的精准预测，提前调度发电机组进行功率调整。此外，构建基于多代理系统（MAS）的分布式控制系统，将各发电单元视为独立的智能代理，通过智能代理之间的信息交互和协同决策，实现各机组在频率调节过程中的快速响应和协同动作。加强通信与控制系统建设，能够提高电力系统对频率变化的感知和调控能力，提升发电快速频率响应的整体效能。

### 3.4 推动储能技术应用

储能技术是解决新能源间歇性和提升发电快速频率响应能力的有效手段。在抽水蓄能方面，加快抽水蓄能电站的规划和建设，充分发挥其容量大、寿命长的优势，在系统频率下降时释放电能，频率上升时储存电能，起到“调峰填谷”和稳定频率的作用。同时，加强抽水蓄能电站与新能源电站的联合运行模式研究，实现新能源发电与抽水蓄能的互补协调，提高新能源消纳能力和系统频率稳定性。对于锂电池等电化学储能，需降低其成本、提高安全性和使用寿命。通过技术创新，研发高性能的电池材料和电池管理系统，提升锂电池的充放电效率和循环寿命。在电力系统中合理配置锂电池储能，可实现对系统频率的快速、精准调节，尤其适用于应对高频次、小幅度的频率波动。此外，探索压缩空气储能、飞轮储能等新型储能技术的应用，根据不同场景需求，发挥各类储能技术的优势，构建多类型储能协同的频率调节体系，显著提升发电快速频率响应能力。

### 3.5 完善标准与规范

完善的标准与规范是保障发电快速频率响应工作有序开展的重要依据。首先，制定统一、细致的响应指标标准。明确不同类型电源在快速频率响应中的响应速度、调节精度、调节范围等具体要求，根据电源特性设定差异化指标，使各发电主体能够清晰了解自身调频任务和目标。同时，建立全面的设备技术标准，规范参与快速频率响应设备的选型、性能参数、安装调试等要求，确保设备满足系统调频需求。在考核机制方面，完善奖惩制度。明确发电主体未按要求提供快速频率响应服务的惩罚措施，如经济处罚、减少发电计划等，增强发电企业的责任意识。建立科学合理的激励机制，对在

快速频率响应中表现优异的发电企业给予奖励，如财政补贴、优先发电权等，充分调动发电企业提升快速频率响应能力的积极性。通过完善标准与规范，为发电快速频率响应工作提供明确的指导和约束，促进电力系统频率稳定保障工作的规范化、制度化发展。

### 3.6 加强国际合作与交流

加强国际合作与交流有助于借鉴国际先进经验，推动发电快速频率响应技术发展。积极参与国际电力行业组织和学术交流活动，与国外先进电力企业、科研机构建立合作关系，共同开展发电快速频率响应相关课题研究。例如，学习欧美等国家在新能源调频技术、储能应用、电力市场机制等方面的成功经验，了解其在应对高比例新能源接入带来的频率稳定问题上的解决方案。引进国外先进的发电快速频率响应技术和设备，结合我国电力系统实际情况进行消化吸收和再创新。同时，将我国在特高压输电、大规模新能源并网等领域的技术优势推向国际市场，与其他国家开展技术合作与交流，共同制定发电快速频率响应的国际标准和规范，提升我国在国际电力领域的话语权和影响力。通过加强国际合作与交流，实现技术共享、优势互补，推动我国发电快速频率响应技术和管理水平的全面提升，促进电力行业的可持续发展<sup>[3]</sup>。

### 结束语

发电快速频率响应是保障电力系统稳定运行的核心环节。当前，在新能源大规模并网背景下，其面临诸多挑战，但通过优化电源结构、升级设备技术、完善标准规范等策略，提升空间广阔。未来，随着储能技术突破、智能控制深化应用，以及国际合作的持续推进，发电快速频率响应能力将不断增强，为构建安全可靠、高效低碳的新型电力系统筑牢根基，推动电力行业朝着绿色、智能方向高质量发展。

### 参考文献

- [1]赵佳佳,余志远,路浩.风力发电快速频率响应研究[J].河南科技,2025,52(6):110-116.
- [2]杨长江.装配式建筑对施工质量和效率影响分析研究[J].石子科技,2025(2):136-138.
- [3]刘颖,孙俊博.基于发电效率最优的风力发电场布局研究[J].节能,2021,38(8):174-176.