

[深度调峰机组]

350 MW深度调峰机组一次调频控制策略分析

文/单腾 马智鑫
建投承德热电有限责任公司

在我国目前的电力系统中，由于电网结构的变化，导致负载峰谷差逐渐增大，且用户对电力系统的需求也在日益增长，使得电力系统的频率稳定问题日益突出，大容量火电机组需要根据AGC指令和电网的频率偏差参与电网的调峰调频。在此背景下，概述深度调峰与一次调频控制原理，分析350 MW深度调峰机组一次调频控制的策略，根据技术难点提出解决方案，对具体案例进行分析与比较，探究未来的发展趋势，旨在为相关领域的研究提供一定的参考。

电力系统的稳定性关系到整个电网的运行效率与安全性，对深度调峰机组进行稳定控制已成为一个亟待解决的问题。特别是350 MW的深度调峰机组具备迅速调整功率的能力，可在短期内对电网的调频特性作出反应，并高效地保持了系统的频率稳定性。在高负载时期，采用深度调峰的方式，可以减少电网的负载，防止系统出现频繁的高频振荡，从而保证电力系统的稳定运转。因此，350 MW的深度调峰机组在整个电网中发挥着无可替代的作用，深度调峰机组进行一次调频控制与优化，是保证电网安全、高效和可靠的重要手段。

深度调峰机组概述

深度调峰就是受电网负荷峰谷差的影响，导致各火电厂降出力，发电机组超过基本调峰范围进行调峰的一种运行方式。一般深度调峰的负荷率多为30%~40%。简单说就是指发电机组在规定的出力调整范围内，为了跟踪负荷的峰谷变化而有计划的、按照一定调节速度进行的发电机组出力调整所提供的服务。相较于常规调峰，深度调峰对机组快速启动、负荷调整范围提出了更高的要

求。350 MW深度调峰机组一般具有热效率高、启动速度快等特点，以满足系统快速调节能力的要求。在技术参数上，350 MW深度调峰机组一般采用具有高效燃烧系统及先进控制系统的燃气轮机技术，运行特性表现为响应速度快、负载调节范围宽和热效率高，能在短时间内实现停机与满负荷的切换，在负荷波动较大的情况下仍能保持系统稳定运行。然而，在深度调峰条件下，机组仍面临许多技术难题。由于深度调峰要求机组频繁起停与负荷快速变化，机组各零部件易受热应力作用，磨损老化加速。过快或过低的负荷都会造成燃烧过程的不稳定性，从而影响燃烧效率与排放控制。为应对上述挑战，需采用先进材料与设计方法，优化燃烧控制系统，保证机组在大负荷波动下运行的稳定性与可靠性。

一次调频控制原理

一次调频是指电网的频率一旦偏离额定值时，电网中机组的控制系统就自动地控制机组有功功率的增减，限制电网频率变化，使电网频率维持稳定的自动控制过程。该方法通过检测系统输出频率和

期望频率之间的差异,并根据此差值对系统参数进行调节,使得输出频率能快速而精确地达到预期要求。一次调频控制的基本策略有:PID控制、模糊逻辑控制与模型预测控制等。比例积分微分控制简称PID控制,是一种经典的控制方法,采用比例控制器、积分控制器和微分控制器对系统输出进行调节,从而保证系统的稳定性和快速性;模糊逻辑控制是以模糊集理论为基础,对输入、输出变量进行模糊化处理,设计模糊规则,从而达到控制目的的一种方法。在一次调频过程中,模糊控制能更好地解决复杂非线性系统的控制问题;模型预测控制(Model Predictive Control, MPC)技术根据系统的动态模型,通过对系统未来行为的预测来调整系统参数,以准确控制输出,提高一次调频控制的准确度与鲁棒性,尤其适合于对控制准确度要求较高的应用场景。一次调频控制利用频率响应特性来调节系统的频率变化。在实际应用中,应根据系统特性与需求选择不同的控制策略,以达到准确控制与最优输出,有效提高系统的综合效率^[2]。

350 MW深度调峰机组一次调频控制策略

1. 发挥模型预测控制的优势

模型预测控制作为一种先进的控制方法,越来越多地应用于能源领域,通过采用数学建模、预测系统未来行为、优化控制输入等方法,实现精确控制。将模型预测控制应用于350 MW深度调峰机组一次调频控制中,可有效地解决系统动态特性复杂、负荷变化大等问题。模型预测控制方法的一个优点是能够综合考虑多种变量及约束条件,通过预测未来系统的行为来优化当前时刻的控制决策,以达到精准调控。对于深度调峰操作,系统需快速响应负荷变化,模型预测控制可通过预测未来负荷,提升机组调节性能与稳定性,有效应对负荷波动挑战。该方法能够提高调频效果,优化系统运行,调频控制方法示意图如图1所示。通过提高模型复杂性、优化控制算法和引入智能优化等方法,提升350 MW深度调峰机组一次调频性能,将实时数据监控与反馈控制相结合,对预测控制策略进行持续优化,达到精确控制。基于模型预测控制的350 MW深度调峰机组一次调频控制具有一定的潜力与优势,但仍存在一定的挑战,通过不断优化算法并

提高系统的稳定性,可有效提升机组调节性能,为深度调峰提供可靠技术支撑。

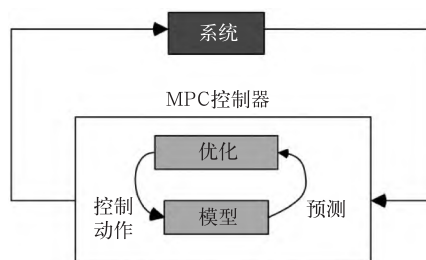


图1 调频控制方法示意图

2. 充分运用自适应控制

自适应控制是一种能够根据系统运行状态及环境变化而自动调节控制参数的智能控制策略,可有效地提高系统的稳定性与性能。在350 MW深度调峰机组一次调频控制中,自适应控制发挥着重要作用。自适应控制具有灵活性的特点,能根据实际运行状态对参数进行动态调整。当机组深度调峰时,系统可能会遇到各种不可预见的情况,如负荷突变和故障等。运用自适应控制方法,可通过对系统运行状态的实时监控,自动调整控制参数,从而提高系统对各种工况的适应性,保证机组的调频性能和稳定运行。充分运用热能动力领域与自动控制技术领域知识,结合改进的群优化算法,在动态双过调改进模型的基础上,寻找火电机组一次调频性能的最优辨识。具体步骤如下:第一步,以动态双重过调改进模型作为基本一次调频性能计算模型,在此基础上,以待识别参数的个数作为搜索空间的种群初始化;第二步,随机将初始化的群体划分到改进的群体中;第三步,计算粒子适应度、粒子的最优位置和种群最优位置;第四步,对不同粒子,将所选的认知系数 c_1 和认知系数 c_2 按照其所属群体进行计算,更新 c_1 和 c_2 ;第五步,利用基本速度修正公式更新质点速度;第六步,根据更新后的质点速度,利用基本质点位置更新公式更新质点位置;第七步,判断循环次数,当循环次数达到最大值时,循环结束。上述的改进的群优化算法中4个种群的动态调整参数 c_1 与 c_2 的计算公式为

$$c_1 = 1.95 - 2t^{\frac{1}{3}}/k_{\max}^{\frac{1}{3}} \quad c_2 = 2t^{\frac{1}{3}}/k_{\max}^{\frac{1}{3}} + 0.05$$

$$c_1 = 1.95 - 2t^{\frac{1}{3}}/k_{\max}^{\frac{1}{3}} \quad c_2 = 2t^{\frac{1}{3}}/k_{\max}^{\frac{1}{3}}/3 + 0.05$$

式中, t 为当前迭代步数; $k_{\max}$ 为最大迭代步数。

因此，自适应控制在350 MW深度调峰机组的一次调频控制中是十分必要的，其灵活性、优化性能与抗干扰能力，可为机组稳定运行与高效率运行提供有力支撑。粒子适应度值 f 计算公式如图2所示。

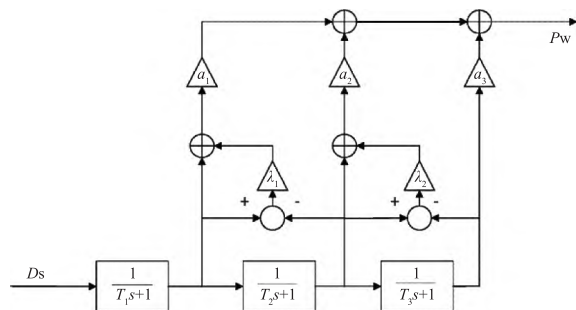


图2 粒子适应度值 f 计算公式

3. 强化多变量控制

对350 MW深度调峰机组一次调频控制而言，多变量控制具有重要意义。该控制策略要求综合考虑多个输入和输出变量，保证系统在负载变化时仍能保持稳定。对于复杂系统，多变量控制方法能够充分考虑各变量间的相互作用，从而达到更加准确的控制效果。如在一次调频过程中，除了对机组负荷的要求外，还要考虑机组转速和气压等多种变量，才能达到快速、准确的调节效果。多变量控制可以更好地理解系统的动态特性，从而采取相应的控制策略。多变量控制已成为现代电力系统普遍采用的一种控制方式，通过综合考虑多种输入、输出变量，可有效地提高调节效率，提高系统的稳定性与响应速度。实践证明，多变量控制对一次调频性能的改善起到很大的作用，为系统的稳定运行提供强有力的支撑。评估多变量控制对一次调频性能改善的影响具有重要意义，结合实际应用与数据分析，验证多变量控制对系统运行的优越性，并持续优化控制策略。在实践效益方面，多变量控制能够提高系统运行效率与稳定性，降低系统运行不确定性，对复杂多变的运营环境具有更强的适应性。在350 MW深度调峰机组一次调频控制中，多变量控制也是应用范围较为广泛的策略之一，通过综合考虑多种输入、输出变量，可实现更准确、更有效的调节，提高系统性能与稳定性。随着技术的进步与实践经验的不断积累，多变量控制的应用范围进一步拓展，有效减少系统的振荡与不稳定性，实现更

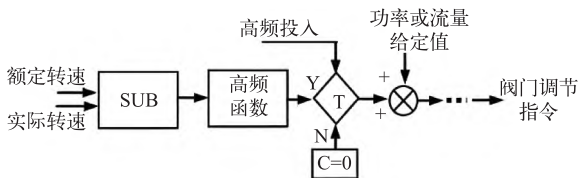
加平稳地调节日标，提升电力系统的整体性能。

4. 引入人工智能控制技术

针对350 MW深度调峰机组一次调频控制问题，可以引入人工智能控制技术。人工智能技术的应用给一次调频带来了崭新的可能性与效益，特别是如机器学习、神经网络等人工智能技术在该领域的具体应用与潜力备受关注。将机器学习技术引入到一次调频控制中，能够极大地提高系统的自适应能力和智能程度。通过利用机器学习算法挖掘数据间隐含的内在关系，准确预测系统运行状态及负荷需求，并动态调整负荷需求。这种预测控制策略可有效减少机组在运行时的误差，提高系统的响应速度与调整准确度，从而实现更稳定、更高效率的调频控制。在一次调频控制中应用神经网络技术，神经网络作为一种仿生学习系统，能够模拟人脑神经元网络结构，对复杂系统进行智能化建模与控制，进一步提高神经网络的辨识与决策能力，实现机组运行状态与外界环境变化的实时监控与响应。基于神经网络的智能控制策略，可有效提高机组运行稳定性与可靠性，降低运行成本与能耗，为电网调峰调频提供更可靠、更高效的支撑。通过运用人工智能技术，将汽轮机转速与额定转速的差值直接转化为功率信号补偿或流量补偿，如DEH系统一次调频控制结构图如图3所示。在该结构中，当转速不等率为5%，汽机从额定负荷100%到0%变化时，所对应的转速升高值为150 r/min，一次调频量的计算公式为

$$\Delta P_f = K \Delta f$$

式中， K 为调频系数； Δf 为频差信号。



DEH系统一次高频控制结构

图3 DEH系统一次调频控制结构图

对应变化1 r/min的转速差的一次调频量（以机组容量660 MW为例） $\Delta P_f = 1 / (3\ 000 \times 5\%) \times 100\% \times 660\text{ MW} = 4.4\text{ MW} / (\text{r/min})$ 。以人工智能为基础的一次调频控制策略是一种极具应用前景的控制方法，随着人工智能技术的不断创新与完善，该智能控制方法必将在电力系统中发挥越来越大的作用，

助力实现能源调度的智能化、高效率和可持续性发展。通过不断探索与实践，将基于人工智能的一次调频控制策略推向一个全新的高度，为电力行业带来更多的发展机遇。

技术难点与解决方案

在深度调峰条件下，一次调频控制面临着频率波动快、功率调整准确度高和系统稳定性难保证等特定技术难题。由于系统频率的急剧变化，使得系统的响应速度无法跟上负荷的变化，从而降低了供电的稳定性；功率调节准确度高需要较高的控制算法及硬件设备；由于负荷快速变化所导致的频率波动很难保证，因此需要更稳定、更灵活的控制方式。针对以上问题，可以采用如下创新技术与策略。针对系统频率变化快的问题，可以引入先进的预测控制算法，在负荷变化趋势预测的基础上，提前调整输出功率，提高系统响应速度；针对功率调整准确度高特点，提出一种新的预测控制方法，可以采用高性能的数字信号处理器和精密的传感器设备，并结合先进的闭环控制算法，实现对输出功率的精准调节；设计更灵活的控制策略，如采用分布式控制方案，实现多个节点间的协同工作，提高系统的稳定性与可靠性。通过引入创新技术与策略，可有效解决电网深度调峰时一次调频面临的技术难题，提高系统性能与稳定性，促进电力工业技术进步，推动清洁能源发展，为构建绿色低碳能源系统作出贡献。

案例分析与比较

350 MW机组在深度调峰时，其一次调频策略对电网频率稳定及机组效率有重要影响。在此基础上，以传统的PID控制和先进的模型预测控制为例，对两种控制策略的性能进行对比分析。具体分析如下。

(1) 案例一：PID控制

某电厂350 MW燃煤机组采用深度调峰方式，采用PID控制方式实现一次调频，并对其运行方式进行优化。系统响应时间为15 s左右，超调量控制在 ± 0.1 Hz以内，但是当负载急剧变化时，系统存在滞后现象，导致系统频率波动更加明显。

(2) 案例二：模型预测控制

在相似条件下，利用模型预测控制实现一次

调频。模型预测控制的响应速度较快，10 s内就能进入稳态，超调更小，约 ± 0.05 Hz，大幅提高控制准确度和稳定性，使系统的频率变化更加准确、平滑。

经过以上对比分析，可见模型预测控制比传统的PID控制有更好的适应性，且模型预测控制具有较高的控制准确度，可有效降低频率波动，能够对控制信号进行预测和调整，其稳定性也优于PID控制。通过以上实际案例比较，发现以模型预测控制为代表的深度调峰机组一次调频控制具有更快、更精确的频率响应能力，能够推动电力系统的智能化发展，是提高电网稳定效率的重要技术方向。

未来发展趋势

随着能源工业的迅速发展，电力需求的不断增加，为350 MW深度调峰机组一次调频带来了新的机遇与挑战。从技术前景来看，一次调频控制技术将向智能化、自动化方向发展。该系统将越来越智能化，能够根据电网实时负荷及市场需求自主调整，提升调频准确度与效率。采用自动化控制系统，提高机组响应速度与稳定性，进而提升机组对电网调度命令的响应速度和准确性。从政策和市场两个层面来看，政府政策导向以及市场变化都会对一次调频控制策略产生深刻的影响。国家能源政策将持续引导能源清洁、高效、智能化，为满足新政策需求，深度调峰机组一次调频技术将不断创新。同时，随着市场竞争的加剧和需求侧管理的兴起，电力市场的变化也会对机组调频控制策略产生较大的影响。350 MW深度调峰机组一次调频技术将在政策导向与市场变化的双重作用下，将继续向智能化、自动化方向发展，通过不断创新、适应变化，在未来能源市场上保持竞争优势。

结束语

综上所述，控制350 MW深度调峰机组一次调频的重要性不言而喻，通过采取一系列的措施对其加以有效的管理与控制，提高系统的性能与稳定性，确保机组能够有效应对电网频率变化，为电力系统的安全运行提供良好保障，进而大力促进我国电力领域的稳健、可持续发展。EA

(收稿日期：2024-08-12)