

[电力负荷]

# 燃机电厂电气系统中的电力负荷波动控制技术

文/施凯

浙江省新能源投资集团股份有限公司

燃机电厂电气负荷波动大，容易导致电压不稳，电网运行效率低的问题，电力系统的电力电荷波动控制技术应运而生。传统的控制技术响应慢、准确度低，且能耗较高，为此，提出基于鹌鹑优化算法的控制技术。首先构建考虑Dos攻击和通信时滞的LFC模型，对紧急切负荷进行分类，并明确目标函数，系统地开展电力负荷类型分析。然后引入非线性惯性权重因子，结合鹌鹑优化算法，进行负荷波动系统控制，有效提升控制准确度与效率。实验结果表明，所提出的燃机电厂电气系统中的电力负荷波动控制技术负荷功率与发电功率的偏差低、成本低，为燃机电厂电气系统的高效、安全运行提供有力技术支撑。

在现代电力系统中，燃机电厂扮演着至关重要的角色，其稳定运行直接影响着电力供应的可靠性。然而，电气系统中的电力负荷波动问题始终是制约燃机电厂高效运行的关键因素。负荷的大幅波动不仅会导致电压不稳、设备损耗加剧，严重时还可能引发系统故障，造成巨大的经济损失。

传统的电力负荷波动控制技术存在响应速度慢、准确度低等缺陷，难以满足当下复杂多变的电力需求。随着网络安全威胁的增加，Dos攻击对电力系统稳定性的影响不容忽视，同时通信时滞也给负荷控制带来新的挑战。因此，构建考虑Dos攻击和通信时滞的LFC模型势在必行。通过对紧急切负荷进行分类，明确目标函数，深入分析电力负荷类型，并借助非线性惯性权重因子、鹌鹑优化算法以及负荷波动控制流程分析，实现对电力负荷波动系统的有效控制，对保障燃机电厂稳定运行意义重大。

## 电力负荷类型分析

### 1. 考虑Dos攻击和通信时滞的LFC模型

精准掌握负荷特性有助于优化电力调度与控

制，可提升系统的可靠性和经济性。在复杂多变的电力环境中，常见的问题是面临Dos攻击和通信时滞等挑战，本文提出基于Dos攻击和通信时滞的LFC负荷频率控制模型。LFC模型旨在维持电力系统的频率稳定，实质为电力系统的功率平衡方程，计算公式为

$$P_g = P_l + P_{rs} \quad (1)$$

式中， $P_g$ 为系统总发电功率； $P_l$ 为总负荷功率； $P_{rs}$ 为系统的旋转备用容量。

当系统在遭受Dos攻击时，恶意流量会干扰控制信号的传输，导致控制器接收错误信息，进而做出错误的调节决策。同时，通信时滞也会使控制信号不能及时到达执行机构，影响系统的响应速度。为应对这些问题，本文提出LFC模型，系统状态方程表达式为

$$\dot{x}(t) = Ax(y) + Bu(t - \tau) + \omega(t) \quad (2)$$

式中， $x(y)$ 为控制信号； $(t - \tau)$ 为控制信号到达执行机构的实际时间； $u$ 为系统状态变量； $A$ 、 $B$ 为系统矩阵； $\omega(t)$ 为Dos攻击产生的干扰。

通过模型的分析，可以更准确地了解电力负荷

在不同干扰情况下的变化规律。电力负荷系统在遭受 Dos 攻击时,通过监测系统状态变量的异常变化,结合通信时滞的影响,能够及时判断攻击的发生,并采取相应的防御措施。

## 2. 紧急切负荷分类

在燃机电厂电气系统中,当电力系统出现严重故障或面临功率缺额时,合理的紧急切负荷措施能够有效避免系统崩溃,确保关键负荷的持续供电。

紧急切负荷分类主要依据负荷的重要程度、对系统稳定性的影响以及可中断特性等因素进行划分。负荷分为重要负荷、一般负荷和可中断负荷三大类。医院、交通枢纽等场所的用电,关乎社会基本运转和公共安全,为重要负荷类型,需确保其在任何情况下都能稳定供电,在紧急切负荷时应予以优先保障。一般负荷则是日常生活和普通工业生产中的常见用电,在系统出现危机时,可适当削减部分用电以维持系统平衡。可中断负荷是指那些对供电连续性要求较低,允许在特定时段或紧急情况下中断供电的负荷,如部分大型工业设备、非关键时段的商业用电等。

为了更科学地进行紧急切负荷操作,本文建立紧急切负荷决策数学模型,公式为

$$\Delta P = \sum_{i=1}^n a_i p_i \quad (3)$$

式中,  $\Delta P$  为系统当前的功率缺额;  $p_i$  为各类负荷的功率;  $a_i$  为不同负荷类别,  $i=1$  代表重要负荷,  $i=2$  代表一般负荷,  $i=3$  代表可中断负荷。

当系统功率缺额较小时,可适当增大可中断负荷的切除系数,优先削减可中断负荷。而当功率缺额较大时,除了加大可中断负荷的切除量,还需适当削减部分一般负荷,同时严格控制重要负荷的切除系数,使其尽可能接近0,以保障重要负荷的正常运行。

通过准确的紧急切负荷分类以及决策模型,能够在电力系统面临危机时,快速、有效地采取措施,维持系统的稳定运行,降低因负荷波动和系统故障带来的损失,为燃机电厂电气系统的可靠供电提供坚实保障。

## 3. 目标函数

目标函数为切除复杂多变的负荷时提供科学决策依据。首先构建以发电成本最小化与系统稳定性

最大化为导向的目标函数,以此平衡电力系统运行中的经济与安全问题,目标函数为

$$C = \sum_{i=1}^m C_i * P_{gi} + \lambda * \sum_{j=1}^n \Delta f_j^2 \quad (4)$$

式中,  $C$  为综合考量后的优化目标值;  $C_i$  为所有发电机组发电成本之和;  $m$  为发电机组数量;  $P_{gi}$  为第  $i$  台发电机组在发电功率为时的成本;  $\lambda$  为权重系数;  $\Delta f_j^2$  为系统各节点频率偏差的平方和;  $n$  表示系统节点数。

电气系统的发电功率成本与燃料消耗、设备损耗等因素紧密相连。通过最小化该二次方和维持系统频率稳定,防止因负荷波动致使频率大幅偏移。同时考虑到电力负荷平衡的重要性,引入负荷平衡约束目标函数,公式为

$$L = \sum_{k=1}^p (P_{dk} - P_{gk})^2 \quad (5)$$

式中,  $L$  为负荷平衡的目标值;  $s$  为电力负荷节点数量;  $P_{dk}$  为第  $k$  个负荷节点的实际负荷需求;  $P_{gk}$  为第  $k$  个负荷节点分配到的发电功率。

在实际运行中,在用电高峰时段,当燃机电厂面临电力负荷波动时,负荷需求大幅增加,一方面要依据发电成本与系统稳定性目标函数,合理调整各发电机组的发电功率,在控制成本的同时保障频率稳定;另一方面,借助负荷平衡约束目标函数,精确分配发电功率到各个负荷节点,确保每个节点的电力需求得到满足。通过对这两个目标函数的协同优化,找到既能满足负荷需求、维持系统稳定,又能降低发电成本的最优运行方案,有效提升燃机电厂电气系统应对不同电力负荷类型的能力,保障电力系统的高效、可靠运行。

## 电力负荷波动系统控制

### 1. 鹈鹕优化算法

鹈鹕优化算法是一种新型的智能优化算法,受鹈鹕觅食行为启发而提出,在电力负荷波动系统控制中展现出良好的应用潜力。

鹈鹕在觅食时,会根据猎物的位置调整自身行动,POA算法模拟这一过程,将问题的解空间视为觅食区域,解则是鹈鹕的位置。算法的核心在于位置更新公式,其数学表达式为

$$X_i^{t+1} = X_i^t + r_1 (X_{\text{rand}}^t - X_i^t) S \quad (6)$$

式中,  $X_i^t$  为第  $i$  只鸚鵡在第  $t$  次迭代时的位置, 对应电力负荷控制问题中的一个潜在解决方案;  $X_{rand}^t$  为从当前种群中随机选择的一只鸚鵡的位置;  $r_1$  为在  $[0,1]$  之间的随机数, 用于增加搜索的随机性;  $S$  为缩放因子。

缩放因子决定搜索步长的大小, 调整它可以平衡算法的全局搜索和局部开发能力。当缩放因子较大时, 算法侧重于全局搜索, 有助于在广阔的解空间中找到大致的最优区域; 缩放因子较小时, 算法聚焦于局部搜索, 对已找到的较优解进行精细优化。

在面对电力负荷波动时, 还需考虑负荷的实时变化以及系统的稳定性约束, 为此引入适应度函数来评估每个解的优劣, 适应度函数为

$$Fit = \eta \Delta E + \theta \Delta U + \beta \Delta F \quad (7)$$

式中,  $Fit$  为适应度值;  $\Delta E$  为负荷功率与发电功率的偏差;  $\Delta U$  为系统频率偏差;  $\Delta F$  为发电成本;  $\eta$ 、 $\theta$ 、 $\beta$  为权重系数, 根据电力系统的实际需求和运行目标进行设定, 用于权衡不同指标的重要性。

通过不断迭代更新鸚鵡的位置, 使得适应度函数值逐渐减小, 最终找到满足电力负荷波动控制要求的最优解, 实现对电力负荷波动系统的有效控制, 保障电力系统的稳定运行。

## 2. 负荷波动控制流程

电力负荷波动控制流程其涵盖多个紧密相连的环节。

1) 实时监测与异常预警。利用传感器和智能电表, 实时采集电力系统数据。同时, 基于考虑Dos攻击和通信时滞的LFC模型, 对数据进行分析, 判断是否存在异常波动。若检测到Dos攻击迹象或通信时滞超出允许范围, 及时发出预警。

2) 负荷类型分析与切负荷决策。依据采集的数据, 对电力负荷进行类型分析。按照紧急切负荷分类原则, 将负荷分为重要负荷、一般负荷和可中断负荷。根据目标函数, 综合考虑发电成本、系统稳定性等因素, 确定在负荷波动情况下的切负荷方案, 优先保障重要负荷, 合理削减可中断负荷和部分一般负荷。

3) 优化算法计算与策略制定。引入鸚鵡优化算法, 以寻找最优的负荷控制策略。通过位置更新公式, 不断迭代更新鸚鵡位置, 也就是不同的潜在控

制方案。同时, 融入非线性惯性权重因子, 在算法迭代初期侧重全局搜索, 后期聚焦局部搜索, 提升算法寻优效率。

4) 控制策略执行与效果反馈。将优化后的负荷控制策略下达至相关设备执行, 持续监测执行效果, 若负荷波动仍未得到有效控制, 返回优化算法计算环节, 重新调整策略, 形成闭环控制, 直至电力负荷稳定在合理范围内, 保障电力系统安全稳定运行。

## 实验研究

为验证燃机电厂电气系统中本文提出的基于鸚鵡优化算法的电力负荷波动控制技术的有效性, 特开展实验研究, 并与传统基于PID控制的燃机电厂电气系统电力负荷波动控制技术进行应用表现对比。

本实验选择在某实际运行的燃机电厂电气系统搭建实验平台, 模拟不同工况下的电力负荷波动。实验选取具有代表性的5种负荷波动场景, 包括负荷的快速上升、快速下降、缓慢变化、周期性波动和随机间歇性波动情况。同时, 为增加实验的真实性, 在部分场景中人为引入模拟的Dos攻击和通信时滞。

实验中, 传统PID控制方法在电力系统控制中应用广泛。本文方法则是基于考虑Dos攻击和通信时滞的LFC模型, 结合紧急切负荷分类、目标函数进行电力负荷类型分析, 并运用鸚鵡优化算法实现负荷波动控制。

在每种负荷波动场景下, 分别采用传统方法和本文方法进行控制, 并记录关键数据。主要采集的数据指标包括负荷功率与发电功率的偏差、系统频率偏差以及控制过程中的发电成本。具体数据如图1所示。

在5种负荷波动场景下, 传统PID控制方法的平均功率偏差为250 kW, 而本文方法将平均功率偏差降低至50 kW。在负荷快速上升场景中, 传统方法的功率偏差最高达到400 kW, 持续时间约为15 s; 本文方法功率偏差最高仅为80 kW, 且在5 s内就恢复到较小偏差范围。这是因为本文方法通过精准的电力负荷类型分析, 结合考虑Dos攻击和通信时滞的LFC模型, 利用非线性惯性权重因子和鸚鵡优化

算法，动态调整控制策略，实现对发电功率的精细调控，从而有效降低偏差。

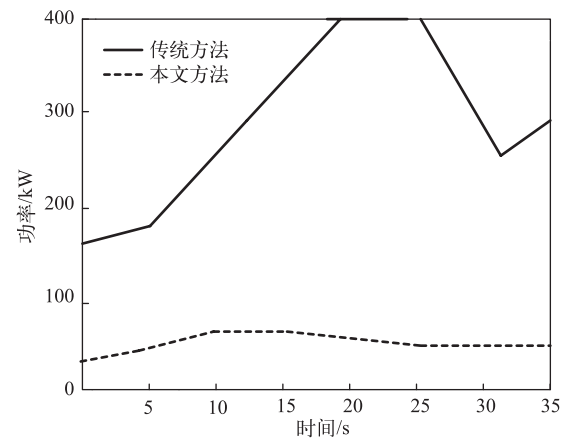


图1 负荷上升场景功率偏差波动图

在5种负荷波动场景下，传统控制方法系统频率偏差均值为0.3 Hz，在部分场景中最大偏差达到0.5 Hz；本文方法使系统频率偏差均值降低至0.1 Hz，最大偏差不超过0.2 Hz。这表明本文方法能更好地维持系统频率稳定，减少频率波动对设备的损害。

综合考虑发电成本，在整个实验过程中，传统方法的总发电成本为50 000元，本文方法通过优化发电策略，将总发电成本降低至40 000元，有效提升了经济效益。

通过以上实验数据对比可以清晰看出，本文提出的基于鹌鹑优化算法的燃机电厂电气系统中的电力负荷波动控制技术在控制准确度、系统稳定性和经济成本方面均优于传统控制方法。该技术能够更有效地应对复杂的电力负荷波动情况，为燃机电厂电气系统的安全、稳定、经济运行提供有力保障。

结束语

本文围绕燃机电厂电气系统的电力负荷波动控制技术展开深入研究。通过构建考虑Dos攻击和通信时滞的LFC模型，有效应对当下复杂的电力系

统环境威胁。对紧急切负荷的合理分类及目标函数的明确，为电力负荷类型分析提供有力支撑。在控制技术上，引入非线性惯性权重因子与鹌鹑优化算法，结合详细的负荷波动控制流程分析，实现对电力负荷波动系统的精准控制。该研究成果不仅提升燃机电厂电气系统的稳定性与可靠性，还为电力行业在应对类似问题时提供新思路与方法，有望在实际应用中进一步推广，助力电力系统安全、高效运行。EA

(收稿日期：2024-12-02)

参考文献

[1] 刁涵彬, 李培强, 郭思源, 等. PMU小扰动信号下的综合负荷模型参数辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(13): 37-49.

[2] 徐浩, 刘青红, 任正, 等. 基于融合技术的中长期电力负荷预测方法[J]. 电力需求侧管理, 2024, 26(4): 94-99.

[3] 袁铁江, 谭捷, 万志. 考虑下游氢负荷波动的新能源制氢系统协调控制策略[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(6): 150-157.

[4] 李谟发, 张志文, 练红海, 等. 含双馈风电电力系统的采样负荷频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(2): 77-88.

[5] 李谟发, 张志文, 胡斯佳, 等. 基于MVO算法与改进目标函数的电力系统负荷频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(6): 1-14.

[6] 陈宗遥, 卜旭辉, 崔立志, 等. 基于特征模型的互联电力系统数据驱动负荷频率控制[J]. 电网技术, 2023, 47(9): 3819-3827.

[7] 付阳, 宋运忠. 考虑可控负荷的多区域电力系统分布式模型预测负荷频率控制[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(17): 101-109.

[8] 王勇, 高红亮, 鲍新宇, 等. 基于浣熊优化算法的电力系统负荷频率控制[J]. 自动化与仪表, 2024, 39(9): 37-40, 46.