

基于灰狼优化算法的电力系统低频振荡抑制策略设计

鲍新宇 高红亮 周 瑞 王 勇 李 俊

(湖北师范大学电气工程与自动化学院)

摘要：由于低频振荡严重威胁着电力系统的安全运行，电力系统稳定器可以有效地抑制低频振荡。针对传统 PID 控制器参数整定方法适应性差的问题，提出一种将灰狼优化算法（GWO）与 PID 控制器相结合的控制方法。在所提出的方法中，灰狼算法被应用于优化 PID 控制器的参数，通过在搜索空间中的灰狼群体中寻找最优解，以实现系统的优化控制。算法通过灰狼群体的社会行为模拟了优化过程，以改善 PID 控制器的响应性和稳定性。在每次迭代中，灰狼群体的 Alpha、Beta 和 Delta 分别对应于 PID 控制器的比例、积分和微分参数，通过不断优化这些参数，实现对电力系统动态变化的适应。通过对标准电力系统模型进行仿真实验，验证了所提出方法的有效性。与传统的手动调谐方法相比，基于灰狼优化算法的 PID 控制器在减小超调和维持系统稳定性方面取得了显著的改善。因此，本研究为电力系统中 PID 控制器的优化控制提供了一种新颖而高效的方法，同时抑制了电力系统产生的低频振荡。

关键词：灰狼优化算法；低频振荡；PID 参数优化

0 引言

当研究者面临着复杂而动态的电力系统控制问题时，为了提高系统的性能和适应性，电力系统的稳定控制成为一项备受关注的研究方向^[1]。在电力系统中，有效的控制策略对于确保系统的稳定性、鲁棒性和性能优越性至关重要。PID 控制器作为一种经典的控制算法，广泛应用于电力系统中，但其性能高度依赖于系统动态特性和负载变化。

近年来，为了克服传统 PID 控制器在应对电力系统复杂动态特性方面的局限性，研究人员开始将自适应控制技术引入 PID 控制器的设计中。在这一领域，

灰狼算法作为一种启发式优化算法，以模拟灰狼社会中的合作和竞争行为，展现了在全局参数优化问题中的潜力^[2]。通过将灰狼算法与 PID 控制器相结合，研究者们可以实现系统参数的优化调整，提高系统对于动态变化的适应能力，从而优化电力系统的性能^[3]。

本文旨在探讨基于灰狼算法的 PID 控制器在电力系统中的优化控制应用。通过对系统动态特性的分析和 PID 参数的调整，旨在实现对电力系统产生低频振荡时进行较好的抑制，确保其在面对复杂的负载波动和外部扰动时依然保持稳定性和性能优越性^[4]。这一研究对于电力系统的可靠性、可控性和可持续性具有

式中, A 、 B 、 C 分别为系统矩阵、输入矩阵和测量矩阵^[5]。值得注意的是, D 为一个零矩阵。其中, K_{PSS} 、 T_1 、 T_2 和 T_w 为 PSS 的相关参数, 其中

K_{PSS} 为 PSS 增益, T_1 、 T_2 、 T_w 为时间常数。 K_1 到 K_6 表示 Heffron - Phillips 常数。电力系统的稳定性受到阻尼转矩的影响。SMIB 电力系统阻尼转矩表达式的相关常数为 K_2 、 K_3 和 K_5 , 其中 K_2 为考虑转子角度恒定时磁链在 d 轴上变化的电转矩变化, K_3 为外阻抗为纯电抗时的阻抗因子, K_5 为考虑 d 轴上磁链恒定时端电压相对于转子角度变化的变化。另外, K_6 为一定转子角度下, 终端电压随 d 轴连杆磁通变化的变化量。 ΔV_{ref} 、 ΔT_m 和 Δv 分别代表励磁参考电压突变、机械转矩扰动和转子转速偏差。图 1 为带有 GWO-PID 控制器的 SMIB 电力系统仿真模型。式中各矩阵以及参数值, 和仿真模型中各个模块的数据说明, 可由文献 [5] 得出。

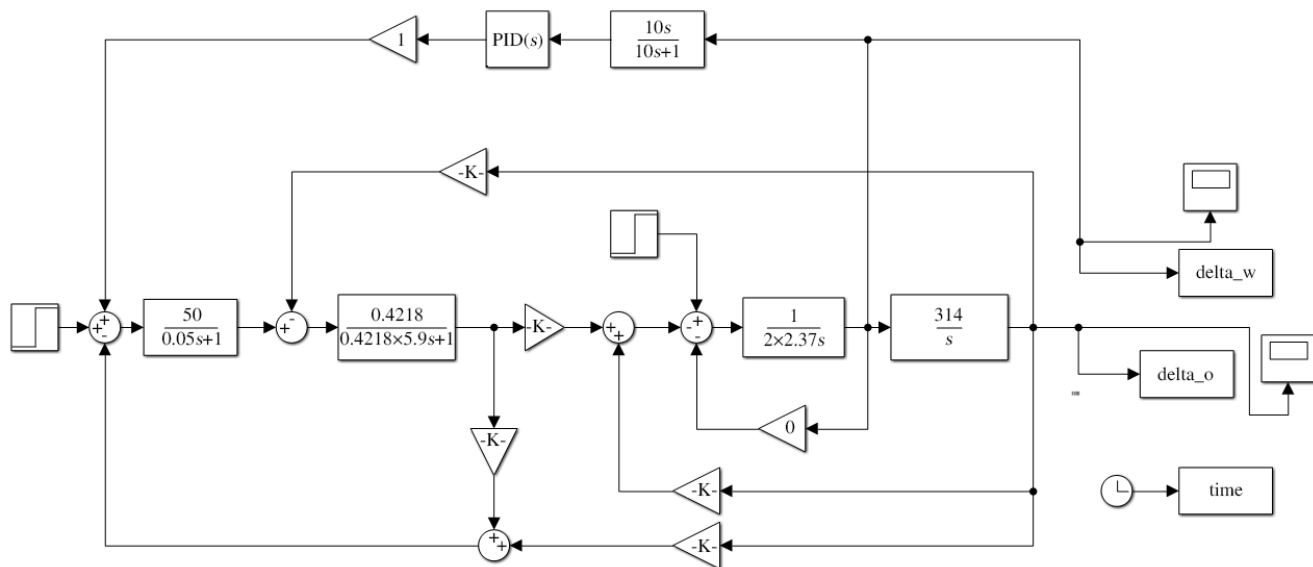


图 1 带有 PID 控制器的 SMIB 电力系统仿真模型

2 灰狼优化算法优化 PID 控制器

2.1 灰狼优化算法介绍

灰狼算法 (GWO) 于 2014 年被首次提出, 作为一种启发式优化算法^[6]。它基于对灰狼群体行为的模拟, 尤其是它们在协作寻食过程中的个体互动和集体智能。GWO 旨在解决优化问题。通过模仿灰狼社

会中的合作与竞争行为，GWO 能够在全局范围内搜索最优解，成为解决复杂优化问题的有力工具。

在 GWO 中, 个体之间的协作与领导关系被用于调整优化问题的搜索空间。算法通过模拟灰狼群体的寻食行为, 以迭代方式更新, 解向更优的方向。这种模仿自然界灰狼群体智能的方法, 使得 GWO 在应对

复杂、高维优化问题时表现出色。

灰狼算法的核心概念是将解空间看作是灰狼群体 $(\alpha, \beta, \delta, \omega)$ 的生态系统。每只灰狼代表一个解，在这个生态系统中，灰狼的位置反映了解的质量，而它们之间的交互和协作则代表了搜索过程。算法主要涉及三种基本行为：寻找猎物、对抗群体和领袖指挥。

寻觅猎物是灰狼在生态系统中寻找猎物的基本行为。每只灰狼通过调整自身位置，试图找到更优解，即猎物。对抗群体是指灰狼之间的竞争和协作过程。灰狼通过相对位置的变化来调整搜索方向，同时在群体中与其他灰狼进行竞争，以便更好地发现潜在的优秀解。领袖指挥是指灰狼群体中领袖的指挥行为。群体中的某些灰狼可能表现出更好的解，它们的位置和状态会对整个群体产生引导作用，使整个群体更有可能朝着更优解的方向演化^[7]。

灰狼在捕猎过程中会包围猎物，对包围猎物行为进行数学建模，数学方程为：

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (2)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (3)$$

式中， t 为当前的迭代； $\vec{A}$ 和 $\vec{C}$ 为该式系数向量； $\vec{X}_p(t)$ 为猎物的位置向量； $\vec{X}(t)$ 为灰狼的位置向量； $\vec{D}$ 为个体与目标的距离^[8]。向量 $\vec{A}$ 和向量 $\vec{C}$ 的计算公式为：

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (4)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (5)$$

式中， $\vec{a}$ 的分量在迭代过程中呈线性从2下降到0； $\vec{r}_1, \vec{r}_2$ 是 $[0, 1]$ 中的随机向量。

狩猎行为见如下公式：

$$\vec{D}_\alpha = |\vec{C} \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}| \quad (6)$$

$$\vec{D}_\beta = |\vec{C} \cdot \vec{X}_\beta - \vec{X}| \quad (7)$$

$$\vec{D}_\delta = |\vec{C} \cdot \vec{X}_\delta - \vec{X}| \quad (8)$$

$$\vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha) \quad (9)$$

$$\vec{X}_2 = \vec{X}_\beta - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_\beta) \quad (10)$$

$$\vec{X}_3 = \vec{X}_\delta - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_\delta) \quad (11)$$

$$\vec{X}(t+1) = (\vec{X}_1 + \vec{X}_2 + \vec{X}_3)/3 \quad (12)$$

2.2 灰狼优化算法改进的PID控制器（GWO-PID）

PID控制器是一种反馈控制器，可根据输出与目标之间的差异调节输入，使系统达到期望状态^[9]。其关键参数包括比例系数、积分系数和微分系数，这些参数的优化对控制系统性能至关重要。通常，使用计算机模拟或实验设计方法进行PID控制器参数的优化。PID控制器的输入是系统目标输出 $y_r(t)$ 与 $y(t)$ 实际输出之间的偏差 $e(t)$ ，控制器的输出是 $u(t)$ ，即：

$$e(t) = y_r(t) - y(t) \quad (13)$$

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (14)$$

式中， K_p 为比例系数； K_i 为积分系数； K_d 为微分系数。

以单位阶跃信号为输入，观察系统的阶跃响应特性，分析系统的超调量、调节时间、稳态误差等性能指标。采用性能指标ITAE作为GWO算法的适应度函数，表达式：

$$ITAE = \int_0^x t |e(t)| dt \quad (15)$$

其灰狼优化算法流程图见图2。

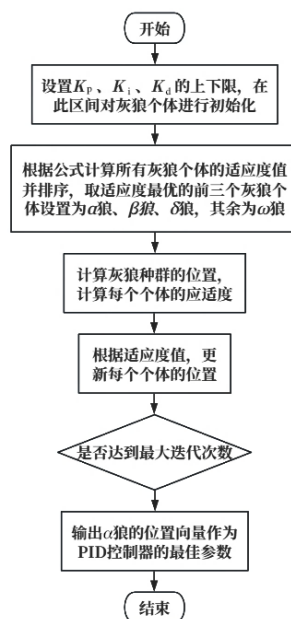


图2 灰狼优化算法流程

3 仿真验证与结果分析

本节以转子转速偏差 $\Delta\omega$ 和转子转角变化 $\Delta\delta$ 作为性能评价指标。

首先, 将 ΔT_m 和 ΔV_{ref} 分别设为 0.01pu 和 0pu。然后, 模拟系统对第一个扰动的响应, 得 GWO-PID 控制器和传统 PID 控制器对 SMIB 电力系统的响应曲线, 如图 3 和图 4 所示。

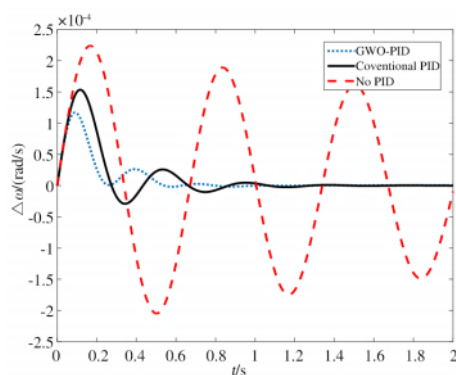


图 3 $\Delta T_m=0.01pu$ 和 $\Delta V_{ref}=0pu$ 时 $\Delta\omega$ 动态响应曲线

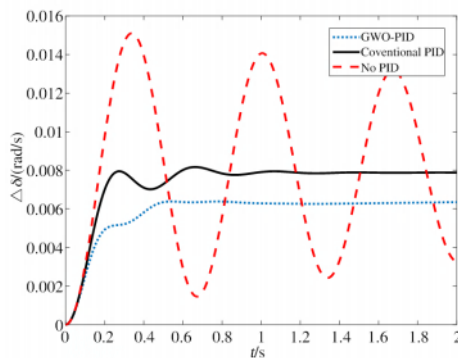


图 4 $\Delta T_m=0.01pu$ 和 $\Delta V_{ref}=0pu$ 时 $\Delta\delta$ 动态响应曲线

由图 3 和图 4 可以看出, 在对系统施加这样的一个扰动之后, 传统 PID 控制器和 GWO-PID 控制器都可以抑制该扰动引起的震荡。并测量在没有控制器状态下系统在受到相应扰动后产生的振荡频率。那么, 可以确定系统产生振荡是 $f=1.578Hz$ 的低频振荡。

从图 3 和图 4 中可以清楚地看出, GWO-PID 控制器的超调是最低的。观察系统的动态响应过程,

GWO-PID 控制器抑制振荡的时间最短。与 PID 的调节时间 $t_s=0.409s$ 相比, 其调节时间 $t_s=0.267s$ 最短。根据超调量和沉降时间两个指标, 可以得出当系统受到 $\Delta T_m=0.01pu$ 和 $\Delta V_{ref}=0pu$ 的第一种扰动类型时, GWO-PID 控制器的动态性能优于传统 PID 控制器。

当电力系统所受的扰动发生变化时, 励磁参考电压扰动为 0.01pu, 机械转矩扰动大小保持不变。通过仿真, 得到两种控制器下 SMIB 电力系统的动态响应曲线, 如图 5 和图 6 所示。

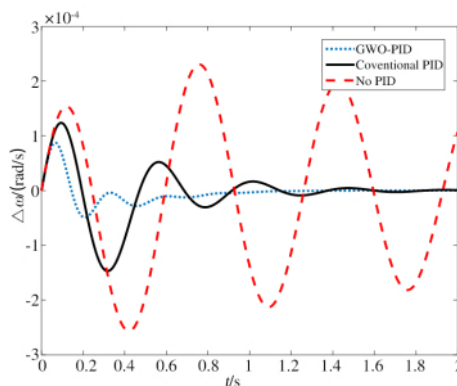


图 5 $\Delta T_m=0.01pu$ 和 $\Delta V_{ref}=0.01pu$ 时 $\Delta\omega$ 的动态响应曲线

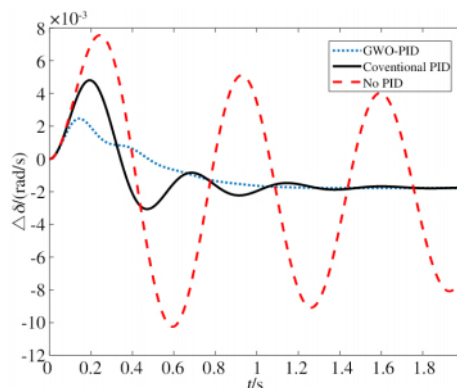


图 6 $\Delta T_m=0.01pu$ 和 $\Delta V_{ref}=0.01pu$ 时 $\Delta\delta$ 的动态响应曲线

从图 5 和图 6 可以看出, 当激励参考电压和机械转矩扰动为 0.01pu 时, 本文设计的 GWO-PID 控制器仍然可以很好地抑制振荡。在没有控制器的情况下, 测量到系统受到扰动后产生的振荡频率为 $f=1.638Hz$ 。因此, 可以清楚地观察到, GWO-PID 控

制器的超调和欠调比传统 PID 控制器小。观察系统响应的动态过程，GWO-PID 的调整时间比传统 PID 控制器短，其调整时间为 $t_s=0.282s$ ，采用 PID 控制器的调节时间 $t_s=0.454s$ 。对比这两种控制器的性能，可以得出当扰动变化为 $\Delta T_m=0.01pu$ 和 $\Delta V_{ref}=0.01pu$ 时，GWO-PID 控制器的动态性能优于其他控制器。

4 结束语

本文研究了 GWO 优化 PID 控制器的问题。在对 SMIB 电力系统进行的仿真实验中，比较了传统 PID 控制器和 GWO-PID 控制器在面对不同类型扰动下的动态响应性能。扰动类型分别为机械转矩扰动和励磁参考电压扰动。对于机械转矩扰动，在传统 PID 控制器和 GWO-PID 控制器的动态响应曲线中，GWO-PID 控制器表现出更好的性能。GWO-PID 控制器在抑制振荡方面表现更为出色，超调量最低，调节时间短，稳定性最好。GWO-PID 控制器的动态性能优于传统 PID 控制器，尤其在超调量方面表现更优。对于励磁参考电压扰动，在传统 PID 控制器和 GWO-PID 控制器的动态响应曲线中，GWO-PID 控制器依然展现出良好的抑制振荡能力。GWO-PID 控制器的超调量较传统 PID 控制器更低，性能表现更优。因此，GWO-PID 控制器在 SMIB 电力系统的动态响应中表现出更好的性能，特别是在抑制振荡、超调量和稳定性方面。所以，对于电力系统产生的低频振荡，采用 GWO-PID 控制器能够更有效地提高系统的稳定性和动态性能。

参考文献

[1] 王兴, 吕谋, 王西平, 等. 基于改进灰狼优化算法的供水管网压力漏失调控优化研究 [J]. 给水排水, 2023, 59 (11) : 144-152.

[2] 张坤鳌, 常云磊. 基于模糊灰狼 PID 的发酵仓解耦控制系统研究 [J]. 电子测量技术, 2023, 46(7) : 19-23.

[3] 王成山, 李鹏, 于浩. 智能配电网的新形态及其灵活特性分析与应用 [J]. 电力系统自动化, 2018, 42 (10) : 13-21.

[4] 许晓晨, 杨跃舞, 付科源, 等. 基于改进灰狼算法的光伏微网光学材料参数识别研究 [J]. 光学与光电技术, 2024, 22 (3) : 120-127.

[5] K. Ellithy, S. Said, O. Kahlout. Design of power system stabilizers based on μ controller for power system stability enhancement[J].International Journal of Electrical Power and eEnergy Systems, 2014(63) : 933-939.

[6] 白敬一, 李忠峰, 马新茹, 等. 灰狼算法优化的 PID 控制器在实验焦炉温度控制中的应用 [J]. 冶金能源, 2023, 42 (4) : 55-59.

[7] 步同杰, 王亚刚. 基于改进灰狼算法的啤酒灌装 PID 液位控制 [J]. 包装工程, 2023, 44 (21) : 245-252.

[8] 史伟光, 王启任. 基于改进灰狼算法的多任务优化算法 [J]. 天津工业大学学报, 2023 (5) : 81-86.

[9] 常春光, 陈佳鑫. 基于灰狼优化算法的装配式预制构件生产调度优化研究 [J]. 沈阳建筑大学学报 (社会科学版), 2023, 25 (6) : 589-596.

[10] 胡学敏, 曾晟, 宋良灵. 基于灰狼算法改进随机森林算法的爆破振动速度预测研究 [J]. 黄金, 2024, 45 (1) : 12-16.

(收稿日期：2024-09-04)