

基于改进灰狼优化算法的同步发电机 交流励磁控制方法

刘斌 叶林

(国网浙江省台州市路桥区供电公司)

摘要：交流励磁控制是保证同步发电机运行稳定的重要手段，但当前现实中控制效果并不理想，不仅同步发电机励磁电压标幺值偏差比较大，而且超调量也比较高。针对当前同步发电机交流励磁控制存在的不足和缺陷，本文提出基于改进灰狼优化算法的同步发电机交流励磁控制方法。以同步发电机励磁电压标幺值偏差最小为目标建立发电机交流励磁控制目标函数，通过降低灰狼优化算法中种群规模和迭代次数以及引入动态收敛因子实现对灰狼优化算法改进，利用改进灰狼优化算法求出最优同步发电机交流励磁控制策略，实现基于改进灰狼优化算法的同步发电机交流励磁控制。经实验证明，设计方法应用下发电机励磁电压标幺值基本接近 1pu，超调量不超过 1%，控制效果良好，可以有效保证同步发电机稳定运行。

关键词：改进灰狼优化算法；同步发电机；交流励磁；控制；种群规模；收敛因子

0 引言

随着现代电力系统的发展，同步发电机作为核心组成部分，其运行效率和稳定性对电力系统的整体性能具有重要影响。为了提高同步发电机的性能，各种先进的控制方法被广泛应用于励磁控制系统中。交流励磁控制作为一种重要的控制手段，能够有效调节发电机的输出电压和频率，从而提高其运行效率和稳定性，同步发电机交流励磁控制对于确保发电机的稳定运行、提高效率、调节负荷、控制无功功率以及保护电力系统等方面都具有重要的意义。然而，传统的交流励磁控制方法往往存在参数整定困难、优化效果不理想等问题，这限制其在复杂电力系统中的应

用。近年来，随着智能优化算法的发展，一些研究者开始尝试将智能优化算法应用于同步发电机的交流励磁控制中，以期取得更好的优化效果。灰狼优化（GWO）是近年来发展起来的一类群智能优化算法，它具有快速收敛和良好的全局寻优能力。它通过模拟灰狼的狩猎行为和等级制度，能够在复杂空间中快速寻找到最优解。然而，原始的灰狼优化算法在处理高维度、多峰值等复杂问题时，仍然存在易陷入局部最优、搜索精度不高等问题，导致在同步发电机交流励磁控制中优化效果不佳。因此，如何对灰狼优化算法进行改进，提高其全局搜索能力和优化精度，成为当前研究的热点之一，为此提出基于改进灰狼优化

算法的同步发电机交流励磁控制方法。

1 建立同步发电机交流励磁控制目标函数

同步发电机交流励磁控制的主要目的是稳定发电机励磁电压，而同步发电机交流励磁电压的稳定程度可用标么值来表征，标么值是一种相对单位，在电力系统分析与工程计算中经常使用的一种数值标注方式，其表达了各个物理量及其相对值。标么值被定义为一个物理量的真实值和一个被选择的相同单元的参考值之间的比率，表示为：

$$\delta = K_u / K \quad (1)$$

式中， δ 为同步发电机交流励磁电压标么值； K_u 为同步发电机交流励磁电压实际值； K 为同步发电机交流励磁电压基准值^[1]。标么值越接近 1，则说明同步发电机的电压值越接近基准值，同步发电机运行越稳定，出现激振的可能性越低，发电机交流励磁控制效果越好^[2]。因此本文研究将同步发电机励磁电压标么值偏差最小为目标建立目标函数，表示为：

$$f = \min |1 - \delta| = \min |1 - K_u / K| \quad (2)$$

式中， f 为同步发电机交流励磁控制目标函数^[3]。要想使目标函数的解接近理想的同步发电机交流励磁控制目标，需要合理选取同步发电机交流励磁电压基准值 K ，根据同步发电机运行原理，其交流励磁电压基准值表示为：

$$K = \frac{S_{\text{base}}}{I_{\text{base}}} = \frac{S_{\text{base}}}{e I_{\text{FDO}}} \quad (3)$$

式中， S_{base} 为同步发电机容量基准值； I_{base} 为同步发电机定子绕组电流基准值； e 为 0~1 随机数； I_{FDO} 为同步发电机定子交流励磁电流^[4]。同步发电机定子绕组电流基准值、容量基准值计算为：

$$\begin{cases} I_{\text{base}} = I_p \\ S_{\text{base}} = \frac{3}{2} U \times I_{\text{base}} \end{cases} \quad (4)$$

式中， I_p 为同步发电机额定相电压的峰值； U 为同步发电机定子绕组电压基准值。将式 (3)、式 (4) 代入到式 (2) 中，即可描述出同步发电机交流励磁控制目标函数。

2 基于改进灰狼优化算法的交流励磁优化控制

2.1 改进灰狼优化算法

在上述基础上，利用优化算法对目标函数最优解求解，求出最优同步发电机交流励磁控制策略，实现对发电机交流励磁优化控制。起初拟采用灰狼优化算法，该算法模拟了灰狼的社会等级制度和狩猎行为，通过协同合作和竞争来寻找最优解，根据适应度函数对狼群进行分层。将目标函数的可能解组建候选解集，每个解拟作为一只狼，其中最优解在群体中为 α 狼，候选解集中两个次优解分别为 β 狼和 γ 狼，解集中其余的候选解为 δ 狼^[5]。四种狼中 α 狼、 β 狼和 γ 狼指导狼群的狩猎行为， δ 狼则跟随以上三种狼^[6]。在灰狼优化算法中无法得知狼群搜索空间中最优解的位置，因此将 α 狼、 β 狼和 γ 狼看作为最优解，通过模仿狼群的狩猎行为迭代更新下一代狼群，直到达到迭代要求后，输出适应度值越高的狼，其对应的解为最优同步发电机交流励磁控制策略^[7]。然而，灰狼优化算法也存在一些局限性，灰狼优化算法的计算资源有限，容易出现局部最优，从而导致算法输出的最优解并非全局最优。因此为了保证同步发电机交流励磁控制精度，对灰狼优化算法进行改进。

具体改进如下：灰狼优化算法的性能在很大程度上取决于参数的选择，如种群规模、迭代次数、收敛因子等。因此降低灰狼优化算法中种群规模和迭代次数，以此提高优化效果。灰狼优化算法中的收敛因子用于控制算法的搜索范围和收敛速度。然而，固定的收敛因子可能无法适应不同的问题和阶段。因此，

可以考虑引入动态收敛因子，使其能够根据问题的复杂性和搜索进度进行自适应调整。

2.2 基于改进灰狼优化算法的最优控制策略求解

利用改进后的灰狼优化算法对目标函数进行求解计算，首先对优化算法的参数进行初始化，确定灰狼种群规模、迭代次数以及初始化收敛因子^[8]。狩猎者根据随机系数生成新的猎物位置，随机系数计算为：

$$\begin{cases} A = 2ar - a \\ C = 2r \end{cases} \quad (5)$$

式中， A 、 C 均为随机的系数向量； a 为收敛因子； r 为随机参数。根据随机的系数向量对猎物位置进行更新，其表示为：

$$X(t+1) = X_p(t) - AD \quad (6)$$

式中， $X(t+1)$ 为更新后的灰狼位置，即更新机制产生的下一代解； $X_p(t)$ 为当前狩猎者位置向量； D 为狩猎者狩猎速度，其计算为：

$$D = [CX_p(t) - [P - X(t)]] \quad (7)$$

式中， P 为最优解对应的灰狼位置； $X(t)$ 为当前灰狼位置^[9]。利用上式为狼群中层次较高的 α 狼、 β 狼和 γ 狼位置更新，当达到迭代要求时，输出适应度值最大的灰狼，适应度值可以衡量出灰狼位置与 α 狼位置的距离，数值越大，则灰狼越接近 α 狼位置，由此可以得到目标函数候选解中最优解，根据最优控制策略对同步发电机交流励磁控制。

3 实验论证

3.1 实验准备与设计

为了验证所提的基于改进灰狼优化算法的同步发电机交流励磁控制方法的有效性与可行性，对其进行相关对比实验，并且分别采用主流方法A与主流方法B进行对比。选同步发电机为实验对象，该同步发电机型号为IHFAS-59878，额定电压和额定电流为

13.44kV、26.45kA，额定功率和额定转速为45MW、2500r/min，定子绕组漏抗为0.121，转子绕组自感为2.155，阻尼系数为0.05，电机极对数为2，转子绕组电阻为0.264Ω，惯性时间常数为12.34s。该同步发电机的励磁机参数：额定电流为1124A，额定电压为320V，额定功率为255kW，超瞬变电抗为0.18，瞬态电抗为0.246，励磁绕组电阻为0.156Ω，励磁绕组时间常数为1.26s。利用本文方法对该同步发电机交流励磁控制，根据同步发电机实际情况，对改进灰狼优化算法参数设置如下：灰狼种群中个体数量为100，收敛因子初始值为0.01，迭代次数设置为200次。通过改进灰狼优化算法迭代计算，对实时优化发电机交流励磁控制参数，图1为同步发电机交流励磁控制实时相电压波形图。

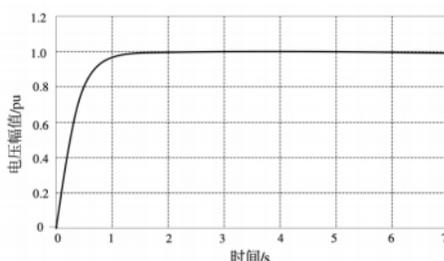


图1 同步发电机交流励磁控制实时相电压波形图

从图1可以看出，控制后同步发电机相电压在0.89s时幅值稳定到1pu，基于改进灰太狼优化算法的同步发电机交流励磁控制时间短，并且控制效果明显。

3.2 实验结果与讨论

为了进一步检验本文所提方法的性能，选择电机标么值和超调量作为评价指标。超调量（Overshoot）是线性控制系统在阶跃信号输入下的响应过程曲线，也就是阶跃响应曲线分析动态性能的一个指标值。它指的是在阶跃输入作用下，被调量的瞬时最大偏差值 x_{max} 与稳态值 $x(\infty)$ 之比，一般用百分比表示，其表示为：

$$\rho = [x_{\max} - x_{\min}] / x \quad (8)$$

式中， ρ 为同步发电机交流励磁控制超调量； x_{\max} 、 x_{\min} 分别为发电机交流励磁控制量瞬时最大偏差值和最小偏差； x 为发电机交流励磁控制量稳态值。表 1、表 2 为三种方法应用下发电机励磁电压标么值和超调量。

表 1 同步发电机励磁电压标么值 (pu)

时间/s	设计方法	主流方法 A	主流方法 B
2	0.99	0.56	0.36
4	1.01	0.48	0.54
6	1.01	0.43	0.48
8	0.99	1.56	0.67
10	1	1.42	1.42
12	1	1.36	1.58
14	1	1.42	1.68
16	0.99	0.74	1.74

表 2 同步发电机励磁控制超调量 (%)

实验组别	设计方法	主流方法 A	主流方法 B
第一组	0.15	10.26	15.64
第一组	0.08	10.56	15.84
第一组	0.11	10.48	15.75
第一组	0.13	10.87	15.69
第一组	0.06	10.69	15.47
第一组	0.08	10.24	15.26
第一组	0.09	10.56	15.36
第一组	0.11	10.45	15.47

对比表 1、表 2 中数据得出实验结论：设计方法应用下同步发电机励磁电压标么值在 1pu 左右，偏差不超过 0.02pu，而主流方法 A 应用下同步发电机励磁电压标么值在 0.43~1.56pu 之间，主流方法 B 应用下同步发电机励磁电压标么值在 0.36~1.74pu 之间，两种主流方法电压标么值偏差远远高于设计方法；此外设计方法的超调量不超过 1%，主流方法 A 超调量在 10% 左右，主流方法 B 超调量在 15% 左右，远远高于设计方法。通过以上实验对比证明设计方法在同步发电机交流励磁控制方面具有绝对的优势，控制效果更加明显。

4 结束语

本文提出的基于改进灰狼优化算法的同步发电机交流励磁控制方法，旨在解决传统控制方法中存在的参数整定困难、优化效果不理想等问题。通过引入多维度搜索策略和自适应权重调整的灰狼优化算法，显著提高系统的全局搜索能力和优化精度，实现对发电机输出电压和频率的精确调节。这不仅提高同步发电机的运行效率和稳定性，还有助于提升整个电力系统的性能和可靠性。通过仿真实验和实际运行验证，证明该方法的有效性和优越性。然而，在实际应用中，还需要进一步考虑电力系统的实际运行情况和各种复杂因素，以不断完善和优化控制方法，更好地适应未来电力系统的发展需求。

参考文献

- [1] 戴月, 李世明, 林玥廷, 等. 基于模糊免疫自适应 PID 的风力发电机励磁控制方法 [J]. 机械与电子, 2023, 41 (12): 65-69.
- [2] 史建宇, 张宇飞, 郭子韬, 等. 多电辅助动力装置用双绕组感应发电机变频交流发电系统励磁控制技术 [J/OL]. 航空动力学报, 1-9[2024-03-10]. <https://doi.org/10.13224/j.cnki.jasp.20220549>.
- [3] 王徽, 关圣凡, 乌梦悦. 模糊 PID 控制的同步发电机励磁控制方法 [J]. 中国新技术新产品, 2022 (24): 17-19.
- [4] 夏永洪, 郭浩然, 周童, 等. 基于双谐波绕组的混合励磁发电机励磁控制系统 [J]. 电子测量技术, 2022, 45 (21): 25-30.
- [5] 黄康. 同步发电机励磁控制研究综述 [J]. 电气应

- 用, 2022, 41 (9): 9-15.
- [6] 王卿鹏. 内燃机车恒功率励磁控制系统及辅发励磁充电电路设计分析 [J]. 内燃机与配件, 2022 (6): 7-9.
- [7] 李秀琴, 石华栋, 李志鹏. 新能源场合下火电机组附加励磁控制参数优化设计 [J]. 节能技术, 2021, 39 (6): 547-550.
- [8] 张瞳, 胡继胜, 王铁龙. 内燃动车柴油发电机的励磁系统模糊滑膜控制研究 [J]. 电工技术, 2021 (18): 1-3.
- [9] 班红梅. 基于遗传算法的同步发电机励磁控制器设计 [J]. 电气开关, 2021, 59 (3): 68-71, 76.

(收稿日期: 2024-03-20)
