

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.191074

基于群灰狼优化算法的双馈感应电机最优控制

赵瑞锋¹, 郭文鑫¹, 王彬¹, 潘振宁², 李世明¹, 李波¹, 卢建刚¹

(1. 广东电网有限责任公司电力调度控制中心, 广东 广州 510060; 2. 华南理工大学电力学院, 广东 广州 510640)

摘要: 设计了一种新颖的群灰狼优化算法(Gathered Grey Wolf Optimizer, GGWO), 用于整定双馈感应电机(Doubly-fed Induction Generator, DFIG)的比例-积分控制器(Proportional-integral, PI)最优参数, 从而实现变风速下的最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)并提高系统的故障穿越能力(Fault Ride-through, FRT)。GGWO 在原始灰狼优化算法(Grey Wolf Optimizer, GWO)的基础上引入分组机制, 将灰狼分为相互独立的合作狩猎组和随机侦察组。其中, 随机侦察组中的灰狼负责进行广泛的全局搜索, 而合作狩猎组的灰狼实现深度的局部探索。同时, 设计狼群间的角色互换机制, 可根据当前适应度函数, 在下次迭代中对不同分工的狼进行角色互换, 进而平衡全局搜索和局部探索的矛盾。通过阶跃风速、随机风速和电网电压跌落三个算例对 GGWO 的优化性能进行了研究。仿真结果表明, 与遗传算法、粒子群算法、飞蛾扑火算法和 GWO 相比, 所提算法具有更好的全局收敛性、MPPT 精确性和 FRT 能力。

关键词: 群灰狼优化算法; 双馈感应电机; 最优控制

Gathered grey wolf optimizer based optimal control of doubly-fed induction generator

ZHAO Ruifeng¹, GUO Wenxin¹, WANG Bin¹, PAN Zhenning², LI Shiming¹, LI Bo¹, LU Jiangan¹

(1. Electric Dispatch and Control Center, Guangdong Power Co., Ltd., Guangzhou 510060, China;

2. College of Electric Power, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A novel Gathered Grey Wolf Optimizer (GGWO) is proposed in this paper for the optimal proportional-integral (PI) parameters tuning of Doubly-Fed Induction Generator (DFIG), so as to achieve Maximum Power Point Tracking (MPPT) and to improve Fault Ride-Through (FRT) ability. Based on original Grey Wolf Optimizer (GWO), the grey wolves are divided into independent cooperative hunting group and random scout group. The grey wolves in the random scout group are responsible for extensive global search, while those in the independent cooperative hunting group are responsible for a deep local exploration. Moreover, a role reversal mechanism is developed, such that the role of different wolves in different groups can be exchanged during the next iteration, according to the current fitness function to balance the contradiction between global search and local exploration. Three case studies are carried out, including step change of wind speed, stochastic wind speed, as well as power grid voltage drop. Simulation results verify that, compared with Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), Moth-Flame Optimization (MFO) and GWO, the proposed method has better global convergence, more accurate power tracking and better FRT capability than other meta-heuristic algorithms.

This work is supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid Co., Ltd. (No. GDKJXM20172831).

Key words: gathered grey wolf optimizer; doubly-fed induction generator; optimal control

0 引言

如今, 全球变暖、化石燃料的广泛使用所造成

的空气污染等严重的环境问题已引起世界各国对可再生能源利用的关注。其中风力发电以其清洁无污染、资源丰富等显著优势, 得到了迅速发展^[1]。风力发电机组主要可分为双馈感应电机(Doubly-fed Induction Generator, DFIG)^[2]与永磁同步电机(Permanent Magnetic Synchronous Generator, PMSG)^[3]

基金项目: 中国南方电网有限责任公司科技项目资助(GDKJXM20172831)

两类。其中 DFIG 具有独立的无功功率控制能力且成本较低, 在工业上应用广泛。

最大功率点跟踪(Maximum Power Point Tracking, MPPT)的目的在于当风速变化时, 控制转子转速使风力涡轮机获得最大的机械能^[4]。考虑到 DFIG 的强非线性、风速的随机性、系统参数的不确定性、电网电压波动干扰等因素, 近年来学界提出了许多非线性控制方法。文献[5]提出了一种改进的神经网络算法, 以实现快速稳定的功率控制响应; 文献[6]应用非线性反推策略来实现 MPPT, 其全局渐近稳定性可用李雅普诺夫理论来证明; 此外, 在文献[7]采用扰动观测法实现 MPPT, 同时应用滑模控制器来实现对有功功率和无功功率的控制。

然而, 上述方法的控制结构比较复杂, 在实践中不易实现。基于经典比例-积分(Proportional-integral, PI)控制的矢量控制(Vector Control, VC)具有结构简单、容易实现等优点, 得到了业界广泛认可, 并应用在 DFIG 功率快速可靠调节中^[8]。通常, VC 的控制性能主要取决于 PI 控制器的增益参数, 而其增益参数相互影响, 如何合理地选取最优 PI 控制器增益参数是 DFIG 最优运行中一个亟待解决的难题。

为解决上述问题, 基于启发式算法的 PI 控制器最优增益参数调节成为了近年来的热点研究问题。文献[9]提出利用粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)用于 PI 控制器增益参数的整定, 通过间接功率控制来保证 DFIG 的 MPPT, 与手动调优 PI 控制器相比, PSO 可以取得更好的控制效果; 文献[10]采用差分进化算法(Differential Evolution, DE)以提高 DFIG 受扰动时的性能; 此外, 文献[11]将遗传算法(Genetic Algorithm, GA)用于改善 DFIG 的故障穿越能力。然而, 上述启发式算法存在过早收敛的问题,

不易获取 DFIG 的全局最优 PI 控制器增益参数。

最近, 文献[12]模拟自然界中灰狼物种分层合作狩猎原理, 提出了一种灰狼优化算法(Grey Wolf Optimizer, GWO)。GWO 将灰狼分为 4 种类型(α 、 β 、 δ 和 ω 狼), 采用猎物探索、猎物包围、猎物捕捉三种策略, 以实现合作狩猎。目前, GWO 已成功应用于经济调度^[13]、表面波参数估计^[14]、光子晶体滤波器的设计^[15]等工程领域。

然而, GWO 的优化效果高度依赖于全局搜索和局部探索之间的平衡。为此, 本文提出了一种新的群灰狼优化算法(Gathered Grey Wolf Optimizer, GGWO)并将其用于整定 DFIG 的 PI 控制器最优参数, 从而实现变风速下的 MPPT, 并提高系统的故障穿越能力(Fault Ride-through, FRT)。最后, 本文在阶跃风速、随机风速和电网电压跌落三种算例下将所提算法的控制性能与遗传算法(Genetic Algorithm, GA)^[11]、粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)^[9]、GWO^[12]和飞蛾扑火算法(Moth-flame Optimization, MFO)^[16]进行了比较, 仿真结果验证了 GGWO 的有效性。

1 双馈感应发电机系统建模

DFIG 的基本结构示意图如图 1 所示。其中, 风轮机通过机械轴系统与发电机相连接, 定子与无穷大电网直接相连, 转子与背靠背换流器相连。转子侧换流器(Rotor-side Converter, RSC)的目标是控制转子转速和无功功率。而电网侧换流器(Grid-side Converter, GSC)的目标是在无功功率幅值和方向改变的情况下维持直流电压恒定。

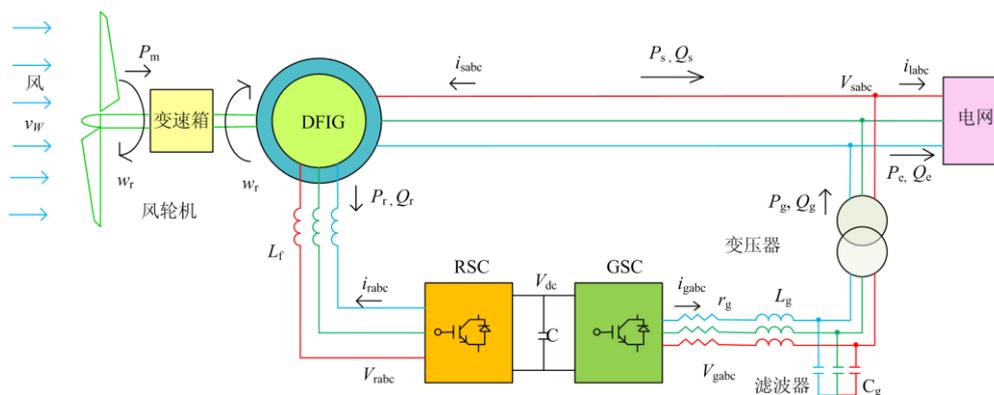


图 1 双馈感应电机的结构示意图

Fig. 1 Configuration of DFIG systems

1.1 风轮机模型

风轮机从风能中获取的机械功率为

$$P_m = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_p(\lambda, \beta) v_{\text{wind}}^3 \quad (1)$$

式中： ρ 为空气密度； R 表示风轮机半径； v_{wind} 表示风速； $C_p(\lambda, \beta)$ 表示一个关于叶尖速比 λ 和桨距角 β 的函数，亦可称为风能利用系数，其中 λ 可以定义为

$$\lambda = \frac{\omega_m R}{v_{\text{wind}}} \quad (2)$$

式中， ω_m 为风轮机的机械转速。基于风轮机的运行特性，功率系数 $C_p(\lambda, \beta)$ 可用式(3)表示。

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{-\frac{c_5}{\lambda_i}} + c_6 \lambda \quad (3)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.008\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (4)$$

式中： $c_1 = 0.5176$ ； $c_2 = 116$ ； $c_3 = 0.4$ ； $c_4 = 5$ ； $c_5 = 0.0068$ [17]。

1.2 发电机模型

发电机的动态方程可用式(5)表示[18]。

$$\begin{cases} \frac{di_{qs}}{dt} = \frac{\omega_b}{L'_s} \left(-R_1 i_{qs} + \omega_s L'_s i_{qs} + \frac{\omega_r}{\omega_s} e'_{qs} - \frac{1}{T_r \omega_s} e'_{ds} - v_{qs} + \frac{L_m}{L_{rr}} v_{qr} \right) \\ \frac{di_{ds}}{dt} = \frac{\omega_b}{L'_s} \left(-\omega_s L'_s i_{qs} - R_1 i_{qs} + \frac{1}{T_r \omega_s} e'_{qs} + \frac{\omega_r}{\omega_s} e'_{ds} - v_{ds} + \frac{L_m}{L_{rr}} v_{qr} \right) \\ \frac{de'_{qs}}{dt} = \omega_b \omega_s \left[R_2 i_{ds} - \frac{1}{T_r \omega_s} e'_{qs} + \left(1 - \frac{\omega_r}{\omega_s}\right) e'_{ds} - \frac{L_m}{L_{rr}} v_{dr} \right] \\ \frac{de'_{ds}}{dt} = \omega_b \omega_s \left[-R_2 i_{ds} - \left(1 - \frac{\omega_r}{\omega_s}\right) e'_{qs} - \frac{1}{T_r \omega_s} e'_{ds} + \frac{L_m}{L_{rr}} v_{qr} \right] \end{cases} \quad (5)$$

式中： ω_b 为机械转速； ω_s 为同步角速度； ω_r 为转子角速度； e'_{ds} 和 e'_{qs} 分别为 dq 轴内部电压； i_{ds} 和 i_{qs} 分别为 dq 轴定子电流； v_{ds} 和 v_{qs} 分别为 dq 轴定子端电压； v_{dr} 和 v_{qr} 分别为 dq 轴转子端电压； L_m 和 L_{rr} 分别为定转子间互感和转子电感。

发电机产生的电磁转矩可由式(6)求得。

$$T_e = (e'_{qs} / \omega_s) i_{qs} + (e'_{ds} / \omega_s) i_{ds} \quad (6)$$

无功功率 Q_s 的计算公式为

$$Q_s = v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs} = v_{qs} i_{ds} \quad (7)$$

1.3 转轴系统模型

转轴系统通常采用等价惯性常数为 H_m 的集中惯量系统进行简单的建模，如式(8)所示[19]。

$$H_m = H_l + H_g \quad (8)$$

式中： H_l 和 H_g 分别为风轮机和发电机的惯性常数。

机电动态方程计算公式为

$$\frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{2H_m} (T_m - T_e - D\omega_m) \quad (9)$$

式中： ω_m 为聚合系统的旋转角速度，与发电机的转子角速度 ω_r 相等； D 为集中惯量系统的综合阻尼； T_m 为机械转矩，并满足 $T_m = P_m / \omega_m$ 。

2 群灰狼优化算法

GGWO 引入“分组”机制，扩展了 GWO 的领导等级，以模仿灰狼群体间更广泛更深入的合作，从而提高寻优的效率和精度。与原有的 GWO 相比，GGWO 有如下三个有前景的特点：

1) 灰狼分为独立的两组，即：合作狩猎组，随机侦察组。前者包括四种类型的灰狼，即 α 、 β 、 δ 和 ω 狼，而后者仅包括 δ 狼。

2) 随机侦察组的任务是对未知环境进行更广泛的探索，以提高全局最优收敛性；而合作狩猎组则通过增加 β 和 δ 狼的数量来进化，即分别为 2 只 β 狼和 3 只 δ 狼，以便进行更深入的开发，从而实现更深度的局部探索。

3) 合作狩猎组中的 α 、 β 和 δ 狼可以在下次迭代过程中根据他们当前适应度函数，与随机侦察组中的 δ 狼进行角色互换。因此，GGWO 可以在算法全局搜索与局部探索间取得适当的平衡。

2.1 领导等级、任务分配和角色互换

原始 GWO 采用单组灰狼进行狩猎，包含 α 、 β 、 δ 和 ω 四种类型的灰狼。而 GGWO 将灰狼分为合作狩猎组和随机侦察组两组， δ 狼分为狩猎狼 (δ_1) 和侦察狼 (δ_2) 两种类型。其中，合作狩猎组中的 β 狼和 δ 狼较 GWO 分别增至 2 个和 3 个。GGWO 中灰狼的领导等级规定如图 2 所示： α 为最高级别的灰狼， β 为排位第二第三的次等级别的灰狼，而 δ_1 代表排位第四、第五和第六的中等级别的狩猎狼，其余的是中等级的侦察狼 δ_2 和下等级的 ω 狼。

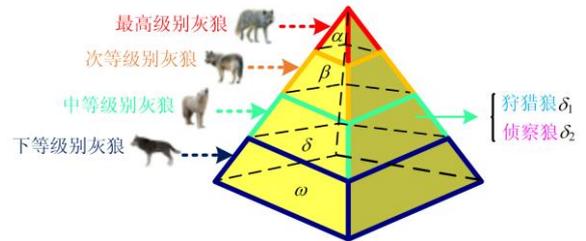


图 2 GGWO 所使用灰狼的领导等级(优势等级由上而下递减)

Fig. 2 Leadership hierarchy of the grey wolves employed in GGWO (dominance level degrades from the top to bottom)

合作狩猎组包含 α 、 β 、 δ 和 ω 狼，它们会进

行深度的局部探索。随机侦察组中的 δ_2 狼会进行广泛的全局搜索。此外,合作狩猎组中的 α 、 β 和 δ_1 狼与随机侦察组中的 δ_2 狼会在下一次迭代中由其当前适应度函数,进行角色交换,从而平衡算法全局搜索与局部探索间的矛盾。

2.2 猎物包围策略

在合作狩猎组,所有灰狼在狩猎过程中对猎物的围捕策略,可以描述为^[20]式(10)和式(11)。

$$\vec{D} = |\vec{C} \cdot \vec{X}_p(t) - \vec{X}(t)| \quad (10)$$

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}_p(t) - \vec{A} \cdot \vec{D} \quad (11)$$

式中: t 代表当前迭代过程; \vec{X}_p 和 \vec{X} 分别为猎物和灰狼的定位向量; \vec{A} 和 \vec{C} 分别为系数向量,如式(12)和式(13)设计所示。

$$\vec{A} = 2\vec{a} \cdot \vec{r}_1 - \vec{a} \quad (12)$$

$$\vec{C} = 2 \cdot \vec{r}_2 \quad (13)$$

式中: \vec{a} 为包围系数向量,其分量在每次迭代过程中从2线性下降到0;而 \vec{r}_1 和 \vec{r}_2 分别为[0, 1]中的均匀分布的随机向量。

此外,包围系数向量 \vec{a} 的值决定了系数向量 \vec{A} 。如果 $|\vec{A}| < 1$,灰狼会攻击当前猎物。而 $|\vec{A}| > 1$,它们将离开当前猎物,并寻找下一个潜在的猎物。

2.3 猎物捕捉策略

如图3所示,为了进行组织良好的狩猎,合作狩猎组将由 α 、 β 和 δ 狼共同领导,一般来说,这些领导者拥有最丰富的经验,并且对潜在猎物准确位置有着最可靠的了解。然后,根据领导者指示的位置信息, ω 狼能够及时更新自己的位置,其位置更新的规律可以表示为

$$\begin{cases} \vec{D}_\alpha = |\vec{C}_1 \cdot \vec{X}_\alpha - \vec{X}|, \vec{D}_{\beta 1} = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_{\beta 1} - \vec{X}| \\ \vec{D}_{\beta 2} = |\vec{C}_2 \cdot \vec{X}_{\beta 2} - \vec{X}|, \vec{D}_{\delta 1} = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_{\delta 1} - \vec{X}| \\ \vec{D}_{\delta 2} = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_{\delta 2} - \vec{X}|, \vec{D}_{\delta 3} = |\vec{C}_3 \cdot \vec{X}_{\delta 3} - \vec{X}| \end{cases} \quad (14)$$

$$\begin{cases} \vec{X}_1 = \vec{X}_\alpha - \vec{A}_1 \cdot (\vec{D}_\alpha), \vec{X}_{21} = \vec{X}_{\beta 1} - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_{\beta 1}) \\ \vec{X}_{22} = \vec{X}_{\beta 2} - \vec{A}_2 \cdot (\vec{D}_{\beta 2}), \vec{X}_{31} = \vec{X}_{\delta 1} - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_{\delta 1}) \\ \vec{X}_{32} = \vec{X}_{\delta 2} - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_{\delta 2}), \vec{X}_{33} = \vec{X}_{\delta 3} - \vec{A}_3 \cdot (\vec{D}_{\delta 3}) \end{cases} \quad (15)$$

$$\begin{cases} \vec{X}(t+1) = k_\alpha \vec{X}_1 + k_\beta \left(\frac{\vec{X}_{21} + \vec{X}_{22}}{2} \right) + \\ k_\delta \left(\frac{\vec{X}_{31} + \vec{X}_{32} + \vec{X}_{33}}{3} \right) \\ k_\alpha + k_\beta + k_\delta = 1, k_\alpha \geq 0, k_\beta \geq 0, k_\delta \geq 0 \end{cases} \quad (16)$$

式中: \vec{X}_α 、 \vec{X}_β 和 \vec{X}_δ 分别为 α 、 β 和 δ_1 狼的位置;而 k_α 、 k_β 和 k_δ 分别为 α 、 β 和 δ_1 狼的引导系数。

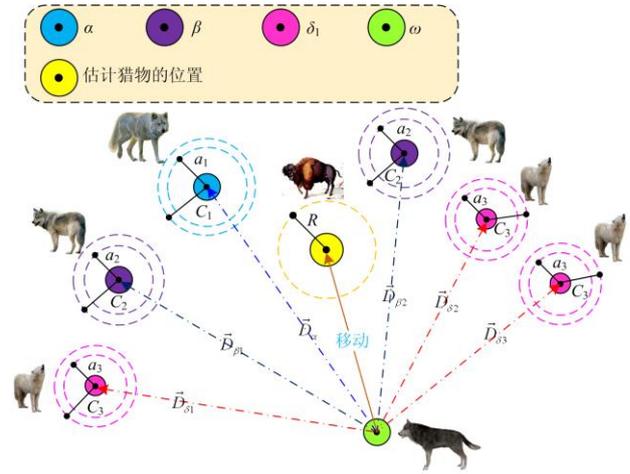


图3 GGWO采用的 ω 狼群定位引导和更新机制

Fig. 3 Location guiding and updating mechanism of the ω wolves adopted by GGWO

2.4 猎物探索策略

侦察狼 δ_2 随机探索潜在的猎物以实现深度的局部探索,它们的位置可以更新为

$$\vec{X}(t+1) = \vec{X}(t) + \vec{r}_{\delta 2} \quad (17)$$

式中, $\vec{r}_{\delta 2}$ 为一个随机的侦察矢量,范围仅受可控变量上限和下限的限制。

3 基于 GGWO 的双馈感应电机最优 PI 控制器增益参数整定

3.1 控制结构

RSC采用传统的基于PI的VC来实现MPPT,外部控制环路通过独立调节发电机转子速度和无功功率,分别获得 dq 轴转子电流参考值 i_{qr}^* 和 i_{dr}^* 。而内部控制环路通过调节这两个电流,并添加补偿项 v_{qr2} 和 v_{dr2} ,最终获得控制器输出 v_{qr} 和 v_{dr} 。上述框架构成了四个耦合的PI控制环,并通过GGWO进行优化,以获得最佳控制性能,如图4所示。相关变量定义如式(18)所示^[21]。

$$\begin{cases} S = \frac{\omega_s - \omega_r}{\omega_s} \\ \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r} \\ i_{ms} = \frac{v_{qs} - R_s i_{qs}}{\omega_s L_m} \\ v_{qr2} = s\omega_s \left(\sigma L_r i_{dr} + \frac{L_m^2 i_{ms}}{L_s} \right) \\ v_{dr2} = -s\omega_s \sigma L_r i_{qr} \end{cases} \quad (18)$$

式中: S 为发电机转差率; σ 为漏抗系数。

考虑以下三种情况: (1) 阶跃风速; (2) 随机风速; (3) 电网电压跌落, 建立 PI 控制器增益参数的优化模型, 如式(19)和式(20)所示。

$$\text{Minimize } f(x) = \sum_{\text{三种算例}} \int_0^T (|Q_s - Q_s^*| + |\omega_r - \omega_r^*| + \omega_1 |u_{qr}| + \omega_2 |u_{dr}|) dt \quad (19)$$

$$\text{subject to } \begin{cases} K_{P_{\min}} < K_{P_i} < K_{P_{\max}} \\ K_{I_{\min}} < K_{I_i} < K_{I_{\max}} \\ v_{\text{windmin}} < v_{\text{wind}} < v_{\text{windmax}} \\ v_{s\min} < v_s < v_{s\max} \\ Q_{s\min} < Q_s < Q_{s\max} \\ u_{qr\min} < u_{qr} < u_{qr\max} \\ u_{dr\min} < u_{dr} < u_{dr\max} \end{cases} \quad i = 1, 2, 3, 4, \quad (20)$$

式中: 四个耦合的 PI 控制环的参数需要进行优化调整, 它们分别表示为 K_{P_i} 和 K_{I_i} , 在相对较慢的外部控制环路中, 比例增益 K_{P_i} 和积分增益 K_{I_i} 的取值范围分别位于 $[0, 0.5]$ 和 $[0, 2]$, 而在相对较快的内部控制环路中, 它们的取值范围分别位于 $[0, 15]$ 和 $[0, 50]$; T 为每种算例下的总运算时间; 风速 v_{wind} 在 $8 \sim 12 \text{ m/s}$ 变化; 电网电压 v_s 在 $0.2 \sim 1.0 \text{ p.u.}$; 无功功率 Q_s 在 $-1.0 \sim 1.0 \text{ p.u.}$; 此外, 权重系数 $\omega_1 = \omega_2 = 1/16$ 。

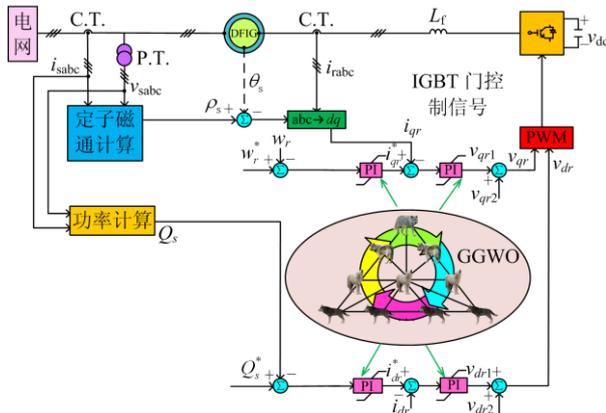


图 4 基于 GGWO 的 DFIG 控制结构

Fig. 4 Overall GGWO based control structure of DFIG

3.2 参数设置

GGWO 中, 引导系数 k_α 、 k_β 和 k_δ , 最大迭代次数 t_{\max} , 合作狩猎群的种群大小 n_h 和随机侦察群的种群大小 n_s , 这 6 个参数直接影响优化效果, 因此需要谨慎选择。本文中, 参数 t_{\max} 在给定值的区间 $\{50, 100, 150, 200, 250\}$ 中选取。一般来说, 最大迭代次数 t_{\max} 越大, 表示运算时间越长, 其得到的最优解质量相应也越高^[22]。通过试验和分析表明, 证明了最优解的存在性, 并且当最大迭代次数 $t_{\max} \geq 100$ 时, 不同算法得到的最优解仍然保持不变, 或者只是略有变化, 因此参数 t_{\max} 设置为 100 以适当缩短各种算法的运算时间。

GGWO 的其他参数通过均匀设计方法^[23]得到, 如表 1 所示。

表 1 GGWO 参数

Table 1 Parameters used in GGWO		
参数	范围	数值
k_α	$0 \leq k_\alpha \leq 1$	0.3
k_β	$0 \leq k_\beta \leq 1$	0.4
k_δ	$0 \leq k_\delta \leq 1$	0.3
t_{\max}	$t_{\max} > 1$	100
n_h	$n_h > 6$	12
n_s	$n_s \geq 1$	6

4 算例研究

本章将所提出的 GGWO 算法应用于 DFIG 的 MPPT 中, 并将其与 GA^[11]、PSO^[9]、GWO^[12]和 MFO^[15]的控制性能进行比较。

图 5 中给出了不同算法在运行 10 次后得到的 Box-and-Whisker 图, 结果表明, 在五种算法中, GGWO 的收敛稳定性最高。

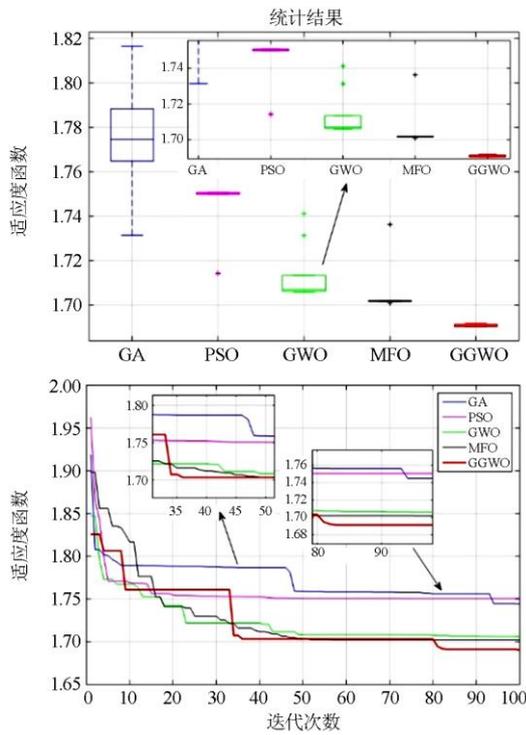


图 5 每种算法在三种情况下的统计结果

Fig. 5 Statistical results of each algorithm obtained on three cases

4.1 阶跃风速

模拟风速从 8 m/s 连续阶跃到 12 m/s, 风速每次阶跃变化增加 1 m/s。不同算法在上述工况下的系统响应如图 6 所示。可以看出, 与其他算法相比, GGWO

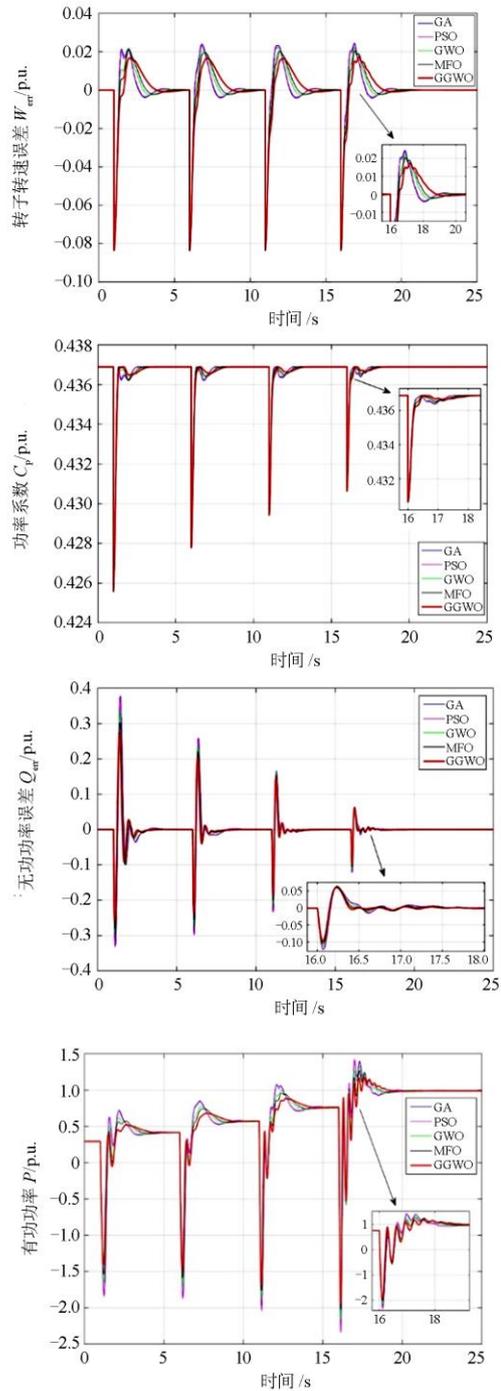


图 6 在风速从 8 m/s 到 12 m/s 连续 4 步变化情况下得到的系统响应

Fig. 6 System responses obtained in the presence of four consecutive step changes of wind speed from 8 m/s to 12 m/s

可以更平稳、更快速地调节无功功率和有功功率^[24]。

4.2 随机风速

模拟风速在 8 ~12 m/s 随机变化, 系统响应如图 7 所示。显然, GGWO 的转子角速度误差和无功功

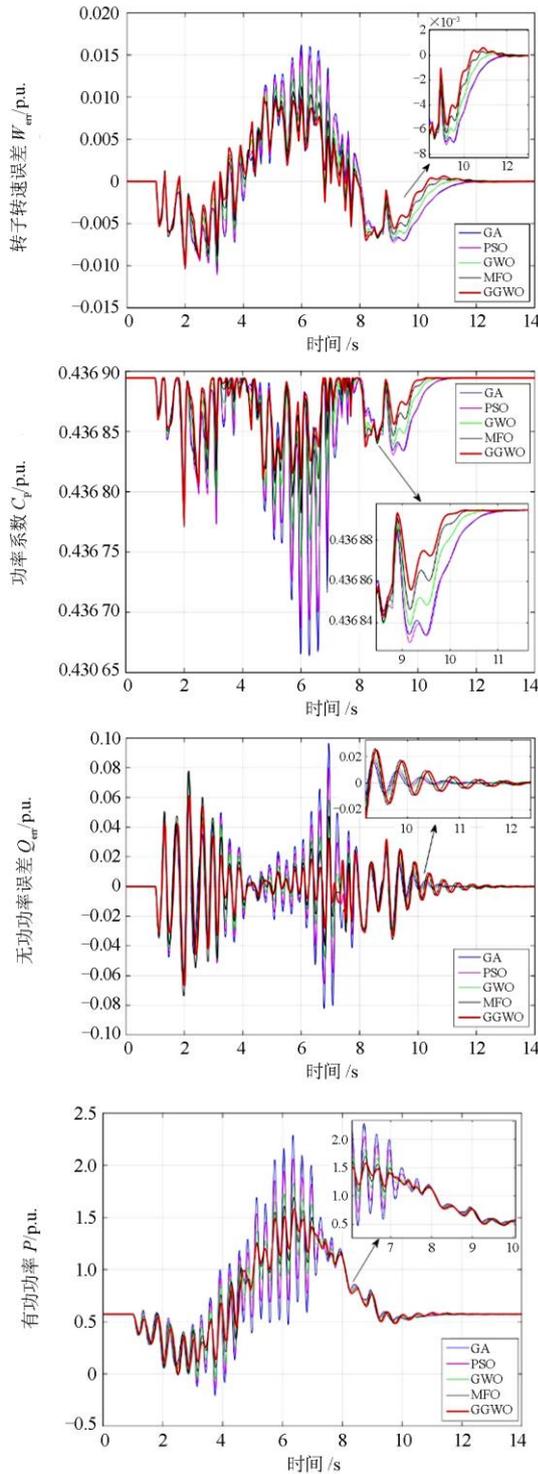


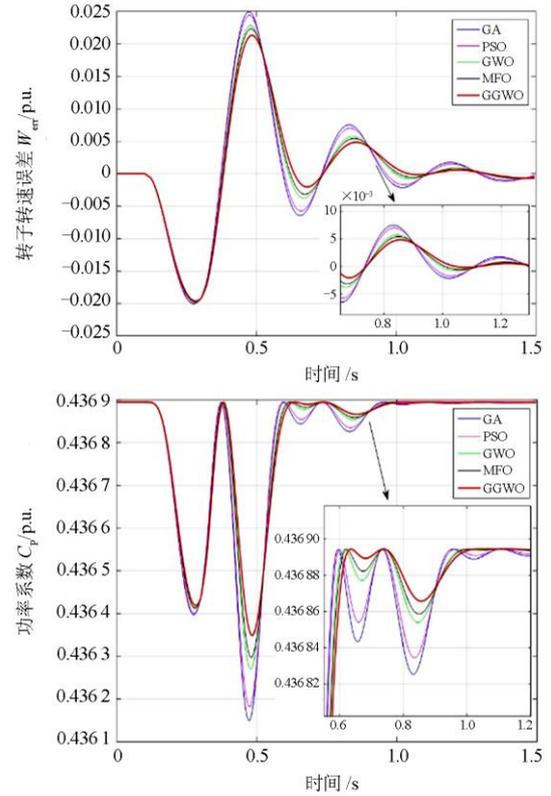
图 7 在 8~12 m/s 随机风速变化 10 s 下的系统响应

Fig. 7 System responses obtained in the presence of a 10 s random wind speed variation between 8 m/s to 12 m/s

率振荡最小, 因此其具有最平滑的控制性能。此外, 其功率系数较其他算法更接近于最优值, 因此 GGWO 能最有效地捕获最大风能。

4.3 电网电压跌落

FRT 要求 DFIG 在电网故障期间、故障恢复之后以及由于负载扰动引起电压骤降时不脱离电网运行, 并且能够向电网提供有功/无功功率控制^[25]。因此, 对电网施加一个持续时间为 0.2 s 的 30% 电压跌落。电网电压跌落下的系统响应如图 8 所示, 由图 8 可见, GGWO 能以最小的超调量快速恢复受扰系统。



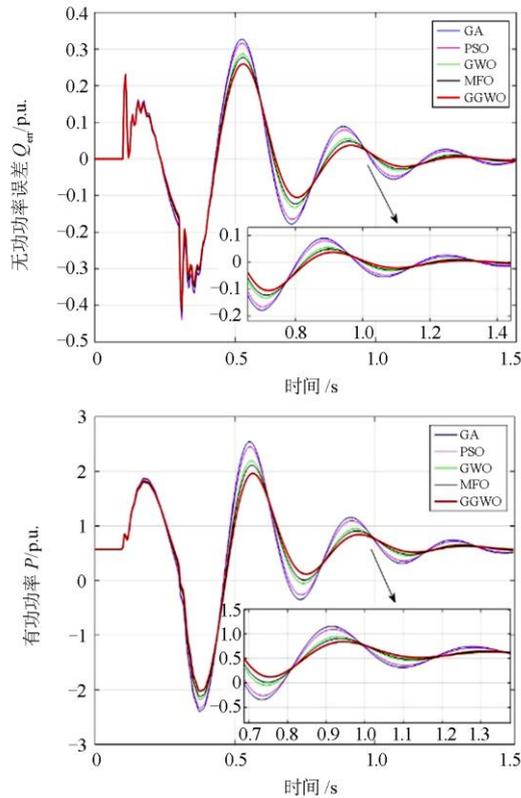


图 8 在电网电压跌落 30%的情况下获得的系统响应

Fig. 8 System responses obtained under a sudden 30% voltage drop at the power grid

4.4 定量分析

表 2 列出了各算法执行时间、收敛时间和收敛迭代次数的统计结果, 其中 PSO 的执行时间和收敛时间最短, 这是因为其在所有算法中具有最简单的优化机制。而 GGWO 由于将狼群分成合作狩猎组和随机侦察组, 分别实现广泛地全局搜索和深度的局部探索, 故执行时间相对较长。但由于算法为离线优化, 因此并不影响其实际应用。

表 2 不同算法在 10 次运行中执行时间和收敛时间的统计结果

Table 2 Statistical results of execution time and convergence time obtained by different algorithms in 10 runs

算法	执行时间/h			收敛时间/h			收敛迭代次数		
	最大	最小	平均	最大	最小	平均	最大	最小	平均
GA	24.04	19.23	23.30	23.73	4.19	7.12	74	19	30.5
PSO	6.40	5.12	6.22	6.32	1.24	2.27	80	22	36.8
GWO	7.41	5.93	6.88	7.10	1.65	3.19	85	24	45.6
MFO	7.03	5.62	6.91	6.98	2.49	3.70	81	36	53.1
GGWO	10.73	8.59	9.71	10.03	4.08	6.82	92	42	68.7

表 3 列出了三种算例下的误差绝对值积分(Integral Absolute Error, IAE)指标。其中 $IAE_x = \int_0^T |x - x^*| dt$, 并且 x^* 为变量 x 的参考值, 仿真时间 $T = 25$ s。由表 2 可见, 除在阶跃风速下, GGWO 的 IAE_{wr} 指标略高于 MFO, 其他算例下, GGWO 的 IAE 指标均最低。特别地, 在风速阶跃变化时, GGWO 的 IAE_Q 仅为 GA 的 77.57%, 随机风速变化时 GGWO 的 IAE_Q 是 GWO 的 89.54%, 电网电压跌落时 GGWO 的 IAE_Q 是 GA 的 84.35%。

表 3 三种算例下不同算法的 IAE 指标

Table 3 IAE indices of different algorithms calculated in three cases

算例	IAE	p.u.				
		GA	PSO	GWO	MFO	GGWO
阶跃	IAE_Q	0.452 93	0.441 69	0.417 11	0.386 70	0.351 32
风速	IAE_{wr}	0.222 96	0.243 29	0.254 12	0.219 75	0.231 05
随机	IAE_Q	0.263 31	0.281 59	0.290 19	0.271 98	0.259 84
风速	IAE_{wr}	0.084 33	0.089 80	0.088 27	0.081 07	0.078 99
电压	IAE_Q	0.172 56	0.169 88	0.169 57	0.157 09	0.145 56
跌落	IAE_{wr}	0.014 02	0.013 69	0.013 58	0.011 48	0.010 69

5 结论

本文提出了一种新的 GGWO 算法, 并将其用于整定 DFIG 的 PI 控制器最优参数。其主要贡献和创新点可总结为如下三点:

- (1) 狼群分为独立的两组, 包括合作狩猎组(包括 α 、 β 和 δ 狼)和随机侦察组(仅含 δ 狼)。合作狩猎组负责广泛的全局探索, 且 β 狼和 δ 狼的数量分别增加到 2 个和 3 个, 随机侦察组负责深度的局部

探索, 从而提高全局最大功率点的质量。

(2) 合作狩猎组中 α 、 β 和 δ 狼的角色, 可以在下次迭代过程中根据他们当前适应度函数, 与随机侦察组中的 δ 狼进行角色互换, 从而平衡全局搜索和局部探索的矛盾。

(3) 三种算例仿真表明, GGWO 能在不同工况下最大限度地获取风能, 且能在电网发生故障后快速恢复受扰系统, 具有最佳 FRT 能力。

参考文献

- [1] 高仕红, 崔佳咪, 胡唐超. 双馈风电机组 dc-link 电压的直接电容电流控制策略[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8): 152-158.
GAO Shihong, CUI Jiami, HU Tangchao. Direct capacitance current control strategy of dc-link voltage for doubly-fed wind power generation[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8): 152-158.
- [2] AYYARAO T S L V. Modified vector controlled DFIG wind energy system based on barrier function adaptive sliding mode control[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2019, 4(1): 34-41. DOI: 10.1186/s41601-019-0119-3.
- [3] 周步祥, 董申, 林楠, 等. 计及撬棒电路的双馈风电机组二次骤升故障穿越特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(5): 152-159.
ZHOU Buxiang, DONG Shen, LIN Nan, et al. Analysis of double-fed wind turbine's secondary high voltage ride-through characteristics considering the crowbar circuit[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(5): 152-159.
- [4] LIU J Z, MENG H M, HU Y, et al. A novel MPPT method for enhancing energy conversion efficiency taking power smoothing into account[J]. Energy Conversion Management, 2015, 101: 738-748.
- [5] 金林骏, 方建安, 潘磊宁. 一种基于改进的粒子群优化算法的神经网络 PID 控制器[J]. 机电工程, 2015, 32(2): 295-300.
JIN Linjun, FANG Jian'an, PAN Leining. Neural PID controller based on improved particle swarm optimization algorithm[J]. Journal of Mechanical and Electrical Engineering, 2015, 32(2): 295-300.
- [6] XIONG P, SUN D. Backstepping-based DPC strategy of a wind turbine-driven DFIG under normal and harmonic grid voltage[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(6): 4216-4225.
- [7] LIU H, LI S. Speed control for PMSM servo system using predictive functional control and extended state observer[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(2): 1171-1183.
- [8] LI S H, HASKEW T A, WILLIAMS K A, et al. Control of DFIG wind turbine with direct-current vector control configuration[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2012, 3(1): 1-11.
- [9] 胡江, 魏星. 基于自适应粒子群算法的直流输电 PI 控制器参数优化[J]. 电网技术, 2008, 32(增刊 2): 71-74.
HU Jiang, WEI Xing. Parameter optimization of HVDC technology PI controller based on adaptive particle swarm optimization[J]. Power System Technology, 2008, 32(S2): 71-74.
- [10] 段建东, 杨杉. 基于改进差分进化法的含双馈型风电场的配电网无功优化[J]. 电力自动化设备, 2013, 33(11): 123-127.
DUAN Jiandong, YANG Shan. Reactive power optimization based on modified differential evolution algorithm for power distribution system with DFIG wind farms[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013, 33(11): 123-127.
- [11] VRIONIS T D, KOUTIVA X I, VOVOS N A, et al. A genetic algorithm-based low voltage ride-through control strategy for grid connected doubly fed induction wind generators[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2014, 29(3): 1325-1334.
- [12] FEHMI B O. Effects of dominant wolves in grey wolf optimization algorithm[J]. Applied Soft Computing Journal, 2019, 83(6): 115-119.
- [13] JAYABARATHI T, RAGHUNATHAN T, ADARSH B R, et al. Economic dispatch using hybrid grey wolf optimizer[J]. Energy, 2016, 111: 630-641.
- [14] SONG X, TANG L, ZHAO S, et al. Grey wolf optimizer for parameter estimation in surface waves[J]. Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2015, 75: 147-157.
- [15] MIRJALILI S. Moth-flame optimization algorithm: a novel nature-inspired heuristic paradigm[J]. Knowledge-Based Systems, 2015, 89: 228-249.
- [16] CHAMAN M A. Superdefect photonic crystal filter optimization using grey wolf optimizer[J]. IEEE Photonics Technology Letters, 2015, 27(22): 2355-2358.
- [17] LIU J, MENG H, HU Y, et al. A novel MPPT method for enhancing energy conversion efficiency taking power smoothing into account[J]. Energy Conversion and Management, 2015, 101: 738-748.
- [18] YANG B, JIANG L, WANG L, et al. Nonlinear maximum power point tracking control and modal analysis of DFIG based wind turbine[J]. International Journal of Electrical Power and Energy Systems, 2016, 74: 429-436.
- [19] WU F, ZHANG X P, JU P, et al. Decentralized nonlinear

- control of wind turbine with doubly fed induction generator[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(2): 613-621.
- [20] MIRJALILI S, MIRJALILI S M, ANDREW L. Grey wolf optimizer[J]. Advances in Engineering Software, 2014, 69: 46-61.
- [21] QIAO W. Dynamic modeling and control of doubly fed induction generators driven by wind turbines[C] // 2009 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition March 15-18, 2009, Seattle, WA, USA: 1-8.
- [22] 左剑, 谢平平, 李银红, 等. 基于智能优化算法的互联电网负荷频率控制器设计及其控制性能分析[J]. 电工技术学报, 2018, 33(3): 478-489.
- ZUO Jian, XIE Pingping, LI Yinhong, et al. Intelligent Optimization algorithm based load frequency controller design and its control performance assessment in interconnected power grids[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(3): 478-489.
- [23] FANG K T, LIN D K J, WINKER P, et al. Uniform design: theory and application[J]. Technometrics, 2000, 42(3): 237-248.
- [24] 康祎龙, 郑婷婷, 苗世洪, 等. 不平衡电网电压下双馈感应发电机系统串联和并联网侧变换器协调控制策略[J]. 电工技术学报, 2018, 33(1): 193-204.
- KANG Yilong, ZHENG Tingting, MIAO Shihong, et al. Coordinated control strategy of series and parallel grid side converters for DFIG systems under unbalanced grid voltage[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(1): 193-204.
- [25] 徐岩, 申南轩, 朱晓荣, 等. 适用于继电保护整定计算的双馈风电机组等效模型[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(18): 114-120.
- XU Yan, SHEN Nanxuan, ZHU Xiaorong, et al. Equivalent model of DFIG for relay protection setting calculation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(18): 114-120.

收稿日期: 2019-09-03

作者简介:

赵瑞锋(1981—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度运行;

郭文鑫(1985—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度运行;

王彬(1987—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统调度运行、电力市场。

(编辑 周金梅)