

提高风电场可靠性的自适应最优过流保护方案

沈 平

国核电力规划设计研究院有限公司, 北京

收稿日期: 2022年11月19日; 录用日期: 2022年12月19日; 发布日期: 2022年12月27日

摘 要

本文提出了一种新的基于灰狼优化算法(GWO)的自适应大型风电场过流保护方案。自适应保护方案克服了传统保护方案的局限性, 在传统保护方案中继电器的误操作会引起电源系统中的部件故障。在不同的风速下, 大范围的电流被供给到电网中。此时, 在只有一组过电流继电器(OCR)的情况下, 会导致严重的失调和误跳闸。实验证明, 基于GWO的自适应过电流保护方案能够显著地改善风电场的OCR运行时间。

关键词

自适应保护, 灰狼优化算法(GWO), 电力系统保护, 风电场

Self-Adaptive Optimal Overcurrent Protection Scheme Improving Reliability of Wind Power Plant

Ping Shen

China Nuclear Power Planning and Design Institute Co., Ltd., Beijing

Received: Nov. 19th, 2022; accepted: Dec. 19th, 2022; published: Dec. 27th, 2022

Abstract

An innovative self-adaptive optimization algorithm based on grey wolf optimization (GWO) overcurrent protection scheme for large-scale wind power plants is proposed in this work. The self-adaptive protection scheme overcomes the limitation of conventional protection schemes, in which incorrect action of rely results in component fault of the power system. The large range current is supplied to the power grid under different wind speeds. In this condition, severe offset and mistrip occur with only one set of overcurrent relay (OCR). It is experimentally approved that the self-adaptive overcurrent protective scheme based on GWO is able to enormously improve the

run time of OCR of the wind power plant.

Keywords

Self-Adaptive Protection, Grey Wolf Optimization (GWO), Power System Protection, Wind Power Plant

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在现代电力系统中,随着风能、太阳能等可再生能源的渗透,发电的主要来源并不总是稳定的,而是在不同的时间范围内急剧波动[1]。对于大型风电场来说,这个问题更加明显,风速的显著变化会影响电网侧的发电量[2]。此外,由于风机故障无法运行或风机维护等意外事件,一个或多个供给装置可能无法运行。因此,风电场的发电量和电流特性在一年中不同的月份或季节可能会有较大的差异。

论文[3]中表明,在故障状态和正常运行状态,上述情况会给电力系统保护继电器、协调及其性能带来严重的问题。例如,如果风电场的一个风力涡轮机正在进行维护,该风力涡轮机将处于离线状态,不会向电网输送任何电力,在风力涡轮机故障时与所有风力涡轮机都在运行向电网提供电力[4]时的风电场产生的电流特性完全不同。因此,如果继电器是静态的,不根据风电场的动态行为调整其设置,将导致保护继电器[5]的不协调、不灵敏、盲目和误操作。在这种情况下,可能严重损坏电力设备,降低电能质量、稳定性、安全性和风力发电场的可靠性。因此,针对上述问题,设计适合风力发电场的保护方案迫在眉睫。

论文[6]中提出了一种风电场长距离输电线路的自适应距离保护方案,通过集成的方法改变继电器特性,可以自适应地改变距离保护的设置,并同时考虑到了晶闸管控制的串联补偿、风电和故障电阻的不利影响因素。在论文[7]中,针对连接海上风电场的高压直流电压源变换器,提出了一种基于自适应下垂的分级最优电压控制方案。通过协调风力涡轮机和风电场电网侧 VSC,最小化风电场内部总线的电压偏离标称电压,从而缓解无功功率(VAR)波动。一些研究人员还考虑设计一种自适应重合闸风电场高渗透电网方案[8] [9]、考虑局部风电场谐波对故障发生时继电器性能的影响。

为此,本文提出了一种新的基于灰狼优化算法(GWO)的自适应大型风电场过流保护方案,可显著提高风电场运行的安全性和可靠性。本文建立了一个大型风电场的模型,用于进行故障分析、继电器设置和协调计算。采用 GWO 实现了过电流继电器(OCR)的最佳协调,并通过仿真和实验结果验证了提出的 GWO 技术用于提高风电场保护的可靠性和高效性,并与其他流行的高效优化技术进行了比较,其中,所提出的 GWO 自适应最优保护协调方案具有较好的性能。

本文的组织结构如下。第二节介绍了灰狼优化算法(GWO),第三节介绍了最佳 OCR 协调的 GWO 技术,第四节给出了仿真和实验结果,并进行了适当的讨论和分析。最后,第五部分对本文进行了总结。

2. 灰狼算法

灰狼优化算法(GWO),通过以下优点局部最优避免、达到全局最优值、无求导机制、灵活性和简单性,得出最佳解决方案[10]。GWO 算法是基于种群的优化算法,它模拟了自然界灰狼的领导层级和狩猎

机制。灰狼具有非常严格的社会等级层次制度，见图 1，图中第一层是种群中的领导者，称为 α ，是算法中的最优解。

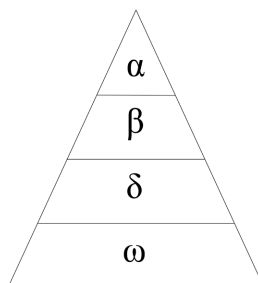


Figure 1. Grey wolf social hierarchy
图 1. 灰狼社会等级结构

图中第二层是领导者 α 的智囊团，称为 β ，是算法中的第二最优解。图中第三层是在种群中负责侦查做事的工人，称为 δ ，是算法中的第三最优解。在算法中，适应度不好的 α 和 β 也会降为 δ 。图中最底层是 ω ，是算法中的备选解。

GWO 算法流程图见图 2。

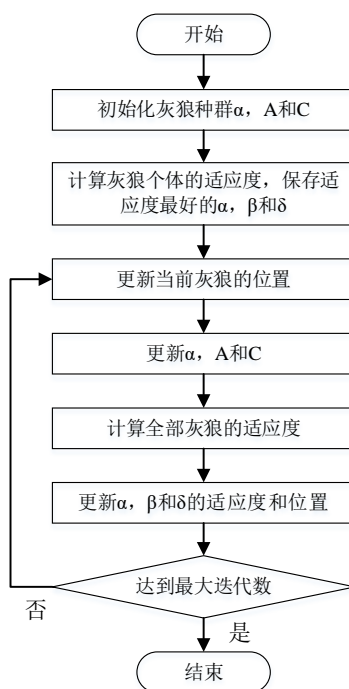


Figure 2. General flowchart for grey wolf optimizer algorithm
图 2. GWO 算法通用流程图

在狩猎过程中，灰狼有包围猎物的倾向；因此，可以为此类行为设计如下数学模型：

$$D = |C \cdot X_p(t) - X(t)| \quad (1)$$

$$X(t+1) = X_p(t) - A \cdot D \quad (2)$$

上述方程中, D 表示个体与猎物间的距离, 为正值, A 和 C 是系数向量, t 为迭代代数, X_p 和 X 分别是猎物和灰狼位置向量。

A 和 C 系数向量的计算如下:

$$A = 2a \cdot r_1 - a \quad (3)$$

$$C = 2 \cdot r_2 \quad (4)$$

在迭代过程中, 其中, “ a ” 是收敛因子的值从 2 线性减少到 0, 而 r_1 和 r_2 是 $[0, 1]$ 中的随机向量。在迭代过程中, 选择最多的三个最优解, 根据其以前的最佳位置更新其位置。这个阶段的公式为:

$$\begin{aligned} D_\alpha &= |C_1 \cdot X_\alpha - X| \\ D_\beta &= |C_2 \cdot X_\beta - X| \\ D_\delta &= |C_3 \cdot X_\delta - X| \end{aligned} \quad (5)$$

其中, D_α , D_β 和 D_δ 分别表示 α , β 和 δ 与其他个体间的距离; X_α , X_β 和 X_δ 分别代表 α , β 和 δ 当前位置; C_1 , C_2 和 C_3 是随机向量, X 是当前灰狼个体的位置。

$$\begin{aligned} X_1 &= X_\alpha - A_1 \cdot (D_\alpha) \\ X_2 &= X_\beta - A_2 \cdot (D_\beta) \\ X_3 &= X_\delta - A_3 \cdot (D_\delta) \end{aligned} \quad (6)$$

$$X(t+1) = (X_1 + X_2 + X_3) / 3 \quad (7)$$

X_1 , X_2 和 X_3 分别表示狼群中 ω 朝向 α , β 和 δ 前进的步长和方向, A_1 , A_2 和 A_3 是随机向量, $X(t+1)$ 是 ω 的最终位置。

3. 基于 GWO 算法优化

为了优化 OCR 协调, 设定一个特定的目标函数(OF)。由于这项工作的目标是最小化继电器的总运行时间, 初步 OF 可以写为:

$$OF = \min X_1 \sum_{i=1}^n (t_i)^2 \quad (8)$$

上式中, t_i 是 OCR 的运行时间, X_1 是权重因子。 OF 函数是求 OCR 的操作时间最小值; 但是, 未考虑到协调时间间隔、时间倍增器设置(TMS), 这些协调约束也应添加进去, 确保继电器之间出现不协调。因此, 提出系数 $X_2 [\Delta t_{mb} - Y(\Delta t_{mb} - |\Delta t_{mb}|)]$, 式中, Δt_{mb} 是继电器的间隔时间。约束条件如下:

$$\begin{aligned} \Delta t_{mb} + CTI &\geq t_b - t_m \\ 0.05 &\leq TMS_i \leq 1 \\ TMS_{i\min} &\leq TMS_i \leq TMS_{i\max} \end{aligned} \quad (9)$$

最终 OF 公式如下:

$$\begin{aligned} OF &= \alpha_1 \sum_{i=1}^n (t_i)^2 + \alpha_2 \sum_{\substack{m=1 \\ b=1}}^n [\Delta t_{mb} - \beta(\Delta t_{mb} - |\Delta t_{mb}|)]^2 \\ t_i &= (0.14 * TMS_i) / \left[\left(I / I_{pickup} \right)^{0.02} - 1 \right] \end{aligned} \quad (10)$$

OF 中的第一项是 OCR 操作时间的总和, 第二项是协调约束, 以及 X_1 、 X_2 和 Y 是加权因子。 t_i 表示

OCR 的工作时间, 由 IEC 60255-151:2009 标准(17)推导而来, 相应替换为公式(10), 首先计算每个继电器的 TMS , 然后得到 TMS 的最优值。 Δt_{mb} 是区别主保护继电器和备用保护继电器之间的时间。

权重因子 X_1 、 X_2 和 Y 需要定制取决于优化应用程序。在基于 GWO 的仿真过程中通过试错法测试最优的权重因子, 选定的最优参数为: $X_1 = 1$ 、 $X_2 = 2$ 和 $Y = 100$, 以便 OF 达到每个 OCR 的最小 TMS 值。

4. 仿真

假设风电场由 40 台风力涡轮机组成, 每台风力涡轮机产生 1.25 MVA 功率, 在 575 V 电压水平和 60 Hz 频率下运行。风机升压变压器额定功率为 1.5 MVA, 将风机电压从 575 V 提升至 35 kV, Y 侧接地的 Y- Δ 连接。整个风电场通过升压变压器和输电线向主公用电网累计馈电 50 MVA。线间电力变压器额定功率为 60 MVA, 在 Δ -Y 连接中将风电场电压从 35 kV 提升至 220 kV, 其中 Y 侧接地。线间输电线路长度为 50 km, 建模为三相四线, 由 R-L 串联阻抗和两组并联电容组成, 集中在线路的起点和终点, 如图 3 所示。

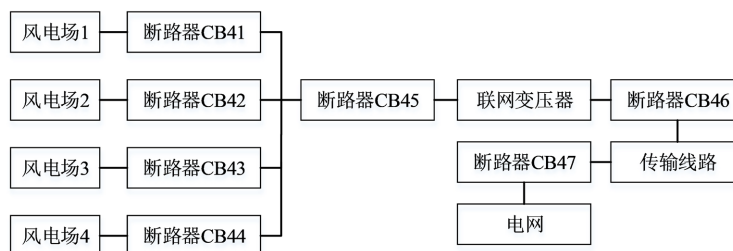


Figure 3. Simplified model of the designed large-scale wind farm

图 3. 大型风电场简单模型设计

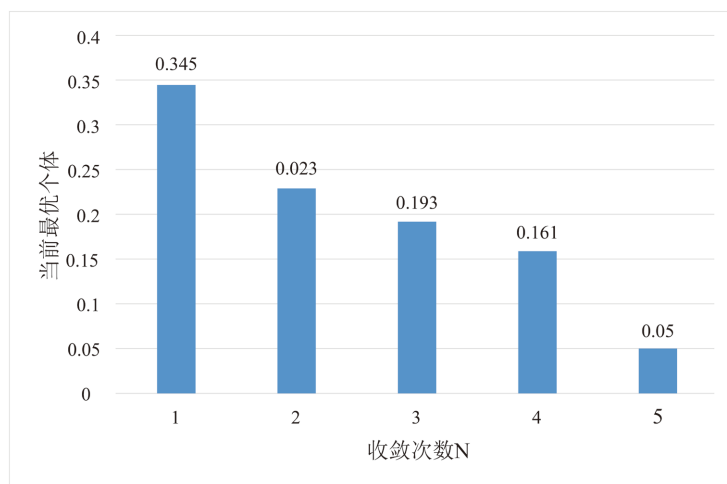


Figure 4. Simulation results of GA

图 4. 遗传算法仿真结果

每个风力涡轮机和风力涡轮机旁边的电力变压器都由高压侧的 OCR 保护, 相应断路器标志为 CB1、CB2、……CB40。每个风电场本身都由另一个 OCR 和 CB 保护, 见图 3 中所示的 CB41-44。靠近线路侧的电力变压器低压侧的整个风电场集电部分由 CB45 保护, 而变压器高压侧由 CB46 保护。最后, 连接整个风电场和电网的输电线路由 CB47 保护。

GA 优化技术是最稳健和高效的优化算法之一。为了进行比较, 选择 GA 算法作为对比算法, 图 4

显示了每个继电器在 TMS 方面的最佳解决方案。

接下来,为每个组设置实施基于 GWO 的优化技术,以优化 TMS 和 OCR 的操作时间。优化过程中,个人之间的平均距离越小,结果越好。在模拟开始时,适应度函数(OF)最优的个体值非常大,这意味着结果不是最优的。在 GWO 优化过程中,适应度函数开始显著减小,并达到平均距离的临界点。此时,结果变得稳定,无法进一步改善(收敛到最小值)。即认为, GWO 已成功获得最佳值,得到每个继电器组设置的 TMS (即运行时间)最小值。收敛后,每个继电器的最佳 TMS 设置如图 5 所示,与 GA 相比, GWO 算法给出的 TMS 更小,其结果明显更好。

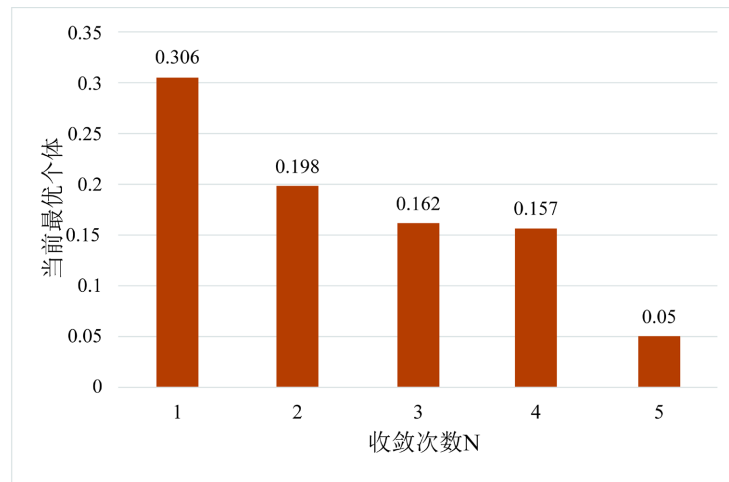


Figure 5. Simulation results of GWO

图 5. 灰狼算法仿真结果

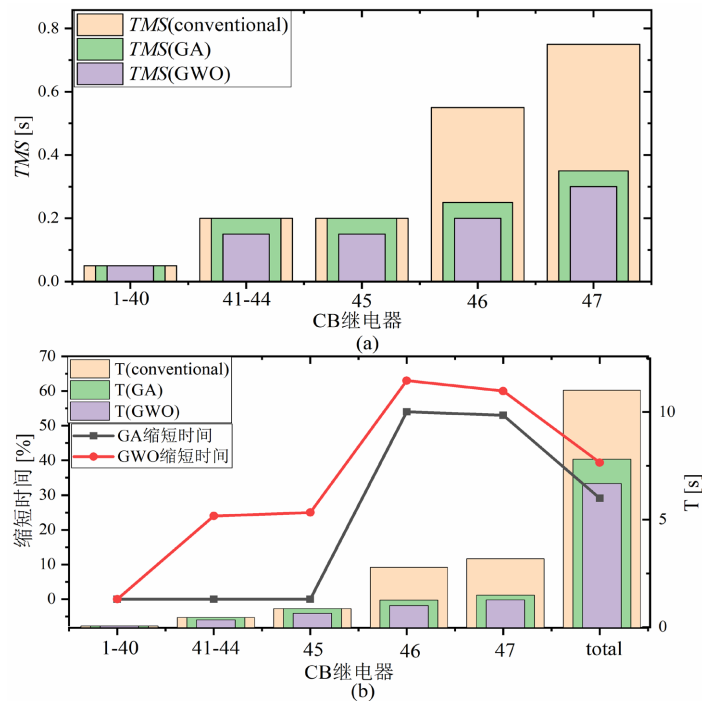


Figure 6. Comparison of coordination methods of GWO, GA and conventional relays

图 6. GWO、GA 和常规继电器协调方法比较

图 6 所示为 GWO、GA 和常规继电器协调方法比较。其中图 6(a)为三种算法给出的各台继电器的 TMS 值，图 6(b)为三种算法给出的总时间 T 与 GWO、GA 相对常规方法的时间缩短百分比。由图可知，相对常规继电器协调方法，GA 算法能降低继电器的 TMS 和总时间 T ，而所提方法对 T 的减少量相对 GA 算法更为显著，最多能比 GA 算法多减少 25% (45 号继电器)，证明了所提方法在大型风电场的继电器协调优化中优于其他技术。

5. 结论

本文提出了一种基于 GWO 的大型风电场自适应最优过流保护方案。虑到协调时间间隔、时间倍增器设置(TMS)等协调约束，提出了一个 OF ，以通过 GWO 优化最小化 OCR 的 TMS 值(即继电器的运行时间)。通过仿真将所提 GWO 的性能与常规继电器协调方法和 GA 优化的性能进行了仿真对比。结果表明，所提方法能得到更低的 OCR 的 TMS 值，改善电场的 OCR 运行时间，具有更优异的性能。

参考文献

- [1] Zhang, H.B., Gruson, F., Rodriguez, D.M.F. and Saudemont, C. (2019) Overvoltage Limitation Method of an Offshore Wind Farm with DC Series-Parallel Collection Grid. *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, **10**, 204-213. <https://doi.org/10.1109/TSSTE.2018.2829929>
- [2] Rezaei, N., Uddin, M.N., Amin, I.K., Othman, M.L., Marsadek, M.B. and Hasan, M.M. (2020) A Novel Hybrid Machine Learning Classifier-Based Digital Differential Protection Scheme for Intertie Zone of Large-Scale Centralized DFIG-Based Wind Farms. *IEEE Transactions on Industry Applications*, **56**, 3453-3465. <https://doi.org/10.1109/TIA.2020.2990584>
- [3] Rezaei, N. and Uddin, M.N. (2021) Fuzzy Logic Based Adaptive Overcurrent Protection for Wind Farms. 2021 *2nd International Conference on Robotics, Electrical and Signal Processing Techniques*, Dhaka, January 2021, 768-771. <https://doi.org/10.1109/ICREST51555.2021.9331046>
- [4] Chen, S., Tai, N.L., Fan, C.J., Liu, J. and Hong, S.B. (2017) Adaptive Distance Protection for Grounded Fault of Lines Connected with Doubly-Fed Induction Generators. *IET Generation, Transmission & Distribution*, **11**, 1513-1520. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2016.1145>
- [5] Ma, J., Zhang, W.B., Liu, J. and Thorp, J.S. (2018) A Novel Adaptive Distance Protection Scheme for DFIG Wind Farm Collector Lines. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, **94**, 234-244. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.07.008>
- [6] Papaspiliotopoulos, V.A., Korres, G.N. and Maratos, N.G. (2017) A Novel Quadratically Constrained Quadratic Programming Method for Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **32**, 3-10. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2015.2455015>
- [7] Mohamed, A.A.R., Sharaf, H.M. and Ibrahim, D.K. (2021) Enhancing Distance Protection of Long Transmission Lines Compensated with TCSC and Connected with Wind Power. *IEEE Access*, **9**, 46717-46730. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3067701>
- [8] Huang, S., Wu, Q.W., Liao, W., Wu, G.P., Li, X.P. and Wei, J. (2021) Adaptive Droop-Based Hierarchical Optimal Voltage Control Scheme for VSC-HVdc Connected Offshore Wind Farm. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, **17**, 8165-8176. <https://doi.org/10.1109/TII.2021.3065375>
- [9] Le Blond, S.P. and Aggarwal, R.K. (2012) Design of Adaptive Autoreclosure Schemes for 132 kV Network with High Penetration of Wind—Part I: Real-Time Modeling. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **27**, 1055-1062. <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2012.2188651>
- [10] 毛志宇, 蒋叶, 李培强, 陈江雨. 基于改进灰狼算法的配电网储能优化配置[J]. 电力系统及其自动化学报, 2022, 34(6): 1-8.