

基于改进GWO-PSO算法的变电站二次系统保护策略

栾士岩¹, 魏颖莉¹, 杨晶鑫¹, 杜梓铭¹, 张乾¹, 郭祥阳²

(1. 国网河北雄安新区供电公司, 河北保定 030021;

2. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北宜昌 443000)

摘要: 微电网在并网或孤岛等不同模式运行时, 网络拓扑结构的变化对变电站二次系统的协调保护策略提出了较高的要求。为此, 提出一种基于结合改进灰狼优化算法和粒子群优化算法的变电站二次系统保护策略。首先, 以最小化变电站中所有继电器的总动作时间为目标建立数学模型; 然后, 针对过电流继电器协调优化问题, 将灰狼优化器和粒子群优化结合, 采用改进后的GWO-PSO算法进行模型求解; 继而, 采用中央保护中心、智能电子设备和通信通道来获取和传输实时数据, 提出了微电网在不同模式下的变电站继电保护策略。仿真结果表明, 相对于传统方法, 所提方法计算速度快且能够明显提升保护系统的速动性。

关键词: 继电保护; 变电站; 保护策略; 组合算法

中图分类号: TM772

文献标志码: A

文章编号: 2096-4145(2024)08-0122-07

Secondary System Protection Strategy of Substation Based on Improved GWO-PSO Algorithm

LUAN Shiyan¹, WEI Yingli¹, YANG Jingxin¹, DU Ziming¹, ZHANG Qian¹,
GUO Xiangyang²

(1. State Grid Xiong'an New Area Power Supply Company, Baoding 030021, China; 2. School of Electrical Engineering and New Energy, Three Gorges University, Yichang 443000, China)

Abstract: When microgrids operate in different modes such as grid connection or islanding, the changes of network topology pose high requirements for the coordinated protection strategy of substation secondary systems. Therefore, a substation secondary system protection strategy based on combining the improved gray wolf optimization (GWO) and particle swarm optimization (PSO) algorithms is proposed. Firstly, the mathematical model is established with the goal of minimizing the total operating time of all relays in the substation; Then, for the coordination optimization problem of overcurrent relays, the gray wolf optimizer and particle swarm optimization are combined, the improved GWO-PSO algorithm are used to solve the model; Subsequently, a central protection center, intelligent electronic devices and communication channels are used to obtain and transmit real-time data, and relay protection strategies for substations in different modes of microgrids are proposed. The simulation results show that compared to traditional methods, the proposed method has faster calculation speed and can significantly improve the speed of protection system.

Key words: relay protection; substation; protection strategy; combinatorial algorithm

0 引言

高比例新能源接入后改变了电力系统的运行模式, 模糊了电力系统故障特征, 这给变电站继电保护带来了新的难题^[1-2]。相对电磁元件, 新能源接

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52107108)

Project Supported by the National Natural Science Foundation of China (52107108)

入后电力电子器件承受大电流能力弱, 电力系统发生故障后, 需要快速隔离故障以保证变电站的安全运行^[3-5]。一方面, 网络拓扑结构的改变可能导致主继电器和备用继电器之间的错误协调^[6-7]; 另一方面, 在保持所有继电器之间协调的同时, 需尽可能缩短操作时间以保证速动性的需求^[8-10]。为此, 亟需研究一种二次系统保护策略来保障变电站的可靠稳定运行。

继电保护系统在保证变电站稳定运行方面发挥

着重要作用,目前已有较多学者针对精确、可靠和快速的继电器策略问题进行深入研究^[11-14]。文献[15]基于半监督马氏距离机器学习算法为继电保护系统的运行维护提供了可靠的定量依据,为相对保护策略提供定量参考。文献[16]提出了一种用于定向过电流继电器在线整定变化的自适应保护协调方案,但模型求解困难。文献[17]研究了太阳能光伏发电厂对继电器协调的影响,通过使用混合保护方案解决了分布式电源渗透对继电保护问题带来的影响。为了提高继电器的功能及其协调性,文献[18]提出一种用于并网和孤岛模式下的微电网通信辅助策略,微电网中的储能系统有助于提高故障电流水平,以便在微电网处于孤岛模式时更新设置。但是,当系统网络结构发生改变时,该方法并不适用,需要考虑继电保护方案的协调性和求解方法的有效性。

为了改善继电系统的协调性,诸多优化算法如遗传算法、粒子群算法(Particle Swarm Optimization, PSO)、引力搜索算法、灰狼算法(Grey Wolf Optimization, GWO)、布谷鸟算法和萤火虫算法等被用来解决继电器的协调问题^[19-21]。文献[22]基于线性规划法对继电器协调问题进行建模以获得继电器的最佳时间乘数设置,但所提算法收敛速度慢,易陷入局部最优。文献[23]基于灰狼算法对单回路和多回路配电网中的继电器协调问题进行优化,减少了迭代次数和计算时间。文献[24-25]考虑了分布式电源的随机性和网络拓扑结构,提出了一种自适应保护算法,可根据有源网状配电网中分布式电源引起的不同故障电流和路径确定最佳保护设置,但未考虑微电网不同运行模式下的约束条件,适应性有限。为了考虑拓扑结构的变化,在设计继电器协调问题时必须考虑所有模式的约束。

本文以变电站中所有继电器的总动作时间最小为目标,针对过电流继电器协调优化问题,将灰狼优化器和粒子群优化结合,采用改进后的GWO-PSO算法进行模型求解,提出了针对微电网在不同接入模式下的变电站保护策略。通过仿真验证了所提方法的有效性。

1 继电保护协调配合模型构建

1.1 目标函数

为了保持变电站二次系统的可靠性,继电器需要系统发生故障时在最短的时间内动作,本文以最

小化变电站二次系统中所有继电器的总动作时间为目标建立目标函数,可以表示为:

$$\min_{-s} = \sum_{i=1}^n t_{i,k} \quad (1)$$

式中: n 为继电器的数量; $t_{i,k}$ 为第 k 个区域中第 i 个继电器故障动作时间。

1.2 约束条件

1.2.1 继电器动作时间约束

继电器动作时间约束为:

$$t_{i,k \min} \leq t_{i,k} \leq t_{i,k \max} \quad (2)$$

式中: $t_{i,k \min}$ 为第 k 个区域第 i 个继电器的最小动作时间,取0.1 s; $t_{i,k \max}$ 为第 k 个区域第 i 个继电器的最大动作时间,取2 s。

1.2.2 时间乘数设置约束

时间乘数设置(Time Multiplier Settings, TMS)约束表示为:

$$T_{i,k \min} \leq T_{i,k} \leq T_{i,k \max} \quad (3)$$

式中: $T_{i,k}$ 为第 k 个区域第 i 个继电器的时间乘数; $T_{i,k \min}$ 和 $T_{i,k \max}$ 分别为第 k 个区域第 i 个继电器的最小和最大时间乘数,这个范围取0.025到1.2。

1.2.3 区域协调约束

区域协调约束为:

$$t_{bi,k} - t_{i,k} \geq \Delta t \quad (4)$$

式中: $t_{i,k}$ 为第 k 个区域中第 i 个继电器故障动作时间; $t_{bi,k}$ 为第 k 个区域第 i 个备用继电器故障的动作时间; Δt 是区域协调时间间隔(Coordination Time Interval, CTI),在本文中,其标准值取0.3 s。

1.2.4 拾取电流约束

拾取电流约束表示为:

$$I_{p \min} \leq I_p \leq I_{p \max} \quad (5)$$

式中: I_p 为继电器的拾取电流; $I_{p \min}$ 和 $I_{p \max}$ 分别为继电器的最小和最大拾取电流。

最小拾取电流取决于继电器的最大负载电流,取最大负载电流的1.5倍。在近端故障时,短路电流较大,主保护和备用保护动作关系正确,但随着故障位置逐渐远离电源点,短路电流逐渐减小,主保护的動作时间比备用保护的動作时间增加得更慢,保护间失去选择性。因此,需要通过系数调节来满足任意故障下的保护选择性,最大拾取电流可以表示为:

$$I_{p \max} = \sigma I_{\text{relay}}^{\min} \quad (6)$$

式中: σ 为调节系数; I_{relay}^{\min} 为继电器最小故障电流。

1.2.5 继电器插头设置约束

对于反时限过流保护继电器(Inverse Definite Minimum Time, IDMT),其特性为:

$$t_{IDMT} = \frac{0.14 \times T}{(P_{SM}^{0.02} - 1)} \quad (7)$$

其中,

$$P_{SM} = I_{relay} / P_S \times C_{sec} \quad (8)$$

式中: t_{IDMT} 为继电器动作时间; P_S 为插头设置; T 为时间乘数设置; P_{SM} 为插头设置乘数; I_{relay} 为继电器故障电流; C_{sec} 为电流互感器二次的额定电流。

拾取电流 I_p 是继电器动作时的最小电流值。因此,过电流继电器的 P_{SM} 定义为:

$$P_{SM} = \frac{I_{relay}}{I_p} \quad (9)$$

插头设置为继电器拾取电流和 CT 二次侧额定电流的百分比比率,表示为:

$$P_S = \frac{I_p}{C_{sec}} \quad (10)$$

式中: I_p 为继电器拾取电流; C_{sec} 为二次侧额定电流。

P_S 和 P_{SM} 之间的关系可表示为:

$$P_{SM} = \frac{I_{relay}}{P_S \times C_{sec}} \quad (11)$$

为了适应微电网不同运行模式下的变电站保护系统,需要对时间乘数设置 T 和插头设置 P_S 进行优化,实现不同运行模式下的变电站保护策略的自适应更新。

2 GWO-PSO 算法

针对本文的过电流继电器协调优化问题,由于继电器的非线性特性,从式(6)和式(7)可以看出继电器的动作时间与优化变量 T 和 P_S 之间的非线性关系。因此,优化模型可以被描述为一个非线性规划问题。本文将灰狼优化器和粒子群优化算法结合,采用混合 GWO-PSO 算法进行模型求解。

灰狼是具有严格社会等级制度的群居动物, GWO 算法中的社会等级层次分为阿尔法狼、贝塔狼、德尔塔狼和欧米茄狼,其中,阿尔法狼表示具有最优解的方案。基于灰狼的社会等级和狩猎行为,灰狼的狩猎策略主要包括以下 3 个部分:(1)追踪、追逐和接近猎物;(2)追逐、包围和骚扰猎物,直到猎物停止移动;(3)攻击猎物。灰狼位置的迭代方程为:

$$X(t+1) = X_p(t) - A * |C * X_p(t) - X(t)| \quad (12)$$

$$A = a \times (2r_1 - 1) \quad (13)$$

$$C = 2 \times r_2 \quad (14)$$

式中: $X(t+1)$ 为第 $t+1$ 次迭代后灰狼的位置; $X(t)$ 为第 t 次迭代后灰狼的位置; $X_p(t)$ 为第 t 次迭代后猎物的位置; a 为区间[0, 2]之间的随机数值; r_1, r_2 分别为区间[0, 1]之间的随机数值; A, C 为随机数。

在灰狼的狩猎过程中,所获得的 3 个最优解被保留,最优解更新如下:

$$X(t+1) = \frac{X_1 + X_2 + X_3}{3} \quad (15)$$

式中: X_1, X_2, X_3 计算如下:

$$X_1 = X_\alpha - A_1 \times D_\alpha \quad (16)$$

$$X_2 = X_\beta - A_2 \times D_\beta \quad (17)$$

$$X_3 = X_\delta - A_3 \times D_\delta \quad (18)$$

式中: $X_\alpha, X_\beta, X_\delta$ 分别为阿尔法狼、贝塔狼和德尔塔狼; A_1, A_2, A_3 为随机数; $D_\alpha, D_\beta, D_\delta$ 分别为阿尔法狼、贝塔狼和德尔塔狼对应的替换变量。

$$D_\alpha = |C_1 \times X_\alpha - X| \quad (19)$$

$$D_\beta = |C_2 \times X_\beta - X| \quad (20)$$

$$D_\delta = |C_3 \times X_\delta - X| \quad (21)$$

式中: C_1, C_2, C_3 为随机数; X 为灰狼的位置。

GWO 在寻优过程中不考虑个体自身的经验,缺乏个体位置和群体位置的交流,可能会导致算法出现早熟收敛,容易陷入局部最优。为此,本文兼顾了算法的收敛速度和精度。将 PSO 中的速度和位置向量引入到 GWO 中,然后用 PSO 算法改进阿尔法灰狼的位置,使灰狼算法在寻优时具有记忆性。通过调节惯性常数以协调混合算法平衡全局搜索及局部开发能力。PSO 算法中每个粒子通过搜索空间以随机速度移动,具有 S 维搜索空间的每个粒子个体的位置表示为:

$$X_i = (X_{i1} X_{i2} X_{i3} \cdots X_{iS}) \quad (22)$$

式中: $X_{i1}, X_{i2}, \dots, X_{iS}$ 分别为第 i 个粒子在 1 维, 2 维和 S 维空间的位置。

每个粒子移动以成为新的粒子位置,粒子位置更新表示为:

$$V_i^{(t+1)} = \omega(t) \cdot V_i^{(t)} + c_1 r_1 (p_{best}^{(t)} - X_i^{(t)}) + c_2 r_2 (g_{best}^{(t)} - X_i^{(t)}) \quad (23)$$

$$X_i^{(t+1)} = X_i^{(t)} + V_i^{(t+1)} \quad (24)$$

式中: c_1, c_2 为加速度系数; r_1, r_2 为区间[0, 1]之间

的随机数值; $\omega(t)$ 为第 t 次迭代的惯性权重; $p_{best}^{(t)}$ 为第 t 次迭代的最优位置; $g_{best}^{(t)}$ 为第 t 次迭代的次优位置; $V_i^{(t)}$ 为第 t 次迭代的粒子位置; $V_i^{(t+1)}$ 为第 $t+1$ 次迭代的粒子位置; $X_i^{(t)}$ 为第 t 次迭代后 WGO 算法中灰狼的位置。

第 t 次迭代的惯性权重 $\omega(t)$ 为:

$$\omega(t) = \left(\omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{2} \right) \times t \quad (25)$$

式中: ω_{\max} , ω_{\min} 分别为最大和最小惯性权重。

通过惯性权重提升 GWO 算法的寻优能力,改进后的控制方程组为:

$$D_{\alpha} = |C_1 \times X_{\alpha} - \omega(t) \cdot X| \quad (26)$$

$$D_{\beta} = |C_2 \times X_{\beta} - \omega(t) \cdot X| \quad (27)$$

$$D_{\delta} = |C_3 \times X_{\delta} - \omega(t) \cdot X| \quad (28)$$

3 变电站二次系统保护策略

基于 IEC 255-03 通信协议,变电站继电器通过从远程或现场智能电子设备 (Intelligent Electronic Devices, IED) 和通信链路接收的数据进行在线更新。

每个断路器的状态将对应于微电网不同的运行模式,在并网模式中有 N 种情况,而在孤岛模式中则会有 $N-1$ 种情况,中央保护中心 (Central Protection Computer, CPC) 将根据微电网不同模式不断更新。

对于并网模式,在识别微电网拓扑结构之后,进行故障电流计算,根据故障位置选择主继电器对和备用继电器对,基于改进后的 GWO-PSO 算法获得时间乘数设置和插头设置的优化值,然后计算目标函数和 CTI,进而更新继电器设置,确保主继电器和备用继电器之间不会出现错位。CPC 保存了不同运行模式下微电网的继电器设置信息以及每个母线和馈线的电流、电压、负载和发电机的实时数据。当 PCC 断路器断开时,则将在 CPC 求解器中切换为孤岛模式,孤岛模式设置也提前在 CPC 中进行更新。

如果识别出故障,CPC 将根据公共耦合点 (Point Of Common Coupling, PCC) 断路器的打开/关闭状态信息获取系统的运行模式。CPC 将根据已保存的设置更新每个反时限过流保护继电器设置。然后检查主继电器和备用继电器之间的协调

是否处于保持状态,如果保持不变,则通过更新设置,将跳闸命令发送到断路器,如果保持变化,则通过 CPC 重新计算设置。所提保护策略如图 1 所示。

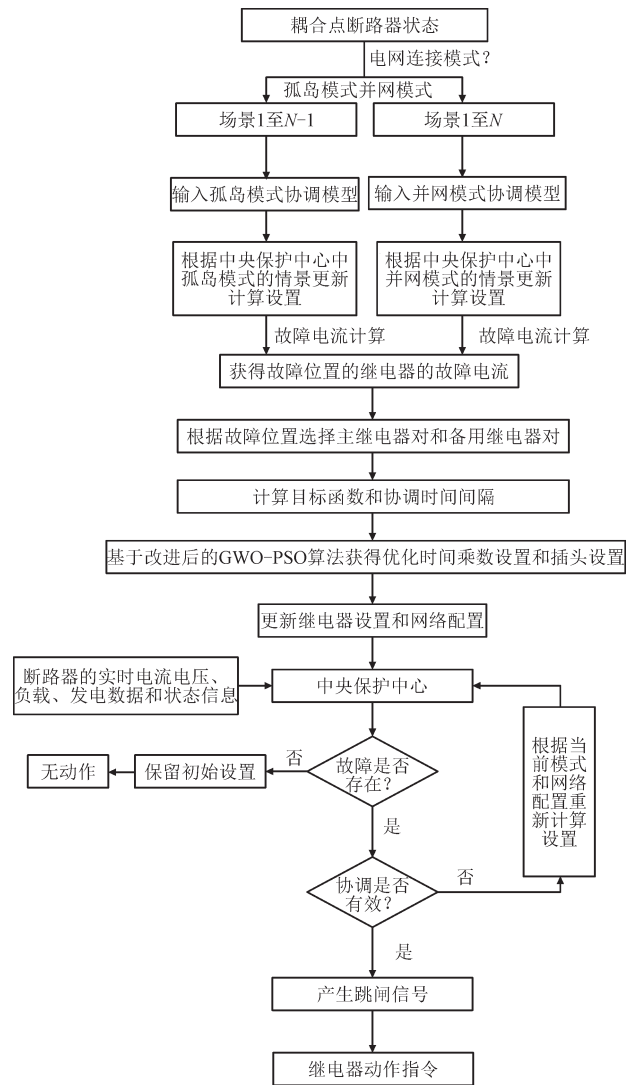


图 1 变电站二次系统保护流程图

Fig.1 Substation secondary system protection process diagram

4 仿真分析

本文采用 9 节点微电网系统对所提策略进行仿真分析,微电网通过一个 20 MVA, 115 kV/12.47 kV 变压器连接到主网,参数见文献[26]。单线对地 (Single Line to Ground, SLG) 故障设置为每条线路的远端(F1-F16)。对于每个故障位置,安装 2 个具有后备保护的定向过电流继电器,主继电器和备用继电器对如表 1 所示,当主网因维护或故障而断开时,微电网可以在并网模式或孤岛模式下运行。

表1 主继电器和备用继电器对
Table 1 Primary and backup relay pairs

故障位置	主继电器	备用继电器
F1	R1, R2	R10, R4
F2	R1, R2	R10, R4
F3	R3, R4	R1, R6
F4	R5, R6	R1, R6
F5	R5, R6	R3, R8
F6	R7, R8	R5
F7	R7, R8	R5
F8	R9, R10	R2, R12
F9	R9, R10	R2, R12
F10	R11, R12	R9, R14
F11	R11, R12	R9, R14
F12	R13, R14	R11, R16
F13	R13, R14	R11, R16
F14	R15, R16	R13
F15	R15, R16	R13
F16	R15, R16	R13

并网模式下,主继电器和备用继电器的动作时间和协调时间间隔结果如表2所示。

表2 并网模式的继电器动作时间和协调时间间隔
Table 2 Relay operating time and CTI for grid connected mode

故障位置	主继电器	备用继电器	主继电器动作时间/s	备用继电器动作时间/s	CTI/s
F1	R1	R10	0.611	0.926	0.316
	R2	R4	0.811	1.495	0.681
F2	R1	R10	0.926	1.358	0.442
	R2	R4	0.842	1.168	0.326
F3	R3	R1	0.495	0.811	0.316
	R4	R6	0.611	0.989	0.382
F4	R3	R1	1.168	1.526	0.355
	R4	R6	1.000	1.316	0.316
F5	R5	R3	0.295	0.621	0.326
	R6	R8	0.358	0.726	0.371
F6	R5	R3	1.316	1.632	0.316
	R6	R8	1.074	1.432	0.358
F7	R7	R5	0.046	0.358	0.316
F8	R7	R5	0.052	0.453	0.413
F9	R9	R2	0.612	0.926	0.316
	R10	R12	0.811	1.389	0.587
F10	R9	R2	0.926	1.768	0.864
	R10	R12	0.800	1.126	0.326
F11	R11	R9	0.495	1.042	0.316
	R12	R14	0.611	0.811	0.425
F12	R11	R9	1.134	1.487	0.354
	R12	R14	0.947	1.263	0.316
F13	R13	R11	0.304	0.620	0.316
	R14	R16	0.365	0.739	0.374
F14	R13	R11	1.263	1.589	0.316
	R14	R16	1.102	1.411	0.316
F15	R15	R13	0.052	0.365	0.316
F16	R15	R13	0.056	0.428	0.374

协调时间间隔包括从继电器到断路器的通信时间以及动作行程时间,当协调时间间隔大于 0.3 s 时,备用继电器将在主继电器之后 0.3 s 内运行,从而确保继电器之间的有效协调和故障线路跳闸的准确性,避免保护误动作。从表2可以看出,所有故障位置的协调时间间隔均较高,满足最低 0.3 秒的标准,

继电器之间可在规定的时间内进行有效的协调。

设置4种场景进行优化整定计算,其中:场景1为孤岛模式下采用 PSO 算法进行整定计算;场景2为孤岛模式下采用本文所提的 GWO-PSO 算法进行整定计算;场景3为并网模式下采用 PSO 算法进行整定计算;场景4为并网模式下采用本文所提的 GWO-PSO 算法进行整定计算。为评估改进算法的性能,将本文中算法与标准 PSO 算法和 GWO 算法进行比较,得到的迭代曲线如图2所示。

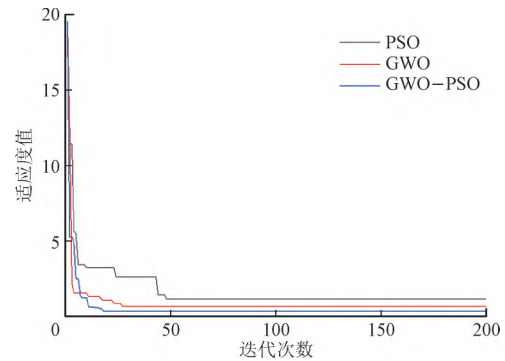


图2 优化算法性能对比

Fig.2 Performance comparison of optimization algorithms

从图2可以看出,PSO 算法由于缺乏动态调整,受初值影响较大,导致在本例中寻优的正确率较低。GWO 算法虽然参数调整比较灵活,但搜索机制导致后期收敛速度变慢,而且易陷入局部最优。而 GWO-PSO 混合算法则有效地平衡了局部搜索和全局开发的能力,收敛速度更快,得到最优解的精度更高,当陷入局部最优时能迅速跳出。4种场景下的计算结果如表3所示,动作时间对比如表4所示。

表3 孤岛和并网模式下的整定计算结果

Table 3 Setting calculation results under islanded and grid connected modes

继电器编号	场景1 TMS	场景2 TMS	场景3 TMS	场景4 TMS
R1	0.164	0.127	0.116	0.163
R2	0.182	0.170	0.213	0.181
R3	0.103	0.164	0.264	0.102
R4	0.246	0.181	0.253	0.246
R5	0.051	0.218	0.324	0.050
R6	0.321	0.168	0.153	0.320
R7	0.031	0.159	0.138	0.028
R8	0.529	0.196	0.302	0.528
R9	0.127	0.144	0.144	0.126
R10	0.236	0.163	0.199	0.234
R11	0.151	0.166	0.070	0.149
R12	0.140	0.185	0.239	0.140
R13	0.074	0.175	0.226	0.074
R14	0.184	0.169	0.141	0.183
R15	0.028	0.133	0.118	0.028
R16	0.272	0.190	0.298	0.271

表4 4种场景下的动作时间对比

Table 4 Comparison of action times in 4 scenarios

项目	场景1	场景2	场景3	场景4
模型求解时间	0.054	0.073	0.059	0.078
平均动作时间	0.641	0.427	0.754	0.493

从表4可以看出,优化模型的求解速度较快,满足继电保护速动型的要求。无论是孤岛模式还是并网模式下,本文所提算法平均动作时间更低,相对于场景1和场景3,场景2和场景4的平均动作时间分别降低了33.4%和34.6%,从而更迅速地切除故障,缩短了故障电流的传播时间。

5 结语

提出一种基于改进GWO-PSO算法的变电站二次系统保护策略。针对过电流继电器协调优化问题,将灰狼优化器和粒子群优化结合,提出了针对微电网不同接入模式下的变电站二次系统保护策略。仿真结果表明,一方面,改进后的算法具有明显的计算速度优势;另一方面,计算出的配电网继电器平均动作时间最短,在不同模式下,保护策略不受网络结构限制,提供了可靠的系统保护。

参考文献

- [1] 吴玮华,周玲,李彪,等. 分布式电源对配网继电保护的影响研究[J]. 低碳世界, 2023, 13(12): 52-54.
WU Weihua, ZHOU Ling, LI Biao, et al. Study on the impact of distributed power supply on distribution network relay protection[J]. Low Carbon World, 2023, 13(12): 52-54.
- [2] 徐宇,杨鹏杰,李磊. 基于优化核极限学习机的新能源配电网继电保护故障检测技术[J]. 自动化应用, 2023, 64(23): 64-69.
XU Yu, YANG Pengjie, LI Lei. New energy distribution network relay protection fault detection technology based on optimised kernel limit learning machine[J]. Automation Application, 2023, 64(23): 64-69.
- [3] 李斌,周博昊,何佳伟,等. 直驱风电场送出线路的正序电压极化距离保护适用性分析[J]. 电力系统自动化, 2023, 47(22): 16-24.
LI Bin, ZHOU Bohao, HE Jiawei, et al. Applicability analysis of positive sequence voltage polarisation distance protection for direct-drive wind farm feeder lines[J]. Power System Automation, 2023, 47(22): 16-24.
- [4] 赵倩雯. 基于微电网接地故障的继电保护策略研究[J]. 电气技术与经济, 2023(02): 31-35.
ZHAO Qianwen. Research on relay protection strategy based on microgrid ground fault[J]. Electrical Technology and Economy, 2023(2): 31-35.
- [5] 吴双. 基于粒子群方法的配电网继电保护实时整定方法研究[J]. 电气技术与经济, 2023(6): 64-66, 70.
WU Shuang. Research on real-time adjustment method of distribution network relay protection based on particle swarm method[J]. Electrical Technology and Economy, 2023(6): 64-66, 70.
- [6] 杨鹏杰,张克宇,徐宇,等. 继电保护和安全稳定控制系统隐性故障分析[J]. 电气技术与经济, 2023(7): 294-306.
YANG Pengjie, ZHANG Keyu, XU Yu, et al. Analysis of hidden faults in relay protection and safety and stability control systems[J]. Electrical Technology and Economy, 2023(7): 294-306.
- [7] 周裕盛,张雅雯,仲仪,等. 继电保护和安稳系统协调控制策略研究[J]. 光源与照明, 2022(2): 186-188.
ZHOU Yushi, ZHANG Yawen, ZHONG Yi, et al. Research on coordinated control strategy of relay protection and safety system[J]. Light Source and Lighting, 2022(2): 186-188.
- [8] 胡珍妮,赵倩,乔亚琴. 基于决策树算法的微电网电压保护方法[J]. 电子设计工程, 2022, 30(7): 125-129, 134.
JENNY Hu, QIAN Zhao, QIAO Yaqin. A microgrid voltage protection method based on decision tree algorithm[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(7): 125-129, 134.
- [9] 刘一民,王书扬,李彬,等. 逆变型新能源场站柔性直流送出系统交流线路差动保护灵敏度优化方案[J]. 电力建设, 2022, 43(1): 63-69.
LIU Yimin, WANG Shuyang, LI Bin, et al. Optimization scheme of AC line differential protection sensitivity for flexible DC sending system of inverter-type new energy field station[J]. Electric Power Construction, 2022, 43(1): 63-69.
- [10] 叶远波,李端超,谢民,等. 面向新型电力系统的智能变电站虚拟回路自动校验技术研究[J]. 电测与仪表, 2022, 59(7): 91-99.
YE Yuanbo, LI Duanchao, XIE Min, et al. Research on automatic calibration technology of virtual circuit in intelligent substation for new power system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2022, 59(7): 91-99.
- [11] 刘健,张小庆,张志华,等. 变电站和馈线单相接地故障处理技术的协调配合[J]. 供用电, 2022, 39(1): 47-51.
LIU Jian, ZHANG Xiaoqing, ZHANG Zhihua, et al. Coordination of single-phase ground fault handling techniques for substations and feeders[J]. Distribution & Utilization, 2022, 39(1): 47-51.
- [12] 方云,熊飞,张莉平. 继电保护数字物理混合动态仿真测试系统分析[J]. 数字通信世界, 2023(12): 57-59, 62.
FANG Yun, XIONG Fei, ZHANG Liping. Analysis of digital-physical hybrid dynamic simulation test system for relay protection[J]. Digital Communication World, 2023(12): 57-59, 62.
- [13] WANG T, CHU X, HUSSAIN K S T, et al. Fault control and line protection strategy for LVDC microgrids based on modified high-frequency-link DC solid state transformer[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2022, 140: 108052-108063.
- [14] 龙瑞华,苏禹宁,柯其志,等. 含分布式电源配电网继电保护定值核校方法[J]. 电气开关, 2023, 61(6): 60-63.
LONG Ruihua, SU Yuning, KE Qizhi, et al. Method of verification of relay protection value for distribution networks with distributed power sources[J]. Electrical Switchgear, 2023, 61(6): 60-63.
- [15] 李永胜,李致宇. 优化过流继电器与距离继电器协调组合最佳

距离[J]. 自动化博览, 2023, 40(4): 70-74.
 LI Yongsheng, LI Zhiyu. Optimisation of the best distance for coordinated combination of overcurrent relay and distance relay[J]. Automation Expo, 2023, 40(4): 70-74.

[16] 翟博龙, 唐志军, 宋福海, 等. 基于OPNET的保护性能评估及采样值估计算法[J]. 电测与仪表, 2023, 60(4): 160-166.
 ZHAI Bolong, TANG Zhijun, SONG Fuhai, et al. Protection performance evaluation and sampling value estimation algorithm based on OPNET[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(4): 160-166.

[17] 陈敬德, 李雅晴, 杨欢红, 等. 基于改进Shapley特征优选及ResNet50深度学习模型的继电保护状态评估研究[J]. 供用电, 2023, 40(12): 72-78, 106.
 CHEN Jingde, LI Yaqing, YANG Huanhong, et al. Research on relay protection state assessment based on improved Shapley feature optimization and ResNet50 deep learning model[J]. Distribution & Utilization, 2023, 40(12): 72-78, 106.

[18] XU H, CAI Y, QU X, et al. An improved strategy for out-of-step oscillation separation devices based on apparent impedance angle applied to a series compensated line[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7: 1-8.

[19] 董小瑞, 孙伟, 樊群才, 等. 基于K LDA-INFLO的继电保护整定数据异常识别方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6): 132-137, 149.
 DONG Xiaorui, SUN Wei, FAN Quncai, et al. K LDA-INFLO-based anomaly identification method for relay protection calibration data[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(6): 132-137, 149.

[20] 宁楠, 孙睿择, 潘凯岩, 等. 基于运行方式与故障信息融合的配电网保护策略优化[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(2): 54-61.
 NING Nan, SUN Ruizhe, PAN Kaiyan, et al. Optimization of distribution network protection strategy based on fusion of operation mode and fault information[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022, 37(2): 54-61.

[21] 来智浩, 高钰琛, 翟常营, 等. 基于信号路径跟踪算法与并发分层架构的热过载保护装置自动校验方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(11): 121-127.
 LAI Zhihao, GAO Yuchen, ZHAI Changying, et al. Research on automatic calibration method of thermal overload protection device

based on signal path tracking algorithm and concurrent layered architecture[J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2022, 58(11): 121-127.

[22] 张峰毓, 霍政界, 李铭, 等. 基于时空分析的变电站继电保护故障信息检测系统设计[J]. 电子设计工程, 2022, 30(4): 110-114.
 ZHANG Fengyu, HUO Zhengjie, LI Ming, et al. Design of substation relay protection fault information detection system based on spatio-temporal analysis[J]. Electronic Design Engineering, 2022, 30(4): 110-114.

[23] 王英英, 王玉龙, 吕东晓, 等. 同塔双回线接地故障断路器误动的改进策略[J]. 高压电器, 2022, 58(5): 172-179.
 WANG Yingying, WANG Yulong, LYU Dongxiao, et al. Improvement strategy for ground fault circuit breaker misoperation of double return lines with the same tower[J]. High Voltage Electrical Apparatus, 2022, 58(5): 172-179.

[24] 糟伟红, 祁晓笑, 董雪涛, 等. 一种适用于微电网的分散式自适应过电流保护[J]. 四川电力技术, 2023, 46(2): 52-58.
 NIAN Weihong, QI Xiaoxiao, DONG Xuetao, et al. A decentralized adaptive overcurrent protection for microgrids[J]. Sichuan Electric Power Technology, 2023, 46(2): 52-58.

[25] 谭金龙, 熊小伏, 南东亮, 等. 基于变电站监控系统的继电保护自动检验方法研究[J]. 电子设计工程, 2023, 31(8): 10-14.
 TAN Jinlong, XIONG Xiaofu, NAN Dongliang, et al. Research on automatic relay protection inspection method based on substation monitoring system[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(8): 10-14.

[26] 李文伟, 韦思南, 汪清涓, 等. 基于组合算法的配电网继电保护优化整定计算方法[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2023, 45(4): 600-607.
 LI Wenwei, WEI Sinan, WANG Qingjuan, et al. Optimal adjustment calculation method for distribution network relay protection based on combinatorial algorithm[J]. Journal of Hubei University (Natural Science Edition), 2023, 45(4): 600-607.

(责任编辑 钱文姝)

收稿日期: 2024-03-27; 修改日期: 2024-07-05

作者简介: 栾士岩(1984), 男, 河北冀州人, 硕士研究生, 副高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化。

(上接第104页)

of WTGs for enhancing primary frequency response and suppressing drivetrain torsional oscillations[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2021, 36(5): 4102-4113.

[26] 陈汝斯, 李大虎, 周泓宇, 等. 基于梯次启动与优化算法的多集群风机最优调频方法[J]. 电力建设, 2023, 44(11): 54-63.
 CHEN Rusi, LI Dahu, ZHOU Hongyu, et al. Optimal frequency regulation in multi-cluster wind turbines using a step start-up and optimization algorithm[J]. Electric Power Construction, 2023, 44(11): 54-63.

[27] 聂永辉, 刘家僮, 孙斌, 等. 基于转子动能释放的风电并网系统非线性频率控制策略研究[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(23): 9127-9136.

NIE Yonghui, LIU Jiatong, SUN Bin, et al. Research on nonlinear frequency control strategy of wind power grid connected system based on rotor kinetic energy release[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(23): 9127-9136.

[28] DEJIAN Y, XIN W, WEI C, et al. Adaptive frequency droop feedback control-based power tracking operation of a DFIG for temporary frequency regulation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 2(39): 2682-2692.

(责任编辑 李萌)

收稿日期: 2024-05-10; 修改日期: 2024-07-10

作者简介: 薛水莲(1988), 女, 陕西渭南人, 硕士研究生, 工程师, 主要研究方向为新能源发电技术、新能源系统的建模和分析。