

基于改进粒子群算法的含 DG 配网反时限过流保护定值优化方法

方榆冬¹, 徐峰², 李跃辉², 杜浩良²

(1. 国网浙江省电力有限公司, 浙江 杭州 310007; 2. 国网浙江省电力有限公司金华供电公司, 浙江 金华 321000)

摘要:随着分布式电源接入配电网带来故障电流大小、潮流方向的改变,配网继电保护整定工作愈发艰巨。针对含 DG 配网反时限过流保护定值优化问题,考虑配网故障不确定因素、继电器固有属性与继电保护的“四性”要求,在粒子群算法(PSO)更新过程中引入“全局历史平均最优解”与动态惯性权重相关概念,提出基于改进粒子群算法(MPSO)的含 DG 配网反时限过流保护定值优化方法。结论表明,MPSO 能有效避免定值求解陷入局部最优困境,适用于含 DG 配网反时限过流保护定值优化问题。

关键词:反时限过流保护;粒子群算法;定值优化;分布式电源

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2022.04.002 中图分类号:TM863 文章编号:1673-9140(2022)04-0013-07

An optimization method for setting value of inverse-time overcurrent protection in distribution network with DG based on MPSO

FANG Yudong¹, XU Feng², LI Yuehui², DU Haoliang²

(1. State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Hangzhou 310007, China; 2. Jinhua Power Supply Company, State Grid Zhejiang Electric Power Co., Ltd., Jinhua 321000, China)

Abstract: As distributed power sources connected to the distribution network, the magnitude of the fault current and the direction of the power flow have been changed, and the relay protection setting of the distribution network has become more difficult. Aiming at the optimization problem of inverse time overcurrent protection setting for the distribution network containing DG, the uncertain factors of distribution network failure, the inherent properties of relays and the four requirements of relay protection is considered. The concept of "global historical average optimal solution" and dynamic inertia weight is introduced in the update process of particle swarm optimization. Finally a fixed value optimization method for inverse time overcurrent protection in the distribution network containing DG based on improved particle swarm optimization is proposed. The conclusion shows that the improved particle swarm algorithm can effectively prevent the fixed value solution from falling into the local optimal dilemma, and it is suitable for the fixed value optimization problem of the inverse time overcurrent protection in the distribution network containing DG.

Key words: inverse time overcurrent protection; PSO; protection setting optimization; distributed generation

随着新能源技术的成熟,大量分布式电源(distributed generation, DG)并入配电网。在带来清洁能源的同时, DG 的接入使传统配电网潮流方向增加了波动性^[1-2],这将导致原有保护整定方法不再适用含 DG 的有源配电网(active distribution network, ADN)^[3]。因此,在当前大量 DG 接入电网背景下,亟需一种适用于 ADN 的保护定值优化方法。

针对 DG 接入有源配电网后保护整定方法不再适用这一问题,当前主流的解决方式是建立定值优化问题对应数学模型,再选取合适的优化算法对保护定值进行整定计算。在构建定值优化数学模型方面,大部分研究将各保护的動作时间之和的最小值作为目标函数,但理想化地认为不同类型或不同线路发生故障概率相等,不符合配电网运行实际^[4-5]。文献[6-7]虽然将继电保护的“四性”(选择性、灵敏性、可靠性及速动性)要求纳入作为数学模型的约束条件,但未考虑继电器本身固有最短動作时间约束与整定系数上下限约束。在定值优化算法方面,相关研究的优化算法主要有数学归纳法^[8]和群体智能优化算法。相较数学归纳法,群体智能优化算法运算效率高、不受数据复杂性影响,对于求解含 DG 的有源配电网保护定值这个多约束条件复杂问题有更好的表现,而在多种智能优化算法中,粒子群算法(particle swarm optimization, PSO)具有设置参数少、易于程序实现等优点。文献[9]使用 PSO 对反时限过电流保护定值优化问题进行了求解,但由于 PSO 存在“早熟”问题,得到的仅是局部最优解。

针对上述数学模型或优化算法的不足,本文基于 DG 接入有源配电网反时限过电流保护整定与配合方法研究,考虑配网故障不确定因素与继电器的固有属性,构建含 DG 配网的反时限过电流保护定值优化数学模型,在标准 PSO 更新过程中,引入“全局历史平均最优解”与动态惯性权重相关概念,提出基于改进粒子群算法(modified particle swarm optimization, MPSO)的含 DG 配网反时限过流保护定值优化方法。通过设置仿真算例对比实验证明,采用本文提出的优化方法可以更好地实现对含 DG 配网反时限过电流保护定值的优化。

1 定值优化目标函数与约束条件

与定时限过流保护相比,反时限过流保护具备動作时间随短路电流的增大而减小的自适应特性,但其参数的优化也更为复杂,构建含 DG 配电网的反时限过流保护的目标函数与约束函数是整定优化的基础。反时限过流继电器的反时限特性有几种典型反时限特性^[10-11],本文采用常规反时限特性:

$$T_{ix} = \frac{0.14C_i}{I_{oi}^{0.02} - 1} \quad (1)$$

式中 T_{ix} 为继电器 R_i 在 x 处的動作时间; C_i 为继电器 R_i 的时间整定系数; I_{oi} 为继电器 R_i 的短路电流倍数,即短路电流 I_{fi} 与启动电流 I_{si} 之比。

1.1 目标函数

大部分研究在构建定值优化目标函数时未考虑电力故障时的不确定因素^[12-13],仅简单将各个继电器動作时间之和作为目标函数,结合常规反时限继电器動作特性,即

$$F = \min \sum_{x=1}^X \sum_i^I T_{ix} = \min \sum_{x=1}^X \sum_i^I \frac{0.14C_i}{I_{oi}^{0.02} - 1} \quad (2)$$

在现实电力系统中,由于外界因素诸如线路周边环境、气象、人为活动的存在,各条线路发生故障的概率不均匀,且即使发生故障,可能的故障类型也不尽相同,从而导致故障电流水平也存在差别。因此,将电力故障中故障线路与故障类型 2 种不确定因素发生概率纳入目标函数具有现实的必要性。

通过对历史故障数据的分析,发现线路 A_i 单位时间内发生故障的概率符合泊松分布^[14],即

$$P(A_i) = \lambda_i e^{-\lambda_i} \quad (3)$$

式中 λ_i 为线路 A_i 单位时间内故障次数。

而根据文献[15],不同故障类型 B_i 发生概率 $P(B_i)$ 如表 1 所示。考虑电力故障中故障线路与故障类型 2 种不确定因素,得到的目标函数可表达为

$$F = \min \sum_{x=1}^X \sum_i^I P(A_i) \cdot P(B_i) \cdot \frac{0.14C_i}{I_{oi}^{0.02} - 1} \quad (4)$$

表 1 不同故障类型发生概率

Table 1 Probability of different failure types

B_i	$P(B_i)$	B_i	$P(B_i)$
三相短路	0.05	两相接地短路	0.10
两相短路	0.20	单相接地短路	0.65

1.2 约束条件

针对反时限过流保护定值整定优化问题,本文约束函数主要考虑继电器固有属性与继电保护“四性”要求^[16]。

继电器出厂时已设定其特定最小动作时间与时间整定上限、下限范围,因此,在定值整定优化时,继电器动作时间和时间整定系数需满足 2 个固定属性^[17]:

$$T_{ix} \geq t_{\min} \quad (5)$$

$$C_{i\min} \leq C_i \leq C_{i\max} \quad (6)$$

式(5)、(6)中 t_{\min} 为继电器固有最小动作时间,本文取 $t_{\min} = 0.02$ s; $C_{i\min}$ 、 $C_{i\max}$ 分别为反时限过流保护继电器时间整定系数的下限、上限,本文取 $C_{i\min} = 0.1$, $C_{i\max} = 1.1$ 。

为满足继电保护可靠性与灵敏性要求,当继电器在保护范围内发生故障时,要求其任何情况下都能正确可靠动作切除故障。因此,继电器的启动电流 I_{si} 需躲过系统正常运行情况下流过继电器 R_i 的最大负荷电流 $I_{L\max}$,且不能大于系统最小运行方式下故障流过继电器 R_i 的最小短路电流 $I_{i\min}$,即

$$I_{L\max} \leq I_{si} \leq I_{i\min} \quad (7)$$

考虑继电保护的选择性要求,当线路发生故障时,由距离故障点最近的保护正确动作跳闸,达到隔离故障点且停电范围最小的要求。但也需考虑继电器可能存在拒绝动作的情况,本文采用主保护与近后备保护配合的方式,并为每个继电器配备正、反 2 个方向保护,不同方向保护设置不同的参数。这一方式主保护与后备保护配合关系更简单,且缩短了两者之间的距离,一定程度上提高了保护的速动性^[18]。主、后备保护之间的时间级差 ΔT 需满足:

$$T_{j,n} - T_{i,n} \geq \Delta T \quad (8)$$

式中 $T_{j,n}$ 为继电器 R_j 近后备保护的動作时间; $T_{i,n}$ 为继电器 R_i 主保护的動作时间。本文取 $\Delta T = 0.2$ s。

2 改进粒子群算法

在标准粒子群算法中,粒子 k 的位置 $x_k = (x_{k1}, x_{k2}, \dots, x_{kd})$ 代表其在 d 维空间的一个潜在

可行解,并根据自身历史最优解 P_k 和全局历史最优解 P_g 动态更新飞行速度 $v_k = (v_{k1}, v_{k2}, \dots, v_{kd})$,通过迭代计算逼近全局最优解^[19]。在含 DG 配网保护定值优化模型中,粒子维度 d 取决于配网系统中待优化继电器个数和待优化量个数,本文优化模型的待优化量为各继电器的时间整定系数 C_i 和启动电流 I_{si} 。

2.1 粒子群算法的改进

为适应本文模型,避免优化算法陷入局部最优解并提高优化性能,本文针对标准粒子群算法采用如下改进措施。

1)全局历史平均最优解。

每个粒子根据自身历史最优解 P_k 和全局历史平均最优解 P_{ag}^n 动态更新飞行速度,以此利用更多历史信息动态调整自身状态,防止陷入局部最优解。定义第 n 次迭代时的全局历史平均最优解为

$$P_{ag}^n = \frac{p_g^1 + p_g^2 + \dots + p_g^n}{n} \quad (9)$$

式中 P_g^n 为第 n 次迭代时的全局最优解。

2)动态惯性权重。

采用随迭代次数动态变化的惯性权重策略,从粒子群算法的寻优搜索特点出发,在寻优搜索前期 ω 取较大值有利于扩大搜索范围,而在寻优搜索后期更小的 ω 值有利于提高收敛的精确度,易在更小的范围搜索得到理想的最优解。动态惯性权重^[20]表达式为

$$\omega(n) = \frac{(\omega_0 - \omega_{\text{end}}) \cdot (n_{\max} - n)}{n_{\max}} + \omega_{\text{end}} \quad (10)$$

式中 n_{\max} 为最大迭代次数; ω_0 为初始惯性权重值; ω_{end} 为终止惯性权重值。

根据上述改进措施,优化后的粒子群算法为

$$\begin{cases} v_{k,d}^{n+1} = \omega(n) \cdot v_{k,d}^n + c_1 \cdot r_1 \cdot (P_k - x_{k,d}^n) + c_2 \cdot r_2 \cdot (P_{ag}^n - x_{k,d}^n) \\ x_{k,d}^{n+1} = x_{k,d}^n + v_{k,d}^{n+1} \\ |v_{k,d}^{n+1}| \leq v_{\max} \end{cases} \quad (11)$$

式中 $\omega(n)$ 为第 n 迭代次数为粒子的惯性权重; r_1 、 r_2 为一定取值范围内的随机数; c_1 、 c_2 分别为向个体历史最优解和全局历史平均最优解逼近的学习因子。

2.2 改进粒子群算法的初始化

MPSO 粒子位置矩阵的初始化形式为

$$\mathbf{X}_k^{(0)} = \begin{bmatrix} t_{11}^{(0)} & i_{11}^{(0)} & t_{12}^{(0)} & i_{12}^{(0)} & \cdots & t_{1b}^{(0)} & i_{1b}^{(0)} \\ t_{21}^{(0)} & i_{21}^{(0)} & t_{22}^{(0)} & i_{22}^{(0)} & \cdots & t_{2b}^{(0)} & i_{2b}^{(0)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ t_{k1}^{(0)} & i_{k1}^{(0)} & t_{k2}^{(0)} & i_{k1}^{(0)} & \cdots & t_{kb}^{(0)} & i_{kb}^{(0)} \end{bmatrix} \quad (12)$$

式(12)为 $i \times 2b$ 矩阵,其中 b 为系统中待优化的继电器个数,矩阵中 t 与 i 分别代表各继电器时间整定系数 C_i 和启动电流 I_{si} 初始值,各初始值为满足约束条件范围内的随机值,此时改进粒子群算法维数 $d=2b$ 。

粒子速度矩阵的初始化形式为

$$\mathbf{V}_i^{(0)} = r \cdot \mathbf{X}_k^{(0)} \quad (13)$$

其中, r 为区间 $[0, 0.1]$ 的任意随意浮点数,即粒子在各维度的初始化速度与对应初始化位置呈线性相关,但随机的初始化位置也意味着随机的初始化速度。

2.3 改进粒子群算法计算步骤

MPSO 计算程序流程如图 1 所示,结合含 DG 配网保护定值优化模型后的具体计算步骤如下:

1) 初始化,即对粒子的位置 x_k 和速度 v_k 进行初始化设置,初始值需在约束条件范围内;

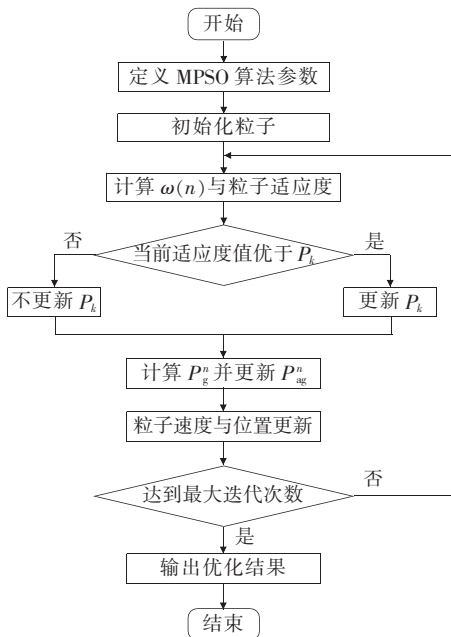


图 1 MPSO 计算程序流程

Figure 1 Improved particle swarm algorithm calculation program flow

2) 进入迭代计算,对粒子的动态惯性权重 $\omega(n)$ 与适应度值进行计算;

3) 根据适应度值更新粒子自身历史最优解 P_k 并滚动更新全局历史平均最优解 P_{ag}^n ;

4) 根据式(11)更新粒子的位置 x_k 和速度 v_k ;

5) 迭代次数判断,若已达到最大迭代次数则终止循环输出最优解与最优适应度值;若未满足迭代次数则返回步骤 2。

3 算例

在仿真软件 Matlab/Simulink 中构建含 DG 配网系统仿真模型,如图 2 所示,在母线 C、E 处分别接入容量为 1、2、3 MV·A 的分布式电源 DG₁、DG₂、DG₃,并在各处线路配备 12 个反时限过电流继电器,编号为 R₁、R₂、⋯、R₁₂,继电器采用主保护与近后备保护配合方式;故障点分别设置在线路 AB、BC、AD、DE 中点的 F₁、F₂、F₃、F₄ 处,故障类型取最严重的三相短路故障。配网系统其他元件参数和改进粒子群优化算法参数设置分别如表 2、3 所示。

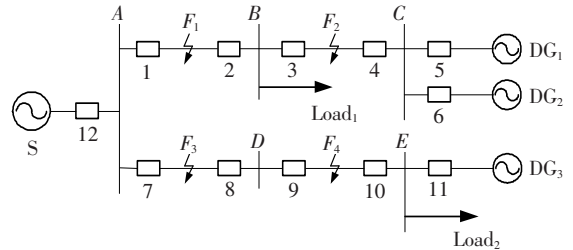


图 2 含 DG 配网系统仿真模型

Figure 2 Simulation model of distribution network system containing DG

表 2 配网系统元件参数设置

Table 2 Parameter setting of distribution network system components

配网系统元件	参数设置
系统侧电源 S	$U_s = 10 \text{ kV}, Z_s = 0.128 + j0.37 \ \Omega$
Load ₁	20 MW, 5 MVar
Load ₂	30 MW, 10 MVar
线路	$l_{AB} = 3, l_{BC} = 2, l_{AD} = 5, l = 1 \text{ km}$ $r = 0.045 \ \Omega/\text{km}, x_1 = 1.3 \times 10^{-3} \text{ H/km},$ $b_0 = 8.67 \times 10^{-9} \text{ F/km}$

表 3 改进粒子群优化算法参数设置

Table 3 Parameter settings of improved particle swarm optimization algorithm

粒子数量	最大迭代次数	惯性权重		取值范围		学习因子	
		ω_0	ω_{end}	r_1	r_2	c_1	c_2
100	200	0.6	0.2	[0,0.3]	[0,0.6]	0.3	0.6

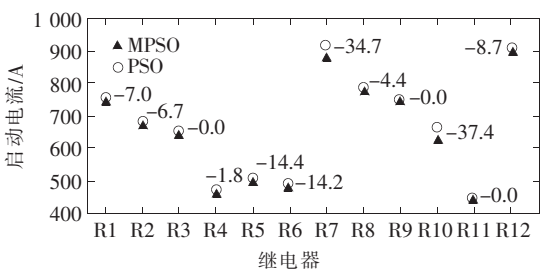
设置 2 组对照实验,分别利用 PSO、MPSO 对含 DG 配网反时限过流保护的时间整定系数 C_i 和启动电流 I_{si} 进行优化。当故障电流方向为正时,继电器作为主保护,时间整定系数为 C^{fw} ,启动电流为 I_s^{fw} ;方向为负时时间整定系数为 C^{rv} ,启动电流为 I_s^{rv} 。2 组对照实验的目标函数与约束条件保持一致。

根据优化步骤进行仿真,得到的优化结果如图 3、表 4 所示。2 组实验对比可知,由 PSO 得到的优化结果仅有 4 个逼近全局最优解,其余 8 个继电器都陷入了局部最优解,存在“早熟”问题。而通过 MPSO 得到的时间整定系数 C_i 和启动电流 I_{si} 更符合或逼近全局最优解,因此,系统中的反时限过流保护总体动作时间相比更小,仅为 16.364 s,相较于 PSO 优化结果约缩短 22%。这是因为 MPSO 采用了动态惯性权重,并且粒子是根据自身历史最优解 P_i 和全局历史平均最优解 P_{ag}^n 动态更新飞行速度,增加了遍历性,有效防止了陷入局部最优。

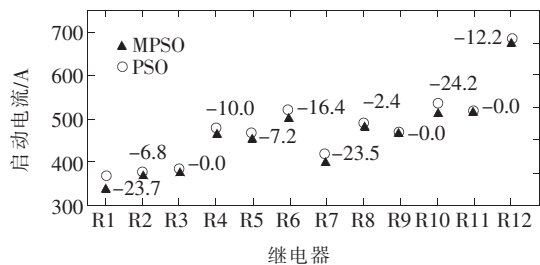
表 4 MPSO 与 PSO 对照实验优化结果数据

Table 4 Comparison of MPSO and PSO experimental optimization result data

继电器	MPSO			
	C^{fw}	I_s^{fw}	C^{rv}	I_s^{rv}
R ₁	0.113	749.002	0.101	344.872
R ₂	0.107	677.903	0.112	372.034
R ₃	0.112	656.465	0.103	388.044
R ₄	0.105	467.895	0.101	471.118
R ₅	0.101	498.186	0.121	464.331
R ₆	0.113	484.769	0.107	506.347
R ₇	0.101	886.573	0.103	401.050
R ₈	0.105	780.028	0.102	488.673
R ₉	0.101	751.132	0.114	472.015
R ₁₀	0.124	632.230	0.103	515.822
R ₁₁	0.105	445.386	0.111	520.371
R ₁₂	0.113	903.208	0.104	677.029
总时间/s	16.364			
继电器	PSO			
	C^{fw}	I_s^{fw}	C^{rv}	I_s^{rv}
R ₁	0.137	756.021	0.132	368.540
R ₂	0.113	684.563	0.114	378.827
R ₃	0.112	656.465	0.103	388.044
R ₄	0.141	469.673	0.137	481.123
R ₅	0.124	512.581	0.133	471.559
R ₆	0.132	498.920	0.127	522.741
R ₇	0.124	921.233	0.105	424.598
R ₈	0.135	784.464	0.112	491.025
R ₉	0.101	751.132	0.114	472.015
R ₁₀	0.132	669.585	0.141	540.038
R ₁₁	0.105	445.386	0.111	520.371
R ₁₂	0.126	911.861	0.123	689.228
总时间/s	23.065			



(a)故障电流方向为正



(b)故障电流方向为负

图 3 MPSO 与 PSO 优化结果比较

Figure 3 Comparison of optimization results between MPSO and PSO

2 组实验中仿真得到的适应度曲线如图 4 所示。在使用 PSO 进行寻优计算、迭代计算到大约第 28 次时,粒子即达到稳定值不再更新,但此时得到的稳定值仅为局部最优值,即此时粒子已陷入“早熟”。而当采用本文提出的 MPSO 时,惯性权重在迭代前期取较大值,扩大了粒子寻优空间,加快了向全局最优值的逼近速度;而在迭代后期惯性权重逐渐减小,且粒子在更新过程中通过引入全局历史平均最优解,利用了更多的历史信息,能在更小区间进行更为细致的寻优搜索,因此,不易陷入局部最优解。经过约 48 次迭代,最终找到全局最优解。

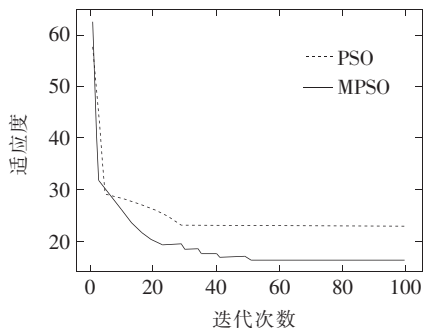


图4 MPSO与PSO适应度值迭代过程比较

Figure 4 Comparison of the iteration process of fitness value between MPSO and PSO

4 结语

分布式电源接入配电网带来故障电流大小、潮流方向的改变,传统的定值优化方法不再适用。本文针对含DG配网的反时限过流保护定值优化问题,基于考虑配网故障线路与故障类型2种不确定因素、继电器固有属性与继电保护的“四性”要求,构建了更符合实际配网系统的定值优化数学模型。并在标准粒子群算法中通过引入“全局历史平均最优解”与动态惯性权重相关概念进行改进优化。

改进后的粒子群算法在反时限过流保护定值优化过程中表现出了良好的性能,既能在寻优前期扩大搜索,快速朝全局最优值逼近,又能在寻优后期进行细致化搜索,避免了陷入局部最优解。保护的总体动作时间大约缩短了22%,在一定程度上提高了反时限过流保护装置的灵敏性与速动性。

参考文献:

[1] 郭利爽,李凤婷,赵新利,等.基于子网络划分的含DG配电网故障区段定位[J].电力系统保护与控制,2020,48(7):76-84.
GUO Lishuang, LI Fengting, ZHAO Xinli, et al. Fault section location for distribution network with DG based on sub-network partition[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(7): 76-84.

[2] 秦立军,张国彦,陈晓东,等.含DG的智能配电网快速自愈技术研究[J].电测与仪表,2021,58(7):67-73.
QIN Lijun, ZHANG Guoyan, CHEN Xiaodong, et al. Research on rapid self-healing technology of smart distribution network with DG[J]. Electrical Measurement &

Instrumentation, 2021, 58(7): 67-73.

- [3] 杨睿,高红均,李海波,等.基于稀疏表示的配电网故障区段定位研究[J].智慧电力,2021,49(10):8-15.
YANG Rui, GAO Hongjun, LI Haibo, et al. Fault section location in distribution network based on sparse representation[J]. Smart Power, 2021, 49(10): 8-15.
- [4] 何思名,袁智勇,雷金勇,等.基于改进灰狼算法的DG接入配电网反时限过电流保护定值优化[J].电力系统保护与控制,2021,49(18):173-181.
HE Siming, YUAN Zhiyong, LEI Jinyong, et al. Optimal setting method of inverse time over-current protection for a distribution network based on the improved grey wolf optimization[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(18): 173-181.
- [5] 王镜毓,石东源,陈金富,等.基于图数据库的继电保护整定计算数据存储与应用[J].电力自动化设备,2017,37(9):218-223.
WANG Jingyu, SHI Dongyuan, CHEN Jinfu, et al. Storage and application of relay protection setting calculation data based on graph database[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(9): 218-223.
- [6] 张羲海,张葛祥,王健,等.计及继电保护与油气信息的变压器故障推理[J].高压电器,2020,56(9):136-143.
ZHANG Xihai, ZHANG Gexiang, WANG Jian, et al. Transformer fault reasoning under relay protection and gas dissolved in oil information[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(9): 136-143.
- [7] GOKHALE S S, KALE V S. An application of a tent map initiated chaotic firefly algorithm for optimal over-current relay coordination[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2016, 78: 336-342.
- [8] 张章,胡源,罗涛,等.中压直流配电系统保护技术研究综述[J].电测与仪表,2020,57(23):109-118.
ZHANG Zhang, HU Yuan, LUO Tao, et al. Review on research of protection technology for medium voltage DC distribution system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2020, 57(23): 109-118.
- [9] PAU M, MUSCAS C, PEGORARO P A, et al. An efficient method to include equality constraints in branch current distribution system state estimation[J]. EURASIP Journal on Advances in Signal Processing, 2015, 2015(1): 17.
- [10] WEI T, LI X L, LI Y S. An inverse time-dependent source problem for a time-fractional diffusion equation

- [J]. *Inverse Problems*, 2016, 32(8):116-121.
- [11] ZHU L I, XIA L, LINGKAI L, et al. Optimal reserve dispatch model considering inverse-time line protection [J]. *Power System Protection and Control*, 2017; 45(15):15-21.
- [12] KIDA A A, PAREJA L A G. Optimal coordination of overcurrent relays using mixed integer linear programming[J]. *IEEE Latin America Transactions*, 2016, 14(3):1289-1295.
- [13] ALBASRI F A, ALROOMI A R, TALAQ J H. Optimal coordination of directional overcurrent relays using biogeography-based optimization algorithms[J]. *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2015, 30(4):1810-1820.
- [14] 谢桦, 陈昊, 张沛. 配电线路多源数据挖掘时变故障概率计算[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(9):63-67.
- XIE Hua, CHEN Hao, ZHANG Pei. Time-varying fault probability calculation for distribution line based on multi-source data mining [J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2020, 32(9):63-67.
- [15] 吕昊, 何益鸣, 田浩, 等. 基于物联网的园区综合能源系统快速通信网络建模与仿真[J]. *中国电力*, 2022, 55(5):166-173.
- LV Hao, HE Yiming, TIAN Hao, et al. Modeling and simulation of fast communication network for park integrated energy system based on IOT [J]. *Electric Power*, 2022, 55(5):166-173.
- [16] 周浩, 石磊, 彭涛, 等. 一起继电保护装置单粒子翻转软错误分析及应对措施[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(7):144-149.
- ZHOU Hao, SHI Lei, PENG Tao, et al. Analysis and countermeasures of single event upset soft errors in a relay protection device [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(7):144-149.
- [17] 胡傲, 黄景光, 翁汉琨, 等. 基于双向配置方向过流继电器的反时限后备保护优化整定策略[J]. *电力自动化设备*, 2016, 36(10):166-171.
- HU Ao, HUANG Jingguang, WENG Hanli, et al. Optimal setting strategy of inverse-time backup protection based on bidirectional configuration of directional overcurrent relays [J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2016, 36(10):166-171.
- [18] 侯俊杰, 宋国兵, 徐瑞东, 等. 交直流混合电网故障耦合特性分析与继电保护研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2021, 49(14):176-187.
- HOU Junjie, SONG Guobing, XU Ruidong, et al. Fault coupling characteristic analysis and relay protection research on an AC/DC hybrid power grid [J]. *Power System Protection and Control*, 2021, 49(14):176-187.
- [19] 刘建华. 粒子群算法的基本理论及其改进研究[D]. 长沙:中南大学, 2009.
- [20] 孟荣, 赵冀宁, 周通. 基于改进惯性权重粒子群算法的抢修小组快速调配策略[J]. *电网与清洁能源*, 2021, 37(7):17-24.
- MENG Rong, ZHAO Jining, ZHOU Tong. Rapid deployment strategy of emergency repair team [J]. *Power System and Clean Energy*, 2021, 37(7):17-24.