

# 基于改进遗传算法的继电保护定值优化的研究

赵建立, 范春菊, 乐全明, 邓孟华

(上海交通大学电子信息与电气工程学院, 上海 200240)

**摘要:** 如何获得一套满足用户期望的、保证整体性能最优的保护定值是当今继电保护整定计算中的研究热点之一。针对不同线路的定时限保护对于配合关系的重要性程度不同, 以及保护延时段对于不同约束条件的侧重不同, 提出了基于改进遗传算法的继电保护定值优化的算法。利用基于自适应的小生境遗传算法, 采用约束区间配合点编码的方法对全电网相间距离保护的 II 段整定计算的优化进行了初步探索, 并结合算例进行了算法的验证。

**关键词:** 定值优化; 约束区间配合点编码; 遗传算法; 约束条件权重

## Application of an enhanced genetic algorithm for protection relay setting coordination

ZHAO Jian-li, FAN Chun-ju, YUE Quan-ming, DENG Meng-hua

(Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China)

**Abstract:** To obtain a satisfactory protection relay setting coordination that can get the best integral effect of protection system is one of the focuses of the development of modern relay setting coordination. Different definite-time relays depend on the importance of the lines and the constraint conditions differently. This paper presents the application of an enhanced Niche-based genetic algorithm for optimizing the protective setting coordination of the second zone of phase distance relay by, adopting constraint interval encoding.

**Key words:** setting optimization; constraint interval coding; enhanced Genetic algorithm; constraint condition weight factor

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)22-0006-04

## 0 引言

现代化的继电保护系统对电力系统的安全稳定运行起着至关重要的作用。通常评价继电保护整定计算方案优劣是基于整体保护性能最优的原则。传统的继电保护整定计算采用了逐级配合的整定方法, 即保护仅与相邻元件的保护逐个进行配合, 确定多个整定结果, 从中选取最严重的数值作为最终整定值。这一整定方法实现简单, 然而这种整定方法没有综合考虑保护定值间的相互影响, 因此很难获得电网整体保护性能最优的保护定值。所以, 如何获得一套满足用户期望的、保证整体性能最优的保护定值成为一个亟待研究的问题。

文献[1]首次将优化理论引入整定计算中, 以所有保护整体动作时间最短为优化目标, 各个保护的待整定定值为自变量, 保护选择性、灵敏性等约束关系为约束条件, 运用直接法、分解法等优化技术解出了大规模电网过流保护的全局最优整定方案。文献[2]研究了基于遗传算法的定时限保护整体运行性能, 以保证所有保护整体动作时间最短和不满

足的约束条件最少为优化目标。文献[3]在采用改进粒子群算法对文献[2]的算法进行了优化。然而, 以上研究对于不同线路的定时限保护对于配合关系的重要性程度及相应保护延时段对于不同约束条件的侧重点没有予以考虑。鉴于这些不足, 本文采用改进遗传算法对文献[2, 3]中采用的模型进行改进, 引入相关权重因子的影响, 进行继电保护的定值优化计算, 并结合算例予以验证。

## 1 数学模型

整个电网继电保护的整定计算问题可以抽象成一个多目标、多变量和多约束的全局优化问题进行求解。在这里我们以全网距离保护延时段整定时间最短, 不满足约束条件最少为寻优目标, 并给各约束条件赋以相应权重。建立模型如下:

$$M = k / \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^l \{t_{ij} + \alpha_i [\beta_j f_{in}(t) + \chi_j f_{sm}(t) + \delta f_{sd}(t) + \varepsilon f_{knd}(t)]\} \quad (1)$$

式中:  $M$  为适应度值;  $k$  为常数;  $I$  为系统中定时限距离保护数目,  $J$  为定时限距离保护延时段数目;  $t_{ij}$  为保护  $i$  第  $j$  延时段动作时间;  $\alpha_i$  为保护安装处线路的权重因子;  $\beta_{ij}$ 、 $x_{ij}$ 、 $\delta_{ij}$ 、 $\varepsilon_{ij}$  分别为保护  $i$  第  $j$  延时段对对级差约束、灵敏度约束、选择性约束和负荷约束的权重因子;  $f(t)$  为关于时间的函数。

在方程式 (1) 中,  $\alpha_i$  为保护安装处线路的权重因子, 与网络结构的脆弱性指标相关。现在以一般情况下, 通过线路的潮流为依据, 定义如下:

$$\gamma_i = p_i, \quad \bar{\gamma}_i = \sum_l p_l / \sum_l l, \quad (2)$$

$$\alpha_i = \gamma_i / \bar{\gamma}_i \quad (3)$$

其中:  $P_l$  为流过线路  $l$  的潮流。考虑到线路潮流的波动性, 我们对  $\alpha_i$  进行粗略处理, 综合全网线路  $\alpha_i$  值, 将线路划分为几个等级, 统计其权重。

由于电力系统的结构和负荷性质的不同, 误动与拒动的危害程度有所不同。对于强联系的电网结构, 拒动的危害大于误动; 对于弱联系的电网结构, 误动的危害更严重<sup>[4]</sup>。如果保护的灵敏度约束得不到满足, 则区内故障时保护有可能拒动, 所以灵敏度约束权重应反比于电网脆弱性系数; 如果保护的选择性约束得不到满足, 则区外故障时保护有可能误动, 所以选择性约束权重应正比于电网脆弱性系数。

假设保护  $i$  所在线路处于  $n_i$  条简单回路<sup>[5]</sup>中, 保护  $i$  所连母线与电网联系线路有  $l_i$  条, 我们定义保护安装处线路电网脆弱性系数  $\eta_i$  如式(4), 并给出  $\delta_{ij}$  与  $x_{ij}$  的计算公式。

$$\eta_i = 1 / (n_i \times l_i); \quad \bar{\eta} = \sum \eta_i / \sum i; \quad (4)$$

$$\chi_{ij} = c_1 \bar{\eta} / \eta_i; \quad \delta_{ij} = c_2 \eta_i / \bar{\eta}; \quad (5)$$

式中:  $c_1$ 、 $c_2$  为常数。

同样对  $\delta_{ij}$  与  $x_{ij}$  进行粗略处理, 划分为几个等级, 统计其权重。

对于定时限后备保护, 级差约束从属于选择性约束, 我们取  $\beta_{ij} = 0$ ; 对于整定计算, 潮流约束一般满足, 我们取  $\varepsilon_{ij} = 0$ 。

$$f(t) = \Delta t; \quad (\text{不满足约束条件}) \quad (6)$$

$$f(t) = 0; \quad (\text{满足约束条件}) \quad (7)$$

电网的电压等级、网架结构的特点、负荷的性质等等均会影响到权重因子的求取。如何寻求最优权重因子应该根据电网的特点作相应修正。

## 2 改进的自适应小生境遗传算法

### 2.1 自适应遗传算法

自适应遗传算法(AGA)的基本思想是, 群体收敛到一个局部最优解时交叉和变异概率要增大才能使群体从局部最优解中尽快摆脱出来。因此交叉和变异算子应随进化代数增长而动态变化。另一方面, 适应度高的个体交叉和变异概率应该较小, 适应度低的个体交叉和变异概率应该较大, 交叉和变异算子应随个体适应度动态变化<sup>[6]</sup>。因此有以下方程式成立。

$$p_c = \frac{k_1(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, \quad f \geq f_{\text{avg}} \quad (8)$$

$$p_c = k_2, \quad f < f_{\text{avg}} \quad (9)$$

$$p_m = \frac{k_3(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, \quad f \geq f_{\text{avg}} \quad (10)$$

$$p_m = k_4, \quad f < f_{\text{avg}} \quad (11)$$

在式(8)~(10)中,  $k_1$ ~ $k_4$  为常量系数,  $f_{\max}$  为当前种群最大适应度值,  $f_{\text{avg}}$  为当前种群平均适应度值,  $f$  为当前个体适应度值。

### 2.2 自适应小生境遗传算法

自适应小生境遗传算法<sup>[7]</sup>:

①设置进化代数计数器  $t=1$ ; 随机生成  $M$  个初始个体组成初始群体  $P(t)$ , 求出各个个体适应度  $F_i$  ( $i=1, 2, \dots, M$ )。

②按个体适应度对群体进行降序排列, 记忆前  $N$  个个体 ( $N < M$ )。

③选择运算。对群体  $P(t)$  进行比例选择, 得到  $P^*(t)$ 。

④交叉运算。按公式(8)、(9)求交叉算子, 对  $P^*(t)$  作均匀交叉运算, 得到  $P^{**}(t)$ 。

⑤变异运算。按公式(10)、(11)求变异算子, 对  $P^{**}(t)$  作均匀变异运算, 得到  $P^{***}(t)$ 。

⑥小生境淘汰运算。将第⑤步得到的  $M$  个个体与第 2 步得到的  $N$  个个体合并在一起, 计算出两两之间的海明距离  $\|x_i - x_j\|$ 。当  $\|x_i - x_j\| < L$  时, 比较  $x_i$  和  $x_j$  适应度大小, 对适应度较小者处以罚函数。

⑦依据新适应度对这  $M+N$  个个体进行降序排列, 记忆前  $M$  个个体, 得  $P(t+1)$ 。

⑧终止条件判断。若不满足终止条件, 则更新进化代数计数器  $t=t+1$ , 转到第③步。若满足终止条件, 则停止计算。

## 3 算例分析

为了验证算法的优越性, 在这里给出了对实例电网相间距离 II 段的定值优化计算过程。

### 3.1 相关参数计算

利用本课题组开发软件 Eset, 对图 1 所示网络进行分析。图 1 中共有 7 个节点, 20 个保护。线路  $L_1, L_2, L_3, L_4, L_5, L_6, L_7, L_8, L_9, L_{10}$  潮流比重为 10: 4: 2: 2: 1: 2: 1: 6: 3: 3。计及潮流波动性, 将线路权重划分为四个级别, 相应线路权重为  $L_1: L_2: L_3: L_4: L_5: L_6: L_7: L_8: L_9: L_{10} = 5: 2: 1: 1: 1: 1: 3: 2: 2$ 。则线路上安装的保护的  $\alpha$  系数可相应取得。

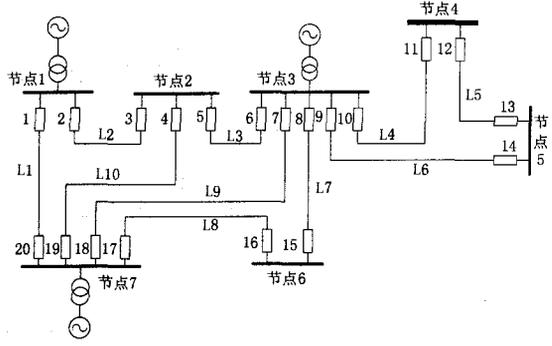


图 1 实例网络  
Fig. 1 Real system

保护 2 处于 3 条简单回路  $L_1-L_2-L_3-L_7-L_8$ 、 $L_1-L_2-L_3-L_9$  与  $L_1-L_2-L_{10}$  中, node1 有两条出线, 所以  $\eta_2=1/(2 \times 3)=0.1667$ 。同理  $\eta_3=0.1111$ 。因为保护 2, 3 共线, 所以取  $\eta_2=\eta_3=0.1667$ 。相应地, 根据公式(3)、(4), 并进行粗度处理, 可以得出表 1 所示结果。

表 1 保护权重表

Tab.1 Weight factor of relay

保护	$x_{ij}$	$\delta_{ij}$	保护	$x_{ij}$	$\delta_{ij}$
1	2	3	11	1	4
2	2	3	12	1	4
3	2	3	13	1	4
4	3	2	14	1	4
5	3	2	15	2	3
6	3	2	16	2	3
7	4	1	17	2	3
8	2	3	18	4	1
9	1	4	19	3	2
10	1	4	20	2	3

3.2 遗传算法编码设计

采用文献[2]提出的约束区间编码与文献[3]提出的配合点编码方式。为了简化处理, 本文保护的整定考虑以下 3 个原则:

- 1) 躲相邻线路距离 1 段;
- 2) 躲相邻线路距离二段;
- 3) 本线路故障有规定的灵敏度。

相应的基于约束区间的配合点图有图 2 所示 3 种形式。

对每个保护一共有 4 个配合点, 可以用 2 位二进制数字表示; 同时定义保护对应的的约束区间编码图模式为 Mode1、Mode2、Mode3。对一个保护而言, 其约束区间编码图的个数与该保护出线的个数相等。根据保护出线的数目, 分配相应的 bit 位数以区分当前保护染色体对应的需配合线路。例如, 实例网络中的保护 2, 其出线为  $L_3$  与  $L_{10}$ , 需要分配一个 bit 位 (0 代表  $L_{10}$  线路的保护 4, 1 代表  $L_3$  线路的保护 5)。保护 2 的基因码表现为 001, 则表示保护 2 的相间距离 2 段与相邻保护 5 的 1 段配合。

为了体现保护基因码的适应度, 我们定义相关配合点的罚区间。图 2(a)图中的  $t_1$  段点划线表示不满足与相邻保护 1 段配合的配合点的罚区间(不满足选择性)。图 2(a)图中的  $t_2$  段虚线表示不满足与相邻保护 2 段配合的配合点的罚区间(不满足选择性)。图 2(b)中的点划线表示不满足保本线路有规定灵敏度的配合点的罚区间(不满足灵敏性)。则保护的基因码不适应度值可以通过计算当前配合支路下的不适应度值和其他配合支路的不适应度值之和。以保护 2 基因码 001 为例, 假设其处于模式 Mode1, 则当前配合支路(保护 5)下, 处于  $t_1$  段  $Z_{sen}$  配合点的罚区间; 假设当前配合点的  $t_1$  等于其他配合保护(即保护 4)的  $t_1$ , 当前配合点的  $Z_1$  大于其他配合保护的  $Z_1$ , 且其他配合保护处于模式 Mode3, 则当前配合点处于其他配合保护  $t_1$  段  $Z_1$  配合点的罚区间。所以保护 2 当前基因码处于两个罚区间内。根据公式(2)-(4)计算相应权重, 即可得到公式(1)的个体适应度值。

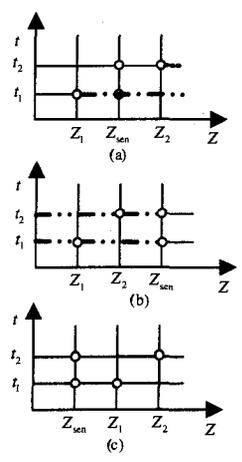


图 2 约束区间编码图模式  
Fig.2 Mode of constraint interval encoding

3.3 算例结果

我们依次计算设置权重前与设置权重后的实

例电网全网相间距离 2 段时间定值, 计算结果见表 3, 其中  $T$  为基因码表征时间,  $t$  为基因码动作时间。

由表 3 可以看出, 在未设置权重之前, 遗传算法可以得出与手算相同的结果; 设置权重之后个体染色体根据相应保护权重系数的不同呈现不同变化。例如, 保护 12, 13 均处于模式 Mode2, 无论基因码取 11 还是 10 均有一个约束条件不满足 (分别为灵敏度约束与选择性约束)。因为对于动作定值越靠近上限适应度越好, 因此优化结果为 10, 即按保护本线路有规定灵敏度整定。设置权重后, 因为保护 12, 13 灵敏度约束权重均为 1, 选择性约束均为 4, 基因码 10 附加时间为 8, 11 附加时间为 2, 新定值将按保证选择性整定, 基因码均取为 11。

表 2 实例网络计算结果

Tab.2 Calculating result of the real system

保护	设置前			设置后			手算
	基因码	$T$	$t$	基因码	$T$	$t$	
1	0010	0.5	0.5	0010	0.5	0.5	0.5
2	111	1.0	1.0	111	1.0	1.0	1.0
3	01	0.5	0.5	01	0.5	0.5	0.5
4	00	0.5	0.5	00	0.5	0.5	0.5
5	0001	0.5	0.5	0001	0.5	0.5	0.5
6	001	0.5	0.5	001	0.5	0.5	0.5
7	10	1.0	1.0	10	1.0	1.0	1.0
8	10	1.0	1.0	10	1.0	1.0	1.0
9	00	0.5	0.5	00	0.5	0.5	0.5
10	00	0.5	0.5	00	0.5	0.5	0.5
11	01	0.5	0.5	01	0.5	0.5	0.5
12	10	3.5	1.5	11	3.5	1.5	1.5
13	10	3.0	1.0	11	3.0	1.0	1.0
14	01	0.5	0.5	01	0.5	0.5	0.5
15	0001	0.5	0.5	0001	0.5	0.5	0.5
16	00	0.5	0.5	00	0.5	0.5	0.5
17	11	1.0	1.0	11	1.0	1.0	1.0
18	1101	1.5	1.5	1101	1.5	1.5	1.5
19	11	1.0	1.0	11	1.0	1.0	1.0
20	00	0.5	0.5	00	0.5	0.5	0.5

## 4 结论

因条件所限, 并未就如何寻求最优权重做深入分析。但对于不同线路的定时限保护对于配合关系的重要性程度及相应保护延时段对于不同约束条件的侧重点不同, 本文基于自适应的小生境遗传算法, 采用约束区间配合点编码的方法对全电网相间距离保护 II 段整定计算的优化进行了初步探索, 并结合算例进行了验证。定值与时间均为优化对象时的优

化方法是下一步工作的重点。

## 参考文献

- [1] Urdaneta A J, Nadira R, Perez L G. Optimal Coordination of Directional Overcurrent Relays in Interconnected Power Systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1988, (3):703-911.
- [2] LI Yin-hong, SHI Dong-yuan, DUM Xian-zhong. A Study on Optimal Coordination of Definite Time Relay Based on Genetic Algorithm[A]. In: Proceedings of the IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition[C]. Dallas(Piacataway):2000.279-284.
- [3] 梅念, 石东源, 李银红, 等. 基于改进粒子群算法的继电保护定值优化[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(16):72-76. MEI Nian, SHI Dong-yuan, LI Yin-hong, et al. Application of An Enhanced Particle Swarm Optimization Algorithm for Protection Relay Setting Coordination[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16):72-76.
- [4] 贺家李, 宋从矩. 电力系统继电保护原理[M]. 北京: 中国电力出版社, 1985.
- [5] 陈允平, 王旭蕊, 邵秋晓. 继电保护机辅整定中形成简单回路的新方法[J]. 电网技术, 1993, 17(3):28-34. CHEN Yun-ping, WANG Xu-rui, SHAO Qiu-shao. A New Method for Enumerating All Simple Loops in the Calculation of Relay Protection Setting Values[J]. Power System Technology, 1993, 17(3):28-34.
- [6] 徐峥, 炎士涛. 基于父个体更新的自适应遗传算法[J]. 微机计算机信息, 2006, 22(11):313-314. XU Zheng, YAN Shi-tao. Adaptive Genetic Algorithm Based on Parents' Replacement[J]. Control & Automation, 2006, 22(11):313-314.
- [7] 周明, 孙树栋. 遗传算法原理及应用[M]. 北京: 国防工业出版社, 1999.74-77.

收稿日期: 2007-06-07;

修回日期: 2007-08-01

作者简介:

赵建立(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为基于.NET的高压电网继电保护整定计算软件的研究; E-mail: zhao\_1883@163.com

范春菊(1967-), 女, 博士, 副教授, 长期从事电力系统继电保护及其综合自动化的教学研究工作;

乐全明(1974-), 男, 博士, 从事电力系统继电保护及其软件工程研究。