

# 配电网反时限过电流保护优化整定方法

杨克杰, 黄 纯

(湖南大学 电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082)

**摘要:**提出一种含分布式电源的配电网反时限过电流保护优化整定方法。以配电网主保护与后备保护的总动作时间最小为目标函数,考虑保护选择性要求等约束条件,建立保护优化整定的数学模型;通过设置动态参数并引入最优解权重改进和声搜索算法,提高算法收敛速度和获取全局最优解的能力。利用改进的和声搜索算法求解模型。优化整定参数基于配电网各故障点的短路电流获得,在计算短路电流时考虑分布式电源对短路电流的贡献,使优化整定结果适用于含分布式电源的配电网。对两相、三相短路故障分别进行保护离线优化整定,实时根据故障类型自动选择优化整定参数,克服保护易受故障类型影响的缺陷。仿真结果表明,所提方法可有效提高有源配电网反时限过电流保护的选择性和速动性。

**关键词:**反时限过电流保护;配电网;分布式电源;和声搜索算法;优化

**中图分类号:**TM 77

**文献标识码:**A

**DOI:**10.16081/j.issn.1006-6047.2019.03.026

## 0 引言

分布式电源 DG (Distributed Generation) 接入配电网后,改变了配电网单一功率流动方向和辐射型拓扑结构,传统三段式电流保护方法已不再适用,只有调整保护方法,才能实现含 DG 配电网的保护<sup>[1]</sup>。其中,反时限过电流保护的整定优化方法为含 DG 配电网的正常运行提供了可靠保障<sup>[2]</sup>。基于智能算法的整定优化中,改进和声搜索算法在解决规模大、维数高、非线性的优化问题中具有极大的优势,能够快速有效地得到全局最优解<sup>[3]</sup>。

目前大部分含 DG 配电网的研究都集中在以通信为基础的保护上<sup>[4-6]</sup>。与传统保护相比,以通信为基础的保护虽具备一定的优势,但其对通信系统的可靠性要求过高,一旦通信瓦解,保护将失效。因此本文将主要针对 DG 对传统过电流保护的影响,提出一种基于本地信息的配电网自适应电流整定方法。该方法可根据配电网运行状态和故障类型的变化实时调整保护定值,从而提高保护的灵敏度。

反时限过电流保护比传统三段式电流保护动作时限短、可靠性高,在配电网中得到了广泛应用<sup>[7]</sup>。文献[8]研究了 DG 接入容量和接入方式对原有三段式电流保护的影响。文献[9-10]依托故障电流限制器,运用保护的控制策略解决 DG 的选值定容问题。文献[11-12]采用智能算法整定优化反时限过电流保护,但算法自身鲁棒性较差,容易陷入局部最优,且该方法将约束条件中的非线性问题进行线性化处理,无法保证保护的可靠性。

本文提出一种改进的反时限过电流保护优化整

定方法,建立了配电网反时限过电流保护优化整定的数学模型,采用改进的和声搜索算法 HSA (Harmony Search Algorithm) 求解模型;对两相短路和三相短路故障分别进行保护参数整定,并根据故障类型自适应地匹配整定值;通过含 DG 的 10 kV 配电系统的仿真算例,验证所提保护优化整定模型及其求解算法的可行性和优越性。

## 1 配电网反时限过电流保护优化整定

### 1.1 反时限过电流保护优化整定的数学模型

与定时限过电流保护相比,反时限过电流保护提高了灵敏性和速动性,广泛应用于配电网中。

反时限过电流保护包含时间整定系数  $T_p$  和启动电流  $I_p$  两大参数,反时限过电流保护动作特性方程如式(1)所示<sup>[13]</sup>。

$$t_{ij} = \frac{0.14T_{pi}}{(I_{ij}/I_{pi})^{0.02} - 1} \quad (1)$$

其中, $i$  为保护设备的编号; $j$  为故障发生的线路编号; $T_{pi}$  为保护设备  $i$  的时间整定系数; $t_{ij}$  为保护动作时间; $I_{ij}$  为流过保护的电流; $I_{pi}$  为保护设备  $i$  的启动电流。

最优化的目标是在满足可靠性与选择性的情况下,配电网任何线路发生故障时,主保护与后备保护的总动作时间最小<sup>[14]</sup>,即最优化目标函数为:

$$\min T_{OPR} = \sum_{i=1}^M \sum_{k=1}^B \sum_{j=1}^L (t_{ij}^p + t_{kj}^b) \quad (2)$$

其中, $M$  为主保护设备的台数; $B$  为后备保护设备的台数; $L$  为故障线路的总数; $t_{ij}^p$  为当线路  $j$  发生短路故障时,保护  $i$  作为主保护的動作时间; $t_{kj}^b$  为当线路  $j$  发生短路故障时,保护  $k$  作为后备保护的動作时间。

为了使主保护与后备保护能够相互配合,需满

收稿日期:2018-01-05;修回日期:2018-12-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51677060)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51677060)

足式(3)所示的约束条件。

$$t_{ij}^b - t_{kj}^p \geq T_c \quad \forall i, k, j \quad (3)$$

其中,  $T_c$  为主保护与后备保护动作时间差的最小值, 为了保证保护的可靠性,  $T_c$  不能过小。

本文中, 所有的反时限过电流保护设备均符合 IEC255-3 标准, 满足式(4)、(5)所示的约束条件。

$$T_{pmin} \leq T_{pi} \leq T_{pmax} \quad \forall i \quad (4)$$

$$I_{pmin} \leq I_{pi} \leq I_{pmax} \quad \forall i \quad (5)$$

式(4)、(5)表示  $T_{pi}$  与  $I_{pi}$  必须在保护设备正常工作的允许范围内取值, 2 个参数均有上界和下界。

此外, 配电网的保护方案需要满足一定的灵敏度要求, 如式(6)所示。

$$k_1 I_{Lmax} \leq I_{pi} \leq k_2 I_{kmin} \quad \forall i \quad (6)$$

其中,  $I_{Lmax}$  为配电网正常运行时流过保护  $i$  的最大负荷电流;  $I_{kmin}$  为配电网发生故障时流过保护  $i$  的最小短路电流;  $k_1$ 、 $k_2$  为可靠系数, 决定该保护方案的灵敏性,  $k_1 > 1$  且  $k_2 < 1$ 。

则配电网反时限过电流保护优化整定问题转换为在约束条件式(3)~(6)下目标函数式(2)的最小优化问题。

## 1.2 针对不同故障类型的保护整定

配电网中性点一般采用不接地或经消弧线圈接地的小电流接地方式, 发生单相接地故障时, 故障电流小, 不需要电流保护动作跳闸。

发生相间短路故障时, 在相同条件下, 两相短路电流是三相短路电流的  $\sqrt{3}/2$ 。现有电流保护一般按三相短路故障进行整定, 然后按两相短路故障校核保护的灵敏度。但这种方法可能在某些情况(如线路长度较短, 首端与末端短路电流相差不大, 或者接入了较大容量的 DG)下, 无法得到满足要求的整定值。

目前, 大多数中压配电网保护已采用微机保护, 故障发生时, 微机保护装置能通过选相算法<sup>[15]</sup>确定故障类型。基于这一前提, 为避免故障类型对反时限过电流保护的影响, 本文针对两相短路故障和三相短路故障分别进行离线优化整定, 获得 2 套整定值; 故障发生后, 保护装置首先识别故障类型是两相短路故障还是三相短路故障, 然后根据故障类型自动匹配相应的离线优化整定参数, 从而提高反时限过电流保护的灵敏性和适用范围。

## 1.3 优化整定方法的适用性分析

值得注意的是, 不含 DG 的配电网与含 DG 的配电网在反时限过电流保护的优化整定模型方面没有区别。不同的是, 对于含 DG 配电网, 在计算流过各保护的故障电流  $I_{ij}$  时, 需要考虑 DG 对短路故障电流的贡献。则本文方法获得的保护参数的优化整定值对于不含 DG 或含各种类型 DG 的配

网均适用。

但是, 并不是所有配电网都适合采用反时限过电流保护。在配电网网络结构不合理、接入 DG 容量过大, 或者由于其他的一些情况下, 即使试图对配电网反时限过电流保护进行优化整定, 也无法同时满足保护的选择性、灵敏性和速动性要求。此时上述优化整定模型没有可行解。

因此, 如果对于某一特定配电网, 上述优化整定问题找不到解, 则说明反时限过电流保护不适用于该配电网, 需改用其他类型的保护, 如带方向的电流保护、纵联差动保护等。因此, 本文可为反时限过电流保护是否适用于某一特定配电网提供一种判断方法。

## 2 改进的 HSA

HSA 是一种智能全局优化算法, 具有概念简单、参数较少、不需要衍生信息、寻优速度快等优点。

HSA 优化过程包含以下步骤<sup>[16]</sup>。

步骤 1: 初始化优化问题。根据优化问题建立数学模型, 确定目标函数  $f(x)$ 、决策变量  $x_i$  及其集合  $x$ 、变量的个数  $N$  和每个变量的可行值域  $X_i$ , 统一形式如式(7)所示。

$$\begin{cases} \min f(x) \\ \text{s.t. } x_i \in X_i \quad i=1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (7)$$

步骤 2: 设定 HSA 基本参数。初始化和声记忆库大小  $H_{MS}$ 、保留和声概率  $H_{MCR}$ 、音调调整概率  $P_{AR}$  和最大迭代次数  $N_I$ 。

步骤 3: 初始化和声记忆库  $H_M$ 。在每个决策变量的可行值域中, 随机产生  $H_{MS}$  个初始解储存在  $H_M$  中, 计算每个解的目标函数值, 并根据目标函数值进行排序, 如式(8)所示。

$$H_M = [x^1 \quad x^2 \quad \dots \quad x^{H_{MS}}]^T \quad (8)$$

步骤 4: 生成新解  $x^{new}$ 。

a. 在保留和声概率  $H_{MCR}$  下, 决策变量在  $H_M$  提供的解集随机选值, 否则在该决策变量的可行值域内随机取值, 如式(9)所示。

$$x_i^{new} = \begin{cases} x_i^{new} \in \{x_i^1, \dots, x_i^{H_{MS}}\} & r_1 \leq H_{MCR} \\ x_i^{new} \in X_i & r_1 > H_{MCR} \end{cases} \quad (9)$$

其中,  $r_1$  为通过  $\text{rand}()$  函数产生的随机数。

b. 若在  $H_M$  中选值, 在音调调整概率  $P_{AR}$  下, 对该值进行微调扰动, 如式(10)所示。

$$x_i^{new} = \begin{cases} x_i^{new} + B_w u(-1, 1) & r_2 \leq P_{AR} \\ x_i^{new} & r_2 > P_{AR} \end{cases} \quad (10)$$

其中,  $r_2$  为通过  $\text{rand}()$  函数产生的随机数;  $B_w$  为连续决策变量的距离带宽;  $u(-1, 1)$  为均匀分布函数。

c. 对每个决策变量均按规则 a、b 生成新解。

步骤 5:更新  $H_M$ 。若新解优于  $H_M$  中的最差解,则用新解替换最差解,根据目标函数值排序,得到新的  $H_M$ 。

步骤 6:判断是否满足终止条件。若满足终止条件,则终止迭代,输出最优解;否则重复步骤 4、5。

HSA 优化过程中,  $H_{MCR}$ 、 $P_{AR}$  和  $B_W$  均为初始设定值,在迭代过程中无法更新。为了提高收敛速度与鲁棒性,本文对 HSA 进行两方面的改进,提出一种改进和声搜索算法 IHSA (Improved Harmony Search Algorithm)。

a. 将  $H_{MCR}$ 、 $P_{AR}$  和  $B_W$  设置为动态参数,如式 (11)~(13) 所示。

$$H_{MCR}(g_N) = H_{MCR \max} - (H_{MCR \max} - H_{MCR \min}) g_N / N_1 \quad (11)$$

$$P_{AR}(g_N) = P_{AR \min} + \frac{(P_{AR \max} - P_{AR \min}) \arctan(g_N / N_1)}{\pi/4} \quad (12)$$

$$B_W(g_N) = B_{W \max} \exp\left(\frac{g_N}{N_1} \ln \frac{B_{W \min}}{B_{W \max}}\right) \quad (13)$$

其中,  $g_N$  为当前迭代次数。随着  $g_N$  的增大,  $H_{MCR}$ 、 $B_W$  逐渐减小,  $P_{AR}$  逐渐增大。

在优化前期,  $H_{MCR}$  较大,  $P_{AR}$  较小, 有利于搜索局部最优解;  $B_W$  较大, 可增加解向量的多样性, 避免优化后期陷入局部最优解。在优化后期,  $H_{MCR}$  较小,  $P_{AR}$  较大, 可增加解向量的多样性;  $B_W$  较小, 微调量很小, 有利于提高最优解的质量。

b. 在 HSA 优化过程中, 当  $x_i^{\text{new}}$  从  $\{x_i^1, \dots, x_i^{H_{MS}}\}$  生成时, 每个分量的权重相等, 优化初期, 搜索方向不定, 随机性较大。IHSA 调整当前  $H_M$  最优解的权重  $w_b$ , 其余解平分剩下的权重  $w_r$ , 如式 (14)、(15) 所示。

$$w_b(g_N) = w_{b \max} - (w_{b \max} - w_{b \min}) g_N / N_1 \quad (14)$$

$$w_r = (1 - w_b) / (H_{MS} - 1) \quad (15)$$

IHSA 引入权重后, 提供了当前最优解的搜索方向。优化初期,  $w_b$  较大, 提高了收敛速度; 优化后期,  $w_b$  较小, 避免陷入局部最优解。

IHSA 流程图如附录 A 中的图 A1 所示。

本文采用 IHSA 求解反时限过电流保护整定优化问题, 具有以下优点:

a. IHSA 将约束条件转化为决策变量的值域和存入  $H_M$  中的判断条件, 无需在目标函数中引入多余参数和罚函数, 鲁棒性较好;

b. 将  $H_{MCR}$ 、 $P_{AR}$  和  $B_W$  设置为动态参数, 在优化初期, 增加解向量的多样性, 加快收敛速度, 在优化后期, 提高最优解的质量, 有利于得到全局最优解, 提高了 IHSA 的效率;

c. 引入最优解的权重  $w_b$ , 以提供搜索方向, 减

小搜索的随机性和无序性, 进一步提高 IHSA 的效率;

d. IHSA 原理简单, 容错性较高, 易于编程实现, 便于工程应用。

### 3 算例及仿真结果分析

为验证本文所提出的方法的正确性与可行性, 本文对图 1 所示的含 DG 的 10 kV 配电网进行保护优化整定。其中, DG 的最大功率设置为 480 kW<sup>[17]</sup>。

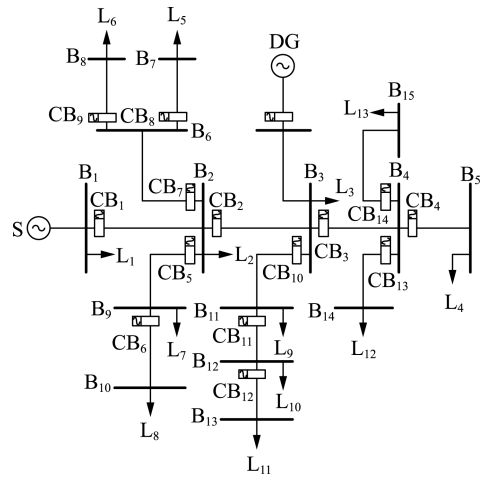




表 2 三相短路优化保护设置

Table 2 Settings of optimal protection for three-phase short circuit fault

| 保护              | $T_p$ | $I_p/A$ | 保护               | $T_p$ | $I_p/A$ |
|-----------------|-------|---------|------------------|-------|---------|
| CB <sub>1</sub> | 0.392 | 271.7   | CB <sub>8</sub>  | 0.116 | 102.6   |
| CB <sub>2</sub> | 0.253 | 280.4   | CB <sub>9</sub>  | 0.106 | 118.0   |
| CB <sub>3</sub> | 0.139 | 331.7   | CB <sub>10</sub> | 0.158 | 305.6   |
| CB <sub>4</sub> | 0.117 | 105.5   | CB <sub>11</sub> | 0.109 | 257.7   |
| CB <sub>5</sub> | 0.141 | 319.1   | CB <sub>12</sub> | 0.103 | 106.3   |
| CB <sub>6</sub> | 0.111 | 126.5   | CB <sub>13</sub> | 0.112 | 119.1   |
| CB <sub>7</sub> | 0.209 | 182.7   | CB <sub>14</sub> | 0.105 | 124.2   |

按照优化整定参数计算各保护的動作时间,如表 3 所示。由仿真结果可知,线路级数较多时,优化整定后的各保护動作时间明显减少。由于约束条件的设置,主保护与后备保护的動作时间差均大于 0.5 s,线路末端发生故障时,各保护的動作时间能够很好地相互配合,缩短了故障持续的时间。

表 3 三相短路故障保护動作时间

Table 3 Operating time of protections under three-phase short circuit fault

| 故障位置                             | 主保护動作时间/s |       | 后备保护動作时间/s |       |
|----------------------------------|-----------|-------|------------|-------|
|                                  | 传统        | 优化    | 传统         | 优化    |
| B <sub>1</sub> -B <sub>2</sub>   | 1.085     | 1.098 | —          | —     |
| B <sub>2</sub> -B <sub>3</sub>   | 1.034     | 0.970 | 1.545      | 1.471 |
| B <sub>3</sub> -B <sub>4</sub>   | 0.741     | 0.674 | 1.294      | 1.178 |
| B <sub>4</sub> -B <sub>5</sub>   | 0.355     | 0.361 | 0.889      | 0.896 |
| B <sub>2</sub> -B <sub>9</sub>   | 1.254     | 0.653 | 1.802      | 1.660 |
| B <sub>9</sub> -B <sub>10</sub>  | 0.908     | 0.379 | 1.784      | 0.892 |
| B <sub>2</sub> -B <sub>6</sub>   | 1.291     | 0.755 | 2.030      | 1.818 |
| B <sub>6</sub> -B <sub>7</sub>   | 1.154     | 0.361 | 1.702      | 0.885 |
| B <sub>6</sub> -B <sub>8</sub>   | 0.963     | 0.346 | 1.634      | 0.866 |
| B <sub>3</sub> -B <sub>11</sub>  | 1.006     | 0.837 | 1.527      | 1.354 |
| B <sub>11</sub> -B <sub>12</sub> | 1.171     | 0.737 | 1.705      | 1.273 |
| B <sub>12</sub> -B <sub>13</sub> | 1.308     | 0.429 | 1.970      | 0.991 |
| B <sub>4</sub> -B <sub>14</sub>  | 0.455     | 0.393 | 0.957      | 1.014 |
| B <sub>4</sub> -B <sub>15</sub>  | 0.342     | 0.341 | 0.857      | 0.844 |

DG 出力不同,保护動作时间不同。表 4 为考虑 DG 出力变化的保护動作时间。表中,100%(480 kV·A)、70%(336 kV·A)、40%(192 kV·A)为 DG 出力,后同。由表可见,当线路 B<sub>12</sub>-B<sub>13</sub> 末端发生三相短路故障时,线路级数最多,短路电流最小,影响最大。

表 4 考虑 DG 随机性保护動作时间

Table 4 Operating times of relays with randomness of DG

| 保护               | 動作时间/s         |               |               |
|------------------|----------------|---------------|---------------|
|                  | 100%(480 kV·A) | 70%(336 kV·A) | 40%(192 kV·A) |
| CB <sub>1</sub>  | 3.813          | 3.689         | 3.578         |
| CB <sub>2</sub>  | 2.784          | 2.672         | 2.574         |
| CB <sub>10</sub> | 1.816          | 1.863         | 1.911         |
| CB <sub>11</sub> | 0.991          | 1.011         | 1.031         |
| CB <sub>12</sub> | 0.429          | 0.433         | 0.437         |

由表 4 可知,随着 DG 出力的减小,系统提供的短路电流逐渐增大,DG 所在节点的上游保护 CB<sub>1</sub> 与 CB<sub>2</sub> 的動作时间减小,下游保护 CB<sub>10</sub>、CB<sub>11</sub> 与 CB<sub>12</sub>

的動作时间增加,CB<sub>2</sub> 与 CB<sub>10</sub> 的動作时间差逐渐减小,但仍大于 0.5 s。考虑 DG 运行的随机性,该算法仍然可以实现保护的选择性和可靠性。

将 IHSA 与标准 HSA 对比,收敛曲线如图 2 所示。迭代初期,由于 IHSA 引入搜索方向,保护動作时间下降较快,收敛速度较快;迭代中期,由于 IHSA 引入动态参数,收敛曲线较圆滑,而 HSA 收敛曲线呈阶梯状,易陷入局部最优;迭代后期,IHSA 的全局最优解明显优于 HSA。

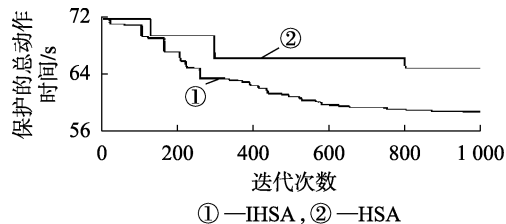


图 2 IHSA 与 HSA 收敛曲线图

Fig.2 Convergence waveforms of IHSA and HSA

### 3.2 针对两相短路故障的保护优化整定

设 DG 处于最大出力,该配电系统发生两相短路故障时,流过主保护的两相短路电流如附录 B 表 B3 所示。

根据约束条件和流过各保护的两相短路电流,初始化  $H_m$ ,并采用 IHSA 对各反时限过电流保护参数进行优化整定,如表 5 所示。

表 5 两相短路优化保护设置

Table 5 Settings of optimal protection under two-phase short circuit

| 保护               | 保护整定值 |         |
|------------------|-------|---------|
|                  | $T_p$ | $I_p/A$ |
| CB <sub>1</sub>  | 0.388 | 272.5   |
| CB <sub>2</sub>  | 0.314 | 194.1   |
| CB <sub>3</sub>  | 0.179 | 204.0   |
| CB <sub>4</sub>  | 0.104 | 103.1   |
| CB <sub>5</sub>  | 0.192 | 180.2   |
| CB <sub>6</sub>  | 0.101 | 106.3   |
| CB <sub>7</sub>  | 0.155 | 247.4   |
| CB <sub>8</sub>  | 0.105 | 114.1   |
| CB <sub>9</sub>  | 0.107 | 112.6   |
| CB <sub>10</sub> | 0.192 | 230.0   |
| CB <sub>11</sub> | 0.189 | 125.0   |
| CB <sub>12</sub> | 0.102 | 104.3   |
| CB <sub>13</sub> | 0.108 | 101.5   |
| CB <sub>14</sub> | 0.100 | 102.7   |

按照优化整定参数计算各保护的動作时间,如附录 B 中的表 B4 所示。由表可见,与传统整定方法相比,反时限过电流保护经过优化整定后,在保障保护选择性的同时,缩短了故障持续的时间,有效提高了多级长线路上保护的速动性。

在采用三相短路优化整定参数的情况下,若线路 B<sub>3</sub>-B<sub>11</sub> 末端发生两相短路故障,则不同的 DG 出力下,各保护的動作时间变化如表 6 所示。

表6 三相短路整定参数下保护动作时间

Table 6 Operating times of relay protections with setting parameters under three-phase short circuit

| 保护               | 动作时间/s          |                |                |
|------------------|-----------------|----------------|----------------|
|                  | 100% (480 kV·A) | 70% (336 kV·A) | 40% (192 kV·A) |
| CB <sub>1</sub>  | 2.202           | 2.177          | 2.158          |
| CB <sub>2</sub>  | 1.498           | 1.481          | 1.467          |
| CB <sub>10</sub> | 0.935           | 0.957          | 0.978          |

由仿真结果可知,随着 DG 出力的减小,系统 S 提供的故障电流逐渐增加, CB<sub>2</sub> 与 CB<sub>10</sub> 的动作时间差逐渐减小,甚至小于 0.5 s,不符合约束条件  $T_c$ ,降低了保护的选择性和可靠性。故三相短路优化整定参数不适用于两相短路故障,需配置 2 套优化整定参数,如表 7 所示。

表7 两相短路整定参数下保护动作时间

Table 7 Operating times of relay protections with setting parameters under two-phase short circuit

| 保护               | 动作时间/s          |                |                |
|------------------|-----------------|----------------|----------------|
|                  | 100% (480 kV·A) | 70% (336 kV·A) | 40% (192 kV·A) |
| CB <sub>1</sub>  | 2.187           | 2.162          | 2.143          |
| CB <sub>2</sub>  | 1.473           | 1.460          | 1.450          |
| CB <sub>10</sub> | 0.909           | 0.927          | 0.943          |

仿真结果表明,配置两相短路优化整定参数,缩短了故障持续的时间,提高了多级长线路上保护的速动性;保护的動作时间差均大于 0.5 s,考虑 DG 出力的随机性,两相短路优化整定参数仍然能实现保护的选择性和可靠性。

### 3.3 针对非金属性故障保护性能验证

配电网发生非金属性短路故障时,过渡电阻使故障电流减小,保护的灵敏性和速动性将受到一定影响。配电线路越短,阻抗越小,保护受到过渡电阻的影响越大。因此,选择较短线路 B<sub>3</sub>-B<sub>4</sub> 末端发生非金属性短路故障验证优化整定值,不同过渡电阻情况下各保护动作时间如表 8 所示。

表8 非金属性短路故障时各保护的動作时间

Table 8 Operating time of relay protections under non-metallic faults

| 故障类型 | 过渡电阻/ $\Omega$ | 保护動作时间/s        |                 |                 |
|------|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
|      |                | CB <sub>1</sub> | CB <sub>2</sub> | CB <sub>3</sub> |
| 三相短路 | 0.5            | 1.861           | 1.243           | 0.713           |
|      | 1.0            | 1.956           | 1.312           | 0.757           |
|      | 2.0            | 2.166           | 1.468           | 0.857           |
|      | 4.0            | 2.656           | 1.844           | 1.112           |
| 两相短路 | 0.5            | 2.000           | 1.311           | 0.727           |
|      | 1.0            | 2.114           | 1.373           | 0.762           |
|      | 2.0            | 2.368           | 1.510           | 0.840           |
|      | 4.0            | 2.979           | 1.822           | 1.029           |

由仿真结果可知,随着过渡电阻的增大,主保护(CB<sub>3</sub>)与后备保护(CB<sub>1</sub>、CB<sub>2</sub>)的動作时间延长,保护的速动性受到影响。但是,随着保护動作时间差的增大,保护的选择性有所提高。因此,2 套整定优

化参数仍然可以实现对低阻和中阻故障的保护。如果过渡电阻进一步增大,動作时间将更长。如果过渡电阻增大导致短路电流小于最大负荷电流,保护将不会動作。目前,配电网常用的三段式电流保护、反时限过电流保护均不能有效实现对高阻故障的保护。

## 4 结论

本文以配电网反时限过电流保护的主保护与后备保护的总動作时间最小为目标函数,以配电网网络约束及保护选择性要求等为约束条件,建立了含分布式电源的配电网反时限过电流保护参数优化整定的数学模型,并采用 IHSA 求解,得到以下的结论。

a. 通过设置 HSA 动态参数并引入权重思想,对 HSA 进行了改进,显著提高了 HSA 的收敛速度和获取全局最优解的能力。

b. 为避免故障类型对反时限过电流保护的影响,针对两相短路和三相短路故障分别进行离线优化整定,获得 2 套整定值;故障发生后,保护首先识别故障性质,然后根据故障类型自动匹配相应的离线优化整定参数,可提高反时限过电流保护的灵敏性和适用范围。

c. 反时限过电流的优化整定参数是基于配电网中各故障点的短路电流获得的,由于短路电流计算时考虑了分布式电源对各短路电流的贡献,因此优化整定结果适用于含分布式电源的配电网。

d. 对于某一特定配电网,优化整定问题可能找不到解(在接入的 DG 容量过大,或者配电网结构不够合理时,这种情况更容易出现);这说明反时限过电流保护不能同时满足该配电网的保护选择性和速动性要求,需改用其他类型的保护。因此,本文方法事实上为反时限过流保护是否适用于某一特定配电网提供了一种判断手段。

e. 仿真结果表明,在反时限过电流保护整定优化问题有解时,本文方法通过反时限过电流保护参数的优化整定,在保障选择性的同时,可有效提高保护的速动性。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 梁才浩,段献忠. 分布式发电及其对电力系统的影响[J]. 电力系统自动化,2001,25(12):53-56.  
LIANG Caihao, DUAN Xianzhong. Distributed generation and its influence on the power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2001, 25(12): 53-56.
- [2] 王鲍雅琼,陈皓. 含分布式电源的配电网保护改进方案综述[J]. 电力系统保护与控制,2017,45(12):146-154.  
WANG Baoyaqiong, CHEN Hao. Overview study on improving protection methods of distribution network with distributed generation[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(12): 146-154.
- [3] MAJID J, ESMAILE K. Two improved harmony search algorithms for solving engineering optimization problems[J]. Communication and

- Numerical Simulation, 2010, 15(11): 3316-3331.
- [4] 马静, 王希, 米超, 等. 含分布式电源的配电网自适应保护新方法[J]. 电网技术, 2011, 35(10): 204-208.  
MA Jing, WANG Xi, MI Chao, et al. A new adaptive protection approach for distribution network containing distributed generation[J]. Power System Technology, 2011, 35(10): 204-208.
- [5] 李鹏, 窦鹏冲, 李雨薇, 等. 微电网技术在主动配电网中的应用[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(4): 8-16.  
LI Peng, DOU Pengchong, LI Yuwei, et al. Application of microgrid technology in active distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(4): 8-16.
- [6] 马静, 刘静. 基于故障稳态分量的含 DG 配电网自适应方向电流保护方案[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(1): 1-9.  
MA Jing, LIU Jing. Adaptive directional current protection scheme based on steady state component in distribution network with DG[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(1): 1-9.
- [7] 张保会, 尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京: 中国电力出版社, 2005: 24-30.
- [8] 孙鸣, 赵月灵, 王磊. DG 容量及接入方式对变电站继电保护定值的影响[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(9): 46-49.  
SUN Ming, ZHAO Yueling, WANG Lei. Impact of DG capacity and location on relay protection of substation[J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(9): 46-49.
- [9] HUCHEL L, ZEINELDIN H H. Planning the coordination of directional overcurrent relays for distribution systems considering DG[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2017, 7(3): 1642-1649.
- [10] 付文秀, 范春菊, 杨炼, 等. 配电网中分布式电源的选址定容和电流保护策略[J]. 电力系统自动化, 2014, 38(10): 78-84.  
FU Wenxiu, FAN Chunju, YANG Lian, et al. Locating and sizing of distributed generators and current protection strategy in distribution networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2014, 38(10): 78-84.
- [11] RAZAVI F, ABYANEH H A, AL-DABBAGH M, et al. A new comprehensive genetic algorithm method for optimal overcurrent relays coordination[J]. Electric Power Systems Research, 2008, 78(4): 713-720.
- [12] MANSOUR M M, MEKHAMER S F, EI-KHARBAWE E S. A modified particle swarm optimizer for the coordination of directional over-current relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007, 22(3): 1400-1410.
- [13] 郭煜华, 姜军, 范春菊, 等. 改进的配电网反时限过电流保护[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(10): 45-50.  
GUO Yuhua, JIANG Jun, FAN Chunju, et al. Improved inverse time over current protection for distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(10): 45-50.
- [14] ZEINELDIN H H, SHARAF H M, IBRAHIM D K, et al. Optimal protection coordination for meshed distribution systems with DG using dual setting directional over current relays[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 6(1): 115-123.
- [15] 牛耕, 周龙, 裴玮, 等. 低压有源配电网在线故障区间定位与识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(9): 2525-2538.  
NIU Geng, ZHOU Long, PEI Wei, et al. On-line fault section location and classification technique for low voltage active distribution network[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(9): 2525-2538.
- [16] ZONG W G, KIM J H, LOGANATHAN G V. A new heuristic optimization algorithm: harmony search[J]. Simulation Transactions of the Society for Modeling & Simulation International, 2001, 76(2): 60-68.
- [17] 王江海, 邵能灵, 宋凯, 等. 考虑继电保护动作的分布式电源在配电网中的准入容量研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 37-43.  
WANG Jianghai, TAI Nengling, SONG Kai, et al. Penetration level permission of for DG in distributed network considering relay protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 37-43.
- [18] KHESHTI M, TEKPETI B S, KANG X. The optimal coordination of over current relay protection in radial network based on particle swarm optimization[C] // 2016 IEEE PES Asia Pacific Power and Energy Engineering Conference. Xi'an, China: IEEE, 2016: 604-608.

#### 作者简介:



杨克杰

杨克杰(1993—),男,河南安阳人,硕士研究生,主要研究方向为主动配电网(E-mail: 15200818623@163.com);

黄纯(1966—),男,湖南长沙人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,主要研究方向为智能配电网、电能质量分析与控制、电力系统保护与控制(E-mail: yellow-pure@hotmail.com)。

## Optimal setting method of inverse time over-current protection for distribution network

YANG Kejie, HUANG Chun

(College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

**Abstract:** An optimal setting method of inverse time over-current protection for distribution network with DGs (Distributed Generations) is proposed. Taking the minimum total operation time of main protection and backup protection as the objective function and considering the constraints such as the selectivity, the mathematical model of protection optimization is established. By setting the dynamic parameters and introducing the optimal weight, the HSA (Harmony Search Algorithm) is improved in aspects of convergence speed and the ability to obtain the global optimal solution. The mathematical model of protection optimization is solved by the improved HAS. The optimal setting parameters are obtained based on the short circuit currents from different fault points in distribution network and the contribution of DGs is considered in short circuit current calculation, which makes the optimal setting results applicable to the distribution network with DGs. The off-line protection optimization is carried out respectively for the two-phase short circuit fault and three-phase short circuit fault, and the optimal setting parameters are selected automatically and real-timely according to the different fault types, by which the defect that the protection is easily affected by fault types can be overcome. Simulative results show that the proposed method can effectively improve the selectivity and speed of the inverse time over-current protection for distribution network with DGs.

**Key words:** inverse time over-current protection; distribution network; distributed power generation; harmony search algorithm; optimization

## 附录 A

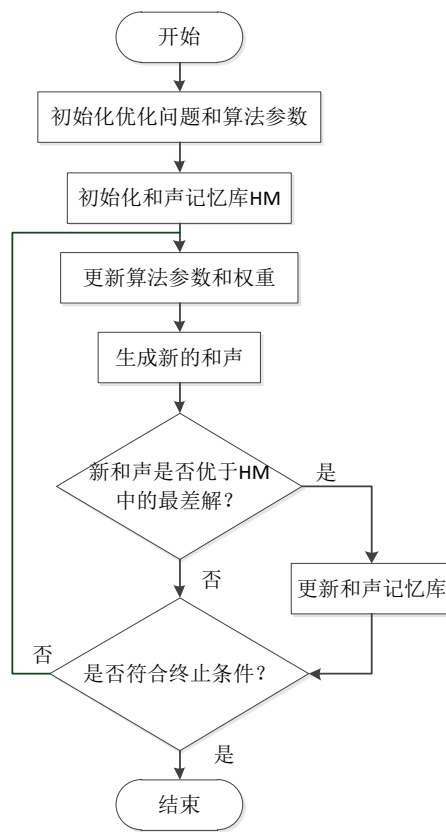


图 A1 IHSA 流程图

Fig.A1 Flow diagram of IHSA

附录 B

表 B1 负载参数

TableB1 Parameters of loads

| 负载 | 有功/MW | 无功/MVar | 负载 | 有功/MW | 无功/MVar |
|----|-------|---------|----|-------|---------|
| 1  | 0.4   | 0.15    | 8  | 0.05  | 0.02    |
| 2  | 0.1   | 0.2     | 9  | 0.2   | 0.08    |
| 3  | 0.25  | 0.1     | 10 | 0.1   | 0.1     |
| 4  | 0.3   | 0.2     | 11 | 0.25  | 0.09    |
| 5  | 0.1   | 0.05    | 12 | 0.1   | 0.05    |
| 6  | 0.3   | 0.07    | 13 | 0.3   | 0.2     |
| 7  | 0.1   | 0.05    | —  | —     | —       |

表 B2 主保护与后备保护对应关系

TableB2 Corresponding relationship between main protections  
and backup protections

| 主保护             | 后备保护            | 主保护              | 后备保护             |
|-----------------|-----------------|------------------|------------------|
| CB <sub>1</sub> | —               | CB <sub>8</sub>  | CB <sub>7</sub>  |
| CB <sub>2</sub> | CB <sub>1</sub> | CB <sub>9</sub>  | CB <sub>7</sub>  |
| CB <sub>3</sub> | CB <sub>2</sub> | CB <sub>10</sub> | CB <sub>2</sub>  |
| CB <sub>4</sub> | CB <sub>3</sub> | CB <sub>11</sub> | CB <sub>10</sub> |
| CB <sub>5</sub> | CB <sub>1</sub> | CB <sub>12</sub> | CB <sub>11</sub> |
| CB <sub>6</sub> | CB <sub>5</sub> | CB <sub>13</sub> | CB <sub>3</sub>  |
| CB <sub>7</sub> | CB <sub>1</sub> | CB <sub>14</sub> | CB <sub>3</sub>  |

表 B3 流过主保护的两相短路电流

TableB3 Two-phase short circuit currents flowing through main protections

| 故障位置                            | 主保护<br>短路电流/A | 故障位置 | 主保护<br>短路电流/A |
|---------------------------------|---------------|------|---------------|
| B <sub>1</sub> -B <sub>1</sub>  | 2723          | d8   | 838.6         |
| B <sub>2</sub> -B <sub>3</sub>  | 1429          | d9   | 810.9         |
| B <sub>3</sub> -B <sub>4</sub>  | 1202          | d10  | 982.9         |
| B <sub>4</sub> -B <sub>5</sub>  | 845.4         | d11  | 624.3         |
| B <sub>2</sub> -B <sub>9</sub>  | 1241          | d12  | 478.7         |
| B <sub>9</sub> -B <sub>10</sub> | 828.7         | d13  | 732.8         |
| B <sub>2</sub> -B <sub>6</sub>  | 1076          | d14  | 896.6         |

表 B4 两相短路故障保护动作时间

TableB4 Operating time of protections under two-phase short circuit fault

| 故障位置                             | 动作时间/s |       |       |       |
|----------------------------------|--------|-------|-------|-------|
|                                  | 主保护    |       | 后备保护  |       |
|                                  | 传统     | 优化    | 传统    | 优化    |
| B <sub>1</sub> -B <sub>2</sub>   | 1.126  | 1.153 | -     | -     |
| B <sub>2</sub> -B <sub>3</sub>   | 1.114  | 1.062 | 1.626 | 1.563 |
| B <sub>3</sub> -B <sub>4</sub>   | 0.862  | 0.695 | 1.419 | 1.255 |
| B <sub>4</sub> -B <sub>5</sub>   | 0.590  | 0.339 | 1.275 | 0.868 |
| B <sub>2</sub> -B <sub>9</sub>   | 1.053  | 0.684 | 1.918 | 1.781 |
| B <sub>9</sub> -B <sub>10</sub>  | 0.785  | 0.338 | 1.319 | 0.860 |
| B <sub>2</sub> -B <sub>6</sub>   | 0.924  | 0.725 | 2.182 | 1.965 |
| B <sub>6</sub> -B <sub>7</sub>   | 0.532  | 0.362 | 1.068 | 0.863 |
| B <sub>6</sub> -B <sub>8</sub>   | 0.548  | 0.371 | 1.094 | 0.889 |
| B <sub>3</sub> -B <sub>11</sub>  | 1.177  | 0.910 | 1.707 | 1.473 |
| B <sub>11</sub> -B <sub>12</sub> | 1.262  | 0.808 | 1.767 | 1.314 |
| B <sub>12</sub> -B <sub>13</sub> | 0.617  | 0.461 | 1.540 | 0.962 |
| B <sub>4</sub> -B <sub>14</sub>  | 0.666  | 0.376 | 1.536 | 0.952 |
| B <sub>4</sub> -B <sub>15</sub>  | 0.590  | 0.319 | 1.170 | 0.829 |