

基于遗传算法的区域电网智能保护

汪¹, 尹项根¹, 赵逸君², 张哲¹

(1. 华中科技大学电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北省武汉市 430074;

2. 中国地质大学计算机学院, 湖北省武汉市 430074)

摘要: 通过对广域保护应用基础研究, 提出一种利用区域电网信息的智能保护系统, 与现有主保护协同工作, 加强电网继电保护水平, 简化后备保护。同时, 针对广域信息采集易受干扰而出现信息丢失或畸变等实际问题, 以及现有广域保护原理对此考虑不足的情况, 提出了包括基于状态关联的区域保护原理与基于遗传算法故障判别原理的区域电网智能保护的决策模块及其工作机制。建立了基于遗传算法的故障数学模型, 仿真试验验证了该模型的有效性及其高容错性。

关键词: 区域电网; 继电保护; 遗传算法; 容错性

中图分类号: TM771

0 引言

近年来, 基于广域测量系统(WAMS)及在线动态安全分析(DSA)的广域保护的研究成为电力系统重要的前沿研究课题之一, 引起了国内外学者的广泛关注^[1-5]。本文认为, 广域保护的一种基本描述是利用广域信息实现的安全稳定控制及继电保护系统。按国内工程应用的划分, 广域保护实际包含了安全紧急控制的“三道防线”, 处于“第一道防线”的继电保护功能是整个安全紧急控制的基础, 因此, 利用广域或区域信息来改善继电保护性能的研究是真正实现广域保护的首要步骤。从应用基础研究的角度出发, 首先以负荷点自然形成的一个个相对独立的能量流交汇区域为中心, 充分利用该区域的信息, 提高“第一道防线”的保护水平; 在此基础上逐步实现包括安全稳定控制的广域保护系统。

目前国内外学者提出了多种广域或区域保护理论, 主要有基于关联方向广域保护、广域电流差动保护及集合保护等^[6-8]。这些保护原理在假定数据采集正确的前提下, 能准确、快速地进行故障判断。但广域信息的采集处于较大范围的区域内, 达不到类似传统保护装置那样精密的抗干扰措施, 并且在原理上对坏数据干扰的处理不足, 尽管随着 WAMS 的完善及变电站光纤化的普及保证了远动通信的实时性和低误码率, 当传输信息帧通过通信校验仍可能出现如下情况: ①部分信息丢失, 引起原因可能是通信环境出现扰动, 或自然灾害引起通信通道损坏; ②部分错误信息上传到决策层, 分布式的信息采集

抗干扰措施难以全面保障, 可能在采集端就出现误信息或误判。信息采集的广域性决定了广域判别原理必须具有极强的容错性能, 但这并不是以往广域保护理论基础研究的重点; 同时, 挖掘广域范围内反映电网故障的各类实时信息与信息间隐含逻辑联系, 提高保护灵敏性和可靠性, 系统需要寻求人工智能技术的支持。遗传算法(GA)是一种自适应启发式全局搜索的概率算法, 能同时搜索解空间的多个点, 使待求问题实现全局最优。目前已有将 GA 用于电力系统的相关研究^[9-11], 但其故障定位数学模型侧重于配电网故障诊断, 采集的电网反馈信息较多, 不适合输电网继电保护领域。在以往研究的基础上, 本文提出一种基于 GA 的广域保护新原理, 建立了数学模型, 并通过仿真对其进行验证。

1 区域电网智能保护

1.1 区域电网智能保护决策模块

广域保护采集的分布式状态信息往往会导致判据对坏数据的抗干扰能力不足, 所以区域电网智能保护决策模块必须采取一套具有较强容错能力的判别系统作为主判据, 充分利用电网故障信息间的逻辑联系, 使区域保护在采集信息存在缺失或畸变时仍能正确决策。另外, 选择一套基于状态关联的区域保护理论作为辅助判据, 以提高系统的可靠性和快速性。主判据与逻辑清晰的辅助判据形成互补, 本文提出了基于 GA 的人工智能判别方法。GA 基于进化理论, 并采用遗传结合、遗传变异及自然选择等设计方法, 简单通用、鲁棒性强, 具有高容错性能。为降低通信负担, 2 套判别单元应尽量考虑选取相同的反映故障的多维电网状态信息作为输入,

包括:区域内主保护(线路和母线)与断路器失灵保护动作状态信息、断路器状态信息、故障方向信息。

1.2 决策模块工作机制

决策模块利用采集信息之间隐含的逻辑关系进行快速的信息状态估计,估计过程与决策流程同时进行。为提高系统可靠性采取以下措施:采集信息可靠时 2 个判据与门出口;存在一定信息误差时主判据重复判断并延时出口;信息误差较大时闭锁系统决策并告警。图 1 为决策模块逻辑控制关系,其中 F 表示逻辑估计误差值, K 表示最大允许容错。

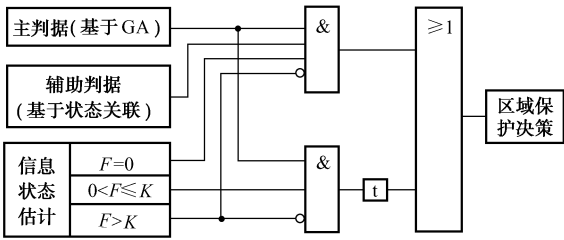


图 1 决策逻辑
Fig. 1 Decision-making logic

信息状态估计模块的任务是对接收到的电网信息进行快速逻辑辨识,鉴别以下几种逻辑:①保护元件信息缺失。②反映相同保护元件的冗余状态信息间的逻辑矛盾:某线路保护主保护状态为动作而两端故障方向相反;保护未动但相关断路器处于跳开状态。 F 与逻辑检测结果对应, K 与保护区域范围及选取的电网关联故障信息量相关。

1.3 区域电网智能保护与现有保护系统的配合

区域智能保护的主要目的在于改善后备保护,寻求与现有主保护的配合。文献[6]提出利用光纤网实现广域差动,并利用仿真软件 Network Simulator 得出网络通信延时最高为 24 ms,而本系统通信传输的状态量远小于广域差动的通信量,考虑决策单元运算的时间与其他延时影响,其对故障的反应时间一定小于 100 ms,比现有后备保护动作更快。由于采用的是多点冗余方向与状态信息,该系统能实现故障准确定位,且与基于差动或纵联方向的主保护判别形成特性互补。同时,当主保护由于异常原因退出运行时,或在某些没有配置双重主保护的区域,可以将其配置为第 2 套主保护。

由于区域智能保护不是靠延时来进行主、后备保护的配合,而是根据系统实时的关联矩阵和故障位置判断出作为后备动作的保护单元,避免了传统后备保护复杂的整定配合问题。通过决策单元对故障进行正确定位后,区域电网智能保护系统能实现以下动作策略:①主保护拒动时加速近后备保护动

作;②故障线路保护单元完全失效时,缩短远后备保护的的动作时间;③对于未装设断路器失灵保护的系系统,断路器失灵时缩短远后备保护的的动作时间及达到类似于断路器失灵保护动作的效果。

2 基于状态关联的区域保护原理

以 F_1 点发生单相接地故障说明区域保护原理。区域电网的实时拓扑结构是进行故障定位的基础,线路的拓扑结构在发生故障、检修时或新加入线路和变电站等情况下,会发生改变。区域保护决策单元在保存初始线路拓扑图的基础上,根据收到的断路器状态信息实时修正被保护区域的拓扑结构,如图 2 所示,其中 CB 表示断路器。

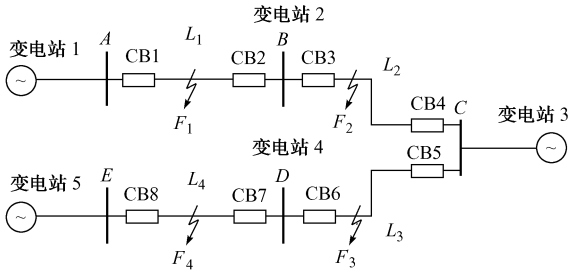


图 2 区域电网结构
Fig. 2 Framework of regional power network

若断路器都处于闭合状态(1 为闭合状态、0 为断开状态),状态信号矩阵 A 为(对应 CB1~CB8):

$$A = [1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1] \tag{1}$$

得出的实时区域关联矩阵 B 为(行对应变电站 1~5,列对应线路 1~4):

$$B = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{2}$$

根据实时故障方向信息,假定“1”代表方向元件的正向结果,“-1”代表方向元件的反向结果,假定在方向元件判断全部正确的情况下可能得到 F_1 点故障下的方向元件结果,如表 1 所示。

表 1 方向元件判断结果
Table 1 Estimation results of direction elements

变电站	方向元件结果			
	线路 1	线路 2	线路 3	线路 4
1	1			
2	1	-1		
3		1	-1	
4			1	-1
5				1

将方向元件计算结果代入系统结构关联矩阵中,代替矩阵中对应元素,得出对应的结果矩阵为:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

在将式(3)中同一矩阵的行向量相加得到的结果中,元素2对应的线路即为发生故障的线路,本例的结果为[2,0,0,0,0],因此,判断线路1发生故障。

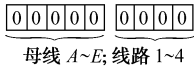
基于状态关联的判别原理无需进行复杂的数据计算,判断准确、迅速,但对状态信息的可靠性要求高,方向元件的正确判断与采集信息完整性直接对决策产生影响,在涉及较多变电站的区域保护系统的应用环境下,仍具有一定局限性。

3 基于 GA 的故障判别原理

将 GA 用于电力系统继电保护领域的关键是建立合理的网络故障数学模型。与配电网相比,输电网络是一个多电源配置的系统,其保护的元件相对重要,配置保护种类多且动作策略也更加复杂,这给建立合适的数学模型带来了一定难度。为保证该判别系统对故障的响应速度,可利用的区域电网状态信息与前述区域保护采集信息相同。

3.1 基因编码

GA 一般不直接处理问题空间的参数而是将待优化的参数进行编码。由于 0-1 数字串恰好能与系统中设备的 2 种状态对应(0 为正常状态、1 为故障状态),所以将参数编码成二进制的数字串,用数字串来表示区域电网智能保护的决策解。图 2 所形成的决策解可表示如下:



3.2 建立适应度函数

在遗传操作中,适应度函数是评价解的性能的依据,性能好的解其优良性能将遗传给下一代。根据适应度函数对群体中的每个个体计算其适应度,为群体进化的选择提供依据。设计适应度函数的主要方法是把问题的目标函数转化成合适的适应度函数。本文构造的适应度函数为:

$$F_{it}(\mathbf{X}) = \sum_{j=1}^N |A_j - A_j^*(\mathbf{X}, \mathbf{C})| + \sum_{k=1}^S |F_k - F_k^*(\mathbf{X}, \mathbf{C})| \quad (4)$$

式中: N 为主保护和断路器失灵保护总数目; M 为

系统元件的数目; S 为故障方向元件数目; $\mathbf{X}$ 为一个 M 维向量, X_i 表示第 i 个元件的状态(0 为正常, 1 为故障状态); $\mathbf{A}$ 为一个 N 维向量, A_j 表示第 j 个保护的实际行动状态(0 为未动作, 1 为动作); $\mathbf{A}^*(\mathbf{X}, \mathbf{C})$ 为一个 N 维向量, $A_j^*(\mathbf{X}, \mathbf{C})$ 表示第 j 个保护的期望状态,如果第 j 个保护应动作, $A_j^* = 1$, 否则 $A_j^* = 0$; F_k 和 $F_k^*(\mathbf{X}, \mathbf{C})$ 的表述与 A_j 和 $A_j^*(\mathbf{X}, \mathbf{C})$ 类似, 分别代表系统中 S 个方向元件的实际状态及其期望状态,如果第 j 个方向为正向, $F_j^* = 1$, 反向 $F_j^* = -1$, 无效判断 $F_j^* = 0$, 约定电流从母线流出方向为正; $\mathbf{C}$ 为一个 N 维向量, C_j 表示第 j 个断路器的实际状态(0 为未跳闸, 1 为跳闸)。

式(4)由 2 部分组成,分别为保护动作信息和故障方向信息与断路器状态、设备状态的期望关系,2 部分共同构成适应度函数。前半部分中的断路器失灵保护启动期望对算法起到了一定补充作用,利于更有效地逼近最优。由于目前 220 kV 及以上主干线路基本配置了断路器失灵保护,故在本文讨论中考虑这部分期望函数。

另外,式(4)是求极小值问题,为了利于 GA 求解,将式(4)转化为一求极大值函数:

$$F_{it}(\mathbf{X}) = V - \sum_{j=1}^N |A_j - A_j^*(\mathbf{X}, \mathbf{C})| - \sum_{k=1}^S |F_k - F_k^*(\mathbf{X}, \mathbf{C})| \quad (5)$$

式中: V 取大于 $N+S$ 的常数。

3.3 保护状态期望函数

当进行区域电网故障定位时,求解该数学模型最优解的过程就是使设备信息确定的保护动作期望值与从各变电站采集终端接收到的保护动作信息最佳逼近的过程。保护状态期望函数与具体网络拓扑、断路器状态、保护配置与动作策略相关,下文仍结合区域网络结构(见图 2)给出期望函数。

假设线路电压等级为 220 kV,如图 2 中 A~E 代表母线, $L_1 \sim L_4$ 代表线路,这些元件与 X_i (i 从 1~9)对应;CB1~CB8 与 C_i (i 从 1~8)对应;同时用下标 m 表示母线保护或线路主保护, bf 表示断路器失灵保护。用 A_i (i 从 1~16)与全部 16 个保护对应: $A_m, B_m, C_m, D_m, E_m, L_{1Am}, L_{1Bm}, L_{2Bm}, L_{2Cm}, L_{3Cm}, L_{3Dm}, L_{4Dm}, L_{4Em}, B_{bf}, C_{bf}, D_{bf}$ 。用 F_i (i 从 CB1~CB8)与全部 8 个故障方向信息对应,即 $F_{CB1} \sim F_{CB8}$ 。

该函数的建立直接影响到适应度函数建立的成功与否,期望动作函数要准确体现保护动作配合原理,主保护期望函数较简单,通用表达式如下:

$$A_i^*(\mathbf{X}, \mathbf{C}) = X_j \quad (6)$$

式中: $1 \leq i \leq 5$ 时, $j = i$; $6 \leq i \leq 13$ 时, $j = [(i + 6) / 2]$, $[\]$ 表示取整。

确定断路器失灵保护与故障方向的期望状态要比确定主保护的期望状态复杂, 因为 2 种期望状态可与多个元件及多个保护的状态有关(该模型只考虑与主保护相关部分)。期望函数具体如下:

$$A_{14}^*(\mathbf{X}, \mathbf{C}) = X_6 A_7 (1 - C_2) \parallel X_7 A_8 (1 - C_3)$$

$$A_{15}^*(\mathbf{X}, \mathbf{C}) = X_7 A_9 (1 - C_4) \parallel X_8 A_{10} (1 - C_5)$$

$$A_{16}^*(\mathbf{X}, \mathbf{C}) = X_8 A_{11} (1 - C_6) \parallel X_9 A_{12} (1 - C_7)$$

$$F_1^*(\mathbf{X}, \mathbf{C}) = X_6 + X_7 + X_8 + X_9$$

$$F_2^*(\mathbf{X}, \mathbf{C}) = X_6 - X_7 - X_8 - X_9$$

$$F_3^*(\mathbf{X}, \mathbf{C}) = -X_6 + X_7 + X_8 + X_9$$

$$F_4^*(\mathbf{X}, \mathbf{C}) = X_6 + X_7 - X_8 - X_9$$

$$F_5^*(\mathbf{X}, \mathbf{C}) = -X_6 - X_7 + X_8 + X_9$$

$$F_6^*(\mathbf{X}, \mathbf{C}) = X_6 + X_7 + X_8 - X_9$$

$$F_7^*(\mathbf{X}, \mathbf{C}) = -X_6 - X_7 - X_8 + X_9$$

$$F_8^*(\mathbf{X}, \mathbf{C}) = X_6 + X_7 + X_8 + X_9$$

式中: $\parallel$ 表示逻辑或。

3.4 GA 流程

种群大小的选取遵循保证 GA 种群多样性及收敛速度相对较快的原则。算法从随机产生的初始种群出发, 进行选择、交叉、变异等进化操作, 当满足收敛条件即结束运行^[12]。选择算子采用“锦标赛法”, 根据仿真计算收敛程度和速度决定合理的交叉和变异的概率。本文设定的种群大小为 50, 初始交叉操作概率为 0.8, 变异概率为 0.03。结束运行的收敛条件为种群最优个体的适应度值均达到最大值或进化代数达到最大代数, 最终将适应值最高且相等的所有解作为最后的判断结果。GA 流程见图 3。

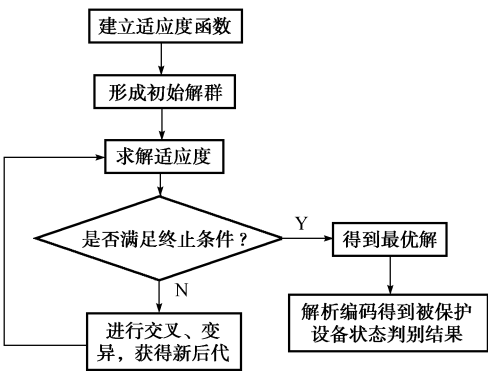


图 3 GA 流程
Fig. 3 Flow chart of genetic algorithm

4 仿真分析

采用本文的模型和算法对基于 GA 的判别系统在输电网故障定位的应用进行仿真测试, 仿真工具

选用 MATLAB。根据图 2 的输电网络建立仿真模型, 模型中包括被保护设备 9 个(设备发生故障为 1, 否则为 0); 仿真输入包括保护动作信息(每组输入第 1 行第 1 位~第 16 位)、断路器状态量(每组输入第 1 行第 17 位~第 24 位)及故障方向信息(每组输入第 2 行), 共 32 位信息。测试结果如表 2 所示。

表 2 故障仿真结果
Table 2 Results of faults simulation

分组	输入	GA 输出	辅助判据结果
1	000001100000000	000001000	线路 1 故障
	00000000000		
	11(-)1(-)1(-)1		
2	00000110000000000	000001000	线路 1,4 故障
	00000000		
	11(-)1(-)111		
3	00000110000100000	000001000	线路 1,4 故障
	00000000		
	11(-)1(-)111		

表 2 中各组记录为依据主保护动作信息和故障方向信息的判断, 第 2 组和第 3 组分别存在 1 位或 2 位信息畸变。仿真结果表明, 采集信息完全无误情况下, GA 主判据及状态关联辅助判据都能得出正确的判决; 当采集信息存在一定畸变的情况下, 状态关联辅助判据则出现误判, 而 GA 主判据仍能得出正确的决策解, 体现出极高的容错性能, 显示出应用 GA 进行故障判别的优越性。

仿真结果表明, 线路故障与 2 个方向元件、2 组断路器状态与 2 组主保护动作信息共 6 组信号, 最不利的输入条件是该 6 组信号全错。从该网络下的容错仿真结果可以看出, 该系统在至多 5 个输入错误时仍能保证正确的判断(共 32 个输入)。所以在此规模网络下, 可取 $K \leq 5$, 为保证系统可靠性, 可适当取较小 K 值。

5 结语

本文提出了一种基于区域电网信息与双重决策单元的区域电网智能保护系统。该保护系统能与现有主保护与后备保护协同工作, 加强了电网“第一道防线”保护水平, 其主要特点如下:

1) 引入了基于 GA 的人工智能判别单元, 具有很高的采集信息容错性能, 极大地改善了由于通信问题给该保护系统的可靠性带来的严重影响。

2) 本套区域电网智能保护系统动作速度介于现有主保护与后备保护之间, 且具有比传统后备保护更高的灵敏性和可靠性, 对主保护形成很好的补充。

3) 本套保护系统利用区域内的电网信息进行判断, 从全局角度做出动作决策, 能够实现传统基于就

地量保护系统无法实现的动作策略,并且避免了传统后备保护复杂的整定配合问题。

参考文献

- [1] 薛禹胜. 时空协调的大停电防御框架: (一) 从孤立防线到综合防御. 电力系统自动化, 2006, 30(1): 1-9.
XUE Yusheng. Space-time cooperative framework for defending blackouts: Part I from isolated defense lines to coordinated defending. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-9.
- [2] 熊小伏, 周家启, 赵霞. 快速后备保护研究. 电力系统自动化, 2003, 27(11): 45-47.
XIONG Xiaofu, ZHOU Jiaqi, ZHAO Xia. Research on fast operating backup protection. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(11): 45-47.
- [3] 王颖, 王玉东. 超高压线路纵联保护配置方案. 电力系统自动化, 2002, 26(22): 62-65.
WANG Ying, WANG Yudong. Configuration scheme of super-high voltage line pilot protection. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(22): 62-65.
- [4] 王晓茹. 利用 Agent 实现新的电网后备保护. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 57-61.
WANG Xiaoru. Novel backup protection system for the electric power grid using Agent. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 57-61.
- [5] 童晓阳, 王晓茹. 基于面向 Agent Petri 网的广域后备保护建模与分析. 电力系统自动化, 2007, 31(18): 43-48.
TONG Xiaoyang, WANG Xiaoru. Agent-oriented Petri net based modeling and dynamic behavior analysis of wide-area backup protection system. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(18): 43-48.
- [6] 苏盛, 段献忠, 曾祥君, 等. 基于多 Agent 的广域电流差动保护系统. 电网技术, 2005, 29(14): 15-19.
SU Sheng, DUAN Xianzhong, ZENG Xiangjun, et al. A multi-agent based wide-area current differential protection system. Power System Technology, 2005, 29(14): 15-19.
- [7] 王慧芳, 何奔腾. 输电线路集合保护及其实现. 电网技术, 2005, 29(14): 49-53.

WANG Huifang, HE Benteng. Transmission line aggregate protection and its implementation. Power System Technology, 2005, 29(14): 49-53.

- [8] 吴科成, 林湘宁, 鲁文军, 等. 分层式电网区域保护系统的原理和实现. 电力系统自动化, 2007, 31(3): 72-77.
WU Kecheng, LIN Xiangning, LU Wenjun, et al. Principle and realization of the hierarchical region protection system for power system. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(3): 72-77.
- [9] 潘翀, 陈伟根, 云玉新, 等. 基于遗传算法进化小波神经网络的电力变压器故障诊断. 电力系统自动化, 2007, 31(13): 88-92.
PAN Chong, CHEN Weigen, YUN Yuxin, et al. Fault diagnosis of power transformers based on genetic algorithm evolving wavelet neural network. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(13): 88-92.
- [10] 熊浩, 孙才新, 陈伟根, 等. 电力变压器故障诊断的人工免疫网络分类算法. 电力系统自动化, 2006, 30(6): 57-60.
XIONG Hao, SUN Caixin, CHEN Weigen, et al. Artificial immune network classification algorithm for fault diagnosis of power transformers. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(6): 57-60.
- [11] 杜红卫, 孙雅明, 刘弘靖, 等. 基于遗传算法的配电网故障定位和隔离. 电网技术, 2000, 24(5): 52-55.
DU Hongwei, SUN Yaming, LIU Hongjing, et al. Fault selection diagnosis and isolation of distribution networks based on genetic algorithm. Power System Technology, 2000, 24(5): 52-55.
- [12] 王小平, 曹立明. 遗传算法——理论、应用与软件实现. 西安: 西安交通大学出版社, 2002.

汪 (1981—), 男, 通信作者, 博士研究生, 主要研究方向: 电力系统继电保护与控制、电力系统人工智能技术。
E-mail: wang_yang@smail.hust.edu.cn

尹项根(1954—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 电力系统继电保护、变电站自动化及安全稳定控制。

赵逸君(1980—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 计算机数据挖掘与智能算法。

Regional Power Network Intelligent Protection Based on Genetic Algorithm

WANG Yang¹, YIN Xianggen¹, ZHAO Yijun², ZHANG Zhe¹

(1. Electric Power Security and High Efficiency Lab, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

Abstract: By studying the application basis of wide area protection, an intelligent protection system based on regional power network information is put forward to work in collaboration with the currently used main protection in strengthening the capability of power system relay protection and simplifying the backup protection. In the meantime, owing to the fact that wide area information is easily disturbed, lost and distorted, while not fully considered in current wide area protection principles, the decision-making and working mechanism of a new regional power network intelligent protection is proposed including the state correlation-based regional protection principle and the genetic algorithm-based fault identification principle. A fault mathematical model based on the genetic algorithm is developed. The simulation results have verified the validity and good fault-tolerance capability of the model proposed.

Key words: regional power network; relay protection; genetic algorithm; fault-tolerance capability