

基于多信息融合的广域继电保护新算法

李振兴, 尹项根, 张 哲, 何志勤, 冯灿成

(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)

摘要: 广域继电保护需融合电网多点信息实现故障元件识别, 因此, 保护算法的高容错性是保证其正确动作的关键。文中提出一种基于多信息融合的广域继电保护新算法, 该算法根据电网结构形成故障识别编码, 并利用基于常规主/后备保护原理的保护动作信息和断路器位置信息, 构建适应度函数和状态期望函数。最后, 利用故障前后的适应度分析故障概率, 以实现高容错性的故障元件识别算法。基于 IEEE 10 机 39 节点系统的仿真表明: 所提出的广域继电保护算法动作正确, 且能较好地克服信息缺失或信息错误带来的影响, 具有很好的实用性。

关键词: 广域继电保护; 信息融合; 适应度函数; 期望函数; 故障识别

0 引言

随着广域测量系统和数字化变电站技术的不断发展和应用, 为提高继电保护系统的性能, 提出了广域保护的概念并进行了初步的研究^[1-3], 但利用广域信息改善继电保护的性能研究主要集中在后备保护方面^[4-5]。目前, 广域或区域继电保护原理研究主要有基于方向比较原理的广域继电保护和基于电流差动原理的广域继电保护等^[6-7]。这些保护原理都是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。尽管随着广域测量系统的完善和光纤通信的普及, 广域通信的实时性和低误码率得到了保证, 但广域信息的采集区域较大, 并且很难能做到类似传统保护装置那样精密的抗干扰措施和在原理上对坏数据的抗干扰处理, 仍可能出现部分信息丢失或有错误信息上传到决策中心。信息采集的广域性决定了广域继电保护故障识别原理必须具有极强的容错性能, 而这不同于以往常规保护理论的基础研究。文献[8-9]为提高保护的容错性能, 提出了基于遗传算法、禁忌搜索、模糊控制等原理的广域保护算法, 但基于智能技术的继电保护原理在实际工程中并没有得到广泛应用, 其可靠性很难得到保证。

广域继电保护实现的后备保护功能在故障切除时肩负着重要的责任, 一方面可以实现较为快速的故障切除, 另一方面则可能因大范围切断输电断面造成严重后果。因此, 如何利用广域冗余信息实现故障元件的可靠识别, 并快速切除故障是目前广域继电保护研究的重点。本文在基于常规继电保护原理的基础上, 提出一种基于多信息融合的广域继电

保护故障识别新算法。

1 基于广域多信息融合的基本原理

充分利用广域范围内的冗余测量信息进行故障识别是实现广域继电保护的基本出发点。考虑到广域信息在测量、判断和传输过程中可能出现的信息缺失或信息错误, 本文提出建立多信息融合的适应度函数模型, 利用信息的冗余性和相互间的逻辑关系, 反映区域内输电系统各元件的故障概率。

1.1 广域故障识别编码

故障识别的目的是在输电系统发生故障时识别出故障元件以实现快速切除故障, 软件实现就是将输电系统元件作为故障识别的对象进行 0-1 状态编码(0 表示正常状态, 1 表示故障状态), 通过对广域范围内所有保护对象元件的状态编码组成的数字串(即故障识别编码, 下文同)进行故障识别计算, 求得最优识别编码表示广域继电保护故障识别的决策解, 解的“1”状态位对应系统的故障元件。理论上, 输电系统各元件均可能发生故障, N 个元件可组成 2^N 组故障识别编码。如图 1 所示广域电网系统, 输电系统元件含母线 A, B, C, D, E 和线路 L_1, L_2, L_3, L_4 , 可形成 512 组故障识别编码, 如果所有故障识别编码都进行故障识别计算, 则广域继电保护的快速性较难实现。

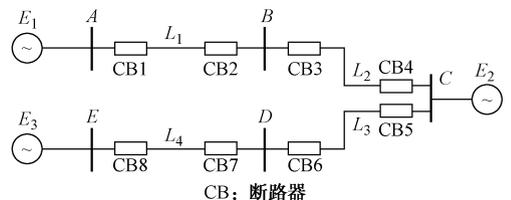


图 1 广域电网结构图

Fig. 1 Framework of wide-area power network

收稿日期: 2010-10-25; 修回日期: 2010-12-31。

国家自然科学基金资助项目(50877031, 50837002)。

实际上,系统同时发生多处故障的可能性很小。如表 1 所示,广域继电保护在实现上仅需分别对输电系统单个元件故障编码,形成 N 组故障识别编码,每组编码仅 1 位“1”状态位对应故障元件,简称该故障元件编码,这样可大大减小广域继电保护系统的计算量。

表 1 故障识别编码
Tab.1 Fault identification codes

编号	故障识别编码 X								
	A	B	C	D	E	L ₁	L ₂	L ₃	L ₄
1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	1	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	1	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	1	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	1	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	1	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	1

1.2 适应度函数数学模型

建立基于信息融合的适应度函数数学模型的目的是利用广域故障信息对每组编码的性能进行评价。适应度函数的好坏直接影响最终的判断结果,且具有不同的容错能力。针对广域继电保护实现广域范围的后备保护,一方面是广域保护在常规主保护失效时能够快速切除故障,另一方面是广域保护在系统发生非预设的运行工况变化、潮流转移或发生区外故障时能够不误动作。因此,适应度函数的建立应考虑以下几个方面。

1) 基于广域故障信息的选取。建立多信息融合的适应度函数必须充分利用判断快速、高灵敏度和高可靠性的保护信息。考虑到广域继电保护动作速度较常规主保护慢,但较常规后备保护特别是远后备保护快^[6-7],且基于纵联或就地信息的常规保护原理较为成熟可靠,本文研究广域继电保护采集智能电子设备(IED)稳态启动后,基于常规保护原理的主保护动作信息和后备保护启动信息以快速实现故障识别。

2) 引入保护动作系数。考虑系统故障时基于不同保护原理的保护动作信息和动作灵敏度均不同,如果同等看待则无法体现主要保护信息的重要性。本文研究引入保护动作系数^[10],不仅区分主保护、后备保护动作信息,同时考虑了主保护与后备保护之间的逻辑关系及保护范围。

3) 容错能力。基于广域信息的故障识别,必须考虑信息缺失或信息错误给保护判断带来的影响。在构造适应度函数时,采用包括主保护、近后备快速

保护、灵敏度较高的距离 II 段、III 段保护及负序、零序方向保护等多信息或双重化保护配置的保护信息进行融合计算,利用众多信息对故障识别的支持及对错误信息的排斥,在有限信息错误或信息缺失时利用故障元件编码适应度变化特性,实现故障元件识别的高容错性。

本文构造系统故障时的适应度函数如下式所示,它反映了最优编码对应的适应度最小:

$$E(X) = \omega_A \sum_{j=1}^{N_A} |A_j - A_j^*| + \omega_B \sum_{j=1}^{N_B} |B_j - B_j^*| + \omega_C \sum_{j=1}^{N_C} |C_j - C_j^*| + \omega_D \sum_{j=1}^{N_D} |D_j - D_j^*| + \omega_E \sum_{j=1}^{N_E} |E_j - E_j^*| + \omega_F \sum_{j=1}^{N_F} |F_j - F_j^*| \quad (1)$$

式中: $E(X)$ 为故障识别编码所对应的适应度; A_j 和 A_j^* 分别为各变电站 IED 配置的主保护的**实际状态和期望状态(0 表示正常、1 表示故障状态); B_j 和 B_j^* 分别为各变电站 IED 配置的距离 I 段、突变量距离等不能保护线路全长但可直接判断保护对象故障的**实际状态和期望状态; C_j 和 C_j^* 分别为各变电站 IED 配置的距离 II 段等能保护线路全长但不能直接判断保护对象故障的**实际状态和期望状态; D_j 和 D_j^* 分别为各变电站 IED 配置的零序、负序等具有正反方向判断的**实际状态和期望状态; E_j 和 E_j^* 分别为各变电站 IED 配置的距离 III 段等远后备保护的**实际状态和期望状态; F_j 和 F_j^* 分别为各变电站 IED 配置的失灵保护的**实际状态和期望状态; $N_A, N_B, N_C, N_D, N_E, N_F$ 分别为保护总数目; $\omega_A, \omega_B, \omega_C, \omega_D, \omega_E, \omega_F$ 分别为保护动作系数(即 AF 值,其原理见文献^[10]),其值分别取 6, 6, 3, 2, 2, 6。

1.3 期望函数数学模型

适应度函数中保护测量信息的实际状态均由决策中心通过系统通信实时获得,对于缺失信息以正常状态(即 0 值)填补。适应度函数中保护动作信息的期望状态由期望函数模型计算得到。期望函数建立的好坏直接影响到适应度函数建立的成功与否,本文研究的期望函数模型是基于广域故障识别编码(如表 1 中编码 X)所体现的电网系统故障发生的元件(即编码解对应的元件),结合系统结构和常规主/后备保护原理的动作逻辑和保护范围共同构建,体现了保护元件的可靠动作性能。其通用表达式为:

$$A_j^* = X_i \quad (2)$$

$$B_j^* \cup B_{j\pm 1}^* = X_i \quad (3)$$

$$C_j^* = X_i \cup X_{lib} \quad (4)$$

$$D_j^* = \begin{cases} 1 & \sum (-1)^n X_i > 0 \\ -1 & \sum (-1)^n X_i < 0 \\ 0 & \sum (-1)^n X_i = 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$E_j^* = X_i \cup X_{ltb} \cup X_{nl} \cup X_{nlb} \quad (6)$$

$$F_j^* = (A_j \cup B_j) \cap S_j \quad (7)$$

式中： X_i 为保护对象的故障识别编码； $B_{j\pm 1}^*$ 为 B_j^* 的对端保护状态；如果 X_i 对应的元件是断路器 j 的反方向元件，则 $n=1$ ，否则 $n=0$ ； X_{ltb} ， X_{nl} ， X_{nlb} 分别为线路末端母线、下一条线路及其末端母线的编码； S_j 为保护对象的断路器位置（1 表示合位、0 表示分位）。

确定断路器失灵保护的期望状态要比确定其他保护的期望状态复杂，这是由于失灵保护是一个与跳闸回路和操作机构有关的保护，所以不能由故障识别编码确定，必须借助于快速保护的動作信息及断路器的位置进行期望状态估计。

2 基于广域多信息融合的故障识别

对应不同的故障识别编码可以得到不同的适应度，文献[8-9]采用遗传算法等技术通过对随机产生的众多组编码按照适应度最优方向进行智能操作计算，寻求最优解即为系统故障元件的故障识别编码。但这种处理随机性很大，同时存在收敛约束问题。考虑到高压输电系统广域范围内保护对象元件相对不多，并且各个保护对象同时发生故障的可能性较小，本文分别按照表 1 组成的故障识别编码，计算其适应度，再根据适应度特点分析故障识别算法。

2.1 故障识别原理

正常运行时，各继电保护的實際信息均为 0，计算此时各组编码的适应度，如表 2 所示。

表 2 正常运行时各组故障识别编码的适应度
Tab. 2 Fitness of fault identification codes in normal operation

编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9
适应度	45	50	52	50	45	62	64	64	62

在系统发生故障时，由于故障元件的實際信息与期望信息一致，其对应故障识别编码的适应度会大幅下降，而与故障元件相关联^[11]的元件因在故障元件的后备保护范围内，其对应初始解的适应度会出现减小或增大的小幅变化；与故障元件不相关联的元件由于实际信息与期望信息不一致，其对应初始解的适应度不会减小。因此，在保护稳态启动后，可以实时监视各组故障识别编码的适应度减小情况，当适应度减小到一定程度时，则判断其对应元件发生故障。

为了更好地说明故障元件识别的算法，通过正常运行时和故障时故障识别编码的适应度比较，引入故障识别概率的概念，令

$$K_i = \frac{E_{si} - E_i}{E_{si}} \quad E_{si} > E_i \quad (8)$$

式中： E_{si} 为正常运行时各组识别编码的适应度，其值如表 2 所示； E_i 为实时计算的各组识别编码的适应度； K_i 为各组识别编码的故障识别概率。

K_i 越大说明该故障识别编码越趋于最优，即其对应元件发生故障的概率最大。

2.2 故障识别判据

理论上，系统发生故障时广域信息完全正确，故障元件对应的故障识别编码的适应度最小，故障识别概率最大，很容易识别故障元件（见表 3）。

表 3 广域信息完全正确时各组编码的故障识别概率
Tab. 3 Fault identification probability with right information

故障点	各组编码的故障识别概率/%								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	100	14	0	0	0	40	0	0	0
B	4	100	12	0	0	32	38	0	0
C	0	8	100	8	0	0	34	34	0
D	0	0	12	100	4	0	0	38	32
E	0	0	0	14	100	0	0	0	40
L_1	18	16	0	0	0	100	0	0	0
L_2	0	20	19	0	0	0	100	0	0
L_3	0	0	19	20	0	0	0	100	0
L_4	0	0	0	16	18	0	0	0	100

实际上，受信息缺失或信息错误的影响，故障元件实际信息与期望信息并不完全一致，其适应度也不再为 0，即故障识别概率下降。表 4 所示为 L_1 故障编码在随机 10 位信息缺失情况下的 5 次实验故障识别概率的计算结果。

表 4 广域信息缺失时各组编码的故障识别概率
Tab. 4 Fault identification probability with lost information

随机序号	各组编码的故障识别概率/%								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	4	4	0	0	0	90	0	0	0
2	0	0	0	0	0	77	0	0	0
3	27	24	0	0	0	87	0	0	0
4	0	18	0	0	0	85	0	0	0
5	24	2	0	0	0	89	0	0	0

表 5 所示为 L_1 故障编码在随机 10 位信息错误情况下的 5 次实验故障识别概率的计算结果。

由表 4、表 5 可知：信息缺失（1 状态视为 0，0 状态也视为 0）对故障元件视为保护拒动，对正常元件不产生影响；信息错误（1 状态视为 0，0 状态视为 1）

对正常元件视为保护误动,对故障元件视为保护拒动。所以,信息错误较信息缺失影响更大。

表 5 广域信息错误时各组编码的故障识别概率
Tab.5 Fault identification probability with error information

随机序号	各组编码的故障识别概率/%								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	0	0	0	0	0	58	0	0	0
2	0	0	0	0	0	61	0	0	0
3	0	0	0	0	0	56	0	0	0
4	0	0	0	0	0	37	0	0	0
5	0	0	0	0	0	42	0	0	0

因此,考虑信息缺失和信息错误的影响,保护判据为:

$$(K_i > K_{Set1}) \cup (K_i > K_{Set2} \cap \bigcap_{j=1, j \neq i}^N K_j < K_{Set3}) \quad (9)$$

式中: $K_{Set1}, K_{Set2}, K_{Set3}$ 为保护定值, K_{Set1} 按照快速保护的可靠性系数整定,本文取 70%, K_{Set2} 按照主保护及快速后备保护拒动、其他后备保护正确动作时计算的故障识别概率整定,本文取 30%, K_{Set3} 按照远后备保护动作、其他保护拒动时计算的故障识别概率整定,本文取 20%。

故障识别具体实现方案如图 2 所示。

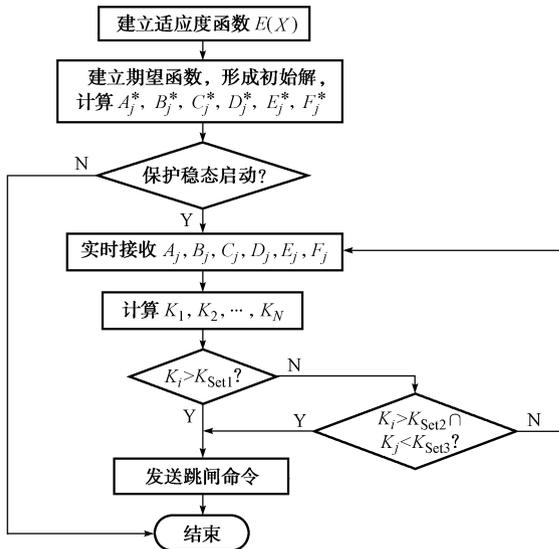


图 2 保护算法流程

Fig.2 Flow chart of protection algorithm

3 算例仿真

为验证本文算法,利用电磁暂态仿真软件 PSCAD/EMTDC 搭建的 IEEE 10 机 39 节点电网系统模型进行仿真验证。仿真系统的单线图及其支路编号如图 3 所示。

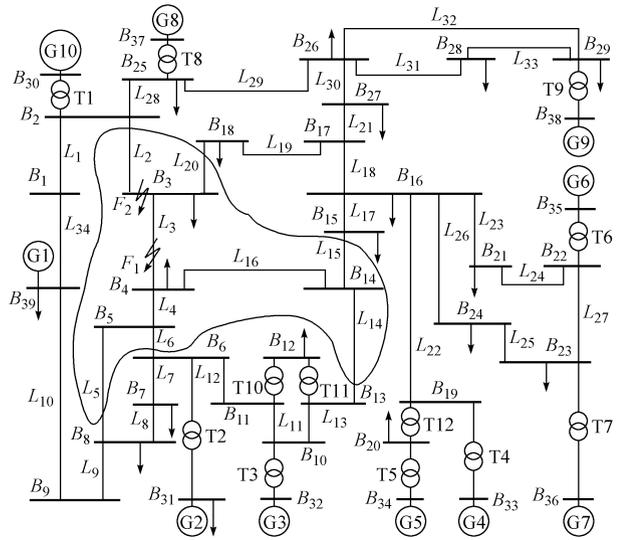
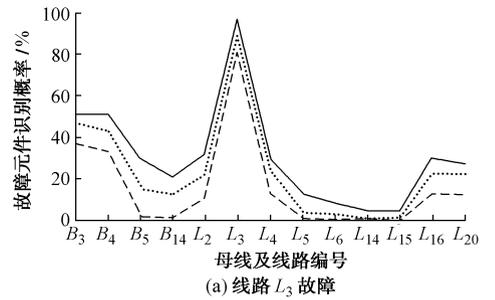


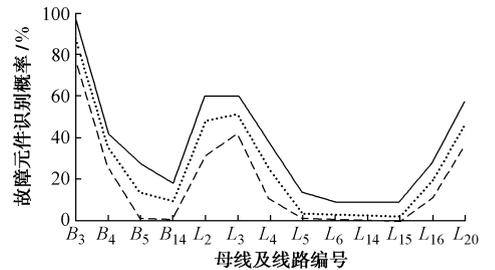
图 3 IEEE 10 机 39 节点系统

Fig.3 IEEE 10-generator 39-bus system

广域继电保护考虑实现后备保护的功能和通信系统的合理利用,没有必要使用全电网的广域信息,仅需有限区域的信息实现电网保护^[12]。本文以图 3 所示的保护区域为仿真对象,在线路 L_3 和母线 B_3 分别发生故障时,采集区域内各 IED 的常规保护动作信息,并随机改变 10 位动作信息模拟信息缺失或信息错误,通过适应度函数计算得到区域内各保护对象元件的故障识别概率。每种仿真实验 100 次,统计实验结果的最大值、最小值及平均值,见图 4。



(a) 线路 L_3 故障



(b) 母线 B_3 故障

— 最大值; --- 最小值; 平均值

图 4 系统故障时的故障元件识别概率

Fig.4 Fault identification probability with system fault

从图 4 可知,按照式(9)的保护判据,故障元件

的故障识别概率在信息缺失或信息错误达到 10 位的情况下均能达到 70% 以上, 可以很好地实现故障识别, 具有较高的容错性和可靠性。

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[J]. 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[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(1): 1-9.
- [2] BEGOVIC M, NOVOSEL D, KARLSSON D, et al. Wide-area protection and emergency control[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(5): 876-891.
- [3] 张保会. 加强继电保护与紧急控制系统的研究提高互联电网安全防御能力[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 1-6.
ZHANG Baohui. Strengthen the protection relay and urgency control systems to improve the capability of security in the interconnected power network[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 1-6.
- [4] 苗世洪, 刘沛, 林湘宁, 等. 基于数据网的新型广域后备保护系统实现[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(10): 32-36.
MIAO Shihong, LIU Pei, LIN Xiangning, et al. A new type of backup protective system in wide area network based on data network[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(10): 32-36.
- [5] EISSA M M, MASOUD M E, ELANWAR M M M. A novel back up wide area protection technique for power transmission grids using phasor measurement unit[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(1): 270-278.
- [6] 王晓茹, HOPKINSON K M, THORP J S, 等. 利用 Agent 实现新的电网后备保护[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(21): 57-62.
WANG Xiaoru, HOPKINSON K M, THORP J S, et al. Novel backup protection system for the electric power grid using Agent [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(21): 57-62.
- [7] 丛伟, 潘贞存, 赵建国. 基于纵联比较原理的广域继电保护算法

研究[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(21): 8-14.

CONG Wei, PAN Zhencun, ZHAO Jianguo. A wide area relaying protection algorithm based on longitudinal comparison principle[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(21): 8-14.

- [8] 汪畅, 尹项根, 赵逸君, 等. 基于遗传算法的区域电网智能保护[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(17): 40-45.
WANG Yang, YIN Xianggen, ZHAO Yijun, et al. Regional power network intelligent protection based on genetic algorithm [J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(17): 40-45.
- [9] LIN Xiangning, KE Shuohao, LI Zhengtian, et al. A fault diagnosis method of power systems based on improved objective function and genetic algorithm—Tabu search[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2010, 25(3): 1268-1274.
- [10] TAN J C, CROSSLEY P A, MCLAREN P G, et al. Application of a wide area backup protection expert system to prevent cascading outages[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2002, 17(2): 375-380.
- [11] 尹项根, 汪畅, 张哲. 适应智能电网的有限广域继电保护分区与跳闸策略[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(7): 1-7.
YIN Xianggen, WANG Yang, ZHANG Zhe. Zone-division and tripping strategy for limited wide area protection adapting to smart grid[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(7): 1-7.
- [12] 李振兴, 尹项根, 张哲, 等. 有限广域继电保护系统的分区原则与实现方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(19): 48-51.
LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, et al. A study of zone division on limited wide area protection system [J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(19): 48-51.

李振兴(1977—), 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: lzx2007001@163.com

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。

张哲(1962—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 电力系统继电保护及自动控制。

Wide Area Protection Algorithm Based on Multi-information Fusion

LI Zhenxing, YIN Xianggen, ZHANG Zhe, HE Zhiqin, FENG Cancheng

(Hubei Provincial Electric Power Security and High Efficiency Lab, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: As wide area backup protection needs multipoint information to identify the fault element, high fault tolerance of the protection algorithm is the key to its correct operation. A novel wide area backup protection algorithm is presented based on wide area information fusion. Fault identification coding is formed according to the structure of the power grid, and the fitness and state expected function is constituted by the operation information of conventional main/backup protection and breaker status. Finally, the fault probability is calculated using the pre- and post-fault fitness function to realize the fault element identification algorithm. Simulation test based on IEEE 39-bus system demonstrates the effectiveness and excellent fault tolerance of this method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 50877031, No. 50837002).

Key words: wide area protection; information fusion; fitness function; expected function; fault identification