基于距离保护契合因子的区域后备保护方法

马　静,郭雅蓉,王增平
(华北电力大学 新能源电力系统国家重点实验室,北京 102206)

摘要:提出一种基于距离保护契合因子的区域后备保护方法,将各段距离保护的元件动作情况与故障位置的关系量化为距离保护贡献度,并将其作为权重构建保护契合度函数和保护契合度期望函数。将保护契合度函数与保护契合度期望函数之比定义为距离保护契合因子,从而识别故障线路。利用 IEEE 10 机 39 节点系统与贵州都匀实际系统进行仿真,仿真结果表明,所提算法不受信息非同步的影响,在距离保护动作 50%的信息缺失或错误的情况下,仍能准确判断故障线路。

关键词:距离保护;贡献度;契合度函数;契合度期望函数;契合因子;区域后备保护;继电保护
中图分类号:TM 772　　**文献标识码**:A　　DOI:10.16081/j.issn.1006-6047.2015.08.001

0　引言

随着互联大电网的发展,电网结构日趋复杂,传统的仅基于本地信息的后备保护配置与整定愈发困难;同时,系统方式复杂多变,后备保护极有可能出现配合不当或灵敏度不足的情况,因此考虑电网多源信息的广域后备保护研究势在必行[1-2]。

目前,基于广域信息改善和提高继电保护性能的研究大致分为 3 类[3]。

a. 基于电气量信息实现广域后备保护功能,如基于电流信息的序电流相位比较和幅值比较的广域后备保护算法[4]、基于电压信息的故障电压比较的广域后备保护算法[5]、基于电压电流综合信息的复合方向元件算法[6-9]和综合阻抗比较算法[10]。

b. 基于保护动作信息和断路器开合状态信息实现广域后备保护功能,如基于遗传算法的广域后备保护算法等[11-15],以及考虑算法容错性的广域后备保护算法等[16-19]。

c. 综合利用电气量信息和保护动作信息实现广域后备保护功能,如基于保护元件与同步相量测量单元(PMU)数据多源的广域后备保护算法等[20]。

上述算法能够在不改变传统后备保护构成的基础上,通过采集广域信息构建后备保护算法。但现阶段 PMU 数据受到信息延时的影响,同步性不能得到保障,因此在形成广域后备保护方案时,应尽可能不依赖数据的同步性。另一方面,考虑到基于不同保护原理的保护动作信息和保护动作灵敏度均不同,为了区分不同的保护信息,在权值设置方面应尽可能克服依靠主观经验性知识带来的不确定性问题。此外,尽管现有的通信技术已经趋于完善,但通信系统仍面临着一定风险,信息缺失和错误依旧是广域后备保护系统无法忽视的问题,因此保护方案还必须具备较高的容错性。

本文提出了一种基于距离保护契合因子的区域后备保护方法。首先,将距离保护动作情况对故障识别的贡献程度定义为距离保护贡献度,并将其作为权重构建保护契合度函数和保护契合度期望函数;然后,利用保护契合度函数与保护契合度期望函数之比得到距离保护契合因子,从而识别故障线路。该方法不受信息非同步的影响,在距离保护动作信息的高位数缺失或错误的情况下,仍能准确判断故障线路,同时克服了传统权重设置依靠先前经验带来的不确定性问题,计算量小。最后,IEEE 10 机 39 节点系统的仿真结果与贵州都匀实际系统的实时仿真系统 RTDS(Real Time Digital Simulator)仿真数据均验证了该方法的正确性和有效性。

1　距离保护贡献度

距离保护的整定原则反映了距离保护动作与其正方向发生故障的位置之间的关系。如图 1 所示,距离保护元件 1 的 I 段动作,故障仅可能发生在线路

收稿日期:2014-12-20;**修回日期**:2015-06-02
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51277193);国家重点基础研究发展计划(973 计划)项目(2012CB215200);中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(2014ZZD02);教育部留学回国人员科研启动基金资助项目([2011]1139);河北省自然科学基金资助项目(E2012502034);中国电机工程学会电力青年科技创新项目([2012]46);国家电网公司项目(PD71-13-031);北京市科技新星支持计划(Z141101001814012);北京市优秀人才支持计划(2013B009005000001);霍英东教育基金资助项目(141057)
Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277193),the National Basic Research Program of China(973 Program)(2012CB215200),the Fundamental Research Funds for the Central Universities(2014ZZD02),the Scientific Research Foundation for the Returned Overseas Chinese Scholars of State Education Ministry([2011]1139),Hebei Natural Science Foundation(E2012502034),the Electric Power Youth Science and Technology Creativity Foundation of CSEE([2012]46),Project of SGCC(PD71-13-031),Bejing Support Program for Science and Technology Nova(Z141101001814012),Support Program for the Excellent Talents in Beijing City(2013B009005-000001) and the Fund of Fok Ying Tung Education Foundation (141057)

L_1上；距离保护Ⅱ段动作，故障可能发生在线路L_1上或者线路L_2的出口处，即图1中点m左侧部分；距离保护Ⅲ段动作，故障可能发生在线路L_1、L_2上，或者线路L_3的出口处，即图1点p左侧部分。

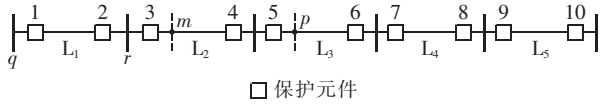

图1 区域电网结构图

Fig.1 Structure of regional power network

将距离保护动作情况与故障位置的关系量化。定义距离保护贡献度ω_{ij}为距离保护元件j动作时，故障发生在线路L_i上的概率。该值反映了距离保护元件j的动作，对判断线路L_i是否为故障线路的贡献程度。下面根据距离保护元件的Ⅰ段、Ⅱ段和Ⅲ段与故障线路之间的位置关系，分别推导距离保护Ⅰ段、Ⅱ段和Ⅲ段的贡献度$\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅰ}}$、$\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅱ}}$、$\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅲ}}$。

1.1 距离保护Ⅰ段贡献度

距离保护Ⅰ段只反映本线路故障，当距离保护元件j在故障线路L_i上时，贡献度为1；当距离保护元件j不在故障线路L_i上时，贡献度为0。由此可得距离保护Ⅰ段贡献度$\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅰ}}$如式(1)所示。

$$\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅰ}}=\begin{cases}1 & \text{元件}j\text{在线路}L_i\text{上}\\ 0 & \text{其他}\end{cases} \tag{1}$$

1.2 距离保护Ⅱ段贡献度

线路上任一点故障的概率受到各种因素的影响，如线路所处的地理位置、环境、投运时间等，因此较难确定线路上任一点故障的概率。假设故障随机发生在线路任一点上，用均匀分布来模拟线路上任一点故障的概率。如当保护元件动作，表示保护范围内出现故障，将保护范围覆盖各条线路的部分的阻抗定义为距离保护元件在各线路上的有效距离等值阻抗，保护范围内任一点发生故障的概率用$[1,Z]$区间的均匀分布模拟，其中Z为保护元件总的有效距离等值阻抗[21]。

距离保护的保护范围是指发生金属性故障时保护的动作范围，该动作范围由整定阻抗决定[22]。如图1所示，元件1的距离保护Ⅱ段的保护范围为点m左侧的范围，即线路qm。该保护元件动作，认为故障发生在线路qm上，且线路qm上任一点发生故障的概率相同，故障发生在线路qr上的概率为l_{qr}/l_{qm}，发生在线路rm上的概率为l_{rm}/l_{qm}，l_{qr}、l_{rm}、l_{qm}分别为线路qr、rm、qm的长度。由于线路的距离与阻抗成正比，可得：$\frac{l_{qr}}{l_{qm}}=\frac{Z_{qr}}{Z_{qm}}$、$\frac{l_{rm}}{l_{qm}}=\frac{Z_{rm}}{Z_{qm}}$，$Z_{qr}$、$Z_{rm}$、$Z_{qm}$分别为线路$L_{qr}$、$L_{rm}$和$L_{qm}$的线路阻抗。距离Ⅱ段元件在各线路上的有效距离等值阻抗计算式如式(2)所示。

$$Z_{\mathrm{eL}_i-j}^{\mathrm{Ⅱ}}=\begin{cases}Z_{\mathrm{L}_i} & \text{元件}j\text{在线路}L_i\text{上}\\ \dfrac{Z_{\mathrm{set}-j}^{\mathrm{Ⅱ}}-Z_{\mathrm{L}i1}}{K_{\mathrm{fL}i-\mathrm{L}i1}} & \text{元件}j\text{在线路}L_{i1}\text{上}\end{cases} \tag{2}$$

其中，$Z_{\mathrm{set}-j}^{\mathrm{Ⅱ}}$为距离保护元件$j$的Ⅱ段整定值；线路$L_{i1}$为线路$L_i$的上级线路，$Z_{\mathrm{L}i1}$为线路$L_{i1}$的阻抗；$K_{\mathrm{fL}i-\mathrm{L}i1}$为线路$L_i$与线路$L_{i1}$间的分支系数。

式(2)中，当距离保护元件j在线路L_i上时，有效距离的等值阻抗为L_i的线路阻抗Z_{L_i}；线路L_{i1}为线路L_i的上级线路，当距离保护元件j在线路L_{i1}上时，在线路L_i上产生的有效距离等值阻抗为通过分支系数折算到L_i上的阻抗值。

以图1为例，保护元件1的距离Ⅱ段保护范围在L_1、L_2上产生的有效距离的等值阻抗分别为：

$$\begin{cases}Z_{\mathrm{eL_1}-1}^{\mathrm{Ⅱ}}=Z_{\mathrm{L_1}}\\ Z_{\mathrm{eL_2}-1}^{\mathrm{Ⅱ}}=\dfrac{Z_{\mathrm{set}-1}^{\mathrm{Ⅱ}}-Z_{\mathrm{L_1}}}{K_{\mathrm{fL_2}-\mathrm{L_1}}}\end{cases} \tag{3}$$

当距离保护元件1的Ⅱ段动作时，故障可能发生在L_1、L_2上的概率分别为保护范围在各线路上的有效距离占保护范围的总有效距离的比。由式(3)进一步得到距离保护Ⅱ段贡献度$\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅱ}}$如式(4)所示。

$$\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅱ}}=\frac{Z_{\mathrm{eL}_i-j}^{\mathrm{Ⅱ}}}{\sum_{n=1}^{N}Z_{\mathrm{eL}_n-j}^{\mathrm{Ⅱ}}} \tag{4}$$

其中，N为线路总数。

1.3 距离保护Ⅲ段贡献度

距离保护Ⅲ段可以反映本线路及相邻线路的故障，整定值按照对所有相邻线路都具有灵敏度整定，其保护范围通常可以延伸到相邻二级线路。

按照上述对有效距离等值阻抗的定义，距离保护Ⅲ段的保护范围在线路L_i上产生的有效距离等值阻抗为：

$$Z_{\mathrm{eL}_i-j}^{\mathrm{Ⅲ}}=\begin{cases}Z_{\mathrm{L}_i}\\ \dfrac{Z_{\mathrm{set}-j}^{\mathrm{Ⅲ}}-Z_{\mathrm{L}i2}-K_{\mathrm{fL}i1-\mathrm{L}i2}Z_{\mathrm{L}i1}}{K_{\mathrm{fL}i-\mathrm{L}i1}}\end{cases} \tag{5}$$

其中，线路L_{i1}为线路L_i的上级线路；线路L_{i2}为线路L_{i1}的上级线路；$Z_{\mathrm{L}i2}$为线路L_{i2}的阻抗；$Z_{\mathrm{set}-j}^{\mathrm{Ⅲ}}$为距离保护元件$j$的Ⅲ段整定值；$K_{\mathrm{fL}i-\mathrm{L}i1}$为线路$L_i$和线路$L_{i1}$间的分支系数；$K_{\mathrm{fL}i1-\mathrm{L}i2}$为线路$L_{i1}$和线路$L_{i2}$间的分支系数。当距离保护元件$j$在线路$L_i$或线路$L_{i1}$上时，有效距离等值阻抗为线路阻抗$Z_{\mathrm{L}_i}$；当距离保护元件$j$在线路$L_{i2}$上时，其在线路$L_i$上产生的有效距离的等值阻抗为通过分支系数折算到$L_i$上的阻抗值。

以图1为例，距离保护元件1的Ⅲ段保护范围在线路L_1、L_2上产生的有效距离等值阻抗分别为$Z_{\mathrm{L_1}}$、$Z_{\mathrm{L_2}}$，在L_3上产生的有效距离等值阻抗为：

$$Z_{\mathrm{eL_3}-1}^{\mathrm{Ⅲ}}=\frac{Z_{\mathrm{set}-1}^{\mathrm{Ⅲ}}-Z_{\mathrm{L_1}}-K_{\mathrm{fL_2}-\mathrm{L_1}}Z_{\mathrm{L_2}}}{K_{\mathrm{fL_3}-\mathrm{L_2}}} \tag{6}$$

当距离保护元件1的Ⅲ段动作时，故障可能发

生在 L_1、L_2、L_3 上的概率分别为保护范围在各线路上有效距离占保护范围总有效距离的比。由式(6)进一步得到距离保护 Ⅲ 段贡献度 $\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅲ}}$ 为:

$$\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅲ}}=\frac{Z_{\mathrm{eL}_i-j}^{\mathrm{Ⅲ}}}{\sum_{n=1}^{N}Z_{\mathrm{eL}_n-j}^{\mathrm{Ⅲ}}} \tag{7}$$

2　基于距离保护契合因子的故障识别方法

2.1　构建保护契合度函数

距离保护贡献度 $\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅰ}}$、$\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅱ}}$、$\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅲ}}$ 分别为距离保护元件 j 的Ⅰ段、Ⅱ段、Ⅲ段动作,故障发生在线路 L_i 上的概率。将距离保护贡献度作为权重对保护动作信息进行融合,得到线路 L_i 的保护契合度函数:

$$E_{\mathrm{F}}(L_i)=\sum_{j=1}^{B_{\mathrm{Ⅰ}}}\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅰ}}D_j^{\mathrm{Ⅰ}}+\sum_{j=1}^{B_{\mathrm{Ⅱ}}}\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅱ}}D_j^{\mathrm{Ⅱ}}+\sum_{j=1}^{B_{\mathrm{Ⅲ}}}\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅲ}}D_j^{\mathrm{Ⅲ}} \tag{8}$$

其中,$D_j^{\mathrm{Ⅰ}}$、$D_j^{\mathrm{Ⅱ}}$、$D_j^{\mathrm{Ⅲ}}$ 分别为故障发生后距离保护元件 j 的Ⅰ段、Ⅱ段、Ⅲ段的实际动作情况;$B_{\mathrm{Ⅰ}}$、$B_{\mathrm{Ⅱ}}$、$B_{\mathrm{Ⅲ}}$ 分别为距离保护Ⅰ段、Ⅱ段、Ⅲ段保护元件的数目。保护契合度函数 $E_{\mathrm{F}}(L_i)$ 为故障发生后,将各距离保护元件实际动作情况代入计算的结果。

2.2　构建保护契合度期望函数

保护契合度期望函数为假设故障发生在线路 L_i 上,将保护元件动作情况期望值进行信息融合的计算结果。在线路不同位置发生故障,保护元件动作情况不同,因此在确定保护元件动作情况的期望值时需要考虑在线路不同位置发生故障的情况。

以图 1 中的系统为例。距离保护元件 5 和 6 的Ⅰ段的保护范围分别为图 2 中的 2 个椭圆部分,2 个椭圆将线路 L_3 分为 A、B、C 这 3 段,在线路 L_3 不同位置发生故障时,各元件的距离保护Ⅰ段的动作情况期望值如表 1 所示(0 表示未动作,1 表示动作;后同)。

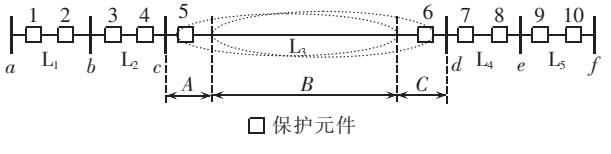

图 2　距离保护Ⅰ段动作情况示例系统
Fig.2　Example system for zone-Ⅰ action of distance protection

故障点在 A、B、C 这 3 段上的概率分别为 $\lambda_A^{\mathrm{Ⅰ}}$、$\lambda_B^{\mathrm{Ⅰ}}$、$\lambda_C^{\mathrm{Ⅰ}}$,计算式如下:

$$\begin{cases}\lambda_A^{\mathrm{Ⅰ}}=\dfrac{Z_{\mathrm{L}_3}-Z_{\mathrm{set}-6}^{\mathrm{Ⅰ}}}{Z_{\mathrm{L}_3}}\\ \lambda_B^{\mathrm{Ⅰ}}=\dfrac{Z_{\mathrm{set}-5}^{\mathrm{Ⅰ}}+Z_{\mathrm{set}-6}^{\mathrm{Ⅰ}}-Z_{\mathrm{L}_3}}{Z_{\mathrm{L}_3}}\\ \lambda_C^{\mathrm{Ⅰ}}=\dfrac{Z_{\mathrm{L}_3}-Z_{\mathrm{set}-5}^{\mathrm{Ⅰ}}}{Z_{\mathrm{L}_3}}\end{cases} \tag{9}$$

同理,距离保护元件 3 和 8 的Ⅱ段的保护范围,也可以将线路 L_3 分为 A、B、C 这 3 段,见图 3。在线路 L_3 不同位置发生故障距离保护Ⅱ段的动作情况见表 2。

表 1　线路 L_3 故障时,距离保护Ⅰ段动作情况
Table 1　Action status of distance protection zone-Ⅰ when fault occurs on L_3

元件编号	动作情况期望值		
	故障点在 A 段	故障点在 B 段	故障点在 C 段
1	0	0	0
2	0	0	0
3	0	0	0
4	0	0	0
5	1	1	0
6	0	1	1
7	0	0	0
8	0	0	0
9	0	0	0
10	0	0	0

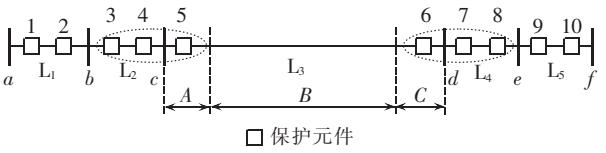

图 3　距离保护Ⅱ段动作情况期望值计算示例系统
Fig.3　Example system for zone-Ⅱ action of distance protection

表 2　线路 L_3 故障时,距离保护Ⅱ段动作情况
Table 2　Action status of distance protection zone-Ⅱ when fault occurs on L_3

元件编号	动作情况期望值		
	故障点在 A 段	故障点在 B 段	故障点在 C 段
1	0	0	0
2	0	0	0
3	1	0	0
4	0	0	0
5	1	1	1
6	1	1	1
7	0	0	0
8	0	0	1
9	0	0	0
10	0	0	0

距离保护元件 3 和 8 的Ⅱ段的保护范围在线路 L_3 上分别产生的有效距离等值阻抗,可以反映图 3 中 A 段和 C 段的长度,故障点在 A、B、C 这 3 段上的概率分别为 $\lambda_A^{\mathrm{Ⅱ}}$、$\lambda_B^{\mathrm{Ⅱ}}$、$\lambda_C^{\mathrm{Ⅱ}}$,计算式如下:

$$\begin{cases}\lambda_A^{\mathrm{Ⅱ}}=\dfrac{Z_{\mathrm{eL}_3-3}^{\mathrm{Ⅱ}}}{Z_{\mathrm{L}_3}}\\ \lambda_B^{\mathrm{Ⅱ}}=\dfrac{Z_{\mathrm{L}_3}-Z_{\mathrm{eL}_3-3}^{\mathrm{Ⅱ}}-Z_{\mathrm{eL}_3-8}^{\mathrm{Ⅱ}}}{Z_{\mathrm{L}_3}}\\ \lambda_C^{\mathrm{Ⅱ}}=\dfrac{Z_{\mathrm{eL}_3-8}^{\mathrm{Ⅱ}}}{Z_{\mathrm{L}_3}}\end{cases} \tag{10}$$

同理,距离保护元件 1 和 10 的Ⅲ段的保护范围,也可以将线路 L_3 分为 A、B、C 这 3 段,如图 4 所示。在线路 L_3 不同位置发生故障时,各元件的距离保护Ⅲ段的动作情况如表 3 所示。

距离保护元件 1 和 10 的Ⅲ段保护范围在线路 L_3 上分别产生的有效距离等值阻抗,可以反映图 4 中 A 段和 C 段的长度,则故障点在 A、B、C 这 3 段上

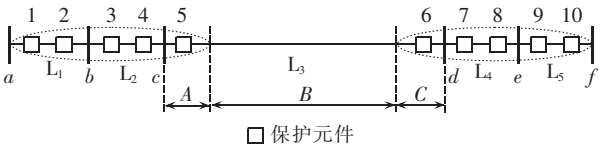

图4 距离保护Ⅲ段动作情况示例系统

Fig.4 Example system for zone-Ⅲ action of distance protection

表3 线路 L_3 故障时,距离保护Ⅲ段动作情况

Table 3 Action status of distance protection zone-Ⅲ when fault occurs on L_3

元件编号	动作情况期望值		
	故障点在 A 段	故障点在 B 段	故障点在 C 段
1	1	0	0
2	0	0	0
3	1	1	1
4	0	0	0
5	1	1	1
6	1	1	1
7	0	0	0
8	1	1	1
9	0	0	0
10	0	0	1

的概率 $\lambda_A^{\mathrm{Ⅲ}}$、$\lambda_B^{\mathrm{Ⅲ}}$、$\lambda_C^{\mathrm{Ⅲ}}$ 分别为:

$$\begin{cases}\lambda_A^{\mathrm{Ⅲ}}=\dfrac{Z_{\mathrm{eL_3-1}}^{\mathrm{Ⅲ}}}{Z_{\mathrm{L_3}}}\\ \lambda_B^{\mathrm{Ⅲ}}=\dfrac{Z_{\mathrm{L_3}}-Z_{\mathrm{eL_3-1}}^{\mathrm{Ⅲ}}-Z_{\mathrm{eL_3-10}}^{\mathrm{Ⅲ}}}{Z_{\mathrm{L_3}}}\\ \lambda_C^{\mathrm{Ⅲ}}=\dfrac{Z_{\mathrm{eL_3-10}}^{\mathrm{Ⅲ}}}{Z_{\mathrm{L_3}}}\end{cases}\tag{11}$$

将式(9)—(11)的计算结果作为故障点在线路不同位置时,保护动作情况期望值的权重,得到线路故障时保护动作情况的期望值,则保护契合度期望函数的计算式如式(12)所示。

$$\begin{aligned}E^*(\mathrm{L}_i)=&\sum_{j=1}^{B_{\mathrm{Ⅰ}}}\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅰ}}(\lambda_A^{\mathrm{Ⅰ}}D_{Aij}^{*\mathrm{Ⅰ}}+\lambda_B^{\mathrm{Ⅰ}}D_{Bij}^{*\mathrm{Ⅰ}}+\lambda_C^{\mathrm{Ⅰ}}D_{Cij}^{*\mathrm{Ⅰ}})+\\&\sum_{j=1}^{B_{\mathrm{Ⅱ}}}\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅱ}}(\lambda_A^{\mathrm{Ⅱ}}D_{Aij}^{*\mathrm{Ⅱ}}+\lambda_B^{\mathrm{Ⅱ}}D_{Bij}^{*\mathrm{Ⅱ}}+\lambda_C^{\mathrm{Ⅱ}}D_{Cij}^{*\mathrm{Ⅱ}})+\\&\sum_{j=1}^{B_{\mathrm{Ⅲ}}}\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅲ}}(\lambda_A^{\mathrm{Ⅲ}}D_{Aij}^{*\mathrm{Ⅲ}}+\lambda_B^{\mathrm{Ⅲ}}D_{Bij}^{*\mathrm{Ⅲ}}+\lambda_C^{\mathrm{Ⅲ}}D_{Cij}^{*\mathrm{Ⅲ}})\end{aligned}\tag{12}$$

其中,$D_{Aij}^{*\mathrm{Ⅰ}}$、$D_{Aij}^{*\mathrm{Ⅱ}}$、$D_{Aij}^{*\mathrm{Ⅲ}}$ 分别为假设故障发生在线路 L_i 的 A 段上,各保护元件Ⅰ段、Ⅱ段、Ⅲ段的动作情况期望值;$D_{Bij}^{*\mathrm{Ⅰ}}$、$D_{Bij}^{*\mathrm{Ⅱ}}$、$D_{Bij}^{*\mathrm{Ⅲ}}$ 分别为假设故障发生在线路 L_i 的 B 段上,各保护元件Ⅰ段、Ⅱ段、Ⅲ段的动作情况期望值;$D_{Cij}^{*\mathrm{Ⅰ}}$、$D_{Cij}^{*\mathrm{Ⅱ}}$、$D_{Cij}^{*\mathrm{Ⅲ}}$ 分别为假设故障发生在线路 L_i 的 C 段上,各保护元件Ⅰ段、Ⅱ段、Ⅲ段的动作情况期望值。

2.3 基于距离保护契合因子识别故障线路

定义线路 L_i 的保护契合度函数值与保护契合度期望函数值之比为该线路的距离保护契合因子。其计算式如下:

$$P_{\mathrm{e}}(\mathrm{L}_i)=E_{\mathrm{F}}(\mathrm{L}_i)/E^*(\mathrm{L}_i)\tag{13}$$

在计算距离保护契合度期望函数值时,考虑到在线路不同位置发生故障的情况,得到的距离保护契合度期望函数值是距离保护契合度函数值的加权平均值,而不是线路某个具体位置发生故障的契合度函数值。因此距离保护契合因子并没有具体的理论值。但是距离保护契合因子的计算是对距离保护契合度函数值进行归一化处理,因此故障线路的距离保护契合因子应为一个接近1的正数。同时,$P_{\mathrm{e}}(\mathrm{L}_i)$ 越大表示保护契合度函数的值越接近保护契合度期望函数的值,则线路 L_i 是故障线路的概率越大,则保护判据为:

$$P_{\mathrm{e}}(\mathrm{L}_i)=P_{\mathrm{emax}}\tag{14}$$

区域后备保护算法的具体实现过程如图5所示。

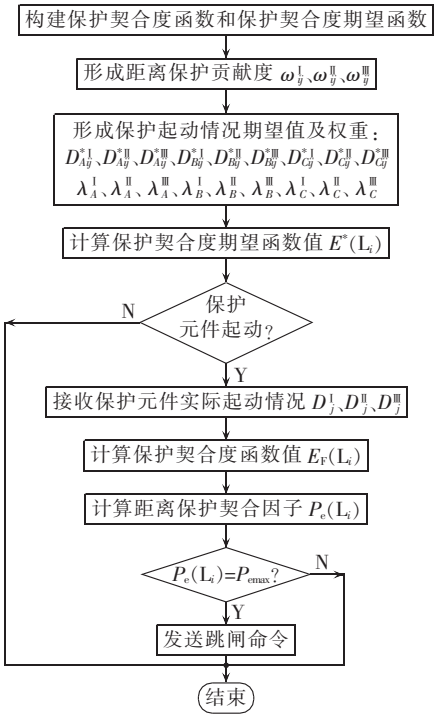

图5 本文所提故障线路识别流程

Fig.5 Flowchart of proposed faulty line identification

3 算例验证

3.1 IEEE 10机39节点的系统仿真验证

为验证本文算法的正确性,利用电磁暂态仿真软件PSCAD搭建的IEEE 10机39节点的电力系统模型进行仿真验证,仿真系统图及其各支路和母线编号如图6所示。广域后备保护的构成模式为区域集中式,选取图6中虚线内所示的保护区域为仿真对象(对区域的选择没有特定的要求,所选区域不同并不影响算法的运算结果)。

在线路 L_8 靠近母线4处发生故障。形成各距离保护元件针对每条线路的距离保护贡献度 $\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅰ}}$、$\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅱ}}$、$\omega_{ij}^{\mathrm{Ⅲ}}$,其中对线路 L_8 各距离保护元件的贡献度如表4所示。在实际保护装置中,相间距离保护整定值与接

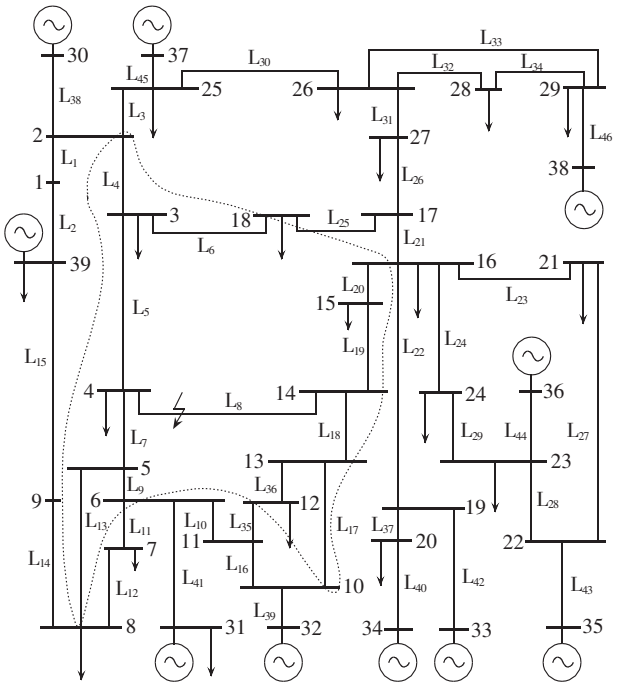

图 6 IEEE 10 机 39 节点系统

Fig.6 IEEE 10-generator 39-bus system

表 4 距离保护元件对判断 L_8 为故障线路的贡献度

Table 4 Contribution degree to faulty L_8 identification by different protective elements for three zones

元件	ω_{8j}^{I}	$\omega_{8j}^{\mathrm{II}}$	$\omega_{8j}^{\mathrm{III}}$	元件	ω_{8j}^{I}	$\omega_{8j}^{\mathrm{II}}$	$\omega_{8j}^{\mathrm{III}}$
2-3	0	0	0.0560	8-5	0	0	0
3-2	0	0	0	5-8	0	0	0
3-4	0	0.1480	0.2745	13-10	0	0	0
4-3	0	0	0	10-13	0	0	0.0102
18-3	0	0	0.0419	14-13	0	0	0
3-18	0	0	0	13-14	0	0.1884	0.2882
5-4	0	0.1842	0.2745	14-15	0	0	0
4-5	0	0	0	15-14	0	0.1432	0.2882
4-14	1	1	0.2882	15-16	0	0	0
14-4	1	1	0.2745	16-15	0	0	0
6-5	0	0	0	13-12	0	0	0
5-6	0	0	0	12-13	0	0	0

地距离保护整定值不同,可以分别根据整定值计算距离保护贡献度,若相间距离保护动作,则采用相间距离保护整定值计算的贡献度作为权重,若接地距离保护动作,则采用接地距离保护整定值计算的贡献度作为权重。算法不受故障类型不同的影响。

将距离保护贡献度作为权重,结合保护动作情况的期望值及其权重,计算保护契合度期望函数值,如表 5 所示。

距离保护贡献度、距离保护契合度期望函数值均可以在系统正常运行的情况时,根据保护整定值计算得到,并存储于区域主机中。故障发生后,根据保护的动作情况,只需将保护动作的距离保护元件的信息上传至区域主机,用于计算距离保护契合度函数值,并不需要再搜集整个区域的信息。区域主机接收到各保护元件实际动作情况如表 6 所示,仅需

表 5 各线路保护契合度期望函数值

Table 5 Value of expected protection fitness function for different lines

线路	期望函数值	线路	期望函数值
L_4	5.2311	L_{13}	4.8635
L_5	6.2961	L_{17}	2.8846
L_6	5.2756	L_{18}	4.6178
L_7	5.8428	L_{19}	6.3087
L_8	5.1464	L_{20}	5.2050
L_9	4.8350	L_{36}	7.0270

表 6 线路 L_8 故障时,各距离保护元件的动作情况

Table 6 Action status of different protective elements when L_8 is faulty

元件	动作情况			元件	动作情况		
	Ⅰ段	Ⅱ段	Ⅲ段		Ⅰ段	Ⅱ段	Ⅲ段
2-3	0	0	1	8-5	0	0	1
3-2	0	0	0	5-8	0	0	0
3-4	0	1	1	13-10	0	0	0
4-3	0	0	0	10-13	0	0	0
18-3	0	0	1	14-13	0	0	0
3-18	0	0	0	13-14	0	0	1
5-4	0	1	1	14-15	0	0	0
4-5	0	0	0	15-14	0	0	1
4-14	1	1	1	15-16	0	0	0
14-4	0	1	1	16-15	0	0	0
6-5	0	0	1	13-12	0	0	0
5-6	0	0	0	12-13	0	0	0

对 15 位(即动作情况为 1 的位数)保护动作信息进行上传,不需要对区域其他信息进行搜集。因此保护的快速性和可靠性能够得到保障。

将距离保护贡献度作为权重,由保护实际动作情况计算保护契合度函数值,如表 7 所示。计算保护契合度函数值与保护契合度期望函数值之比,得到距离保护契合因子,如表 8 所示。

表 7 各线路保护契合度函数值

Table 7 Value of protection fitness function for different lines

线路	契合度函数值	线路	契合度函数值
L_4	0.5784	L_{13}	0.8423
L_5	3.0259	L_{17}	0
L_6	0.5093	L_{18}	0.6784
L_7	2.5949	L_{19}	1.4568
L_8	5.1183	L_{20}	0
L_9	0.1956	L_{36}	0

表 8 各线路距离保护契合因子

Table 8 Distance protection fitting factor of different lines

线路	契合因子	线路	契合因子
L_4	0.1106	L_{13}	0.1732
L_5	0.5078	L_{17}	0
L_6	0.0965	L_{18}	0.1469
L_7	0.4617	L_{19}	0.2309
L_8	0.9412	L_{20}	0
L_9	0.0405	L_{36}	0

考察系统的容错性,针对距离保护 I 段,或纵联

保护拒动或误动的情况考虑4种特殊情况,以验证本方法的正确性和有效性。

情况1:若线路L_8两端的距离保护Ⅰ段均不动作,即表6中的元件4–14的Ⅰ段动作值为0(此时距离保护Ⅰ段不能正确判断线路L_8故障)。

情况2:若线路L_8两端的距离保护Ⅰ段均不动作,且一端距离保护Ⅱ段拒动,即表6中的元件4–14的Ⅰ段动作值为0,元件14–4的Ⅱ段动作值为0(此时纵联距离保护拒动)。

情况3:若线路L_7一端的距离保护Ⅰ段误动,即表6中的元件5–4的Ⅰ段动作值为1(此时距离保护Ⅰ段误判线路L_7故障)。

情况4:若线路L_7两端的距离保护Ⅱ段均动作,即表6中的元件4–5的Ⅱ段动作值为1(此时纵联距离保护误动)。上述4种情况的距离保护契合因子如表9所示。

表9 4种情况下,各线路距离保护契合因子

Table 9 Distance protection fitting factor of different lines for four conditions

线路	契合因子			
	情况1	情况2	情况3	情况4
L_4	0.1106	0.1106	0.1106	0.1106
L_5	0.4941	0.4341	0.4941	0.4941
L_6	0.0965	0.0965	0.0965	0.0965
L_7	0.4521	0.4521	0.6263	0.6263
L_8	0.7464	0.5825	0.9411	0.9411
L_9	0.0405	0.0405	0.0405	0.0405
L_{13}	0.1732	0.1732	0.1732	0.1732
L_{17}	0	0	0	0
L_{18}	0.1469	0.1469	0.1469	0.1469
L_{19}	0.2309	0.2309	0.2309	0.2309
L_{20}	0	0	0	0
L_{36}	0	0	0	0

由表9中数据可知,线路L_8的距离保护契合因子在4种情况下均为区域最大值,满足判据式(14),由此判断线路L_8为故障线路。因此,在距离保护Ⅰ段拒动或误动,以及纵联距离保护拒动或误动的情况下,本方法均能正确判断故障元件。

在对容错性进行分析时,如果逐一对各种情况进行分析,很难枚举到系统可能发生的所有情况。为此,笔者将可能出现问题的所有元件进行N–3处理(超出了系统安全考虑的较严重的N–2情况),以考查本方法的有效性和可行性。如表6所示,线路L_8故障后,区域内共有15位保护动作信息。对这15位保护动作信息进行分析,任意N位保护信息错误的仿真结果如表10所示。表中,P_w为错误保护信息数目占保护信息总数目的百分比;X为所有可能情况的统计个数;Y为本方法造成误判的情况数目;本方法正确判断的概率$W=(X-Y)/X$。

表10中数据显示,15位保护动作信息中任意3位出错,算法均能准确判断故障,且信息容错位数占保护信息总数目的百分比高达20%,表明该算法具有一定的容错性。

表10 所提方法的容错性能

Table 10 Fault-tolerant performance of proposed method

N	P_w/%	X	Y	W/%
1	6.67	15	0	100
2	13.33	105	0	100
3	20.00	455	0	100
4	26.67	1365	24	98.24

本方法在进行故障判断时,只需要搜集故障发生后动作的保护信息,不需要对电气量信息进行搜集。考虑带过渡电阻的短路时,距离保护范围将缩小,动作的保护信息位数也将减少,当保护动作信息减少到0位时(即区域内所有距离保护拒动),本方法不能用于识别故障;当保护动作信息有2位及以上时(如故障线路两端距离保护Ⅲ段动作),本方法可用于识别故障。

以线路L_8故障为例进行仿真,得到契合因子如表11所示。由于过渡电阻的影响,各线路的距离保护契合因子均减小,但故障线路的距离保护契合因子仍大于非故障线路,满足判据式(14),可见本方法具备一定的抗过渡电阻的能力。

表11 各线路距离保护契合因子

Table 11 Distance protection fitting factor of different lines

线路	契合因子	线路	契合因子
L_4	0	L_{13}	0
L_5	0.0733	L_{17}	0
L_6	0	L_{18}	0.0489
L_7	0.0452	L_{19}	0.0720
L_8	0.1097	L_{20}	0
L_9	0	L_{36}	0

3.2 贵州都匀实际系统RTDS仿真验证

以图7所示的贵州都匀110 kV实际系统为例,验证本方法在实际工程中的可靠性。

利用RTDS对图7中线路L_6中点发生故障的情况进行分析,各保护元件的动作情况如表12所示,各线路距离保护契合因子如表13所示。

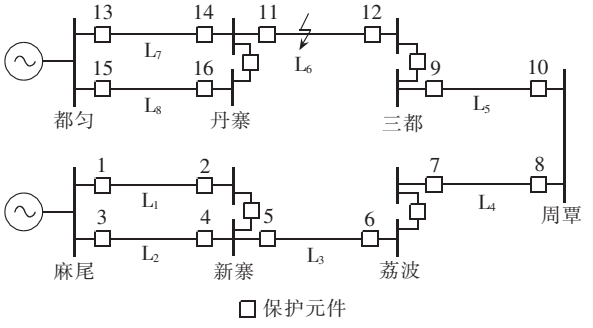

图7 贵州都匀系统

Fig.7 Duyun system in Guizhou

表 12 线路 L_6 故障时,各距离保护元件的动作情况
Table 12 Action status of different protective elements when L_6 is faulty

元件	动作情况			元件	动作情况		
	Ⅰ段	Ⅱ段	Ⅲ段		Ⅰ段	Ⅱ段	Ⅲ段
1	0	0	0	9	0	0	0
2	0	0	0	10	0	1	1
3	0	0	0	11	1	1	1
4	0	0	0	12	1	1	1
5	0	0	0	13	0	0	1
6	0	0	0	14	0	0	0
7	0	0	0	15	0	0	1
8	0	0	0	16	0	0	0

表 13 各线路距离保护契合因子
Table 13 Distance protection fitting factor of different lines

线路	契合因子	线路	契合因子
L_1	0	L_5	0.3256
L_2	0	L_6	1.0998
L_3	0	L_7	0.1845
L_4	0	L_8	0.2063

表 12 中,线路 L_6 故障区域内共有 10 位保护动作信息,对这 10 位保护动作信息进行分析,任意 N 位数信息错误的仿真结果如表 14 所示。由表 14 中数据可知,10 位保护动作信息中任意 5 位(N–5)信息错误(超出了系统安全考虑的较严重的 N–2 情况),本方法均能准确判断故障,且信息容错位数占保护信息总数目的百分比高达 50%,表明本方法对实际系统具有一定的指导意义。

表 14 所提方法的容错性能
Table 14 Fault-tolerant performance of proposed method

N	P_w/%	X	Y	W/%
1	10	10	0	100
2	20	45	0	100
3	30	120	0	100
4	40	210	0	100
5	50	252	0	100
6	60	210	3	98.57

4　结论

本文提出了一种基于距离保护契合因子的区域后备保护算法,本方法具有以下特点:

a. 引入距离保护贡献度,作为距离保护契合度函数和契合度期望函数中的权重值,该权重值根据距离保护的保护范围定量计算得出,克服了传统权重设置依赖先验经验带来的不确定性问题;

b. 本方法具有很高的容错性,保护动作信息任意 3 位数(容错百分比为 20%)、任意 5 位数(容错百分比为 50%)出错,故障判断的准确率仍为 100%;

c. 故障发生后,本方法仅需要搜集各保护的动作信息,需要上传的信息量少,且对通信系统的同步性没有要求;

d. 不需要进行保护定值的计算,只需要对区域内线路的距离保护契合因子进行横向比较,进而定位故障。

参考文献:

[1] 马静,李金龙,王增平,等. 基于故障关联因子的新型广域后备保护[J]. 中国电机工程学报,2010,30(31):100-107.
MA Jing,LI Jinlong,WANG Zengping,et al. Wide-area back-up protection based on fault correlation factor[J]. Proceedings of the CSEE,2010,30(31):100-107.

[2] 马静,王希,王增平,等. 圆网格式保护区域交叠全覆盖分区新方法[J]. 电力自动化设备,2012,32(9):50-54.
MA Jing,WANG Xi,WANG Zengping,et al. Partition of protection zone with circular overlapping coverage for wide-area protection system[J]. Electric Power Automation Equipment,2012,32(9):50-54.

[3] 马静,许冬,王桐,等. 基于故障确信度的广域多重故障识别新算法[J]. 电网技术,2012,36(12):88-93.
MA Jing,XU Dong,WANG Tong,et al. A novel wide-area multiple-fault location algorithm based on fault confirming degree [J]. Power System Technology,2012,36(12):88-93.

[4] 李振兴,尹项根,张哲,等. 基于序电流相位比较和幅值比较的广域后备保护方法[J]. 电工技术学报,2013,28(1):241-250.
LI Zhenxing,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. Algorithm of wide-area protection on comparison of current phase and amplitude[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2013,28(1):241-250.

[5] 何志勤,张哲,尹项根,等. 基于故障电压比较的广域后备保护新算法[J]. 电工技术学报,2012,27(7):274-283.
HE Zhiqin,ZHANG Zhe,YIN Xianggen,et al. A novel wide area backup protection algorithm based on fault voltage comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(7):274-283.

[6] 姜宪国,王增平,李琛,等. 适应于广域后备保护的复合方向元件[J]. 电力系统自动化,2013,37(3):64-69.
JIANG Xianguo,WANG Zengping,LI Chen,et al. Complex directional element adapting to wide area backup protection [J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(3):64-69.

[7] 王艳,金晶,焦彦军. 广域后备保护故障识别方案[J]. 电力自动化设备,2014,34(12):70-75,99.
WANG Yan,JIN Jing,JIAO Yanjun. Fault identification scheme for wide-area backup protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(12):70-75,99.

[8] 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.

[9] 曾飞,苗世洪,林湘宁,等. 基于序分量的电网广域后备保护算法[J]. 电力系统自动化,2010,34(23):57-63.
ZENG Fei,MIAO Shihong,LIN Xiangning,et al. A wide area backup protection algorithm for power grid based on sequence component[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(23):57-63.

[10] 李振兴,尹项根,张哲,等. 基于综合阻抗比较原理的广域继电保护算法[J]. 电工技术学报,2012,27(8):179-186.

LI Zhenxing,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. A study of wide-area protection algorithm based on integrated impedance comparison[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012,27(8):179-186.

[11] 汪旸,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):40-44.
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):40-44.

[12] 汪旸,尹项根,张哲,等. 基于遗传信息融合技术的广域继电保护[J]. 电工技术学报,2010,25(8):174-179.
WANG Yang,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. Wide area protection based on genetic information fusion technology[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2010,25(8): 174-179.

[13] 杨增力,石东源,段献忠. 基于方向比较原理的广域继电保护系统[J]. 中国电机工程学报,2008,28(22):87-93.
YANG Zengli,SHI Dongyuan,DUAN Xianzhong. Wide-area protection system based on direction comparison principle [J]. Proceedings of the CSEE,2008,28(22):87-93.

[14] TAN J C,CROSSLEY P A,KIRSCHEN D,et al. An expert system for the back-up protection of a transmission networks [J]. IEEE Trans on Power Delivery,2000,15(2):508-514.

[15] 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):350-380.

[16] 李振兴,尹项根,张哲,等. 基于多信息融合的广域继电保护新算法[J]. 电力系统自动化,2011,35(9):14-18.
LI Zhenxing,YIN Xianggen,ZHANG Zhe,et al. Wide area protection algorithm based on multi-information fusion[J]. Automation of Electric Power Systems,2011,35(9):14-18.

[17] 王睿,王晓茹,黄飞,等. 基于相关矩阵的电网广域后备保护算法[J]. 电力系统自动化,2013,37(4):69-74.
WANG Rui,WANG Xiaoru,HUANG Fei,et al. Wide area backup protection algorithm for power grid based on correlation matrix[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(4): 69-74.

[18] 田聪聪,文明浩. 具有高信息冗余的广域后备保护系统[J]. 电网技术,2011,35(10):214-219.
TIAN Congcong,WEN Minghao. A wide-area backup protection system with high information redundancy[J]. Power System Technology,2011,35(10):214-219.

[19] 张保会,周良才,汪成根,等. 具有容错性能的广域后备保护算法[J]. 电力系统自动化,2010,34(5):67-71.
ZHANG Baohui,ZHOU Liangcai,WANG Chenggen,et al. Wide area backup protection algorithm with fault-tolerance performance[J]. Automation of Electric Power Systems,2010,34(5): 67-71.

[20] 何志勤,张哲,尹项根,等. 电力系统广域继电保护研究综述[J]. 电力自动化设备,2010,30(5):125-130.
HE Zhiqin,ZHANG Zhe,YIN Xianggen,et al. Overview of power system wide area protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2010,30(5):125-130.

[21] 叶圣永,王晓茹,周曙,等. 基于马尔可夫链蒙特卡罗方法的电力系统暂态稳定概率评估[J]. 电工技术学报,2012, 27(6): 168-174.
YE Shengyong,WANG Xiaoru,ZHOU Shu,et al. Power system probabilistic transient stability assessment based on Markov chain Monte Carlo method[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(6):168-174.

[22] 张保会,尹项根. 电力系统继电保护[M]. 北京:中国电力出版社,2005:100.

作者简介:

马 静

马 静(1981—),男,陕西阳泉人,副教授,博士后,研究方向为电力系统保护、稳定与控制(**E-mail**:hdmajing@aliyun.com);

郭雅蓉(1989—),女,山西临汾人,硕士研究生,主要从事电力系统继电保护等方面的研究工作;

王增平(1964—),男,河北辛集人,教授,博士研究生导师,博士,研究方向为电力系统自动化、继电保护、变电站综合自动化。

Regional backup protection algorithm based on fitting factor of distance protection

MA Jing,GUO Yarong,WANG Zengping

(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources, North China Electric Power University,Beijing 102206,China)

Abstract: An algorithm based on the fitting factor of distance protection is proposed for the regional backup protection,which quantitatively converts the relationship between the condition of its element action and the fault location into the contribution degree for every zones of each distance protection, takes the contribution degree as the weight to establish the protection fitness function and expected protection fitness function;defines the ratio of fitness function to expected fitness function as the fitting factor of distance protection;identifies the faulty line according to the fitting factor. Simulations are carried out for IEEE 10-generator 39-bus system and Duyun system in Guizhou,and the simulative results show that,immune to the asynchrony of information,the faulty line is still identified correctly by the calculated fitting factor even when 50% of action information is lost or incorrect.

Key words: distance protection; contribution degree; fitness function; expected fitness function; fitting factor; regional backup protection; relay protection