

# 基于线路二次设备实时信息的保护定值风险评估研究

蒋航<sup>1</sup>, 刘进<sup>2</sup>, 熊俊<sup>1</sup>, 王新花<sup>3</sup>, 陈愚<sup>1</sup>, 龚仁敏<sup>3</sup>

(1. 国家电网有限公司西南分部, 四川 成都 610000; 2. 国网四川省电力公司, 四川 成都 610000;  
3. 北京中恒博瑞数字电力科技有限公司, 北京 100085)

**摘要:** 对继电保护设备风险程度进行评估, 及时发现继电保护系统薄弱环节, 对维持电力系统安全稳定运行具有重要作用。以故障发生概率和危害程度作为继电保护定值风险评估的量化指标, 提出了一种基于线路二次设备实时信息的保护定值风险评估方法。基于继电保护拒动和误动两个方面对保护不正确动作的概率进行计算, 并以相对负荷损失这一特征量来定量分析保护不正确动作的危害。从保护定值的配合关系和继电保护系统的硬件缺陷两个方面, 对保护装置整体闭锁和主保护闭锁这两种闭锁情况下的保护定值在线校核策略进行研究, 建立以单个保护装置为研究对象的保护定值风险评估模型。通过对某地区电网线路保护装置进行定值风险评估, 验证了所提方法的合理性和可行性。该方法有利于发现继电保护系统的薄弱环节, 提升电力系统的安全性和可靠性。研究成果对提升电网安全可靠运行具有指导意义。

**关键词:** 继电保护; 在线校核; 负荷损失; 保护定值; 风险评估

## Research on relay protection setting risk assessment based on real-time information of line secondary facility

JIANG Hang<sup>1</sup>, LIU Jin<sup>2</sup>, XIONG Jun<sup>1</sup>, WANG Xinhua<sup>3</sup>, CHEN Yu<sup>1</sup>, GONG Renmin<sup>3</sup>

(1. State Grid Southwest Branch, Chengdu 610000, China; 2. State Grid Sichuan Electric Power Company, Chengdu 610000, China; 3. Beijing Joinbright Digital Electric Technology Co., Ltd., Beijing 100085, China)

**Abstract:** To evaluate the risk degree of relay protection equipment and find out the weak links of the relay protection system in time is of great importance to maintain the safe and stable operation of the power system. Taking the probability of failure and the degree of damage as the quantitative index of relay protection setting risk assessment, a method of protection setting risk assessment based on real-time information of secondary equipment on line is proposed. Based on the two aspects of rejection and misoperation of relay protection, the probability of incorrect operation of protection is calculated, and the hazard of incorrect operation of protection is quantitatively analyzed by the characteristic quantity of relative load loss. From the aspects of coordination relationship of relay protection setting and hardware defects of relay protection system, the online checking strategies of protection setting in the case of overall blocking and main blocking of protection device are studied, and a relay protection setting risk assessment model is established based on a single protection device. The method is proved to be reasonable and feasible through the constant value risk assessment of the line protection device in a certain area. The method is helpful to find the weak links of the relay protection system and to improve the safety and reliability of the power system. The research results have guiding significance to improve the safe and reliable operation of the power network.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51307059) and Science and Technology Project of State Grid Southwest Branch (No. SGXN0000DDJS1800004).

**Key words:** relay protection; on-line verification; load loss; protection setting value; risk assessment

## 0 引言

继电保护系统作为维持电力系统安全可靠运行

的第一道防线, 继电保护装置的准确、快速、可靠动作能很大程度地减少事故对电力设备的损坏<sup>[1-3]</sup>。随着交直流混联电网的迅猛发展, 在某些实时方式下, 继电保护整定值可能存在拒动或误动的风险, 因此, 对于继电保护故障特性的研究受到了广泛关注<sup>[4-5]</sup>。

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(51307059); 国家电网有限公司西南分部科技项目(SGXN0000DDJS1800004)

根据国内外继电保护事故调研报告统计,造成继电保护隐患的原因主要有两类:一是在当前运行方式下存在继电保护定值失配或者灵敏性不足的情况;二是二次设备存在硬件缺陷,主要包括通信通道故障,电压互感器、电流互感器等测量元件故障、保护装置元件老化或者设计存在缺陷以及二次设备回路接线错误等<sup>[6-7]</sup>。文献[8-9]提出一种基于保护隐藏故障模式分析的  $N-k$  故障分析方法,该方法通过剖析继电保护隐藏故障的根本机理,分析出不同隐藏故障模式下保护装置以及线路故障的准确位置,该方法能够定量评估电网中继电保护隐藏故障对系统可靠性的影响。文献[10-11]研究了继电保护定值在线校核及预警系统在智能调度支持系统中的应用,通过在线获取电网一次设备实时运行信息,实现对当前电网方式下继电保护定值的灵敏性、选择性的实时校核。但其未对可能导致继电保护不正确动作的其余硬件设备进行校核。文献[12]应用蒙特卡罗法对线路故障、保护装置动作以及隐性故障等随机事件建立概率模型,评估保护装置对电力系统风险的影响,该方法具有一定的可行性及有效性。文献[13]综合考虑保护装置所处线路位置的重要程度以及保护故障后果的严重程度,基于相对熵组合赋权法求出各指标权重,构建了保护综合重要度评估模型,按照保护综合重要度对继电保护定值进行顺序校核。文献[14-16]通过在继电保护整定系统中引入信息融合技术,能够及时地对因电力系统运行方式发生变化而产生的相关变化特性做出反馈,及时地对继电保护相关动作特性做出准确校正,能够极大程度地提高调度人员的工作效率。

当线路保护装置、开关出现拒动使得故障设备及故障线路无法及时切除时,会进一步破坏电气设备;若相关后备保护延时动作不能及时切除故障,则不可避免地会发生大面积停电,这对电网安全经济运行造成新的风险,因此本文提出了一种基于线路二次设备实时信息的保护定值风险评估方法。文章对保护不正确动作的概率及相对负荷损失进行定量计算,考虑保护定值的配合关系以及继电保护系统的硬件缺陷,对保护装置整体闭锁和主保护闭锁这两种闭锁情况下的保护定值在线校核策略进行研究,建立以单个保护装置为研究对象的保护定值风险评估模型,该评估模型能够客观反映线路保护装置的风险程度。

## 1 保护不正确动作的概率计算

在继电保护系统中,通常采用灵敏性这一指标来评估继电保护范围内保护装置及时动作切除故障

的基本特性;采用选择性这一指标来评估继电保护装置有选择地、准确可靠地切除故障线路的另一基本特性。对于继电保护系统而言,若由于系统的灵敏性不足而导致系统发生拒动,不能有效切除故障线路,其对应一个继电保护的拒动区域;若由于系统的选择性不足而导致系统发生误动,造成非故障线路断电,其对应一个继电保护的误动区域<sup>[17]</sup>。

将保护的拒动区域和误动区域归为本文所研究的保护定值风险区域,若故障发生在保护定值风险区域之外,则继电保护系统不会出现拒动或是误动的现象。

因此,保护不正确动作的概率取决于线路保护风险范围内发生故障的概率。把输电线路出现故障的概率记作  $P(m)$ ,故障落入保护风险范围的概率记作  $P(n)$ 。由于两者互为独立事件,所以求解得到保护定值风险区域中出现线路故障的概率  $P_e$  为

$$P_e = P(m)P(n) \quad (1)$$

### 1.1 线路的故障发生率

基于泊松分布这一概率学理论来分析线路的故障率,则在监测周期  $t$  内线路不出现故障的概率可表示为<sup>[18]</sup>

$$P_{\text{nor}} = e^{-\lambda_0 t} \quad (2)$$

式中,  $\lambda_0$  为监测周期  $t$  内线路发生故障的平均概率。

因此,监测周期  $t$  内,线路发生故障的概率为

$$P(m) = 1 - P_{\text{nor}} = 1 - e^{-\lambda_0 t} \quad (3)$$

### 1.2 线路保护的风险范围

设线路全长为  $L$ ,继电保护发生拒动风险的长度范围为  $L_{n0}$ ,继电保护发生误动风险的长度范围为  $L_{n1}$ ,则线路保护拒动区域占总线路的概率  $P_{ni}(n)$  和保护误动区域占总线路的概率  $P_{li}(n)$  分别为

$$\begin{cases} P_{ni}(n) = \frac{L_{n0}}{L} = \frac{Z_{n0}}{Z_L} \\ P_{li}(n) = \frac{L_{n1}}{L} = \frac{Z_{n1}}{Z_L} \end{cases} \quad (4)$$

式中:  $Z_{n0}$  是线路  $L_{n0}$  的阻抗;  $Z_{n1}$  是线路  $L_{n1}$  的阻抗;  $Z_L$  是这条输电线路的总阻抗。

### 1.3 保护定值风险区域的故障率

根据上述分析,线路出现故障且保护拒动的概率  $P_{\text{seni}}$  以及线路出现故障且保护误动的概率  $P_{\text{seli}}$  可通过式(5)计算求得。

$$\begin{cases} P_{\text{seni}} = (1 - e^{-\lambda_0 t}) \frac{Z_{n0}}{Z_L} \\ P_{\text{seli}} = (1 - e^{-\lambda_0 t}) \frac{Z_{n1}}{Z_L} \end{cases} \quad (5)$$

## 2 保护不正确动作的损失评估

对于继电保护系统而言,若系统的灵敏性不足,则系统会发生拒动,不能有效切除故障线路;若系统的选择性不足,则系统会发生误动,导致非故障线路断电<sup>[17]</sup>。无论是拒动还是误动,都会对电力系统的安全稳定运行造成干扰,如负荷损失等。因此,本文采用相对负荷损失这一指标来评估保护不正确动作的危害。

以图1所示的变电站及输电线路简化示意图为例,以线路输送的有功功率进行表征,假定整条线路的负荷基准值是 $C_N$ ,线路1中继保装置 $QF_1$ 流过的实时负荷为 $C_1$ ,线路2中继保装置 $QF_2$ 流过的实时负荷为 $C_2$ 。

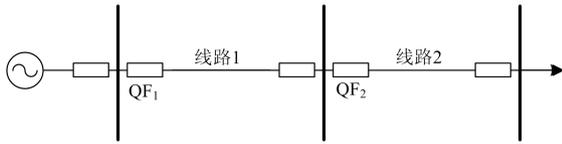


图1 变电站及输电线路简化示意图

Fig. 1 Simplified schematic diagram of transformer substation and transmission line

### 2.1 保护拒动

以拒动相对负荷损失这一评价指标来量化保护拒动造成的后果。如图1所示,假定线路2出现故障,本应该由本线路断路器 $QF_2$ 切除故障,负荷损失为 $C_2$ ;但灵敏性不足或保护装置拒动的情况下, $QF_2$ 会拒动,导致其上一级保护 $QF_1$ 动作,造成负荷损失变成 $C_1$ 。假定潮流方向不变且 $C_1$ 恒大于 $C_2$ ,此时保护拒动相对负荷损失 $C_{sen}$ 的计算公式为

$$C_{sen} = \frac{C_1 - C_2}{C_N} \quad (6)$$

### 2.2 保护误动

以误动相对负荷损失这一评价指标来量化保护误动造成的后果。如图1所示,假定线路2出现故障,则应由断路器 $QF_2$ 动作切除故障线路,但由于断路器 $QF_1$ 发生误动,此时由于继保装置误动而产生的负荷相对损失量 $C_{sel}$ 的计算公式为

$$C_{sel} = \frac{C_2 + C_1 - C_2}{C_N} = \frac{C_1}{C_N} \quad (7)$$

## 3 保护定值风险评估方法的提出

### 3.1 保护定值在线校核策略研究

按照《国家电网公司继电保护和安全自动装置缺陷管理办法》中的规定,将投入运行的继电保护和安全自动装置缺陷按照严重程度分为三级,分别

为危急缺陷、严重缺陷以及一般缺陷。但从继电保护定值校核的角度来看,使用这种设备缺陷的划分方法不能对保护装置进行故障的防范。因此,需要从二次设备缺陷对保护功能的影响程度重新进行划分,即将二次设备缺陷故障对保护装置的影响分为三种:保护装置整体闭锁、主保护闭锁以及不闭锁保护。将电网二次设备缺陷对保护装置的影响列于表1中。

表1 二次设备缺陷对保护装置的影响

Table 1 Impact of secondary equipment defects on protective devices

对保护设备的影响	故障类型
整体闭锁保护	存储器出错、程序出错、定值出错、CPU 采样出错、DSP 采样异常、跳合出口异常、直流电源异常
主保护闭锁	远跳异常、无有效帧、识别码错、严重误码、通道异常、长期差流、差动退出、补偿参数错
不闭锁保护	跳闸位置异常、零序长期启动、装置长期启动、连接错误

当电网二次设备发生故障时,在故障检修期间内需要对部分保护定值在实时运行方式下的适应性进行重点校核,以监测电网的实时性能,确保其满足继电保护四性的要求。本文重点对由二次设备缺陷引起的保护装置整体闭锁和主保护闭锁这两种闭锁情况进行讨论。

#### 3.1.1 保护装置被闭锁

对于220 kV及以上电力系统,通常配备两套相互独立的继电保护装置,当其中一套继电保护装置因故障拒动时,也必能由另一套继电保护装置发出跳闸命令去断开故障。假定断路器拒绝动作,则启动由断路器失灵保护<sup>[19]</sup>,断开同一母线上其他断路器以切除故障。当二次设备缺陷引起线路配置的双套保护装置均被闭锁时,保护装置无法给对应的断路器发送跳闸命令,此时断路器失灵保护不能起到近后备保护功能的作用。若此时该线路发生故障,则应该由上一级线路远后备定值来切除故障。

以图2所示的输电网络简化示意图为例,若断路器 $QF_1$ 所配置的两套保护装置均被闭锁,则需要对相邻线路以及相邻变压器的相间距离III段、接地距离III段以及零序电流III段定值项的远后备灵敏性进行校核,即对同侧上一级线路的 $QF_3$ 、 $QF_5$ 、 $QF_7$ 等断路器的保护定值灵敏性进行校核。此外,这些保护定值的动作时间要尽可能缩短,满足电网稳定的要求。

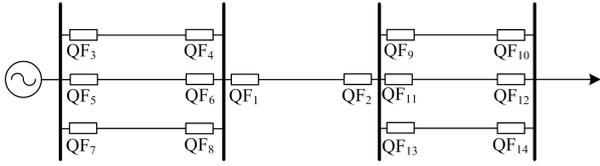


图 2 电力网络简化示意图

Fig. 2 Simplified schematic diagram of power network

### 3.1.2 主保护被闭锁

对于双侧源电网，当一侧保护装置被闭锁后，本线路对侧保护装置的主保护将被闭锁，因此对侧开关应该按照主保护被闭锁的情况进行定值校核。主保护被闭锁后需要对本线路 II 段定值后备保护的灵敏性以及上级线路 II 段定值的选择性进行重点校核。

#### (1) 校核本线路 II 段定值后备灵敏性

由于二次设备故障导致保护装置的主保护被闭锁后，线路两侧的差动保护均不能正常动作。本线路上发生故障后由 II 段定值动作切除故障，因此需要对本线路两端保护装置的 II 段定值进行灵敏性校验，对于线路保护定值项来说，需要保证相间距离 II 段、接地距离 II 段、零序电流 II 段在本线路故障时的灵敏性，且动作时间需要缩短至满足电网稳定性要求的时间<sup>[20]</sup>。

#### (2) 校核上级线路 II 段定值的选择性

在 220 kV 以上的电网中，距离保护 II 段定值一般与下一级支路 I、II 段配合以确保有足够的灵敏性，在满足灵敏性的情况下，因与 II 段定值配合可能导致整定时间过长，如大于 1.7 s，则需要与主保护配合，并考虑与下一级失灵保护的配合。

以图 1 所示的电网结构示意图为例，如果 QF<sub>1</sub> 的距离 II 段定值与 QF<sub>2</sub> 的主保护定值配合，一旦 QF<sub>2</sub> 的主保护退出后，QF<sub>1</sub> 的距离 II 段时间定值和 QF<sub>2</sub> 的距离 II 段时间定值会存在相同的可能，导致线路 2 上发生故障后，QF<sub>1</sub> 会发生误动的风险，即 QF<sub>1</sub> 和 QF<sub>2</sub> 两个开关同时动作，扩大停电范围。所以说当上一级线路的距离 II 段保护定值按与下一级主保护配合取值时，其配合关系主要依赖主保护的可靠动作来保证，一旦主保护退出，下一级支路的某些区域就存在保护失配的风险<sup>[21]</sup>。因此，主保护被闭锁情况下，对上级线路 II 段定值的选择性进行校核是十分有必要的。

### 3.2 保护定值风险评估模型建立

建立保护装置的保护定值风险评估模型<sup>[22-25]</sup>，计算保护装置的保护定值在线校核风险评估值  $R_i$ 。

$$R_i = Q_{seni} \gamma_{seni} R_{seni} + Q_{seli} \gamma_{seli} R_{seli} \quad (8)$$

其中，

$$R_{seni} = P_{seni} C_{seni} \quad (9)$$

$$R_{seli} = \max(P_{selij} C_{selij}) \quad 1 \leq j \leq m \quad (10)$$

式中： $i$  为各保护装置的编号； $Q_{seni}$  和  $Q_{seli}$  为标志系数； $\gamma_{seni}$  和  $\gamma_{seli}$  分别为灵敏性和选择性权重系数； $R_{seni}$  和  $R_{seli}$  分别为保护装置  $i$  的灵敏性和选择性校核风险； $P_{seni}$  为因线路  $i$  灵敏性不符合要求而导致继保装置发生拒动的概率， $C_{seni}$  为继保装置发生拒动产生的负荷相对损失量； $P_{seli}$  为因线路  $i$  与相邻配合线路  $j$  由于继电保护的选择性不符合条件而导致继保装置发生误动的概率， $C_{seli}$  为继保装置发生误动产生的负荷相对损失量； $m$  为线路  $i$  与相邻配合线路中不符合选择性要求的线路数。

若线路的灵敏性符合规定，则令  $Q_{seni}$  为 0；若线路的灵敏性不符合规定，则令  $Q_{seni}$  为 1。若线路的选择性符合规定，则令  $Q_{seli}$  为 0；若线路的选择性不符合规定，则令  $Q_{seli}$  为 1。若保护装置被闭锁，则  $Q_{seni} = Q_{seli} = 1$ ；只要  $m > 0$ ，则  $Q_{seli} = 1$ 。

灵敏性权重系数  $\gamma_{seni}$  和选择性权重系数  $\gamma_{seli}$  的取值范围为 0~1，且  $\gamma_{seni} + \gamma_{seli} = 1$ 。 $\gamma_{seni}$  和  $\gamma_{seli}$  的取值需要根据该条输电线路自身的特性以及其与所在电网的交互性而定：对于系统备用容量较小的电网系统，若输电线路与电源端距离较远，那么  $\gamma_{seli}$  的取值要大一些，防止由于保护的选择性不符合规定而造成继保装置误动，导致负荷端断电，降低电力系统运行的稳定性；而对于系统备用容量较大且输电线路数目较多的电网系统，若由于保护的选择性不符合规定而造成继保装置误动，可能对整个系统造成的负荷损失量并不大，此时灵敏性权重系数  $\gamma_{seni}$  相对取大一些<sup>[17]</sup>。

基于式(8)对不符合继电保护特性的输电线路进行定值风险评估，根据评估结果对各条输电线路的风险程度大小进行排序，以此判断各输电线路的运行风险，从而完善这些线路的继保措施。

## 4 算例验证

以图 3 所示的某地区电网线路简化示意图为例。

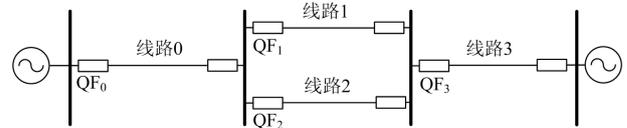


图 3 某地区电网线路简化示意图

Fig. 3 Simplified schematic diagram of power network lines in a certain area

因线路1和线路2与电源距离较远联系相对薄弱,因此灵敏性权重系数较小,  $\gamma_{sen1} = \gamma_{sen2} = 0.4$ , 而选择性权重系数较大,  $\gamma_{sel1} = \gamma_{sel2} = 0.6$ ; 线路3与电源距离较近联系紧密,因此灵敏性权重系数较大,  $\gamma_{sen3} = 0.7$ , 而选择性权重系数  $\gamma_{sel3} = 0.3$ 。由于线路0的灵敏性校核及选择性校核结果均满足要求,所以  $Q_{sen0} = 0, Q_{sel0} = 0$ ; 而线路1和线路2的灵敏性校核及选择性校核均不满足要求,且线路3的保护装置被闭锁,所以  $Q_{sen1} = 1, Q_{sel1} = 1; Q_{sen2} = 1, Q_{sel2} = 1; Q_{sen3} = Q_{sel3} = 1$ 。对线路保护装置进行定值风险评估,计算其保护定值风险评估值。

已知各条线路的保护拒动率、上级线路保护误动率、线路故障率以及线路承载负荷如表2所示。

表2 各条线路基本参数

Table 2 Basic parameters of each line

线路编号	保护拒动率	上级线路保护误动率	线路故障率	线路承载负荷
0	—	—	—	0.315
1	0.001 3	0.001 628	0.014 5	0.238
2	0.000 415	0.001 304	0.008 2	0.168
3	0.002 751	0.001 0.003 07	0.018 9	0.279

基于式(5)、式(6)及式(7)计算得到:线路1因保护灵敏性不足而拒动的概率  $P_{sen1}$  为 0.00189%, 保护拒动相对负荷损失  $C_{sen1}$  为 0.077; 线路1与线路0由于继电保护的选择性不符合条件而发生保护误动的概率  $P_{sel01}$  为 0.00236%, 保护误动的相对损失量  $C_{sel01}$  为 0.315。线路2因保护灵敏性不足而拒动的概率  $P_{sen2}$  为 0.00034%, 保护拒动相对负荷损失  $C_{sen2}$  为 0.147; 线路2与线路0由于继电保护的选择性不符合条件而发生保护误动的概率  $P_{sel02}$  为 0.00107%, 保护误动的负荷相对损失量  $C_{sel02}$  为 0.315。线路3因保护灵敏性不足而拒动的概率  $P_{sen3}$  为 0.0052%, 保护拒动相对负荷损失  $C_{sen3}$  为 0.127。线路3与线路1由于继电保护的选择性不符合条件而发生保护误动的概率  $P_{sel13}$  为 0.00189%, 保护误动的负荷相对损失量  $C_{sel13}$  为 0.238; 线路3与线路2由于继电保护的选择性不符合条件而发生保护误动的概率  $P_{sel23}$  为 0.0058%, 保护误动的负荷相对损失量  $C_{sel23}$  为 0.168。

线路1: 基于式(9)和式(10)求解得到线路1保护装置的灵敏性校核风险  $R_{sen1}$  和选择性校核风险  $R_{sel1}$  分别为

$$R_{sen1} = 0.0000189 \times 0.077 = 0.0000014553$$

$$R_{sel1} = \max(0.0000236 \times 0.315) = 0.000007434$$

基于式(8)求得线路1保护装置的保护定值在线校核风险评估值  $R_1$  为

$$R_1 = 1 \times 0.4 \times 0.0000014553 + 1 \times 0.6 \times 0.000007434 = 0.00000504252$$

线路2: 基于式(9)和式(10)求解得到线路2保护装置的灵敏性校核风险  $R_{sen2}$  和选择性校核风险  $R_{sel2}$  分别为

$$R_{sen2} = 0.0000034 \times 0.147 = 0.0000004998$$

$$R_{sel2} = \max(0.0000107 \times 0.315) = 0.0000033705$$

基于式(8)求得线路2保护装置的保护定值在线校核风险评估值  $R_2$  为

$$R_2 = 1 \times 0.4 \times 0.0000004998 + 1 \times 0.6 \times 0.0000033705 = 0.00000222222$$

线路3: 基于式(9)和式(10)求解得到线路3保护装置的灵敏性校核风险  $R_{sen3}$  和选择性校核风险  $R_{sel3}$  分别为

$$R_{sen3} = 0.000052 \times 0.127 = 0.000006604$$

$$R_{sel3} = \max(0.000007182, 0.000009744) = 0.000009744$$

基于式(8)求得线路3保护装置的保护定值在线校核风险评估值  $R_3$  为

$$R_3 = 1 \times 0.7 \times 0.000006604 + 1 \times 0.3 \times 0.000009744 = 0.000007546$$

综上, 将保护定值风险评估计算结果按照从大到小依次排序:  $R_3 > R_1 > R_2$ , 即线路出现保护不正确动作的风险从高到低依次为: 线路3 > 线路1 > 线路2。根据上述计算结果, 加强对保护定值高风险线路的相应防范措施, 如设置几套保护定值的整定方案, 当本侧双套主保护退出, 或者对侧双套主保护退出后, 需要切换保护定值区, 以满足保护定值对电力系统的适应性。

## 5 结论

本文研究了基于线路二次设备实时信息的保护定值风险评估方法。对继电保护拒动和继电保护误动的概率进行计算, 并以相对负荷损失这一特征量来定量分析保护拒动和误动的危害。研究了保护装置整体闭锁和主保护闭锁这两种闭锁情况下的保护定值在线校核策略, 建立以单个保护装置为研究对象的保护定值风险评估方案, 所提评估方案有利于发现继电保护系统的薄弱环节, 有助于提升电力系统的安全性和可靠性。

## 参考文献

- [1] 杨国生, 桂强, 张烈, 等. 双通道线路纵联保护应用情况分析及其评价指标[J]. 中国电力, 2018, 51(6): 77-82.

- ZHANG Guosheng, GUI Qiang, ZHANG Lie, et al. Application analysis and evaluation index research of dual channel line protection[J]. *Electric Power*, 2018, 51(6): 77-82.
- [2] 许宗光, 文继锋, 李彦, 等. 一种基于数据冗余校验的数字化变电站继电保护装置防误方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(5): 166-170.
- XU Zongguang, WEN Jifeng, LI Yan, et al. An anti-maloperation method based on redundancy data check for relay protection devices in digital substations[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(5): 166-170.
- [3] BAE K, THORP J S. A stochastic study of hidden failures in power system protection[J]. *Decision Support System*, 1999, 24(3): 259-268.
- [4] 杨国生, 戴飞扬, 王文焕, 等. 基于灰度关联法和TOPSIS法的继电保护状态评估综合算法研究与应用[J]. *中国电力*, 2019, 52(2): 94-103.
- YANG Guosheng, DAI Feiyang, WANG Wenhuan, et al. Research and application of comprehensive algorithm of relay protection status assessment based on gray correlation analysis and TOPSIS method[J]. *Electric Power*, 2019, 52(2): 94-103.
- [5] 吴文传, 宁辽逸, 张伯明, 等. 一种考虑二次设备模型的在线静态运行风险评估方法[J]. *电力系统自动化*, 2008, 32(7): 1-5.
- WU Wenchuan, NING Liaoyi, ZHANG Boming, et al. Online operation risk assessment for power system static security considering secondary devices models[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2008, 32(7): 1-5.
- [6] YU X, SINGH C. A practical approach for integrated power system vulnerability analysis with protection failures[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2004, 19(4): 1811-1820.
- [7] 张兆云, 林璞, 王星华. 交直流混合配电网继电保护研究综述[J]. *电力系统保护与控制*, 2019, 47(5): 179-187.
- ZHANG Zhaoyun, LIN Pu, WANG Xinghua. Review on relay protection of AC/DC hybrid distribution grids[J]. *Power System Protection and Control*, 2019, 47(5): 179-187.
- [8] 孙光, 陈金富, 陈志光, 等. 计及继电保护系统多模式隐藏故障的电网 N-k 风险分析[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(15): 37-43.
- SUN Guang, CHEN Jinfu, CHEN Zhiguang, et al. N-k contingency risk analysis of power grid considering multi-mode hidden failure in relay protection system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(15): 37-43.
- [9] 申原. 一种计及继电保护系统多模式隐藏故障的电网 N-k 风险方法研究[J]. *自动化与仪器仪表*, 2015(11): 171-172.
- SHEN Yuan. Research on N-k risk method of power network considering multi-mode hidden faults of relay protection system[J]. *Automation & Instrumentation*, 2015(11): 171-172.
- [10] 肖繁, 尹柳, 戚宣威, 等. 双馈电源接入对变压器差动保护的影响机理分析[J]. *浙江电力*, 2018, 37(12): 45-51.
- XIAO Fan, YIN Liu, QI Xuanwei, et al. Influence mechanism analysis of doubly fed induction generator access on differential protection of transformer[J]. *Zhejiang Electric Power*, 2018, 37(12): 45-51.
- [11] 谢俊, 石东源, 杨增力, 等. 基于多代理系统的继电保护定值在线校核预警系统[J]. *电力系统自动化*, 2007, 31(13): 77-82.
- XIE Jun, SHI Dongyuan, YANG Zengli, et al. An on-line verification of relay settings and early warning system of protective relaying based on MAS[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2007, 31(13): 77-82.
- [12] 陈为化, 江全元, 曹一家. 考虑继电保护隐性故障的电力系统连锁故障风险评估[J]. *电网技术*, 2006, 30(13): 14-19.
- CHEN Weihua, JIANG Quanyuan, CAO Yijia. Risk assessment of power system cascading failure considering hidden failures of protective relays[J]. *Power System Technology*, 2006, 30(13): 14-19.
- [13] 蒋红亮, 吕飞鹏. 基于相对熵组合赋权法的继电保护定值在线校核顺序研究[J]. *电测与仪表*, 2018, 55(6): 82-88.
- JIANG Hongliang, LÜ Feipeng. Study on on-line verification sequence for relay protection setting based on combinational weighting[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2018, 55(6): 82-88.
- [14] 潘佳锋, 朱和剑, 高捷, 等. 基于信息融合的继电保护整定通知单智能决策技术研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2018, 46(21): 188-192.
- PAN Jiafeng, ZHU Hejian, GAO Jie, et al. Study of intelligent decision making technology for relay protection setting notification based on information fusion[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(21): 188-192.
- [15] 梅慧兰, 徐玮, 陈允平, 等. 专家系统在继电保护整定计算中的应用研究[J]. *电力系统保护与控制*, 2004, 32(8): 15-18.
- MEI Huilan, XU Wei, CHEN Yunping, et al. Application research on expert system in protective relay setting

- calculation[J]. Power System Protection and Control, 2004, 32(8): 15-18.
- [16] LI Z, YIN X, ZHANG Z, et al. Wide-area protection fault identification algorithm based on multi-information fusion[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28(3): 1348-1355.
- [17] 黄超. 计及风险的继电保护在线校核研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [18] 王乐, 杨帅, 朱时阳, 等. 基于泊松分布的输电线路跳闸概率预测方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(11): 3777-3783.  
WANG Le, YANG Shuai, ZHU Shiyang, et al. Prediction method of transmission line trip probability based on poisson distribution[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(11): 3777-3783.
- [19] 赵晓明, 吴建伟. 电力系统继电保护定期校验问题综述及其展望[J]. 浙江电力, 2011, 30(11): 1-5.  
ZHAO Xiaoming, WU Jianwei. Overview of periodic check problems and prospect for relay protection in power system[J]. Zhejiang Electric Power, 2011, 30(11): 1-5.
- [20] 张永浩, 龚仁敏, 王利强, 等. 220~750 kV 电网线路后备保护整定配合探讨[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 136-142.  
ZHANG Yonghao, GONG Renmin, WANG Liqiang, et al. Discussion on the coordination of backup protection relay settings in the 220~750 kV network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 136-142.
- [21] 陈梦晓, 王慧芳, 何奔腾. 距离II段保护简化整定方法及区域式后备保护方案[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(7): 151-156, 163.  
CHEN Mengxiao, WANG Huifang, HE Benteng. A Simplified method of distance relay zone-II setting calculation and a region-based backup relaying scheme[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(7): 151-156, 163.
- [22] THORP J S, PHADKE A G, HOROWITZ S H, et al. Anatomy of power system disturbances: importance sampling[J]. Journal of Electric Power and Energy Systems, 1998, 20(2): 147-152.
- [23] MILI L, QIU Q, PHADKE A G. RISK assessment of catastrophic failures in electric power systems[J]. International Journal of Critical Infrastructures, 2004, 1(1): 38-63.
- [24] BAE K, THORP J S. A stochastic study of hidden failures in power system protection[J]. Decision Support Systems, 1999, 24(3): 259-268.
- [25] ELIZONDO DC. A methodology to assess and rank the effects of hidden failures in protection schemes based on regions of vulnerability and index of severity[D]. Blacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2003.
- 
- 收稿日期: 2019-04-23; 修回日期: 2019-07-03  
作者简介:  
蒋航(1980—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 长期从事继电保护及安全自动装置管理工作;  
刘进(1969—), 男, 本科, 高级政工师, 研究方向为应急、安全防范, 电力设施防外破;  
熊俊(1978—), 男, 硕士研究生, 高级工程师, 长期从事继电保护及安全自动装置管理工作。  
(编辑 张爱琴)