# 继电保护原理性运行失效概率模型

戴志辉1,王增平1,焦彦军1,曹树江2

(1. 华北电力大学电气与电子工程学院,河北省保定市 071003; 2. 河北省电力公司,河北省石家庄市 050021)

摘要:建立了继电保护原理性运行失效的双层概率模型,即基于赋时 Petri 网的保护逻辑动态层和 基于模糊 Petri 网的概率信息层。该模型不仅能够进行保护逻辑的动态仿真,而且能够根据系统 运行方式、保护定值和保护逻辑,定量计算保护系统运行过程中由继电保护原理引起的运行失效概 率,对继电保护动作特性与特定故障匹配程度的随机性分析具有参考价值。

关键词:继电保护;可靠性;运行失效;概率模型

## 0 引言

继电保护可靠性研究作为保护系统设计、配置 及运行的重要参考依据,越来越受到关注。目前该 方面的研究主要分为2类:①保护系统软、硬件及其 组合的可靠性评估<sup>[14]</sup>。主要考虑与电网运行方式 相关性较小的保护系统软、硬件失效,涉及保护系统 二次回路、一次设备、装置插件、软件等在设计、制 造、安装、运行过程中的缺陷及硬件老化、人为失误 等因素。②继电保护原理方案及其实现方法的可靠 性<sup>[5-8]</sup>。主要涉及与系统运行状态密切相关的保护 原理、配置方案及离线整定的定值引起的失效、隐性 故障及其对电网安全的影响等<sup>[9-11]</sup>。

继电保护原理性失效概率反映了保护动作特性 与特定故障匹配程度的随机性。例如距离保护在原 理上受过渡电阻、系统振荡、潮流转移等因素影响, 如当过渡电阻较大时可能造成的保护拒动即是一种 保护原理性失效。对于保护原理性失效,目前多数 文献围绕失效概率和运行风险模型展开讨论,对故 障的发生概率主要通过概率统计和已有概率模型确 定,较难反映保护系统的实时运行风险;有的文献对 保护的测量元件进行了失效概率和运行风险评估, 但忽视了保护的逻辑关系,难以真正反映保护系统 的失效概率,最终影响了保护系统运行风险评估的 准确性。实际上,在保护逻辑中除了测量元件,还要 考虑与启动元件、洗相元件、时间元件等的逻辑配合 关系,既要考虑连续变量的动态行为,又要涉及离散 事件变量动态行为以及这2种行为的相互作用<sup>[12]</sup>。 本文根据保护的动作机理,结合 Petri 网理论,建立 了保护原理性失效的双层模型,在进行保护逻辑动 态仿真的基础上,根据系统运行状态和保护定值定 量计算保护原理性运行失效概率,旨在进一步提高

收稿日期: 2010-04-17;修回日期: 2010-07-10。

保护原理性失效概率计算的准确性。

### 1 保护元件的瞬时失效概率模型

风险是一种损失的可能性,是面临损失的可能 性状况。当概率是0或1时,没有风险;当概率介于 0~1之间时,存在风险。要进行保护可靠性及运行 风险的定量评估,首先要有定量计算的依据。本文 一方面从元件角度出发,以概率评估不同特征量输 入情况下保护元件拒动、误动的可能性;另一方面从 保护逻辑角度出发,建立了基于模糊 Petri 网 (FPN)的保护原理性失效概率模型进行保护原理性 失效的综合评估。

#### 1.1 保护元件的瞬时不启动概率

目前微机保护中的保护元件大致可以分为 2类:①欠量动作的元件,如距离元件、低电压元件 等;②过量动作的元件,如电流启动元件等。这些元 件不论采用比幅式判据还是比相式判据,总能根据 定值找到一个动作的边界,如阻抗元件的圆轨迹等。 本文以此边界为参考,根据定值和实际测量的特征 量,计算保护元件的运行失效概率。

以方向阻抗元件为例,其圆心处的保护拒动概率最小,记为 *p*<sub>inact.min</sub>(数值上可取 0),圆轨迹上的启动概率为 *p*<sub>inact.mid</sub>(数值上可取 0.5)。假设拒动概率在圆的径向上呈线性变化,并将数值限制在[0,1]以内,则其瞬时不启动概率可按下式计算<sup>[5]</sup>:

$$p_{\text{ref}}(Z_{\text{set}}, Z_{\text{m}}, \varphi_{\text{m}}) = p_{\text{inact. min}} + \frac{p_{\text{inact. min}} - p_{\text{inact. min}}}{0.5 Z_{\text{set}}} \cdot \left[ \left(\frac{Z_{\text{set}}}{2}\right)^2 + Z_{\text{m}}^2 - Z_{\text{set}} Z_{\text{m}} \cos(\varphi_{\text{sen}} - \varphi_{\text{m}}) \right]^{\frac{1}{2}} \leqslant 1$$
(1)

式中:Z<sub>set</sub>为本保护整定阻抗;Z<sub>m</sub>为本保护测量阻抗;q<sub>m</sub>为测量阻抗角;q<sub>sen</sub>为方向阻抗元件的最大灵敏角。

对应于三段阻抗定值,各段瞬时不启动概率分

别记为  $p_{ref}^{I}$ ,  $p_{ref}^{II}$ ,  $p_{ref}^{II}$ ,  $p_{ref}^{III}$ 。

其他元件可依此类推,选取合适的特征量和最 小、最大及边界启动概率参照点,进行瞬时不启动概 率的计算。对于过量动作的元件,如阶段式电流保 护的拒动概率<sup>[6]</sup>,其处理思路与欠量动作元件相似。 首先选取合适的特征量,如保护范围,然后根据短路 点的位置确定概率的变化趋势,如短路点处在保护 动作边界处的概率取 0.5,则短路点处在保护范围 内拒动概率趋于 0,随着短路超出边界部分的增大, 保护不启动概率也相应增大。

## 1.2 保护元件的瞬时误动概率

误动概率 *p*<sub>mis</sub>是指区内无故障时保护动作的概率,或相邻设备/线路发生故障且其保护未拒动的情况下,本电力设备/线路保护动作的概率。它表征了在某一系统运行状态和保护定值情况下,保护元件误动的可能性,可用式(2)计算:

 $p_{\mathrm{mis}} = p_{\mathrm{reclose}}$  .

$$\left\{ p_{\text{w.nf}} + \frac{\sum_{j=1}^{m} (p_{\text{w}}(j) p_{\text{f.next}}(j))}{\sum_{j=1}^{m} \left[ p_{\text{f.next}}(j) \prod_{i \neq j} (1 - p_{\text{w}}(i)) \right]} \right\}$$
(2)

式中: $p_{reclose} \in (0,1]$ 为重合闸重合失败概率,体现了 重合闸对瞬时性故障、断路器偷跳等情况的纠正作 用,可采用电网中的统计数据计算,如未配置重合 闸,则 $p_{reclose} = 1; p_{w,nf}$ 为无故障情况下保护的误动概 率; $p_{f,next}(j)$ 为被保护设备/线路的相邻下一级第j个设备/线路的故障概率,服从泊松分布<sup>[13]</sup>; $p_w(j)$ 为本保护在有m个相邻设备/线路的系统中运行, 由于第j条相邻下一级设备/线路短路导致的误动 概率,对于三段式保护,亦有对应的3个误动概率:  $p_{w}^{I}(j), p_{w}^{II}(j),$ 。

下面重点考虑 *p*<sub>w</sub>(*j*)的求法,以输电线路距离保护为例。

1) I 段:距离保护 I 段在被保护线路的第 j 条 相邻下一级线路短路而该相邻线路的距离保护又未 拒动情况下动作属于误动,其概率可记为:

 $p_{w}^{I}(j) = (1 - p_{ref,j}^{I} p_{ref,j}^{I} p_{ref,j}^{I})(1 - p_{ref,i}^{I})$ (3) 式中:  $p_{ref,j}^{I}$ ,  $p_{ref,j}^{I}$ ,  $p_{ref,j}^{I}$ ,  $b_{ref,j}^{I}$ 

求法均同式(1),只需选取相应保护的定值。

距离 I 段定值一般为被保护线路阻抗的 80%~85%,误动概率较小,但不排除由测量误差、 过渡电阻、系统运行方式变化等因素引起误动的可能。

2) Ⅱ段:其动作时间大于被保护线路及其第 j

条相邻下一级线路 I 段的动作时间,只有在后 2 段 保护均拒动的情况下启动才能够动作于跳闸,且只 有当第 *j* 条相邻下一级线路的 Ⅱ 段、Ⅲ 段不同时拒 动,被保护线路的距离保护 Ⅱ 段动作才能视为误动, 其概率如下所示:

 $p_{\mathbf{w}}^{\mathbb{I}}(j) = (1 - p_{\mathrm{ref},i}^{\mathbb{I}}) p_{\mathrm{ref},i}^{\mathbb{I}} p_{\mathrm{ref},j}^{\mathbb{I}} (1 - p_{\mathrm{ref},j}^{\mathbb{I}} p_{\mathrm{ref},j}^{\mathbb{I}}) \quad (4)$ 

3)Ⅲ段:在过负荷或潮流转移等情况下,距离Ⅲ 段可能因为测量阻抗落入动作区而误动,这也是多 次大停电中造成事故范围扩大的重要原因。本文设 置距离保护Ⅲ段的误动概率如下:测量阻抗小于距 离保护Ⅲ段定值 Z<sup>III</sup><sub>set</sub>时,*p*<sub>w.nf</sub>为一较小的常数;Z<sub>m</sub>> 3Z<sup>III</sup><sub>set</sub>时,*p*<sub>w.nf</sub>=0;当 Z<sub>m</sub> 在[Z<sup>III</sup><sub>set</sub>,3Z<sup>III</sup><sub>set</sub>]中时,*p*<sub>w.nf</sub>线 性递减。

# 2 基于 FPN 的保护原理性运行失效概率 模型

由于保护逻辑关系复杂,若采用传统的基于串 并联等值的概率算法或其他算法,处理过程复杂,运 算量大且难以反映保护逻辑中的所有元件,如时间 元件的特性。故本节首先进行形式化的 FPN 定量 推理,以减小推理运算规模,加快推理速度。然后, 给出基于 FPN 的继电保护原理性失效概率模型。

2.1 FPN

FPN 作为一种高效的建模和分析工具,将模糊 集理论与 Petri 网有机结合,近年来得到了快速发展<sup>[14]</sup>。

2.1.1 继电保护知识的 FPN 表示方法

在继电保护逻辑中,存在大量逻辑推理规则,以 "或"逻辑为例,其推理规则可用式(5)表示:

if  $U_1(\alpha_1)$  or  $U_2(\alpha_2)$  or  $\cdots$  or  $U_n(\alpha_n) \stackrel{\tau}{-}$ 

 $D_1(\beta_1), D_2(\beta_2), \cdots, D_m(\beta_m)$  (5)

式中: $U_1$ , $U_2$ ,…, $U_n$ 为条件; $\alpha_1$ , $\alpha_2$ ,…, $\alpha_n$ 为条件的 权系数; $D_1$ , $D_2$ ,…, $D_m$ 为结论; $\beta_1$ , $\beta_2$ ,…, $\beta_m$ 为相应 结论的可信度; $\tau$ 为规则可实现的阈值。

基于推理规则的 FPN 的一般形式可定义为一 个六元组:  $(P, T, I, O, \tau(t), S_0(p))$ 。其中: P = $\{P_1, P_2, ..., P_n\}$ 为模糊库所集,表示模糊命题,包括 初始库所集、中间库所集及结论库所集,对应保护逻 辑中的输入、中间结果及输出;  $T = \{T_1, T_2, ..., T_n\}$ 为模糊变迁集,对应保护逻辑中的与门、或门、非门 等逻辑元件及时间元件;  $I 和 O 分别为定义在 P \times T$ 和  $T \times P$ 上带标示的模糊关系,分别表示库所节点 到变迁节点、变迁节点到库所节点的连接情况及每 个连接的权系数,满足  $0 < I(P_i, T_j) \leq 1, 0 < O(P_i, T_j) \leq 1, 7$  节点的触发阈值,取值范围为[0,1]中的实数;  $S_0(p)$ 为定义在库所集合 P上的函数,表示库所节 点的初始标记状态,即已知命题在推理开始时的可 信度,取值范围为[0,1]中的实数,对应于保护逻辑 中各元件的初始瞬时误动和不启动概率。

2.1.2 FPN 的矩阵表示形式

为了充分发挥 FPN 的优势,首先给出其矩阵表示形式,方便后续的快速定量计算。

1)输入矩阵  $\Delta = (\delta_{ij}), \delta_{ij} \in [0,1], 表示 P_i$  到  $T_j$ 上的输入关系及权重。若  $P_i$  是  $T_j$  的输入时,  $\delta_{ij}$  等 于  $P_i$  到  $T_j$  输入弧上的权系数  $\alpha_{ij}$ ; 反之,  $\delta_{ij} = 0$ 。其 中: $i=1,2, \dots, n; j=1,2, \dots, m$ 。

2)输出矩阵  $\Gamma = (\gamma_{ij}), \gamma_{ij} \in [0,1], 表示 T_j$  到  $P_i$ 上的输出关系和结论的可信度;若  $P_i$ 是  $T_j$ 的输 出时, $\gamma_{ij}$ 等于  $T_j$ 推出  $P_i$ 的可信度  $\beta_{ij}$ ;反之, $\gamma_{ij} = 0$ 。 其中: $i=1,2,\dots,n; j=1,2,\dots,m$ 。

3)  $S = [s_1, s_2, \dots, s_n]^T$ 为定义在模糊库所集合 P上的状态向量,表示各命题的可信度, $s_i \in [0, 1]$ ,  $i=1,2,\dots,n_o$ , $S_0 = [s_{10}, s_{20}, \dots, s_{n0}]^T$ 表示命题的初 始可信度。

4) 变迁的阈值  $\boldsymbol{\tau} = [\tau_1, \tau_2, \cdots, \tau_m]^T, \tau_j \in [0, 1],$  $j=1, 2, \cdots, m_o$ 

为方便 FPN 的推理计算,定义如下几个算子。 加法算子⊕: $C = A \oplus B \Leftrightarrow c_{ij} = \max(a_{ij}, b_{ij})$ ;比较算 子⊗: $D = A \otimes B \Leftrightarrow if a_{ij} \ge b_{ij}, d_{ij} = 1$  else  $d_{ij} = 0$ ; 直乘 算子⊙: $E = A \odot B \Leftrightarrow e_{ij} = a_{ij} \times b_{ij}$ 。其中,A,B,C,D, E 均为  $n \times m$  维矩阵。

2.2 基于 FPN 的继电保护原理性失效概率模型

模型分为2个层次:一是赋时 Petri 网描述的保 护逻辑动态层<sup>[12]</sup>,主要处理保护逻辑关系及上文中 没有考虑的保护时序关系;二是模糊信息层,在 FPN 中体现各保护逻辑元件及其组合的概率信息。

假设某个保护逻辑推理过程有 n 个命题, m 条规则,即在对应的 FPN 中有 n 个库所和 m 个变迁, FPN 的输入矩阵为  $\Delta_{n \times m}$ ,输出矩阵为  $\Gamma_{n \times m}$ 。保护 原理运行失效概率推理算法主要包括以下步骤:

步骤 1:按第 1 节所示方法计算保护逻辑中各 输入元件的失效概率,将其作为对应输入库所的初 始可信度。中间库所及输出库所的初始可信度置为 0。

如对于采用方向阻抗元件的距离保护,利用 式(1)~式(4)计算方向阻抗元件的瞬时不启动概率 和误动概率,作为逻辑模型中阻抗测量元件的输入, 其他如启动元件、选相元件可按类似原则计算。

步骤 2:进入模型的第1层次,在初始可信度不 小于 0.5 的输入库中各置1个托肯,进行一步动态 仿真,仿真流程及分析结果与常规保护一致。 $\beta_{ij}$ 是 模型第1层次的重要标示,本文利用其值表示逻辑 状态图中的随时间变化的联通关系。由于 $\beta_{ij}$ 是 $T_j$ 推出 $P_i$ 的可信度,结合保护逻辑,当该步仿真前 $P_i$ 中有托肯时,置 $\beta_{ij}=1$ 。为了避免Petri 网触发过程 中,库所中的托肯随着变迁的触发从有到无而使后 续计算出错,只要 $\beta_{ij}=1$ 即保持此值不再改变,除非 输入发生改变;其他情况置 $\beta_{ij}=0$ 。只要有变迁触 发,总有一个 $\beta_{ij}$ 元素会从0到1变化,若仿真中任 意一个 $\beta_{ij}$ 发生变化,进入步骤 3,否则结束。

步骤 3:进入模型的第2层次,完成以下步骤: 第1步:计算等效模糊输入可信度。

$$\boldsymbol{E} = \boldsymbol{\Delta}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{S}_{\mathrm{o}}$$

(6)

式中: $E = [e_1, e_2, \dots, e_m]^T$ ,该步骤将同一变迁中多 个模糊输入按其可信度和权系数等效为一个权系数 为1的模糊输入。

第2步:等效模糊输入可信度与变迁阈值的比较。

$$\boldsymbol{G} = \boldsymbol{E} \bigotimes \boldsymbol{\tau} \tag{7}$$

式中:G为m 维列向量,当等效模糊输入的可信度 不小于变迁的阈值时, $g_i = 1$ ,否则  $g_i = 0$ 。

第3步:消去可信度小于变迁阈值的输入项。

$$\mathbf{H} = \mathbf{E} \odot \mathbf{G} \tag{8}$$

式中:H 为与E,G 同维的列向量,经该步计算,H 中 只含可使变迁触发的输入的可信度。

第4步:计算模糊输出库所的可信度。

 $\boldsymbol{S}^{1} = \boldsymbol{\Gamma} \boldsymbol{H} \tag{9}$ 

式中: $S^1$ 为m维列向量,表示经过首轮推理后,可直接得到结论的可信度。在 $S^1$ 中,不能直接推理得到的,不是结论命题的库所,可信度为0。

第5步:计算当前可得到的所有命题的可信度。  $S_1 = S_0 \oplus S^1$  (10)

第6步:用式(10)中的 $S_1$ 代替式(6)中的 $S_0$ ,反 复用式(6)~式(10)进行迭代。设 $S^k$ 为第k步推理 得到的结论,则在第k步推理进行后,所有命题的可 信度为 $S_k = S_{k-1} \oplus S^k$ 。

第7步:当 $S_k = S_{k-1}$ 时,本次推理结束,返回步骤2。

定量处理充分利用了 Petri 网的并行处理能力,过程简单直观,重点突出,易于实现模块化。

### 3 算例分析

以图1所示的简化三段式距离保护逻辑为例进 行说明,输入为保护启动元件、三段距离测量元件、 选相元件及辅助判据(如有流判据)等。输出为三段 式距离保护对应的跳闸命令。

— 18 —



图 1 简化距离保护逻辑 Fig. 1 Simplified distance protection logic

图 1 对应的 Petri 网如图 2 所示,其中, $s_1$  对应 保护的启动元件, $s_2 \sim s_4$  对应三段距离测量元件, $s_{10}$ 对应选相元件, $s_{11}$ 对应辅助判据, $s_{12}$ , $s_{13}$ 分别代表距 离保护各段的跳令输出。

	0.1	0.9	0	0	0	0
	0.1	0	0.9	0	0	0
	0.1	0	0	0.9	0	0
A	0	0	0	0	1.0	0
$\Delta =$	0	0	0	0	0	1.0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0

取 *S*<sub>0</sub>=[0.9,0.1,0.4,0.6,0,0,0,0,0,0,0.2,0.2,0, 0,0]<sup>T</sup>; [] 段延时定值取 0.5 s, []] 段取 2 s。*τ* 中各阈 值均取 0.5。根据图 2 连接关系, 有

 $\Gamma =$ 

0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0 <sup>T</sup>
0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
													(12)

以此次保护元件失效概率计算时刻为时间零 点,根据基于 FPN 的保护原理性失效概率模型进行 计算,迭代结果为:①0~0.5 s时,S = [0.9, 0.1,0.4,0.6,0,0.63,0,0,0,0.2,0.2,0,0,0]<sup>T</sup>。根据动 态逻辑层描述的关系,由于时间元件的作用,II段、 III段不会误动, $S 中 s_{13}, s_{14}$ 皆为0,与此符合;I 段也 由于其他元件的牵制作用,其误动概率输出为0。 ②0.5 s~2 s时,S = [0.9, 0.1, 0.4, 0.6, 0, 0.63, 0,



图 2 简化距离保护逻辑对应的 Petri 网 Fig. 2 Petri net of simplified distance protection logic

作为核心元件的测量元件拒动一般会引起相应 保护段的拒动。但由于保护逻辑中其他元件的牵制 作用,测量元件误动未必会引起相应保护段的误动。 本文以误动概率为例,首先根据保护元件失效概率 模型分别计算 s1~s4, s10, s11,限于篇幅,取

	0 <sup>T</sup>	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
(11)	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0.1	0.1	0	0	0.8
	0	0	0	0.1	0.1	0	0.8	0
	0_	0	0	0.1	0.1	0.8	0	0

0,0,0.2,0.2,0,0,0]<sup>T</sup>。Ⅲ段不会误动,误动概率 s<sub>14</sub>为0,与此符合。③2 s以后,S=[0.9,0.1,0.4, 0.6,0,0.63,0,0,0.63,0.2,0.2,0,0,0.544]<sup>T</sup>。 Ⅰ段、Ⅱ段此时误动概率为0。但 s<sub>14</sub>的概率为 0.544,说明Ⅲ段有可能误动,由于考虑了其他元件 的牵制作用,因此其误动概率较之只考虑测量元件 时(0.6)要低。虽然此处差别不很明显,但在后续计 算保护运行风险指标时可能引起较大误差。

由计算结果可见,一方面,模型考虑了时间定 值,真实反映了各时间段保护的失效时序和失效概 率。另一方面,虽然有些情况下测量元件具有较高 的误动率,但由于选相元件、辅助判据的牵制作用, 保护误出口的概率实际上会有一定程度的降低。

上例相当于输入同样的输入概率且持续时间超 过了Ⅲ段时间定值,故距离Ⅲ段导致的保护误动概 率在2 s以后不为0 且保持相同。事实上,本模型 各输入元件失效概率均能根据系统状态,随特征量 如测量阻抗的变化而变化,加之仿真计算流程保证 了对于不同时刻的不同输入,输出也不相同;相同输 入,若采用的保护逻辑不同,输出也不同。

### 4 结语

本文建立了双层继电保护原理运行失效概率模型,能在真实反映保护逻辑关系及保护时序关系、保 护逻辑动态过程的基础上,根据系统运行方式、保护 定值和保护逻辑,定量计算继电保护的原理性运行 失效概率,计算结果能更真实地描述保护系统的运 行状态及继电保护动作特性与特定故障的匹配程 度。克服了常规可靠性评估方法只反映某些固定模 式下的长期可靠性水平,而忽略实时运行条件及保 护时间定值对可靠性影响的不足。

形式化的 FPN 定量推理算法减小了推理运算 规模,加快了推理速度,推理过程直观。

# 参考文献

[1] 王钢,丁茂生,李晓华,等.数字继电保护装置可靠性研究.中国 电机工程学报,2004,24(7):47-52.

WANG Gang, DING Maosheng, LI Xiaohua, et al. Reliability analysis of digital protection. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 47-52.

- [2] ANDERSON P. An improved reliability model for redundant protective system—Markov models. IEEE Trans on Power Systems, 1997, 12(2): 573-578.
- [3] 孙福寿,汪雄海.一种分析继电保护系统可靠性的算法.电力系统自动化,2006,30(16):32-35.
   SUN Fushou, WANG Xionghai. A new method for reliability

analysis of protection in power systems. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(16): 32-35.

- [4] 王超,高鹏,徐政,等. GO 法在继电保护可靠性评估中的初步应用. 电力系统自动化,2007,31(24):52-56.
  WANG Chao, GAO Peng, XU Zheng, et al. Application of GO methodology in reliability assessment of protective relays. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(24): 52-56.
- [5] 沈智健,周家启,卢继平,等.距离保护运行风险评估模型.电力系统自动化,2008,32(12):7-11. SHEN Zhijian, ZHOU Jiaqi, LU Jiping, et al. Operational risk evaluation model of distance protection. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 7-11.
- [6] 沈智健,卢继平,赵渊,等. 阶段式电流保护运行风险评估模型. 中国电机工程学报,2008,28(13):70-77.
   SHEN Zhijian, LU Jiping, ZHAO Yuan, et al. Operational risk evaluation model of stepped current protection. Proceedings of

the CSEE, 2008, 28(13): 70-77.

[7] 王树春. 双重化继电保护系统可靠性分析的数学模型. 继电器, 2005,33(18):6-10. WANC Shushup Markey model for reliability analysis of dual

WANG Shuchun. Markov model for reliability analysis of dualredundant relays. Relay, 2005, 33(18): 6-10.

- [8] 熊小伏,欧阳前方,周家启,等.继电保护系统正确切除故障的概率模型.电力系统自动化,2007,31(7):12-15.
   XIONG Xiaofu, OUYANG Qianfang, ZHOU Jiaqi, et al. Probabilistic model for the relay protection system's correct failure removal. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 12-15.
- [9] 段献忠,杨增力,程道.继电保护在线整定和离线整定的定值性 能比较.电力系统自动化,2005,29(19):58-61. DUAN Xianzhong, YANG Zengli, CHENG Xiao. Performance analysis of relay settings determined according to off-line calculation and on-line calculation. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(19): 58-61.
- [10] 吴文传,吕颖,张伯明.继电保护隐患的运行风险在线评估.中 国电机工程学报,2009,29(7):78-83.
  WU Wenchuan, LÜ Ying, ZHANG Boming. On-line operating risk assessment of hidden failures in protection system. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 78-83.
- [11] THORP J S, BAE K. An importance sampling application: 179-bus WSCC system under voltage based hidden failures and relay misoperation// Proceedings of the 31st Annual Hawaii International Conference on System Science: Vol 3, January 6-9, 1998, Big Island, HI, USA: 39-46.
- [12] 戴志辉,王增平. 微机保护动作逻辑建模与动态分析. 电力系统 自动化,2009,33(11):81-84.
   DAI Zhihui, WANG Zengping. Modeling and dynamic analysis of microcomputer-based protection operation logic. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(11): 81-84.
- [13] 李文沅. 电力系统风险评估:模型、方法和应用. 北京:科学出版 社,2006.
- [14] 袁崇义. Petri 网原理. 北京:电子工业出版社, 1998.

戴志辉(1980—),男,通信作者,博士研究生,讲师,主要 研究方向:电力系统保护与控制。E-mail: daihuadian@163. com

王增平(1964—),男,教授,博士生导师,主要研究方向: 电力系统保护与控制。

焦彦军(1963—),男,教授,主要研究方向:电力系统保 护与控制。

### An Operation Failure Probability Model for Power System Protection

DAI Zhihui<sup>1</sup>, WANG Zengping<sup>1</sup>, JIAO Yanjun<sup>1</sup>, CAO Shujiang<sup>2</sup>

(1. North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Electric Power of Hebei, Shijiazhuang 050021, China)

**Abstract:** A two-level operation failure probability model for power system protection is proposed. This model is based on programmable time Petri net (PTPN) for dynamic simulation of protection logic, and fuzzy Petri net (FPN) for probability calculation. It can be used to simulate protection logic as well as to calculate instantaneous failure probability for protection design purpose according to the system operation mode, protection settings and protection logic. It provides a useful reference for the analysis of the probabilistic characteristics of protection actions and the degree of matching of associated system faults.

Key words: protective relaying; reliability; operation failure; probabilistic model