

智能电网中继电保护装置隐性故障风险评估

智能电网中的继电保护装置是整个电力系统的第一道防线，其自身安全性是电网整体能否正常运行的核心点。对此，在详细分析继电保护装置自身安全性需求的基础上，提出了一种新型继电保护装置隐性故障风险的评估方式。通过对继电保护装置自身安全性和电网实际需求要素的分析，建立继电保护装置隐性故障评估指标。依靠评估指标将系统故障详细划分为硬件子系统和软件子系统，并分别建立故障风险评估模型。最后通过Crluo模型仿真分析法进行模型分析，对可靠性指标进行收敛统计，实现风险评估。仿真实验表明，新设计的故障风险评估方法使用的分析模型比传统模型适应度高20%左右；新型评估方式整体评估准确度更高，对电流捕捉效果更好。

张 勇/江苏宏源电气有限责任公司

0 引言

智能电网主要是指在现代集成多项高速网络中，通过现代网络传感技术模型和相关电气测量技术，搭配专有的电气硬件设备和智能化决策支持系统，建立的电气传输网络。相比较传统电网，智能电网在可靠性、安全性、经济性和高效性等方面具有更明显优势。继电保护装置，作为现代智能电网的首要防护装置，其整体可靠性对整个电网的正常运行具有重要意义。隐性故障是继电保护装置中存在的一种永久性内部缺陷，很容易造成电力系统扰动和电气事故。与常规事故相比，隐性故障最大的特点在于不会立刻触发保护装置的保护动作，而是在某一时刻同其他故障事件一起爆发，其危害性更强。通常情况下，继电保护装置隐性故障的主要表现形式有：电网操作失败、故障排除失效以及电网或保护装置以外跳闸等。造成以上

故障的原因主要在于电网继电保护装置软件定值错误以及保护装置固定硬件的缺陷，所以有必要建立与之相适应的电网继电保护装置隐性故障风险评估的方法，实现保护装置隐性故障的辨识和排查^[1]。

1 继电保护装置隐性故障评估指标的建立

制定系统的继电保护装置故障可靠性指标是建立继电保护装置隐性故障模型和故障分析的前提。

可靠度 $R(t)$ ：主要指继电保护装置或保护系统在正常运行的条件下，在时间区域 $[0, t)$ 内不会出现隐性故障的概率。与之相对的还有隐性故障不可靠度 $F(t) = 1 - R(t)$ 。不可靠度主要是指继电保护装置在时间区域 $[0, t)$ 内第一次出现失效的概率。

可用度 A ：可用度主要是指在继电保护装置正常的工作时间和条件下，在某一段时间 t 内正常工作的概率，与之相对的是不可用度： $A' = 1 - A$ 。

失效密度 $f(t)$ ：主要是指继电保护装置或保护系统在时间区域 $(t, t + \Delta t]$ 内，发生首次失效的概率，计算公式为

$$f(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad (1)$$

式中， $F(t)$ 为求取的可靠度，通过上下求导，求出的趋近值即为失效密度值。

失效率 $\lambda(t)$ ：继电保护装置或保护系统从起始时刻到测评时刻完好的条件下，在时刻 t 以后的时间内发生失效的概率， $\lambda(t)dt$ 即为在 $(t, t + \Delta t]$ 期间发生的概



张 勇/工程师

关键词/Keywords

继电保护装置 ·
仿真分析 ·
评估指标 ·

率, 根据定义可以建立求取公式为

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{p(t \leq t + \Delta t)}{\Delta t} \quad (2)$$

修复分布函数 $G(t)$: 主要是指继电保护装置的组件或系统在开始时刻即失效的情况下, 在时间区域 $[0, t)$ 内的修复概率。 $G(t)$ 为一单调递增函数, 函数计算公式为

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} G(t) = 1 \quad (3)$$

修复密度 $g(t)$: 修复密度 $g(t)$ 为修复分布函数的一阶微分, 其计算公式为

$$g(t) = \frac{dG(t)}{dt} \quad (4)$$

故障平均修复时间MTTR: MTTR表示为对电网继电保护装置隐性故障修复的期望时间, 其表达式为

$$MTTR = \int_0^{\infty} t \cdot g(t) dt \quad (5)$$

2 继电保护装置故障风险评估分析模型

通常情况下, 智能电网继电保护装置隐性故障分析模型的建立大多采用静态故障树分析方法 (Fault Tree Analysis, FTA)^[2]。但是作为一种以静态分析机理和静态故障机理为核心的故障分析方法难以描述部分系统失效时的整体行为动态。例如: 系统故障修复、时间序相关修复和硬件冷热机备用等。所以新型继电保护装置隐性故障风险评估基于传统静态故障树分析方式, 通过引入功能相依门指标、序列指标、继电保护装置隐性故障可靠性指标以及备用指标等动态特性逻辑, 进行继电保护装置故障风险分析模型的建立^[3]。继电保护装置隐性故障可靠性的具体指标, 可以将电网继电保护装置的隐性故障按照可靠性功能分析划分为: 继电器硬件子系统和故障风险评估软件子系统。因为故障风险评估软件子系统主要是受到继电器硬件系统环境和软件的编制组合影响, 为了提高继电保护装置隐性故障风险评估模型的全面性, 可以将其全部归入于硬件系统中, 其建模计算流程如图1所示。

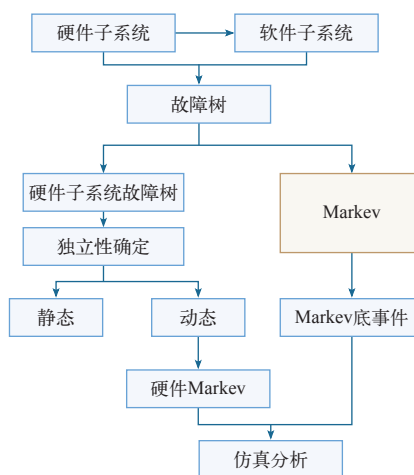


图1 建模流程图

2.1 保护装置硬件子系统风险评估模型的建立

根据静态故障树分析方法, 结合电网硬件构成结构特性, 可以建立继电保护装置硬件子系统故障风险评估的动态故障树误动子系统风险评估模型, 如图2所示。

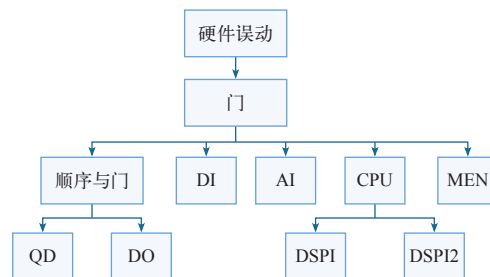


图2 硬件子系统故障树模型图

因为目前智能电网继电保护装置所使用的主要硬件设备和对应的超高压电网线路保护装置均采用双保护性中央处理器 (CPU), 完成电网后备保护工作, 所以设计采用逻辑门表示双方的风险逻辑评估关系。另外, 电网保护性出口所使用的出口插件采用启动原件QD具有开放性直流正负极电源可靠性的测评。因为QD和DO两模块有可能存在误动效应, 且QD先于DO模块引起继电保护误动情况, 误动子系统故障树模型采用优先与门表示其误动逻辑^[4]。为了提高动态故障树模型分析逻辑, 可以将动态门逻辑转化为Markev动态分析链, 如图3所示。

通过图3可以看出, 模拟状态下, 当继电器的

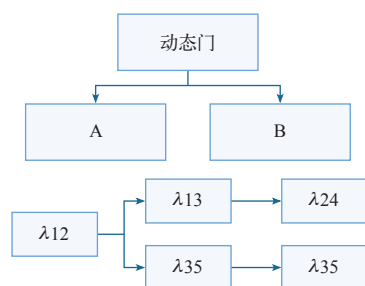


图3 逻辑动态分析链转化图

输入装置A和B均出现隐性故障并且A的失效率大于B时，输出结果为失效。如果A和B均不失效，或者B的失效率大于A时，输出结果不为失效。此外图3中的 λ_{12} , λ_{13} , λ_{24} , λ_{35} 等值为继电器保护装置各状态下故障问题转移概率。设 $\lambda_{12}=\lambda_{13}=\lambda_{24}=\lambda_{35}=3.575\ 2\times 10^{-5}/\text{h}$, $\mu_{12}=\mu_{13}=\mu_{24}=\mu_{35}=(1/8)/\text{h}$ 。按照上述值对应图3模型可以建立Markov动态分析链方程，计算继电保护装置在各状态下的稳态概率。根据系统故障树和图3建立状态转移分析矩阵

$$A = \begin{pmatrix} -(\lambda_{12} + \lambda_{13}) & \lambda_{12} & \lambda_{13} & 0 & 0 \\ \mu_{12} & -(\mu_{12} + \lambda_{24}) & 0 & \lambda_{24} & 0 \\ \mu_{13} & 0 & -(\mu_{13} + \lambda_{35}) & 0 & \lambda_{35} \\ 0 & \mu_{24} & 0 & -\mu_{24} & 0 \\ 0 & 0 & \mu_{35} & 0 & -\mu_{35} \end{pmatrix} \quad (6)$$

通过式(6)可以计算出继电保护装置各状态下稳态的概率 $P=[P_1\ P_2\ P_3\ P_4\ P_5]$

$$\begin{cases} pA=0 \\ \sum P=1 \end{cases} \quad (7)$$

根据上述公式，可以解出继电器各状态下稳态故障概率 $P_1=0.999\ 95$, $P_2=P_3=3.001\ 4\times 10^{-5}$, $P_4=P_5=9.05\times 10^{-9}$ 。得出计算结果后，可以将 P_4 和 P_5 值以及失效率等各类参数带入Markov动态分析链，作为底事件进行继电保护装置系统仿真分析。

2.2 保护装置软件子系统风险评估模型的建立

智能电网继电保护装置的软件子系统正常运行的风险性影响因素主要有以下几个方面：软件开发人员对智能电网继电器的工作需求理解不当，分析定义不明；没有将特殊电网情况或错误

处理等因素考虑到软件结构内，导致软件系统设计失误；软件开发编码有错误点；软件测试不正确；程序编译应用和编译环境引入错误导致的运行环境失常。因为现阶段保护装置软件子系统风险评估模型的可靠性主要是受继电保护装置硬件系统的影响，所以可以将其整体纳入硬件系统风险评估中。

保护装置软件子系统风险评估模型的建立必须基于以下考虑：计算机系统保护软件的风险故障主要是由整体设计缺陷引起，在软件系统的综合测评和运行过程中，软件逻辑漏洞和错误需要不断被发现。进行逻辑错误更改后，如果没有产生新错误，可以认为软件的失效率和漏洞数量成正比例关系。系统软件不存在变异情况：同一个运行软件程序所有的系统主文件是复制相同的，整体可靠性与时间无关。并行路径相同的情况下，多余的风险软件不能提高可靠性。由于软件本身漏洞引起的误动性保护，在统计期内有可能产生零失效数据。基于以上原因，设计采用MUSA-XISOUK评估模型。其隐性故障率评估表达式为

$$\lambda_0(m) = \lambda_0 e^{-\theta m} \quad (8)$$

式中， λ_0 为继电保护装置初始失效率； θ 为评估漏洞减少率综合判定系数； m 为保护装置系统在实际电网运行中直接发现的漏洞数。

为了将设计的系统评估模型与硬件部分的失效和整体系统失效相对应，设计将软件失效模式继续细化为拒动和误动两种失效模式。软件的拒动失效率为 $\lambda_{sj}(m)$ ，误动失效率为 $\lambda_{sw}(m)$ ，与其对应的修复率可以由 μ_1 和 μ_2 对应。以上所有参数均可作为Markov动态分析的底事件进行数值分析，具体参数值可以由RFRADI系统统计结果^[5]。

3 Crluo模型仿真分析及故障风险评估

Crluo模型仿真分析法主要以DET函数风险表达式为核心，可以直接体现系统自身的静态逻辑关系，是一种适用于各类逻辑分析的单值函数^[6]。因为继电保护装置隐性故障的风险评估属于动态逻辑，想要进行仿真分析必须先将动态逻辑进行

静态化^[7]。具体方式是将动态逻辑时间切割成细小的时间区间，每一个小的时间区间可以近似地看成为静态逻辑，然后分别对这类小的时间段进行静态逻辑仿真分析，解决静态和动态的转换问题。

将继电保护装置底事件的各项参数如：底事件数和失效抽样事件概率建立输入联系，录入Crluo模型如图4所示。

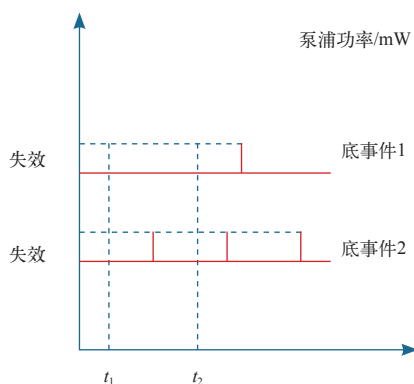


图4 系统分析转移图

根据图4按下列步骤进行Crluo仿真。首先预定仿真事件，记录继电保护装置正常运行的时间和预定时间内正常运行次数。将系统运行时间和次数作为底事件参数输入，并设置最长仿真区间^[8]。利用Crluo模型系统开始仿真，并判定各类底事件参数和区域时间判定保护装置在此区域时间内的整体运行状态，结束仿真分析，获取继电保护装置可靠性指标。最后可以进行多次仿真，获取多组可靠性指标进行概率收敛计算，实现高准确度保护装置隐性故障风险评估^[9-10]。

4 仿真实验

为了实际检测新设计的继电保护装置故障风险评估方式的实际效果，特设计仿真实验，进行实际验证。设计对比组和实验组，令对比组使用传统继电保护装置隐性故障的风险评估方式，令实验组使用新设计的继电保护装置隐性故障评估方式，进行效果对比。

4.1 实验原理

因为利用智能电网中的开闸电流线圈可以实

际探测出继电保护装置多类隐性故障。通过分析不同的开闸电流线圈对应曲线，可以将常见的继电保护装置故障详细划分为以下几种：操作电源电压不稳、继电保护装置合闸阶段有阻塞、操作机构有阻塞、铁心空行时间长和辅助开关接触不良等几类典型问题。实验选择上海高压电器有限公司生产的ZK78_259型继电保护装置进行仿真模拟。利用激光霍利韦尔智能电网金属电流元件收集检测线圈的电流信号，并提取区域时间特征和电流特征向量。通过分析模型对比继电保护装置正常和非正常状态下，电网电流的异常状态样本可以确定：当继电保护装置正常运行时，电网电流的时间和电流特征向量会在实验区域时间内有规律恒定，个别时段电流中位数进行左右随机波动；当继电保护装置发生异常时，特征向量的整体变动会出现异常反应，大大超出电流中位数或在某个方向发生异常运动，与正常状态下的特征向量有明显的变化。

4.2 分析模型对比

利用计算机仿真软件，使对照组和实验组进行同一继电保护装置隐性故障实验分析，共进行20组仿真实验，实验包含继电保护装置5种常见隐性故障。对比实验组和对比组故障诊断分析模型的综合适应度，其对比曲线图如图5所示。

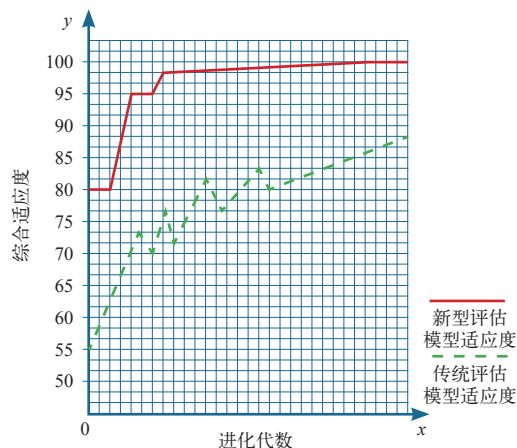


图5 评估分析模型适应度对比

根据图5可以看出，传统智能电网继电保护装置隐性故障风险的评估分析模型其综合适应度处

于55%~85%之间,且很容易出现不稳定状态,在特殊条件下容易影响风险评估准确度。新型继电保护装置隐性故障风险评估模型的综合适应度在80%~95%之间,相比较传统分析模型综合适应度平均提高20%左右,且整体稳定度更强。

4.3 实际故障评估对比

令实验组和对比组分别对实验用电网继电保护装置进行故障风险评估,其诊断输出结果如表1、表2所示。

表1 实验组评估结果

样本	分类距离			故障编码	诊断结果
1	0.958	0.875	0.696	-1	电源电压不稳
2	0.355	0.074	0.257	-1	合闸阶段有阻塞
3	0.258	0.638	0.368	1	正常
4	0.359	0.489	0.687	-1	操作机构有阻塞
5	0.659	0.215	0.635	-1	铁心空行时间长
6	0.589	0.687	0.578	1	开关接触不良

表2 对比组评估结果

样本	分类距离			故障编码	诊断结果
1	0.789	0.755	0.259	-1	电源电压不稳
2	0.639	0.687	0.267	-1	合闸阶段有阻塞
3	0.258	0.638	0.368	1	正常
4	0.359	0.489	0.687	-1	操作机构有阻塞

根据表1和表2可以看出,新型继电保护装置故障风险评估方式将预设的各类典型故障风险模式均作出正确风险评估,并能有效反映电网电流回路状态,电磁铁心运行状态。传统风险评估方案仅能有效评估出三种。

5 结束语

现阶段我国智能电网的研发和建设致使对继电保护装置的风险保护评估准确度要求越来越高。交流直流电源、新能源电源的接入导致我国电网结构越来越复杂。继电保护装置隐性故障风险评估方式的开发和研究顺应了我国电力系统发展的大方向。新设计的风险评估方式,通过建立

评价指标,进而构建了多层次结构的逻辑分析模型,可以正确评估继电保护装置隐性故障风险情况,为电力保护理论研究提供了方法参考。

参考文献

- [1] 李仲青,高翔,李永丽,等.考虑继电保护隐性故障的风险评估技术研究[J].中国电机工程学报,2016,38(增刊1):29-35.
- [2] 周静.隐性故障的继电保护系统可靠性与评估要点分析[J].黑龙江科学,2016,7(19):80-81.
- [3] 薛士敏,孙文鹏,高峰,等.基于精确隐性故障模型的输电系统连锁故障风险评估[J].电网技术,2016,40(4):1012-1017.
- [4] 屈自强.基于继电保护隐性故障的电力系统连锁故障分析[J].华东科技:学术版,2016,75(10):236-236.
- [5] 周世勇.继电保护和自动装置隐性故障所引发的电力系统连锁故障分析[J].中国战略新兴产业,2017,58(8):103-106.
- [6] 杨少智.智能电网中信息网与物理电网间连锁故障的防御策略研究[J].中国新技术新产品,2016,8(9):18-19.
- [7] 田园,胡炎.计及保护和断路器动作不确定性的隐性故障检测模型[J].电网技术,2016,40(9):2896-2903.
- [8] 李文菊.论电力系统中继电保护装置维护以及故障解决措施[J].工程技术:全文版,2016,17(6):00188-00188.
- [9] 周培强,周孟然,谢颖,等.基于三参数Weibull分布的继电保护风险评估可靠性研究[J].工矿自动化,2016,42(8):56-61.
- [10] 房新华.浅谈电力系统中继电保护隐性故障分析与改进措施[J].经济管理:全文版,2016,9(8):00112-00112.

(收稿日期:2018-01-18) EA