

# 基于改进状态空间分割法的继电保护设备拒动风险评估

丁茂生<sup>1</sup>, 钱胜<sup>2</sup>, 王超<sup>3</sup>, 王琦<sup>2</sup>, 汤奕<sup>2</sup>

(1. 国网宁夏电力有限公司, 宁夏 银川 750001; 2. 东南大学 电气工程学院, 江苏 南京 210096;  
3. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 宁夏 银川 750011)

**摘要:**继电保护设备隐性故障已经成为导致电力系统连锁故障的重要因素。因此,在电力系统的风险分析中,需要突破传统 $N-1$ 故障设置假设,考虑受继电保护设备隐性故障影响的 $N-k$ 连锁故障。针对继电保护设备拒动引发连锁故障的问题,首先根据继电保护设备的功能模块建立继电保护设备拒动故障树模型;然后综合考虑元件固有失效率和运行信息,建立继电保护设备拒动概率动态评估模型。基于此,提出一种改进的状态空间分割法对电力系统面临的连锁故障风险进行分析,实现了在枚举空间和抽样空间中进行连锁故障搜索,可提高连锁故障搜索的完备性和风险分析的计算效率。最后,在仿真中验证了所提方法的有效性。

**关键词:**继电保护设备拒动;电力系统;连锁故障;故障树模型;改进状态空间分割法;风险评估

**中图分类号:**TM 774

**文献标志码:**A

**DOI:**10.16081/j.epae.202106024

## 0 引言

随着电力系统规模的扩大,电力系统运行中面临的不确定性风险增加,电力系统灾难性连锁故障的次数明显增多<sup>[1]</sup>。连锁故障指系统中某一元件故障导致一系列其他元件停运,这种连锁反应迅速蔓延,最终造成大规模停电事故<sup>[2]</sup>。研究表明,大部分大停电事故都与继电保护设备的不正确动作有关<sup>[3]</sup>。

继电保护设备不正确动作属于典型的小概率高危害事件,其主要危害是造成事故扩大,引发不可预计的 $N-k$ 故障。因此,有必要在电网运行风险评估中考虑继电保护设备动作的影响<sup>[4]</sup>。文献[5-6]基于历史统计信息建立继电保护故障概率模型,分析了继电保护隐藏故障对连锁故障动态过程的影响机制;文献[7-9]基于复杂网络理论分析了连锁故障发生、发展以及传播的机制,该方法忽略了电力系统物理特性,更适用于电网静态脆弱性分析。目前针对继电保护故障的建模主要集中于静态模型,缺少考虑设备运行环境与运行状态对继电保护设备拒动概率模型的影响。

电力系统风险评估方法分为解析法和模拟法2类。其中,解析法适用于筛选低重、大概率故障事件,模拟法适用于小概率故障随机抽样。针对连锁故障风险评估,文献[10-11]提出了高风险 $N-k$ 故障

搜索方法,该方法以小概率评估技术和事件树方法进行求解,本质上是基于解析法的故障集生成技术;文献[12]对隐性故障进行详细分类,建立考虑环境和系统潮流影响的继电保护系统马尔可夫模型,提出了基于蒙特卡洛法的电力系统可靠性分析方法。然而对于继电保护设备拒动这类小概率事件,传统的蒙特卡洛法计算效率较低。状态空间分割法则结合了解析法和蒙特卡洛法的优点,提高了计算效率,已有研究将其应用于电力系统风险分析<sup>[13-15]</sup>。但现有状态空间分割法将解析法与蒙特卡洛法割裂开来,使得连锁故障搜索过程仅体现在抽样空间中,影响连锁故障搜索效率和搜索结果的完备性,因此,考虑继电保护设备拒动引发的连锁故障搜索时,需要对传统的状态空间分割法进行改进。

本文在继电保护设备故障概率建模方面综合考虑了设备运行环境与运行状态对继电保护设备拒动概率模型的影响,进一步提高了继电保护设备拒动概率评估结果与实际情况的匹配程度;提出了一种基于改进状态空间分割法的风评估方法,该方法在连锁故障搜索过程中兼顾枚举子空间和抽样子空间,分别对枚举法的采样过程和模拟法采样过程进行改进,可提高连锁故障搜索的计算效率和完备性,从而保证系统风险分析计算的快速性和准确性。

## 1 基于元件运行信息修正的继电保护设备拒动概率评估模型

### 1.1 继电保护系统构成及其故障原因分析

继电保护系统涵盖了在隔离故障过程中发挥作用的各个功能模块,如互感器、继电器等,继电保护各功能模块及关系见图1。实际运行情况表明,由设备硬件或软件失效而引起继电保护设备拒动或误动的情况很少。同时,继电保护的设计原理、配置方

收稿日期:2020-09-23;修回日期:2021-05-08

基金项目:国家电网公司科技项目(CPS视角下的电网控制系统可靠性与风险评估方法研究);国家自然科学基金青年科学基金资助项目(51707032)

Project supported by the Science and Technology Project of SGCC(Research on Reliability and Risk Assessment Methods of Power Grid Control System from the Perspective of CPS) and the Young Scientists Fund of the National Natural Science Foundation of China(51707032)

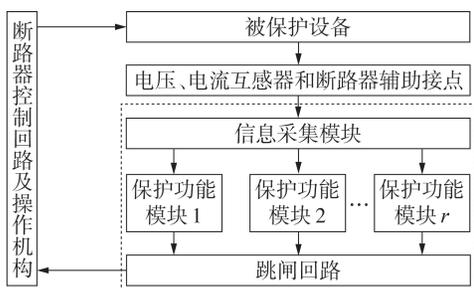


图1 继电保护各功能模块及关系

Fig.1 Functional modules of relay protection and their relationships

案、整定方式、电力系统运行方式以及设备的实际运行环境和工作状态对其可靠性的影响程度却很大,导致继电保护设备拒动或误动的实际发生概率有较大的变化。因此,在分析继电保护失效机理时,不仅要考虑继电保护设备本身的硬件、软件失效,还要考虑其实际运行情况对设备拒动、误动的影响。

### 1.2 基于元件历史运行统计信息的继电保护设备拒动概率

一方面,继电保护设备的正确工作离不开硬件功能模块的可靠运行。硬件功能模块的失效会引起整个继电器设备的失效,即继电保护设备可能会发生拒动。分析继电保护设备拒动时,一般主要考虑中央处理模块(CPU)、存储器模块(MEM)、模拟量采集模块(AI)、数字量采集模块(DI)、数字量输出模块(DO)、电源模块(PSU)这6个功能模块,且只要其中任意1个模块失效均会导致继电保护设备拒动。相应的继电保护设备拒动故障树模型见图2。图中,1—6分别表示CPU失效、MEM失效、AI失效、DI失效、DO失效及PSU失效。

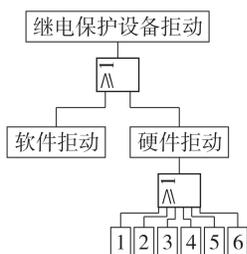


图2 继电保护设备拒动故障树模型

Fig.2 Fault tree model of rejection fault for relay protection equipment

基于元件历史运行统计信息,可计算得到继电保护设备的硬件等效失效率 $\lambda_J$ (即每年的失效次数,单位为次/a)为:

$$\lambda_J = (\lambda_{CPU} + \lambda_{MEM} + \lambda_{AI} + \lambda_{DI} + \lambda_{DO})/2 + \lambda_{PSU} \quad (1)$$

式中: $\lambda_{CPU}$ 、 $\lambda_{MEM}$ 、 $\lambda_{AI}$ 、 $\lambda_{DI}$ 、 $\lambda_{DO}$ 、 $\lambda_{PSU}$ 分别为CPU、MEM、AI、DI、DO、PSU基于历史运行统计信息的失效率。

另一方面,继电保护设备硬件的运行有赖于软件程序的支撑,本文将软件程序的可靠性称为非原

理性软件可靠性,分析时将其纳入继电保护设备硬件系统失效率的分析计算中,采用Musa Logarithmic模型表示保护非原理性软件的可靠性,则保护非原理性软件的失效率 $\lambda_s$ 可表示为:

$$\lambda_s = \lambda_0 e^{-\theta m} \quad (2)$$

式中: $\lambda_0$ 为初始失效率; $\theta$ 为漏洞减少率系数; $m$ 为系统运行中累积发现的漏洞。

非原理性软件失效包括拒动和误动2种失效模式,认为2种失效模式分别占软件失效的50%<sup>[16]</sup>,因此,软件的拒动失效率 $\lambda_{sj}$ 为:

$$\lambda_{sj} = \lambda_s/2 \quad (3)$$

和一般的工业产品类似,继电保护设备的失效率会随着时间的增长而变化,呈现“浴盆”形状,称为“浴盆曲线”<sup>[17]</sup>。一般而言,继电保护设备在出厂或现场运行前,已进行了充分测试,故本文假设继电保护设备已不再处于早期失效期,而是处于随机失效期,其随机失效率近似为一个常数,可采用指数分布函数进行拟合<sup>[18]</sup>。因此,综合继电保护设备中软、硬件的失效率,采用指数分布模型对继电保护设备的拒动概率 $P_{j0}$ 进行描述,如式(4)所示。

$$P_{j0} = 1 - e^{-(\lambda_J + \lambda_{sj})t} \quad (4)$$

式中: $t$ 为继电保护设备运行时间。

### 1.3 基于实际运行信息的继电保护设备拒动概率修正

继电保护设备的运行环境(如温度、湿度等)和运行状态会对设备的可靠性产生影响,下面分别进行分析。

1)运行环境对继电保护设备拒动概率的影响。当继电保护设备处于额定运行环境下时,设备可靠性较高,此时设备拒动主要由其硬件和软件的固有故障导致,无需修正。但若遭遇极端天气,继电保护设备所处运行环境的相关参数接近甚至超过额定值,例如高温、高湿环境将导致设备可靠性降低,增加设备拒动概率。以温度为例,当继电保护设备的运行环境温度在额定区间内时,其越接近额定区间的上、下限,设备可靠性将越低,而当运行环境温度超出额定区间时,偏离额定值越远,设备可靠性降低越快。因此定义继电保护设备的第 $i$ 种运行环境的修正系数 $K_{li}$ 满足超高斯分布,如式(5)所示,运行环境与修正系数的关系图见附录A图A1。

$$K_{li} = \exp \left\{ - \left[ \alpha_1 (c_i - m_i) / w_i \right]^{N_i} \right\} \quad (5)$$

式中: $c_i$ 为第 $i$ 种运行环境参数; $w_i$ 为第 $i$ 种额定运行环境参数区间的长度; $m_i$ 为第 $i$ 种额定运行环境参数区间的中间值; $N_i$ 为形状参数,一般取为8或10; $\alpha_1$ 依据设定的额定运行环境参数边界处修正值 $K_{lim}$ 计算得出。

2)运行状态对继电保护设备拒动概率的影响。

除了运行环境可能对继电保护设备拒动概率产生影响外,设备也可能发生原理性拒动。由于继电保护设备的电压、电流互感器存在量测误差及整定误差,其中量测误差一般服从正态分布,整定误差是由人为误操作或者计算错误造成的,其值一般为常数。因此可假设继电保护设备的实际触发值 $x_{tri}$ 与整定值 $x_{set}$ 间的误差 $\varepsilon$ 满足正态分布,其概率密度 $f_\varepsilon(\varepsilon)$ 为:

$$f_\varepsilon(\varepsilon) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left(-\frac{\varepsilon^2}{2\sigma^2}\right) \quad (6)$$

式中: $\sigma$ 为量测误差的标准差。

则实际触发值 $x_{tri}$ 的分布概率密度 $f_x(x_{tri})$ 为:

$$f_x(x_{tri}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma^2} \exp\left[-\frac{(x_{tri}-x_{set})^2}{2\sigma^2}\right] \quad (7)$$

实际量测值 $x$ 、整定值 $x_{set}$ 、实际触发值 $x_{tri}$ 与继电保护设备状态间的关系如表1所示。

表1 实际触发值与继电保护设备状态之间的关系  
Table 1 Relationship between actual trigger value and status of relay protection equipment

$x$ 的范围	继电保护设备状态
$x < x_{tri}$ 且 $x < x_{set}$	可靠不动作
$x_{tri} \leq x < x_{set}$	误动
$x_{set} \leq x < x_{tri}$	拒动
$x \geq x_{tri}$ 且 $x \geq x_{set}$	可靠动作

对于实际量测值 $x$ ,继电保护设备发生原理性拒动的概率 $P(x)$ 即为 $x_{set} < x < x_{tri}$ 的概率,即:

$$P(x) = P(x_{set} < x < x_{tri}) = \int_{x_{set}}^{x_{tri}} f_x(x) dx \quad (8)$$

将式(8)所给出的 $P(x)$ 定义为继电保护设备拒动概率修正系数 $K_2$ ,则 $x$ 与 $K_2$ 的关系如图3所示。

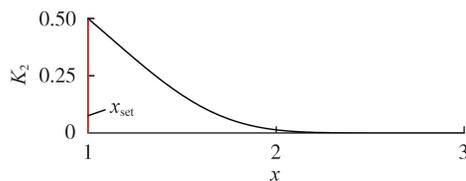


图3 实际量测值 $x$ 与 $K_2$ 的关系图

Fig.3 Relationship curve between actual measured value  $x$  and  $K_2$

综上所述,在考虑继电保护设备的固有失效率、运行环境与运行状态后,其拒动概率 $P_j$ 可以表示为:

$$P_j = 1 - (1 - K_2)(1 - P_{j0}) \prod_i K_{1i} \quad (9)$$

## 2 基于改进状态空间分割法的继电保护设备拒动风险评估

在电力系统风险分析中,由于继电保护设备发生拒动的概率通常很小,若直接在全状态空间上使用非贯序蒙特卡洛法,则会多次重复抽取发生概率较大的低重故障状态,算法收敛将极其缓慢;若直接

采用枚举法,由于系统状态组合数巨大,在有限时间内枚举连锁故障几乎难以实现;对于极端低概率事件,传统状态空间分割法可能会失去效果。因此本文采用改进状态空间分割法解决该问题,以实现涉及小概率事件的风险评估。

### 2.1 改进状态空间分割法

改进状态空间分割法将状态空间划分为枚举子空间和状态采样子空间。对2个子空间分别采用枚举法和模拟法进行状态筛选,采用枚举法筛选低重大概率状态,采用模拟法随机抽样小概率高风险状态。改进状态空间分割法示意图如图4所示。

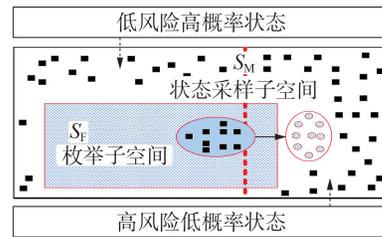


图4 改进状态空间分割法示意图

Fig.4 Schematic diagram of improved state space partitioning method

1)枚举法采样过程改进:采用快速排序算法,按状态概率降序依次选择系统状态,直至所有被选择状态的累积概率达到指定值。为便于说明,将通过枚举所选择的系统状态的集合记为 $S_F$ ,将枚举状态的累积概率定义为上限概率 $\alpha$ 。快速排序算法可在不搜索整个状态空间的情况下,依次、快速地选出概率较大的系统状态,直至上限概率 $\alpha$ 达到指定值,考虑到继电保护设备拒动引起的连锁故障的低概率特性,将传统的上限计算公式转换为:

$$\alpha = \sum_{s_i \in S_F} P(s_i) \beta(s_i) \quad (10)$$

$$\beta(s_i) = 1 - \prod_{j \in i} P(s_j^i)$$

式中: $s_i$ 为第 $i$ 个系统状态; $P(s_i)$ 为 $s_i$ 的发生概率; $\beta(s_i)$ 为校正系数,表示继电保护设备拒动的效果; $j \in i$ 表示快速排序法中第 $i$ 个系统状态的相邻状态; $P(s_j^i)$ 为与 $s_i$ 相关的第 $j$ 个继电保护设备拒动的概率。

2)模拟法采样过程改进:图4中黑色方块表示模拟法随机抽取的系统状态,实线箭头表示当采样状态属于状态枚举子空间时,基于采样状态进一步执行小概率事件采样。通过这种改进,对小概率事件增加了采样,而相同的采样状态将被传统状态空间分割法丢弃。

3)采用模拟法对剩余的状态空间进行采样,直至计算精度(例如方差系数)达到指定值。集合 $S_M$ 中所有系统状态的累积概率为 $1 - \alpha$ 。

系统风险指标的期望值 $E(F)$ 如式(11)所示。

$$E(F) = \alpha E[F(s) | s \in S_F] + (1 - \alpha) E[F(s) | s \in S_M] \quad (11)$$

$$E[F(s) | s \in S_F] = \frac{1}{\alpha} \sum_{s_i \in S_F} F(s_i) P(s_i) \quad (12)$$

$$E[F(s) | s \in S_M] = \frac{1}{n} \sum_{s_i \in S_M} F(s_i) \quad (13)$$

式中:  $F(s)$  为系统在状态  $s$  下的负荷损失总量;  $E[F(s) | s \in S_F]$  为采用快速排序法计算的系统风险指标期望值;  $E[F(s) | s \in S_M]$  为采用非贯序蒙特卡洛法计算得到的系统风险期望值;  $n$  为非贯序蒙特卡洛法抽样总次数。

## 2.2 最优负荷减载算法

本文采用的风险分析指标为预期失负荷量, 其由最优负荷减载算法确定, 该算法以电网故障后负荷减载量最小为优化目标, 如式(14)所示。

$$\min f_{\text{load\_shedding}} = \sum_{i \in N} M_i \quad (14)$$

式中:  $f_{\text{load\_shedding}}$  为优化减载量;  $N$  为电网节点集合;  $M_i$  为节点  $i$  的减载量。

线路潮流及约束分别如式(15)、(16)所示。

$$P_l = \frac{S_l}{X_l} \sum_{i \in N} A_{li} \delta_i \quad l \in L \quad (15)$$

$$L_{pl} \leq P_l \leq U_{pl} \quad l \in L \quad (16)$$

式中:  $P_l$  为线路  $l$  的潮流;  $S_l$  为线路  $l$  的运行状态;  $X_l$  为线路  $l$  的阻抗;  $A_{li}$  为线路  $l$  的有向邻接矩阵中的元素;  $\delta_i$  为节点  $i$  的相角;  $L$  为系统中线路的集合;  $U_{pl}$ 、 $L_{pl}$  分别为线路潮流的上、下界。

节点电流方程约束为:

$$\sum_{l \in L} A_{li} P_l = \sum_{k \in G_{\text{emi}}} G_k (P_k + \Delta P_k) - (P_{di} - M_i) \quad i \in N \quad (17)$$

式中:  $G_k$  为发电机  $k$  的运行状态;  $P_k$  为发电机  $k$  的初始发电量;  $\Delta P_k$  为发电机  $k$  的可调节量;  $\sum_{l \in L} A_{li} P_l$  为节点  $i$  由线路输入或输出的功率;  $P_{di}$  为节点  $i$  的初始负荷;  $G_{\text{emi}}$  为发电机集合。

发电机出力约束和负荷减载约束为:

$$L_k - P_k \leq \Delta P_k \leq U_k - P_k \quad k \in G_{\text{emi}} \quad (18)$$

$$0 \leq M_i \leq P_{di} \quad i \in N \quad (19)$$

式中:  $U_k$  和  $L_k$  分别为发电机  $k$  出力的上、下界。

## 2.3 考虑继电保护设备拒动的电力系统连锁故障风险评估模型

当电网线路发生故障时, 若继电保护设备正常工作, 则线路两端的断路器会及时切除故障线路, 维持电网安全稳定运行。若继电保护设备拒动, 即发生小概率事件, 则线路两端的断路器无法正常切除线路, 随后判断线路的后备保护是否动作, 若依然拒动, 继续判断后续是否发生小概率事件, 直至不发生后小概率事件后, 计算可靠性指标。基于 2.1 节的改进状态空间分割法与 2.2 节的最优负荷减载算法,

建立考虑继电保护设备拒动概率的电力系统连锁故障风险评估模型。考虑继电保护设备拒动的电网连锁故障风险评估流程见附录 A 图 A2, 具体步骤如下:

1) 初始化电网结构、元件故障概率, 设定概率上限;

2) 使用快速排序法在未选择的系统状态中选取概率最大的系统状态;

3) 采用直流潮流最优切负荷算法计算当前系统状态下的最小切负荷代价;

4) 根据切负荷结果更新快速排序法的风险指标、状态空间与累积概率;

5) 若累积概率未达到上限概率则返回步骤 2), 否则快速排序法完成, 进入步骤 6);

6) 根据系统元件故障率对系统状态进行抽样;

7) 判断抽样的系统状态是否属于快速排序法生成的状态空间, 若是则进入步骤 8), 否则进入步骤 10);

8) 根据当前状态搜索后续连锁故障, 并对继电保护设备拒动故障状态进行一次抽样;

9) 若继电保护设备拒动, 线路两端的断路器无法正常切除线路, 则返回步骤 8), 否则返回步骤 6);

10) 根据当前状态搜索后续继电保护设备拒动故障状态, 并对继电保护设备拒动故障状态进行一次抽样;

11) 若仍有继电保护拒动故障发生, 判断线路的后备保护是否动作, 若依然拒动, 则返回步骤 10), 否则进入步骤 12);

12) 根据系统状态执行最优负荷减载算法, 确定负荷切除节点与负荷切除量;

13) 更新风险指标的期望并计算收敛指标, 若算法收敛则输出系统风险指标, 否则返回步骤 6) 重新进行状态抽样。

## 3 算例分析

采用 IEEE RTS-79 可靠性测试系统(下文简称 RTS 系统)对本文所提方法进行验证。该系统共包含 33 台发电机组、38 条线路、5 台变压器、24 条母线, 总装机容量为 3405 MW, 峰荷为 2850 MW, 系统结构如附录 A 图 A3 所示。本文在进行风险分析时, 主要考虑由母线故障和线路故障引发的连锁故障。

### 3.1 考虑运行环境和运行状态的继电保护设备拒动概率评估结果

以 RTS 系统中给出的继电保护失效率 0.009 772 次/a 为参考; 以指数概率模型描述继电保护拒动的基础概率, 其约为 0.002 7%。基于此, 考虑各个继电保护设备拒动概率的差异, 对各继电保护设备的拒动概率添加小幅波动, 波动大小符合平均值为 0、方差为 0.003 的正态分布。

1) 运行环境因素影响下的运行环境修正系数。

假设设备额定运行环境参数区间为 $[-1, 1]$ , 令 $N_1=8$ , 根据运行环境修正系数满足超高斯分布这一假设, 继电保护设备运行在额定运行环境区间外时, 可靠性将逐渐降低。由式(9)可知, 运行环境修正系数应该取一个略小于1的数, 因此假定在额定运行环境边界处的修正系数定值为0.98, 则在运行环境的影响下, 修正系数可由式(20)计算。

$$K_{i1} = \exp\left[-(1.228c_i/2)^8\right] \quad (20)$$

则运行环境修正系数随继电保护设备运行环境参数的变化曲线如图5所示。当继电保护设备运行在额定工作区间内时, 运行环境对修正系数的影响很小。而当继电保护设备的运行区间超过了额定工作区间时, 运行环境修正系数随实际环境与额定状态的偏离值急剧变化, 从而使设备越过额定区间运行时, 故障概率发生明显变化。

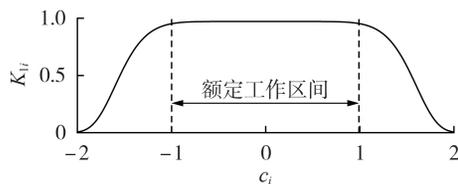


图5 运行环境修正系数随运行环境参数的变化曲线

Fig.5 Curve of operating environmental correction coefficient varying with operating environmental parameters

2) 运行状态因素影响下的拒动概率修正系数。与运行环境修正系数的分析方法类似, 假设设备额定运行状态的实际量测值在 $[0, 1]$ 范围内波动, 当其超过1时, 设备故障概率将会增加, 同样取形状参数为8, 在设备额定运行状态边界处的拒动概率修正系数定值为0.02, 则在运行状态因素的影响下, 拒动概率修正系数可由式(21)计算, 则拒动概率修正系数随实际量测值的变化曲线如图6所示。

$$K_2 = 1 - \exp\left\{-\left[2.456(x-0.5)/2\right]^8\right\} \quad (21)$$

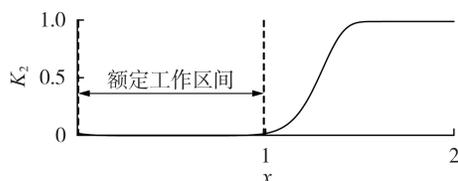


图6 拒动概率修正系数随实际量测值的变化曲线图

Fig.6 Curve of rejection probability correction coefficient varying with actual measured value

### 3.2 基于状态空间分割的连锁故障风险分析结果

本文在进行风险分析时, 选用预期失负荷指标EPNS(Expected Power Not Supplied)表征系统运行的风险。表2为不同风险分析方法的计算结果。表中,  $\lambda_{EPNS}$  为EPNS的标幺值; 解析法的上限概率为0.98; 蒙特卡洛法的终止条件取为EPNS指标的方差系数不大于0.05; 改进状态空间分割法的上限概率

取为0.8, 终止条件与蒙特卡洛法相同。

表2 不同风险分析方法之间的性能比较

Table 2 Performances comparison among different risk analysis methods

方法	$\lambda_{EPNS}$	计算次数	计算耗时 / s
解析法	0.3003	50 103	2007.04
非贯序蒙特卡洛法	0.7956	103 070	3963.04
改进状态空间分割法	0.7974	19 884	848.52

由表2可见, 解析法与其他2种方法的计算结果差距较大, 其原因在于随着枚举过程的发展, 连锁故障发生的概率越来越小, 以至于在有限的时间内进行风险分析, 难以覆盖整个状态空间, 容易忽略低概率高风险状态。

图7为累积概率随计算次数 $T$ 的变化曲线, 图中横坐标取为 $\lg T$ 。随着枚举状态的不断增加, 累积概率的变化越来越小, 导致枚举法需要极大的计算资源来保证计算结果合理性, 因此, 在此场景下解析法并不适用。另一方面, 如表2所示, 非贯序蒙特卡洛法与改进状态空间分割法具有相近的结果, 但是改进状态空间分割法的计算量仅约为蒙特卡洛法的1/5, 计算速度也比蒙特卡洛法更快。因此本文所提方法相对于解析法和蒙特卡洛法, 在计算结果与计算速度上均具有优势。

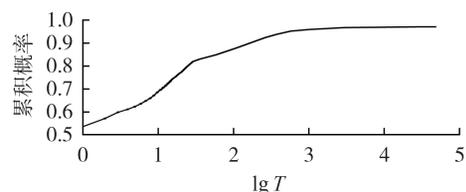


图7 累积概率随计算次数的变化曲线图

Fig.7 Curve of cumulative probability varying with calculation time

1) 上限概率定值影响分析。进一步地, 采用EPNS指标分析上限概率 $\alpha$ 对本文所提改进状态空间分割法的影响, 结果见表3。

表3 上限概率对改进状态空间分割法的影响

Table 3 Influence of upper probability on performance of improved SSP method

上限概率	快速排序法状态数	非贯序蒙特卡洛法抽样数	$\lambda_{EPNS}$
0.800	25	19 859	0.7974
0.900	168	10 348	0.7754
0.950	485	3 781	0.7809
0.970	3 671	2 979	0.7826
0.971	5 476	2 136	0.7972
0.972	11 385	2 019	0.7920

由表3可见, 不同上限概率对应的EPNS指标近似, 但快速排序法达到概率上限所需的状态数量迅速增加。这是因为上限概率决定了快速排序法与蒙

特卡洛法的混合程度,当上限概率上升时,快速排序法要达到上限概率所需的状态数量将随之迅速增加,而非贯序蒙特卡洛法抽样次数随之减小。结合这 2 种方法的状态数或抽样次数随上限概率变化的趋势,可看出存在一个极小值使得快速排序法的状态数和蒙特卡洛法的抽样数之和,即计算总次数最小。

2)考虑运行环境和运行状态的继电保护设备拒动风险分析。考虑运行环境对设备拒动概率的影响,对系统连锁故障风险进行分析,上限概率为 0.9760,抽样法的收敛判别指标为 0.05。

考虑运行环境影响的风险分析结果见图 8。图中,运行环境参数  $c_i$  为标么值,1.00 表示额定运行环境。由图可见,受继电保护设备运行环境的影响,系统连锁故障风险评估指标 EPNS 值发生变化,这是因为设备运行环境逐渐偏离设备的额定工作环境,使得运行环境对设备故障概率的影响逐渐增大,从而导致风险指标值的变化。同时也说明,本文所提方法能响应设备故障概率的变化,且有一定的敏感度,证明了其有效性。

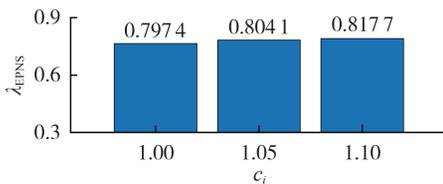


图 8 考虑运行环境影响的风险分析结果

Fig.8 Risk analysis result considering impact of operating environment

另一方面,考虑运行状态的影响,在 1.05、1.10 倍的额定工作环境下,对系统连锁故障风险进行分析,结果如图 9 所示。由图可见,虽然运行状态对继电保护设备故障概率的影响变化微小,但是对最终的连锁故障风险指标仍体现出一定的影响,表明本文所提方法对设备故障概率的波动有一定的灵敏度,体现了其有效性。

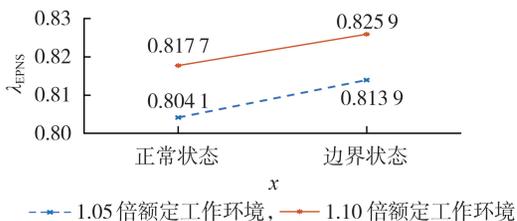


图 9 考虑运行状态影响的风险分析结果

Fig.9 Risk analysis result considering impact of operating conditions

## 4 结论

本文提出了一种考虑继电保护拒动影响的电力系统连锁故障风险快速分析方法。该方法考虑了元

件运行信息对继电保护设备拒动概率的影响,并通过改进状态空间分割法实现电力系统连锁故障风险的快速分析。另外,该方法考虑了状态空间搜索中小概率事件的影响,适用于考虑小概率事件的复杂系统风险分析场景,可为处理包含极端天气、网络攻击等因素的电力系统风险分析问题提供参考。对于继电保护误动情况的研究是笔者进一步的研究方向。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

## 参考文献:

- [1] 刘挺坚,刘友波,刁塑,等. 连锁故障中负荷损失数值特征的非参联分析[J]. 电力自动化设备,2018,38(7):148-154,161. LIU Tingjian,LIU Youbo,DIAO Su,et al. Nonparametric correlation analysis of numerical feature for load loss in cascading failure[J]. Electric Power Automation Equipment,2018,38(7):148-154,161.
- [2] 姜盛波,杨军,王建雄,等. 基于预防-紧急协调控制的大电网连锁故障防御策略[J]. 电力自动化设备,2019,39(12):148-154. JIANG Shengbo,YANG Jun,WANG Jianxiong,et al. Defense strategy against large power grid cascading failure based on coordinated preventive-emergency control[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(12):148-154.
- [3] 易俊,卜广全,郭强,等. 巴西“3·21”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 电力系统自动化,2019,43(2):1-6. YI Jun,BU Guangquan,GUO Qiang,et al. Analysis on blackout in Brazilian Power Grid on March 21,2018 and its enlightenment to power grid in China[J]. Automation of Electric Power Systems,2019,43(2):1-6.
- [4] 许婧,白晓民. 考虑保护隐藏故障的系统  $N-k$  故障分析[J]. 中国电机工程学报,2012,32(1):108-114,11. XU Jing,BAI Xiaomin. Power system  $N-k$  contingency analysis in consideration of protection hidden failure[J]. Proceedings of the CSEE,2012,32(1):108-114,11.
- [5] 林湘宁,夏文龙,熊玮,等. 不受潮流转移影响的距离后备保护动作特性自适应调节研究[J]. 中国电机工程学报,2011,31(增刊):83-87. LIN Xiangning,XIA Wenlong,XIONG Wei,et al. Study of adaptive adjustment of operation characteristics of distance backup protection immune to the impact of power flow transferring[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(Supplement):83-87.
- [6] 高斯泊,董博. 基于继电保护隐藏故障的系统连锁故障风险评估[J]. 电测与仪表,2017,54(22):77-82. GAO Sibao,DONG Bo. Risk assessment of power system cascading failures in consideration of protection hidden failure[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2017,54(22):77-82.
- [7] 邓春兰. 基于复杂网络理论的电网连锁故障脆弱性研究[D]. 成都:西南交通大学,2014. DENG Chunlan. Vulnerability research for cascading failures blackout in power system based on complex network theory [D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2014.
- [8] 丁明,过羿,张晶晶. 基于效用风险熵的复杂电网连锁故障脆弱性辨识[J]. 电力系统自动化,2013,37(17):52-57. DING Ming,GUO Yi,ZHANG Jingjing. Vulnerability identification for cascading failures of complex power grid based on effect risk entropy[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(17):52-57.

- [9] 曹一家,张宇栋,包哲静. 电力系统和通信网络交互影响下的连锁故障分析[J]. 电力自动化设备,2013,33(1):7-11.  
CAO Yijia,ZHANG Yudong,BAO Zhejing. Analysis of cascading failures under interactions between power grid and communication network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2013,33(1):7-11.
- [10] 吴旭. 基于 $N-k$ 故障的电力系统运行风险及脆弱性评估[D]. 北京:华北电力大学,2013.  
WU Xu. Operational risk and vulnerability assessment of power system based on  $N-k$  contingency[D]. Beijing:North China Electric Power University,2013.
- [11] PAL D, MALLIKARJUNA B, JAYA M, et al. Analysis and modeling of protection system hidden failures and its impact on power system cascading events[J]. Journal of Control, Automation and Electrical Systems,2019,30(2):277-291.
- [12] 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.  
XUE Shimin,SUN Wenpeng,GAO Feng,et al. Risk assessment of transmission system cascading failure based on accurate hidden failure model[J]. Power System Technology,2016,40(4):1012-1017.
- [13] WU Chunliang,WANG Wenhai,ZHANG Lie,et al. Analysis of typical modes of relay protection defects based on  $K$ -means algorithm[C]//2019 International Conference on Electronic Engineering and Informatics (EEI). Nanjing, China: IEEE, 2019: 499-505.
- [14] 李海南. 基于空间分割的电力系统风险评估方法研究及其软件实现[D]. 北京:华北电力大学,2015.  
LI Hainan. Research on power system risk assessment of power system based on state space division and software implementation[D]. Beijing:North China Electric Power University,2015.
- [15] 王晓滨,黄武浩,楼华辉,等. 系统状态空间分割法在电力系统可靠性评估中的应用[J]. 电网技术,2011,35(10):124-129.  
WANG Xiaobin,HUANG Wuhao,LOU Huahui,et al. Application of state-space partitioning method in power system reliability assessment[J]. Power System Technology,2011,35(10):124-129.
- [16] 戴志辉,王增平,焦彦军. 基于动态故障树与蒙特卡罗仿真的保护系统动态可靠性评估[J]. 中国电机工程学报,2011,31(19):105-113.  
DAI Zhihui,WANG Zengping,JIAO Yanjun. Dynamic reliability assessment of protection system based on dynamic fault tree and Monte Carlo simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2011,31(19):105-113.
- [17] 赵涛. 可靠性工程基础[M]. 天津:天津大学出版社,1999:8-9.
- [18] 王睿琛,薛安成,毕天姝,等. 继电保护装置时变失效率估算及其区域性差异分析[J]. 电力系统自动化,2012,36(5):11-15,23.  
WANG Ruichen,XUE Ancheng,BI Tianshu,et al. Time-varying failure rate estimation of relay protection devices and their regional differences analysis[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(5):11-15,23.

#### 作者简介:



丁茂生

丁茂生(1977—),男,宁夏吴忠人,正高级工程师,博士,研究方向为电力系统稳定分析与控制(E-mail:dingmaosheng1977@126.com);

钱胜(1996—),男,安徽蚌埠人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(E-mail:220192835@seu.edu.cn);

王超(1989—),男,宁夏银川人,高级工程师,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制(E-mail:chaowang311@live.com);

王琦(1989—),男,江苏南通人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统稳定分析与控制、电网信息物理系统等(E-mail:wangqi@seu.edu.cn)。

(编辑 任思思)

## Risk assessment of relay protection equipment rejection based on improved state space partitioning method

DING Maosheng<sup>1</sup>, QIAN Sheng<sup>2</sup>, WANG Chao<sup>3</sup>, WANG Qi<sup>2</sup>, TANG Yi<sup>2</sup>

(1. State Grid Ningxia Electric Power Co. Ltd., Yinchuan 750001, China;

2. School of Electrical Engineering, Southeast University, Nanjing 210096, China;

3. State Grid Ningxia Electric Power Research Institute, Yinchuan 750011, China)

**Abstract:** Hidden failures of relay protection equipment have become an important factor causing electric power system cascading failures. Therefore, in the risk analysis of electric power system, it is necessary to break through the traditional  $N-1$  failure setting assumption, and consider  $N-k$  cascading failures affected by hidden failures of relay protection equipment. Aiming at the problem that relay protection equipment rejection causes electric power system cascading failures, firstly a fault tree model of relay protection equipment rejection is built according to the function modules of the relay protection equipment. Then considering the inherent failure rate and operation information of the components, a dynamic probability assessment model for relay protection equipment rejection is built. Based on this, an improved state space partitioning method is proposed to analyze the cascading failure risk faced by electric power system, which realizes cascading failure search in enumeration space and sampling space, and can improve the completeness of cascading failure search and the computational efficiency of risk analysis. Finally, the effectiveness of the proposed method is verified by simulation.

**Key words:** relay protection equipment rejection; electric power systems; cascading failures; fault tree model; improved state space partitioning method; risk assessment

# 附录 A

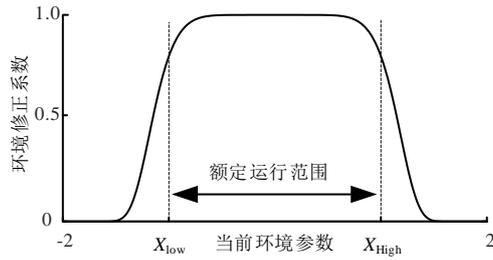


图 A1 运行环境与修正系数的关系图

Fig.A1 Schematic diagram of relationship between operating environment and correction factor

图中,  $X_{Low}$ 、 $X_{High}$  分别为额定环境下限、上限。

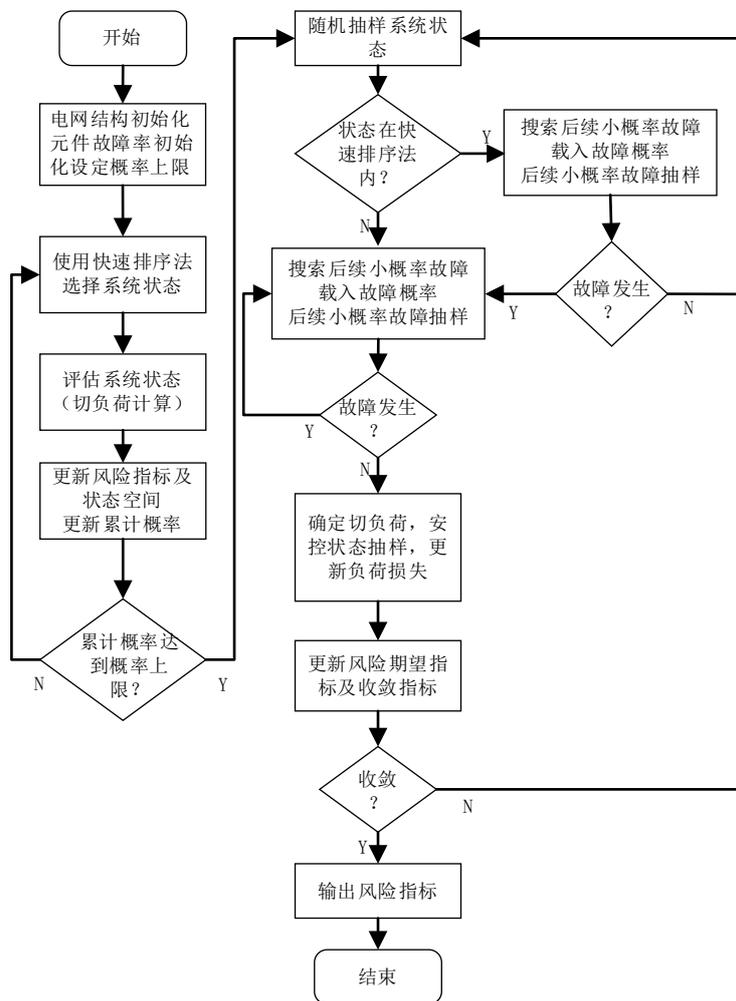


图 A2 考虑继电保护设备拒动的电网连锁故障风险评估流程

Fig.A2 Risk assessment process of cascading failure in power grid considering refuse-to-operate fault of relay protection equipment

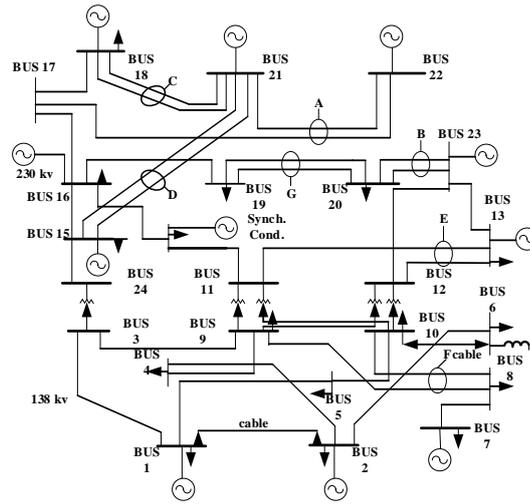


图 A3 RTS-79 测试系统结构图

Fig.A3 Structure diagram of RTS-79 test system