

DOI: 10.7667/PSPC180603

二次系统隐性故障的多指标综合风险评估

周虎兵¹, 张焕青¹, 杨增力¹, 李君¹, 王晶¹, 殷建军²

(1. 国网湖北省电力有限公司, 湖北 武汉 430077; 2. 北京四方继保自动化股份有限公司, 北京 100085)

摘要: 针对二次系统隐性故障可能引发的连锁故障, 提出了一种多指标综合风险评估方法。采用马尔科夫状态空间转移方法, 求解系统处于不同状态的时变概率及平稳概率。将平稳概率与距离保护相结合, 构造反映系统隐性故障的模型。从电网容量、电网用户、电网稳定性3个方面建立电源孤立、负荷切除以及电网解列的风险指标, 加权得到反映连锁性故障的综合风险指标。建立了基于蒙特卡洛抽样算法的风险评估体系, 并通过具体的算例对多指标风险评估的方法应用进行展示。

关键词: 隐性故障; 马尔科夫状态空间; 综合风险指标; 蒙特卡洛抽样算法

Multi-criteria integrated risk assessment of secondary system hidden failures

ZHOU Hubing¹, ZHANG Huanqing¹, YANG Zengli¹, LI Jun¹, WANG Jing¹, YIN Jianjun²

(1. State Grid Hubei Electric Power Company, Wuhan 430077, China;

2. Beijing Sifang Automation Co., Ltd., Beijing 100085, China)

Abstract: A multi-index comprehensive risk assessment method is proposed to deal with the possible chain failures caused by hidden failures in secondary systems. The Markov state space transfer method is used to solve the time-varying probability and stationary probability of the system in different states. In this paper, a combination of stationary probability and distance protection is used to construct a model to reflect the hidden failures of the system. From three aspects of power grid capacity, power grid users and power grid stability, the risk criteria of isolation, load excision and disassembly of power grid are set up, and the integrated risk criteria is weighted to reflect the cascading failures. A risk assessment system based on Monte Carlo sampling algorithm is established to solve the above criteria, and a specific example is given to demonstrate the multi-criteria risk assessment of the secondary system hidden failures.

This work is supported by State Grid Hubei Electric Power Company (No. 26150515003C) and National Natural Science Foundation of China (No. 51207113).

Key words: cascading failure; Markov; integrated risk assessment; Monte Carlo sampling algorithm

0 引言

在变电站中, 先进的通信组网方式以及集成化的智能设备使得变电站的运行管理更为规范和高效。然而新技术的应用经验欠缺, 初期体系尚未完善, 给二次系统的运维带来了新的挑战。其二次回路不可见的特性, 使得发生隐性故障后难以及时排查。这类只有在系统发生不正常运行状态才会表现出来的故障^[1], 可进一步地引发危害极大的连锁性故障, 严重威胁电网的安全稳定运行^[2-4]。

现有的研究系统隐性故障的方法主要有概率统计法和概率模型法^[5]。概率统计法根据运行数据或仿真模拟系统不同运行状态, 统计隐性故障的发生概率, 虽然在样本容量越大, 其模型的可信度也越高, 但是这种方法并未考虑连锁性故障后, 潮流转移等实时运行条件对于隐性故障概率的影响。而概率模型的方法则从保护原理的角度揭示隐性故障的概率, 主要有距离保护、过电流保护概率模型等^[6-8]。除了上述涉及保护原理方面的概率模型外, 还有计及自然因素及设备自身环境所致的故障概率模型^[9-12]。

当前用于隐性故障风险评估的仿真算法主要有蒙特卡洛抽样算法^[13]和重点抽样法^[14], 二者均通过多次抽样仿真得到连锁故障的发生概率, 不同的是

基金项目: 国网湖北省电力公司项目资助(26150515003C); 国家自然科学基金项目资助(51207113)

重点抽样法采用的是均值不变基础上的替换概率, 能够增大稀有事件出现的次数且减少计算工作量。近年来, 马尔科夫状态空间法被不断用来评估系统的可靠性^[15-23]。文献[20, 22]从保护整体功能出发, 根据其故障、检修和修复特性, 建立继电保护系统的状态转移空间, 量化保护系统稳态可用率。文献[23]考虑隐性故障的操作失败和意外跳闸两种表现形式, 充分计及各元件间的相互配合和影响, 建立了反映隐性故障对系统影响的马尔科夫模型。现有基于马尔科夫链的继电保护系统评估方法大多从电网规划与系统运行状态的安排角度, 解析得到保护装置状态的稳态概率。文献[24]统筹考虑了二次设备的故障和其对一次系统的影响, 以风险传递建立二次系统的风险评估。

本文针对二次系统隐性故障提出了一种多指标综合风险评估。利用马尔科夫状态转移空间理论, 计算系统的时变和平稳概率, 在此基础上得到反映系统隐性故障的距离保护概率模型。同时, 考虑到隐性故障发生后系统发生的连锁性故障, 提出了涵盖多指标的综合风险评估体系, 并通过蒙特卡洛抽样算法对相应风险指标进行计算。

1 继电保护状态转移的隐性故障模型

1.1 基于马尔科夫链的继电保护状态转移划分

继电保护系统在运行过程中随着运行时间的累积将可能由正常运行状态转移至不同的故障状态, 而继电保护系统具有可修复性, 经过检修可以使系统重新回到正常状态。马尔科夫链理论能够用来分析继电保护装置的可靠性, 根据其运行特点、动作为进行分析, 确定保护装置各状态的转移关系, 建立动作状态空间模型^[15]。继电保护装置状态具体

划分和对应的状态空间如表 1 和图 1 所示。

表 1 继电保护装置的状态划分

划分状态	线路及保护状态
状态 1	线路和保护装置均处于健康状态
状态 2	线路被停用, 保护装置被检修
状态 3	线路正常工作, 保护装置的拒动失效状态不可自检
状态 4	线路正常, 保护装置的拒动失效状态可自检, 并报警闭锁
状态 5	保护装置自检误动失效状态不可检, 发生误动且线路被隔离
状态 6	线路正常, 保护装置的误动失效可自检, 并报警闭锁
状态 7	线路发生故障, 保护装置拒动, 故障范围扩大
状态 8	线路发生故障, 保护装置正确动作切除故障
状态 9	线路故障隔离后, 保护装置的误动失效状态不可自检
状态 10	线路故障隔离后, 保护装置的拒动失效状态不可自检
状态 11	线路故障被修复, 保护装置的拒动失效状态不可自检
状态 12	线路被隔离后, 保护装置的拒动失效状态可自检
状态 13	线路被隔离后, 保护装置的误动失效状态可自检

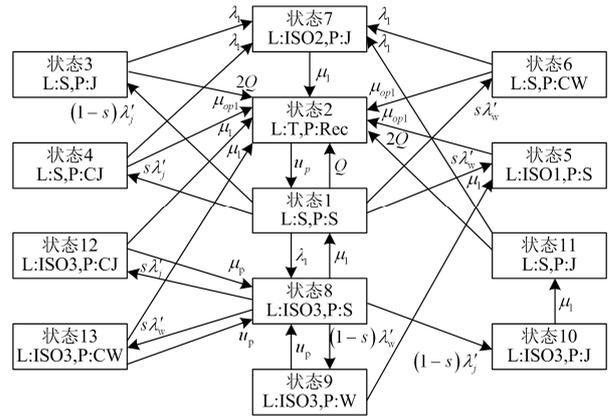


图 1 单一保护装置的状态转移空间

Fig. 1 State transfer space of a single protection device

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix}
 -z & Q & s'\lambda'_j & s\lambda'_j & s'\lambda'_w & s\lambda'_w & 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \mu_p & -\mu_p & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 2Q & -(2Q + \lambda_1) & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \mu_{op1} & 0 & -(\mu_{op1} + \lambda_1) & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \mu_{op1} & 0 & 0 & -(\mu_{op1}) & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \mu_{op1} & 0 & 0 & 0 & -(\mu_{op1} + \lambda_1) & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -(\lambda'_j + \mu_1) & s'\lambda'_w & s'\lambda'_j & 0 & s\lambda'_j & s\lambda'_w \\
 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_1 & 0 & 0 & \mu_p & -(\mu_1 + \mu_p) & 0 & 0 & 0 & 0 \\
 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -\mu_1 & \mu_1 & 0 & 0 \\
 0 & 2Q & 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda_1 & 0 & 0 & 0 & -(\lambda_1 + 2Q) & 0 & 0 \\
 0 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_p & 0 & 0 & 0 & -(\mu_1 + \mu_p) & 0 \\
 0 & \mu_1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu_p & 0 & 0 & 0 & 0 & -(\mu_1 + \mu_p)
 \end{bmatrix} \quad (1)$$

保护信息系统调度中心的主站可对各变电站保护信息子站中的数据进行统一采集, 建立单一保

护装置的状态转移矩阵 $\mathbf{A}_{13 \times 13}$ 。矩阵 \mathbf{A} 中 $z = Q + \lambda'_j + \lambda_1$; $\lambda'_j = \lambda'_j + \lambda'_w$; $s' = 1 - s$; $\mu = \mu_p + \mu_1$ 。

矩阵 A 中所有继电保护参数将随着历史样本数据的增加动态变化。利用 A 矩阵可推出任意时间间隔 t 的时变概率所满足的方程组, 从而可以求解时变概率, 对于任意 ij 及 $t \geq 0$, 有

$$p'_{ij}(t) = \sum_{k \neq i} q_{ik} p_{kj}(t) - q_{ii} p_{ij}(t) \quad (2)$$

其中, 可根据柯尔莫戈洛夫向前/后方程及初始条件求得 $p_{ij}(t)$ 为

$$\begin{cases} p_{ii}(0) = 1 \\ p_{ij}(0) = 0 \end{cases} \quad (3)$$

当最后所处状态 j 固定时, $p_{ij}(t)(i=0,1,\dots,N)$ 采用向后方程较方便; 当初始状态 i 固定时, $p_{ij}(t)$ 时($j=0,1,\dots,N$)采用向前方程较方便。求解的矩阵表达式为

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} P(t) = P(t)A \\ P(0) = I_n \end{cases} \quad (4)$$

同样地, 已知系统各转移状态概率可进一步求得平稳概率。

$$\begin{cases} pA = 0 \\ \sum_i p_i = 1 \end{cases} \quad (5)$$

1.2 隐性故障模型

继电保护在隐性故障下的误动是一种概率事件, 导致系统初始故障继续发展, 严重情况下引发连锁故障造成大停电等事故。本文采用常用的概率模型来描述电力系统线路保护装置的隐性故障, 其特性如图 2 所示^[8]。

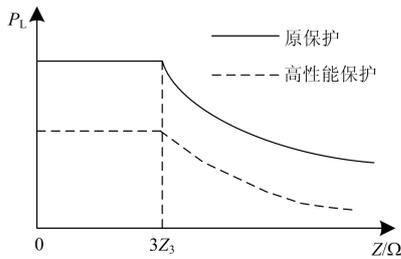


图 2 线路保护的隐性故障特性

Fig. 2 Hidden failure characteristic of line protection

继电保护隐性故障模型有距离保护模型和过流保护模型。考虑到过流保护通常受系统运行方式的影响较大, 其原理本身的缺陷容易对保护准确动作造成干扰。而距离保护第 3 段的动作阻抗按躲过最小负载阻抗整定, 相对于第 1 段和第 2 段而言, 距离保护第 3 段对电网出现故障以及扰动后显得更加敏感, 因此用距离保护第 3 段来反映保护的隐性故

障, 其概率模型为

$$P = \begin{cases} P_L & Z < 3Z_3 \\ P_L \cdot e^{-\frac{Z}{3Z_3}} & Z \geq 3Z_3 \end{cases} \quad (6)$$

在线路保护中, 保护装置误动的概率 P_L 与测量阻抗 Z 有关, 当测量阻抗 $Z \leq 3Z_3$ 时, 保护装置误动概率为常数。当 $Z > 3Z_3$ 时, 保护装置误动概率按指数规律迅速减小。

在 1.1 节的保护状态转移基础上, 利用马尔科夫理论求解距离保护误动的平稳概率。在该概率模型中可以看到, 其不正确动作的概率并非常数, 而是取决于电力系统的故障条件和运行工况, 电网每条支路对应的保护装置都有相应的误动概率。当保护装置跳闸清除线路故障后, 系统原有潮流流向将会发生改变, 即潮流转移。在潮流转移的情况下, 与故障点临近的其他正常运行线路则有可能分担断开线路原本的能量, 导致相应的保护临近跳闸状态。

2 多指标综合风险评估体系

考虑到继电保护发生隐性故障时, 其不正确动作将导致系统发生连锁性电力安全事故, 造成了经济和社会损失。本节从电网容量、电网用户、电网稳定性来建立反映涵盖上述三方面评估风险的综合风险指标。

(1) 电源孤立风险指标

在电力系统发生连锁故障时, 由于线路的连锁跳闸以及发电机保护的動作可能造成发电机脱离系统, 将此现象定义为电源孤立。电源孤立的概率为

$$P_{BI} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N B(i) \quad (7)$$

式中: N 表示某次模拟中的故障仿真次数; i 是此次模拟中的故障仿真次数编号, 若出现电源孤立, 则 $B(i)$ 为 1, 反之为 0。

由于电源孤立将会造成整个系统容量的减小, 进行标么化后, 电源孤立的严重度指标为

$$I_{BI} = \frac{1}{P_S \times N} \sum_{i=1}^N P_G(i) \quad (8)$$

式中: $P_G(i)$ 为第 i 次故障仿真时导致的电源容量损失; P_S 为系统容量; I_{BI} 为电源孤立的后果, 为方便不同系统之间的对比, 将其标么化。

综合考虑电源孤立的概率和对应的严重度, 则电源孤立的风险指标可定义为

$$R_{BI} = P_{BI} \cdot I_{BI} \quad (9)$$

(2) 负荷切除风险指标

在发生连锁故障时, 由于线路的连锁跳闸以及

发电机保护的動作可能造成负荷切除, 其概率为

$$P_{L_i} = \sum_i \frac{L_i}{N} \quad (10)$$

式中: N 表示某次模拟中的故障仿真次数; i 是此次模拟中的故障仿真次数编号; L_i 表示第 i 次仿真中, 如果需要切负荷则为 1, 反之为 0。

在系统发生连锁性故障切除负荷时, 不同次算法仿真所求出的负荷损失不同, 因此采用期望功率损失并对其进行归一化处理后来评估。

$$EIP = \sum_i P_{L_i}(i) \quad (11)$$

$$I_{L_i} = \frac{ELP}{SL} \quad (12)$$

式中: N 表示总的仿真数目; i 是每一次连锁故障仿真的编号; $P_{L_i}(i)$ 表示第 i 次仿真中的负荷消滅数量; ELP 为期望功率损失; SL 为系统的总负荷; I_{L_i} 为归一化期望功率损失。

考虑负荷切除的概率和对应的归一化期望功率损失, 根据风险的定义, 负荷切除的风险指标值可定义为

$$R_{L_i} = P_{L_i} \cdot I_{L_i} \quad (13)$$

(3) 电网解列风险指标

线路发生连锁跳闸可使得电网分裂成 2 个以上互不连接的部分, 造成电网解列现象, 其概率为

$$P_{NB} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S(i) \quad (14)$$

式中: N 表示某次模拟中的故障仿真次数; i 是此次模拟中的故障仿真次数编号, 若出现电网解列, 则 $S(i)$ 为 1, 反之为 0。

由于电网解列会造成整个电力系统容量的减小, 同理分析可知, 电网解列的严重度为

$$I_{NB} = \frac{1}{P_S \times N} \sum_{i=1}^N P_N(i) \quad (15)$$

式中: $P_N(i)$ 为第 i 次模拟故障造成的系统容量损失; P_S 为系统容量; N 表示总的仿真数目。

电网解列的风险为其发生可能性与严重度的结合, 其风险指标为

$$R_{NB} = P_{NB} \cdot I_{NB} \quad (16)$$

(4) 综合风险指标

系统的综合风险(IR)反映了继电保护不正确动作时连锁故障对整个电力系统的影响, 可定义系统的综合风险为电源孤立风险、电网解列风险、负荷孤立风险及加权和, 即

$$IR = \alpha_1 R_{BI} + \alpha_2 R_{NB} + \alpha_3 R_{LI} \quad (17)$$

式中: IR 为系统的综合风险; α_1 、 α_2 、 α_3 为权重因数。

获取电源孤立风险 R_{BI} 、负荷孤立风险 R_{LI} 、电网解列风险 R_{NB} 后, 可结合系统的关键因素选取合适的权重因数计算系统的综合风险 IR 。

电力系统的连锁故障风险有不同的表现形式, 系统综合风险(IR)综合了连锁故障对于电源孤立、负荷切除、电网解列方面的风险, 反映连锁故障对系统安全的综合风险。另外, 通过 R_{BI} 、 R_{LI} 、 R_{NB} 指标量化对继电保护设备不正确动作导致系统的综合风险分析, 可以定位出系统继电保护的薄弱环节, 并实施有效加强保护性能或者改变电网运行方式等措施, 以规避电网连锁故障的发生。

3 基于蒙特卡洛算法的风险评估

蒙特卡洛抽样法是根据继电保护隐性故障的概率模型以及故障切除时间的概率分布, 通过多次抽样仿真得到连锁故障的发生概率及综合评价指标。在第 1、2 节的基础上, 本节利用蒙特卡洛概率抽样算法对继电保护隐性故障进行风险评估, 计算流程如图 3 所示。

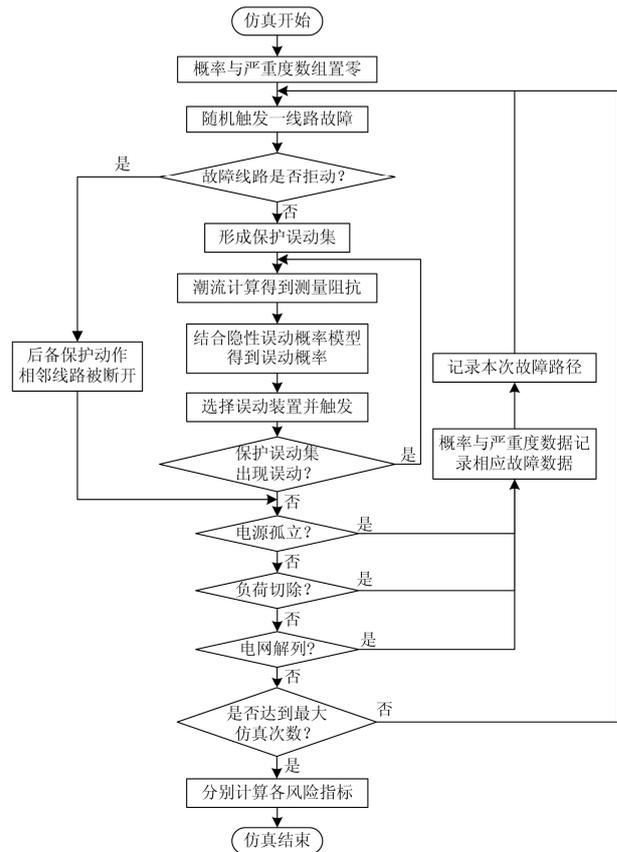


图 3 基于蒙特卡洛模拟的连锁故障风险指标计算流程

Fig. 3 Calculation process of cascading failure risk indicators based on Monte Carlo simulation

仿真由设定的随机初始线路的三相故障开始,判断初始线路对应的继电保护是否拒动。若拒动,相邻线路会被断开,记录数据并开始下一次仿真;若未发生拒动,继电保护正确切除该线路,则判断保护误动集(初始线路的上一级保护)内的距离保护是否误动。若距离保护未发生误动,则说明系统中已经不存在故障,此时记录故障所涉及的继电保护装置并开始新的模拟仿真。若继电保护误动后导致出现负荷切除、电源孤立及电网解列等现象,则记录此次模拟仿真的风险评估指标和故障所涉及的继电保护,并重新开始新的模拟仿真,否则继续模拟仿真直至算法达到设置的最大模拟仿真次数。模拟仿真结束后,计算电源孤立、负荷切除及电网解列的概率和严重度,并得出继电保护的总体风险。

4 算例分析

算例选取专门针对电网可靠性的 IEEE10 机 39 节点可靠性测试系统,其拓扑结构如图 4 所示。参考 500 kV 线路中保护系统基本数据和历史运行数据^[25],建立系统状态转移矩阵时输入数据如表 2 所示。

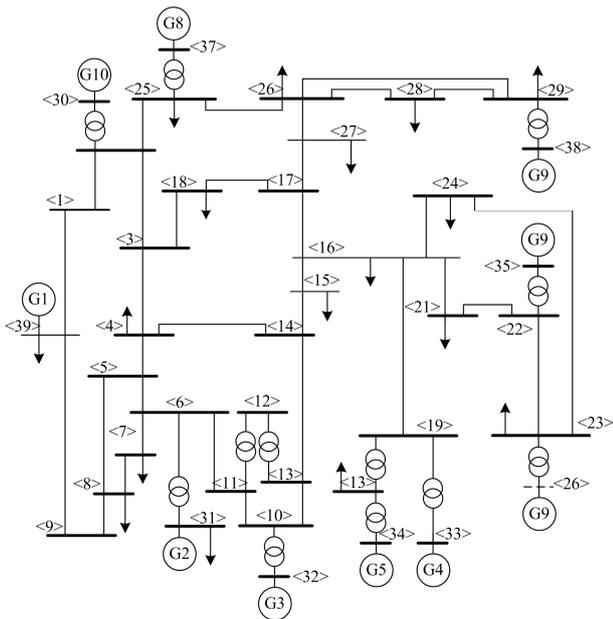


图 4 IEEE10 机 39 节点系统模型

Fig. 4 IEEE 10 machine 39 node system model

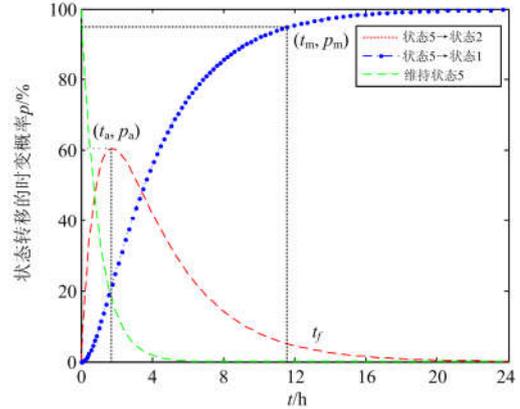
表 2 继电保护装置动作行为基础数据

Table 2 Basic data of action behavior of relay protection device

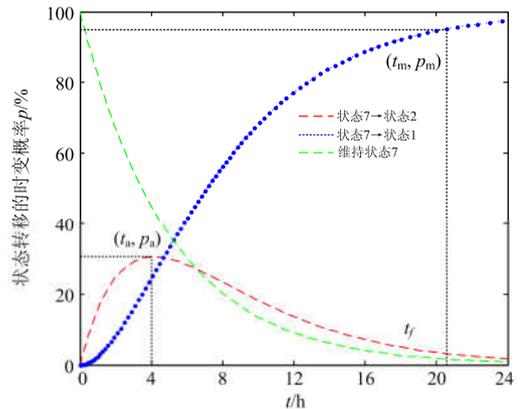
μ_0/h^{-1}	μ_1/h^{-1}	μ_{op1}/h^{-1}	λ_1/a^{-1}
1/8	1/24	1/3.5	0.5
$\lambda'_j \times 10^6/a^{-1}$	$\lambda'_w \times 10^6/a^{-1}$	s/%	Q/h^{-1}
24.11	24.11	80	1/40000

(1) 隐性故障概率计算

根据表 2 中的基础数据以及马尔科夫链建立的状态转移矩阵,可计算隐性故障概率。图 5 所示为系统处于状态 5(误动)、状态 7(拒动)的时变概率。



(a) 线路正常, 保护误动状态 5 的时变概率



(b) 线路故障, 保护拒动状态 7 的时变概率

图 5 系统处于状态 5 和 7 的时变概率

Fig. 5 Time-varying probability in state 5 and 7

当线路发生故障且保护处于拒动状态时,相对于保护误动而言,工作人员不仅要保护装置进行检修,另外还需要对线路本身进行排查和维修,只有当线路和保护装置的故障均排除后才能恢复正常状态,因此会消耗更多的时间。如图 5 所示,同样是从初始状态恢复正常状态的概率曲线,初始状态为状态 7 的时变概率在 24 h 内均低于初始状态 5,维持在初始状态的时变概率则高于初始状态 5。

相应地,根据式(5)求得继电保护装置处于状态 5 和状态 7 的平稳概率分别为 0.001 2 和 0.005 5。

(2) 风险指标计算

对图 4 所示的 39 节点系统进行蒙特卡洛抽样仿真计算,每次仿真均为随机线路故障,利用第 3 节中的蒙特卡洛抽样法计算各风险指标。其中,采用方差系数来表征计算精度。对每个风险指标的方差

系数进行比较, 选取方差系数最大的风险指标, 其方差系数作为收敛判据, 这样可以保证所有风险指标的估计值都能接近其数学期望值。本仿真中设置收敛方差系数为 0.000 13, 循环进行单次仿真, 仿真次数不断增加。当方差系数小于 0.000 13 时, 仿真计算停止, 此时单次仿真的次数为 17 500 次, 进行 5 次循环仿真, 取计算结果的平均值作为各概率指标, 结果如图 6—图 9 所示。

从图 6 中可以看出, 在电源孤立、负荷切除、电网解列的出现概率指标中, 电源孤立的出现概率最高, 电网解列发生的概率最小。从图 7 中可以看出, 在电源孤立、负荷切除、电网解列的后果指标中, 出现电网解列的后果最严重, 电源孤立与负荷切除的严重度比较接近。从图 8 可以看出, 在电源孤立、负荷孤立、电网解列的风险指标中, 电源孤立和电网解列的风险指标都比较大, 需要重点预防, 负荷切除导致的风险较低。

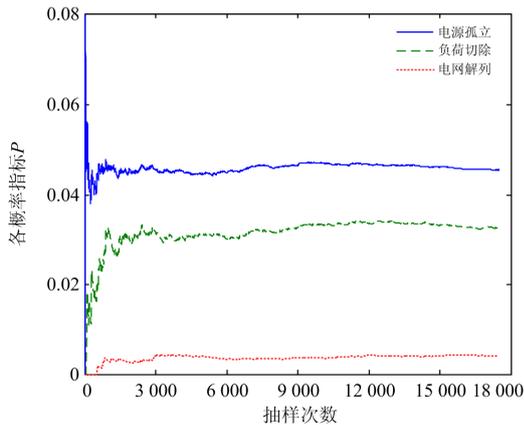


图 6 概率指标与抽样次数关系

Fig. 6 Relationship between the probability index and the sampling number

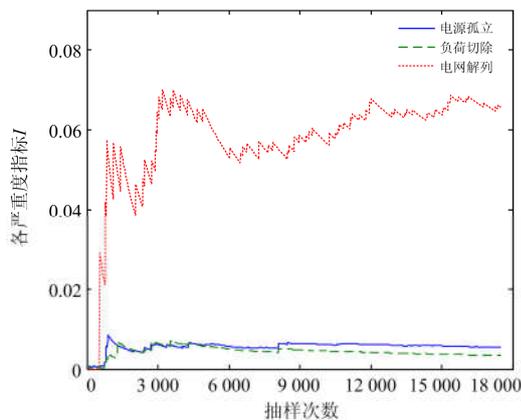


图 7 后果指标与抽样次数关系

Fig. 7 Relationship between the consequence index and the sampling number

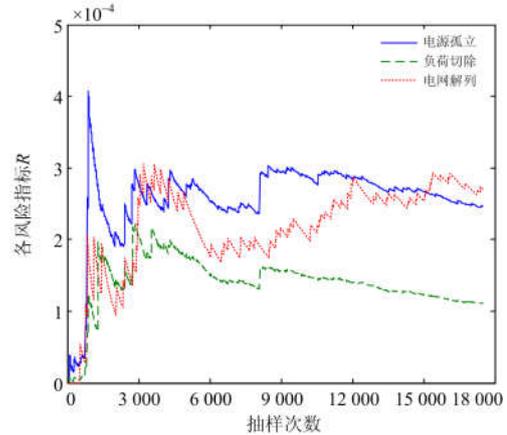


图 8 风险指标与抽样次数关系

Fig. 8 Relationship between the risk index and the sampling number

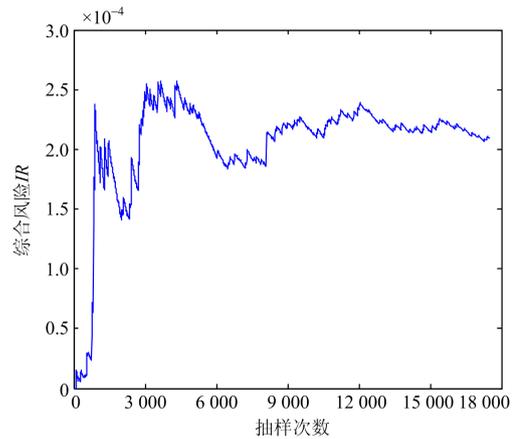


图 9 综合风险指标与抽样次数关系

Fig. 9 Relationship between the comprehensive risk index and the sampling number

根据不同次仿真计算结果可得各类风险(电源孤立、负荷切除、电网解列)发生的概率和后果, 如表 3 所示。

表 3 各类风险发生的概率和后果

Table 3 Probability and consequence of various types of risk

类别	概率	后果	风险($\times 10^{-4}$)
电源孤立	0.045 54	0.005 43	2.47
负荷切除	0.032 48	0.003 42	1.11
电网解列	0.004 12	0.065 83	2.71

对这三类风险各设置权重 $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_3 = \frac{1}{3}$, 求得系统的综合风险指标为 2.10×10^{-4} 。

上述仿真分析假定系统发生三相故障, 无论是暂时性故障还是永久性故障, 从脆弱性的角度考虑,

依据这种假设得到的结果较为保守(系统最常发生的还是单相故障)。另外,本算例中的保护配置均为单一化的距离保护,可将综合风险最大的继电保护采用多重化配置以及3取2动作跳闸策略等措施来降低系统发生连锁性故障的风险。

5 结语

本文从变电站二次系统隐性故障的角度出发,对其引发的连锁性故障进行风险评估。根据继电保护装置的状态转移模型,提出了基于连续时间马尔科夫链的保护装置运行状态时变概率和平稳概率的求解算法。建立了反映二次系统隐性故障的距离保护概率模型以及涵盖多指标(电源孤立、负荷切除以及电网解列)的风险评估体系,利用蒙特卡洛算法对连锁故障发生的各项风险指标进行计算,并评估继电保护发生隐性故障时对系统造成的运行风险。算例中借助典型10机39节点系统对连锁故障风险进行了评估,仿真结果表明该方案能够有效评估继电保护不正确动作所产生的风险。

此外,作者已与某电网公司就本文成果的落地可行性方案进行了初步探讨,其可用来定量评估评估智能变电站二次系统隐性故障的严重程度,定位薄弱环节。

参考文献

[1] TAMRONGLAK S. Analysis of power system disturbances due to relay hidden failures[J]. 1994.

[2] PHADKE A G, THORP J S. Expose hidden failures to prevent cascading outages in power systems[J]. Computer Applications in Power IEEE, 1996, 9(3): 20-23.

[3] 李再华, 白晓民, 丁剑, 等. 西欧大停电事故分析[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(1): 1-3.

LI Zaihua, BAI Xiaomin, DING Jian, et al. Analysis of the western Europe blackout[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(1): 1-3.

[4] 孙可, 韩祯祥, 曹一家. 复杂电网连锁故障模型评述[J]. 电网技术, 2005, 29(13): 1-9.

SUN Ke, HAN Zhenxiang, CAO Yijia. Review on models of cascading failure in complex power grid[J]. Power System Technology, 2005, 29(13): 1-9.

[5] 蔡伟贤. 继电保护隐藏故障风险分析及电网扰动记录方法研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2008.

CAI Weixian. Risk analysis of hidden failures in relay protection and research on power system disturbance recording method[D]. Chongqing: Chongqing University, 2008.

[6] 熊小伏, 蔡伟贤, 周家启, 等. 继电保护隐藏故障造成

输电线路连锁跳闸的概率模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(13): 6-10.

XIONG Xiaofu, CAI Weixian, ZHOU Jiaqi, et al. Probabilistic model for transmission lines cascading trips caused by hidden failures in relay protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(13): 6-10.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 刘明军, 邵周策, 上官帖, 等. 输电线路山火故障风险评估模型及评估方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(6): 82-89.

LIU Mingjun, SHAO Zhouce, SHANGGUAN Tie, et al. Study on models and methods of risk assessment of transmission line fault caused by fire[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(6): 82-89.

[10] 何迪, 章禹, 郭创新, 等. 一种面向风险评估的输电线路故障概率模型[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(7): 69-76.

HE Di, ZHANG Yu, GUO Chuangxin, et al. Failure probability model of transmission lines for risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(7): 69-76.

[11] 王燕, 杜志叶, 阮江军. 高压架空输电线路覆冰情况下风险评估研究[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(10): 84-90.

WANG Yan, DU Zhiye, RUAN Jiangjun. Reliability risk evaluation for the high voltage overhead transmission line under icing condition[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(10): 84-90.

[12] 熊小伏, 曾勇, 王建, 等. 基于山火时空特征的林区输电通道风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(4): 1-9.

XIONG Xiaofu, ZENG Yong, WANG Jian, et al. Risk assessment of power transmission channels in forest regions based on spatial-temporal features of forest fire[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(4): 1-9.

[13] BAE K, THORP J S. An importance sampling application: 179 bus WSCC system under voltage based hidden

- failures and relay misoperations[C] // Hawaii International Conference on System Sciences, January 9-9, 1998, Kohala Coast, HI, USA: 39-46.
- [14] YANG F, MELIOPOULOS A P S, COKKINIDES G J, et al. A bulk power system reliability assessment methodology[C] // International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems, September 12-16, 2004, Ames, IA, USA: 44-49.
- [15] 薛安成, 罗麟, 景琦, 等. 基于 Markov 模型的高压输电线路继电保护装置风险评估[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1995-2000.
- XUE Ancheng, LUO Lin, JING Qi, et al. Research on Markov model based risk assessment of protective relaying for high voltage transmission line[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1995-2000.
- [16] ETEMADI A H, FOTUHI-FIRUZABAD M. New considerations in modern protection system quantitative reliability assessment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2010, 25(4): 2213-2222.
- [17] ANDERSON P M, AGARWAL S K. An improved model for protective-system reliability[J]. IEEE Transactions on Reliability, 1992, 41(3): 422-426.
- [18] JOHNSON G F. Reliability considerations of multifunction protection[J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2002, 38(6): 1688-1700.
- [19] HAARLA L, PULKKINEN U, KOSKINEN M, et al. A method for analysing the reliability of a transmission grid[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2008, 93(2): 277-287.
- [20] ANDERSON P M, CHINTALURI G M, MAGBUHAT S M, et al. An improved reliability model for redundant protective systems-Markov models[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1997, 12(2): 573-578.
- [21] KUMM J J, WEBER M S, HOU D, et al. Predicting the optimum routine test interval for protective relays[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1995, 10(2): 659-665.
- [22] 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[J]. 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[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(7): 12-15.
- [23] JIANG K, SINGH C. New models and concepts for power system reliability evaluation including protection system failures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2011, 26(4): 1845-1855.
- [24] 王力军, 周凯, 吴迪, 等. 基于风险传递网络的智能变电站二次系统风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 97-105.
- WANG Lijun, ZHOU Kai, WU Di, et al. Risk assessment for smart substation secondary system using risk transfer network model[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 97-105.
- [25] WANG L, WANG G, SUN Z. Determination of the optimum routine maintenance intervals for protective systems[C] // 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, July 26-30, 2009, Calgary, AB, Canada: 1-5.

收稿日期: 2018-05-21; 修回日期: 2018-11-19

作者简介:

周虎兵(1974—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统继电保护;

张焕青(1963—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统及自动化。

(编辑 许威)