

# 改进严重度模型下计及二次系统影响的电网风险评估

许鹏程<sup>1</sup>, 林建森<sup>1</sup>, 林缔<sup>1</sup>, 廖剑波<sup>1</sup>, 官语<sup>1</sup>, 林焱<sup>2</sup>

(1. 国网福建省电力有限公司福州供电公司, 福建 福州 350004;  
2. 国网福建省电力有限公司电力科学研究院, 福建 福州 350007)

**摘要:**针对现有电网安全风险评估方法未充分考虑不同一次设备、负荷重要程度以及二次系统性能的影响,文中提出一种改进严重度模型下计及二次系统影响的电网静态安全风险评估方法。首先,分析继电保护隐性故障、自动重合闸成功率以及自动切负荷装置对风险评估的影响,并建立相应的风险评估模型;然后,在基于效应理论的严重度模型中引入重要程度因子,对系统中线路、母线和负荷的重要度进行量化,提出改进严重度模型的风险指标评估方法。最后,对改进 IEEE-RTS79 测试系统进行风险评估,验证了所提模型及方法可有效辨识电力系统中的薄弱环节,且较传统风险评估方法更符合系统实际,为电力系统运维检修和风险管控提供了参考依据。

**关键词:**二次系统;隐性故障;改进严重度;风险评估;风险管控

中图分类号:TM715

文献标志码:A

文章编号:2096-3203(2021)02-0212-08

## 0 引言

日益增长的电力需求、愈发复杂的网架结构以及逐渐扩大的电力系统规模对电网安全稳定运行提出了更加严峻的挑战<sup>[1-4]</sup>,电力系统静态安全风险评估逐渐成为研究重点<sup>[5-6]</sup>。近年来,国内外多起大规模停电事故表明,二次系统故障或误动将直接导致电网大面积停电,这种潜在风险严重威胁电网的安全运行<sup>[7-11]</sup>。二次系统的可靠性对电力系统正常运行有着至关重要的作用,亟需开展二次系统隐性故障辨识研究,并将其引入电力系统静态安全风险领域。

现阶段,已有大量研究将继电保护隐性故障引入电力系统风险评估领域。文献[12-13]从原理层面对相关保护元件失效的概率模型进行分析,为考虑保护元件失效影响的概率性评估研究提供参考。针对继电保护隐性故障可能引发的系统连锁故障动作,文献[14]通过建立马尔科夫状态转移空间模型,分析了系统在各种时变状态下的转移概率,提出一种考虑保护装置误动的连锁故障多指标风险评估方法。文献[15]基于事件树理论计算了继电保护故障引起大事故的概率,从调控层面考虑保护定值整定合理性对系统运行风险的影响,为薄弱环节辨识和在线风险预警提供依据。文献[16]结合线路运行状态,根据线路保护的自检特性划分保护装置的风险状态,基于马尔科夫模型建立各状态转移概率,进而对高压输电线路进行风险评估。上述文献的研究重点是关于二次系统故障导致连

锁误动的建模,而将一、二次系统作为整体进行综合评估时,忽略了不同一次设备和负荷重要程度对风险评估的影响。另一方面,文献[17-18]指出计及二次系统影响的风险评估应充分考虑二次保护装置配置、动作准确率和拒动率等因素。

基于上述分析,文中通过引入线路、母线和负荷重要度因子,对已有严重度评价模型进行改进,提出一种计及二次系统影响的电力系统静态安全风险评估方法。对改进的 IEEE-RTS79 系统进行风险评估,验证所提模型及方法的合理性与有效性。

## 1 计及二次系统影响的风险评估模型

### 1.1 考虑继电保护装置隐性故障的风险评估模型

保护装置误动是概率事件<sup>[19]</sup>,文中分别以距离Ⅲ段和发电机机端电压描述线路和发电机保护装置隐性故障下误动的概率分布<sup>[17]</sup>。线路保护装置隐性故障下误动的概率分布如图1所示。

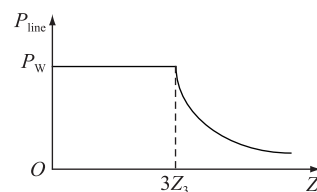


图1 线路保护装置隐性故障下误动的概率分布  
Fig.1 Probability distribution of misoperation under hidden faults for line protection devices

线路保护装置隐性故障下误动的概率为:

$$P_{\text{line}} = \begin{cases} P_w & Z \leq 3Z_3 \\ P_w e^{-Z/Z_3} & Z > 3Z_3 \end{cases} \quad (1)$$

式中: $Z$ 为线路保护装置实测阻抗; $Z_3$ 为距离Ⅲ段阻

抗定值;  $P_w$  为常数。

发电机保护装置隐性故障下误动的概率分布如图 2 所示。

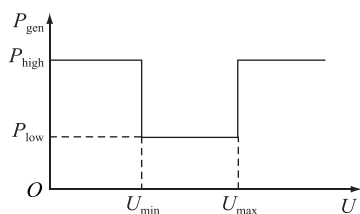


图 2 发电机保护装置隐性故障下误动的概率分布

Fig.2 Probability distribution of misoperation under hidden faults for generator protection devices

发电机保护装置隐性故障下误动概率为:

$$P_{\text{gen}} = \begin{cases} P_{\text{low}} & U_{\min} < U < U_{\max} \\ P_{\text{high}} & U \leq U_{\min}, U \geq U_{\max} \end{cases} \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{low}}, P_{\text{high}}$  为概率常数;  $U_{\max}, U_{\min}$  分别为发电机端电压的最大值和最小值。

当系统中某线路因故障被切除后,与其相邻的线路或发电机的保护装置误动概率将增大,若这些保护装置以一定概率发生误动将直接导致连锁故障。文中以准误动联络矩阵  $C$  描述与被切除线路相连元件的继电保护准误动集合,  $C$  中元素定义为:

$$(C)_{ij} = \begin{cases} 0 \\ P_{ij} \end{cases} \quad (3)$$

式中:  $P_{ij}$  为元件  $i$  被切除后,元件  $j$  保护装置误动的概率。

以图 3 所示的电力系统阐述保护装置隐性故障下的连锁故障过程。

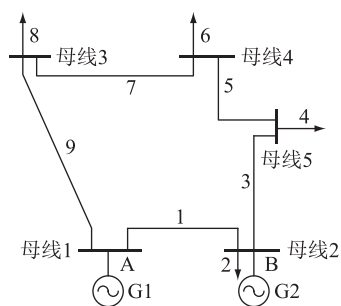


图 3 电力系统接线示意

Fig.3 Schematic diagram of power system wiring

每添加 1 条连锁故障路径后,进行该状态的潮流计算,直到系统发生切负荷、电源脱离系统和电网解列等事件,连锁故障不再继续发展,记录此时的系统状态和事故后果。当某一线路被切除后,通过式(1)和式(2)的保护装置隐性故障模型计算该状态下其他线路、发电机继电保护装置发生误动的概率,进而确定连锁误动的发展路径。则求得  $C$  为:

$$C = \begin{bmatrix} 0 & P_{12} & P_{13} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{19} & P_{14} & P_{1B} \\ P_{21} & 0 & P_{23} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{2B} \\ P_{31} & P_{32} & 0 & P_{34} & P_{35} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{3B} \\ 0 & 0 & P_{43} & 0 & P_{45} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & P_{53} & P_{54} & 0 & P_{56} & P_{57} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{65} & 0 & P_{67} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & P_{75} & P_{76} & 0 & P_{78} & P_{79} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{87} & 0 & P_{89} & 0 & 0 \\ P_{91} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{97} & P_{98} & 0 & P_{94} & 0 \\ P_{A1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & P_{A9} & 0 & 0 \\ P_{B1} & P_{B2} & P_{B3} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

以线路 9 发生区内故障为例,分析其故障切除后可能导致的系统连锁故障。

连锁故障 1。保护装置 9 动作切除故障后,保护装置 7 相继动作,造成失负荷。

连锁故障 2。保护装置 9 动作切除故障后,保护装置 1 相继动作,造成电源脱离系统。

连锁故障 3。保护装置 9 动作切除故障后,保护装置 A 相继动作,造成电源脱离系统。A, B 分别为发电机 G1, G2 的保护装置。

连锁故障 4。保护装置 9 动作切除故障后,保护装置 1, 7 相继动作,造成系统解列。

综上所述,根据  $C$  的状态转移方向,计算考虑继电保护动作的连锁故障发生概率  $P_{CF}$  为:

$$P_{CF} = P(E_i) \times \prod P(E_j) \times \prod P(E_k) \times \dots \quad (5)$$

式中:  $P(E_i)$  为元件  $i$  的年故障率;  $P(E_j)$  为元件  $i$  故障情况下元件  $j$  继电保护隐性故障下误动的概率;  $P(E_k)$  为元件  $i, j$  故障情况下元件  $k$  继电保护隐性故障下误动的概率。

## 1.2 考虑自动重合闸的风险评估模型

自动重合闸装置对系统运行风险的影响主要为其自身的动作正确率以及线路发生瞬时性故障的概率。当系统发生瞬时性故障时,自动重合闸装置动作成功率  $P_{suc}$  为:

$$P_{suc} = P_{true} P_{line} \quad (6)$$

式中:  $P_{true}$  为自动重合闸装置正确动作概率,一般取 99.5%;  $P_{line}$  为线路发生瞬时性故障的概率。

## 1.3 考虑切负荷装置的最优负荷削减模型

传统最优负荷削减模型将系统中的所有负荷均列入可切负荷,而实际运行时系统每次只能切除安装有切负荷装置节点上的负荷,并有切除量限制。为了使最优切负荷模型更贴合实际,文中提出考虑切负荷装置的最优负荷削减模型,改进模型的

目标函数为:

$$f = \min \sum_{i \in C_D} C_i \quad (7)$$

式中: $C_D$ 为安装有切负荷装置的母线集合; $C_i$ 为装置*i*的切负荷量。

改进模型的约束条件为:

$$T(S) = A(S)(P_G - P_D + C) \quad (8)$$

$$\sum_{i \in N_G} P_{Gi} + \sum_{i \in C_D} C_i = \sum_{i \in N_D} P_{Di} \quad (9)$$

$$P_{Gi, \min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi, \max} \quad i \in N_G \quad (10)$$

$$0 \leq C_i \leq P_{Di} \quad i \in C_D \quad (11)$$

$$|T_k(S)| \leq T_{k, \max} \quad k \in L \quad (12)$$

式中: $T(S)$ 为故障状态*S*下的有功潮流矩阵; $A(S)$ 为系统输入功率和有功潮流的关系矩阵; $P_G$ 为发电机输出功率; $P_D$ 为负荷量; $C$ 为切负荷量; $N_G$ 为含发电机的母线; $N_D$ 为负荷母线; $P_{Gi, \min}$ ,  $P_{Gi, \max}$ 分别为发电机输出功率的最小和最大值; $T_k(S)$ 为故障状态*S*下支路*k*的有功潮流; $T_{k, \max}$ 为有功潮流的最大值; $L$ 为系统所有支路集合。

## 2 静态安全风险评估指标

### 2.1 基于效用函数的严重度量化方法

早期风险评估大多根据期望损失值度量系统风险,但其未能有效衡量高损失、低概率与低损失、高概率风险间的差异性。为此提出基于效用理论的严重度计算方法,该方法能避免调度和运行人员对高损失、低概率事故的回避,有效反映电网事故后果的严重程度<sup>[20]</sup>。

设*w*为电力系统故障损失值, $S(w)$ 为度量系统故障损失的严重度函数。根据运行人员的风险倾向, $S(w)$ 满足 $S'(w) > 0$ 时,表示随着*w*的增加,运行人员的不满意程度增加;且满足 $S''(w) > 0$ 时,表示随着*w*的增加,运行人员的不满意程度增加速度变快。为合理反映电网风险及其分布情况,文中选择指数型效用函数衡量系统故障损失严重度<sup>[21]</sup>,以静态安全风险指标即失负荷、过负荷、电压越限和电压失稳风险构建指标体系,并从负荷、母线以及系统风险3个维度全面有效地实现电网静态安全风险评估。

### 2.2 负荷风险指标

#### 2.2.1 失负荷风险

为评价系统故障后的失负荷风险,提出系统期望失负荷风险指标 $R_{Loss}$ 为:

$$R_{Loss} = \sum_j \sum_i [P(F_j)S_{ev}(F_j, L_i)] \quad (13)$$

式中: $P(F_j)$ 为第*j*个故障状态发生的概率,可根据每个元件所处状态的概率乘积计算得出; $S_{ev}(F_j, L_i)$

为状态*j*下,母线*i*失负荷严重程度,文中取失负荷量。

考虑到损失等量负荷对不同重要程度负荷的影响不同,在上述严重程度量化模型中引入负荷重要程度因子 $\alpha_i$ ,即:

$$S_{ev}(F_j, L_i) = \alpha_i(e^{w_i} - 1) \quad (14)$$

式中: $w_i$ 为母线*i*失负荷量。

根据负荷分级表,结合停电事故的减供负荷量, $\alpha_i$ 划分如表1所示。

表1  $\alpha_i$ 取值

Table 1 Value of  $\alpha_i$

负荷等级	$\alpha_i$	负荷等级	$\alpha_i$
一般	0.1	一级	0.7
三级	0.3	特别重要	0.9
二级	0.5		

#### 2.2.2 过负荷风险

为评价系统故障造成元件设备潮流超出规定安全值的风险,提出系统过负荷风险指标 $R_{OL}$ 。

$$R_{OL} = \sum_j \sum_i [P(F_j)S_{ew}(F_j, L_i)] \quad (15)$$

式中: $S_{ew}(F_j, L_i)$ 为状态*j*下,支路*i*过负荷严重程度。

$$S_{ew}(F_j, L_i) = e^{x_i} - 1 \quad (16)$$

式中: $x_i$ 为支路*i*(包括线路和变压器)的过负荷量,假设系统故障后支路*i*的潮流为*p<sub>i</sub>*,则:

$$x_i = \begin{cases} p_i - p_0 & p_i > p_0 \\ 0 & 0 \leq p_i \leq p_0 \end{cases} \quad (17)$$

式中: $p_0$ 为该支路过负荷风险为0的潮流临界值。

考虑到等量过负荷对不同重要程度线路的影响不同,在上述严重程度量化模型中引入线路重要程度因子 $\beta_i$ ,即:

$$S_{ew}(F_j, L_i) = \beta_i(e^{x_i} - 1) \quad (18)$$

影响 $\beta_i$ 的因素包括线路拓扑重要程度、线路所供负荷综合重要程度等,故在实际评估工作中, $\beta_i$ 可根据式(19)确定。

$$\beta_i = \beta_{ai} \beta_{bi} \quad (19)$$

式中: $\beta_{ai}$ , $\beta_{bi}$ 分别为线路拓扑、线路电压等级重要程度因子。

文中根据线路介数大小对线路拓扑重要程度进行定量描述, $\beta_{ai}$ 取值如表2所示。根据电网电压等级, $\beta_{bi}$ 取值如表3所示。

### 2.3 母线风险指标

#### 2.3.1 电压越限风险

电压越限风险 $R_{OV}$ 反映电力系统故障导致系统母线电压偏离额定值的风险。

表2  $\beta_{ai}$  取值  
Table 2 Value of  $\beta_{ai}$

线路介数	$\beta_{ai}$	线路介数	$\beta_{ai}$
0~10	0.1	30~50	0.5
10~30	0.3	50以上	0.7

表3  $\beta_{bi}$  取值  
Table 3 Value of  $\beta_{bi}$

电压等级/kV	$\beta_{bi}$	电压等级/kV	$\beta_{bi}$
10	0.1	220	0.7
35	0.3	500	0.9
110	0.5		

$$R_{OV} = \sum_j \sum_i [P(F_j) S_{ei}(F_j, V_i)] \quad (20)$$

式中: $S_{ei}(F_j, V_i)$ 为状态 $j$ 下,母线 $i$ 电压越限严重程度。

$$S_{ei}(F_j, V_i) = e^{V_i} - 1 \quad (21)$$

式中: $V_i$ 为母线 $i$ 的电压偏移值。

假设母线 $i$ 在系统故障后的电压为 $U_i$ ,则:

$$U_i = \begin{cases} U_0 - U_i & 0 < U_i < U_0 \\ 0 & U_i = 0 \\ U_i - U_0 & U_i > U_0 \end{cases} \quad (22)$$

式中: $U_0$ 为该母线电压越限风险为0的电压临界值。

考虑到各母线重要程度不同,相同的电压偏移量对不同母线的影晌各不相同。因此,在上述严重程度量化模型中引入母线重要程度引子 $\gamma_i$ ,即:

$$S_{ei}(F_j, V_i) = \gamma_i (e^{V_i} - 1) \quad (23)$$

式中: $\gamma_i$ 取值与 $\beta_{bi}$ 一致。

### 2.3.2 电压失稳风险

电压失稳风险 $R_{LV}$ 反映电力系统故障导致系统母线电压失稳的风险。

$$R_{LV} = \sum_j \sum_i [P(F_j) S_{vc}(F_j, V_i)] \quad (24)$$

式中: $S_{vc}(F_j, V_i)$ 为状态 $j$ 下,母线 $i$ 电压失稳严重程度。

$$S_{vc}(F_j, V_i) = e^q - 1 \quad (25)$$

式中: $q$ 为系统电压崩溃损失值。

$$q = \begin{cases} 0.2 - K_p & 0 \leq K_p \leq 0.2 \\ 0 & K_p > 0.2 \end{cases} \quad (26)$$

$$K_p = \frac{P_{cr} - P_0}{P_0} \quad (27)$$

式中: $K_p$ 为母线稳定储备裕度; $P_0$ 为当前负荷情况; $P_{cr}$ 为系统电压崩溃临界值。

### 2.4 系统综合风险指标

文中定义系统综合风险指标 $R_{syn}$ 为失负荷、过负荷、电压越限和电压失稳风险的加权和。

$$R_{syn} = R\omega \quad (28)$$

式中: $R = [R_{LOSS} R_{OL} R_{OV} R_{LV}]$ 为系统单项风险指标构成的行向量; $\omega = [\omega_1 \omega_2 \omega_3 \omega_4]^T$ 为系统单项风险指标权重构成的列向量。

值得注意的是,文中所提严重程度因子是将不同电压等级、不同重要度的负荷、线路及母线等进行差异化处理,由此计算出的风险指标更符合实际运行风险情况。

### 3 风险评估过程

风险评估过程包括系统状态抽样、系统状态评估和风险指标统计3个阶段,计及二次系统影响的大电网风险评估流程如图4所示。

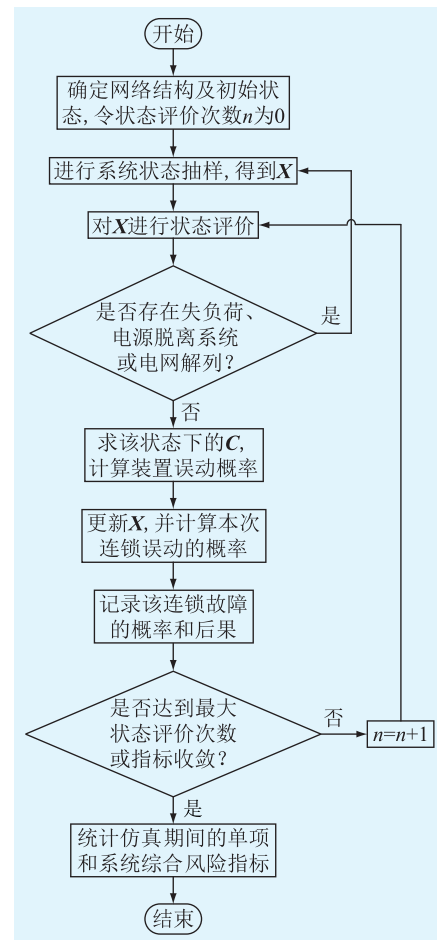


图4 风险评估流程

Fig.4 Flow of risk assessment

(1) 确定待评估系统网络结构、参数及其初始运行状态,令状态评价次数 $n$ 为0。

(2) 在仿真期间,分别对每个元件进行抽样,得到系统状态 $X = [X_1 X_2 \dots X_N]$ ,其中 $N$ 为系统元件个数。

(3) 对 $X$ 进行状态评价,判断是否存在失负荷、电源脱离系统或电网解列。若存在,则跳至步

骤(2),否则进行下一步。

(4) 根据系统网络结构求得该状态下的  $C$ ; 建立  $X$  的隐性故障模型,并计算保护装置误动概率。

(5) 选择误动的保护装置,根据保护装置动作情况更新  $X$ ,并计算本次连锁误动的概率。

(6) 根据文中定义的故障后果量化失负荷、过负荷、电压越限和电压失稳严重程度,记录该连锁故障的概率和后果。

(7) 重复步骤(3)一步骤(6),直至指标收敛或达到最大状态评价次数。

(8) 统计仿真期间的单项风险指标和系统综合风险指标。

## 4 算例分析

### 4.1 算例说明

以图 5 所示的改进 IEEE-RTS79 系统作为算例。假设系统在除母线 3,5,14,19 外的其余母线上均装设自动切负荷装置。根据表 1 设置不同负荷等级,根据表 2、表 3 分别设置线路、母线重要程度。

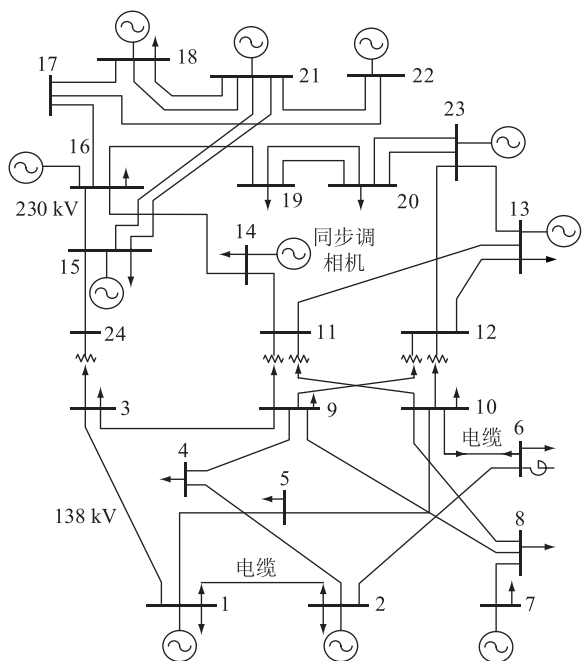


图 5 风险评估测试系统接线

Fig.5 Wiring of risk assessment test system

### 4.2 风险评估方法有效性验证

采用非序贯蒙特卡罗对该系统状态进行抽样,对故障状态下的连锁故障状态转移进行仿真。设仿真最大状态评价次数为  $10^5$  次;指标收敛条件为概率方差系数小于 0.05 或达到最大评价次数。各概率指标收敛过程如图 6—图 9 所示。

由图 6—图 9 指标收敛过程可知,各概率指标在仿真期间均不同程度地收敛于某一概率值。仿

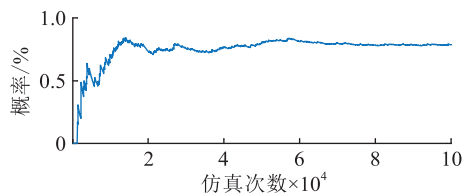


图 6 系统失负荷概率收敛过程

Fig.6 Convergence process of system load loss probability

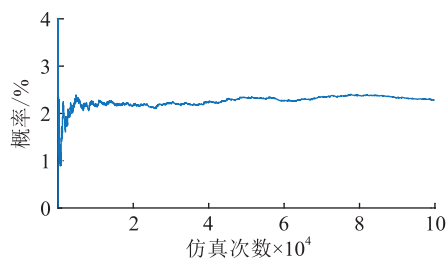


图 7 系统过负荷概率收敛过程

Fig.7 Convergence process of system over-load probability

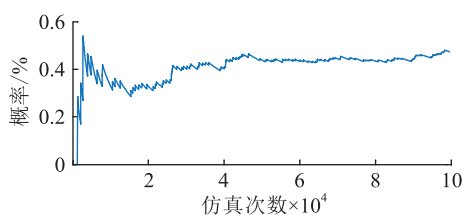


图 8 电压越限概率收敛过程

Fig.8 Convergence process of voltage beyond limits probability

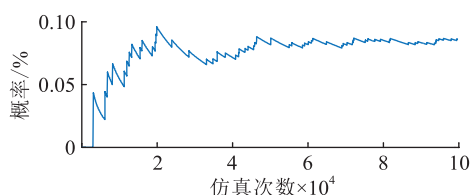


图 9 电压失稳概率收敛过程

Fig.9 Convergence process of voltage instability probability

真过程中系统风险评估单项指标结果如表 4 所示。

表 4 风险指标计算结果

Table 4 Calculation results of risk index

风险指标	计及二次系统	不计及二次系统	指标偏差/%
$R_{Loss} \times 10^{-4}$	2.365	2.188	8.09
$R_{OL} \times 10^{-4}$	5.539	5.146	7.64
$R_{OV} \times 10^{-4}$	3.899	3.519	10.80
$R_{LV} \times 10^{-5}$	6.284	5.747	9.34

由表 4 可知,所提方法可有效考虑二次系统对电网风险的影响,而不计及二次系统影响的系统风险评估指标均偏低,这使风险评估结果过于乐观,

故在实际工程风险评估中有必要考虑二次系统对评估结果的影响。

#### 4.3 基于风险的系统薄弱环节分析

为分析系统薄弱环节,列举 10 条特定线路故障时的  $R_{syn}$ ,如表 5 所示。

表 5 特定线路故障下的  $R_{syn}$   
Table 5  $R_{syn}$  under specific line failure

线路序号	起点母线	终点母线	$R_{syn} \times 10^{-6}$
1	16	14	2.364
2	9	7	13.528
3	19	20	0.423
4	4	9	9.899
5	21	15	6.951
6	21	18	0.856
7	1	3	27.661
8	7	10	11.338
9	2	4	33.867
10	21	15	6.591

对各线路故障引起的风险指标进行排序,可知线路 9 和线路 7 故障导致其他保护装置连锁误动的风险最大。改善保护装置性能可有效降低系统连锁故障风险,故在风险预防管控中可重点考虑在线路 9 和线路 7 升级高性能保护装置。其次,值得注意的是,线路故障引发连锁故障的风险不仅与继电保护装置的隐性故障概率有关,还与线路的负载率有关,两者将决定连锁故障的严重程度。因此,提升重点线路负载能力亦是风险预防管控重要手段之一。

为了对比线路负载能力和继电保护隐性故障概率对  $R_{syn}$  的贡献程度,分别改变线路 9 继电保护隐性故障下误动的概率(降低 10%)和线路负载能力(提高 10%),对比分析  $R_{syn}$ ,如表 6 所示。假设系统失负荷风险为重点关注指标,其他各单项风险指标重要度一致,取  $\omega = [0.4 \ 0.2 \ 0.2 \ 0.2]^T$ 。

表 6 不同风险管控措施下的  $R_{syn}$  对比

Table 6 Comparison of  $R_{syn}$  under different risk control measures

管控措施	$R_{syn} \times 10^{-5}$	贡献度/%
不采取措施	3.387	0
升级保护装置	3.234	4.517
提升线路负载能力	3.082	9.005

由表 6 可知,提高线路两端保护装置性能可减小连锁故障发生概率,降低系统风险。由于连锁故障的发生概率很小,且保护装置性能升级能力有限,该方法对  $R_{syn}$  的贡献度相对较小。提高重点线

路的负载能力,可减小连锁故障严重程度,降低系统风险,相比之下,该方法对  $R_{syn}$  的贡献度较大。二者各有利弊,保护装置性能升级相对容易且投资较小,故在实际的生产运行中,应适当权衡降低风险和经济性间的关系。

## 5 结语

文中综合考虑了继电保护隐性故障、自动重合闸以及自动切负荷装置对风险评估的影响,提出了一种计及二次系统影响的电力系统静态安全风险评估方法。对改进 IEEE-RTS79 测试算例进行风险评估,结果表明,不计及二次系统影响的系统风险评估指标均偏低,故在实际工程风险评估中有必要考虑二次系统对评估结果的影响。

在基于风险的系统薄弱环节分析过程中,对比了不同风险管控措施对降低系统风险的影响。结果表明:提高重要线路负载能力较升级继电保护装置性能对降低系统风险贡献更大,而升级继电保护装置相对容易且投资更小,故在实际生产应用中,应权衡降低风险和经济性间的关系后再进行决策。

本文得到国网福建省电力有限公司科技项目(521304190027)资助,谨此致谢!

### 参考文献:

- [1] 成锐,刘文霞,金秋龙,等. 基于分布估计和智能存储的复杂电网可靠性评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(19): 5541-5548, 5831.  
CHENG Rui, LIU Wenxia, JIN Qiulong, et al. Reliability evaluation in composite power system based on estimation of distribution algorithm and intelligent storage[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(19): 5541-5548, 5831.
- [2] 许鹏程,刘文霞,陈启,等. 基于重要抽样与极限学习机的大电网可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 204-210.  
XU Pengcheng, LIU Wenxia, CHEN Qi, et al. Reliability evaluation of large power system based on combination of important sampling and extreme learning machine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 204-210.
- [3] 杨超平,姚锐,张爽,等. 协调运行经济性与安全性的电力系统连锁故障风险控制方法[J]. 电工电能新技术, 2017, 36(12): 71-78.  
YANG Chaoping, YAO Rui, ZHANG Shuang, et al. Cascading outage risk mitigation method coordinating economy and security in power systems[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2017, 36(12): 71-78.
- [4] 许鹏程,陈启,刘宗岐,等. 基于优化卷积法和静态安全约束的电网外受电分析[J]. 现代电力, 2017, 34(2): 8-13.  
XU Pengcheng, CHEN Qi, LIU Zongqi, et al. Transmission transfer capability evaluation of power system base on optimized

- convolution method and static security constraints[J]. Modern Electric Power, 2017, 34(2): 8-13.
- [5] 何晓峰,黎寿涛,夏成军,等. 基于 OPA 连锁故障模型的电力系统风险评估[J]. 南方电网技术, 2019, 13(10): 31-38.  
HE Xiaofeng, LI Shoutao, XIA Chengjun, et al. Risk assessment of power system based on OPA cascading failure model[J]. Southern Power System Technology, 2019, 13(10): 31-38.
- [6] 李岩,滕云,徐明忻,等. 特高压交直流混联电网连锁故障安稳风险评估[J]. 高电压技术, 2018, 44(11): 3743-3750.  
LI Yan, TENG Yun, XU Mingxin, et al. Security and stability analysis method for AC/DC UHV power system cascading failure based on improved risk assessment[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(11): 3743-3750.
- [7] 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, 36(S1): 29-35.  
LI Zhongqing, GAO Xiang, LI Yongli, et al. The development of risk assessment technology related to a hidden failure of protection system[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(S1): 29-35.
- [8] ZHAO L L, LI X M, NI M, et al. Review and prospect of hidden failure: protection system and security and stability control system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2019, 7(6): 1735-1743.
- [9] 彭云豪,董希建,周海强,等. 电网安全稳定控制系统可靠性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(13): 123-131.  
PENG Yunhao, DONG Xijian, ZHOU Haiqiang, et al. Reliability evaluation of power grid security and stability control system[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(13): 123-131.
- [10] PHADKE A G, THORP J S. Expose hidden failures to prevent cascading outages in power systems[J]. IEEE Computer Applications in Power, 1996, 9(3): 20-23.
- [11] FALAHATI B, FU Y. Reliability assessment of smart grids considering indirect cyber-power interdependencies[J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2014, 5(4): 1677-1685.
- [12] 戴志辉,王增平,焦彦军,等. 阶段式保护原理性失效风险的概率评估方法[J]. 电工技术学报, 2012, 27(6): 175-182.  
DAI Zhihui, WANG Zengping, JIAO Yanjun, et al. Probabilistic assessment method for failure risk of stepped protection philosophy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(6): 175-182.
- [13] 沈智健,周家启,卢继平,等. 距离保护运行风险评估模型[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 7-11, 82.  
SHEN Zhijian, ZHOU Jiaqi, LU Jiping, et al. Operational risk evaluation model of distance protection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 7-11, 82.
- [14] 周虎兵,张焕青,杨增力,等. 二次系统隐性故障的多指标综合风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(9): 120-127.  
ZHOU Hubing, ZHANG Huanqing, YANG Zengli, et al. Multi-criteria integrated risk assessment of secondary system hidden failures[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(9): 120-127.
- [15] 吴文传,吕颖,张伯明. 继电保护隐患的运行风险在线评估[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 78-83.  
WU Wenchuan, LYU Ying, ZHANG Boming. On-line operating risk assessment of hidden failures in protection system[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 78-83.
- [16] 薛安成,罗麟,景琦,等. 基于 Markov 模型的高压输电线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.
- [17] 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, 25.  
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, 25.
- [18] ALLAN R N, BILLINTON R, BREIPOHL A M, et al. Bibliography on the application of probability methods in power system reliability evaluation[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1999, 14(1): 51-57.
- [19] 李博通,李永丽,姚创,等. 继电保护系统隐性故障研究综述[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 26(7): 34-39.  
LI Botong, LI Yongli, YAO Chuang, et al. Overview of research on hidden failures in protection system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 26(7): 34-39.
- [20] 李海南,张建华,朱星阳,等. 计及天气影响的含风电场电力系统风险评估[J]. 华东电力, 2014, 42(6): 1084-1091.  
LI Hainan, ZHANG Jianhua, ZHU Xingyang, et al. Risk assessment of power system with wind farm considering weather impacts[J]. East China Electric Power, 2014, 42(6): 1084-1091.
- [21] 谭梦思. 基于风险评估的电力系统安全预警分级研究[D]. 北京:华北电力大学, 2014.  
TAN Mengsi. Research of security forewarning classification for power system based on risk assessment[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2014.

作者简介:



许鹏程

许鹏程(1990),男,硕士,工程师,从事电力系统风险及可靠性评估、继电保护等工作(E-mail:ncepuxpc@163.com);

林建森(1990),男,硕士,工程师,从事电力系统保护与控制工作;

林缔(1979),男,学士,高级工程师,从事电力系统保护与控制工作。

## Grid risk assessment based on the improved severity model considering the influence of secondary system

XU Pengcheng<sup>1</sup>, LIN Jiansen<sup>1</sup>, LIN Di<sup>1</sup>, LIAO Jianbo<sup>1</sup>, GUAN Yu<sup>1</sup>, LIN Yan<sup>2</sup>

- (1. State Grid Fuzhou Power Supply Company of Fujian Electric Power Co., Ltd., Fuzhou 350004, China;  
2. State Grid Fujian Electric Power Co., Ltd. Research Institute, Fuzhou 350007, China)

**Abstract:** The existing power grid security risk assessment methods do not fully consider the impact of different primary equipment, load importance and secondary system performance. Grid static security risk assessment method considering the influence of secondary system based on the improved severity model is proposed. Firstly, the effects of hidden faults of relay protection, automatic reclosing success rate and automatic load-cutting devices on risk assessment are analyzed, and corresponding risk assessment model is established. Then, by quantifying the importance of lines, buses and loads, a risk index quantification method of the improved severity model is proposed which introduces the importance degree factor into severity model. The proposed method is applied to the improved IEEE-RTS79 testing system. It is verified that the proposed model and method can effectively identify the weak links in the power system, and are more in line with the system reality than traditional risk assessment methods. The proposed method can provide a reference for power system operation, maintenance, and risk management.

**Keywords:** secondary system; hidden faults; improved severity; risk assessment; risk management

(编辑 吴楠)

(上接第 211 页)

## Evaluation method and operation control strategy of primary frequency response for East China Grid

XU Xian<sup>1</sup>, LU Xiao<sup>1</sup>, ZHOU Ting<sup>1</sup>, LI Jianhua<sup>2</sup>, LI Zhaowei<sup>3</sup>

- (1. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210024, China;  
2. East China Branch of State Grid Corporation of China, Shanghai 200120, China;  
3. NARI Technology Co., Ltd., Nanjing 211106, China)

**Abstract:** With the increase of renewable energy and DC external power supply capacity, it is more and more important to ensure the frequency safety of the power system. A simplified frequency simulation model is proposed, which includes the synchronous generator, governor and load model, and takes the voltage variation affecting the load response into account. The model is used to simulate the frequency response of the power system under the actual and expected faults. It shows that the simulation accuracy meets the requirements while compared with the calculation results of the BPA detailed model. The simplified model is used to evaluate the current and future frequency security situation of East China Grid. It is pointed out that the frequency security of East China Grid is facing severe challenges in 2025. The primary frequency response services of the conventional synchronous generator need to be improved and the proportion of DC external power supply injecting power needs to be limited to ensure the frequency safety of the power system. It is also suggested that the renewable energy should provide virtual synchronous generator control and primary frequency control to realize the friendly connection of new energy generating units to the grid and meet the needs of the grid development in the future.

**Keywords:** primary frequency response; simplified simulation model; quantitative assessment; frequency safety; renewable energy

(编辑 钱悦)