

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.221579

# 考虑一二次耦合多重故障的电力系统风险评估

张路<sup>1</sup>, 熊张恣<sup>2</sup>, 王建<sup>2</sup>, 南东亮<sup>1</sup>, 赵启<sup>1</sup>, 熊小伏<sup>2</sup>

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400044)

**摘要:** 为了综合评估恶劣天气下输电线路故障与二次系统隐性故障导致的多重故障风险, 提出了考虑一二次耦合多重故障的电力系统风险评估方法。首先, 分析了气象灾害导致输电线路故障的特点, 总结了一二次设备耦合多重故障的特点。其次, 综合考虑输电线路及保护装置的失效概率, 建立了一二次耦合多重故障模型。然后, 应用拉丁超立方抽样实现初始故障集的快速生成, 进而评估系统失负荷、节点电压越限、支路潮流越限等风险指标。最后, 采用 IEEE39 节点系统对所提方法进行测试。研究表明: 考虑一二次耦合的多重故障, 系统面临的风险更为严重; 使用拉丁超立方抽样, 可兼顾不同气象分区内线路故障概率分布差异, 提高计算效率; 通过多维度风险指标排序, 能够有效筛选灾害天气落区内影响电网风险的关键线路和母线, 为电网风险防控和薄弱环节治理提供决策依据。

**关键词:** 电力系统; 一二次耦合; 多重故障; 风险评估; 恶劣天气

## Power system risk assessment considering primary and secondary coupled multiple faults

ZHANG Lu<sup>1</sup>, XIONG Zhangmin<sup>2</sup>, WANG Jian<sup>2</sup>, NAN Dongliang<sup>1</sup>, ZHAO Qi<sup>1</sup>, XIONG Xiaofu<sup>2</sup>

(1. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China;

2. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** To comprehensively assess the risk of multiple faults that are due to transmission line and hidden faults in secondary systems during severe weather, a risk assessment method for power systems considering primary and secondary coupled multiple faults is proposed. First, the characteristics of transmission line faults caused by meteorological disasters are analyzed, and the characteristics of primary and secondary coupled multiple faults are summarized. Second, a primary and secondary coupled multiple fault model is established by considering the fault probability of transmission lines and protection devices. Then, a Latin hypercube sampling method is applied to quickly generate the initial fault set and evaluate the loss of load, node voltage out-of-limit, branch power flow out-of-limit, and other risk indices. Finally, the proposed method is tested using the IEEE39-node system. The results reveal that the power system faces more serious risks when considering primary and secondary coupled multiple faults; the use of Latin hypercube sampling allows taking into account fault probability distribution differences of transmission lines within different meteorological subareas and improve computational efficiency; multidimensional risk ranking can effectively screen critical lines and buses that affect power grid risk within severe weather subareas, and provide a decision basis for power grid risk prevention and weak link management.

This work is supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 52277079).

**Key words:** power system; coupling of primary and secondary; multiple fault; risk assessment; severe weather

## 0 引言

随着西电东送等跨区、跨省电网互联规模不断

增大, 同塔多回、交叉跨越、密集通道等输电线路越来越多, 受到外部极端天气、自然灾害、网络攻击等因素影响, 以及内部保护、稳控等二次系统失效, 引发多重故障的风险有增无减。梳理近年来发生的多起大停电事故, 发现同时多重故障和相继多重故障是许多大停电事故的主要原因。例如, 2016

基金项目: 国家自然科学基金项目资助(52277079); 重庆市出站留(来)渝博士后择优项目资助(2020LY23)

年的澳大利亚大停电<sup>[1]</sup>，是由极端天气引发线路故障，继而导致风电机组大规模脱网造成。2011年的美墨大停电<sup>[2]</sup>，则是由异常天气叠加调度管理模式缺陷引发；2012年的印度大停电<sup>[3]</sup>、2018年巴西大停电<sup>[4]</sup>均是由潮流转移引起保护误动作及安控策略的缺陷造成。由此可以看出，电网故障常常是由气象灾害所引发，而当系统初始故障发生后，如果二次设备不正确动作，则会导致多个相邻设备跳闸，扩大故障影响范围，推动连锁故障的发生与发展。

目前，已有不少考虑二次设备故障对电网运行风险影响的研究。对于继电保护不正确动作概率模型和风险评估，文献[5]基于关联规则挖掘与组合赋权-云模型提出一种二次设备运行状态风险评估方法，兼顾了状态评估分析过程中的随机性与模糊性。文献[6]分析了保护、断路器失效对输电线路停运的影响，提出了结合线路完整模型及序贯蒙特卡洛仿真的输电系统可靠性分析方法。文献[7]研究了故障电流限制器对断路器和其他元件时变故障率的影响，并以此评估系统风险。文献[8]研究了继电保护隐性故障的概率模型，从二次设备角度衡量系统的连锁故障风险，并提供了相应的预防策略。上述研究大多只考虑二次设备运行风险隐患，却忽略了一次设备故障导致保护隐性故障暴露，继而引发多重故障的发展模式，因而不能全面反映系统的多重故障风险。

针对气象灾害导致一次设备(输电线路)故障引发的系统风险评估方面，文献[9]提出一种自然灾害下高风险多重故障集快速生成方法，通过计算群发故障和相继故障的组合概率，分析了高风险预想故障导致的电网风险。文献[10]研究了强风、冰风暴等极端天气对架空输电线路安全的影响，应用所提的风偏放电概率预警模型，实现短期风速预报下线路风偏放电概率预警和电网风险评估。文献[11]基于风险概率、线路故障输送能力损失值和风险社会影响系数，建立多种自然灾害下架空输电线路运行风险评估体系，并采用改进层次分析法计算不同自然灾害的风险权重，提高评估结果的准确性。

综上所述，现有研究要么侧重考虑恶劣天气下一次设备的多重故障，要么侧重考虑二次系统隐性故障导致的连锁跳闸风险，缺乏综合考虑一二次设备耦合引起的多重故障风险。鉴于此，本文在传统风险评估方法的基础上，提出计及一二次耦合多重故障的电力系统风险评估方法。首先，分析气象灾害导致输电线路故障的特点，总结一二次耦合多重故障的特点。其次，综合考虑输电线路、保护装置的失效概率，建立一二次耦合多重故障模型。然后，

应用拉丁超立方抽样实现初始故障集的快速生成，并采用拓扑搜索遍历所有可能的耦合多重故障场景，评估系统失负荷、节点电压越限、支路潮流越限等风险指标。最后，采用 IEEE-39 节点系统对所提方法的效果进行验证。

## 1 电网多重故障特点分析

### 1.1 气象灾害导致的多重故障特点

输电线路暴露在恶劣气象环境之中，其故障概率会显著增加，并可能引发多重故障，甚至引发大系统解列等严重事故。恶劣气象环境中输电线路多重故障形态属于典型的共因模式故障，即同一外部原因引起多个故障同时发生的事件，这些故障虽然同时发生，但是故障之间没有相互因果关系<sup>[12]</sup>。这种气象环境相依的共因故障，意味着只考虑输电线路与气象环境间的相依性，而非线路与线路之间的相关性，其多重故障仍是相互独立的。特别是密集输电通道，由于相邻线路间距很小，输电通道排布密集，同一区域的输电通道在气象因素的影响下往往呈现出相同的形态。近年来，密集输电通道发生短时多重故障的案例也时有报道，例如 2017 年 4 月 3 日华中某电网 500 kV SZ-I 线、220 kV ZY-I 线相继 16 min 跳闸停运；2018 年 3 月 3 日西南某地山火造成 220 kV BD 线、HD 线同时跳闸停运，均是密集输电通道在山火等自然灾害影响下发生多重故障。

### 1.2 一二次耦合多重故障特点分析

保护装置存在拒动问题是典型的隐性故障，当输电线路和变压器等一次设备正常运行时，隐性故障不会暴露，因而不会产生严重后果；但是，当一次设备发生故障，保护装置缺陷就会暴露出来，继而造成停运范围扩大，引发更为严重的后果<sup>[13]</sup>。目前，有关单一故障引发潮流转移，导致距离 III 段或过负荷保护等后备保护动作(非期望误动)而引发的连锁故障的传播特点和风险评估已有较多研究。现有的电网过负荷保护多整定成过负荷时发送信号，误动风险已经不突出<sup>[14]</sup>。而保护拒动会扩大故障停电范围，后果更严重。图 1 为一二次设备耦合故障动作示意图，其中 MP 为主保护装置，BP 为远后备保护装置。

当线路 L 发生故障时，若发生保护拒动行为，系统会自动启动失灵保护跳开所有相邻元件，依据保护拒动位置，可将故障扩大范围划分为以下 3 种情况。

1) M 侧保护拒动，线路 L 及其在 M 侧的全部相邻线路将跳闸停运；

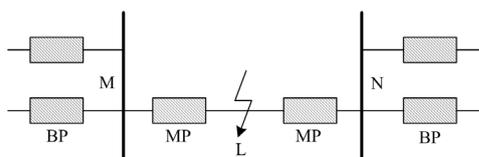


图1 一二次设备耦合故障保护动作示意图

Fig. 1 Schematic of protection action for primary and secondary equipment coupled faults

2) N侧保护拒动, 线路L及其在N侧的全部相邻线路将跳闸停运;

3) 两侧保护同时拒动, 则线路L及其两侧全部相邻线路将跳闸停运。

根据国家电网公司公布的近年来我国继电保护的运行经验, 保护动作正确率在98%以上, 两侧同时发生拒动是极小概率事件, 可以不纳入分析。由于考虑了保护装置的隐性故障, 在分析多重故障风险时研究范围将更加全面。

## 2 考虑一二次耦合的多重故障风险模型

### 2.1 不同天气条件下输电线路故障概率模型

由于输电线路特别是超特高压线路, 具有输电距离长、气象跨区大等特点, 且在极端气象灾害时, 存在多气象因素组合作用, 增大了线路故障概率。因此, 为了得到一次设备的故障概率模型, 根据1.1节的分析, 按气象条件生成输电线路的多重故障概率, 如表1所示。

表1 按气象条件优化多重故障概率产生方式

Table 1 Multiple fault probability generation method optimized by meteorological conditions

气象条件	故障类型	多重故障概率产生方式
正常天气	偶然故障	多年平均故障率, 在线监测识别故障及缺陷
恶劣天气	放电故障	输电通道风险评估得到的风偏、雷击、 舞动、山火等跳闸概率
灾害天气 或 极端天气	放电故障 或 结构失效	输电通道风险评估得到的风偏、雷击、 舞动、山火等跳闸概率, 覆冰、风灾导致的断线倒塔概率

在实际应用中, 考虑到绝大多数时间是正常天气, 且极端天气发生时为了快速生成多重故障集, 需要对气象条件进行筛选过滤。本文参考气象灾害预警等级, 将气象条件分为正常天气、恶劣天气、灾害天气和极端天气4种情况。按照输电线路设计气象条件(设计温度、风速、冰厚等), 可以采用按天气状态统计的故障率计算故障概率, 也可采用根据具体气象参数计算得到的结构失效或电气失效故障概率<sup>[15-18]</sup>。

本文采用按天气状态统计的故障率计算输电线

路的故障概率, 考虑短时间 $\Delta t$ 内(例如数小时~1天)天气情况基本保持不变, 简化认为输电线路故障率也保持不变, 并假定在恶劣天气持续的较短时间内线路的故障不可修复, 此时线路故障停运概率可用指数模型表示。因此, 输电线路在不同气象条件下发生故障的概率为

$$P_{L_f} = 1 - e^{-\lambda_{ave(w)} \Delta t} \quad (1)$$

式中:  $P_{L_f}$ 为输电线路的故障概率, %;  $\lambda_{ave(w)}$ 为该输电线路在气象条件 $w$ 下的年均值故障率, 并折算到次/(km·h);  $\Delta t$ 为评估时间, h。

### 2.2 二次设备失效概率模型

拒动和误动是二次设备失效的表现形式。我国输电线路上普遍带有自动重合闸功能, 能够降低瞬时性故障导致的线路停运, 也可有效纠正保护误动。加上智能变电站信息传输网络化, 各种电磁干扰影响更小, 大大降低了保护误动发生的可能<sup>[19]</sup>。因此, 本文只针对保护拒动情况进行分析。

为分析保护拒动概率, 将保护拒动情况分为一类拒动和二类拒动。一类拒动是指二次系统发生回路断线、硬件失效等导致跳闸信号不能正确产生、传输的拒动模式。一类拒动的二次元件失效概率可用指数模型表示, 如式(2)。

$$P_{R1} = 1 - e^{-\lambda_{R1} \Delta t} \quad (2)$$

式中:  $P_{R1}$ 为一类拒动的二次元件失效概率;  $\lambda_{R1}$ 为一类拒动的失效率。

二类拒动是指由保护装置运行环境参数影响而导致保护拒动的拒动模式, 其概率用 $P_{R2i}$ 表示,  $P_{R2i}$ 描述了 $n$ 套保护中第 $i$ 套的二类拒动概率。

综合以上两类拒动场景, 保护装置的拒动概率可集中表示为

$$P_R = 1 - (1 - P_{R1}) \left( 1 - \prod_{i=1}^n P_{R2i} \right) \times P_{L_f} \approx \left[ P_{R1} + \prod_{i=1}^n P_{R2i} \right] \times P_{L_f} \quad (3)$$

式中,  $P_R$ 为保护装置的拒动概率, 计算故障率的故障次数来源于多年历史统计数据。

由于保护动作切除故障的前提包含断路器的正确动作, 因此需要将断路器故障导致不能跳闸的情况纳入二次设备失效概率模型。本文采用文献[20]建立的断路器失效的威布尔比例风险模型, 即

$$\lambda(t_n; X) = \frac{1.145}{10000} \left( \frac{t_n}{10000} \right)^{1.145-1} \times \exp(2.689X_1 + 0.726X_2) \quad (4)$$

式中:  $t_n$ 为断路器的动作次数;  $X_1$ 为设备状态;  $X_2$ 为天气条件。在设备状态评价的基础上, 按文献[20]

中设备状态等级对协变量  $X_1$  进行取值；再根据天气条件对协变量  $X_2$  进行取值，结合设备的具体时刻  $t$  或动作次数  $t_n$ ，将数据代入公式便可求得当前设备的故障率。

### 2.3 一二次设备耦合故障概率模型

目前，我国高压输电线路基本上都配置了 2 套不同原理的主保护和后备保护。输电线路的主保护一般采用纵联保护，后备保护则以距离保护、零序保护为主<sup>[21]</sup>。由于主、后备保护的原理不同，动作时限也不一样，并且 2 套保护装置相互独立，因此本文在进行多重故障风险分析时将它们分开考虑，建立一二次耦合故障概率模型，如图 2 所示。

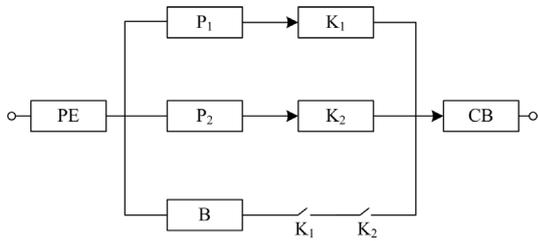


图 2 一二次设备故障概率模型

Fig. 2 Probability model of primary and secondary coupled multiple faults

图 2 反映了输电线路与单侧保护装置之间的耦合关系，其中，PE 为一次设备； $P_1$ 、 $P_2$  分别为第一套、第二套主保护；B 为后备保护；CB 为断路器。本文通过寻找继电保护系统主保护与后备保护之间的关系，分析一次设备故障和保护拒动引起的多重故障。设一次设备故障概率为  $P_{PE}$ ，第一、二套主保护和后备保护装置的拒动概率分别为  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ ，断路器正常工作概率为  $P_{CB}$ 。分析串并联模型可以得到系统只发生一次设备停运的概率  $P_{Normal}$  为

$$P_{Normal} = P_{PE} (1 - P_1 P_2) P_{CB} \quad (5)$$

系统发生主保护拒动、后备保护正确动作的耦合停运概率  $P_{Failure}$  为

$$P_{Failure} = P_{PE} (P_1 P_2 - P_1 P_2 P_3) P_{CB} \quad (6)$$

将保护设备扩展到线路两侧，依据该模型，即可合理评估一二次设备耦合情况下系统运行风险。

## 3 电网多重故障风险评估

### 3.1 多重故障风险评估指标

电力系统的风险是对可能性事故后果的综合度量。文献[22]将系统的风险概率指标定义为事故发

生概率与事故严重度的乘积，如式(7)。

$$R_{Risk} = P_{Event} \cdot I_{Event} \quad (7)$$

式中： $R_{Risk}$  为系统风险概率指标； $P_{Event}$  为事故发生概率； $I_{Event}$  为事故严重度。

随着初始故障后线路跳闸，系统将发生潮流转移，考虑到输电线路上的负荷过载和母线电压越限能够有效反映电网故障后的新形态，同时连锁故障下负荷损失量的大小是衡量故障严重程度的重要依据，因此本文选定的多重故障风险评估指标如下。

#### 1) 电压越限风险

定义节点  $i$  电压越限风险和系统综合电压越限风险分别为

$$R_i(u) = P_r(u_i) \cdot S_{ev}(w_i) \quad (8)$$

$$R(u) = \sum_{i=1}^I R_i(u) \quad (9)$$

式中： $R_i(u)$  表示  $i$  节点的电压越限风险值； $R(u)$  表示系统综合电压越限风险； $P_r(u_i)$  表示  $i$  节点电压越限概率； $S_{ev}(w_i)$  表示  $i$  节点电压越限严重度； $I$  为系统总节点数。

我国电力系统通常规定电压安全运行范围为 0.95~1.05 p.u.，因此  $i$  节点电压越限值可表示为

$$w_i = \begin{cases} 0.95 - U_i, & U_i < 0.95 \\ 0, & 0.95 \leq U_i \leq 1.05 \\ U_i - 1.05, & U_i > 1.05 \end{cases} \quad (10)$$

式中： $U_i$  为  $i$  节点电压标么值； $w_i$  为  $i$  节点电压越限值。

采用风险偏好型效用函数表示电压越限严重度<sup>[23]</sup>，如式(11)所示。

$$S_{ev}(w_i) = \frac{e^{w_i} - 1}{e - 1} \quad (11)$$

#### 2) 潮流越限风险

定义支路  $b$  的潮流越限风险和系统综合潮流越限风险分别为

$$R_b(s) = P_r(s_b) \cdot S_{ev}(w_{sb}) \quad (12)$$

$$R(s) = \sum_{b=1}^B R_b(s) \quad (13)$$

式中： $R_b(s)$  为支路  $b$  的潮流越限风险； $R(s)$  为系统综合潮流越限风险； $s_b$  表示支路  $b$  实际传送功率； $P_r(s_b)$  为支路  $b$  发生潮流越限概率； $w_{sb}$  表示支路  $b$  的潮流越限值； $S_{ev}(w_{sb})$  为支路  $b$  的潮流越限严重度； $B$  为系统总支路数。

支路  $b$  的潮流越限值可表示为

$$w_{sb} = \begin{cases} |s_b| - s_0, & |s_b| \geq s_0 \\ 0, & |s_b| < s_0 \end{cases} \quad (14)$$

式中,  $s_0$  一般取该支路功率限额的 0.9 倍。

支路潮流超限严重度同样采用风险偏好型效用函数:

$$S_{ev}(w_{sb}) = \frac{e^{w_{sb}} - 1}{e - 1} \quad (15)$$

### 3) 失负荷风险

电网负荷损失主要发生在因故障导致电网解列形成孤岛, 为维持功率平衡而切除负荷, 以及线路过载保护动作或低电压保护动作导致切机、切负荷。因此, 定义失负荷风险值为

$$R(l) = P_r(l) \cdot S_{ev}(w_l) \quad (16)$$

式中:  $R(l)$  表示系统失负荷风险值;  $P_r(l)$  表示系统失负荷概率;  $S_{ev}(w_l)$  表示失负荷严重度。

定义失负荷严重度函数为单一场景下系统失负荷量与系统总负荷量的比值, 如式(17)。

$$S_{ev}(w_l) = \frac{w_l}{S(l)} \quad (17)$$

式中:  $w_l$  为单一场景下系统失负荷量;  $S(l)$  为系统总负荷量。

本文同时采用失负荷概率  $LOLP$  和失负荷量  $EDNS$  进行失负荷风险评估:

$$LOLP_i = \sum_{S \in F} \frac{w_{il}}{M} \quad (18)$$

$$EDNS_i = \sum_{S \in F} \frac{w_{il}}{M} \times L_i \quad (19)$$

$$LOLP = \sum_{i \in I} LOLP_i \quad (20)$$

$$EDNS = \sum_{i \in I} EDNS_i \quad (21)$$

式中:  $LOLP_i$  为负荷点  $i$  的失负荷概率;  $LOLP$  为系统总失负荷概率;  $EDNS_i$  为负荷点  $i$  的期望缺供电力;  $EDNS$  为系统总的期望缺供电力;  $F$  为失负荷状态集;  $I$  为负荷点集合;  $M$  为系统总抽样次数;  $L_i$  为负荷点  $i$  的负荷总量;  $w_{il}$  表示负荷点  $i$  失负荷的次数。

为简化分析过程, 本文采用基于直流潮流的最优切负荷模型, 将机组出力分析、负荷削减简化为线性规划问题, 以此计算系统总体失负荷量。将目标函数定为最小失负荷量, 约束条件包含有功功率平衡、系统潮流方程以及发电机出力限制, 即

$$f = \min \sum_{i \in N_G} w_i \quad (22)$$

$$\begin{aligned} T(S) &= A(S)(P_G - P_D + P_C) \\ \sum_{i \in G_{set}} P_{Gi} + \sum_{i \in D_{set}} P_{Ci} &= \sum_{i \in D_{set}} P_{Di} \\ \text{s.t. } P_{Gi}^{\min} &\leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max} (i \in G_{set}) \\ 0 &\leq P_{Ci} \leq P_{Di} (i \in D_{set}) \\ |T_k(S)| &\leq T_k^{\max} (k \in L_{set}) \end{aligned} \quad (23)$$

式中:  $N_G$  为系统发电母线的集合;  $T(S)$  为停运状态的有功潮流向量;  $P_G$  和  $P_D$  分别为发电输出和负荷功率向量;  $A(S)$  为  $S$  停运状态的有功潮流和注入功率间的关系矩阵;  $P_C$  为负荷削减向量;  $P_{Gi}$ 、 $P_{Di}$ 、 $P_{Ci}$  和  $T_k(S)$  分别为  $P_G$ 、 $P_D$ 、 $P_C$  和  $T(S)$  的元素,  $P_{Gi}^{\min}$ 、 $P_{Gi}^{\max}$  和  $T_k^{\max}$  分别为  $P_{Gi}$  和  $T_k(S)$  的限值;  $G_{set}$ 、 $D_{set}$  和  $L_{set}$  分别为系统发电机母线集合、系统负荷母线集合和支路集合。

综合考虑一二次耦合多重故障对系统风险指标的影响, 计算系统的风险值。

$$S_{wq}(x) = \frac{1}{J} \sum_{j=1}^J S_{evj}(x) + \frac{1}{K} \sum_{j=1}^K S_{evj}(x), \quad (24)$$

$$x \in \{w_i, w_{sb}, w_l\}$$

$$R_{cp}(x) = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n [(1 - P_R) \cdot S_{lq}(x) + P_R \cdot S_{wq}(x)], \quad (25)$$

$$x \in \{w_i, w_{sb}, w_l\}$$

式中: 假设抽样得到的总场景数为  $n$ , 单一场景下系统故障线路  $M$  侧拒动产生的状态数为  $J$ ;  $N$  侧拒动产生的状态数为  $K$ ;  $S_{wq}(x)$  为第  $q$  个场景下保护拒动的系统严重度函数;  $S_{lq}(x)$  为第  $q$  个场景下保护正确动作的系统严重度函数;  $R_{cp}(x)$  为考虑一二次设备耦合下的系统风险值;  $S_{evj}(x)$  为第  $j$  种拒动状态下的系统严重度函数;  $x$  为电压超限后果、潮流超限后果及失负荷后果。

同时, 为了对系统面临的风险进行全面的描述, 排序搜寻电网薄弱环节, 定义系统综合严重度指标为

$$S_{ev} = \alpha \sum_{i=1}^I S_{ev}(w_i) + \beta \sum_{k=1}^K S_{ev}(w_{sb}) \quad (26)$$

式中:  $S_{ev}$  为系统综合严重度指标;  $\alpha$  和  $\beta$  分别为节点电压超限严重度函数与支路潮流超限严重度函数的权值。

## 3.2 基于拉丁超立方抽样的风险评估

在进行电网风险后果分析时, 首先需要生成电网运行场景集, 以此来模拟系统的实际运行状况。为提高故障集的生成效率, 本文采用拉丁超立方抽

样方法进行多重故障抽样。作为一种特殊的多维分层抽样法，拉丁超立方抽样可以用更少的抽样次数来准确模拟系统的状态分布<sup>[24]</sup>。相较于蒙特卡洛抽样法，拉丁超立方以分层抽样代替均匀抽样，避免了大量重复场景的生成，大大降低了样本规模，提高了计算速度。

对系统内的  $n$  个元件，按抽样次数  $m$  分层抽取数值，得到  $m$  组数据，其中每组包含  $n$  个位于 0~1 中的随机数  $r_1, r_2, \dots, r_n$ ，将得到的随机数与元件故障概率  $F_n$  进行对比，判断元件工作状态。

$$\begin{cases} r_n > F_n, \text{元件正常运行} \\ r_n \leq F_n, \text{元件故障停运} \end{cases} \quad (27)$$

因此，若抽取到的随机数  $r_k (k=1, \dots, n)$  大于元件的故障概率  $F_k (k=1, \dots, n)$ ，表示元件  $k$  处于正常运行状态，反之则表示元件  $k$  处于故障停运状态。依次对比判断，可得到  $m$  个场景下的系统运行状态。

计及一二次耦合风险评估流程如图 3 所示。

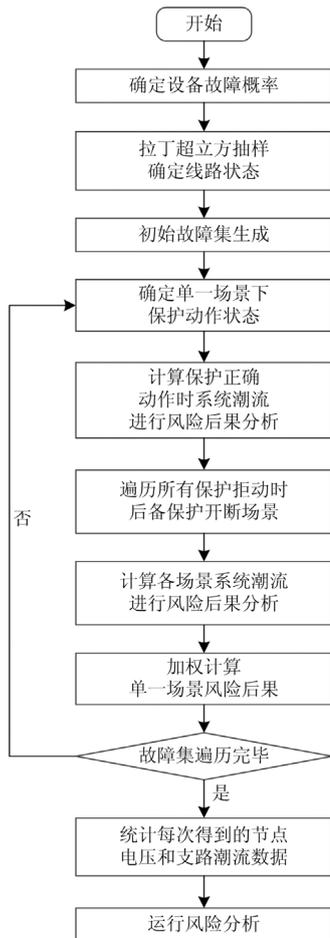


图 3 计及一二次耦合的多重故障风险评估流程

Fig. 3 Flowchart of risk assessment considering primary and secondary coupled multiple faults

依据一二次设备耦合模型，对每个初始故障遍历所有可能的保护动作断开线路的子场景，针对每个子场景分别进行潮流分析，再根据 3.1 节的各项指标计算公式，即可得到总场景下各项风险指标。

#### 4 算例分析

本文以 IEEE39 节点系统为例，基于 Python 构建所提出的一二次耦合风险评估模型。图 4 为 IEEE39 节点系统的接线图。

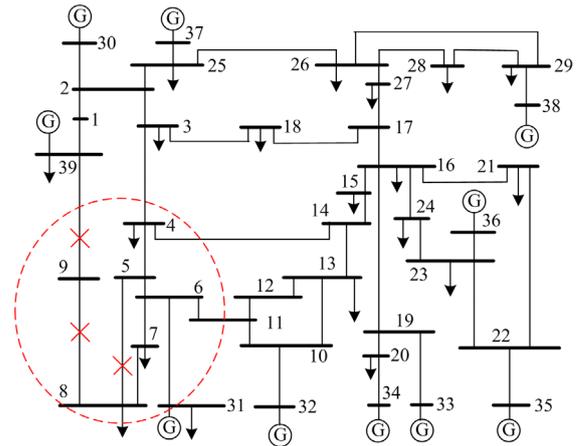


图 4 IEEE39 节点系统接线图

Fig. 4 One line diagram of the IEEE39-node power system

依据 2.1 节气象条件分类，本文主要分析正常天气、恶劣天气、灾害天气及极端灾害 4 类气象条件，假设不同天气落区集中覆盖的线路“5-8”、线路“8-9”及线路“9-39”3 处。

表 2 列出了不同气象条件下灾害落区中的线路故障概率，灾害天气落区内线路故障概率参考 2.1 节中指数模型且依据线路长度计算<sup>[25]</sup>。设定灾害落区中线路故障概率由中心向边缘逐级递减，灾害落区外的线路及正常天气下的线路初始停运概率选为各线路历史停运概率。

为验证本文所提出的一二次耦合风险评估模型的有效性，对比传统多重故障风险评估模型，设置以下 3 组仿真场景。

场景 1：多重故障情景下保护正常动作，只有抽取到的故障线路发生停运；

场景 2：故障线路首端发生保护拒动，抽取到的故障线路和与该线路首端相连的全部相邻上一级线路停运；

场景 3：故障线路末端发生保护拒动，抽取到的故障线路和与该线路末端相连的全部相邻上一级线路停运。

如第 1.2 节分析，线路两侧保护同时发生拒动

是极小概率事件, 因此, 本文假设场景 2、3 每次只考虑故障线路的单侧保护装置失效拒动, 同时采用  $N - k (k = 1, 2, \dots)$  事件生成初始故障集。

依据 3.2 节, 选取拉丁超立方抽样生成初始故障集, 抽样次数设为 10 000 次。保护不正确动作时

线路 M 侧和 N 侧拒动概率均取为 1%。场景 1 对应只考虑一次设备故障的风险分析, 综合分析场景 2、3 可得到计及一二次耦合的系统多重故障风险。

表 2 IEEE39 节点系统线路故障概率

Table 2 Transmission line fault probability of the IEEE39-node power system

线路	不同天气落区内故障概率				线路	故障概率	线路	故障概率
	极端天气	灾害天气	恶劣天气	正常天气				
1-2	$5.00 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^{-2}$	$1.00 \times 10^{-3}$	$4.38 \times 10^{-4}$	2-3	$3.78 \times 10^{-4}$	17-18	$6.50 \times 10^{-4}$
1-39	$2.50 \times 10^{-1}$	$5.00 \times 10^{-2}$	$5.00 \times 10^{-3}$	$5.82 \times 10^{-4}$	2-25	$4.45 \times 10^{-4}$	17-27	$5.82 \times 10^{-4}$
3-4	$1.18 \times 10^{-2}$	$2.35 \times 10^{-3}$	$2.35 \times 10^{-4}$	$5.48 \times 10^{-4}$	3-18	$4.34 \times 10^{-4}$	21-22	$5.14 \times 10^{-4}$
4-5	$5.88 \times 10^{-2}$	$1.18 \times 10^{-2}$	$1.18 \times 10^{-3}$	$3.40 \times 10^{-5}$	10-11	$2.23 \times 10^{-4}$	22-23	$5.82 \times 10^{-4}$
4-14	$1.18 \times 10^{-2}$	$2.35 \times 10^{-3}$	$2.35 \times 10^{-4}$	$6.16 \times 10^{-4}$	10-13	$6.85 \times 10^{-4}$	23-24	$3.77 \times 10^{-4}$
5-6	$5.88 \times 10^{-2}$	$1.18 \times 10^{-2}$	$1.18 \times 10^{-3}$	$5.82 \times 10^{-4}$	13-14	$4.34 \times 10^{-4}$	23-36	$4.45 \times 10^{-4}$
5-8	$1.18 \times 10^{-1}$	$2.35 \times 10^{-2}$	$2.35 \times 10^{-3}$	$5.65 \times 10^{-4}$	14-15	$3.77 \times 10^{-4}$	25-26	$4.90 \times 10^{-4}$
6-7	$1.18 \times 10^{-2}$	$2.35 \times 10^{-3}$	$2.35 \times 10^{-4}$	$2.63 \times 10^{-4}$	15-16	$4.68 \times 10^{-4}$	26-27	$6.03 \times 10^{-4}$
6-11	$1.18 \times 10^{-2}$	$2.35 \times 10^{-3}$	$2.35 \times 10^{-4}$	$5.02 \times 10^{-4}$	16-17	$3.06 \times 10^{-4}$	26-28	$4.77 \times 10^{-4}$
7-8	$5.88 \times 10^{-2}$	$1.18 \times 10^{-2}$	$1.18 \times 10^{-3}$	$2.30 \times 10^{-5}$	16-19	$1.10 \times 10^{-5}$	26-29	$2.50 \times 10^{-5}$
8-9	$3.39 \times 10^{-1}$	$6.79 \times 10^{-2}$	$6.79 \times 10^{-3}$	$2.30 \times 10^{-5}$	16-21	$4.73 \times 10^{-4}$	28-29	$4.52 \times 10^{-4}$
9-39	$5.00 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-1}$	$1.00 \times 10^{-2}$	$6.85 \times 10^{-4}$	16-24	$6.00 \times 10^{-4}$	—	—

#### 4.1 仿真结果及分析

##### 1) 失负荷风险

系统失负荷风险如图 5—图 7 所示。通过分析不同气象条件下系统各项失负荷风险指标, 可以看出随着天气恶劣程度的加剧, 失负荷概率、失负荷量、失负荷风险值均呈梯次大幅增加。同时, 相较于保护正确动作情况, 保护拒动情况下的各项失负荷风险指标明显更高。一方面说明了更极端的天气下电网故障概率更高, 由此引发的失负荷风险更大; 另一方面, 由于保护拒动引发下级线路断开, 扩大了事故范围, 也进一步加剧了事故带来的损失。如图 6 所示, 系统失负荷量在保护正确动作和拒动时对比最为明显, 说明考虑一二次耦合的多重故障情况下系统面临的风险更为严峻。

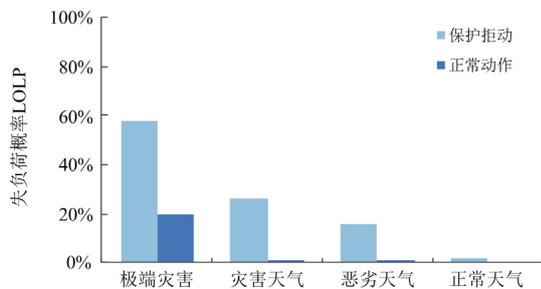


图 5 不同气象条件下系统失负荷概率

Fig. 5 LOLP of the system in different meteorological conditions

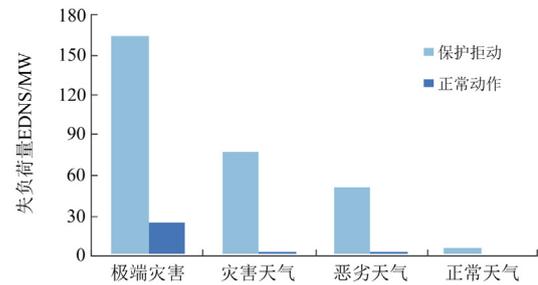


图 6 不同气象条件下的系统期望缺供电力

Fig. 6 EDNS of the system in different meteorological conditions

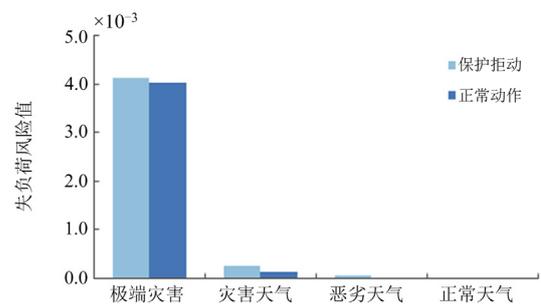


图 7 不同气象条件下系统失负荷风险值

Fig. 7 Risk of load loss of the system in different meteorological conditions

##### 2) 潮流越限和电压越限风险

电力系统的节点电压和支路潮流越限风险, 主

要与电网的潮流分布、设备负载能力和设备故障概率有关。表 3 和表 4 对不同仿真场景下潮流越限及电压越限风险值最高的 5 条线路和母线进行了统计,可以看出,在不同仿真场景下,对全系统风险指标贡献最多的 5 条线路和母线是相同的。潮流越限风险值最高的 5 条线路对应为 2-3、4-14、13-14、10-13、6-7,而电压越限风险值最高的 5 条母线分别为 9、39、1、8、7。对各场景下的风险结果排序,可以溯源电网薄弱环节。以上排序筛查出的输电线路和母线均位于天气落区附近,且越靠近气象灾害落区中心,风险值越大。

表 3 不同仿真场景下的线路潮流越限风险

Table 3 Branch power flow out-of-limit risk in different simulation scenarios

线路编号	保护状态	正常天气	恶劣天气	灾害天气	极端灾害
2-3	正常	$1.577 \times 10^{-4}$	$2.629 \times 10^{-3}$	$5.290 \times 10^{-3}$	$1.382 \times 10^{-2}$
	拒动	$2.715 \times 10^{-4}$	$2.628 \times 10^{-3}$	$5.315 \times 10^{-3}$	$1.406 \times 10^{-2}$
4-14	正常	$6.441 \times 10^{-5}$	$5.538 \times 10^{-4}$	$1.125 \times 10^{-3}$	$3.900 \times 10^{-3}$
	拒动	$4.817 \times 10^{-4}$	$6.965 \times 10^{-4}$	$1.136 \times 10^{-3}$	$4.181 \times 10^{-3}$
13-14	正常	$5.366 \times 10^{-5}$	$3.687 \times 10^{-4}$	$9.648 \times 10^{-4}$	$3.260 \times 10^{-3}$
	拒动	$2.580 \times 10^{-4}$	$4.983 \times 10^{-4}$	$7.397 \times 10^{-4}$	$2.864 \times 10^{-3}$
10-13	正常	$6.501 \times 10^{-5}$	$3.174 \times 10^{-4}$	$6.209 \times 10^{-4}$	$2.453 \times 10^{-3}$
	拒动	$6.968 \times 10^{-5}$	$2.233 \times 10^{-4}$	$8.182 \times 10^{-4}$	$2.805 \times 10^{-3}$
6-7	正常	0	$2.122 \times 10^{-4}$	$5.640 \times 10^{-4}$	$2.387 \times 10^{-3}$
	拒动	0	$1.960 \times 10^{-4}$	$6.016 \times 10^{-4}$	$2.387 \times 10^{-3}$

表 4 不同仿真场景下的母线电压越限风险

Table 4 Bus voltage out-of-limit risk in different simulation scenarios

母线编号	保护状态	正常天气	恶劣天气	灾害天气	极端灾害
9	正常	$9.725 \times 10^{-6}$	$1.002 \times 10^{-2}$	$3.988 \times 10^{-2}$	$2.436 \times 10^{-1}$
	拒动	$7.100 \times 10^{-4}$	$1.011 \times 10^{-2}$	$4.251 \times 10^{-2}$	$2.108 \times 10^{-1}$
39	正常	0	$7.936 \times 10^{-3}$	$3.276 \times 10^{-2}$	$1.790 \times 10^{-1}$
	拒动	$1.350 \times 10^{-5}$	$1.039 \times 10^{-2}$	$3.566 \times 10^{-2}$	$1.949 \times 10^{-1}$
1	正常	0	$1.569 \times 10^{-3}$	$6.460 \times 10^{-3}$	$4.076 \times 10^{-2}$
	拒动	$1.200 \times 10^{-5}$	$2.320 \times 10^{-3}$	$6.233 \times 10^{-3}$	$3.994 \times 10^{-2}$
8	正常	$1.137 \times 10^{-3}$	$4.599 \times 10^{-3}$	$8.206 \times 10^{-3}$	$2.452 \times 10^{-2}$
	拒动	$1.623 \times 10^{-3}$	$5.081 \times 10^{-3}$	$9.202 \times 10^{-3}$	$2.699 \times 10^{-2}$
7	正常	$1.152 \times 10^{-3}$	$4.559 \times 10^{-3}$	$7.523 \times 10^{-3}$	$1.597 \times 10^{-2}$
	拒动	$1.931 \times 10^{-3}$	$4.684 \times 10^{-3}$	$7.538 \times 10^{-3}$	$1.671 \times 10^{-2}$

为寻找电网中的薄弱环节,本文同时从潮流越限次数角度加以考虑,寻找气象灾害影响下系统所暴露出的薄弱部分,如图 8 所示。

在考虑一二次耦合和灾害天气情景下,统计排序各线路潮流越限次数,可以看出线路 2-3 发生越

限次数最多,其次为线路 6-7、线路 6-11 等。由于这几条线路靠近气象灾害落区,电网故障引发潮流转移时,将承担更多负荷,加之作为区域联络线本身输送了较大负荷,因此潮流越限风险也随之增加。

如图 9 所示,对比保护拒动和正确动作场景可以看出:保护拒动时系统的两种综合越限风险指标均高于保护正确动作时。灾害天气下电网风险主要受天气状况及灾害落区影响,由于线路故障概率远高于保护拒动概率,因此系统电压及潮流越限风险在保护拒动时差异并不十分明显。然而,在正常天气下,保护拒动是电网风险扩大的主要原因,此时系统在保护拒动时的越限风险指标差异较为明显。

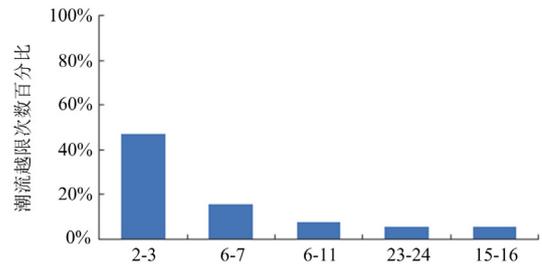
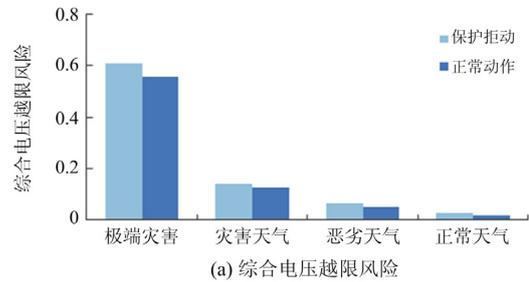
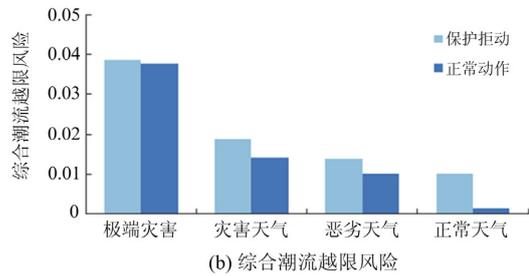


图 8 灾害天气下线路潮流越限次数百分比

Fig. 8 Percentage of branch power flow out-of-limit during disaster weather



(a) 综合电压越限风险



(b) 综合潮流越限风险

图 9 不同仿真场景下的系统综合电压/潮流越限风险

Fig. 9 System integrated voltage/ power flow out-of-limit risk in different simulation scenarios

从以上分析可以看出,计及一二次耦合的多重故障风险评估模型有效突出了天气落区下的电网薄弱环节。对于分析一二次耦合系统的多重故障风险

时, 系统失负荷风险将大大增加, 而系统电压及潮流越限风险依气象情况均有不同幅度提升。同时, 受天气落区的影响, 风险值也由落区中心向周边扩散, 灾害落区内的电网将变得更为脆弱。提前根据气象预报和气象灾害预警信息, 做好电网调度部署, 将有效降低多重故障导致的高风险事件发生的可能性。

#### 4.2 风险筛选结果分析

为筛选出所有抽样样本中最为严重的故障场景, 本文分别以系统失负荷量及综合严重度指标为标准进行排序筛选, 综合严重度指标中  $\alpha$  和  $\beta$  权值各取为 0.5, 分析极端天气下的排序筛选结果如表 5 和表 6 所示, 其中蓝色标识的故障线路为保护拒动的线路, 红色标识的故障线路为保护拒动后断开的上级线路。

表 5 不同仿真场景下的失负荷量排序筛选结果

Table 5 EDNS screening results in different simulation scenarios

保护动作情况	故障停运线路	场景类别	失负荷量/MW
保护拒动	4-14、3-4、4-5、1-2、 1-39、5-6、5-8、6-7	场景 2	1359.8
正常动作	1-39、5-8、6-7	场景 1	859.8

表 6 不同仿真场景下综合严重度指标排序筛选结果

Table 6 Comprehensive severe screening results in different simulation scenarios

保护动作情况	故障停运线路	场景类别	综合严重度指标
保护拒动	5-6、6-7、6-11、9-39	场景 3	34.145 31
正常动作	1-39、5-6、6-11、7-8、 9-39	场景 1	33.222 52

由表 5 可知, 按失负荷量排序的风险结果中, 考虑保护拒动下的最大失负荷量场景, 出现在线路 4-14 发生故障, 首端保护拒动, 引发后备保护动作断开上级线路 3-4、4-5, 导致系统形成了 5 个孤立的子网, 由于子网中的发电设备难以满足负荷需求, 系统不得不切除更多的负荷以维持正常运行。同时故障后线路停运可能形成孤立的负荷节点, 也将其计入系统失负荷情况, 其最终失负荷量为 1359.8 MW。对于只考虑一次设备故障的最大失负荷量场景, 此时系统解列为 2 个孤立的子网, 最优潮流分析下系统的失负荷量为 859.8 MW。对比两者可看出, 保护拒动相较于正常动作场景下的最高失负荷量提高了 58.15%, 说明在同一天气场景下, 计及一二次耦合下的连锁故障, 系统失负荷量风险将大大增加。对于表 6, 从按综合严重度指标排序的风险结果中

可看出, 同一气象条件下, 保护拒动相较于正常动作的最高越限均值提高了 2.78%。

以上分析表明, 计及一二次耦合多重故障时, 无论是失负荷量还是综合严重度指标, 其风险严重程度均高于只考虑一次设备多重故障, 且在失负荷量上表现得更为明显, 排序结果有效验证了考虑一二次耦合多重故障在电网风险评估中的必要性和所提方法的有效性。

## 5 结论

本文建立了考虑一二次耦合的多重故障风险模型, 应用拉丁超立方抽样法, 综合评估了恶劣天气下输电线路故障与二次系统隐性故障导致的多重故障风险。通过算例分析, 验证了考虑一二次耦合多重故障风险分析的必要性和所提方法的有效性。经过研究, 得出如下结论。

1) 相比于只考虑一次设备的多重故障, 综合考虑一二次耦合下系统的多重故障风险时, 系统失负荷风险将大大增加; 极端天气情况下, 考虑保护拒动时, 系统综合电压越限风险和综合潮流越限风险略高于保护正常动作时的风险, 而正常天气情况下, 系统越限风险受保护拒动影响升高较为明显。

2) 气象灾害落区内的输电线路故障概率更高, 采用具有分层抽样特性的拉丁超立方抽样, 生成的多重故障集包括了系统所有可能的运行场景; 相比蒙特卡洛抽样, 在降低样本规模的同时提高了抽样效率, 保证了多重故障样本的全面性。

3) 按照系统失负荷量和综合严重度函数等多维指标进行风险排序, 能够有效筛选气象灾害落区内影响电网风险的关键线路和母线, 为电网风险防控和薄弱环节治理提供决策依据。

致谢: 本文得到国网新疆电力公司电力科学研究院项目的资助, 谨此致谢。

## 参考文献

- [1] 曾辉, 孙峰, 李铁, 等. 澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J]. 电力系统自动化, 2017, 41(13): 1-6.  
ZENG Hui, SUN Feng, LI Tie, et al. Analysis of “9·28” blackout in south Australia and its enlightenment to China[J]. Power System Protection and Control, 2017, 41(13): 1-6.
- [2] 毛安家, 张戈力, 吕跃春, 等. 2011年9月8日美墨大停电事故的分析及其对我国电力调度运行管理的启示[J]. 电网技术, 2012, 36(4): 74-78.

- MAO Anjia, ZHANG Geli, LÜ Yuechun, et al. Analysis on large-scale blackout occurred in South America and North Mexico interconnected power grid on Sept. 8, 2011 and lessons for electric power dispatching in China[J]. Power System Technology, 2012, 36(4): 74-78.
- [3] 梁志峰, 葛睿, 董昱, 等. 印度“7·30”、“7·31”大停电事故分析及对我国电网调度运行工作的启示[J]. 电网技术, 2013, 37(7): 1841-1848.
- LIANG Zhifeng, GE Rui, DONG Yu, et al. Analysis of large-scale blackout occurred on July 30 and July 31, 2012 in India and its lessons to China's power grid dispatch and operation[J]. Power System Technology, 2013, 37(7): 1841-1848.
- [4] 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.
- [5] 南东亮, 王维庆, 张陵, 等. 基于关联规则挖掘与组合赋权-云模型的电网二次设备运行状态风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(10): 67-76.
- NAN Dongliang, WANG Weiqing, ZHANG Ling, et al. Risk assessment of the operation state of power grid secondary equipment based on association rule mining and combination weighting-cloud model[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(10): 67-76.
- [6] 张占龙, 么莉, 雷林绪, 等. 计及保护失效的输电网可靠性评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2016, 28(1): 79-85, 102.
- ZHANG Zhanlong, YAO Li, LEI Linxu, et al. Transmission network reliability evaluation considering protection failures[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2016, 28(1): 79-85, 102.
- [7] YOUSEFI H, MIRZAIE M, AMINIFAR F. Reliability assessment of HV substations equipped with fault current limiter considering changes of failure rate of components[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(7): 1504-1509.
- [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, 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.
- [9] 崔伟, 李武璟, 牛拴保, 等. 自然灾害下高风险多重故障集快速生成方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 197-203.
- CUI Wei, LI Wujing, NIU Shuanbao, et al. Rapid generation method of high risk multiple fault set under natural disaster[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 197-203.
- [10] WANG Jian, XIONG Xiaofu, LI Zhe, et al. Wind forecast-based probabilistic early warning method of wind swing discharge for OHTLs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 2169-2178.
- [11] 宋耐超, 王瑞琦, 李明明, 等. 多自然灾害下的架空输电线路运行风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(19): 65-71.
- SONG Naichao, WANG Ruiqi, LI Mingming, et al. Risk assessment of overhead transmission lines under multiple natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(19): 65-71.
- [12] 吴文传, 宁辽逸, 张伯明, 等. 一种考虑二次设备模型的在线静态运行风险评估方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(7): 1-5, 14.
- WU Wenchuan, NING Liaoyi, ZHANG Boming, et al. Online operation risk assessment for power system static security considering secondary devices models[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(7): 1-5, 14.
- [13] 熊小伏. 继电保护系统状态诊断及维修决策方法[M]. 北京: 中国电力出版社, 2017.
- [14] MATHEBULA V C, SAHA A K. Reliability of IEC 61850 based substation communication network architecture considering quality of repairs and common cause failures[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2022, 7(1): 174-188.
- [15] 王建, 熊小伏, 李哲, 等. 气象环境相关的输电线路故障时间分布特征及模拟[J]. 电力自动化设备, 2016, 36(3): 109-114, 123.
- WANG Jian, XIONG Xiaofu, LI Zhe, et al. Time distribution of weather-related transmission line failure and its fitting[J]. Electric Power Automation Equipment, 2016, 36(3): 109-114, 123.
- [16] 熊小伏, 王建, 袁峻, 等. 时空环境相依的电网故障模型及在电网可靠性评估中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(15): 28-35.
- XIONG Xiaofu, WANG Jian, YUAN Jun, et al. Temporal and spatial environments dependent power grid failure

- method and its application in power grid reliability assessment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(15): 28-35.
- [17] 熊小伏, 王建. 电网气象关联风险分析方法及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2019.
- [18] XU X, MITRA J, WANG T, et al. An evaluation strategy for microgrid reliability considering the effects of protection system[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016, 31(5): 1989-1997.
- [19] TAVAKOLI M, NAFAR M. Human reliability analysis in maintenance team of power transmission system protection[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2020, 5(4): 270-282.
- [20] 张璞, 张波, 王建, 等. 计及主设备时变状态的变电站短时风险评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(14): 73-81.  
ZHANG Pu, ZHANG Bo, WANG Jian, et al. Short-term risk assessment for a power substation considering the time-varying operation conditions of power equipment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(14): 73-81.
- [21] 罗泳, 李永丽, 李仲青, 等. 考虑隐性故障的继电保护系统可靠性分析及评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(1): 84-89.  
LUO Yong, LI Yongli, LI Zhongqing, et al. Assessment of the reliability of protection system considering hidden failure[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(1): 84-89.
- [22] 王一枫, 汤伟, 刘路登, 等. 电网运行风险评估与定级体系的构建及应用[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(8): 141-148.  
WANG Yifeng, TANG Wei, LIU Ludeng, et al. Construction and application of power grid operation risk assessment and rating system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(8): 141-148.
- [23] 陈朝宽, 张靖, 何宇, 等. 基于 Cornish-Fisher 级数和半不变量法的含光伏配电系统风险评估[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(2): 91-96.  
CHEN Chaokuan, ZHANG Jing, HE Yu, et al. Risk assessment of distribution system with photovoltaic based on Cornish-Fisher series and cumulant method[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(2): 91-96.
- [24] WANG X, SHENG X, QIU W, et al. Fault reconfiguration strategies of active distribution network with uncertain factors for maximum supply capacity enhancement[J]. IEEE Access, 2021, 10: 72373-72380.
- [25] 张毅明, 张忠会, 姚峰, 等. 基于风险理论的电力系统元件风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(23): 73-78.  
ZHANG Yiming, ZHANG Zhonghui, YAO Feng, et al. Risk assessment of power system components based on the risk theory[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(23): 73-78.
- 
- 收稿日期: 2022-10-05; 修回日期: 2022-11-03  
作者简介:  
张 路(1987—), 男, 硕士, 工程师, 研究方向为电力系统稳定控制; E-mail: 15212593377@163.com  
熊张恣(1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电网风险评估与气象灾害预警、电力系统保护与控制; E-mail: xiongzhangmin@foxmail.com  
王 建(1986—), 男, 通信作者, 博士(后), 副教授, 博士生导师, 研究方向为电网风险评估与气象灾害预警、电力系统保护与控制。E-mail: wangrelay@foxmail.com  
(编辑 魏小丽)