

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.231041

灾害天气下计及一二次设备耦合故障的电网短时风险评估

王建¹, 熊张恣¹, 南东亮², 张路², 欧阳金鑫¹

(1. 输变电装备技术全国重点实验室(重庆大学), 重庆 400044; 2. 国网新疆电力有限公司
电力科学研究院, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 灾害天气下电网发生短时多重故障有可能超出保护系统预设的反应能力, 一二次设备耦合影响将助推多重故障风险发展和蔓延。为此, 提出了计及一二次设备耦合故障的短时风险评估方法。首先, 分析了一次设备与二次设备之间的交互作用及其对电网短时运行风险的影响。其次, 构建了一次设备和二次设备的故障概率模型, 重点分析了一二次设备耦合故障引发保护拒动的概率。然后, 结合保护系统对超预期故障的反应能力, 提出了灾害天气下电网短时多重故障风险评估方法。最后, 采用改造的 IEEE39 节点系统对所提方法进行测试。算例结果表明: 受外界气象环境影响, 保护系统缺陷暴露导致非期望动作使得电网多重故障风险更为严重; 综合考虑灾害天气对一二次设备影响下的短时运行风险, 对于发现和消除保护系统薄弱环节及制定电网降风险运行策略具有一定参考价值。

关键词: 电力系统; 灾害天气; 多重故障; 耦合故障; 短时风险评估

Short-time risk assessment of a power grid in weather disasters considering the coupled faults of primary and secondary equipment

WANG Jian¹, XIONG Zhangmin¹, NAN Dongliang², ZHANG Lu², OUYANG Jinxin¹

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment Technology (Chongqing University), Chongqing 400044, China;
2. Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, China)

Abstract: The short-time multiple faults occurring in a power grid in a weather disaster may exceed the preset reaction ability of the protection system, and the coupling effect of primary and secondary equipment will promote the development and spread of multiple fault risk. Thus this paper proposes a short-time risk assessment method considering the coupled faults of primary and secondary equipment. First, the interaction between primary and secondary equipment and its impact on the short-time operational risk of the power grid are analyzed. Second, the fault probability model of primary and secondary equipment is constructed, especially focusing on the failure-to-trip probability of protection with regard to coupled faults of primary and secondary equipment. Then, combined with the reaction ability of the protection system to unexpected faults, a short-time multi-fault risk assessment method is proposed. Finally, the proposed method is validated using a modified IEEE39-node system. The results show that, under the influence of external meteorological environment, unexpected actions caused by the exposure of defects in the protection system make the multiple fault risk in the grid more serious. This comprehensive consideration of short-time operational risk can be useful for identifying and eliminating weak points in protection systems and formulating risk-reduction operational strategies for power grids.

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

Key words: power system; weather disaster; multiple faults; coupled fault; short-time risk assessment

0 引言

新型电力系统是我国能源体系转型的重要载体,

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)

是助力实现“双碳”目标的基础。随着新能源机组的大量接入和电网快速发展, 电力系统的容量与规模持续扩大, 电网结构日趋复杂^[1]。受外部极端天气、自然灾害影响, 内部保护、稳控等二次系统缺陷导致非期望动作, 引发多重故障的风险日益增加。例如, 2021年7月河南持续遭遇强降雨天气, 郑州

等地发生严重内涝, 多座变电站的一次和二次设备同时发生故障而全停^[2]。又如, 2021年2月美国得州受冰风暴影响, 新能源出力骤降, 跨州联络线路覆冰, 导致大停电事故^[3]。梳理发现, 一旦灾害天气引起电网多重故障, 如果保护系统不能及时准确反应, 则会导致多个相邻设备跳闸, 推动多重故障风险蔓延。因此, 有必要研究灾害天气下保护系统对故障的反应能力, 评估电网短时运行风险。

目前, 已有不少灾害天气下电网短时多重风险评估方面的研究, 主要集中在借助气象和地理信息数据, 分析一次设备或二次设备受灾概率和程度, 从而综合评估系统的风险水平。例如, 文献[4]提出了电网气象灾害故障预警方法。文献[5]提出了受复合自然灾害影响产生的多重故障风险分析方法, 分析多重自然灾害交互影响下的系统运行风险。文献[6]提出 $N-2$ 故障组合剪枝预想事故集的快速筛选方法, 获取灾害天气引发的高风险多重故障组合, 实现快速风险分析。文献[7]针对恶劣天气建立电网风险评估模型, 以强风为例评估其在移动过程中对电网的时空影响。

在计及保护系统隐性故障的风险评估方面, 现有研究侧重于建立马尔科夫状态空间模型或历史统计模型, 评估保护设备的运行可靠性。例如, 文献[8]总结了保护和安控装置隐性故障的分类方法及通用概率模型。文献[9]分析了造成保护不正确动作的各类因素, 建立保护误动模型分析多重故障风险。文献[10]分析了保护系统各环节工作原理, 建立了包含保护系统各组件在内的可靠性模型, 采用故障树法计算保护设备故障概率。文献[11]分析了各类气象灾害特点及致灾机理, 综合评估恶劣天气下线路故障与二次系统隐性故障导致的多重故障风险。文献[12]基于马尔科夫状态空间法建立保护装置隐性故障模型, 计算保护不正确动作概率, 并应用到连锁故障仿真中。现有研究多针对长时间尺度讨论保护设备的可靠性, 未能反映遭受短时极端天气影响下保护设备可靠性的时变特征。

除了继电保护的隐性故障, 还有一种情形是电网发生多重故障, 超过了保护整定计算时考虑的场景。例如, 大风导致架空输电线路发生断线故障, 集成在架空地线中的 OPGW 光纤信道也一并断开; 暴雨侵袭变电站, 站内进水导致运行设备短路的同时, 也损害了电缆沟内的通信电缆和就地保护装置, 等等。本文将此类由于极端天气条件所引发的多个一二次设备同时失效情况, 统称为超预期事故。目前, 针对灾害天气下一二次设备共因故障模式及其后果分析, 以及考虑超预期事故下的电网运行风险

评估的相关研究还未见报道。

鉴于此, 本文提出了灾害天气下计及一二次耦合故障的电网短时风险评估方法。首先, 分析一次设备与二次设备之间的交互作用及其对电网短时运行风险的影响。其次, 构建一次设备和二次设备的故障概率模型, 重点分析一二次设备耦合故障引发保护拒动的概率。然后, 结合保护系统对超预期故障的反应能力, 提出灾害天气下电网短时多重故障风险评估方法。最后, 采用改造的 IEEE39 节点系统对所提模型和方法进行测试。

1 一二次设备耦合影响分析

1.1 一次设备对二次设备的影响

关注一次设备与二次设备之间的协调性, 是确保电力系统安全运行的关键。一次设备作为供电系统的主体, 发生故障时可能影响二次设备保护、控制和监测的正常运行, 使得二次设备非正常动作。梳理一次设备对二次设备的主要影响如下。

1) 一次设备故障超过保护预期范围。一次设备状态超出二次设备的保护、控制等预设场景, 可能导致二次设备不正确动作。例如, 新能源机组的故障穿越能力影响其在网状态和出力大小, 若涉网保护整定值未能及时匹配新能源系统变化, 可能导致保护和稳控系统无法及时应对新能源机组的大规模脱网^[13]。再如, 保护配置和整定配合按照预设的故障场景, 但灾害天气引发电网短时多重故障, 可能超出保护范围, 或潮流转移引起连锁跳闸, 造成不必要的线路跳闸。

2) 一次设备故障影响二次设备通信。二次设备经由通信信道进行信息传输和交换, 以实现系统的监测、控制和保护。常见的有线通信信道主要包括铜导线、光纤以及电力线载波等, 这些信道常常随架空输电线路一并架设, 当线路断线时, 二次设备之间的通信信道也一并被切断, 导致其无法正常进行信息传输和交换, 产生信息传输延迟或导致纵联保护等二次设备不正确动作等问题。

1.2 二次设备对一次设备的影响

关注二次设备对一次设备的影响同样重要。作为对一次设备监测、控制、保护和调节的设备, 二次设备运行状态直接关系到系统的安全运行, 其对一次设备的影响可概括为以下两个方面。

1) 保护非期望动作导致事故范围扩大。当保护系统检测到一次设备处于异常运行状况或发生故障时, 通过发送跳闸命令触发断路器动作, 以保障一次设备的安全运行。但是, 当二次设备因自身缺陷发生拒动、误动等非期望动作时, 可能导致事故范

围的扩大,进一步加剧电网运行风险。

2) 控制系统失效引发系统运行失衡。二次设备产生的反馈信号经由通信回路传输至控制系统,用于调节和控制一次设备的运行状态。例如,当电网故障、直流闭锁等发生潮流转移时,由于功率不平衡可能引发低频减载、高频切机等稳控行为。然而,由于二次系统控制失效可能导致稳控装置无法按预期动作,从而影响电网安全。

1.3 一二次耦合对系统安全运行的影响

在电力系统运行中,暴雨、大风等极端天气可能同时作用于一次设备和二次设备,相较于只关注灾害天气对一次设备或二次设备的独立影响,考虑一次及二次设备间耦合作用时,此类超预期事故所导致的实际影响将更大。此外,极端气象条件下电网中的同塔多回输电线路、密集输电通道等发生多重故障往往超出了传统保护配置和保护定值的预设标准。保护发生非期望动作的概率显著提高,多重故障发生概率大大增加。考虑到一次和二次设备之间耦合作用的复杂性,如果受到极端天气影响,可能引发更为复杂的故障传递路径,影响电力系统的运行风险。因此,亟需建立一二次耦合故障概率模型,综合分析电网的短时多重故障风险,识别运行安全隐患,为电力系统调度运行与维护决策提供重要依据。

2 一二次设备耦合故障概率模型

2.1 基于数值天气预报的一次设备故障概率预测

电网中一次设备主要由发电机、变压器、输电线路、断路器和隔离开关等设备组成,由于输电线路和断路器长期暴露在自然环境中,其运行状态受天气影响较大,且处在隔离故障链条中的关键位置,因此本文重点针对输电线路和断路器设备进行故障概率分析。

1) 架空输电线路故障概率预测模型

随着信息技术和天气预报技术的快速发展,通过专业的电力气象预报,针对各类典型气象灾害,开展输电线路故障预测和电网风险预警已有较多研究^[14-19]。作者团队在气象预测及输电线路气象关联风险分析方面也有较多的经验积累,针对台风^[20]、覆冰^[21]、强对流^[22]、山火^[23]、高温^[24]和地质灾害^[25]等典型气象灾害,构建了相应的故障概率模型,用于电网气象风险预警和电力系统短时运行风险评估。本文基于现有灾害天气下输电线路故障风险分析模型,通过数值天气预报预测相应极端场景下的输电线路故障概率,具体模型不再赘述。

2) 断路器故障概率预测模型

断路器作为电力系统中用于隔离故障的一次设备,其运行状况决定了故障能否有效切除,本文依据文献[26]的威布尔比例风险模型,建立断路器的失效模型,如式(1)所示。

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

式中: λ_{CB} 为断路器失效率; t_n 为断路器的动作次数; X_1 为反映断路器设备状态的协变量; X_2 为反映天气条件对断路器故障率影响的协变量。 X_1 的取值通过模糊综合评价计算得到。而 X_2 的选取则参考相关规范^[27], 根据气象灾害预警等级进行取值。

假设断路器故障在较短时间内(小时到天)服从泊松分布,因此在时间间隔 Δt 内断路器正常运行的概率为

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

2.2 一二次设备耦合故障概率计算

2.2.1 二次设备故障阶段分析

二次设备故障概率模型可由早期故障、常时性故障和偶发性故障 3 个阶段组成。早期故障体现在保护装置设计、制造的缺陷,通常情况下,装置在出厂或现场运行之前,已经过测试将早期故障排除,故在此不做考虑。常时性故障和偶发性故障的诱因和故障机理间存在区别,因此下面分别进行讨论。

1) 常时性故障

二次设备常时性故障指的是在正常运行状态下,由于设备老化、质量问题、环境影响等原因引起的故障。常时性故障涉及二次设备中的各种元件和部件,严重时将引发二次设备非正常动作。

对某省电网智能站运行数据、检查维修报告以及现场运维信息等数据进行分析可知,二次设备运行可靠性主要由保护装置的软件、硬件及通信功能组件共同决定,二次设备各环节常时性故障诱因如图 1 所示。

在软件可靠性研究方面,采用 John Musa 模型分析,基于软件运行的历史数据和初始状态计算二次设备软件故障率。对于硬件模块,通常考虑由于老化因素诱发故障,其故障率随时间变化出现“浴盆曲线”,因此可采用 Weibull 分布函数拟合保护老化故障率随时间变化的函数。而对于通信设备,除了考虑老化失效,还须考虑网络攻击对其安全性的影响,通过攻击通信设备漏洞,攻击者可以以直接或间接的方式控制二次设备发出跳闸命令,导致断路器无故障跳闸。本文采用攻击树模型构造断路器

无故障跳闸的攻击树, 计算各个攻击场景的成功率, 进而计算网络攻击下的二次设备通信故障率^[28]。

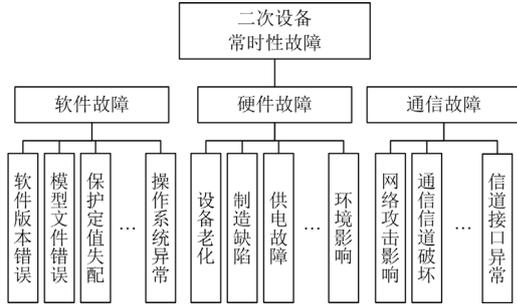


图 1 二次设备各环节常时性故障诱因

Fig. 1 Causes of steady state faults in different parts of secondary equipment

在求得二次设备软件、硬件及通信组件故障率后, 依据下文保护设备状态空间模型计算保护装置常时性故障概率。

2) 偶发性故障

二次设备非期望动作的发生除了与装置自身缺陷有关, 更多的是与恶劣天气的发生相关。在诸如大风、暴雨、雷电等灾害天气下, 二次设备的通信线缆、动作装置等元件极易受到破坏。以暴雨引发变电站内进水为例, 可能引起测量设备损坏或传感器受潮, 电流、电压等测量值出现误差, 影响二次设备对系统状态的监测和控制。严重时导致二次设备装置内部电路短路或腐蚀, 使其无法正常工作, 从而影响对输电线路、变压器等关键设备的保护。

本文关注暴露在自然环境中的二次设备测量及通信环节受极端天气破坏而产生的偶发性故障, 本地测量及通信环节故障率采用基于恶劣天气类型影响系数的故障模型计算, 再利用泊松分布计算关注时段内的故障概率^[29]。

2.2.2 保护系统拒动概率

1) 保护装置常时性故障模型

在实际工程中, 保护系统可通过维修进行故障修复, 因此将其运行状态划分为正常状态、异常状态和故障状态。其中, 正常状态是指继电保护设备能够完成既定的保护功能且无异常情况存在; 异常状态是指继电保护设备运行在异常状况下, 但完成既定保护功能的能力不受影响; 故障状态是指继电保护设备已处于失效运行状态, 失去完成既定保护功能的能力。本文选择三态累进模型描述保护设备运行状态的转移关系, 如图 2 所示。

保护的正常状态经过环境、设备老化等因素影响, 进入异常状态; 如果异常信息能够被监测并及时修复, 则装置恢复到正常状态; 如果未能被监测

并及时修复处理, 其运行状态将进一步恶化进入故障状态。同时, 保护运行在正常状态时经过突发性故障也将导致直接进入故障状态。由保护功能组件及三态累进模型建立常时性故障下保护装置状态空间模型, 如图 3 所示。

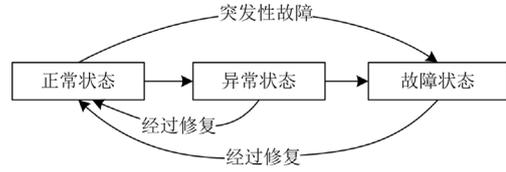


图 2 保护装置运行状态三态累进模型

Fig. 2 Three-state progressive model of protection device operational states

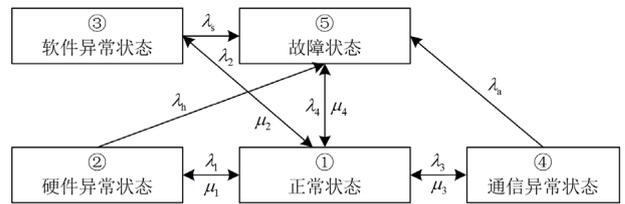


图 3 保护装置状态空间模型

Fig. 3 State-space model of protection devices

图 3 中, ①表示保护装置正常状态, ②、③、④分别表示保护装置硬件、软件、外部回路和通信处于异常状态, ⑤表示保护装置处于故障状态。 λ_1 、 λ_2 、 λ_3 分别表示保护装置硬件、软件、外部回路和通信异常率; λ_h 、 λ_s 、 λ_a 分别表示保护装置硬件、软件及通信故障率; λ_4 表示保护装置直接进入故障状态的故障率; μ_1 、 μ_2 、 μ_3 表示保护装置异常后的修复率; μ_4 表示保护装置故障后的修复率。

根据状态空间图定义状态转移矩阵为

$$A = \begin{bmatrix} \alpha & \lambda_1 & \lambda_2 & \lambda_3 & \lambda_4 \\ \mu_1 & -(\mu_1 + \lambda_h) & 0 & 0 & \lambda_h \\ \mu_2 & 0 & -(\mu_2 + \lambda_s) & 0 & \lambda_s \\ \mu_3 & 0 & 0 & -(\mu_3 + \lambda_a) & \lambda_a \\ \mu_4 & 0 & 0 & 0 & -\mu_4 \end{bmatrix} \quad (3)$$

其中

$$\alpha = -(\lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 + \lambda_4) \quad (4)$$

系统在各个状态的平稳状态概率向量为

$$P = [P_0, P_1, P_2, P_3, P_4] \quad (5)$$

式中: P 为保护装置平稳状态概率向量; P_0 为保护装置处在正常状态的概率; P_1 、 P_2 和 P_3 分别表示保护装置硬件、软件、通信处于异常状态的概率; P_4 表示保护装置处于故障状态的概率。

又由于

$$P \cdot A = 0 \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^4 P_i = 1 \quad (7)$$

联立式(3)一式(7)可求得保护装置正常运行的概率 P_0 。

2) 计及偶发性故障的拒动概率计算

一套完整的继电保护系统应包括测量装置、通信装置、保护装置和断路器 4 部分。此外, 220 kV 及以上电压等级的设备, 要求配置两套完全独立的继电保护系统且均配置后备保护, 其目的是为了为了保证其中任何一个元件发生异常或故障都能可靠进行隔离, 它们是典型的并联关系。为分析一二次设备耦合故障模式, 建立一二次设备耦合可靠性模型, 如图 4 所示。

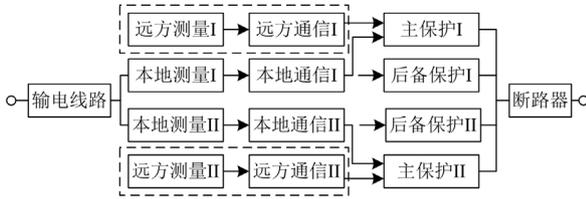


图 4 一二次设备耦合可靠性模型

Fig. 4 Primary and secondary equipment coupling reliability model

假设系统装设 I、II 两套主保护及配套相应后备保护, 其中 P_{11} 、 P_{12} 、 P_{13} 、 P_{14} 分别表示保护 I 的本地测量、本地通信、主保护及后备保护正常运行概率; P_{111} 、 P_{112} 、 P_{113} 、 P_{114} 分别表示保护 II 的本地测量、本地通信、主保护及后备保护正常运行概率。

为反映二次设备时变故障特征, 以保护装置常时性故障拒动概率反映模型中主保护及后备保护环节故障概率, 以保护装置偶发性故障概率反映暴露在自然环境中的保护测量及通信环节故障概率, 从而确定二次设备时变故障概率。

第 I 套保护正确动作概率 P_{C1} 为

$$P_{C1} = P_{11}P_{12}P_{13} + P_{11}P_{12}P_{14} - P_{11}P_{12}P_{13}P_{14} \quad (8)$$

第 II 套保护正确动作概率 P_{C2} 为

$$P_{C2} = P_{111}P_{112}P_{113} + P_{111}P_{112}P_{114} - P_{111}P_{112}P_{113}P_{114} \quad (9)$$

当输电线路发生故障时, 两套主保护中任意一套保护路径通畅, 且断路器正常工作, 故障正常切除, 因此考虑一二次设备耦合的保护系统正确动作概率 P_C 为

$$P_C = P_{CB}(P_{C1} + P_{C2} - P_{C1}P_{C2}) \quad (10)$$

2.2.3 保护系统误动概率

保护系统误动故障与当前系统运行状态相互关联, 其中受线路潮流变化的影响最为直接。线路故

障会在短时间内引发大范围潮流转移、波动甚至越限, 此过程将导致保护误动故障的暴露, 运行风险由此加剧^[30]。

保护装置的测量和信号传输处理是正确判断系统状态的关键环节。然而受制造质量、设备老化、环境变化等因素的影响, 装置可能在信号采集、数字/逻辑运算处理等地方产生微小误差, 导致其测量值与真实值之间存在微小偏差。此类微小偏差虽然在单个环节中体现不明显, 但在保护装置动作判断的过程中可能会叠加扩大继而引发保护误动作。

由于微机保护设备根据整定值触发动作, 其软件的比较判断逻辑是干脆利落的 0-1 关系, 因此判断的结果也是 0-1 关系。但是, 由于测量和信号传输处理引起的输入误差, 可能导致比较结果不正确。因此, 本文基于故障引发潮流转移, 考虑保护动作判断时模数转换引起的微小误差, 信号处理存在的精度损失等因素的影响, 以故障切除支路信息和全网潮流信息为依据, 对潮流转移过负荷引起的保护误动进行识别判断, 即构建保护误动模型, 其中线路电流测量值 I_m 由真实值 I_a 和保护测量、信号传输处理等环节的误差 $e\%$ 构成, 如式(11)所示。

$$I_m = I_a + e\% \quad (11)$$

$$P_m = \begin{cases} 0, & I_m \leq I_{trip} \\ 1, & I_m > I_{trip} \end{cases} \quad (12)$$

式中: P_m 为考虑线路过载误动的保护动作概率; I_{trip} 为保护动作电流整定值。通过式(11)将潮流转移保护动作判断误差纳入考虑, 以全面分析保护非期望动作对系统运行风险的影响。

3 考虑超预期故障的电网运行风险评估

3.1 风险指标

电力系统的风险是对非预期事故发生的后果概率和严重性的度量。通常将系统的风险指标定义为事故发生概率与事故严重度的乘积, 如式(13)所示。

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

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。

由于线路潮流可以有效地表征出系统故障后的新形态, 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) 损失负荷

本文风险评估考虑以下负荷的损失: 因保护动作造成所有进线开断所形成的孤立负荷, 因所有出线开断所形成的孤立电源, 以及为系统解列形成孤

岛的有功平衡而削减的负荷。在评估过程中, 通过分析系统拓扑及所处的状态计算相应的负荷损失。

定义失负荷风险值为

$$R_l = P_{rl} \cdot S_{ev}(w_l) \quad (14)$$

式中: R_l 表示系统失负荷风险值; P_{rl} 表示系统失负荷概率; w_l 表示当前场景下系统损失负荷量; $S_{ev}(w_l)$ 表示损失负荷严重度。

为衡量系统损失负荷严重程度, 以单一场景下系统损失负荷量与系统总负荷量的比值定义损失负荷严重度, 如式(15)所示。

$$S_{ev}(w_l) = \frac{w_l}{S_l} \quad (15)$$

式中, S_l 为系统总负荷量。

同时, 以失负荷概率和期望缺供电力进行失负荷风险评估。

$$R_{LOLP} = \frac{n_L}{N} \quad (16)$$

$$R_{EDNS} = \frac{\sum_{k=1}^N w_{kl}}{N} \quad (17)$$

式中: R_{LOLP} 为失负荷概率; R_{EDNS} 为期望缺供电力; N 为总抽样场景数; n_L 为损失负荷场景数; w_{kl} 为第 k 个场景下系统损失负荷量。

2) 潮流越限风险

定义支路 b 的潮流越限风险为

$$R_b(s) = P_r(s_b) \cdot S_{ev}(w_{sb}) \quad (18)$$

式中: $R_b(s)$ 为支路 b 的潮流越限风险; 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。

支路 b 的潮流越限值可表示为

$$w_{sb} = \begin{cases} |s_b| - s_0, & |s_b| \geq s_0 \\ 0, & |s_b| < s_0 \end{cases} \quad (19)$$

式中, s_0 一般取该支路功率限额的 0.9 倍。

支路潮流越限严重度同样采用风险偏好型效用函数, 如式(20)所示。

$$S_{ev}(w_{sb}) = \frac{e^{w_{sb}} - 1}{e - 1} \quad (20)$$

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。假设抽样得到的总场景数为 n , 单一场景下系统故障线路首端拒动产生的故障集数量为 J , 末端拒动产生的故障集数量为 K , 则

$$S_{wq}(x) = \frac{1}{J} \sum_{i=1}^J S_{evi}(x) + \frac{1}{K} \sum_{i=1}^K S_{evi}(x), x \in \{w_{sb}, w_l\} \quad (21)$$

$$R_{cp}(x) = \frac{1}{n} \sum_{l=1}^n [P_C \cdot S_{lq}(x) + (1 - P_C) \cdot S_{wq}(x)], x \in \{w_{sb}, w_l\} \quad (22)$$

式中: x 为系统损失负荷量及潮流越限值; $S_{wq}(x)$ 为第 q 个场景下保护拒动的系统严重度函数; $S_{evi}(x)$ 为第 i 种拒动状态下的系统严重度函数; $R_{cp}(x)$ 为考虑一二次设备耦合下的系统风险值; $S_{lq}(x)$ 为第 q 个场景下保护正确动作的系统严重度函数; P_C 为考虑一二次设备耦合的保护系统正确动作概率。

为了计算上述指标, 需要进行潮流计算。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, 如式(23)和式(24)所示。

$$f = \min \sum_{i \in N_G} w_i \quad (23)$$

$$\mathbf{T}(S) = \mathbf{A}(S)(\mathbf{P}_G - \mathbf{P}_D + \mathbf{P}_C)$$

$$\sum_{i \in G_{set}} P_{Gi} + \sum_{i \in D_{set}} P_{Ci} = \sum_{i \in D_{set}} P_{Di}$$

$$\text{s.t. } P_{Gi}^{\min} \leq P_{Gi} \leq P_{Gi}^{\max}, i \in G_{set} \quad (24)$$

$$0 \leq P_{Ci} \leq P_{Di}, i \in D_{set}$$

$$|T_k(S)| \leq T_k^{\max}, k \in L_{set}$$

式中: N_G 为系统发电母线的集合; $\mathbf{T}(S)$ 为停运状态的有功潮流向量; $\mathbf{A}(S)$ 为停运状态的有功潮流和注入功率间的关系矩阵; \mathbf{P}_G 和 \mathbf{P}_D 分别为发电输出和负荷功率向量; \mathbf{P}_C 为负荷削减向量; P_{Gi} 、 P_{Di} 、 P_{Ci} 和 $T_k(S)$ 分别为 \mathbf{P}_G 、 \mathbf{P}_D 、 \mathbf{P}_C 和 $\mathbf{T}(S)$ 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。

3.2 评估流程

现有研究在讨论系统运行风险时, 多采用蒙特卡洛模拟等方法进行分析, 未考虑评估过程中运行方式的变化, 与实际设备运行存在较大差异, 且无法准确反映保护设备的状态关系。在二次设备故障分析中, 后备保护动作与已出现的保护故障相互关联, 如果只是将多个故障孤立地结合起来, 难以体现保护的真正动作过程, 为此本文依据一二次设备耦合模型, 提出改进的系统短时风险评估流程, 如图 5 所示。

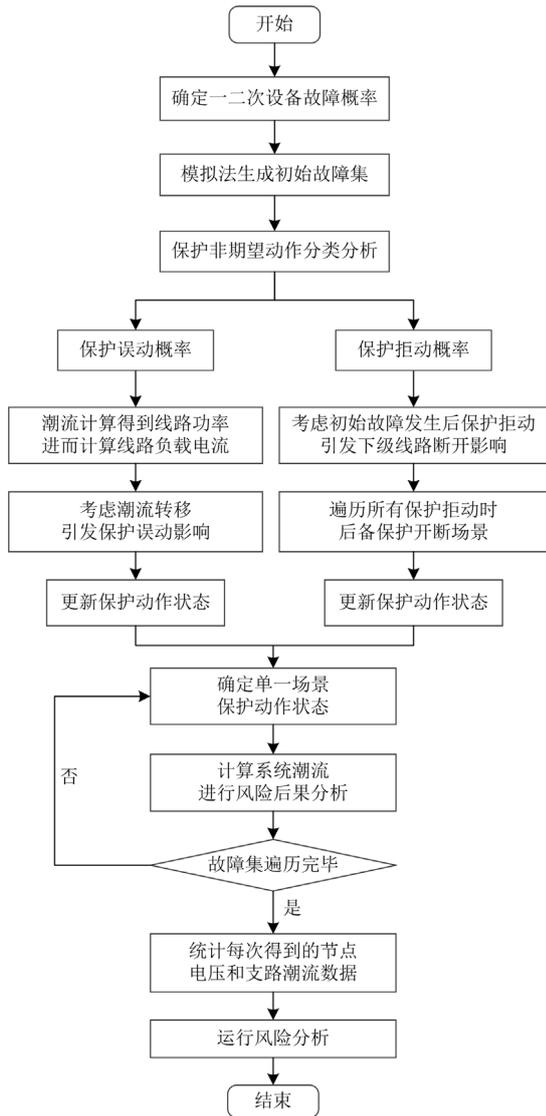


图 5 计及一二次设备耦合故障的短时风险评估流程图

Fig. 5 Flowchart of short-time risk assessment considering the coupled faults of primary and secondary equipment

- 1) 参考不同极端灾害天气研究模型，确定一次及二次设备故障概率。
- 2) 应用拉丁超立方模拟生成初始故障集。
- 3) 依据一二次设备耦合模型进行保护非期望动作分类分析：(1) 计算保护误动概率，针对初始场景潮流计算确定故障后的潮流分布，更新保护动作状态获得更新后的故障场景；(2) 计算保护拒动概率，设置故障后保护拒动引发下级线路断开，针对初始故障场景遍历生成拒动故障场景集。
- 4) 对于保护拒动和误动生成的故障场景进行潮流计算及风险后果分析，确定故障集遍历完毕后，计算各项风险指标，完成运行风险分析。

4 算例分析

本算例采用改造的 IEEE39 节点系统分析灾害天气来临引发一次设备 $N-k$ 故障，保护系统存在缺陷时是否可靠动作正确切除故障，在一二次设备耦合模型的基础上进行系统短时运行风险评估。

4.1 一二次设备故障概率计算

1) 一次设备故障概率计算

以中国某地区 2023 年 7 月系统预报的对流天气过程为例，截取中国气象局天气数值预报系统中某 1 h 的预测风速数据集，采用网格化方法和单元分割法分别处理预报数据，并将 IEEE39 节点系统投影至该气象区域中，从而预测出未来时刻每条输电线路所承受的天气强度。如图 6(a)所示，此次强对流天气发生区域所处的网格风速最大值达到 30 m/s。基于短时天气数值预报，结合强对流天气下输电线路故障机理，采用输电线路结构失效概率模型和风偏放电失效概率模型计算线路故障概率，图 6(b)为改进的 IEEE39 节点系统气象灾害及故障概率空间分布图。

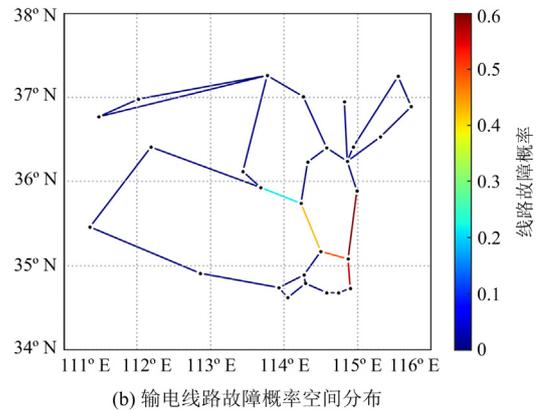
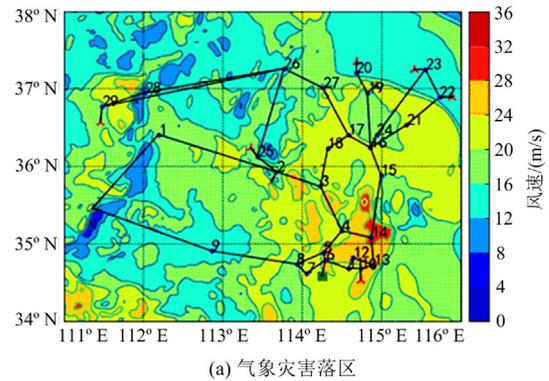


图 6 气象灾害落区及输电线路故障概率空间分布图

Fig. 6 Spatial distributions of weather disaster and fault probability of transmission lines

其中强对流天气集中覆盖在线路“L₄₋₁₄”、线路“L₁₃₋₁₄”及线路“L₁₄₋₁₅”三处, 线路故障概率也由风速中心向边缘逐级递减, 灾害中心及附近部分高故障概率线路如表 1 所示。

表 1 灾害中心及附近部分高故障概率线路

Table 1 Part of transmission line with high fault probability in the center of the disaster and its vicinity

所处区域	线路名称	故障概率
灾害中心	L ₄₋₁₄	0.464
	L ₁₃₋₁₄	0.538
	L ₁₄₋₁₅	0.566
灾害边缘	L ₂₋₃	0.202
	L ₃₋₄	0.352

2) 二次设备非期望动作概率计算

参考某地智能站保护设备的运行维护记录、保护动作情况统计、异常告警、缺陷统计以及状态监测等数据信息^[31], 得到保护设备及其各功能组件的可靠性参数如表 2 所示。

表 2 保护设备及其各功能组件可靠性参数

Table 2 Reliability parameters of protection equipment and its functional components

状态转移率/(次·a ⁻¹)	数值	状态转移率/(次·h ⁻¹)	数值
λ_1	1.13×10^{-5}	μ_1	833.33×10^{-4}
λ_2	0.41×10^{-5}	μ_2	1250.67×10^{-4}
λ_3	0.96×10^{-5}	μ_3	416.67×10^{-4}
λ_4	14.25×10^{-5}	μ_4	208.33×10^{-4}
λ_5	10.22×10^{-5}	—	—
λ_6	9.85×10^{-5}	—	—
λ_7	16.42×10^{-5}	—	—

将表 2 中的各项可靠性参数代入式(3)一式(7)中, 求得一二次耦合故障状态模型中主保护和后备保护的正常运行概率 $P_{13} = P_{14} = 99.18\%$ 。灾害天气下本地测量及通信环节的正常运行概率参考文献[29]求得 $P_{11} = P_{12} = 95.08\%$ 。断路器正确动作概率由式(2)求得 $P_{CB} = 99.88\%$, 根据一二次耦合故障状态模型求得 $P_C = 98.96\%$, 继而得到保护系统拒动概率为 $1 - P_C = 1.04\%$; 保护误动方面装置测量、信号传输处理等环节的误差 $e\%$ 拟定为 $\pm 5\%$ 。

3) 仿真模型设置

为准确反映保护非正确动作逻辑, 获取故障演化过程, 设定全网线路的两侧均配置了两套主后备保护。对保护拒动场景分析时, 本文假设只考虑故障线路的单侧保护装置失效拒动, 不考虑线路两侧

保护同时拒动的极小概率事件, 同时采用拉丁超立方抽样生成初始故障集, 抽样次数设为 10 000 次, 综合分析各场景, 可得到灾害天气来临时保护动作状态及系统运行风险。

4. 2 电网短时运行风险评估结果及分析

1) 风险指标计算结果分析

采用上述数据整定计算后, 获得一次灾害天气来临时系统各项风险指标数值, 其中系统损失负荷风险值如表 3 所示。

表 3 灾害天气下系统损失负荷风险值

Table 3 Loss load risk values of power system under weather disaster

风险指标	保护非期望动作	保护正确动作
R_{LOLP}	0.5616	0.0837
R_{EDNS}/MW	257.34	29.61
$S_{ev}(w_i)$	1.119×10^{-2}	4.857×10^{-3}

通过分析系统各项损失负荷风险指标可以看出, 灾害天气所引发的 $N-k$ 故障下失负荷概率、失负荷量、损失负荷风险值均处在较高水平, 这意味着电力系统可能面临着频繁的失负荷事件。同时, 较大的期望缺供电力值意味着在给定时间内有更多的负荷需求无法得到满足, 系统供电能力不足。当系统无法满足用户用电需求时, 可能会导致供电中断, 影响用户的正常用电。以上结果表明, 灾害天气会对电力系统的可靠性和稳定性产生较为严重的影响。

同时, 相较于保护正确动作情况, 保护发生拒动和误动的非期望动作情况下, 各项失负荷风险指标大幅增加。分析可知, 在初始故障场景的基础上, 考虑保护拒动引发的下级线路断开、保护误动引发的非必要跳闸, 均扩大了事故范围, 进一步加剧了故障带来的损失。由表 3 可知, 保护正确动作时系统的损失负荷风险为 4.857×10^{-3} , 而保护非期望动作时骤增至 1.119×10^{-3} , 说明考虑一次灾害天气来临时, 较弱的保护对故障的反应能力使得系统面临的风险更为严峻。

电力系统的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密切相关。图 7 针对不同保护动作状态下线路潮流越限风险值最高的 5 条线路进行了排序, 可以看出, 在不同保护动作状态下, 对全系统风险指标贡献最多的 5 条线路和母线是相同的, 即线路 L₆₋₁₁、L₁₀₋₁₁、L₄₋₅、L₆₋₇ 和 L₂₋₃ 的潮流越限风险均处在较高水平, 其中线路 L₆₋₁₁ 在保护非期望动作和正确动作情况下的风险值, 分别达到了 8.31×10^{-2} 和 0.84×10^{-2} , 以上

数据表明相关线路受灾害天气影响较大。

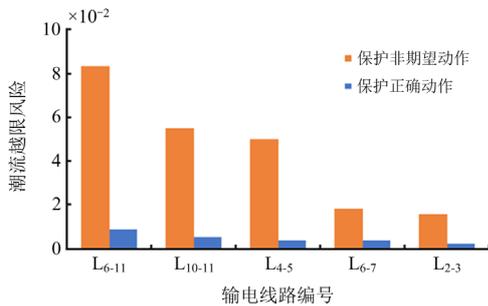


图 7 不同保护动作状态下的线路潮流越限风险

Fig. 7 Branch power flow out-of-limit risk in different protection operating states

进一步分析故障原因，高风险线路均围绕灾害天气落区附近产生，由于灾害中心线路故障概率较高，发生断线时引发潮流转移，故障线路承载的负荷转至周边线路，灾害边缘线路重载致使潮流越限风险加剧。此外，对比保护正常动作，保护非期望动作风险数值大大增加，受外界环境影响，保护缺陷暴露导致非期望动作将使系统运行面临的风险更为严峻。

从以上分析可以看出，对于灾害天气来临时的短时多重故障风险评估，对比保护正常动作，保护发生非期望动作时系统失负荷风险及潮流越限风险均有大幅提升，二次设备缺陷由灾害天气激发而暴露，在电网发生故障时不能可靠动作正确切除故障线路，加剧了事故风险。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。更新老化设备，定期维护检修，优化定值设置，可确保二次设备在复杂条件下稳定运行和准确响应，保障系统安全。加强线路监测和故障应急处理，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，提高电力系统的应对能力和抗灾能力。

2) 高风险场景故障演化过程分析

为分析灾害天气来临时保护装置非期望动作导致的多重故障演化过程，依据系统失负荷量对生成的故障集进行排序筛选，选取故障最为严重的场景进行分析。表 4 列出了失负荷量最高的故障场景。

表 4 故障严重场景排序筛选结果

Table 4 Screening results of serious fault scenario

保护动作情况	保护非期望动作停运线路	失负荷量/MW
保护拒动	L ₁₄₋₁₅ →L ₁₅₋₁₆	2190.8

分析可知，故障最严重场景出现在某一初始故障发生后，考虑保护拒动引发下级线路断开生成的子场景，线路 L14-15 末端保护拒动，引发后备保护动作断开上级线路 L15-16，导致系统形成了数个孤立的子网，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，最终失负荷量为 2190.8 MW，查得此场景初始故障失负荷量为 1870.8 MW，对比两者可以看出，相较于初始故障，保护非期望动作的失负荷量提高了 17.1%，说明考虑保护对故障反应能力影响时系统失负荷量风险显著增加。因此，建立完善的故障诊断与排查体系，制定综合的应急预案，加强对于一次及二次设备的监测和维护，能够及时发现并消除一二次设备耦合故障所引发的问题，提高系统的抗灾能力，确保系统在复杂环境下的安全运行。

5 结论

本文针对灾害天气下电网发生短时多重故障有可能超出保护系统预设的反应能力、一二次设备耦合影响将助推多重故障风险发展和蔓延的问题，分析了一二次设备耦合故障对电网短时运行风险的影响，构建了一次设备和二次设备的故障概率模型，重点分析了灾害天气下一二次设备耦合故障引发保护拒动的概率，进而提出了灾害天气下计及保护系统对故障反应能力的电网短时多重故障风险评估方法。针对改造的 IEEE39 节点系统的测试效果验证了所提方法的有效性，结果表明：受外界气象环境影响，保护系统缺陷暴露导致的非期望动作使得电网多重故障风险更为严重，系统失负荷量、期望缺供电力以及灾害落区中心线路潮流越限风险均呈现出数量级的上升。本文综合考虑灾害天气对一二次设备影响下的短时运行风险，所提评估方法对于发现和消除保护系统薄弱环节以及制定电网降风险运行策略，具有一定参考价值。

参考文献

[1] 秦建茹, 李海波, 孙谊娟, 等. 考虑新能源极限并网强度约束的常规机组最小开机方式优化方法[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(16): 127-135.

QIN Jianru, LI Haibo, SUN Yiqian, et al. Optimal method of minimum start-up mode for conventional units considering new energy limit grid-connection strength constraint[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(16): 127-135.

[2] 谢作威, 布和朝鲁, 诸葛安然, 等. "21.7"河南暴雨暖湿季风输送带加强及关键天气流型的准地转位涡反演[J]. 大气科学, 2022, 46(5): 1147-1166.

- XIE Zuwei, BUEH Cholaw, ZHUGE Anran, et al. An intensification of the warm and moist conveyor belt of the Asian summer monsoon in the "21.7" Henan rainstorm and its key circulation from the quasi-geostrophic potential vorticity perspective[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2022, 46(5): 1147-1166.
- [3] 李政麒, 蔡晔, 曹一家, 等. 美国得州“2·15”停电事故分析及对中国新型电力系统供电充裕度的启示[J]. *电力科学与技术学报*, 2022, 37(5): 17-24.
LI Zhengqi, CAI Ye, CAO Yijia, et al. Analysis of "2.15" blackout in Texas and its enlightenment to China's new power system supply adequacy[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2022, 37(5): 17-24.
- [4] 胡凉平, 丛伟, 徐安馨, 等. 基于深度稀疏自编码网络和场景分类器的电网气象故障预警方法[J]. *电力系统保护与控制*, 2022, 50(20): 68-78.
HU Liangping, CONG Wei, XU Anxin, et al. Early warning method for a power grid fault caused by meteorology based on a deep sparse auto-encoder network and scene classifier[J]. *Power System Protection and Control*, 2022, 50(20): 68-78.
- [5] 薛禹胜, 吴勇军, 谢云云, 等. 复合自然灾害下的电力系统稳定性分析[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(4): 10-18.
XUE Yusheng, WU Yongjun, XIE Yunyun, et al. Power system stability analysis for intercurrent natural disasters[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(4): 10-18.
- [6] 陈军, 高兴, 南东亮, 等. 恶劣天气下基于 N-2 故障组合剪枝法的电网多重故障风险评估[J]. *电工电能新技术*, 2023, 42(7): 96-104.
CHEN Jun, GAO Xing, NAN Dongliang, et al. Multiple-fault risk assessment of power grid based on N-2 faults combination pruning method in severe weathers[J]. *Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy*, 2023, 42(7): 96-104.
- [7] PANTELI M, PICKERING C, WILKINSON S, et al. Power system resilience to extreme weather: fragility modeling, probabilistic impact assessment, and adaptation measures[J]. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2017, 32(5): 3747-3757.
- [8] 赵丽莉, 李雪明, 倪明, 等. 继电保护与安全稳定控制系统隐性故障研究综述及展望[J]. *电力系统自动化*, 2014, 38(22): 128-135.
ZHAO Lili, LI Xueming, NI Ming, et al. Review and prospect of research on hidden failures of protection system and security and stability control system[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2014, 38(22): 128-135.
- [9] LIU Wenxia, QI Yao, SHI Qingxin, et al. Risk assessment of cascading failure of distribution network with flexible multi-state switch[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems, Part A*, 2022, 142: 1-10.
- [10] LIU X, SHAHIDEHPOUR M, CAO Y, et al. Risk assessment in extreme events considering the reliability of protection systems[J]. *IEEE Transactions on Smart Grid*, 2015, 6(2): 1073-1081.
- [11] 张路, 熊张恣, 王建, 等. 考虑一二次耦合多重故障的电力系统风险评估[J]. *电力系统保护与控制*, 2023, 51(14): 95-105.
ZHANG Lu, XIONG Zhangmin, WANG Jian, et al. Power system risk assessment considering primary and secondary coupled multiple faults[J]. *Power System Protection and Control*, 2023, 51(14): 95-105.
- [12] 卢扬, 李永丽, 李仲青, 等. 考虑隐性故障的单一保护装置风险评估[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2018, 30(4): 84-90.
LU Yang, LI Yongli, LI Zhongqing, et al. Risk assessment on single-protection equipment considering hidden failures[J]. *Proceedings of the CSU-EPSCA*, 2018, 30(4): 84-90.
- [13] OUYANG Jinxin, YU Jianfeng, LONG Xiaoxuan, et al. Coordination control method to block cascading failure of a renewable generation power system under line dynamic security[J]. *Protection and Control of Modern Power Systems*, 2023, 8(1): 194-204.
- [14] 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.
- [15] 吴勇军, 薛禹胜, 谢云云, 等. 台风及暴雨对电网故障率的时空影响[J]. *电力系统自动化*, 2016, 40(2): 20-29.
WU Yongjun, XUE Yusheng, XIE Yunyun, et al. Space-time impact of typhoon and rainstorm on power grid fault probability[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2016, 40(2): 20-29.
- [16] KHAZEIYNASAB SR, QI J. Resilience analysis and cascading failure modeling of power systems under extreme temperatures[J]. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, 2021, 9(6): 1446-1457.
- [17] 谢云云, 薛禹胜, 文福拴, 等. 冰灾对输电线故障率影响的时空评估[J]. *电力系统自动化*, 2013, 37(18): 32-41.
XIE Yunyun, XUE Yusheng, WEN Fushuan, et al. Space-time evaluation for impact of ice disaster on transmission line fault probability[J]. *Automation of Electric Power Systems*, 2013, 37(18): 32-41.
- [18] BONELLI P, MARCACCI P, BERTOLOTTI E, et al. Nowcasting and assessing thunder storm risk on the Lombardy region (Italy)[J]. *Atmospheric Research*, 2011, 100(4): 503-510.

- [19] 谢云云, 薛禹胜, 王昊昊, 等. 电网雷击故障概率的时空在线预警[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 44-51.
XIE Yunyun, XUE Yusheng, WANG Haohao, et al. Space-time early-warning of power grid fault probability by lightning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 44-51.
- [20] 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.
- [21] 庄文兵, 祁创, 熊小伏, 等. 计及气象因素时间累积效应的输电线路覆冰预测[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(17): 6-13.
ZHUANG Wenbing, QI Chuang, XIONG Xiaofu, et al. Transmission line icing forecast considering the time cumulative effect of meteorological factors[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(17): 6-13.
- [22] WANG Jian, XIONG Xiaofu, ZHOU Ning, et al. Early warning method for transmission line galloping based on SVM and AdaBoost bi-level classifiers[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2016, 10(14): 3499-3507.
- [23] 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.
- [24] 李明明, 王建, 熊小伏, 等. 高温天气下架空线路运行温度与弧垂超限预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(2): 25-33.
LI Mingming, WANG Jian, XIONG Xiaofu, et al. Operating temperature and sag off-limit warning method for overhead transmission lines in the conditions of high-temperature weather[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(2): 25-33.
- [25] 陈强, 王建, 熊小伏, 等. 一种降雨诱发滑坡灾害下输电杆塔的监测与预警方法[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(3): 147-155.
CHEN Qiang, WANG Jian, XIONG Xiaofu, et al. Monitoring and early warning method for transmission tower under rainfall-induced landslide disaster[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(3): 147-155.
- [26] 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.
- [27] 中国南方电网有限责任公司. 南方电网运行安全风险量化评估技术规范: Q/CSG11104002—2012[S]. 广州: 中国南方电网有限责任公司, 2012.
- [28] 丁明, 李晓静, 张晶晶. 面向 SCADA 的网络攻击对电力系统可靠性的影响[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(11): 37-45.
DING Ming, LI Xiaojing, ZHANG Jingjing. Effect of SCADA-oriented cyber attack on power system reliability[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(11): 37-45.
- [29] 栾思维, 吕飞鹏, 韩康, 等. 基于保护实时故障模型的电网脆弱环节在线辨识[J]. 电测与仪表, 2016, 53(19): 77-82, 99.
LUAN Siwei, LÜ Feipeng, HAN Kang, et al. On-line identification of vulnerable links in power grid based on protection real-time fault model[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2016, 53(19): 77-82, 99.
- [30] MATHEBULA VC, SAHA AK. 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.
- [31] 南东亮. 基于缺陷识别与状态评估的继电保护风险控制方法[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2022.
NAN Dongliang. Relay protection risk prevention and control method based on defect identification and state assessment[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2022.

收稿日期: 2023-08-14; 修回日期: 2023-10-23

作者简介:

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

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

南东亮(1985—), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为电力系统运行控制与继电保护。E-mail: ndl_hhu@126.com

(编辑 周金梅)