

自然灾害下电网运行风险控制策略探讨

常康¹, 徐泰山¹, 郁琛¹, 刘镭², 王昊昊¹, 郭俊³

(1. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司, 江苏 南京 211106; 2. 国网江西省电力有限公司, 江西 南昌 330077; 3. 国网湖南省电力公司防灾减灾中心, 湖南 长沙 410129)

摘要: 停电防御框架向自然灾害预警延伸已成为广泛共识。自然灾害演化的时空分布特征及其诱发电网故障的不确定性, 迫切需要将基于确定性准则的安全稳定分析向电网运行风险评估拓展, 将基于电力系统安全稳定控制技术导则确定性场景的三道防线控制向基于动态故障场景的风险控制延伸。针对自然灾害下电网运行风险如何在在线防御的问题, 总结了当前自然灾害下电网输电元件故障概率特征及其评估技术以及自然灾害下安全防御的困局与应对现状。分析了包括设备保护在内的电网安全稳定各道防线的风险控制代价特征。提出了适应灾害下概率及损失变化特征的风险控制策略。该策略既可实现预防控制与紧急控制间防御门槛的自动设置, 又可获得降低电网实际运行风险的在线预防控制优化措施。

关键词: 自然灾害; 电网运行风险; 故障概率; 预想故障集筛选; 风险评估; 风险控制; 三道防线

Discussion of power system operation risk control strategy in natural disasters

CHANG Kang¹, XU Taishan¹, YU Chen¹, LIU Lei², WANG Haohao¹, GUO Jun³

(1. NARI Group Corporation /State Grid Electric Power Research Institute, Nanjing 211106, China; 2. State Grid Jiangxi Electric Power Company Limited, Nanchang 330077, China; 3. State Grid Hunan Electric Power Corporation Reducing-disaster Technology Key Laboratory, Changsha 410129, China)

Abstract: It has become a common consensus that the blackout defense framework has been extended to the early warning of natural disasters. Due to the spatial and temporal distribution characteristics of natural disasters' evolution, and fault uncertainty induced by natural disasters, it is urgent to extend the safety and stability analysis of power system based on deterministic criterion to the operation risk assessment, to extend traditional safety and stability control based on deterministic scenarios listed in three-defense-lines to risk control. In this paper, several key technologies in the field of disaster prevention, namely fault probability assessment and its characteristics, power system security defense predicament and its countermeasures, are reviewed firstly. Secondly, the risk control cost characteristics of power system considering three-defense-lines is analyzed. Finally, risk control strategy is discussed, which is adaptive for probability and loss characteristics in natural disasters. With the proposed strategy, it is easy to set contingency and acquire the preventive control optimization measure that effectively reduces the operation risk of power system.

This work is supported by National Key Research and Development Program of China (No. 2017YFB0902600) and Science and Technology Project of State Grid Corporation of China "Research on Power Grid Security Probabilistic Risk Analysis Method and System under Large-scale Forest Fire".

Key words: natural disasters; operation risk of power system; fault probability; contingency set screening; risk evaluation; risk control; three-defense-lines

0 引言

外部自然灾害一直是导致电网发生故障的主要

原因^[1]。近年来, 由自然灾害诱发的停电事故时有发生, 停电防御框架向自然灾害预警延伸成为广泛共识^[2]。自然灾害演化的时空分布特征及其诱发电网故障的不确定性, 迫切需要将基于确定性准则的安全稳定分析向电网运行风险评估拓展, 将基于电力系统安全稳定控制技术导则^[3]确定性场景的三道防线控制向基于动态故障场景的风险控制延伸。

基金项目: 国家重点研发计划项目资助(2017YFB0902600); 国家电网公司科技项目资助“大范围山火灾害下电网安全概率风险分析方法及系统研究”

在外部环境越发严峻的同时, 电网结构也正在发生着质的变化, 伴随着大容量、远距离交流互联, 使得电网受灾害影响的可能性和严重性显著增加, 探讨自然灾害下的电网运行风险防控已经是电网发展的内在需求。把电力系统发展的内外部因素结合起来看, 大停电的风险已经外延到传统安全稳定分析的边界以外。因此, 需要突破原来预先设定故障集的模式, 将引发扰动的内外部因素考虑进来, 实现计及外部灾害及设备状态的电网运行风险防控。

风险概念是在事件还未发生时, 对其危险程度的量化。事件的风险值可表示为该事件发生后的损失与事件发生的概率值的乘积。文献[4]提出用主动停电的损失代替不受控制的停电损失, 用为了使该事件不发生恶果而必须付出的控制代价与事件发生的概率值的乘积来表示电网运行风险, 解决了停电损失难以事前评估的问题。

国内学者及机构在电网调度防灾领域做了大量有益的探索和实践。在自然灾害下电网运行风险防控系统概念设计及理论储备方面^[2,5-7], 主要完成了向自然灾害预警拓展的停电防御框架设计、各类自然灾害引发电网故障的机理及概率评估模型探索以及电网运行风险评估理论的建立。文献[5-6]深刻反思了 2008 年初中国南方罕见冰灾导致大范围长时间停电事件以及 2011 年日本福岛核泄漏事件暴露出的 $N-1/N-k$ 确定性安全准则的不完善性, 指出目前停电防御系统在广域信息、仿真分析、控制决策 3 个核心功能方面的不足。文献[2]在归纳极端外部环境停电特征的基础上, 设计了支撑自然灾害早期预警与决策支持的停电防御框架。文献[7]提出了复合灾害造成的群发性故障的风险分析思路和框架。在自适应自然环境的电网安全稳定协调防御系统研发及试点应用方面, 主要从工程的角度论证了外部环境信息与电网运行信息融合及指导安全稳定控制的可行性。文献[8]介绍了国际上首套自适应外部自然灾害的停电综合防御系统在江西电网的应用情况及对调度决策的支撑作用。在此基础上, 需要继续探索自然灾害下基于风险管控理念的三道防线拓展及风险控制系统的應用, 主要结合自然灾害风险特征拓展三道防线体系框架, 实现自然灾害下基于风险等级的三道防线协调控制。

国外在电力系统防灾领域的研究主要集中在可靠性评估及减灾机制领域。文献[9]在 IEEE 将天气分为正常、恶劣、大灾难三类的基础上, 根据大量历史数据求取不同天气状态下的电力设备故障率。文献[10-11]分别以污闪和台风为例讨论了外部环境影响设备可靠性的关键要素及其评估指标。文献[12]

提出了自然灾害下电网高风险事件的快速识别方法。文献[13]总结了国外电力系统在自然灾害应急处置方面的经验, 该经验局限于管理机制的建立, 在调度防灾的综合防御系统方面还鲜有成功经验可借鉴。

本文针对自然灾害下电网运行风险如何在线防御的问题, 首先总结当前自然灾害下电网输电元件故障概率特征及其评估技术, 然后分析自然灾害下大电网安全防御的困局及应对现状, 其次在分析包括设备保护在内的电网安全稳定各道防线的风险控制代价特征的基础上, 提出适应灾害下概率及损失变化特征的风险控制策略, 探讨以电网运行风险为核心、以风险防控代价比为防御原则的灾害防控理念。

1 自然灾害下输电元件故障概率评估及其特征

1.1 自然灾害下输电元件故障概率评估

自然灾害下电网运行风险控制逻辑上包括如下过程: 融合广域的外部灾害数据、电网设备台账及运行状态数据, 建立外部灾害、输电设备、电网风险之间的关联关系, 实现自然灾害下电网运行风险的精准辨识与科学防控。其中, 传统的电网可靠性评估采用固定不变的元件年均故障率模型, 难以适应电力系统运行风险评估需求, 如何求取灾害下输电元件时变停运概率是运行风险评估与防控首先要解决的关键技术^[14]。

自然灾害下输电元件故障概率评估模型大致分为统计模型、机理模型。统计模型一般适用于中长期(年、季、月)的元件故障率评估^[15-16], 且往往面临样本缺乏的问题^[17]。机理模型方面, 学者对影响电网安全的常见外部自然灾害类型(如: 雷电、台风、暴雨、覆冰、山火、大风、污秽、沙尘暴、磁暴等)^[18-25]均进行了探索, 但由于灾害引发电网故障涉及因素众多、机理复杂, 存在模型参数难以整定甚至有些难以解析表达的问题。复合灾害研究方法大都是按照独立事件进行处理^[7], 文献[26]建立的基于灰色模糊理论的多气象要素组合的输电元件故障概率模型, 其实质也是对不同气象要素按独立事件进行解耦加权。但是, 独立事件的处理方式往往会引起对强耦合的 $N-k$ 多重故障的概率估计不足的问题。

1.2 自然灾害下输电元件故障概率特征

自然灾害下输电元件故障概率呈现如下特征:

1) 模型复杂性。灾害引发电网故障涉及耦合因素众多、机理复杂, 模型参数难以整定甚至有些难

以解析表达。以山火灾害下架空线路概率评估为例定性描述其机理复杂性及耦合因素多样性。

山火引发线路闪络机理一般可归纳为 4 种模型:热游离模型、空气密度下降模型、电导率模型和颗粒触发模型^[21]。前两种模型的致灾机理是火焰高温使得空气绝缘降低,后两种模型的致灾机理是空间颗粒使得空间电场畸变降低了击穿电压。而线路空气间隙绝缘强度降低往往是火焰温度、电子和离子以及固体颗粒等因素共同作用的结果。其引发电网故障的途径可归结为导线空气间隙击穿与绝缘子损坏。电力系统中接入的山火数据,主要来源于同步卫星、极轨卫星或者人工巡线上报,不管哪一种方式目前都无法做到实时上送。因此,山火蔓延行为及其与线路档的关系预测也是概率评估中的重要一环。

综合来看,描述山火强度及其蔓延变化的特征量可提炼为:火焰区域温度、火强度/烟浓度、火场形状、火蔓延速度。更具体来说,与影响山火强度的火场温度、烟浓度密切相关的外部因素包括:植被(类型、分布、干燥程度)、气象(气温、湿度、风速);与蔓延特征相关的外部因素包括:风速、风向、地形;与线路击穿特性关联的参数包括:电压等级、海拔高度、设备运行状态等。

2) 数值非精确性。不同于设备可靠性中长时间尺度的故障率(次/百公里×年)的概念,本文讨论的电网运行风险中的输电元件故障概率,表示短时间尺度内(小时、分钟)不同灾害情形下输电元件受灾故障的可能性。但是由于电力设备由自然灾害导致停运的有效样本数量有限,因而大数定律成立的条件在现实中难以满足。在这种情况下,任何精确的概率计算值都难以反映设备真实的停运可能性^[27]。这就进一步增加了短时间尺度输电元件概率实用性的难度。目前主要是利用概率值在一定时间窗口内具有的相对性^[6]对输电元件受灾害影响程度进行排序筛选。

3) 时空不确定性。输电元件的停运从时间维看是一个随机过程,即当前处于运行状态的设备,在未来不确定的某个时间将会发生故障。因此,灾害下元件故障概率仅表示一段时间内元件失效可能性的期望值,其具体的故障位置、故障类型、故障时间仍然具有不确定性。

2 自然灾害下安全防御的困局及应对现状

2.1 自然灾害下预防控制与紧急控制协调的必要性

电网安全防御一直遵循系统安全稳定控制技术导则,按照扰动级别或者故障严重程度设置三道防

线^[3]。关于严重程度的定性描述在实际应用时可操作性不强。为此,传统三道防线理论基于三个级别的扰动发生概率差别很大且不在一个数量级上的假设,将故障等级固化为故障形式,即第 I 类故障是指出现概率较高的单一故障、第 II 类故障是指出现概率较低的单一严重故障、第 III 类故障是指出现概率很低的多重严重故障。故障形式及故障等级固化的好处,是可以方便地实施确定性的分析并制定相应的控制措施:针对第 I 类预想故障不安全的情况实施预防控制,对发生概率更低的第 II 和第 III 类故障配置紧急控制措施。

自然灾害下极易出现多重故障概率大于单一故障概率的情况^[28],此时传统三道防线基于三类故障概率差别很大的假设条件已不复存在。那么对于自然灾害诱发的高概率多重严重故障是被动等待第三道防线动作,还是需要主动采取预防或紧急控制呢?因此,单纯依靠故障严重度(或故障概率、故障形式)划分的传统三道防线在自然灾害环境下适应性降低,唯一科学的划分依据应该是故障时序,即对于故障前的预想场景均可实施预防控制、对故障后的场景均可实施前馈型紧急控制及反馈型校正控制。

目前工程上主流的根据确定性准则实施的电网运行控制,难以妥善协调小概率高风险事件下电网运行的安全稳定性与经济性。国内各级调度机构已经开始探索基于电网运行风险的预防控制和紧急控制技术,对于灾害下概率大的多重严重故障,主动采取预防或制定紧急控制预案。以跨区直流运行风险为例,目前已经根据灾害类型及等级,划分了直流运行的“红橙黄蓝绿”五个风险等级,然后根据等级采取不同的控制措施:达到红色风险时,按照“先降后控”原则调整运行方式实施预防控制;对于橙色或黄色风险,完善故障预案,储备紧急控制措施。基于风险的预防控制目标一般是以性价比最优的方式降低运行风险或控制其在可接受范围内,求解的方法有灵敏度法、最优潮流法、人工智能法。基于风险的紧急控制主要解决预防控制代价过高和预防控制措施矛盾的问题,为特定的扰动场景提供控制风险的措施,其研究的焦点包括启动判据与时机、控制空间调整、最优控制策略制定等。

预防控制和紧急控制是维持电力系统安全运行的两种重要手段,具有很强的互补性^[29],传统三道防线内部的优化和不同防线之间的协调已有深入研究,文献[30-31]按照“解耦迭代、聚合协调”的框架,分别提出了预防控制与紧急控制协调、紧急控制与校正控制协调的寻优算法。但目前自然灾害下

基于风险的多道防线的控制还是分离的，首先急需探讨适合自然灾害下电网运行风险特征的预防与紧急协调控制技术。该协调控制技术的核心问题是如何通过自动化技术快速搜索到实施预防控制与紧急控制的分界线或门槛。该分界线可以是满足某种概率或者风险指标的某一故障场景，对于排序在该故障场景之前的故障可采取预防控制，对于之后的故障则认为预防控制代价过高或存在冲突措施而不可行，需要采取紧急控制。

2.2 自然灾害下预想故障集设置的合理性

与传统动态安全分析(DSA)中的预想故障集由调度运行人员凭经验预先设定不同，自然灾害下的预想故障集与自然灾害的演化过程以及电力系统运行状态密切相关^[7]。目前工程可行的自然灾害下故障集设置方法是，基于故障重数或者故障概率门槛值，以穷尽式组合的方式生成群发预想故障集，既满足安全稳定规则的要求，又包含概率高于某一门槛值的所有故障^[32]。

为进一步提升计算效率，需要进行预想故障集筛选排序。目前的 DSA 里已经有基于历史评估结果的预想故障集筛选方法^[33]。其原理是对比当前在线评估的运行断面与上一次(或历史)评估断面之间的差异，估算新状态下安全稳定模式和裕度，从而过滤掉不需要重复计算的故障。然而自然灾害的演化再叠加上电网运行状态的变化，使得自然灾害下每轮待评估的预想故障集均可能动态变化，传统筛选方法已经失效。目前自然灾害下故障集大都以组合故障概率为依据进行排序^[34]。

按照墨菲定律：假如事情有可能发生，则在一定情况下一定会发生。因此可以忽视的只是低风险事件，而不是小概率事件。那么为了提升安全防御的可信度，就必须不断扩大故障集的规模，将更多小概率事件也纳入考核范畴，陷入“小概率高风险”故障场景的组合爆炸中。如何权衡在线计算速度与精度的矛盾，合理设置自然灾害下需要考核的预想故障集成为焦点。

理论上所有可能发生的故障数目为无穷大，因此，直接通过计算所有可能发生的故障所导致的电网运行风险来评估预防控制措施的优化性能是不可行的。需要提出一种计算策略，既不需要对所有可能发生的故障进行计算分析，又能够保证计算得到的预防控制措施能够降低电网运行风险，且具有比较好的优化性能。已有的凭经验或根据概率门槛值设置预想故障集的处理方式，存在很强的人为因素，不能权衡计算速度和计算精度之间的矛盾。此外，已有的安全稳定在线预防控制优化决策技术通常只

将预防控制代价最小作为优化目标，没有将保护装置及安自装置的控制代价和预防控制代价之和作为风险控制目标。至于已有的预防控制与紧急控制协调优化方法，虽然考虑了预防控制代价和第二道安全防线的控制代价，但没有计及保护装置和第三道安全防线的控制代价，同样也只能处理调度运行人员预先设定的故障集，当故障集中故障数目比较大时，计算速度不能满足在线运行的要求。

为此，需要改变传统三道防线以概率为核心的防御准则，建立以风险为核心的防御思路，即不再一味地对潜在故障均进行防御，而是首先根据电力系统当前具备的可用风险防控措施及其代价，衡量付出的控制代价及挽回的风险损失之间的关系，根据性价比，对于得不偿失的故障不再主动采取预防控制，放由后续的防线去管控。通过引入与自然灾害的发展趋势及关注的电网运行风险密切相关的排序指标，增强自然灾害下故障场景设置的科学性和针对性。

3 适应灾害下概率及损失变化特征的风险控制策略

本文采用概率与控制代价乘积的风险定义^[4]。因此，实施后可减少的风险值大于其机会成本的所有控制措施都应在待选的决策空间内^[2]。

3.1 自然灾害下控制代价计算特征及变化特征

按照各类控制措施应对场景的演化过程，可以把控制代价分为：事前对于预想不安全采取的预防控制、快速隔离故障的继电保护、按照既定策略执行的紧急控制、稳定被破坏后的就地安自装置紧急控制等，如图 1 所示。第一个称为预防控制代价，后 3 种合称为紧急控制代价。

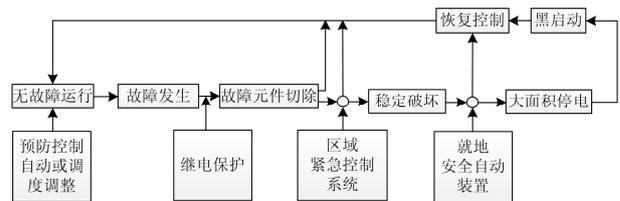


图 1 控制代价分类示意图

Fig. 1 Diagram of control cost classification

再换一个维度来看这个过程，紧急控制代价可以划分为原发故障损失和相继故障损失。原发故障损失包括原发故障直接诱发的继电保护装置动作所导致的损失、因原发故障诱发安控动作导致的损失以及故障后动态过程所引起的安自装置动作所造成的损失。相继故障损失包括故障后动态过程中继电

保护动作损失及后续安自装置动作损失。其特征是：前 2 类可以在事前可得，仅与运行方式及故障集有关，不需要详细的时域仿真；后 3 类跟动态过程相关，需要完整计及保护及安自装置模型进行时域仿真计算，如图 2 所示。

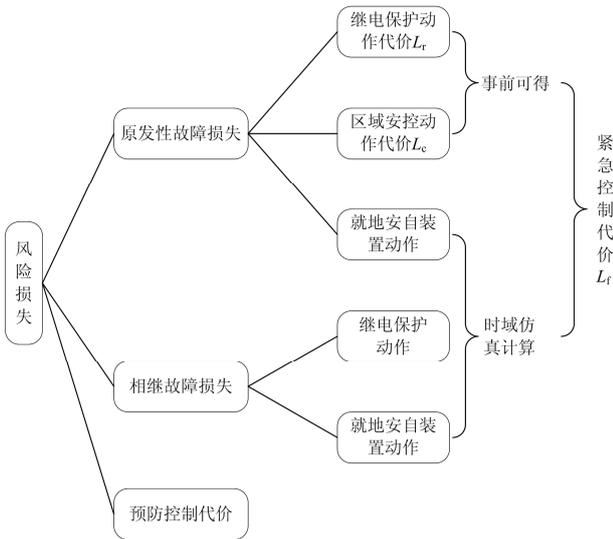


图 2 紧急控制代价计算特征分类示意图

Fig. 2 Diagram of emergency control cost calculation feature classification

预防控制代价与紧急控制代价随故障数目变化特征如图 3 所示。图中红线是单独采取紧急控制的代价曲线，绿线是单独采取预防控制代价曲线，其变化特征包括：(1) 随着预想故障集中故障数目的增加，单独采取预防控制或者单独采取紧急控制，其控制代价均不断增加；(2) 在预想故障集中故障数目较小时，单独采取紧急控制代价增加的速度大于单独采取预防控制的调整代价增加的速度；(3) 随着故障数目的增多，预防控制需要协调的矛盾增多，损失的代价会急剧增加，从而出现单独采取紧急控制代价增加的速度小于单独采取预防控制的调整代价增加的速度。

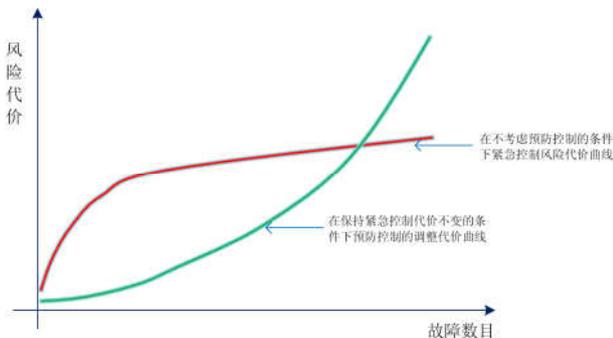


图 3 控制代价随故障数目变化特征示意图

Fig. 3 Diagram of control costs vary with the number of failures

如果同时实施预防控制与紧急控制措施，实施预防控制后系统运行点朝着安稳裕度增加的方向移动，从而一定程度上降低紧急控制代价。基于图 3 中预防控制与紧急控制代价的变化特征，则总的风险代价会随着故障数目的增加呈现先降低后增加的趋势，存在风险优化控制的极值点。

因此，如果对预想故障集按自然灾害下评估的故障概率由大到小排序，并优先针对排序在前的预想故障进行预防控制优化计算，直至增加的预防控制代价与降低的紧急控制代价之和不能再降低，则搜索到了风险优化极值点，那么排序在该极值点之后的故障集可不采取主动控制降低风险，从而降低了预想故障集设置对调度运行人员的依赖程度。该策略的具体流程如下文所述。

3.2 自然灾害下在线预防控制风险优化流程

该风险控制策略流程包括预想故障集排序、预想故障集分段处理、预防控制代价优化等几个关键点，如图 4 所示。

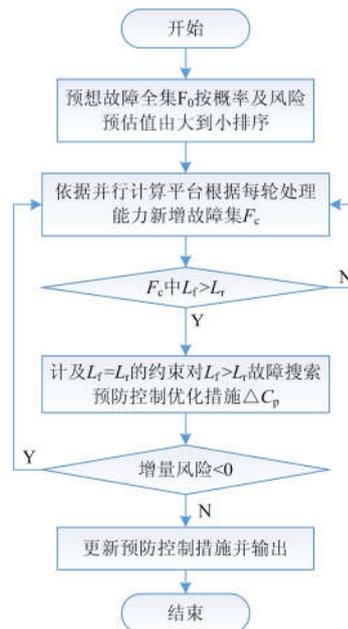


图 4 自然灾害下计及保护与安自控制代价的在线预防控制风险优化决策流程图

Fig. 4 Flow chart of online preventive control risk optimization under natural disaster considering protection and automatic-security device control costs

1) 预想故障集排序

排序的目的是降低遗漏应重点关注故障的可能性，因此需要将故障概率大的故障排序靠前，对于概率相同的故障，可根据灾害引起的原发故障直接触发的继电保护及安控系统控制代价对应的事前预

估风险值排序。该风险值不需进行安稳时域仿真，可按式(1)计算。

$$R_{rc,i} = (L_{r,i} + L_{c,i})p_{f,i} \quad i=1,2,\dots,n_0 \quad (1)$$

其中： n_0 为概率大于设定阈值值的预想故障全集 F_0 中预想故障的数目； $L_{r,i}$ 和 $L_{c,i}$ 分别为第 i 个预想故障发生后直接触发的保护装置动作所导致的损失代价、安自装置动作所导致的损失代价； $p_{f,i}$ 为第 i 个预想故障发生的概率； $R_{rc,i}$ 为第 i 个预想故障发生后因预想故障直接触发的保护装置和安自装置动作所导致的风险。

2) 预想故障集分群

分群的目的是提升计算效率。首先根据并行计算平台 CPU 的总核数确定每轮计算新增加的故障数目，形成当前轮待计算的故障子集 F_c 。然后根据是否存在原发性继电保护动作代价之外的紧急控制代价将 F_c 划分为 2 组，满足 $L_r > L_r$ 的集合记为 F_p ，其余的记为 F_s ，如图 5 所示。其中， L_f 表示全部紧急控制代价， L_r 表示预想故障直接触发的保护装置动作所导致的损失代价，如图 2 所示。

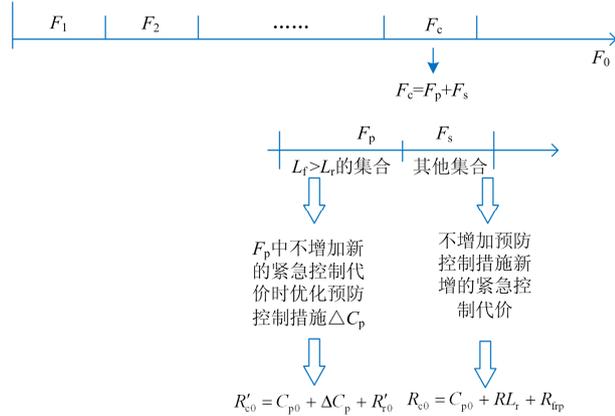


图 5 预想故障集分段及控制措施优化示意图

Fig. 5 Diagram of contingency set section and control measures optimization

3) 预防控制代价优化

针对当前轮待计算的故障子集 F_c ，如果不新增预防控制措施，其对应的运行风险 R_{c0} 如式(2)所示。

$$R_{c0} = C_{p0} + R_{r0} + R_{fp} = C_{p0} + \sum_{i=1}^{n_0} L_{r,i} p_{f,i} + \sum_{j=1}^{n_p} (L_{fp,j} - L_{rp,j}) p_{fp,j} \quad (2)$$

其中： C_{p0} 为当前已采取的预防控制措施对应的控制代价； R_{r0} 为预想故障全集 F_0 中因直接触发保护装置动作所导致的风险之和； R_{fp} 为当前轮故障子集 F_p 中扣除直接触发保护装置动作所导致的风险后所产生的风险之和； n_p 为 F_p 中预想故障的数目； $L_{rp,j}$

和 $L_{rp,j}$ 分别为 F_p 中第 j 个预想故障发生后的全部紧急控制代价、直接触发的保护装置动作所导致的损失代价； $p_{fp,j}$ 为 F_p 中第 j 个预想故障发生的概率。

针对当前轮待计算的故障子集 F_p ，如果强制约束 $L_{fp}=L_{rp}$ ，即除了直接触发的保护装置动作代价外不增加新的紧急控制代价，采用基于控制性能指标的启发式算法^[35]优化求得需要新增的预防控制代价为 ΔC_p ，则此时对应的运行风险 R'_{c0} 如式(3)所示。

$$R'_{c0} = C_{p0} + \Delta C_p + R'_{r0} = C_{p0} + \Delta C_p + \sum_{i=1}^{n_0} L'_{r,i} p_{f,i} \quad (3)$$

其中， R'_{r0} 和 $L'_{r,i}$ 分别为计及新增预防控制措施生成的电网最新运行状态下 F_0 中因直接触发保护装置动作所导致的风险之和、第 i 个预想故障直接触发保护装置动作导致的损失代价。

由于协调预防控制与紧急控制而产生的增量风险 ΔR 如式(4)所示。

$$\Delta R = R'_{c0} - R_{c0} = (\Delta C_p - R_{fp}) + (R'_{r0} - R_{r0}) \quad (4)$$

其中： $(\Delta C_p - R_{fp})$ 为新增预防控制代价及其对故障子集 F_p 的紧急控制风险降低作用的叠加； $(R'_{r0} - R_{r0})$ 为新增预防控制措施更改电网运行状态后诱发的直接触发保护装置动作产生的风险增量。

因此，一直沿着 $\Delta R < 0$ 的方向优化，可以得到需要实施预防控制的预想故障集以及降低电网实际运行风险的在线预防控制优化措施^[36]。

4 结论与展望

当前自然灾害下的安全防御以输电元件故障概率为核心、以传统三道防线为防御原则。在这种模式下，为了提升安全防御的可靠性，需要不断扩大故障集、降低概率阈值，理论上如果计及小概率高风险事件的防御，那么需要防御的故障数量将是无穷多。另一方面，自然灾害下的输变电设备故障概率特征，也已经不符合三道防线关于不同故障形式故障概率差别很大的假设。在这种背景下，本文探讨了以电网运行风险为核心、以风险防控代价比为防御原则的灾害防控理念，提出了适应灾害下概率及损失变化特征的风险控制策略，在预防控制与紧急控制间自动设置防御门槛。

对于跨区的交直流混联电网，目前正在构建系统保护的防御体系。可以想象的是，对于如此复杂的互联系统，自然灾害下的故障组合形式不可能离线穷尽。因此，自然灾害下与预防控制相协调的系统保护策略在线优化追加应该是下一步系统保护建

设的重要内容之一。

参考文献

- [1] 罗剑波, 郁琛, 谢云云, 等. 关于自然灾害下电力系统安全稳定防御方法的评述[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 158-170.
LUO Jianbo, YU Chen, XIE Yunyun, et al. A review on risk assessment of power grid security and stability under natural disasters[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 158-170.
- [2] 薛禹胜, 吴勇军, 谢云云, 等. 停电防御框架向自然灾害预警的拓展[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(16): 18-26.
XUE Yusheng, WU Yongjun, XIE Yunyun, et al. Extension of blackout defense scheme to natural disasters early-warning[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(16): 18-26.
- [3] 电力系统安全稳定控制技术导则: GB/T 26399—2011[S]. 北京: 中国电力出版社, 2011.
- [4] 薛禹胜, 刘强, DONG Zhaoyang, 等. 关于暂态稳定不确定性分析的评述[J]. 电力系统自动化, 2007, 31(14): 1-6.
XUE Yusheng, LIU Qiang, DONG Zhaoyang, et al. A review of nondeterministic analysis for power system transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31(14): 1-6.
- [5] 薛禹胜, 费圣英, 卜凡强. 极端外部灾害中的停电防御系统构思(一)新的挑战与反思[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(9): 1-6.
XUE Yusheng, FEI Shengying, BU Fanqiang. Upgrading the blackout defense scheme against extreme disasters part I new challenges and reflection[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(9): 1-6.
- [6] 薛禹胜, 肖世杰. 综合防御高风险的小概率事件: 对日本相继天灾引发大停电及核泄漏事件的思考[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(8): 1-11.
XUE Yusheng, XIAO Shijie. Comprehensively defending high risk events with low probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(8): 1-11.
- [7] 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.
- [8] 金学成, 陈堂龙, 邹根华, 等. 自适应外部环境的电网安全稳定智能防御系统应用[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(23): 137-142.
JIN Xuecheng, CHEN Tanglong, ZOU Genhua, et al. Application of power grid security and stability intelligent defense system self-adapting the external environment[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(23): 137-142.
- [9] BILLINTON R, SINGH G. Application of adverse and extreme adverse weather: modeling in transmission and distribution system reliability evaluation[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(1): 115-120.
- [10] ENGELBRECHT C S, HARTINGS R, LUNDQUIST J. Statistical dimensioning of insulators with respect to polluted conditions[J]. IEE Proceedings: Generation, Transmission and Distribution, 2004, 151(3): 321-326.
- [11] NATEGHI R, GUIKEMA S D, QUIEING S M. Comparison and validation of statistical methods for predicting power outage durations in the event of hurricanes[J]. Risk Analysis, 2011, 31(12): 1897-1906.
- [12] MIKI T. Consideration of uncertainty factors in search for high risk events of power systems caused by natural disasters[J]. WSEAS Transactions on Power Systems, 2008, 3(3): 76-81.
- [13] 侯慧, 尹项根, 游大海, 等. 国外经验对中国电力系统应急减灾机制的启示[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(12): 89-93.
HOU Hui, YIN Xianggen, YOU Dahai, et al. Apocalypse of overseas experiences on emergency anti-disaster mechanism for China power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(12): 89-93.
- [14] 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.
- [15] 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.

- [16] 易永亮, 熊小伏, 徐望圣, 等. 一种计及地线影响的输电线路可靠性动态评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(10): 77-84.
YI Yongliang, XIONG Xiaofu, XU Wangsheng, et al. A dynamic evaluation method of transmission line reliability considering the effects of ground wire[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(10): 77-84.
- [17] 宁辽逸, 吴文传, 张伯明, 等. 运行风险评估中缺乏历史统计数据时的元件停运模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(25): 26-31.
NING Liaoyi, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Component outage modeling method for operation risk assessment with limited power components' failure data[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(25): 26-31.
- [18] 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.
- [19] 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, 83.
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, 83.
- [20] 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, 98.
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, 98.
- [21] 吴勇军, 薛禹胜, 陆佳政, 等. 山火灾害对电网故障率的时空影响[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(3): 14-20.
WU Yongjun, XUE Yusheng, LU Jiazheng, et al. Space-time impact of forest fire on power grid fault probability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(3): 14-20.
- [22] 杨杰, 吕晓燕, 段诗尧, 等. 风偏计算软件在线路故障分析中的应用[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 77-82, 100.
YANG Jie, LÜ Xiaoyan, DUAN Shiyao, et al. Application of wind deviation calculation software in transmission line faults analysis[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 77-82, 100.
- [23] 李剑, 王湘雯, 黄正勇, 等. 超疏水绝缘涂层制备与防冰、防污研究现状[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 61-75.
LI Jian, WANG Xiangwen, HUANG Zhengyong, et al. Research of preparation, anti-icing and anti-pollution of super hydrophobic insulation coatings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 61-75.
- [24] 陈西平, 琚泽立, 孙毅卫, 等. 陕西云地闪参数分布规律的研究[J]. 智慧电力, 2017, 45(10): 88-94.
CHEN Xiping, JU Zeli, SUN Yiwei, et al. Research on distribution law for cloud-to-ground lightning in Shaanxi area[J]. Smart Power, 2017, 45(10): 88-94.
- [25] 王泽忠, 陶瑞祥. 基于区域分解求解磁暴感应地电场的广义极小残量迭代算法[J]. 电工技术学报, 2018, 33(6): 1265-1275.
WANG Zezhong, TAO Ruixiang. Generalized minimal residual iterative algorithm for solving induced geoelectric field during geomagnetic storms based on domain decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018, 33(6): 1265-1275.
- [26] 熊小伏, 王尉军, 于洋, 等. 多气象因素组合的输电线路风险分析[J]. 电力系统及其自动化学报, 2011, 23(6): 11-15, 28.
XIONG Xiaofu, WANG Weijun, YU Yang, et al. Risk analysis method for transmission line combining of various meteorological factors[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2011, 23(6): 11-15, 28.
- [27] 刁浩然, 杨明, 韩学山, 等. 电力设备停运概率的非精确条件估计[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(19): 5134-5144.
DIAO Haoran, YANG Ming, HAN Xueshan, et al. Imprecise estimation for conditional outage probability of power components[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(19): 5134-5144.
- [28] 刘海涛, 孙元章, 程林, 等. 计及多状态元件模型的系统状态快速排序技术[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(1): 16-21.
LIU Haitao, SUN Yuanzhang, CHENG Lin, et al. Fast sorting technique considering multi-state component models[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(1): 16-21.
- [29] 薛禹胜. 暂态稳定预防控制和紧急控制的协调[J]. 电力系统自动化, 2002, 26(4): 1-4, 9.
XUE Yusheng. Coordinations of preventive control and emergency control for transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26(4): 1-4, 9.

- [30] 薛禹胜, 李威, HILL D J. 暂态稳定混合控制的优化(一) 单一失稳模式的故障集[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(20): 6-10.
XUE Yusheng, LI Wei, HILL D J. Optimal hybrid control of transient stability part one: for cases with a unique unstable mode[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(20): 6-10.
- [31] 王达, 薛禹胜, WU Q H, et al. 故障驱动切负荷和轨迹驱动切负荷的协调优化[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 1-6.
WANG Da, XUE Yusheng, WU Q H, et al. Optimization and coordination of fault-driven load shedding and trajectory-driven load shedding[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 1-6.
- [32] 徐泰山, 许剑冰, 鲍颜红, 等. 互联电网预防控制和紧急控制在线预决策系统[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(7): 1-4, 36.
XU Taishan, XU Jianbing, BAO Yanhong, et al. Online predecision based preventive and emergency control system for interconnected power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30(7): 1-4, 36.
- [33] 徐泰山, 薛禹胜, 李碧君, 等. 暂态稳定在线预警故障集的自适应筛选[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(22): 1-4.
XU Taishan, XUE Yusheng, LI Bijun, et al. On-line adaptive contingency screening for early-warning of transient stability[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(22): 1-4.
- [34] 姚恺丰, 于继来, 徐泰山, 等. 热带气旋引发电网群发性故障的动态事故集生成方法[J]. 电网技术, 2014, 38(6): 1593-1599.
YAO Kaifeng, YU Jilai, XU Taishan, et al. A method to generate dynamic accident set for power grid clustered faults caused by tropical cyclone[J]. Power System Technology, 2014, 38(6): 1593-1599.
- [35] 鲍颜红, 冯长有, 徐泰山, 等. 电力系统在线安全稳定综合辅助决策[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(1): 104-110.
BAO Yanhong, FENG Changyou, XU Taishan, et al. Online security and stability comprehensive auxiliary decision-making of power system[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(1): 104-110.
- [36] 徐泰山, 薛禹胜, 鲍颜红, 等. 计及保护与安自控制代价的在线预防控制风险决策方法: 中国, CN 201510424625.5[P]. 2015-07-17.

收稿日期: 2018-06-27; 修回日期: 2018-09-07

作者简介:

常康(1983—), 男, 通信作者, 博士研究生, 高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: changkang@sgepri.sgcc.com.cn

徐泰山(1968—), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制; E-mail: xutaishan@sgepri.sgcc.com.cn

郁琛(1984—), 男, 博士, 主要研究方向为电力系统安全稳定分析与控制。E-mail: yuchen@sgepri.sgcc.com.cn

(编辑 葛艳娜)