

自然灾害下高风险多重故障集快速生成方法

崔伟¹,李武璟¹,牛拴保¹,王风雷¹,褚云龙¹,薛晨¹,杨君军²

(1. 国家电网有限公司西北分部,陕西 西安 710000;2. 南瑞集团(国网电力科学研究院)有限公司,江苏 南京 211106)

摘要:随着电力系统稳定特性日趋复杂、极端自然灾害频发以及社会对电能依赖程度的增长,迫切需要将停电防御框架向自然灾害预警拓展。提出一种自然灾害下高风险多重故障集快速生成方法,将高风险预想故障纳入在线安全分析。在兼顾多类型自然灾害和多地点电气设备空间-电气耦合特性的基础上计算群发故障和相继故障的组合概率,从网架结构脆弱性、电网状态脆弱性和电网事故风险3个维度进行故障后果评价,采用回溯算法实现自然灾害下高风险预想集快速筛选和生成。实际电网的案例验证了所提方法的有效性和实用性。

关键词:自然灾害;故障概率;高风险;多重故障;回溯算法

中图分类号:TM 73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202103004

0 引言

预想故障集包括单一设备故障、群发性故障和相继故障,是进行电网安全分析与控制的重要数据^[1]。外部自然灾害对电网造成破坏的频次和程度不断上升,受交直流线路密集架设和外部灾害的影响,群发性故障和相继故障等多重故障发生概率增加^[2]。在电网跨区互联的背景下,局部故障可能引发全局性安全风险,对于电网在线安全分析与决策的预想故障集,在传统单一设备故障的基础上需要考虑高风险的群发性故障和相继故障^[3]。目前,预想故障集的来源为全网 $N-1$ 故障和调度运行人员凭经验设置的故障,与电网安全特性失配程度较大,不能全面反映电网实时运行状况。为了满足在线安全分析与决策的实时性要求,需要结合外部灾害信息和电网网架结构进行群发性和相继故障的滚动快速生成和筛选。

基于自然灾害引发的设备故障概率获取受灾设备集合,在受灾设备集合内进行故障设备组合,可以减小预想故障集的规模。文献[4]针对单一外部灾害采用穷尽式组合的方法,基于概率阈值和故障重数生成多重故障集,降低了故障维数。文献[5]指出孤立地分析不同自然灾害的影响,不能正确地反映复合灾害下的停电风险。文献[6]定性描述“独立 $N-s$ 故障”与“相关 $N-s$ 故障”概率大小之间的关系,其中 s 为故障设备数目。现有方法在单一灾害设备故障概率评估的基础上以穷尽式组合的方式生成多

重故障集,耗时长,故障集规模大^[7],且无法计及多种灾害耦合影响下多重故障的组合概率和后果进行多重故障的快速筛选,难以满足在线安全分析与决策的实时性要求。

面对数千台机组、数万个节点的大电网,基于自然灾害下的故障概率进行设备组合,受故障重数和概率阈值约束,大量低风险故障纳入防御范围,故障规模较大,难以满足有限计算资源条件下的在线安全分析与控制要求,需进一步筛选高风险故障。预想故障集筛选主要通过快速估算反映事故严重程度的安全稳定指标,滤除不严重事故。文献[8]先用负荷和潮流迭代预估方法,再用改进的二次曲线预估方法筛选静态稳定故障。文献[9]提出基于电网上一轮在线评估结果筛选当前运行方式下严重故障集的方法,实现了按暂态稳定严重程度筛选需详细计算的预想故障子集^[10]。然而,自然灾害引发多重故障与灾害发展路径、灾害严重程度以及受灾设备间的空间-电气耦合特性密切相关,现有故障集筛选方法难以适应外部灾害下多重故障的动态变化和筛选^[11-12]。

本文提出一种自然灾害下高风险多重故障集快速生成方法。首先,兼顾外部自然灾害下单一设备故障概率、设备/杆塔间的空间距离以及电气耦合特性,建立群发性故障和相继故障的组合概率量化评估模型;然后,从网架结构、电网状态和事故风险3个维度提出基于故障后果的高风险预想故障集评价指标计算方法;最后,基于受灾设备集构建故障设备组合问题的优化数学模型,采用回溯算法实现预想故障集的快速筛选和生成。

1 故障组合概率评估

从自然灾害形成机理的角度看,不同类型灾害对电网设备的影响范围、影响时间和导致的故障类

收稿日期:2020-05-06;修回日期:2021-01-08

基金项目:国网西北分部D5000系统电网风险动态评估与智能决策控制功能建设项目(2018-00465-WDGS)

Project supported by Power Grid Risk Dynamic Assessment and Intelligent Decision Control Function Construction Project in D5000 System of State Grid Northwest Branch (2018-00465-WDGS)

型各不相同,如:积雪和覆冰影响的时间尺度为几小时至几天,该类型灾害会引起输电线路杆塔的绝缘子闪络,覆冰增加最终将导致断线和倒塔事故;山火导致多回线路同时或相继跳闸,甚至跳闸后重合闸失败。而且,不同类型灾害之间具有诱发或耦合作用,单个灾害往往会诱发多种灾害,多种灾害在时间维度和空间维度的演化过程中相互影响,从而导致电力设备发生群发性故障或相继故障。外部灾害的不确定性及其引发设备故障的复杂性使得很难用数学模型精确地获取受灾设备故障集,但可以根据灾害概率、灾害与设备空间和电气作用关系引入耦合系数,计算不同类型灾害、不同电气设备间的组合概率,从而进行故障设备组合。

1.1 单一设备故障概率

在单一灾害影响下,电气设备的故障概率为灾害发生的概率^[13-16]。同一设备受多种灾害影响时,各种类型灾害为独立事件,根据复合灾害的致灾途径引入不同类型灾害耦合系数,修正单一设备在复合灾害下的故障概率为:

$$p_l = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - \beta_i P_{l,i}) \quad (1)$$

其中, p_l 为设备 l 在复合灾害下的故障概率; $P_{l,i}$ 为设备 l 在灾害 i 下的故障概率; m 为灾害数目; β_i 为灾害 i 与其他灾害之间的耦合系数,不同类型灾害之间的耦合系数与灾害之间的因果关系、灾害重合时长和灾害间的影响程度有关,其计算公式如式(2)所示。

$$\beta_i = \frac{\sum_{j=1}^m \left(\varepsilon_{i,j} \frac{\Delta t_{i,j}}{\Delta t} \frac{P_{l,j}}{P_{l,\max}} \right)}{m} \quad (2)$$

其中, $\varepsilon_{i,j}$ 表示灾害 i 与灾害 j 之间的因果关系,两灾害如积雪和覆冰间存在因果关系,取 $\varepsilon_{i,j}=1$,暴雨和山火间不存在因果关系,取 $\varepsilon_{i,j}=0$; Δt 为预想时段时长; $\Delta t_{i,j}$ 为灾害 i 与灾害 j 的重合时长; $P_{l,\max}$ 为设备 l 受所有类型灾害影响的最大故障概率。

设备发生故障既受自然灾害的影响,也受电网运行状态的影响^[17-18]。前后故障之间有明确的因果关系,如前一故障改变了系统状态从而触发下一个设备故障时,根据灾害与设备状态之间的叠加效应,修正设备故障概率为:

$$p'_l = 1 - (1 - p_l)(1 - \omega p_z) \quad (3)$$

其中, p'_l 为设备 l 修正后故障概率; p_z 为系统状态改变导致设备 l 故障的概率; ω 为影响因子,取 $\omega \geq 1$ 。

1.2 组合概率计算

群发性故障是指众多电气设备受外部自然灾害影响而发生的多重预想故障,例如由于同一地区的气象及地质条件相仿,外部极端灾害往往同时波及众多设备,从而造成群发性故障及大面积停电。预

想故障集中各设备发生故障视为独立事件,组合概率计算公式为:

$$P_{c,K} = 1 - \prod_{l=1}^K (1 - \alpha_l p'_l) \quad (4)$$

其中, $P_{c,K}$ 为 K 重设备组合概率, K 为一个多重预想故障中的设备数,简称故障重数; α_l 为设备 l 与该组合中其他设备之间的耦合系数, $0 \leq \alpha_l \leq 1$, α_l 越大表示两设备间耦合越紧密。

根据设备间的空间距离和电气距离计算耦合系数 α_l 为:

$$\alpha_l = \prod_{j=1, j \neq l}^K \left(\frac{L_{\min} E_{\min}}{L_j E_j} \right) \quad (5)$$

其中, L_j 和 E_j 分别为设备 l 与设备 j 间的空间距离和电气距离; L_{\min} 为设备 l 与该组合中其他设备之间空间距离的最小值; E_{\min} 为设备 l 与该组合中其他设备之间电气距离的最小值。

自然灾害演化过程中设备故障概率是随着时间而变化的,设灾害时段内设备 a 故障概率的时间序列模型为 $P_a = \{P_{a,t_1}, P_{a,t_2}, \dots, P_{a,t_i}, \dots, P_{a,t_h}\}$,其中 P_{a,t_i} 为设备 a 在 t_i 时刻的故障概率, t_1, t_h 分别为灾害开始、结束时刻。当多个设备故障之间的时间差大于1 min时,称为慢速相继故障,可以作为独立故障生成;当多个故障之间的时间差小于1 min时,称为快速相继故障,需作为同一个故障场景来考虑。从受灾设备全集的序列模型中按时间顺序选择 K 个设备进行组合时,后续设备故障受前面设备故障的影响,按照时间序列模型计算设备间时间维度的耦合系数为:

$$\alpha_b = \prod_{a=1, a \neq b}^K \frac{\text{cov}(P_b, P_a)}{\psi_{\max}} \quad (6)$$

其中, $P_b = \{P_{b,t_1}, P_{b,t_2}, \dots, P_{b,t_i}, \dots, P_{b,t_h}\}$; $\text{cov}(P_b, P_a)$ 为设备 b 与设备 a 故障概率的协方差; ψ_{\max} 为设备 b 与其他设备协方差的最大值。当两设备间协方差为负时,取 $\alpha_b = 0$ 。

对于输电线路间的组合概率评估,基于同塔多回线路、密集高压输电通道及交叉跨越线路的杆塔位置和耦合特点,进一步根据受灾杆塔间的空间距离识别紧密耦合杆塔集合 o_1 和一般耦合杆塔集合 o_2 ,提升密集通道故障的关注度。根据杆塔故障概率和耦合效应修正输电线路间的组合概率为:

$$p_o = 1 - \prod_{i=1}^{G_1} (1 - \beta_1 p_{o_1,i}) \prod_{j=1}^{G_2} (1 - \beta_2 p_{o_2,j}) \quad (7)$$

其中, p_o 为输电线路之间的组合概率; $p_{o_1,i}$ 为集合 o_1 中第 i 个杆塔的故障概率; $p_{o_2,j}$ 为集合 o_2 中第 j 个杆塔的故障概率; G_1, G_2 分别为集合 o_1 和 o_2 中杆塔的数目; $\beta_1、$

β_2 分别为集合 o_1 和 o_2 的耦合系数,且 $0 \leq \beta_1 < \beta_2 \leq 1$ 。

2 故障后果评价指标

极端自然灾害下倒塔、断线等多重故障严重破坏电网的网架结构,造成系统潮流重新分布,同时电网运行状态的急剧变化还会引起系统功角、电压、频率等安全稳定问题,故障后薄弱的网架与多类安全稳定问题交织耦合,更易诱发大规模连锁故障甚至大面积停电,同时故障后安全自动装置和三道防线动作会导致部分发电、负荷损失,引发一定的经济风险,严重威胁电网运行的安全性和经济性。因此,针对自然灾害下大规模多重严重故障的筛选问题,不能依赖某一维度的评价指标,需从多个维度考量故障后果的严重程度。

为了有效地降低自然灾害下多重故障规模,本文选择网架结构脆弱性指标、电网状态脆弱性指标和事故风险指标分别表征自然灾害下网架结构破坏程度、电网安全稳定运行状态和事故事件等级,从电网结构、状态和风险3个维度构建的故障后果评价指标具有互补性和全面性特点,当任一维度的指标满足筛选条件时,则保留该预想故障,该方法解决了高风险故障漏筛的问题,同时后果评价指标不依赖时域仿真,故障筛选耗时可以满足在线安全分析与决策的要求。

2.1 网架结构脆弱性指标

网架结构由发电、负荷节点和线路组成,决定了系统电能的传输能力和功率分布,是电网内在的本质特征。自然灾害下重要线路等设备遭到破坏,严重影响输电线路利用率,甚至会引起电网风险。

电气介数表征输电线路承载发电与负荷间传输功率的重要程度,基于线路传输功率上限及其对发电、负荷节点的灵敏度定义输电线路的电气介数为:

$$B_i = \sum_{g \in \Omega_g} \sum_{l \in \Omega_l} W_{gl} \lambda_{i,g} \quad (8)$$

其中, B_i 为输电线路 i 的电气介数; Ω_g 为电网中发电机集合; Ω_l 为电网中负荷集合; $\lambda_{i,g}$ 为输电线路 i 对发电机 g 的灵敏度; W_{gl} 为发电机 g 到负荷 l 所有路径的最小传输容量,如式(9)所示。

$$W_{gl} = \min \left(\frac{W_l}{\lambda_{l,g}}, \dots, \frac{W_j}{\lambda_{j,g}}, \dots, \frac{W_q}{\lambda_{q,g}} \right) \quad (9)$$

其中, W_j 为发电机 g 到负荷 l 中第 j 条路径的最大传输功率; $\lambda_{j,g}$ 为第 j 条路径对发电机 g 的灵敏度; q 为发电机 g 到负荷 l 的路径数目。

为便于筛选对网架结构破坏程度较大的多重预想故障,定义网架结构脆弱性指标为故障所含输电线路脆弱性指标中的最小值,脆弱性指标越小表示故障对网架结构的破坏越严重。量化评估输电线路 i 脆弱性指标 $C_{net,i}$ 为:

$$C_{net,i} = \left(1 - \frac{B_i - W_{i,max}}{W_{i,max}} \right) \times 100\% \quad (10)$$

其中, $W_{i,max}$ 为输电线路 i 的功率上限。

2.2 电网状态脆弱性指标

线路电流和功率、母线电压和相角以及系统频率和暂态稳定性是表征电网运行状态的变量,反映了在遭受扰动或故障后元件状态量发生变化、系统运行点发生移动,并可能向临界值逼近的特性。因此,故障后电网过载安全性、电压稳定性、系统频率安全性和暂态稳定性可较好地表征电网状态脆弱性,定义电网状态脆弱性指标 $C_{stat,k}$ 为:

$$C_{stat,k} = \min(\eta_{s,k}, \eta_{f,k}, \eta_{v,k}, \eta_{vt,k}, \eta_{\theta,k}) \quad (11)$$

其中, $\eta_{s,k}$ 、 $\eta_{f,k}$ 、 $\eta_{v,k}$ 、 $\eta_{vt,k}$ 、 $\eta_{\theta,k}$ 分别为故障 k 下电网热稳裕度、频率安全裕度、静态电压稳定裕度、暂态电压稳定裕度和暂态功角稳定裕度。

采用初始方式进行潮流计算、灵敏度分析和模态分析,快速估算电网安全稳定状态,从而评估电网热稳裕度、频率裕度、电压稳定裕度和暂态稳定裕度。

(1)静态过载安全性。根据直流潮流法和分布因子法可快速估算故障后各支路潮流 $I_{1,i,k}$,则系统热稳裕度为 $\eta_{s,k} = \min_{i=1,2,\dots,r} (1 - I_{1,i,k}/I_{max,i})$,其中, r 为监视支路数目, $I_{max,i}$ 为支路 i 热稳限值。

(2)系统频率安全性。预想故障后电网的频率动态过程与电网的惯性时间常数、有功注入不平衡量、负荷静态频率特性和发电机一次调频特性紧密相关。有功注入不平衡量基本决定了稳态频率的大小,负荷静态频率特性和发电机一次调频特性通过改变有功注入不平衡量影响稳态频率。因此,采用准静态模拟的方法可依次快速估算预想故障 k 下 t 个同步网的稳态频率,即:

$$f_{1,i,k} = f_{0,i,k} + f_{N,i} \frac{\Delta P_{0,i} + \Delta P_{1,i,k}}{K_{L,1,i} P_{L,1,i}} \quad (12)$$

其中, $f_{0,i,k}$ 和 $f_{1,i,k}$ 分别为故障前和故障后同步电网 i 的稳态频率; $f_{N,i}$ 为同步电网 i 的额定频率; $\Delta P_{0,i}$ 为故障直接导致同步电网 i 的有功不平衡量; $\Delta P_{1,i,k}$ 为故障后安全控制装置的当值措施导致同步电网 i 的有功不平衡量; $K_{L,1,i}$ 和 $P_{L,1,i}$ 分别为同步电网 i 的负荷有功静态频率特性系数和负荷有功之和。

取故障 k 下 t 个同步网的频率裕度最小值作为其系统频率裕度,即 $\eta_{f,k} = \min_{i=1,2,\dots,t} (1 - f_{1,i,k}/f_{N,i})$ 。

(3)静态电压稳定性。自然灾害下供电能力不足、无功电源分布不均、支撑能力不足的局部电网,特别是与负荷中心电气距离较近的输电通道故障下易出现电压稳定问题,按照以下步骤快速评估静态电压稳定性。

a. 基于初始方式计算电压稳定裕度 $\eta_{v,0}$, 根据裕度值动态设定元件参与因子阈值 δ_{\max} , 即 $\eta_{v,0}$ 越大, 则 δ_{\max} 越大, $\eta_{v,0}$ 越小, 则 δ_{\max} 越小。

b. 基于极限态方式的模态分析结果, 获取电压薄弱母线和发电机、线路、变压器等元件的参与因子 $\delta_{i,k}$, 筛选 $\delta_{i,k} > \delta_{\max}$ 的设备, 形成危险设备集。

c. 若故障 k 的组成设备属于危险设备集, 且故障设备与薄弱母线间的电气距离较小, 则故障 k 可能引起静态电压稳定问题, 取 $\eta_{v,k} = -1$; 否则, 故障 k 静态电压稳定, 取 $\eta_{v,k} = 1$ 。

(4) 暂态电压稳定性。多重故障下局部受端电网无功平衡能力不足易引起暂态电压失稳问题, 其动态过程近似为系统不断从一个暂态平衡点过渡到新的暂态平衡点的运动轨迹。基于准静态假设可以实现暂态电压稳定快速仿真^[19], 根据发电机、负荷等设备的动态特性、保护和自动控制装置的动作时刻提前预测故障后一系列暂态平衡点, 将微分仿真转换为代数方程, 通过快速求解代数方程获取各平衡点的暂态电压, 如果负荷母线恢复电压大于其规定的运行电压, 且超过设定的阈值, 则暂态电压稳定裕度 $\eta_{vt,k} = 1$, 否则, 取 $\eta_{vt,k} = -1$ 。

(5) 暂态功角稳定性。通过模型驱动的时域仿真进行暂态稳定性分析, 需要获得足够时长的受扰轨迹信息, 计算速度较慢。扩展等面积准则 (EEAC) 严格地将高维系统的稳定裕度问题转换为多个映象平面轨迹的数据挖掘问题, 较好地权衡了故障筛选量化和快速的要求。静态扩展等面积准则 (SEEAC) 在 EEAC 的基础上假设系统为理想两群模式, 只需 1 次泰勒展开即可快速识别主导模式。因此, 基于 SEEAC 算法可快速计算暂态功角裕度, 即 $\eta_{i,k}$ 。

2.3 电网事故风险指标

自然灾害下发电损失和负荷损失是触发事故风险的重要因素, 国务院颁布的《电力安全事故处罚条例》和《国家电网公司安全事故调查规程》均明确发电损失和负荷损失是评价事故风险等级的重要指标。根据故障本身损失及故障后安全自动装置和系统保护动作情况, 定义预想故障 i 下电网事故风险指标为:

$$R_e = k_{g,i} \sum_{j \in G} \mu_{g,j} (P_{g,j} - P_{g,i,j}) + \sum_{l \in L} \mu_{l,i} (P_{l,i} - P_{l,i,l}) \quad (13)$$

其中, G 和 L 分别为初始运行状态下发电厂和负荷集合; $\mu_{g,j}$ 为发电厂 j 的上网电价; $\mu_{l,i}$ 为负荷 l 的购买电价; $P_{g,j}$ 和 $P_{g,i,j}$ 分别为发电厂 j 在初始运行状态下和故障 i 后的有功出力; $P_{l,i}$ 和 $P_{l,i,l}$ 分别为负荷 l 在初始运行状态下和故障 i 后的负荷有功; $k_{g,i}$ 为根据电网经济运行管理设置的切机事故风险折算系数。

3 基于回溯法的高风险故障生成

在故障组合概率计算和故障后果评价的基础上, 根据受灾设备集生成群发性故障和相继故障的问题属于组合求解问题, 其目标是寻找一个组合概率、故障重数和故障后果满足筛选条件的多重预想故障集以及在线计算速度要求。但受灾设备数目越多, 组合耗时越长, 组合规模越大, 甚至出现组合爆炸问题。

将故障设备组合优化问题表达为问题 W: 已知灾害影响范围内 n 个受灾设备的故障概率 P_i 组成的 n 元组 $S_i = (P_1, P_2, \dots, P_n)$, 构成一个状态空间 $E = \{(P_1, P_2, \dots, P_n) | P_i \in S_i, i = 1, 2, \dots, n\}$, 设定 n 元组中约束集为 D , 求 E 中满足故障组合重数约束、组合概率阈值约束、网架结构脆弱性指标约束、电网状态脆性指标约束和事故风险指标约束的所有 n 元组。回溯算法可按照深度优先的次序遍历满足要求的路径, 在搜索过程中寻找问题的解, 当发现已不满足求解条件时, 则回溯返回, 尝试别的路径。为使用回溯算法优化搜索满足 D 的所有解, 定义 $n \times n$ 维的状态空间树 S , 每个元素看作图中的一个节点, 将问题 W 化归为图的路径遍历问题。

$$S = \begin{bmatrix} P_1 & P_2 & P_3 & P_4 & \cdots & P_n \\ & P_2 & P_3 & P_4 & \cdots & P_n \\ & & P_3 & P_4 & \cdots & P_n \\ & & & \ddots & & \vdots \\ & & & & P_{n-1} & P_n \\ & & & & & P_n \end{bmatrix} \quad (14)$$

状态空间树 S 中每行元素按照故障概率由大到小的顺序排列, 在 n 个数中选取 K 个数的所有组合, 相当于在一个 $n \times n$ 维的上三角矩阵中求从 (1,1) 位置出发, 按照深度优先的规则搜索到第 n 行的任意一列元素作为结束的所有路径, 规定只有相邻行之间的节点并且下一行的节点必须处于上一行节点右边才有路径相连, 其他情况都无路径相通。显然, 任一路径经过的数字序列就对应一个符合要求的组合。搜索下一个到达位置 (w, K) , 即第 w 行第 K 列时, 限定行数 x 的范围 $w \leq x \leq n$, 判断已搜索路径是否满足 D 中所有约束条件。若满足则记录该路径, 并继续搜索下一个到达位置; 若不满足, 则返回到上一个受灾设备的位置, 沿下一条路径重新搜索。对最大组合重数 K 进行循环, 即可快速得到 $N-2, N-3, \dots, N-K$ 组合故障的所有组合, 基于回溯算法的高风险故障生成流程详见附录中图 A1。

确定最大组合重数 K 的方法: 将受灾设备概率从大到小排序, 待组合设备依次相乘, 直到概率乘积小于故障组概率阈值 P_{\max} 为止, 当 $P_1 P_2 \cdots P_x \leq P_{\max}$ 时, 最大故障重数 $K_x = x - 1$, 选取 $K = \max(K_x, K_{\text{set}})$ 作

为预想时段内设备最大组合重数,其中, P_x 为第 x 个设备的故障概率, K_{set} 为设定的最大故障重数。

4 算例分析

以我国西北电网某断面时刻计算数据为例,电网规模为5872个节点、1032台机组、3152条交流线路、9回直流系统。该时刻海西、河西输电通道及祁韶直流和天中直流附近有大风和暴雨气象灾害预警,受灾设备数共49个,包括2回直流系统、12台变压器和35条交流线路。

4.1 组合概率计算

根据大风和暴雨单一灾害下设备故障概率计算复合灾害下设备的故障概率,取灾害耦合系数为1。表1列出了部分设备在复合灾害下的概率计算结果。

表1 单一设备故障概率

Table 1 Fault probability of single device

受灾设备	故障概率		
	大风	暴雨	复合灾害
风亚线	0.32	0.56	0.7008
风乌线	0.31	0.52	0.6688
达吐线	0.31	0.42	0.5998
达乌Ⅱ线	0.28	0.39	0.5608
达亚线	0.28	0.36	0.5392
明圣线	0.19	0.34	0.4654
海月Ⅰ线	0.20	0.32	0.4560
常祁Ⅰ线	0.19	0.21	0.3601
河武Ⅰ线	0.21	0.23	0.3917
祁韶直流	0.18	0.22	0.3604
天中直流	0.14	0.19	0.3034

在表1计算结果的基础上,根据设备间空间距离和电气距离计算组合概率,部分结果如表2所示。由于空间距离和电气距离越小,设备间耦合系数越大,因此设备组合概率越大,如风亚线+达亚线组合概率为0.862。

表2 设备组合概率计算结果

Table 2 Calculation results of combined device probability

组合设备	空间距离/km	电气距离/ Ω	组合概率
风亚线+风乌线	34.61	36.73	0.577
风亚线+达吐线	99.49	35.54	0.299
风亚线+达乌Ⅱ线	42.07	38.43	0.505
风亚线+达亚线	27.86	9.99	0.862
风亚线+河武Ⅰ线	123.73	42.12	0.043
风亚线+祁韶直流	115.26	52.23	0.037
风亚线+天中直流	135.26	62.28	0.032
祁韶+天中直流	107.42	43.21	0.042

4.2 组合故障筛选

假设组合概率阈值为0.02,网架结构脆弱性阈值为0.20,电网状态脆弱性阈值为0.60,事故风险阈值为100.0,根据组合概率及阈值计算最

大组合重数 $K=5$ 。

基于回溯算法生成 $N-2$ 、 $N-3$ 、 $N-4$ 和 $N-5$ 组合故障,在满足概率阈值要求的前提下,当网架结构脆弱性、电网状态脆弱性和事故风险指标中任一指标满足筛选条件时,则保留该组合故障,最终生成多重预想故障数为1572个,表3列出了部分组合故障。

表3 组合故障筛选结果

Table 3 Screening results of combined fault

组合故障	网架脆弱性	状态脆弱性	事故风险	是否保留
风亚线+风乌线三永	0.13	0.78	0	是
风亚线+达吐线三永	0.22	0.72	0	否
风亚线+达乌Ⅱ线三永	0.23	0.73	0	否
风亚线+达亚线三永	0.21	0.74	0	否
风亚线+河武Ⅰ线三永	0.56	0.55	0	是
明圣线+海月Ⅰ线三永	0.19	0.62	0	是
常祁Ⅰ线三永+祁韶直流双极闭锁	0.23	0.34	210.1	是
祁韶+天中直流双极闭锁	0.34	0.03	412.6	是

由表3可知,风亚线+达吐线三永故障的组合概率为0.299,但是其三维故障后果评价指标均不满足筛选条件,属于低风险故障,因此未纳入防御范围。保留明圣线+海月Ⅰ线三永故障的原因在于网架结构脆弱性指标为0.19(小于阈值0.20),海月断面开断一回线后,严重影响海西走廊输送功率,但没有出现断面越限和设备过载问题,若仅采用状态脆弱性指标,该组合故障将被过滤,显然不合理。保留常祁Ⅰ线三永+祁韶直流双极闭锁故障的原因在于事故风险指标为210.1(大于阈值100.0),祁韶直流功率为3998.0 MW,直流双极闭锁后安控切机2398.0 MW,若仅采用网架结构脆弱性指标和状态脆弱性指标,该组合故障将被过滤。由此可知,采用单一维度指标筛选的组合故障存在漏筛高风险故障的问题,不能全面反映电网安全稳定水平。

在受灾设备数为49个、最大组合重数为5、计算资源为100个CPU的情况下,对比本文方法与穷举组合、仅按组合概率和仅按故障后果评价指标筛选故障这3种方法的故障规模和耗时情况,如表4所示。其中,当故障规模较大时采用并行计算进行后果评价。

由表4可知:随着故障重数增加,采用穷举组合生成的故障数目快速增长,在有限的计算资源条件下对穷举组合故障进行仿真分析不满足工程实用要求;采用仅按组合概率筛选组合故障时,其计算速度比穷举组合提高了一个数量级,故障规模降低为3555个,但存在无需进行仿真分析的高概率低风险故障;采用仅按故障后果评价指标筛选组合故障时,需计算所有穷举组合故障的后果,耗时约219.93 s,虽然可以筛选出高风险故障,但是组合故障数越多,

表4 组合故障规模和耗时对比

Table 3 Comparison of combined fault scale and time consumption

方法	参数	参数值				合计
		2	3	4	5	
穷举组合	故障数	1176	18424	211876	1906884	2138360
	故障耗时/s	1.52	2.33	4.23	12.25	20.33
仅按组合概率	故障数	113	384	876	2182	3555
	故障耗时/s	0.21	0.41	0.82	1.18	2.62
仅按故障后果评价指标	故障数	52	127	336	1237	1752
	故障耗时/s	12.12	27.33	56.23	124.25	219.93
本文方法	故障数	52	127	272	1121	1572
	故障耗时/s	0.27	1.09	2.18	4.24	7.78

注:栏目中2—5表示故障重数。

计算耗时越长;采用本文方法时,先过滤低概率故障,然后根据故障后果评价指标筛选组合故障,总耗时约7.78 s,生成故障数为1572个,既降低了故障集的规模,又提高了计算速度。

4.3 预想故障安全稳定评估

针对全网受灾设备穷举组合生成的多重预想故障集进行时域仿真计算,以 $N-2$ 组合故障为例,按照故障严重程度分别列出部分保留故障子集和部分过滤故障子集的评估结果,分别如表5和表6所示。

表5 保留 $N-2$ 故障子集仿真结果Table 5 Simulative results of saved $N-2$ fault subset

预想故障	系统裕度	发电损失/万元
祁韶+天中直流双极闭锁	0.11	320.57
常祁 I 线三永+祁韶直流双极闭锁	0.19	153.28
明圣线+海月 I 线三永	0.21	153.28
凤亚线+河武 I 线三永	0.27	153.28

表6 过滤 $N-2$ 故障子集仿真结果Table 6 Simulative results of filtered $N-2$ fault subset

预想故障	系统裕度	发电损失/万元
凤亚线+达吐线三永	0.74	0
凤亚线+达乌 II 线三永	0.76	0
凤亚线+达亚线三永	0.83	0

由表5和表6可知,采用本文方法保留的预想故障子集均为故障后果较严重的故障,且没有漏选高风险故障,提高了电网安全风险分析与防控故障集的有效性。

5 结论

针对自然灾害下大电网多重预想故障集的不确定性和高风险性的特点,本文建立基于灾害概率和设备空间、电气耦合特性的组合概率评估模型,为受灾设备组合成为群发性故障提供依据;选择网架结构脆弱性指标、电网状态脆弱性指标和事故风险指

标,建立基于故障后果的三维高风险预想故障集评价指标体系;基于故障组合概率和风险评价指标,采用回溯算法实现自然灾害下高风险多重预想故障集的快速生成。

对自然灾害下西北电网数据的仿真分析,验证了所提方法的有效性和实用性,该方法能过滤大部分低概率低风险和高概率低风险预想故障,大幅降低了需要基于时域仿真的预想故障集规模,加快了在线安全分析与防控的计算速度,推动了大电网在线安全稳定评估技术的实用化。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 段慧,鲍颜红,王超,等. 基于并行模式的多预想故障静态电压稳定辅助决策[J]. 电力自动化设备,2015,35(7):95-100.
DUAN Hui,BAO Yanhong,WANG Chao,et al. Auxiliary decision-making based on parallel mode multi-contingency for static voltage stability[J]. Electric Power Automation Equipment,2015,35(7):95-100.
- [2] 王昊昊,徐泰山,李碧君,等. 自适应自然环境的电网安全稳定协调防御系统的应用设计[J]. 电力系统自动化,2014,38(9):143-151.
WANG Haohao,XU Taishan,LI Bijun,et al. Design of coordinated prevention system in self-adapting natural environment for safety and stability of power grid[J]. Automation of Electric Power Systems,2014,38(9):143-151.
- [3] 张晶晶,尉静慧,李小燕. 台风对电力系统连锁故障的影响分析[J]. 电力自动化设备,2019,39(10):157-162.
ZHANG Jingjing,WEI Jinghui,LI Xiaoyan. Impact analysis of typhoon on cascading failure for electric power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2019,39(10):157-162.
- [4] 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.
- [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] 薛禹胜,谢云云,文福拴,等. 关于电力系统相继故障研究的评述[J]. 电力系统自动化,2013,37(19):1-9,40.
XUE Yusheng,XIE Yunyun,WEN Fushuan,et al. A review on cascading failures in power systems[J]. Automation of Electric Power Systems,2013,37(19):1-9,40.
- [7] 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.
- [8] 赵晋泉,江晓东,张伯明. 一种用于电力系统静态稳定性分析的故障筛选与排序方法[J]. 电网技术,2005,29(20):62-67.
ZHAO Jinquan,JIANG Xiaodong,ZHANG Boming. A contingency screening and ranking method for power system static stability analysis[J]. Power System Technology,2005,29(20):62-67.

- [9] 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.
- [10] 徐泰山,杜延菱,鲍颜红,等. 在线暂态安全稳定评估的分类滚动故障筛选方法[J]. 电力系统自动化,2018,42(13):182-188.
XU Taishan, DU Yanling, BAO Yanhong, et al. A classification rolling contingency screening method for on-line transient security and stability assessment [J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(13): 182-188.
- [11] 方丽华,熊小伏,方嵩,等. 基于电网故障与气象因果关联分析的系统风险控制决策[J]. 电力系统保护与控制,2014,42(17):113-119.
FANG Lihua, XIONG Xiaofu, FANG Song, et al. Power system risk control decision based on cause and effect correlation analysis of fault and meteorology [J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(17): 113-119.
- [12] 谢敏,尹一江,杜余昕,等. 考虑复杂天气风险源的电力系统可用输电能力评估[J]. 电力自动化设备,2018,38(4):16-22.
XIE Min, YIN Yijiang, DU Yuxin, et al. Assessment on available transfer capability considering complex weather risk sources [J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(4): 16-22.
- [13] 王泽斌,王松岩,陈莹,等. 强台风环境下考虑微地形因素的输电通道结构安全概率评估方法[J]. 电力自动化设备,2020,40(1):184-191.
WANG Zebin, WANG Songyan, CHEN Ying, et al. Safety probability assessment method considering micro-topography for transmission grid under strong typhoon environment [J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(1): 184-191.
- [14] WU F F, TSAI Y K, YU Y X. Probabilistic steady-state and dynamic security assessment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1988, 3(1): 1-9.
- [15] 刘颖英,朱永强,蔡维,等. 基于灾害等级概念的电能质量综合评估新思路[J]. 电力自动化设备,2009,29(8):110-113.
LIU Yingying, ZHU Yongqiang, CAI Wei, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on disaster levels [J]. Electric Power Automation Equipment, 2009, 29(8): 110-113.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 徐泰山,鲍颜红. 中期电压稳定的快速仿真算法研究[J]. 电力系统自动化,2000,24(24):9-11.
XU Taishan, BAO Yanhong. A fast simulation method for mid-term voltage stability countermeasures [J]. Automation of Electric Power Systems, 2000, 24(24): 9-11.

作者简介:



崔伟

崔伟(1987—),男,陕西安康人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统及其自动化(E-mail: 1479377442@qq.com);

李武璟(1993—),男,陕西榆林人,工程师,硕士,主要研究方向为电力系统及其自动化(E-mail: 903094972@qq.com);

牛拴保(1978—),男,陕西西安人,教授级高级工程师,硕士,主要研究方向为电力系统调度自动化(E-mail: niusb@nw.sgcc.com.cn)。

(编辑 王锦秀)

Rapid generation method of high risk multiple fault set under natural disaster

CUI Wei¹, LI Wujing¹, NIU Shuanbao¹, WANG Fenglei¹, CHU Yunlong¹, XUE Chen¹, YANG Junjun²

(1. Northwest Branch of State Grid Corporation of China, Xi'an 710000, China;

2. NARI Group Corporation(State Grid Electric Power Research Institute), Nanjing 211106, China)

Abstract: Along with increasing complication of stability characteristic of power system, frequent occurrence of extreme natural disasters and increasing dependence of society on electrical energy, it is urgent to extent blackout defense framework to early-warning of natural disaster. A rapid generation method of high risk multiple fault set under natural disasters is proposed, which incorporates high risk anticipated faults into online security analysis. On the basis of considering multiple types of natural disasters and spatial-electrical coupling characteristics of electrical equipment in multiple locations, the combined probability of group faults and successive faults is calculated. Fault consequence is evaluated from three dimensions of grid structure vulnerability, power grid state vulnerability and power grid fault risk. The backtracking algorithm is adopted to quickly screen and generate high risk fault set under natural disasters. The effectiveness and practicability of the proposed method are verified by a practical power grid case.

Key words: natural disaster; fault probability; high risk; multiple faults; backtracking algorithm

附录：

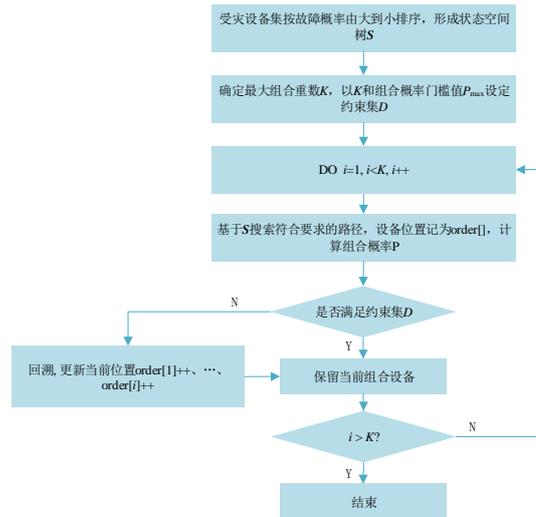


图 A1 基于回溯算法的高风险故障生成流程

Fig.A1 Flowchart of predictive fault generation based on backtracking algorithm