

应对极端冰灾的电力系统多阶段韧性提升策略

李雪,张涵帅,姜涛,张儒峰,陈厚合

(东北电力大学 现代电力系统仿真控制与绿色电能新技术教育部重点实验室,吉林 吉林 132012)

摘要:为提升冰灾下电力系统的韧性,降低系统负荷削减量,提高系统恢复速率,提出一种应对极端冰灾的电力系统多阶段韧性提升策略。对冰灾场景以及受冰灾影响的线路故障率进行建模;从线路抗冰能力、系统负荷损失、系统恢复情况、线路受损情况、维修资源充裕度多个角度构建电力系统综合韧性评估指标,以定位冰灾下系统的薄弱环节;在此基础上,通过灾前线路故障风险预测、灾中机组出力调整以及除冰线路筛选和主动停运除冰、灾后维修顺序规划等策略提升冰灾下的系统韧性。基于IEEE 39和IEEE 118节点系统进行仿真分析,结果验证了所提韧性评估方法和提升策略的有效性。

关键词:极端冰灾;电力系统;韧性评估;韧性提升;负荷削减;线路停运除冰

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202404007

0 引言

近年来,随着全球气候不断恶化,世界范围内的极端冰灾事件频发,严重威胁到电力系统安全、可靠供电。当极端冰灾发生时,常年暴露在自然环境中的输电线路有可能覆冰,而覆冰过厚可能会导致断线、倒塔、线路舞动等严重事故^[1]。此外,绝缘子覆冰后的绝缘强度下降,可能会引起绝缘子闪络,从而可能会给电力系统带来不同程度的影响。2020年11月,吉林省遭受历史罕见的强雨雪大风冰冻天气,造成102.44万用户供电中断,约 1.2×10^8 m²的供热受到影响^[2]。2021年,美国冬季冰灾致德克萨斯州超过380万用户失去电力供应,损失负荷近20 000 MW^[3]。上述由极端冰灾导致的大面积停电事故说明,冰灾易导致电力系统遭受大范围断线故障,严重威胁电力系统安全、可靠运行,因此,有必要对冰灾下电力系统的韧性进行有效评估,进而提出相应的韧性提升策略,以降低冰灾对电力系统安全、可靠运行的影响。

电力系统韧性是指电力系统在遭受极端灾害后能够抵御灾害带来的扰动并尽快恢复到正常运行状态的能力^[4]。为有效评估电力系统在极端灾害下的韧性:文献[5]分析极端灾害对电力系统各元件故障率的影响,进而结合系统负荷削减量构建电力系统的韧性评估指标;文献[6]分别从鲁棒性、快速性和冗余性3个方面构建系统的韧性评估指标,以定位系统在极端灾害下的薄弱环节;文献[7-8]均针对系统和元件层面进行韧性评估,其中文献[7]基于韧性

梯形量化系统及关键设施韧性,评估电力系统应对极端天气事件的能力,文献[8]在系统层面通过灾害带来的负荷削减量量化评估灾害对电力系统的影响,在设备层面构建考虑设备故障前、后的韧性指标来识别电力系统灾前的薄弱环节和灾后的故障元件最佳修复策略。

为提升电力系统在极端灾害下的韧性,国内外学者针对不同灾害场景提出相应的韧性提升策略,以降低极端灾害对电力系统的影响。文献[9-11]将韧性提升表述为优化问题,其中:文献[9]提出一种电力系统预调度和除冰装置预定位的最优协调策略,以提升输电网在极端冰灾下的韧性;文献[10]提出一种考虑线路故障概率的电力系统预防-紧急协调调度方法,以降低极端自然灾害对系统的影响;文献[11]综合考虑风电出力的不确定性和极端事件的预期影响,进而构建韧性提升策略的优化模型。文献[12-13]均针对系统提出防护性策略来降低灾害造成的影响,其中:文献[12]提出一种基于灾害风险评估的防御性孤岛算法,将电网主动解列为多个孤岛,以隔离故障率较高的元件,提升系统韧性;文献[13]则根据负荷重要程度和拓扑重要度,辨识系统关键元件并采取相应保护措施,以此抑制连锁故障,降低灾害对电力系统的影响。文献[14-15]提出不同时间尺度上的韧性提升策略,其中:文献[14]通过灾前储能调度、灾中最优切负荷和灾后优化故障线路抢修顺序等策略全过程提升系统韧性;文献[15]基于影响增量法提出一种灾前线路防冻预处理、灾中优化除冰顺序、灾后优化维修方案的电力系统冰灾韧性全过程提升策略。

上述关于韧性评估的研究大多聚焦于系统层面,其评估指标多数集中于量化韧性评估曲线,较少有研究关注系统内的元件运行状态与维修资源分布。而在上述关于韧性提升策略的研究中,各阶段

收稿日期:2023-10-23;修回日期:2024-04-02

在线出版日期:2024-04-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U22B20105)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(U22B20105)

提升策略之间缺乏协同,且较少考虑灾害特性。因此,在系统遭受极端灾害侵袭时,可能无法在韧性评估环节中准确判别系统的薄弱环节,难以制定有针对性的韧性提升策略。

为此,本文构建一种电力系统的综合韧性评估指标,在此基础上提出一种考虑冰灾影响的多阶段系统韧性提升策略,以减少冰灾对电力系统的危害。首先,对冰灾场景和线路覆冰厚度进行建模,分析冰灾下输电线路的故障率;其次,根据系统负荷变化情况和系统内的元件状态,构建电力系统冰灾下的综合韧性评估指标,实现对系统韧性的多维评估;然后,在预测线路故障风险及覆冰厚度、调整机组出力、主动停运线路除冰以及规划故障线路维修顺序的基础上,提出应对冰灾影响的多阶段韧性提升策略,以减少故障线路数量,降低系统负荷削减量;最后,通过不同规模的算例系统验证所提韧性评估方法与提升策略的有效性。

1 冰灾场景及故障率建模

为研究冰灾对输电网的影响,本章分别构建输电线路的覆冰厚度增长模型和冰灾下输电线路的断线故障率模型。

参考文献[16],本文的输电线路覆冰厚度增长模型采用Jones模型,即:

$$D_{ice}(t) = \frac{1}{\pi \rho_i} \sqrt{(\varphi(t) \rho_w)^2 + (3.6 v_w(t) W(t))^2} \quad (1)$$

式中: $D_{ice}(t)$ 为 t 时刻线路上的覆冰厚度; ρ_i 和 ρ_w 分别为冰的密度和水的密度; $\varphi(t)$ 为 t 时刻的冻雨量; $v_w(t)$ 为 t 时刻输电线路所在位置的风速; $W(t) = 0.067 \varphi^{0.864}(t)$ 为环境空气的含水量。

当输电线路覆冰累积时,线路所承受的荷载是垂直方向上因覆冰重量而生成的冰力荷载和水平方向上风力荷载的合成。根据 t 时刻的线路覆冰厚度,可得到单位长度线路的冰力荷载 $L_i(t)$ 为:

$$L_i(t) = 9.8 \times 10^{-3} \rho_i \pi (d + D_{ice}(t)) D_{ice}(t) \quad (2)$$

式中: d 为线路的直径。

考虑到冰灾的时空特性、冰灾的最大影响半径以及线路和冰灾中心的实际地理位置, t 时刻输电线路所在位置的风速 $v_w(t)$ 可通过附录A式(A1)进行计算^[17-18],进而可得到单位长度线路的风力荷载 $L_w(t)$ 为:

$$L_w(t) = C S v_w^2(t) (d + 2D_{ice}(t)) \quad (3)$$

式中: C 为常系数,取值为 6.964×10^{-3} ; S 为跨度因子,其计算公式如附录A式(A2)所示。

由式(2)和式(3)即可得到单位长度输电线路所承受的冰风力荷载 $L_{iw}(t)$ 为:

$$L_{iw}(t) = \sqrt{L_i^2(t) + L_w^2(t)} \quad (4)$$

根据线路对覆冰承载的设计荷载和极限荷载,可得到 t 时刻单位长度线路发生断线的故障率 $P_f(t)$ 为:

$$P_f(t) = \begin{cases} 0 & L_{iw}(t) \leq a_{iw} \\ e^{\frac{0.6931(L_{iw}(t) - a_{iw})}{b_{iw} - a_{iw}}} - 1 & a_{iw} < L_{iw}(t) < b_{iw} \\ 1 & L_{iw}(t) \geq b_{iw} \end{cases} \quad (5)$$

式中: a_{iw} 和 b_{iw} 分别为线路对覆冰承载能力的设计荷载和极限荷载。

则长度 l 的输电线路在冰灾下的故障率 $P_l(t)$ 为:

$$P_l(t) = 1 - (1 - P_f(t))^l \quad (6)$$

2 冰灾下的电力系统韧性评估

本章对冰灾下输电线路断线故障给电力系统造成的影响进行评估,以量化冰灾下的系统负荷变化曲线并进行韧性评估。

2.1 冰灾下的系统负荷变化曲线

根据冰灾的实际特点以及灾害过程中系统负荷的变化情况,本节首先构建冰灾下的系统负荷变化曲线。由于输电线路自身具有一定的抗冰能力,在冰雪天气刚开始时,电网不会立即出现断线故障。随着冰雪天气的发展,当线路上的覆冰厚度超过其设计值后,线路可能出现故障。冰雪天气的继续发展会导致越来越多的线路因断线故障而被迫停运,系统负荷水平将明显降低。在冰雪天气结束后,维修队伍将对故障线路进行抢修,系统负荷水平逐渐恢复至初始状态。上述过程可由图1所示系统负荷变化曲线进行描述。图中: $F_{R0}(t)$ 和 $F_R(t)$ 分别为正常情况和冰灾影响下的系统负荷变化曲线; R_0 为正常情况下系统的负荷水平; R_{min} 为受冰灾影响最严重情况下系统的负荷水平; t_0 为获取到冰雪天气数据的时刻; t_1 为冰雪天气的起始时刻; t_2 为系统开始遭受冰灾侵袭的时刻; t_3 为在系统内出现断线故障后负荷开始削减的时刻; t_4 为系统不再受到冰灾影响的时刻,在此时刻开始对故障线路进行抢修;由于冰雪天气的结束时刻可能不早于 t_4 ,本文假设冰雪

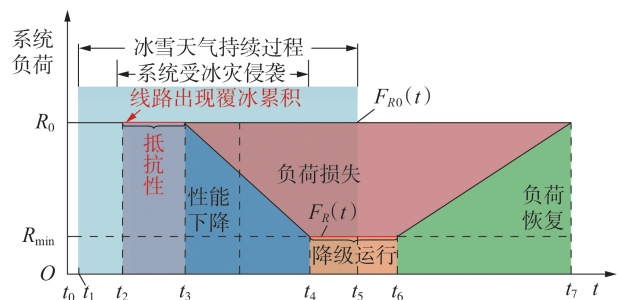


图1 系统受冰灾影响的负荷变化曲线

Fig.1 Load variation curve when system affected by ice disaster

天气结束的时刻为 t_5 ; t_6 为系统负荷开始恢复的时刻; t_7 为系统恢复至初始运行状态的时刻。

2.2 冰灾下系统韧性评估指标的构建

本节分别构建静态韧性指标和动态韧性指标来评估冰灾对电力系统的影响,进而量化评估电力系统在冰灾下的韧性。

2.2.1 静态评估指标

静态评估指标主要用于反映冰灾前系统内基础设施和维修资源的情况,包括线路受损指标和维修资源充裕度指标。

1) 线路受损指标 R_1 。该指标是根据正常运行的线路数量而构建的,该指标越大,说明正常运行的线路数量越多,系统受冰灾的影响越小。该指标的表达式为:

$$R_1 = N_{\text{normal}} / N_0 \quad (7)$$

式中: N_{normal} 为整个冰雪灾害过程中未发生故障的线路; N_0 为系统的线路总量。

2) 维修资源充裕度指标 R_w 。该指标通过需要修复的故障数量与能够同时修复的故障数量来体现,其表达式为:

$$R_w = \begin{cases} 1 & N_{\text{team}} \geq N_{\text{fault}} \\ N_{\text{team}} / N_{\text{fault}} & N_{\text{team}} < N_{\text{fault}} \end{cases} \quad (8)$$

式中: N_{team} 为系统内维修资源的数量,即能够同时修复的故障数量; N_{fault} 为需要修复的故障数量。

2.2.2 动态评估指标

动态评估指标通过量化图1所示的系统负荷变化曲线进行构建,包括线路抗冰能力指标、系统负荷损失指标和系统负荷恢复指标。

1) 线路抗冰能力指标 R_{re} 。该指标用于体现线路的抗冰能力,对应图1中 t_2-t_3 阶段,该指标越大,说明线路抗冰能力越好,其表达式为:

$$R_{re} = \frac{\int_{t_2}^{t_3} F_R(t) dt}{\int_{t_2}^{t_4} F_R(t) dt} \quad (9)$$

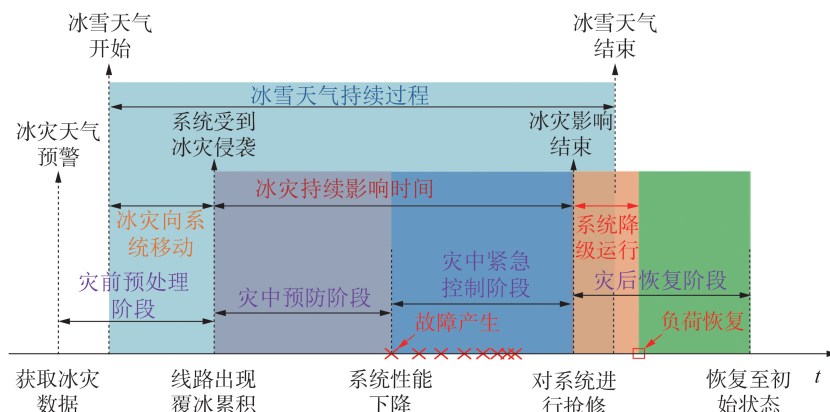


图2 考虑冰灾演变过程的韧性阶段划分示意图

Fig.2 Schematic diagram of resilience phase division considering evolution process of ice disaster

2) 系统负荷损失指标 R_{Loss} 。该指标用于评估冰灾下系统负荷损失的严重程度,即体现系统的鲁棒性,通过量化图1中 t_3-t_4 阶段中曲线 $F_R(t)$ 的面积进行构建。该指标越大,说明系统负荷削减越少,系统对冰灾的抵御能力越强。该指标的表达式如式(10)所示。

$$R_{Loss} = \frac{\int_{t_3}^{t_4} F_R(t) dt}{\int_{t_3}^{t_4} F_{R0}(t) dt} \quad (10)$$

3) 系统负荷恢复指标 R_{rec} 。该指标用于评估灾后系统的负荷恢复情况,该指标越大,说明系统的负荷恢复速率越快,其表达式为:

$$R_{rec} = \int_{t_6}^{t_7} F_R(t) dt / [R_0(t_7 - t_6)] \quad (11)$$

2.2.3 综合韧性评估指标

结合上述静态指标和动态指标,可得到电力系统的综合韧性评估指标 R_1 为:

$$R_1 = \omega_d (\omega_{re} R_{re} + \omega_{Loss} R_{Loss} + \omega_{rec} R_{rec}) + \omega_{st} (\omega_1 R_1 + \omega_w R_w) \quad (12)$$

式中: ω_d 和 ω_{st} 分别为加权后的动态指标和静态指标的权重系数; ω_{re} 、 ω_{Loss} 、 ω_{rec} 分别为线路抗冰能力指标、系统负荷损失指标和系统负荷恢复指标的权重系数; ω_1 和 ω_w 分别为线路受损情况指标和维修资源充裕指标的权重系数。权重系数的取值情况如附录A所示。综合韧性评估指标 R_1 的取值范围为0~1, R_1 越大,冰灾下系统的韧性就越高。

3 冰灾下的多阶段系统韧性提升策略

本章将冰灾下的韧性全过程提升策略划分为4个阶段,阶段划分示意图如图2所示,各阶段的具体定义如附录B所示。基于上述阶段划分,本文提出冰灾下的电力系统多阶段韧性提升策略,可分为灾前预处理、灾中预防控制、灾中紧急控制和灾后恢复4个阶段,以提升系统韧性。

3.1 灾前预处理阶段

由于冰灾对电网中所有线路同时造成影响的概率较低,在灾前预处理阶段可根据天气预报数据对冰雪天气的移动路径进行预测,以是否存在故障风险为依据,初步筛选需关注或采取策略的输电线路,以减少后续各阶段需要处理的线路数量。灾前预处理阶段的具体流程如下:

- 1) 输入由天气预报得到的冰雪天气数据,确定冰灾移动路径;
- 2) 根据式(1)预测各条线路上的覆冰情况;
- 3) 以线路是否会产生覆冰累积为标准,筛选出所有可能存在故障风险的线路,形成线路集合 Ω_{ice} ;
- 4) 将 Ω_{ice} 以及集合中各线路的覆冰厚度变化情况传递至灾中预防阶段。

3.2 灾中预防阶段

在此阶段,部分线路开始出现覆冰累积,但尚未对系统造成影响。为减少后续故障线路的数量,在系统未发生故障时,通过调整发电机出力使部分可能发生故障的线路的有功功率损耗达到临界不覆冰线损,通过线路上的有功损耗发热防止覆冰的产生,减轻冰灾对系统造成的影响。根据线路覆冰过程中的热平衡方程以及输电线路不覆冰的临界条件,可得到临界不覆冰电流 $I_c^{[19]}$,如式(13)所示。

$$I_c^2 = \frac{d}{r_0} \left\{ -\pi T_a (h + h_p) - \left(\frac{0.79 h_p v_w^2}{2 c_a} + \frac{h_{abs} v_w^3}{2} \right) + 0.95 \pi \sigma_r \left[273^4 - (273 + T_a)^4 \right] - 8400 v_w h_{abs} T_a \right\} \quad (13)$$

式中: r_0 为输电线路单位长度电阻; T_a 为环境温度,单位为 $^{\circ}\text{C}$; h 和 h_p 分别为输电线路表面自然对流系数和强制对流系数; c_a 为空气比热; h_{abs} 为空气中的液水质量浓度,即绝对湿度; σ_r 为常系数,取值为 $55.67 \text{ nW} / (\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ 。

根据临界不覆冰电流计算防止线路覆冰所需的最小焦耳热,即临界不覆冰线损 $P_{L, \min}$,如式(14)所示。

$$P_{L, \min} = I_c^2 r_0 l \quad (14)$$

基于上述临界不覆冰线损可构建灾中预防阶段的系统韧性提升最优模型,其目标函数为:

$$\max \sum_{g \neq k} P_{gk, \text{Loss}} \quad g-k \in \Omega_{ice} \quad (15)$$

式中: $P_{gk, \text{Loss}}$ 为线路 $g-k$ 的有功功率损耗。

模型中的约束条件包括有功、无功约束,功率平衡约束,电压幅值约束,相角约束,具体表达式如附录C式(C1)所示。

灾中预防阶段提升策略的具体流程如下:

- 1) 输入相关的天气数据以及线路参数;
- 2) 计算集合 Ω_{ice} 中各线路的临界不覆冰线损;

3) 基于式(15)和式(C1)调整发电机出力,使集合 Ω_{ice} 中线路的有功功率损耗增加;

4) 确定可以防止覆冰产生的线路并将其从集合 Ω_{ice} 中移除。

3.3 灾中紧急控制阶段

随着冰灾的继续发展,线路覆冰情况逐渐严重,部分线路可能无法通过灾中预防阶段的策略防止覆冰产生,导致断线故障出现,此时,可通过所提灾中紧急控制使部分覆冰线路主动停运除冰。本文选择配置移动式直流除冰装置的除冰队伍对线路进行除冰,以避免线路因覆冰过厚而引起断线故障,减少故障线路的数量,降低系统负荷削减量,提升冰灾下电力系统的韧性。

受除冰设备及冰灾规模的限制,通常无法同时对所有线路进行停运除冰,且部分线路在停运除冰后的负荷提升量较小,因此,应在所有可能发生事故的覆冰线路中筛选除冰线路并按顺序对其进行除冰。本节通过线路实时覆冰率、线路停运后的潮流转移熵及除冰后的系统负荷提升程度3个指标评估线路覆冰情况以及线路的重要程度^[20-21],并最终得到除冰顺序评价指标^[22],该指标的计算公式及除冰线路的筛选流程如附录C所示。

上述除冰线路的筛选以及线路停运除冰的灾中紧急控制策略流程如附录C图C2所示,具体过程如下。

1) 输入集合 Ω_{ice} 以及除冰装置数量 $N_{deicing}$,并计算 Ω_{ice} 中第一条线路开始产生覆冰累积的时刻 t_{ice} ,且令 $\lambda = t_{ice}$ 。

2) 判断 λ 时刻的空闲除冰装置数量是否为0。若是,则转至步骤5);否则执行步骤3)。

3) 按照附录C图C1所示流程计算当前时刻 Ω_{ice} 内各条线路的除冰顺序评价指标 F ,筛选出除冰线路集合 $\Omega_{deicing}$ 。

4) 判断当前时刻的集合 $\Omega_{deicing}$ 是否为空集。若不是,则对集合 $\Omega_{deicing}$ 中的线路停运除冰,将该线路移出 Ω_{ice} ,并且令 $N_{deicing} = N_{deicing} - \text{crad}(\Omega_{deicing})$,其中 $\text{crad}(\cdot)$ 表示集合中元素的数量;否则执行步骤5)。

5) 将 λ 时刻已经故障的线路移出 Ω_{ice} ,并令 $\lambda = \lambda + 1$ 。若有完成除冰的线路,则令 $N_{deicing} = N_{deicing} + N_{finish}$,其中 N_{finish} 为当前时刻完成除冰的线路数量。

6) 判断 Ω_{ice} 是否为空集。若是,则完成灾中紧急控制阶段提升策略;否则返回步骤2)。

3.4 灾后恢复阶段

在冰灾不再对系统造成影响后,维修队伍将开展灾后故障线路的维修。本文假设1条故障线路仅由1组维修队伍进行维修。可根据每次完成维修后的系统负荷恢复量最大来规划故障线路的维修顺序,最终使负荷完全恢复至初始状态,达到提升系统

韧性的目的。在此阶段中,本文选用基于直流潮流的负荷削减模型来计算系统负荷削减阶段和恢复阶段的负荷变化情况。灾后恢复阶段提升策略中维修线路筛选的目标函数为:

$$\max \sum_{i=1}^{N_{\text{Bus}}} P_{\text{recover}}(i) \quad (16)$$

式中: N_{Bus} 为系统中的节点数量; $P_{\text{recover}}(i)$ 为完成对所选线路的维修后节点*i*的负荷恢复量。

模型中的约束条件包括有功功率平衡约束、直流潮流约束、线路潮流约束、相角约束,具体表达式如附录C式(C9)所示。

灾后恢复阶段的韧性提升策略流程如附录C图C3所示,具体过程如下。

1)确定故障线路的数量和线路编号,故障线路构成集合 Ω_{fault} ,并输入维修队伍数量 N_{team} ,令 $\lambda=t_{\text{start}}$, t_{start} 为开始维修的时刻。

2)将 λ 时刻完成维修的线路置于集合 Ω_{rec} 中。

3)判断此时的维修队伍数量 N_{team} 是否为0且 Ω_{rec} 是否为空集。若是,则令 $\lambda=\lambda+1$,并返回步骤2);否则令 $N_{\text{team}}=N_{\text{team}}+\text{crad}(\Omega_{\text{rec}})$,并清空 Ω_{rec} 。

4)判断维修队伍数量 N_{team} 是否小于 $\text{crad}(\Omega_{\text{fault}})$ 。若是,则根据式(16)和式(C9)逐一选择维修线路,并将其移出 Ω_{fault} ,直至当前时刻无空闲维修队伍,再令 $N_{\text{team}}=0$, $\lambda=\lambda+1$,返回步骤2);否则说明当前维修队伍数量大于待维修故障线路数量,可直接对剩余故障线路进行维修,结束对故障线路维修顺序的规划。

3.5 多阶段系统韧性提升策略

多阶段系统韧性提升策略根据冰雪天气的演变过程分阶段对系统韧性进行提升。在灾前预处理阶段,根据冰灾数据对冰灾的移动路径进行预测,以线路是否存在故障风险为标准,生成线路集合 Ω_{ice} ,并将其传递至灾中预防阶段;灾中提升策略分为灾中预防阶段提升策略和灾中紧急控制阶段提升策略,灾中预防阶段提升策略通过调整机组出力使集合 Ω_{ice} 中的部分线路达到临界不覆冰状态,以此减轻冰灾对系统造成的影响,灾中紧急控制阶段提升策略基于灾中预防阶段更新的集合 Ω_{ice} 筛选除冰线路并对其进行停运除冰,进一步减少系统负荷削减;灾后恢复阶段提升策略以线路完成维修后的系统负荷恢复量最大为目标对故障线路的维修顺序进行规划。具体过程如附录C图C4所示。

4 算例分析

为验证本文所提多阶段韧性提升策略的可行性和有效性,本章分别通过IEEE 39和IEEE 118节点测试系统对其进行分析验证。

4.1 IEEE 39节点测试系统

IEEE 39节点测试系统的拓扑结构图和地理接线图分别如附录D图D1和图D2所示。假设冰灾从图D2中坐标(0,700) km处登陆,自东南向西北方向移动,与正东方向成 120° 。冰灾模型中平均冻雨量为 3 mm/h ,冻雨的最大影响半径为 150 km ,冻雨移动速度为 50 km/h 。衰减系数为 10000 。线路覆冰厚度设计值为 15 mm ,覆冰厚度警戒值为 12 mm 。所模拟冰灾持续时间为 72 h ,共有4组维修队伍和1组除冰队伍,线路维修时间为 $6\sim 8 \text{ h}$,除冰队伍对必要线路进行除冰,维修队伍对故障线路进行维修,二者相互独立。以 15 min 为一个时间间隔进行仿真。

根据冰灾实际数据可确定冰灾移动路径,根据式(1)对各条线路上的覆冰厚度进行计算,可得到各条线路上的覆冰变化情况,如附录D图D3所示,其中各线路上的最大覆冰厚度情况如图D2所示。

4.1.1 冰灾影响下的系统故障率及负荷变化情况

基于各条线路上的覆冰厚度变化可得到系统中的线路故障率变化情况,如图3所示。冰灾形成后并未立刻对系统造成影响,直至 12.5 h 后系统才遭受冰灾侵袭,部分线路上开始产生覆冰积累。随着部分线路上的覆冰厚度超过其设计值,线路故障率逐渐增加至最大值。随着冰灾的移动,线路受冰灾的影响减弱,最终故障率在不再受影响时降至0。

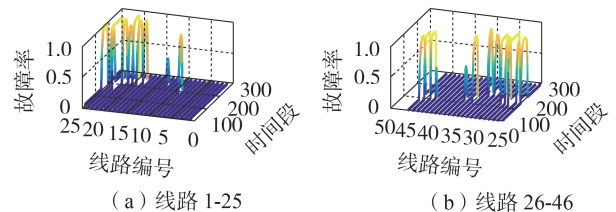


图3 冰灾影响下IEEE 39节点测试系统中的线路故障率

Fig.3 Line failure rate of IEEE 39-bus test system under influence of ice disaster

根据各时刻的线路故障率,通过蒙特卡罗模拟抽样得到各时刻的线路运行状态变化情况^[18]。假设线路维修顺序为线路故障顺序,对负荷削减量进行计算,即可得到系统在不施加任何韧性提升措施下的负荷变化情况,如图4所示。

由于输电网自身具有较高的冗余性,当开始有线路出现断线故障时,系统负荷不会立即削减。例如,图4中:在 A_1 点,个别线路因发生故障而退出运行,但尚未出现负荷削减;在 A_2 点,负荷出现削减,并持续减小至一个最小值,即 A_3 点;在冰灾结束后,维修工作开始,系统负荷水平在 A_6 点恢复至初始状态;故障线路在 A_7 点全部完成维修并恢复至正常运行。

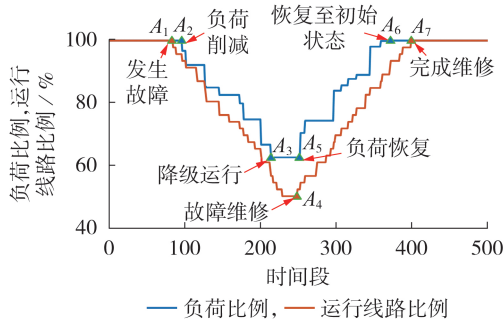


图4 未考虑韧性措施时冰灾影响下IEEE 39节点测试系统负荷及运行线路比例

Fig.4 Percentage of load and operation lines under ice disaster without considering resilience strategy for IEEE 39-bus test system

4.1.2 多阶段系统韧性提升策略

1) 灾前预处理阶段。

基于冰灾数据对各条线路上的覆冰厚度进行预测,结果如附录D表D1所示。共有6条线路的最大覆冰厚度小于20 mm,其中线路14因其覆冰厚度以及所承受的冰风力荷载较小,无故障风险,因此,无须将该线路置于集合 Ω_{ice} 中;在剩余线路中,有16条线路的最大覆冰厚度为20~30 mm,6条线路的最大覆冰厚度超过30 mm,存在较高的故障风险。受冰灾影响的线路集合 Ω_{ice} 如表D1所示。

在灾前预处理阶段,通过对各线路上的覆冰厚度变化情况进行预测,生成有故障风险的线路集合 Ω_{ice} ,以此减少后续各阶段中处理线路的数量。

2) 灾中预防阶段提升策略。

在灾中预防阶段,根据式(13)、(14)计算各条线路所需的临界不覆冰线损,并根据式(15)计算在调整机组出力下集合 Ω_{ice} 中各条线路能够达到的最大有功功率损耗。在系统未发生故障时,共计线路35和线路46这2条线路可在此阶段通过调整发电机出力防止覆冰的产生。发电机出力以及线路损耗的变化情况分别如图5和表1所示。

3) 灾中紧急控制阶段提升策略。

在灾中紧急控制阶段,根据式(C2)~(C8)计算除冰顺序评价指标 F ,初步筛选出需除冰的线路。在冰灾开始19 h后,除冰顺序评价指标 F 的计算结

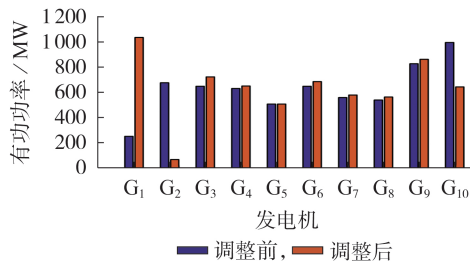


图5 IEEE 39节点测试系统的发电机出力

Fig.5 Generator output of IEEE 39-bus test system

表1 IEEE 39节点测试系统防覆冰线路的有功损耗

Table 1 Active power loss of anti-icing lines for IEEE 39-bus test system

| 线路编号 | 调整前的线路有功损耗 / MW | 临界不覆冰线损 / MW | 调整后的线路有功损耗 / MW |
|------|-----------------|--------------|-----------------|
| 35 | 2.78 | 2.99 | 3.77 |
| 46 | 5.23 | 2.70 | 6.77 |

果如附录D表D2所示,此时线路45的覆冰厚度为12.09 mm,大于覆冰厚度警戒值 D_{lim} ,且完成除冰后的负荷提升量大于0,满足除冰要求,因此,选择线路45作为除冰线路进行停运除冰。后续筛选的除冰线路为线路37和线路34,分别在35.25 h和51 h时完成除冰。此后直至冰灾结束均不再有线路满足除冰条件,灾中紧急控制阶段提升策略实施完成。

4) 灾后恢复阶段提升策略。

在灾后恢复阶段,根据式(16)规划故障线路维修顺序,采取灾后恢复阶段提升策略的故障线路维修顺序如附录D表D3所示。

通过采取灾后恢复阶段提升策略规划故障线路的维修顺序后,系统能更快地将更重要的负荷恢复至较高的水平,进而恢复至正常运行状态。

4.1.3 各阶段提升策略下的系统负荷变化情况

采取各阶段系统韧性提升策略后的系统负荷如图6所示。

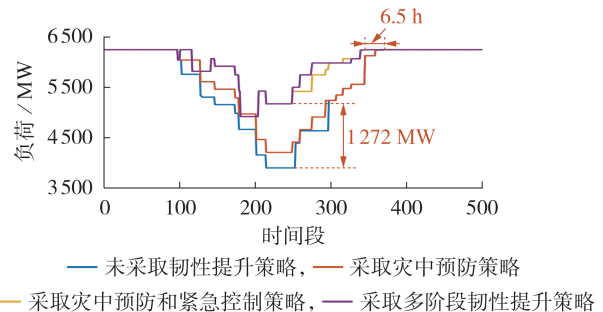


图6 IEEE 39节点测试系统的负荷对比

Fig.6 Load comparison of IEEE 39-bus test system

灾中预防阶段提升策略使得线路35和线路46达到临界不覆冰线损,减轻了冰灾对系统造成的影响。仅采用灾中预防策略使系统在受冰灾影响最严重情况下的负荷削减比例由37.54%降低至32.64%,即负荷水平提高了307 MW。

进一步采取灾中紧急控制阶段提升策略对4.1.2节3)中筛选出的3条线路进行除冰后,系统在受冰灾影响最严重情况下的负荷削减比例降低至21.25%,负荷比例比采取灾中预防阶段提升策略后的有所提高。随着故障线路数量的减少,系统所需恢复时间也缩短,共需要24.25 h完成恢复。

在采取灾后恢复阶段提升策略规划故障线路的维修顺序后,系统在恢复阶段的负荷削减总量由

10 466 MW·h 降低至 7 959 MW·h,重要负荷得到优先恢复,系统在恢复阶段维持较高的负荷水平,在同时时间段比未采取灾后恢复阶段提升策略时的负荷削减量更少。

总体而言,在采取多阶段系统韧性提升策略后,系统中的故障线路数量由 23 条减少至 18 条,系统在受冰灾影响最严重情况下的负荷水平提高了 1 272 MW,整个韧性提升过程中系统的负荷削减总量由 83 832 MW·h 降低至 33 586 MW·h,总负荷削减比例由 19.50% 降低至 8.63%,系统恢复至初始运行状态的时间比未采取韧性提升策略时可提前 6.5 h,系统在冰灾下的韧性得到提升。

4.1.4 系统韧性提升效果分析

在未采取多阶段韧性提升策略的情况下,通过式(7)~(12)计算系统韧性评估指标。采取韧性提升策略前、后 IEEE 39 节点测试系统的指标以及采取提升策略后相较于采取提升策略前的指标提升比例如表 2 所示。

表 2 采取韧性提升策略前、后 IEEE 39 节点测试系统的指标与提升比例

Table 2 Indices and improvement percentage of IEEE 39-bus test system before and after adopting resilience enhancement strategy

| 情形 | 动态评估指标 | | | 静态评估指标 | | R_1 |
|----------|----------|------------|-----------|--------|--------|--------|
| | R_{re} | R_{Loss} | R_{rec} | R_l | R_w | |
| 采取提升策略前 | 0.3746 | 0.8215 | 0.8463 | 0.5000 | 0.1739 | 0.5395 |
| 采取提升策略后 | 0.4664 | 0.8945 | 0.9475 | 0.6087 | 0.2222 | 0.6228 |
| 提升比例 / % | 24.51 | 8.89 | 11.96 | 21.74 | 27.77 | 15.44 |

在采取提升策略前:由动态评估指标及系统负荷变化曲线可知,系统中线路的抗冰能力以及抵御冰灾的能力较差,在受冰灾影响最严重情况下的负荷削减比例接近 40%,系统负荷恢复速率相对较慢;由静态评估指标可知,在受冰灾影响最严重情况下,共有 50% 的线路因发生断线故障而无法正常运行,且由于需要修复的故障数量大于能够同时修复的故障数量,维修资源的充裕度较低。相较于采取提升策略前,在采取提升策略后,所有的评估指标均有所提升, R_l 为 0.6228,提升比例为 15.44%。上述结果表明本文所提多阶段系统韧性提升策略可实现冰灾下系统韧性的有效提升。

4.2 IEEE 118 节点测试系统

本节进一步以 IEEE 118 节点测试系统为例,验证所提冰灾下韧性评估与提升策略的有效性。IEEE 118 节点测试系统的地理接线图如附录 D 图 D4 所示。假设冰灾从图 D4 中坐标(0,600) km 处登陆,向西北方向移动,与正东方向的夹角为 145°。平均冻雨量为 5 mm/h,冰雪天气最大影响半径为 75 km,移动速度为 35 km/h,持续时间为 84 h。系

统共有 8 组维修队伍和 3 组除冰队伍,维修队伍与除冰队伍相互独立。以 15 min 为一个时间间隔进行仿真。

4.2.1 系统故障率以及负荷变化情况

在整个冰灾过程中,系统中各线路故障率变化情况如附录 D 图 D5 所示。系统中共有 132 条线路因受冰灾影响而存在故障风险,其中 111 条线路的最大故障率大于 0.5,76 条线路的最大故障率大于 0.9,发生断线路障的风险较高。

通过蒙特卡罗模拟得到各时刻的线路运行状态变化情况,进而得到系统负荷变化情况,如图 7 所示。在 A_1 点,系统中出现了第一处故障,并且在 A_2 点引发了系统负荷削减,直至 A_3 点负荷不再削减。在系统进入恢复阶段之后,第一条故障线路在 A_4 点完成维修,系统负荷在 A_6 点恢复至初始运行状态,故障线路在 A_7 点全部完成维修。在整个过程中,最大故障线路数量超过线路总数的 60%,共计 112 条,系统总负荷削减量为 913 MW,约为负荷总量的 21.52%。

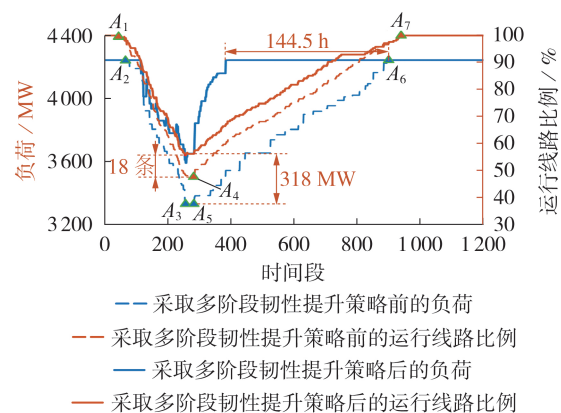


图 7 IEEE 118 节点测试系统的负荷及运行线路比例对比

Fig.7 Comparison of load and percentage of operation lines for IEEE 118-bus test system

4.2.2 韧性评估指标与提升效果分析

采取多阶段系统韧性提升策略的具体分析如附录 E 所示。由图 7 可知,相较于采取提升策略前,在采取提升策略后,系统在受冰灾影响最严重情况下的负荷水平以及系统恢复速率均有较明显的提升,负荷由 3 329 MW 提升至 3 647 MW,总计提升了 318 MW,整个冰灾过程中的系统负荷削减量减少了 82 691 MW·h,系统恢复至初始运行状态的时间提前了 144.5 h,故障线路数量减少了 18 条。

IEEE 118 节点测试系统韧性评估指标的计算结果如表 3 所示。相较于采取提升策略前,在采取提升策略后,系统恢复至初始状态的时间相对较短,这是由于在采取提升策略前的维修顺序是按照线路故障的顺序而制定的,负荷恢复速度较慢,IEEE 118

节点测试系统环网较多,冗余度较高,在采取提升策略后,在灾后阶段中完成部分线路的维修后即可使负荷恢复至初始状态。相较于采取提升策略前,采取提升策略后的综合韧性评估指标提升了 13.59%。

表 3 采取韧性提升策略前、后 IEEE 118 节点测试系统的指标与提升比例

Table 3 Indices and improvement percentage of IEEE 118-bus test system before and after adopting resilience enhancement strategy

| 情形 | 动态指标 | | | 静态指标 | | R_t |
|----------|----------|------------|-----------|--------|--------|--------|
| | R_{re} | R_{loss} | R_{rec} | R_l | R_w | |
| 采取提升策略前 | 0.1354 | 0.9069 | 0.8928 | 0.3978 | 0.0714 | 0.4908 |
| 采取提升策略后 | 0.3761 | 0.9135 | 0.9537 | 0.5000 | 0.0860 | 0.5575 |
| 提升比例 / % | 177.77 | 0.73 | 6.82 | 25.69 | 20.45 | 13.59 |

5 结论

本文提出一种冰灾下多阶段系统韧性提升策略,所提策略关注冰灾的演进过程,针对各阶段特点进行韧性提升。通过灾前预处理阶段预测线路故障风险、灾中预防阶段调整机组出力、灾中紧急控制阶段筛选除冰线路以及使线路主动停运除冰、灾后恢复阶段规划故障线路维修顺序能够有效降低冰灾下的系统负荷削减量,增强电力系统抵御冰灾的能力,通过 IEEE 39 和 IEEE 118 节点测试系统算例对所提韧性提升策略进行分析验证,相关结论如下。

1) 所提系统韧性评估指标综合考虑了线路抗冰能力、系统负荷损失、系统负荷恢复、维修资源及线路受损情况,可实现对冰灾下电力系统韧性的综合评估。

2) 本文基于冰灾的时空特性及灾害演变过程的实际特征,从系统层面出发对冰灾影响系统的各阶段及重要时间节点进行定义,为后续冰灾下韧性提升策略的时间尺度划分提供参考。

3) 所提冰灾下多阶段系统韧性提升策略可以降低冰灾对系统造成的影响,达到提升冰灾下系统韧性的目的。相较于采取所提韧性提升策略前,采取提升策略后,IEEE 39 和 IEEE 118 节点测试系统综合韧性评估指标的提升比例分别为 15.44% 和 13.59%,在受冰灾影响最严重情况下的负荷水平分别提高了 1272 MW 和 318 MW,整个过程中系统的负荷削减总量分别降低了 59.94% 和 76.25%。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

[1] 张恒旭,刘玉田,张鹏飞. 极端冰雪灾害下电网安全评估需求分析与框架设计[J]. 中国电机工程学报,2009,29(16):8-14.
ZHANG Hengxu, LIU Yutian, ZHANG Pengfei. Requirements analysis and framework design for power system security assessment considering extreme ice disasters[J]. Proceedings of

the CSEE,2009,29(16):8-14.

- [2] 吉林省政府网. 吉林省应对雨雪冰冻天气有关情况新闻发布会[EB/OL]. (2020-11-19)[2023-07-21]. http://www.jl.gov.cn/szft/xwfb/xwfbh/xwfb2020/jlssjrmdbdhdyhy_266835/wzzb/202011/t20201120_7769573.html.
- [3] 王伟胜,林伟芳,何国庆,等. 美国得州 2021 年大停电事故对我国新能源发展的启示[J]. 中国电机工程学报,2021,41(12):4033-4043.
WANG Weisheng, LIN Weifang, HE Guoqing, et al. Enlightenment of 2021 Texas blackout to the renewable energy development in China[J]. Proceedings of the CSEE,2021,41(12):4033-4043.
- [4] 符杨,顾吉平,田书欣,等. 基于地震灾害场景的主动配电网多维韧性评估方法[J]. 电力自动化设备,2023,43(3):1-11.
FU Yang, GU Jiping, TIAN Shuxin, et al. Multidimensional resilience evaluation method of active distribution network based on earthquake disaster scene[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(3):1-11.
- [5] 周晓敏,葛少云,李腾,等. 极端天气条件下的配电网韧性分析方法及提升措施研究[J]. 中国电机工程学报,2018,38(2):505-513,681.
ZHOU Xiaomin, GE Shaoyun, LI Teng, et al. Assessing and boosting resilience of distribution system under extreme weather[J]. Proceedings of the CSEE,2018,38(2):505-513,681.
- [6] 李雪,孙霆锴,侯恺,等. 地震灾害下海岛综合能源系统韧性评估方法研究[J]. 中国电机工程学报,2020,40(17):5476-5493.
LI Xue, SUN Tingkai, HOU Kai, et al. Evaluating resilience of island integrated energy systems with earthquake[J]. Proceedings of the CSEE,2020,40(17):5476-5493.
- [7] PANTELI M, MANCARELLA P, TRAKAS D N, et al. Metrics and quantification of operational and infrastructure resilience in power systems[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2017,32(6):4732-4742.
- [8] JIANG T, SUN T K, LIU G D, et al. Resilience evaluation and enhancement for island city integrated energy systems[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2022,13(4):2744-2760.
- [9] YAN M Y, AI X M, SHAHIDEHPOUR M, et al. Enhancing the transmission grid resilience in ice storms by optimal coordination of power system schedule with pre-positioning and routing of mobile DC de-icing devices[J]. IEEE Transactions on Power Systems,2019,34(4):2663-2674.
- [10] 刘经纬,康海鹏,颜文婷,等. 极端灾害下的电力系统预防-紧急协调调度[J]. 电力自动化设备,2023,43(8):202-209.
LIU Jingwei, KANG Haipeng, YAN Wenting, et al. Preventive and emergency coordinated dispatching of power system under extreme disaster[J]. Electric Power Automation Equipment,2023,43(8):202-209.
- [11] 杜敏,刘绚,周元刚. 考虑极端事件下的高比例可再生能源电力系统韧性增强策略[J]. 电力系统自动化,2023,47(12):19-27.
DU Min, LIU Xuan, ZHOU Yuangang. Resilience enhancement strategy for power system with high proportion of renewable energy considering extreme events[J]. Automation of Electric Power Systems,2023,47(12):19-27.
- [12] PANTELI M, TRAKAS D N, MANCARELLA P, et al. Boosting the power grid resilience to extreme weather events using defensive islanding[J]. IEEE Transactions on Smart Grid,2016,7(6):2913-2922.
- [13] 王玮,赵家悦,郭创新,等. 考虑故障连锁的多灾害输电弹性评估及关键弹性提升元件辨识[J]. 中国电机工程学报,2022,42(1):127-140.
WANG Wei, ZHAO Jiayue, GUO Chuangxin, et al. Assessing

- resilience of transmission network and identifying key elements to enhance resilience considering failure chain under multiple disasters[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(1):127-140.
- [14] 姜涛,唐少南,李雪,等. 应对台风影响的海岛微网群韧性全过程提升[J]. 中国电机工程学报,2022,42(18):6625-6641.
JIANG Tao,TANG Shaonan,LI Xue,et al. Resilience boosting strategy for island microgrid clusters against typhoons[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(18):6625-6641.
- [15] ZHAO N Y,YU X D,HOU K,et al. Full-time scale resilience enhancement framework for power transmission system under ice disasters[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems,2021,126:106609.
- [16] JONES K F. A simple model for freezing rain ice loads[J]. Atmospheric Research,1998,46(1/2):87-97.
- [17] BROSTROM E,AHLBERG J,SODER L. Modelling of ice storms and their impact applied to a part of the Swedish transmission network[C]//2007 IEEE Lausanne Power Tech. Lausanne,Switzerland;IEEE,2007:1593-1598.
- [18] 王建学,张耀,吴思,等. 大规模冰灾对输电系统可靠性的影响分析[J]. 中国电机工程学报,2011,31(28):49-56.
WANG Jianxue,ZHANG Yao,WU Si,et al. Influence of large-scale ice disaster on transmission system reliability[J]. Proceedings of the CSEE,2011,31(28):49-56.
- [19] 李晓明,舒欣,王琳琳,等. 电网可控线损灵敏度模型的防覆冰潮流控制[J]. 高电压技术,2011,37(12):3076-3083.
LI Xiaoming,SHU Xin,WANG Linlin,et al. Power control for prevent icing using sensitivity of controllable line losses[J]. High Voltage Engineering,2011,37(12):3076-3083.
- [20] 曾珂,李华强,曾梦婕,等. 考虑改进潮流转移熵的电力系统融冰预防控制[J]. 电网技术,2015,39(2):582-586.
ZENG Ke,LI Huaqiang,ZENG Mengjie,et al. Power system ice-melting preventive control considering improved transfer entropy of power flow[J]. Power System Technology,2015,39(2):582-586.
- [21] 赵书强,涂筱莹,王达飞,等. 考虑负荷特性的输电网可靠性评估软件开发[J]. 电力自动化设备,2014,34(7):129-133.
ZHAO Shuqiang,TU Xiaoying,WANG Dafei,et al. Development of reliability evaluation software of power transmission grid considering load characteristics[J]. Electric Power Automation Equipment,2014,34(7):129-133.
- [22] 陈亮,傅闯,李兴源. 基于加权平均组合评价法的电网直流融冰计划决策[J]. 电网技术,2014,38(10):2913-2918.
CHEN Liang,FU Chuang,LI Xingyuan. Decision-making of power grid DC de-icing plan based on weighted average combinative evaluation[J]. Power System Technology,2014,38(10):2913-2918.

作者简介:

李雪(1986—),女,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统安全性与稳定性、电力系统高性能计算、电力市场(E-mail:xli@neepu.edu.cn);

张涵帅(2000—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力系统韧性提升(E-mail:zhanghanshuai@aliyun.com);

姜涛(1983—),男,教授,博士研究生导师,博士,主要研究方向为电力系统安全性与稳定性、可再生能源集成、综合能源系统(E-mail:t.jiang@aliyun.com)。

(编辑 王锦秀)

Multi-stage resilience enhancement strategy for power system against extreme ice disaster

LI Xue,ZHANG Hanshuai,JIANG Tao,ZHANG Rufeng,CHEN Houhe

(Key Laboratory of Modern Power System Simulation and Control & Renewable Energy Technology,Ministry of Education, Northeast Electric Power University,Jilin 132012,China)

Abstract: In order to enhance the resilience of power system under ice disaster, reduce the system load shedding amount and improve the system load restoration speed, a multi-stage resilience enhancement strategy of power system against extreme ice disaster is proposed. The ice disaster scenarios and line failure rates influenced by the ice disaster are modelled. The comprehensive resilience assessment indicators are constructed from multiple perspectives of ice resistance ability of the line, system load loss, system recovery situation, line damage situation, and repair resource sufficiency degree to locate the system weak loop under the ice disaster. On this basis, the system resilience under ice disaster is enhanced through strategies such as line failure risk prediction before the disaster, unit output adjustment, together with the de-icing line screening and active line shutdown for de-icing during the disaster, and repair sequence planning after the disaster. The simulation analysis is performed on IEEE 39-bus and 118-bus systems, and the results verify the effectiveness of the proposed resilience assessment method and enhancement strategy.

Key words: extreme ice disaster; electric power systems; resilience assessment; resilience enhancement; load shedding; line shutdown for de-icing

附录 A:

A1 冰灾影响下输电线路所在位置风速计算

$$v_w(t) = v_{\max} e^{-\frac{(\lambda(t)-\lambda_{\max})^2 + (\delta(t)-\delta_{\max})^2}{k}} \sin \phi(t) \quad (A1)$$

式中, v_{\max} 为最大风速; $\lambda(t)$ 和 $\delta(t)$ 为输电线路到冰灾中心的极径和极角; λ_{\max} 和 δ_{\max} 为最大风速点到冰灾中心的极径和极角; $\phi(t)$ 为风向与输电线路之间的夹角; k 为衰减系数。

A2 跨度因子计算

$$S = \begin{cases} 1 - (v_w - 2.2352) \times 10^{-3} & v_w > 2.2352 \text{ m/s} \\ 1 & v_w \leq 2.2352 \text{ m/s} \end{cases} \quad (A2)$$

A3 韧性评估指标权重系数取值情况

线路抗冰能力指标、系统负荷损失指标和系统负荷恢复指标的权重系数 ω_{re} 、 ω_{Loss} 、 ω_{rec} 满足 $\omega_{re} + \omega_{Loss} + \omega_{rec} = 1$; 线路受损情况指标和维修资源充裕指标的权重系数 ω_1 、 ω_w 满足 $\omega_1 + \omega_w = 1$; 加权后的动态指标以及静态指标的权重系数 ω_d 和 ω_{st} 满足 $\omega_d + \omega_{st} = 1$ 。权重系数的取值可根据实际情况进行调整。本文后续研究中动态指标的权重系数 ω_{re} 、 ω_{Loss} 、 ω_{rec} 分别取值为 0.2、0.4、0.4, 静态指标的权重系数 ω_1 、 ω_w 均取值为 0.5, ω_d 和 ω_{st} 的取值亦均为 0.5。

附录 B:

B1 冰灾下韧性全过程提升策略中各阶段定义情况

1) 灾前预处理阶段: 定义为从获取到冰雪天气数据到系统中任意一条线路出现覆冰的时刻, 对应图 1 中的 $[t_0, t_2)$ 时间段, 图 2 中以白色和浅蓝色背景标注。

2) 灾中预防阶段: 定义为从线路开始出现覆冰累积到系统负荷开始削减的时刻, 对应图 1 中 $[t_2, t_3)$ 时间段。该阶段的特点是随着冰灾发展, 各线路上逐渐出现覆冰累积, 然而系统没有因冰灾影响导致负荷削减。在图 2 中以灰色背景标注。

3) 灾中紧急控制阶段: 定义为从负荷开始削减到冰灾不再影响系统的时刻, 此阶段对应图 1 中 $[t_3, t_4)$ 时间段, 在图 2 中以深蓝色背景标注。

4) 灾后恢复阶段: 定义为冰灾影响结束的时刻到系统负荷恢复至初始运行状态的时刻, 在图 2 中以橙色和绿色背景标注, 其中橙色部分为系统降

级运行阶段, 绿色背景为负荷恢复阶段, 分别对应图 1 中的 $[t_4, t_6]$ 和 $[t_6, t_7]$ 阶段。

图 2 中冰雪天气的持续过程以浅蓝色标注, 对应图 1 中 $[t_1, t_5]$ 时间段, 包括冰雪天气的移动过程及冰雪灾害对系统的持续影响阶段。

附录 C:

C1 灾中预防阶段系统韧性提升最优模型约束条件

$$\begin{cases} P_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \cos(\theta_{ij}) + B_{ij} \sin(\theta_{ij})) \\ Q_i = V_i \sum_{j \in i} V_j (G_{ij} \sin(\theta_{ij}) - B_{ij} \cos(\theta_{ij})) \\ P_{G,i}^{\min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{\max} \\ Q_{G,i}^{\min} \leq Q_{G,i} \leq Q_{G,i}^{\max} \\ P_{G,i} - P_{L,i} = P_i \\ Q_{G,i} - Q_{L,i} = Q_i \\ V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \\ \theta_i^{\min} \leq \theta_i \leq \theta_i^{\max} \\ P_{gk, Loss} = \frac{P_g^2 + Q_g^2}{V_g^2} R_{gk} \quad g - k \in \Omega_{ice} \end{cases} \quad (C1)$$

式中, $P_{gk, Loss}$ 为线路 $g-k$ 的有功功率损耗, 其中线路 $g-k \in \Omega_{ice}$, g 、 k 为 Ω_{ice} 中线路两端节点编号; Ω_{ice} 为灾前预处理阶段中生成的受冰灾影响线路集合; P_i 、 Q_i 分别为节点 i 注入的有功和无功功率; V_i 和 V_j 分别为节点 i 和节点 j 的电压幅值; G_{ij} 和 B_{ij} 分别为线路 $i-j$ 的电导和电纳; θ_i 为节点 i 的相角, θ_{ij} 为节点 i 和节点 j 之间的相角差; $P_{G,i}$ 、 $P_{G,i}^{\min}$ 、 $P_{G,i}^{\max}$ 分别为节点 i 上发电机组输出的有功功率以及有功功率的上限及下限; $Q_{G,i}$ 、 $Q_{G,i}^{\min}$ 、 $Q_{G,i}^{\max}$ 分别为节点 i 上发电机组输出的无功功率以及无功功率的上限及下限; V_i^{\min} 以及 V_i^{\max} 为节点 i 电压幅值的下限和上限; R_{gk} 为线路 $g-k$ 的电阻值。

C2 除冰顺序评价指标计算及除冰线路筛选流程

1) 线路实时覆冰率指标 m_1 :

根据各时刻线路的覆冰厚度及其设计值, 对线路实时覆冰率指标进行构建, 量化线路受覆冰影响的严重程度。对于 t 时刻的线路 $i-j$ 的实时覆冰率指标 m_1 为:

$$m_{1,ij}(t) = D_{ice,ij}(t) / D_{design} \quad (C2)$$

式中, $D_{ice,ij}(t)$ 为 t 时刻下的线路 $i-j$ 上的覆冰厚度, D_{design} 为线路覆冰厚度的设计值。

2) 线路停运后的潮流转移熵 m_2 :

通过计算潮流转移熵来判断线路主动停运除冰对系统潮流及运行状态的影响, 其模型为^[20]:

当系统在运行状态为 s 时, 线路 $i-j$ 停运, 则

线路 $g-k$ 分担其转移的潮流 $\Delta\alpha_{gk,ij}^s$ 可表示为:

$$\Delta\alpha_{gk,ij}^s = p_{gk,ij}^s - p_{gk,0}^s \quad (C3)$$

式中, $p_{gk,ij}^s$ 为线路 $i-j$ 断开后线路 $g-k$ 的潮流;

$p_{gk,0}^s$ 为线路 $g-k$ 的初始潮流。

此时, 线路 $g-k$ 所承担的潮流冲击率 $\beta_{gk,ij}^s$ 为:

$$\beta_{gk,ij}^s = \Delta\alpha_{gk,ij}^s / \sum \Delta\alpha_{gk,ij}^s \quad (C4)$$

则线路 $i-j$ 停运时的潮流转移熵 $H_{T,ij}^s$ 为:

$$H_{T,ij}^s = -\sum \beta_{gk,ij}^s \ln \beta_{gk,ij}^s \quad (C5)$$

当 $H_{T,ij}^s$ 的数值较大时, 线路 $i-j$ 停运除冰对系统潮流影响相对较小, 转移到其它线路的潮流分布较为均匀; 而当 $H_{T,ij}^s$ 数值较小时, 线路 $i-j$ 停运对系统潮流冲击相对较大, 可能会造成线路过载或引发连锁故障, 此时应考虑对其他线路进行除冰。

进而可得线路 $i-j$ 停运后的潮流转移熵 m_2 为:

$$m_{2,ij} = \frac{H_{T,ij}^s}{\max H_{T,ij}^s} \quad (C6)$$

3) 除冰后系统负荷提升程度 m_3 :

不同线路停运除冰后系统的负荷提升程度不同, 所以应优先对系统负荷提升程度大的线路进行除冰。通过最优负荷削减模型^[21]对比不同线路除冰后系统负荷提升程度, 对除冰线路进行筛选, 表达式如下:

$$m_{3,ij} = P_{\text{improve},ij} / P_{\text{Loss}} \quad (C7)$$

式中, P_{Loss} 为 Ω_{ice} 中线路在全部发生故障时的负荷削减量; $P_{\text{improve},ij}$ 为未对任何线路除冰时, 完成对线路 ij 除冰后的负荷提升量。

将上述三个评价指标进行加权可得除冰顺序评价指标 F , 表达式如下:

$$F = \omega_1 \cdot m_1 + \omega_2 \cdot m_2 + \omega_3 \cdot m_3 \quad (C8)$$

式中, ω_1 、 ω_2 、 ω_3 分别为评价指标 m_1 、 m_2 、 m_3 的权重系数, 其中 $\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 = 1$, 具体取值由加权平

均组合评价法进行确定^[22]。

综上, 除冰线路筛选流程如图 C1 所示:

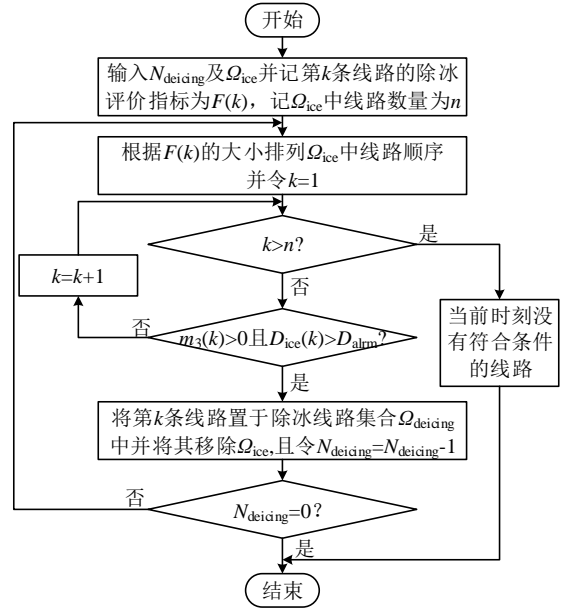


图 C1 除冰线路筛选过程流程图

Fig.C1 De-icing line screening process

步骤 1: 输入当前时刻下的除冰装置数量 N_{deicing} 、线路集合 Ω_{ice} , 以及各线路的除冰顺序评价指标 F , 记第 k 条线路的除冰评价指标为 $F(k)$, 并记 Ω_{ice} 中线路数量为 n ;

步骤 2: 根据 $F(k)$ 的大小, 按照由大到小的顺序排列 Ω_{ice} 中线路, 并令 k 为 1;

步骤 3: 逐一判断顺序编号为 k 的线路评估指标 m_3 是否大于 0 且覆冰厚度 D_{ice} 是否大于警戒值 D_{alarm} , 如果是则选取该线路置于除冰线路集合 Ω_{deicing} 并移出 Ω_{ice} , 令 $N_{\text{deicing}} = N_{\text{deicing}} - 1$, 并判断当前时刻下 N_{deicing} 是否为 0, 如果不是, 则返回步骤 2,

否则结束当前时刻除冰线路的筛选; 如果不满足要求, 则令 $k = k + 1$, 继续判断下一条线路。如当前时刻下, 所有线路均不满足要求, 则结束当前时刻的除冰线路筛选;

步骤 4: 输出除冰线路筛选结果。

C3 灾中紧急控制阶段韧性提升策略流程图

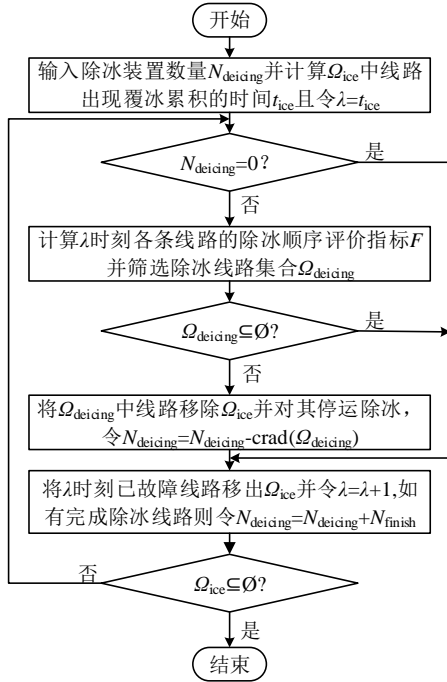


图 C2 灾中紧急控制阶段韧性提升策略流程图

Fig.C2 System resilience enhancement strategy of emergency control phase during disaster

C4 维修线路筛选模型约束条件

$$\begin{cases}
 0 \leq P_s(i) \leq P_{lost}(i) \\
 P_{recover}(i) = P_{lost}(i) - P_s(i) \\
 P_{G,i}^{\min} \leq P_{G,i} \leq P_{G,i}^{\max} \\
 P_G + P_s - P_L = A_a P_{ij} \\
 P_{ij} = (\theta_i - \theta_j) / x_{ij} \quad \eta_{ij} \in \Omega_{normal} \\
 P_{gk} = u_{gk} [(\theta_g - \theta_k) / x_{gk}] \quad gk \in \Omega_{fault} \\
 \sum_{gk \in \Omega_{fault}} u_{gk} = 1 \\
 |P_{ij}| \leq P_{ij}^{\max} \\
 |P_{gk}| \leq P_{gk}^{\max} \\
 \theta_i^{\min} \leq \theta_i \leq \theta_i^{\max}
 \end{cases} \quad (C9)$$

式中, $P_s(i)$ 为完成对所选线路的维修后节点 i 的负

荷削减量; $P_{lost}(i)$ 为选择维修线路前节点 i 的负

荷削减量; $P_{recover}(i)$ 为完成对所选线路的维修后节点

i 的负荷恢复量; P_G 、 P_s 、 P_L 为 N_{Bus} 维列向量,

其内的元素分别为各节点发电机的有功功率、负荷削减量、负荷的有功功率, N_{Bus} 为系统中的节点数

量; P_{ij} 为 N_0 维列向量, 其内的元素为各条线路的

潮流; A_a 为节点支路增广关联矩阵; x_{ij} 、 x_{gk} 分别

为线路 $i-j$ 、 $g-k$ 的电抗值; Ω_{normal} 为正常线路集合, 其中包括已完成筛选的维修线路; Ω_{fault} 为故障线路集合即待维修线路集合, 其中不包含正在维修

的线路和已选择维修的线路; u_{gk} 为表示线路 $g-k$

状态的二进制变量, 若选择线路 $g-k$ 进行维修则为 1, 未选择线路 $g-k$ 进行维修则为 0。

C5 灾后恢复阶段韧性提升策略流程图

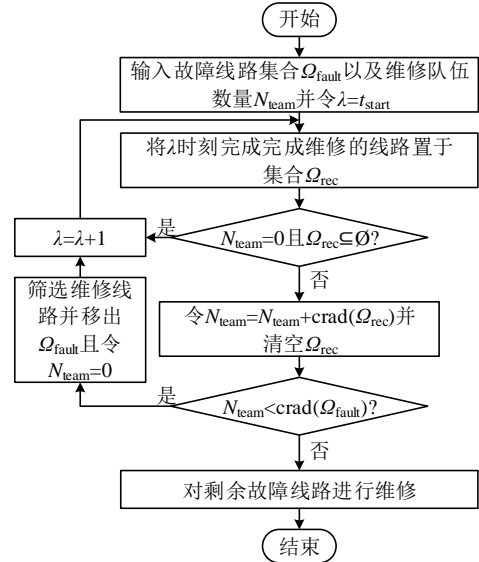


图 C3 灾后恢复阶段韧性提升策略流程图

Fig.C3 System resilience enhancement strategy of post-disaster recovery phase

C6 多阶段系统韧性提升策略示意图

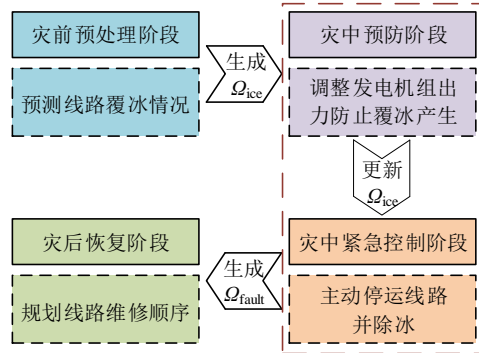


图 C4 多阶段系统韧性提升策略

Fig.C4 Multi-stage system resilience enhancement strategy

附录 D:

D1 IEEE 39 测试系统拓扑结构图

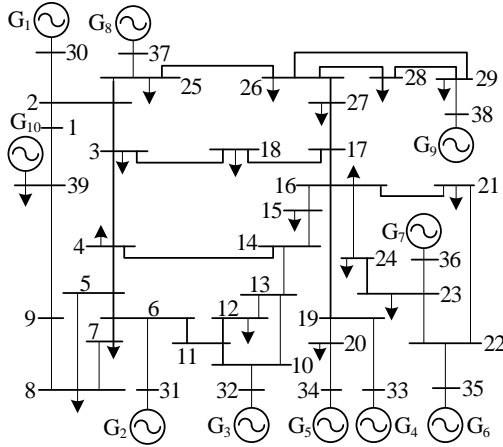


图 D1 IEEE 39 测试系统拓扑结构图

Fig.D1 IEEE 39 test system topology diagram

D2 IEEE 39 测试系统地理位置接线及线路最大覆冰厚度

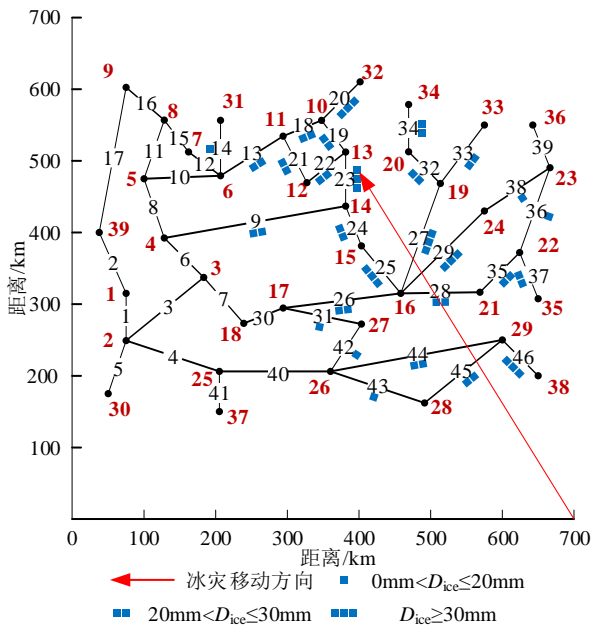
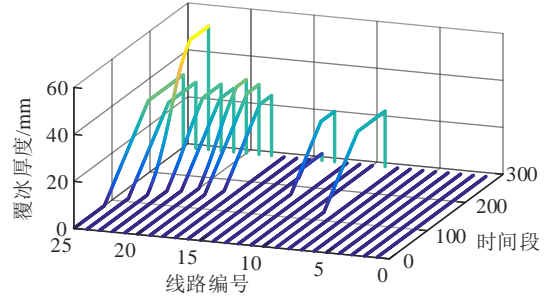


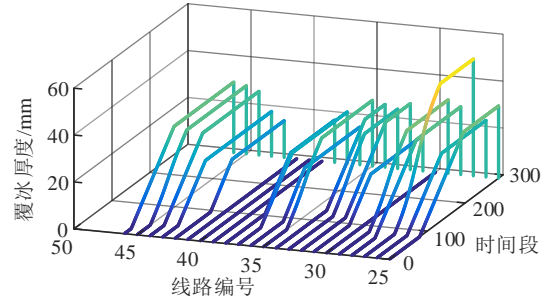
图 D2 IEEE 39 测试系统地理位置接线及线路最大覆冰厚度

Fig.D2 IEEE 39 test system geographic location wiring diagram and maximum ice coverage thickness of each line

D3 冰灾影响下 IEEE 39 测试系统内各线路覆冰厚度变化情况



(a) 线路 1-25 覆冰厚度变化情况



(b) 线路 26-46 覆冰厚度变化情况

图 D3 冰灾影响下 IEEE 39 测试系统内各线路覆冰厚度变化情况

Fig.D3 Ice cover situation of the line within the IEEE 39 test system under the influence of ice disaster

D4 冰灾影响下 IEEE 39 测试系统内线路覆冰情况

表 D1 冰灾影响下 IEEE 39 测试系统内线路覆冰情况

Table D1 Ice cover situation of the line within the IEEE 39 test system under the influence of ice disaster

| 类别 | 线路编号 |
|--------------------------|---|
| 最大覆冰厚度小于 20mm | 14、31、36、38、42、43 |
| 最大覆冰厚度介于 20mm 到 30mm 之间 | 9、13、18、19、21、22、24、26、28、32、33、34、35、37、44、45 |
| 最大覆冰厚度大于 30mm | 20、23、25、27、29、46 |
| 受冰灾影响线路集合 Ω_{ice} | 31、36、38、42、43、9、13、18、19、21、22、24、26、28、32、33、34、35、37、44、45、20、23、25、27、29、46 |

D5 第 19 小时除冰顺序评价指标计算结果

表 D2 第 19 小时除冰顺序评价指标计算结果

Table D2 Calculation result of assessment metric of deicing

| sequence at the 76th hour | | | |
|---------------------------|--------|------|--------|
| 线路编号 | F | 线路编号 | F |
| 45 | 0.6493 | 44 | 0.6428 |
| 37 | 0.4729 | 28 | 0.3964 |
| 36 | 0.3589 | 38 | 0.3515 |
| 19 | 0.3378 | 23 | 0.3315 |
| 22 | 0.3274 | 29 | 0.3272 |
| 24 | 0.3263 | 18 | 0.3263 |
| 33 | 0.3232 | 20 | 0.3226 |
| 9 | 0.2998 | 25 | 0.2929 |
| 27 | 0.2727 | — | — |
| | | 43 | 0.5634 |
| | | 34 | 0.3787 |
| | | 32 | 0.3460 |
| | | 26 | 0.3274 |
| | | 21 | 0.3270 |
| | | 31 | 0.3232 |
| | | 42 | 0.3184 |
| | | 13 | 0.2793 |

D6 IEEE 39 测试系统内故障线路维修顺序

表 D3 IEEE 39 测试系统内故障线路维修顺序

Table D3 Faulted line repair sequence within the IEEE 39 test system

| 维修队伍编号 | system | |
|--------|--------------------|-------------------|
| | 未采取灾后恢复阶段提升策略的维修顺序 | 采取灾后恢复阶段提升策略的维修顺序 |
| 维修队伍 1 | 43→29→33→32→13 | 28→18→24→32→29 |
| 维修队伍 2 | 44→25→9→22→18 | 44→19→27→22→20 |
| 维修队伍 3 | 27→26→23→20 | 25→43→33→13 |
| 维修队伍 4 | 28→24→19→21 | 26→9→23→21 |

D7 IEEE 118 测试系统地理位置接线图

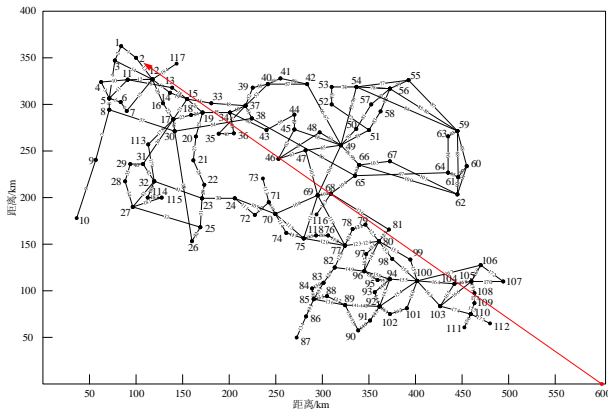
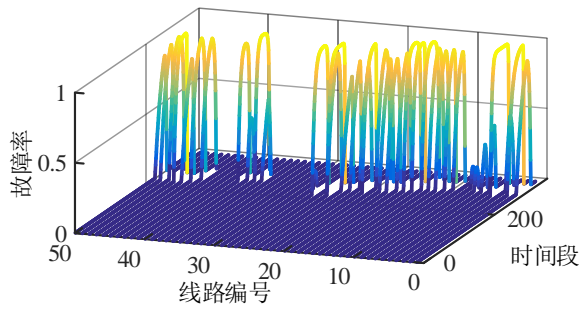


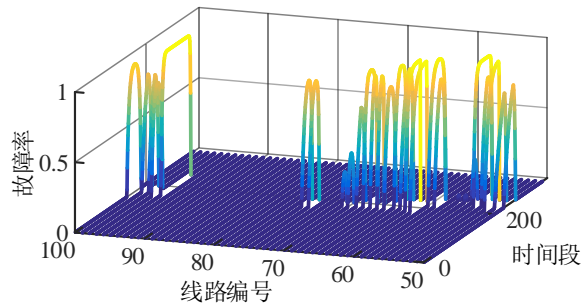
图 D4 IEEE 118 测试系统地理位置接线图

Fig.D4 IEEE 118 test system geolocation wiring diagram

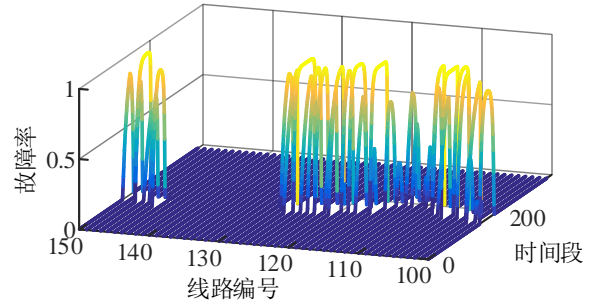
D7 冰灾影响下 IEEE 118 测试系统内各线路故障率变化情况



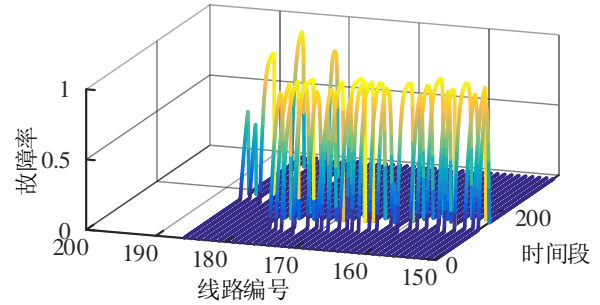
(a) 线路 1-50 故障率变化情况



(b) 线路 51-100 故障率变化情况



(c) 线路 101-150 故障率变化情况



(d) 线路 151-186 故障率变化情况

图 D5 冰灾影响下 IEEE 118 测试系统内各线路故障率变化情况

Fig.D5 Variation of line failure rate within the IEEE 118 test system under the influence of ice disaster

附录 E:

为减轻极端冰灾对系统造成的影响,本节通过采取所提多阶段系统韧性提升策略来提升系统在冰灾下的韧性。

表 E1 冰灾影响下 IEEE 118 测试系统内线路覆冰情况
Table E1 Ice cover situation of the line within the IEEE 118 test system under the influence of ice disaster

| 最大覆冰厚度 | 线路编号 |
|---------|--|
| 5~15mm | 58、81、141、142、143、161、179 3、5、6、7、8、28、29、30、36、38、55、56、57、66、67、69、70、71、98、99、101、103、109、110、111、112、114、115、117、129、144、146、147、149、156、162、185、186 |
| 15~30mm | 1、2、4、10、11、12、13、14、15、16、17、18、19、20、21、22、23、24、25、26、27、37、39、44、45、46、47、48、49、50、51、52、53、54、59、60、61、62、63、64、65、68、75、76、96、97、100、102、104、105、106、107、108、113、116、118、119、120、121、122、123、124、125、126、127、128、145、148、150、151、152、153、154、155、157、158、159、160、163、164、165、166、167、168、169、170、171、172、173、174、175、176、177、178、183、184 |
| >30mm | |

通过于灾前预处理阶段对线路覆冰情况进行预测后,各条线路的最大覆冰厚度如表 E1 所示。共计有 141 条线路因受冰灾侵袭产生覆冰,其中大部分线路的最大覆冰厚度大于 30mm,存在较高的故障风险。

在灾中预防阶段通过式(13)、(14)计算各条线路能够达到的临界不覆冰电流和线损后,再由式(15)筛选出能够达到临界不覆冰线损的线路,能够满足

所有防覆冰要求的线路共有4条,分别为线路163、174、175以及176,其中线路有功功率损耗变化情况如图E1所示。

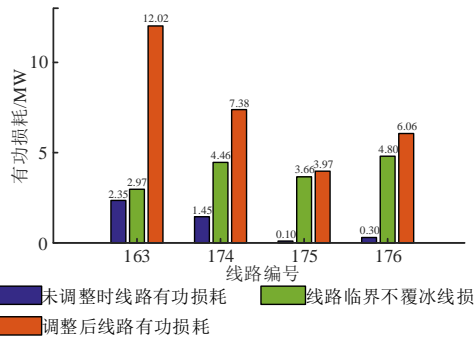


图 E1 IEEE 118 测试系统防覆冰线路有功损耗变化情况

Fig.E1 Variation of anti-icing line active power loss within the IEEE 118 test system

随着系统内的线路逐渐发生故障,韧性提升策略逐渐由灾中预防阶段转换为灾中紧急控制阶段,并开始对除冰线路进行筛选。同样以第一条除冰线路的筛选为例,于冰灾开始14h后确定,当前时刻下存在覆冰线路的除冰顺序评价指标 F 的结果如表E2所示,筛选后除冰线路为线路173。基于上述筛选流程,整个灾中紧急控制阶段共计完成了对14条线路进行停运除冰。

表 E2 第14小时除冰顺序评价指标计算结果

Table E2 Calculation result of assessment metric of deicing sequence at the 14th hour

| 线路编号 | F | 线路编号 | F | 线路编号 | F |
|------|--------|------|--------|------|--------|
| 173 | 0.6990 | 177 | 0.6962 | 172 | 0.6092 |
| 170 | 0.5978 | 171 | 0.5216 | 169 | 0.4926 |
| 166 | 0.4625 | 168 | 0.4575 | 167 | 0.4307 |
| 165 | 0.3858 | 164 | 0.3807 | — | — |

冰灾影响结束后,故障线路的维修工作陆续开始,采取灾后恢复阶段提升策略后的故障线路维修顺序如中表E3所示。在确认故障线路并对维修顺序进行规划后,能够使系统在恢复阶段维持更高的负荷水平,进一步增强系统韧性。

表 E3 IEEE 118 测试系统内故障线路维修顺序

Table E3 Faulted line repair sequence within the IEEE 118 test system

| 维修队伍编号 | 采取灾后恢复阶段提升策略后维修顺序 |
|--------|--|
| 维修队伍 1 | 122→20→21→98→177→126→66→159→76→171→37→168 |
| 维修队伍 2 | 11→184→185→149→15→157→166→150→127→147→10→108 |
| 维修队伍 3 | 68→60→128→99→145→170→62→54→115→106→100→50 |
| 维修队伍 4 | 156→25→105→112→113→109→69→178→26→120→102→27 |
| 维修队伍 5 | 158→61→59→164→22→52→23→53→165→121→97→49 |
| 维修队伍 6 | 16→151→183→119→65→155→124→75→51→154→12→152 |
| 维修队伍 7 | 146→17→107→123→45→39→48→1→96→19→36 |
| 维修队伍 8 | 67→18→153→169→118→3→4→2→104→47→24 |