

极端灾害下的电力系统预防-紧急协调调度

刘经纬,康海鹏,颜文婷,陈 钊,李长城
(广西大学 电气工程学院,广西 南宁 530004)

摘要:针对极端灾害提出了考虑线路故障概率的电力系统预防-紧急协调调度方法。以预防阶段和紧急阶段综合失负荷成本最小化为目标,建立考虑线路故障率的电力系统防御-攻击-防御3层优化调度模型。其中,预防阶段的发电机出力调整、网络拓扑切换和负荷减载以及紧急阶段的发电机再调度、紧急负荷切除被建立为防御资源,线路故障率被纳入攻击资源的建模中。采用列与约束生成算法对该模型进行求解,将3层模型转化为双层混合整数线性规划问题,通过IEEE-RTS-24节点系统进行算例仿真验证了所提方法的有效性,结果表明:在预防阶段采取调度措施作为主要防御手段能够有效降低负荷损失;在预防-紧急协调决策优化过程中考虑线路故障率能够有效降低预防成本,提升预防效果。

关键词:电力系统韧性;极端灾害;预防调度;紧急调度;线路故障概率

中图分类号:TM73

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202212017

0 引言

极端灾害是造成长时间、大面积停电频繁发生的重要原因之一,对电力系统的安全稳定运行问题提出了严峻的挑战^[1]。为了应对极端灾害,提升电力系统韧性作为现代电力系统的重要任务,逐渐成为研究热点。

提升电力系统韧性的策略可以分为规划策略和运行策略两大类,其中,运行策略根据电网受灾的3个阶段(灾前阶段、灾中阶段、灾后阶段)可进一步划分为预防调度策略、紧急调度策略和恢复调度策略^[2]。由于灾害发生的各阶段下电网运行的边界条件相互依赖,单独构建某一个阶段的运行策略对降低灾害影响的效果有限,因此应协调各个阶段的运行状态进行综合分析^[3-4]。已有研究表明,采取合理的灾前预防措施可以有效提升电网在灾害过程中的适应力,从而减小或者避免负荷的损失。灾前阶段制定预防策略,必须对可能出现的灾害故障场景及各阶段运行策略进行考虑。文献[5]考虑台风极端灾害各阶段下的电网运行状态,提出了以线路加固与植被管理作为韧性提升措施的防御-攻击-防御(defense-attack-defense, DAD)3层优化方法。文献[6]考虑台风灾害的时空特性与线路故障状态的不确定集,通过线路加固与储能配置保证了重要负荷在灾害各阶段的不间断供电。文献[7]研究了灾害前抢修人员的提前配置与台风后的系统恢复模型。文献[8-9]将DAD模型用于电网建设规划以抵御极

端灾害下可能发生的多重故障。上述研究成果表明了制定科学的灾前阶段规划策略可以有效提高电力系统韧性。

与规划策略相比,运行调度策略在灾前阶段更具有灵活性与经济性,可以在较短的时间内以较小的成本提升电网韧性^[2]。文献[10]将预防调度作为台风灾害前韧性提升的主要措施,与紧急调度相互协调,建立DAD模型对抗极端灾害,但对于线路投切及发电机调节能力的考虑不够详细。文献[11]提出了在预防调度阶段主动削减可切除负荷,从而减少了受灾过程的总体损失,达到提升电网韧性的效果,但没有考虑备用线路在预防阶段的应用。文献[12]针对覆冰灾害,提出在预防阶段进行线路潮流的优化调整,利用功率损耗的发热减轻覆冰的影响。文献[13]以预防-紧急调度的协调实现对连锁故障蔓延的抑制。上述研究为灾前运行调度奠定了很好的基础,但在防御措施方面考虑不够全面。并且对灾害的攻击资源仅以受损线路数量上限“ $N-K$ ”建模,并未考虑自然灾害下元件发生故障的概率信息,极易造成防御资源的浪费,因此有必要将极端灾害下电力系统元件故障概率融入韧性提升措施的决策中。

极端灾害对于电网的破坏主要集中在架设于户外的杆塔与导线^[14],其中任一元件的损坏都会导致整条传输线路受损。文献[15]提出一种考虑极端灾害时空特性的电力系统线路故障概率评估方法。文献[16]建立了台风灾害下考虑地理高程信息的输电通道失效概率评估方法,并根据福建电网的实际受灾情况验证了其工程应用的有效性。文献[17]对超高压直流输电线路遭受雷击风险的预警与评估方法进行了研究。文献[18]提出了一种考虑灾害时空特性的电网雷击故障概率预警方法,并在江西电网投

收稿日期:2022-07-08;修回日期:2022-09-30

在线出版日期:2022-12-22

基金项目:广西自然科学基金资助项目(2020GXNSFBA297069)
Project supported by the Natural Science Foundation of Guangxi Province(2020GXNSFBA297069)

入了实际运行。

综合上述分析,本文提出一种考虑元件故障率的电力系统预防-紧急协调调度模型。基于元件故障概率信息,利用熵权法计算故障场景熵值,以调度人员设置的故障场景熵值区间范围为攻击资源,以预防阶段的发电机出力调整、网络拓扑切换和负荷减载以及紧急阶段的发电机再调度、紧急负荷切除为防御资源,建立预防-紧急协调调度 DAD 3 层优化模型,并引入辅助变量将模型中含绝对值的非线性整数项转化为线性项,根据列与约束生成(column and constraint generation, C&CG)算法给出了模型的转换求解方法。最后,通过 IEEE-RTS-24 节点系统的测试对本文方法的有效性进行了分析验证。本文的创新之处在于:建立了以发电机、线路、负荷为防御资源的预防-紧急协调调度模型,在预防阶段通过发电机出力调整、线路开合闸、主动负荷减载等措施,降低电网整体损失;利用熵权法将线路故障率纳入攻击资源的建模中,保证防御措施能够优先覆盖发生概率较大且较严重的场景,排除故障线路少且发生概率小的场景,有效降低预防成本。

1 预防-紧急协调调度框架

本节介绍极端灾害下电网预防阶段与紧急阶段的协调调度框架,其具体框架如图 1 所示。该框架旨在实现预防阶段和紧急阶段在灾害场景下的协调,其主要思想在于通过预防阶段的发电机出力调整、线路投切和预防性负荷减载,避免紧急阶段的切机、切负荷,实现灾害全过程系统综合损失最小。其主要流程如下。

首先,进行元件故障概率预测评估,通过预防阶

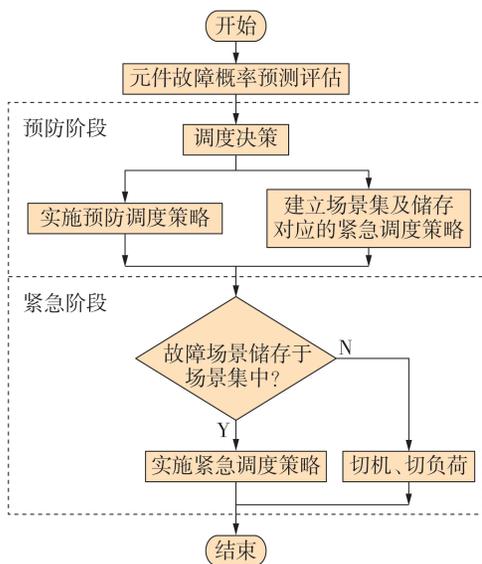


图 1 预防-紧急协调调度框架

Fig.1 Framework of preventive and emergency coordinated dispatching

段的调度决策,获得最优的预防调度策略与对应场景集的紧急调度策略。然后,执行预防调度策略,并储存紧急调度策略。在灾害发生后的紧急阶段,判断故障场景是否存储于故障集中,若故障场景已储存于场景集中,则执行对应紧急调度策略。需要注意的是,若故障场景未储存于场景集中,则以最小负荷削减量为目标,采取切机、切负荷等紧急措施^[15],以降低发生连锁故障、大停电的风险。

极端灾害下的故障概率预测评估是一个多学科融合研究的领域。本文关注的重点在于如何通过调度提高系统韧性,不涉及具体的灾害信息搜集过程及故障预测模型,因此以文献[15]的台风灾害下线路故障概率预测评估研究为例。

2 调度决策模型

本节具体介绍应对极端灾害的 3 层优化调度决策模型,其目的是通过协调预防调度和紧急调度,最小化整体经济损失。第 1 层优化调度决策模型为防御层,负责灾前调度的最优决策,并将极端灾害前的机组出力调整、线路开合闸状态以及预防性负荷减载传递给第 2 层与第 3 层;第 2 层优化调度决策模型为攻击层,模拟极端灾害(理性攻击者)的行为,决策变量为选择攻击的线路,极端灾害试图通过有限的攻击资源造成最严重的系统经济损失;第 3 层优化调度决策模型负责最小化系统发生故障后的经济损失。第 1 层模型的决策变量在第 2、3 层被视为常量,第 2 层模型的决策变量在第 3 层被视为常量。在本节中,标注了标 a、b、c 的变量分别表示第 1—3 层的变量。

2.1 预防响应模型

预防响应指的是在发展迅猛的极端灾害影响电网之前,通过各类调度手段对电网状态进行调整,增加电网备用容量,避免预想故障发生后线路过载导致负荷被紧急切除,从而达到降低损失的目的。本文采用输电网潮流优化中计算速度较快的直流潮流模型,原因是在预防阶段很可能只能留给调度人员很短的调度决策时间,加快模型计算速度具有重要意义。本文将采取发电机出力调整、负荷减载和对线路进行开合闸的手段,减少灾害攻击的影响,提升电网韧性。

预防响应的目标函数如下:

$$\min \left(\sum_{g \in G} c_g P_{g,a} + \sum_{d \in D} c_{d,a} \Delta P_{d,a} \right) \quad (1)$$

式中: G 、 D 分别为发电机、负荷的集合; c_g 为发电机 g 的单位发电成本; $P_{g,a}$ 为预防阶段下发电机 g 的出力; $c_{d,a}$ 为负荷 d 在预防阶段的单位削减成本; $\Delta P_{d,a}$ 为负荷 d 预防性削减量。

电网必须满足节点潮流平衡方程和线路潮流平

衡方程,具体如下:

$$\sum_{g \in G_i} P_{g,a} - \sum_{(i,j) \in \Omega_{Bi}} P_{ij,a} = \sum_{d \in D_i} (P_{d,a} - \Delta P_{d,a}) \quad (2)$$

$$B_{ij}(\theta_{i,a} - \theta_{j,a}) + P_{ij,a} \leq (1 - u_{ij,a})M \quad (3)$$

$$B_{ij}(\theta_{i,a} - \theta_{j,a}) + P_{ij,a} \geq (u_{ij,a} - 1)M \quad (4)$$

式中: G_i 、 Ω_{Bi} 、 D_i 分别为节点 i 处所有发电机、线路、负荷的集合; $P_{d,a}$ 为负荷 d 在预防阶段的数值; $u_{ij,a}$ 为表示预防阶段线路 (i, j) 开合状态的 0-1 变量, $u_{ij,a}=1$ 表示线路 (i, j) 处于合闸状态, $u_{ij,a}=0$ 表示线路 (i, j) 处于开闸状态; $P_{ij,a}$ 为预防阶段线路 (i, j) 的传输功率; B_{ij} 为线路 (i, j) 的导纳; $\theta_{i,a}$ 、 $\theta_{j,a}$ 分别为节点 i 、 j 的相角; M 为一个较大的数, 可以取 $M=100\,000$ 。式(3)和式(4)确保了断开的线路传输功率为 0。

电网中发电机出力必须在其发电容量之内, 即满足式(5)所示约束。

$$P_g^{\min} \leq P_{g,a} \leq P_g^{\max} \quad (5)$$

式中: P_g^{\min} 、 P_g^{\max} 分别为发电机 g 出力的最小值、最大值。

电网中输电线路受其传输容量极限的限制, 即满足式(6)所示约束。

$$P_{ij}^{\min} u_{ij,a} \leq P_{ij,a} \leq P_{ij}^{\max} u_{ij,a} \quad (6)$$

式中: P_{ij}^{\min} 、 P_{ij}^{\max} 分别为线路 (i, j) 传输容量的最小值、最大值。

各负荷节点减载量应满足:

$$0 \leq \Delta P_{d,a} \leq P_{d,a}^{\max} \quad (7)$$

式中: $P_{d,a}^{\max}$ 为负荷 d 的最大预防性削减量。

此外, 在受极端灾害影响之前的预防阶段, 将处于检修状态、备用状态的线路投入运行, 可以增加电网的冗余性; 将高风险线路进行切除, 可以避免线路故障发生潮流突变对电网造成冲击。但在实际运行中, 对线路进行开合闸操作是有限度的。在预防阶段, 调度人员需要在有限的时间内找出对系统韧性影响最大的线路优先进行开合闸。因此对于线路的操作需要满足以下约束条件:

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_b} |u_{ij,0} - u_{ij,a}| \leq K_a \quad (8)$$

式中: Ω_b 为电网中所有线路的集合; $u_{ij,0}$ 为表示线路 (i, j) 初始状态的 0-1 变量, $u_{ij,0}=1$ 表示线路 (i, j) 处于运行状态, $u_{ij,0}=0$ 表示线路 (i, j) 处于备用或检修状态。式(8)用于在预防响应阶段找出优先级最高的 K_a 条线路进行开合闸操作。值得注意的是, 如果 K_a 取值过高, 则可能会出现灾害已经来临但仍无法完成调度指令的情况; 如果 K_a 取值较低, 则无法完全发挥所有可调用的线路资源。因此, K_a 的取值取决于极端灾害的发展情况与电网的实际运行情况。

由于约束式(8)引入了含绝对值的非线性项, 需对其进行线性化处理。引入辅助变量 u_{ij}^+ 、 u_{ij}^- , 进行以下转换:

$$\sum_{(i,j) \in \Omega_b} |u_{ij,0} - u_{ij,a}| \leq K_a \Leftrightarrow \begin{cases} u_{ij}^+ = \max\{0, u_{ij,0} - u_{ij,a}\} \\ u_{ij}^- = \max\{0, u_{ij,a} - u_{ij,0}\} \\ \sum_{(i,j) \in \Omega_b} u_{ij}^+ + u_{ij}^- \leq K_a \end{cases} \quad (9)$$

对于式(9)中仍含有“max 函数”形式的非线性项, 采用大 M 法即可对其完成线性化。

2.2 灾害攻击模型

自然灾害对电网的最终影响体现在电网组件损坏所导致的切负荷量, 切负荷量最大的场景即为最恶劣的故障场景。基于此, 可以对自然灾害进行攻击者建模, 以极端灾害对电网造成的损失最大为目标, 其目标函数如下:

$$\max \sum_{d \in D} c_{d,c} \Delta P_{d,c} \quad (10)$$

式中: $c_{d,c}$ 为负荷 d 在紧急阶段的单位削减成本; $\Delta P_{d,c}$ 为紧急阶段下负荷 d 的切除量。

由香农信息熵理论, 信息熵表示一个事件的不确定程度, 一个事件的信息熵值越大, 则其包含的信息量越大。电力系统在灾害的攻击下是一个可能发生各种故障事件的不确定系统, 由若干个“某一元件是否发生故障”的不确定事件构成, 因此, 可以利用熵值作为数学度量表述灾害对系统的攻击情况^[19]。基于极端灾害下线路故障率的评估, 灾害攻击导致的故障场景熵值 W 表达式如下:

$$W = \sum_{(i,j) \in \Omega_b} (-\log_2 p_{ij}) u_{ij,b} \quad (11)$$

式中: p_{ij} 为线路 (i, j) 的故障概率; $u_{ij,b}$ 表示第 2 层模型中线路 (i, j) 运行状态的 0-1 变量, $u_{ij,b}=1$ 表示线路 (i, j) 发生故障, $u_{ij,b}=0$ 表示线路 (i, j) 正常运行。

由调度人员设置熵值 W 的区间范围即设置攻击者模型的攻击资源:

$$W_{\min} \leq \sum_{(i,j) \in \Omega_b} (-\log_2 p_{ij}) u_{ij,b} \leq W_{\max} \quad (12)$$

式中: W_{\min} 、 W_{\max} 分别为攻击资源的下限、上限。区间范围越大, 攻击者的攻击资源越丰富, 包含的故障场景越多。合理设置下限 W_{\min} 可以削减大量发生概率高但危害小的场景, 加快模型求解速度; 合理设置上限 W_{\max} 可以预防概率较低、影响较大的场景, 排除发生概率极低的场景, 从而获得经济有效的优化结果。实际上, 合理的攻击资源上下限反映的是电网抵抗灾害的能力。超出这个上限的灾害, 说明超出了电网的预防能力, 采取调度措施强行抵抗也会损失巨大, 需要通过其他的措施, 如规划、恢复手段来应对。调度人员可以通过调整攻击资源获得多种优化结果, 并从中选取合理的调度方案, 下文 4.2.3 节将对攻击资源的设置进行具体分析。

2.3 紧急响应模型

紧急响应旨在利用可调度资源,在灾害发生后的第一时间将电网损失控制在最低值。在紧急阶段调度人员可操作资源较为有限,线路的开合闸无法在该阶段作为韧性提升的资源。本文所提紧急调度策略具体包括快速可调度发电机组出力的调整和执行被动切除负荷。

紧急响应的目标函数如下:

$$\min \sum_{d \in D} c_{d,c} \Delta P_{d,c} \quad (13)$$

由于紧急阶段执行被动切负荷决策的成本比系统预防阶段时更加昂贵^[20],因此需设置紧急阶段的单位削减成本 $c_{d,c}$ 远高于预防阶段的 $c_{d,a}$,其根本目的是为了使本文数学优化模型在寻优求解过程中,通过进行成本更低的预防阶段负荷切除,避免成本较高的紧急负荷切除。需要指出的是,预防阶段的 $c_{d,a}$ 和紧急阶段的 $c_{d,c}$ 评估精确与否并不会影响求解的结果。

在该阶段电网仍应满足节点潮流平衡方程和线路潮流平衡方程,具体如下:

$$\sum_{g \in G_i} P_{g,c} - \sum_{(i,j) \in \Omega_{ij}} P_{ij,c} = \sum_{d \in D_i} (P_{d,c} - \Delta P_{d,c}) \quad (14)$$

$$B_{ij}(\theta_{i,c} - \theta_{j,c}) + P_{ij,c} \leq (1 - u_{ij,c})M \quad (15)$$

$$B_{ij}(\theta_{i,c} - \theta_{j,c}) + P_{ij,c} \geq (u_{ij,c} - 1)M \quad (16)$$

式中: $P_{g,c}$ 为紧急阶段下发电机 g 的出力,其他变量类似。

类似于预防阶段的响应,线路传输容量和负荷切除也需保证在限制之内,即:

$$P_{ij}^{\min} u_{ij,c} \leq P_{ij,c} \leq P_{ij}^{\max} u_{ij,c} \quad (17)$$

$$0 \leq \Delta P_{d,c} \leq P_{d,c}^{\max} \quad (18)$$

式中: $P_{d,c}^{\max}$ 为负荷 d 的最大紧急切除量。

在紧急调度阶段,仅指定快速可调度发电机组参与有功功率的调整,其他机组为不可调度机组,有功出力情况与预防阶段保持一致。可调度发电机出力上下限与爬坡能力应满足如下约束:

$$P_g^{\min} \leq P_{g,c} \leq P_g^{\max} \quad (19)$$

$$-\Delta P_g^{\text{up}} \leq P_{g,c} - P_{g,a} \leq \Delta P_g^{\text{down}} \quad (20)$$

式中: ΔP_g^{up} 、 ΔP_g^{down} 分别为发电机 g 的上、下备用容量。

紧急状态下的线路状态受到预防阶段线路状态和灾害攻击的共同影响,需满足如下约束:

$$u_{ij,c} = u_{ij,a} u_{ij,b} \quad (21)$$

3 基于 C&CG 算法的 3 层模型求解

由于所提模型为 min-max-min 模型,现有求解器无法直接求解此类问题。通常而言,3 层优化模型可以通过 C&CG 算法求解。本文的 3 层优化模型可写为如下紧凑形式:

$$\left\{ \begin{array}{l} \min_{\mathbf{x}_1} \mathbf{c}_1^T \mathbf{x}_1 \\ \text{s.t. } \mathbf{A} \mathbf{r}_1 + \mathbf{B} \mathbf{x}_1 \leq \mathbf{b}_1 \\ \max_{\mathbf{r}_2} \mathbf{c}_3^T \mathbf{x}_3 \\ \text{s.t. } \mathbf{C} \mathbf{r}_2 \leq \mathbf{b}_2 \\ \min_{\mathbf{x}_3, \mathbf{r}_3} \mathbf{c}_3^T \mathbf{x}_3 \\ \text{s.t. } \mathbf{E} \mathbf{x}_1 + \mathbf{G} \mathbf{r}_3 + \mathbf{H} \mathbf{x}_3 \leq \mathbf{b}_3 \\ \mathbf{r}_1 \otimes \mathbf{r}_2 = \mathbf{r}_3 \end{array} \right. \quad (22)$$

式中: \otimes 表示 2 个等维矩阵对应元素相乘; \mathbf{r}_1 、 \mathbf{x}_1 、 \mathbf{r}_2 、 \mathbf{r}_3 、 \mathbf{x}_3 分别对应 $[u_{ij,a}]$ 、 $[P_{g,a}, P_{ij,a}, \theta_{i,a}, \Delta P_{d,a}]$ 、 $[u_{ij,b}]$ 、 $[u_{ij,c}]$ 、 $[P_{g,c}, P_{ij,c}, \theta_{i,c}, \Delta P_{d,c}]$; 常系数矩阵 \mathbf{c}_1 、 \mathbf{b}_1 、 \mathbf{c}_3 、 \mathbf{b}_2 、 \mathbf{b}_3 包含的非 0 元素分别有 $[c_g, c_{d,a}]$ 、 $[M, P_g^{\max}, P_g^{\min}, P_{d,a}^{\max}, K_a]$ 、 $[c_{d,c}]$ 、 $[W_{\max}, W_{\min}]$ 、 $[M, \Delta P_g^{\text{up}}, \Delta P_g^{\text{down}}, P_{d,c}^{\max}, P_g^{\min}]$; \mathbf{A} 、 \mathbf{B} 、 \mathbf{C} 、 \mathbf{E} 、 \mathbf{G} 、 \mathbf{H} 分别为与矩阵 \mathbf{r}_1 、 \mathbf{x}_1 、 \mathbf{r}_2 、 \mathbf{x}_1 、 \mathbf{r}_3 、 \mathbf{x}_3 相乘的系数矩阵。

该模型为一个 3 层优化模型,其第 1 层、第 2 层、第 3 层分别对应于预防响应阶段、灾害攻击阶段与紧急响应阶段。第 1 层模型经过线性化转换转化为混合整数线性规划 (mixed-integer linear programming, MILP) 问题;第 2 层模型为整数规划 (integer programming, IP) 问题;第 3 层模型中,由于预防响应和灾害响应的 0-1 变量 $u_{ij,a}$ 、 $u_{ij,b}$ 在紧急响应中为常量,又根据式 (21),紧急响应阶段线路状态 $u_{ij,c}$ 由 $u_{ij,a}$ 、 $u_{ij,b}$ 直接决定,因此 \mathbf{r}_3 可以视为常量,第 3 层模型不含离散变量,属于线性规划 (linear programming, LP) 问题。故本文采用 C&CG 算法,将原 MILP-IP-LP 这 3 层问题等效为双层 MILP 模型进行求解。

3.1 子问题

子问题包含原问题中的灾害响应、紧急响应,为 max-min 问题,需将其合并为单层问题。由于第 3 层问题为 LP 模型,因此可利用对偶理论写出其对偶问题。合并后的子问题形式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_{\mathbf{r}_2, \mathbf{x}_3, \mathbf{r}_3} \alpha \\ \text{s.t. } \alpha \leq (\mathbf{b}_3 - \mathbf{E} \mathbf{x}_1 - \mathbf{G} \mathbf{r}_3)^T \boldsymbol{\lambda} \\ \mathbf{E} \mathbf{x}_1 + \mathbf{G} \mathbf{r}_3 + \mathbf{H} \mathbf{x}_3 \leq \mathbf{b}_3 \\ \mathbf{H}^T \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{c}_3 \\ \boldsymbol{\lambda} \leq 0 \\ \mathbf{C} \mathbf{r}_2 \leq \mathbf{b}_2 \\ \mathbf{r}_1 \otimes \mathbf{r}_2 = \mathbf{r}_3 \end{array} \right. \quad (23)$$

式中: α 为引入的中间变量,是对子问题目标函数的预估值; $\boldsymbol{\lambda}$ 为对偶变量。具体推导过程见附录 A。对于约束中包含的 \mathbf{r}_3 与对偶变量 $\boldsymbol{\lambda}$ 相乘的部分,其本质为 0-1 变量与连续变量的相乘,可以引入辅助变量 y ,通过如下大 M 法将其线性化:

$$y = r_2 \boldsymbol{\lambda} \Leftrightarrow \left\{ \begin{array}{l} y \geq -M r_2 \\ y \leq M r_2 \\ y \leq \boldsymbol{\lambda} + M(1 - r_2) \\ y \geq \boldsymbol{\lambda} - M(1 - r_2) \end{array} \right. \quad (24)$$

式中： r_2, λ 分别对应于 r_2, λ 中的元素。

3.2 主问题

主问题为改进的原预防响应层的问题。第一次求解主问题时,故障集为空集。随着C&CG算法迭代次数 m 的增加,需要不断将新的最恶劣场景 r_2^m 加入故障集,并将故障集返回主问题,在主问题中添加对应的新的变量 x_3^m 和相应约束,然后求解模型获得最优预防策略。第 m 次迭代的主问题可以表示为:

$$\begin{cases} \min_{r_1, x_1, x_3^m} c_1^T x_1 + \eta \\ \text{s.t. } g(r_1, x_1) \leq 0 \\ f(r_1, x_1, r_2^m, x_3^m) \leq 0 \\ \eta \geq \sum_{i=1}^k c_3^T x_3^m \\ m \in \{1, 2, \dots, k\} \end{cases} \quad (25)$$

式中： k 为迭代总次数； $g(r_1, x_1) \leq 0$ 表示预防响应层的原始约束； $f(r_1, x_1, r_2^m, x_3^m) \leq 0$ 表示每次迭代后新加入的约束； η 为辅助变量,表示所有恶劣场景经济损失之和。

3.3 模型求解流程

通过上述转换,主问题与子问题均转化成了MILP问题,从而采用C&CG算法的求解思路对主问题与子问题进行迭代求解,流程如图2所示。图中： U^m, L^m 分别为第 m 次迭代时主问题目标函数的上、下界；取 $\varepsilon=10^{-4}$ 用于迭代终止判据。

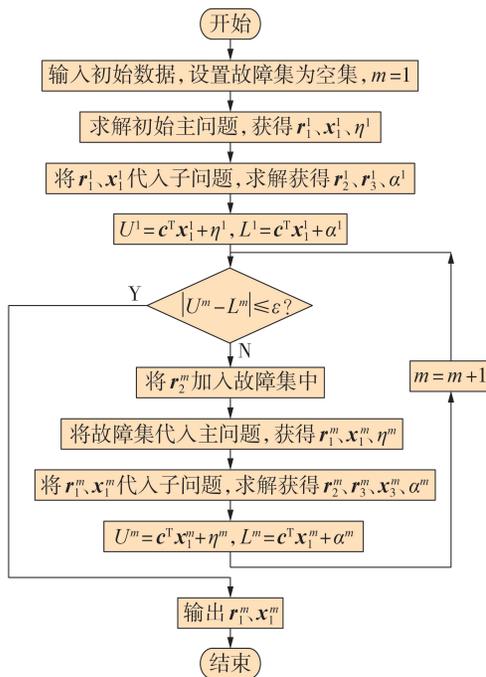


图2 求解算法流程图

Fig.2 Flowchart of solution algorithm

4 算例分析

4.1 算例概述

本文选取 IEEE-RTS-24 节点系统为算例,分析

极端灾害下所提的预防-紧急协调调度方法,通过比较不同预防策略、不同攻击者建模、不同攻击资源的调度结果,验证本文所提方法的可行性和有效性。

设置可切除负荷占总负荷量的80%,处于节点2、7、13、22、23的机组为快速可调机组,机组上下备用容量设置为最大出力的20%,线路18、20、37处于备用或待检修状态,寻找优先级最高的1条线路(即 $K_s=1$)进行开合闸操作,设 $c_{d,a}=100$ 元/MW、 $c_{d,c}=1000$ 元/MW。需要说明的是,设置切负荷成本是为了使优化模型在寻优求解中通过预防阶段的负荷切除避免紧急阶段的负荷切除,选取的典型设置值的精确与否并不会影响最终决策结果。电力系统中各线路在极端灾害条件下发生故障的概率见附录B表B1^[15,21]。本文算例基于MATLAB R2020a平台,调用GUROBI 9.5.1工具箱进行求解。

4.2 协调调度结果与分析

本节将对预防措施、攻击者建模方式进行分析,以验证本文提出的调度预防措施和攻击者建模方式的有效性,并对不同攻击强度设置下的预防成本进行比较,分析本文所提方法的可行性。

4.2.1 预防措施分析

从不同的灾害防御策略出发,对以下策略中的最恶劣场景进行分析,获得系统各阶段的切负荷成本如表1所示。本文策略:设定攻击资源上限 $W_{\max}=5$ 、下限 $W_{\min}=0$,在预防阶段考虑发电机出力调整、负荷削减策略与线路投切。对比策略:设定攻击资源上限 $W_{\max}=5$ 、下限 $W_{\min}=0$,在预防阶段考虑发电机出力调整、负荷削减策略,但不考虑线路投切。

表1 不同策略的切负荷成本

Table 1 Cost of load shedding with different strategies

策略	预防阶段切负荷 / MW	紧急阶段切负荷 / MW	总损失负荷 / MW	损失成本 / 元	主动投切线路
本文策略	69.61	0	69.61	6961	投入线路18
对比策略	100.86	0	100.86	10086	—

通过表1可知,系统采取本文策略时,在预防阶段投入线路18,负荷减载量为69.61 MW,所需成本为6961元。对比策略在预防阶段不对线路进行开合闸操作,决策结果中预防阶段共切除负荷100.86 MW,相比于本文策略要额外削减31.25 MW负荷。因此采取线路开合闸的方式在一定程度上可以减小系统的损失。

另外,如果在预防阶段不考虑预防性切负荷作为防御措施^[10],则该模型无法收敛,即该防御措施无法抵御攻击者的所有攻击行为,在紧急阶段通过快速机组的调节无法使电网恢复稳定状态,必须进行切机、切负荷操作,同时有发生连锁故障的风险,对

此本文不进行深入讨论。

4.2.2 攻击者建模分析

首先,按照文献[11]所使用的攻击层建模方法,将DAD模型第2层响应中的约束式(12)修改为灾害强度(受损线路数量)上限,计算不同灾害强度的预防切负荷量,如表2左侧所示。然后,在本文模型中调整攻击者攻击资源上限 W_{\max} ,获得与各级灾害强度相近的预防成本,并统计其故障场景集之中最恶劣场景的故障线路数量,如表2右侧所示,以进行对比。

表2 不同攻击者模型的切负荷量

Table 2 Load shedding with different attacker models

灾害强度	切负荷量 / MW	最恶劣故障线路数量 / 条	W_{\max}	切负荷量 / MW	最恶劣故障线路数量 / 条
2	0	2	4.3	0	3
3	99.87	3	5.6	77.08	4
4	440.00	4	14	486.20	7

以攻击资源上限 $W_{\max}=5.6$ 的情况为例,在预防阶段共切除负荷77.08 MW,在故障集中,最多有4条线路遭受攻击导致损坏,包含线路5、12、15、17。如果以灾害强度作为攻击者建模,设置灾害强度(受损线路上限)为3,则此时预防阶段共需切除负荷99.87 MW,但是最多仅考虑到3条线路遭受攻击的情况。

对比2种不同的攻击者建模方式,分析可知,在预防成本相近的情况下,针对本文所提出的攻击者模型进行防御,能预防含有更多故障线路的故障场景。其原因是文献[11]的攻击者建模方式将大量发生概率极低且故障线路较少的场景纳入了攻击资源,导致防御者消耗了大量的防御资源用于预防这些场景。而通过本文提出的攻击者建模方法,可以排除故障线路少同时发生概率小的场景,将故障程度更加严重且发生概率更大的场景纳入攻击者的攻击资源,使得防御者在成本相近的情况下,针对灾害做出更精准、更科学的防御决策。总体而言,按照本文所提的自然灾害建模方法,可以针对极端灾害进行合理但成本低的预防调度。

4.2.3 攻击强度分析

本节主要分析攻击强度的设置对系统调度结果的影响,通过对比不同攻击资源上限条件下采取预防措施和不采取任何措施的负荷切除量,从而获得合理的调度方案,验证本文方法的可行性。为了方便分析,本节将所有攻击资源上限均取为整数,攻击资源下限取0。

不同攻击资源上限得到的具体负荷损失情况如表3所示。

表3 不同攻击强度下的切负荷量

Table 3 Load shedding with different attack strengthes

W_{\max}	采取预防措施下的切负荷量 / MW		无预防措施的切负荷量 / MW	
	预防阶段	紧急阶段	预防阶段	紧急阶段
2	0	0	0	0
3	0	0	0	97.94
4	0	0	0	107.94
5	69.61	0	0	137.36
6	227.00	0	0	227.00
7	227.00	0	0	227.00
8	227.00	0	0	227.00
9	327.00	0	0	227.00

由表3可知,当设置灾害攻击资源上限小于9时,系统可以通过预防措施以较小的代价抵御灾害带来的巨大损失。但是,当攻击资源上限设置为6时,系统需要通过227 MW的预防性负荷削减抵御灾害攻击,与不采取任何预防措施时的紧急切负荷持平。当攻击资源上限设置为9时,预防切负荷量为327 MW,远超不采取任何措施时的紧急切负荷量227 MW。虽然进行预先减载的单位成本比紧急减载更低,但是对于调度人员而言,如此激进的抵御策略是无法接受的。因此,通过预防调度的措施抵御灾害攻击是有一定限度的。

总体而言,在极端灾害来临前短时间内无法进行规划策略等其他韧性提升措施时,灵活设置合理的攻击资源上限并通过调度措施对灾害进行预防,可以避免电网在一些概率较低、影响较大的场景中遭受损失,从而获得良好的韧性提升效果,这对于加强电力系统安全风险管控和应急保障能力有重要意义。

5 结论

本文计及极端灾害对线路故障率的影响,通过分析预防措施、灾害攻击、紧急措施不同决策行为特征,建立了电力系统预防-紧急协调调度DAD 3层优化模型,详细描述了线路遭受攻击前的预防措施决策、灾害对线路攻击决策以及线路停运后的电网运行状况,并将MILP-IP-LP问题转化为双层MILP问题,利用C&CG算法进行求解。算例结果表明:

1) 本文提出的电力系统预防-紧急协调调度方法,可以通过制定合理的调度措施以减小极端灾害攻击带来的严重损失;

2) 在调度决策优化中考虑线路故障概率信息,可以有效提升预防效果,降低预防成本。

在下一步研究中,笔者将主要从以下2个方面进行改进与延伸:

1) 本文攻击资源上下限的选取需要调度人员通过多次调整后进行合理取值,下一步将深入分析不

同极端灾害的特性,提出适用于各种极端灾害的选取攻击资源上下限的一般方法;

2)由于本文模型采用调度措施作为主要防御手段,在灾害攻击强度较高时的防御力仍然有限,必须通过灾前规划与运行以及灾后恢复的协调共同抵御,同时极端灾害下负荷和发电机出力的不确定性带来的影响也应该被纳入考虑范畴。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] TON D T, WANG W T P. A more resilient grid: the U.S. department of energy joins with stakeholders in an R&D plan [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3): 26-34.
- [2] PANTELI M, MANCARELLA P. The grid: stronger, bigger, smarter?: presenting a conceptual framework of power system resilience [J]. IEEE Power and Energy Magazine, 2015, 13(3): 58-66.
- [3] POUDEL S, DUBEY A. Critical load restoration using distributed energy resources for resilient power distribution system [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(1): 52-63.
- [4] 别朝红, 林超凡, 李更丰, 等. 能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(9): 2735-2745.
- BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2745.
- [5] MA Shanshan, CHEN Bokan, WANG Zhaoyu. Resilience enhancement strategy for distribution systems under extreme weather events [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2018, 9(2): 1442-1451.
- [6] 张海波, 马伸铜, 程鑫, 等. 保证重要负荷不间断供电的配电网储能规划方法[J]. 电网技术, 2021, 45(1): 259-268.
- ZHANG Haibo, MA Shentong, CHENG Xin, et al. Distribution network energy storage planning ensuring uninterrupted power supply for critical loads [J]. Power System Technology, 2021, 45(1): 259-268.
- [7] ARAB A, KHODAEI A, HAN Z, et al. Proactive recovery of electric power assets for resiliency enhancement [J]. IEEE Access, 2015, 3: 99-109.
- [8] YUAN Wei, WANG Jianhui, QIU Feng, et al. Robust optimization-based resilient distribution network planning against natural disasters [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2016, 7(6): 2817-2826.
- [9] 郭铭群, 赵鹏飞, 孙珂, 等. $N-K$ 重故障下输储协同规划模型及算法[J]. 电网技术, 2020, 44(11): 4218-4226.
- GUO Mingqun, ZHAO Pengfei, SUN Ke, et al. $N-K$ contingencies considered joint planning of energy storage and transmission expansion problem: model and algorithm [J]. Power System Technology, 2020, 44(11): 4218-4226.
- [10] HUANG Gang, WANG Jianhui, CHEN Chen, et al. Integration of preventive and emergency responses for power grid resilience enhancement [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(6): 4451-4463.
- [11] QIN Zhijun, CHEN Xinwei, HOU Yunhe, et al. Coordination of preventive, emergency and restorative dispatch in extreme weather events [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(4): 2624-2638.
- [12] HUANG Wei, HU Bo, SHAHIDEHPOUR M, et al. Preventive scheduling for reducing the impact of glaze icing on transmission lines [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(2): 1297-1310.
- [13] 姜盛波, 杨军, 王建雄, 等. 基于预防-紧急协调控制的大电网连锁故障防御策略[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(12): 148-154.
- JIANG Shengbo, YANG Jun, WANG Jianxiong, et al. Defense strategy against large power grid cascading failure based on coordinated preventive-emergency control [J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(12): 148-154.
- [14] 杜诗嘉, 郭创新, 俞啸玲, 等. 台风灾害下的弹性配电网研究综述与展望[J]. 电力自动化设备, 2022, 42(2): 176-186, 209.
- DU Shijia, GUO Chuangxin, YU Xiaoling, et al. Review and prospect of resilient distribution network under typhoon disaster [J]. Electric Power Automation Equipment, 2022, 42(2): 176-186, 209.
- [15] 唐文虎, 杨毅豪, 李雅晶, 等. 极端气象灾害下输电系统的弹性评估及其提升措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(7): 2244-2254, 2403.
- TANG Wenhui, YANG Yihao, LI Yajing, et al. Investigation on resilience assessment and enhancement for power transmission systems under extreme meteorological disasters [J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(7): 2244-2254, 2403.
- [16] 陈莹, 王松岩, 陈彬, 等. 台风环境下考虑地理高程信息的输电通道结构失效故障概率评估方法[J]. 电网技术, 2018, 42(7): 2295-2302.
- CHEN Ying, WANG Songyan, CHEN Bin, et al. Evaluation of the failure probability of power transmission corridors during typhoons using digital elevation information [J]. Power System Technology, 2018, 42(7): 2295-2302.
- [17] GU Shanqiang, WANG Jian, WU Min, et al. Study on lightning risk assessment and early warning for UHV DC transmission channel [J]. High Voltage, 2019, 4: 144-150.
- [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] 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.
- [20] VARAIYA P P, WU F F, BIALEK J W. Smart operation of smart grid: risk-limiting dispatch [J]. Proceedings of the IEEE, 2011, 99(1): 40-57.
- [21] 李雅晶. 极端天气事件下电力系统调度及其弹性提升的研究 [D]. 广州: 华南理工大学, 2020.
- LI Yajing. Power system dispatch and its resilience enhancement during extreme weather events [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2020.

作者简介:



刘经纬

刘经纬(1997—),男,硕士研究生,研究方向为电力系统韧性(E-mail: liujingwei19@163.com);

李长城(1989—),男,助理教授,博士,通信作者,主要研究方向为电力系统韧性、保护和控制等(E-mail: lichangcheng@gxu.edu.cn)。

(编辑 李玮)

Preventive and emergency coordinated dispatching of power system under extreme disaster

LIU Jingwei, KANG Haipeng, YAN Wenting, CHEN Zhao, LI Changcheng

(School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: The preventive and emergency coordinated dispatching method of power system considering line failure rate is proposed for extreme disasters. The three-level optimal dispatching model of defense-attack-defense for power system taking the line failure rate into account is established with the objective of minimizing the integrated load loss cost in the preventive and emergency stages. In this regard, the generator output adjustment, the network topology switching and the load shedding in the preventive stage, and the generator re-dispatching and the emergency load shedding in the emergency stage are built as defense resources, whereas the line failure rate is included in the modeling of attack resources. The column and constraint generation algorithm is applied to solve the model, transforming the three-stage model into a two-stage mixed-integer linear programming problem. The effectiveness of the proposed method is verified by case study simulation based on the IEEE-RTS-24 bus system. Results show that the load loss is reduced effectively in the preventive stage when dispatching measures are adopted as the main defense means, meanwhile the preventive cost is reduced effectively and the preventive effect is improved by considering the line failure rate in the optimization process of preventive and emergency coordinated decision.

Key words: power system resilience; extreme disaster; preventive dispatching; emergency dispatching; line failure rate

(上接第 173 页 continued from page 173)

Non-intrusive load monitoring method based on low-frequency power difference characteristic and dual long short-term memory network

ZHOU Buxiang, ZHAO Wenwen, ZANG Tianlei, CHEN Yang, MIN Xinwei

(College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: In order to improve the accuracy and adaptability of event detection and load identification in load monitoring, a non-intrusive load monitoring method based on low-frequency power difference characteristic and dual long short-term memory network is proposed. Based on the low-frequency data, an event detection algorithm is proposed according to the characteristic difference between power fluctuation caused by normal operation of appliances and power jumping caused by event start / stop, which eliminates fluctuation interference through the difference characteristic of power fluctuation in the sliding window, realizes accurate event location and obtains relevant power data. A dual long short-term memory network is established, and the specific discrimination units of different appliances are constructed and trained. An event identification network consisting of each discrimination unit is established, and the events are comprehensively discriminated according to the probabilities outputted by each discrimination unit, and the non-intrusive load monitoring is realized. The effectiveness and accuracy of the proposed method are verified based on the test data sets.

Key words: event detection; non-intrusive load monitoring; long short-term memory network; load identification; low-frequency characteristic

附录 A

子问题包含第二层灾害攻击模型和第三层紧急响应模型，其目标函数与约束具体可表示为：

$$\begin{aligned}
 & \max \sum_{d \in D} c_{d,c} \Delta P_{d,c} \\
 & \text{s.t. } W_{\min} \leq \sum_{(i,j) \in \Omega_b} (-\log_2 p_{ij}) u_{ij,b} \leq W_{\max} \\
 & \min \sum_{d \in D} c_{d,c} \Delta P_{d,c} \\
 & \text{s.t. } \begin{cases} \sum_{g \in G} P_{g,c} - \sum_{(i,j) \in \Omega_b} P_{ij,c} \leq \sum_{d \in D} P_{d,c} - \Delta P_{d,c} \\ \sum_{g \in G} P_{g,c} - \sum_{(i,j) \in \Omega_b} P_{ij,c} \geq \sum_{d \in D} P_{d,c} - \Delta P_{d,c} \\ B_{ij}(\theta_{i,c} - \theta_{j,c}) + P_{ij,c} \leq (1 - u_{ij,c})M \\ B_{ij}(\theta_{i,c} - \theta_{j,c}) + P_{ij,c} \geq (u_{ij,c} - 1)M \\ P_{ij}^{\min} u_{ij,c} \leq P_{ij,c} \leq P_{ij}^{\max} u_{ij,c} \\ 0 \leq \Delta P_{d,c} \leq P_{d,c}^{\max} \\ P_g^{\min} \leq P_{g,c} \leq P_g^{\max} \\ -\Delta P_g^{up} \leq P_{g,a} - P_{g,c} \leq \Delta P_g^{down} \\ u_{ij,c} = u_{ij,a} u_{ij,b} \end{cases}
 \end{aligned}$$

将其写为矩阵形式，可得：

$$\begin{aligned}
 & \max_{r_2} c_3^T x_3 \\
 & \text{s.t. } C \cdot r_2 \leq b_2 \\
 & \min_{x_3, r_3} c_3^T x_3 \\
 & \text{s.t. } E \cdot x_1 + G \cdot r_3 + H \cdot x_3 \leq b_3 \\
 & r_1 \otimes r_2 = r_3
 \end{aligned}$$

式中： \otimes 表示两个等维矩阵对应元素相乘； r_1 、 x_1 、 r_2 、 r_3 、 x_3 分别对应 $u_{ij,a}$ 、 $[P_{g,a}, P_{ij,a}, \theta_{i,a}, \Delta P_{d,a}]$ 、 $u_{ij,b}$ 、 $u_{ij,c}$ 、 $[P_{g,c}, P_{ij,c}, \theta_{i,c}, \Delta P_{d,c}]$ ；常系数矩阵 c_3 、 b_2 、 b_3 分别包含了 $c_{d,c}$ 、 $[W_{\max}, W_{\min}]$ 、 $[M, \Delta P_g^{up}, \Delta P_g^{down}, P_{d,c}^{\max}, P_g^{\max}, P_g^{\min}]$ ； C 、 E 、 G 、 H 分别为与变量矩阵 r_2 、 x_1 、 r_3 、 x_3 相乘的系数矩阵。

由于 0-1 变量 $u_{ij,a}$ 、 $u_{ij,b}$ 在第三层紧急响应中为常量，又根据 $u_{ij,a}u_{ij,b}=u_{ij,c}$ ，第三层紧急响应阶段线路状态 $u_{ij,c}$ 由 $u_{ij,a}$ 、 $u_{ij,b}$ 直接决定，因此在第三层模型中 r_3 可以视为常量，第三层 min 模型为线性规划问题，可以直接将其对偶变化为 max 问题，并且将原始 max-min 问题转化为一个单层 max 问题。对于约束 $E \cdot x_1 + G \cdot r_3 + H \cdot x_3 \leq b_3$ ，引入 λ 作为其对偶变量，且根据对偶定理，有： $\lambda \leq 0$ 。由此可得对偶问题的目标函数应为： $\max (b_3 - E \cdot x_1 - G \cdot r_3)^T \cdot \lambda$ 。由于在设定矩阵 x_3 时，其中的变量 $P_{g,c}$ 、 $P_{ij,c}$ 、 $\theta_{i,c}$ 、 $\Delta P_{d,c}$ 并没有约束，因此可得对偶约束： $H^T \cdot \lambda = c_3$ 。为了方便表示目标函数，引入的中间变量 α 作为目标函数的预估值，因此子问题转化如下：

$$\begin{aligned}
& \max_{r_2, x_3, r_3} \alpha \\
& \text{s.t. } \alpha \leq (\mathbf{b}_3 - \mathbf{E} \cdot \mathbf{x}_1 - \mathbf{G} \cdot \mathbf{r}_3)^\top \cdot \boldsymbol{\lambda} \\
& \quad \mathbf{E} \cdot \mathbf{x}_1 + \mathbf{G} \cdot \mathbf{r}_3 + \mathbf{H} \cdot \mathbf{x}_3 \leq \mathbf{b}_3 \\
& \quad \mathbf{H}^\top \cdot \boldsymbol{\lambda} = \mathbf{c}_3 \\
& \quad \boldsymbol{\lambda} \leq 0 \\
& \quad \mathbf{C} \cdot \mathbf{r}_2 \leq \mathbf{b}_2 \\
& \quad \mathbf{r}_1 \otimes \mathbf{r}_2 = \mathbf{r}_3
\end{aligned}$$

至此，完成了子问题由双层 max-min 问题向单层 max 问题的转化。该问题为一个 MILP 问题，可以通过 Gurobi 求解器直接进行求解。

附录 B

表 B1 风险线路故障率

Table B1 Risk line failure rate

线路	故障率	线路	故障率
5	0.6579	17	0.3035
9	0.1148	18	0.0519
10	0.8396	19	0.0490
11	0.1323	20	0.0186
12	0.2162	21	0.0308
13	0.2592	23	0.0053
15	0.2162	25	0.0250
16	0.0651	26	0.0097