

# 考虑次生故障差异化影响下韧性主动提升的 输电系统网架重构策略

李少岩<sup>1</sup>, 赵汉广<sup>1</sup>, 顾雪平<sup>1</sup>, 何剑<sup>2</sup>, 屠竞哲<sup>2</sup>, 冀鲁豫<sup>2</sup>

- 华北电力大学电气与电子工程学院, 河北省保定市 071003;
- 中国电力科学研究院有限公司, 北京市海淀区 100192)

## A Novel Transmission Network Reconfiguration Strategy Considering Active Improvement of System Resilience Under the Differential Influence of Contingencies

LI Shaoyan<sup>1</sup>, ZHAO Hanguang<sup>1</sup>, GU Xueping<sup>1</sup>, HE Jian<sup>2</sup>, TU Jingzhe<sup>2</sup>, JI Luyu<sup>2</sup>

- School of Electrical & Electronic Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, Hebei Province, China;
- China Electric Power Research Institute, Haidian District, Beijing 100192, China)

**ABSTRACT:** In recent years, the green-oriented transition of energy has accelerated, extreme events have occurred frequently, and the international situation has been unstable. With the coexistence of conventional and unconventional security risks, the risk of power system outages increases. A robust and reliable network reconfiguration strategy is important to prevent the recurrence of collapse during restoration. Secondary faults or contingencies are rarely considered in the existing research on power system restoration. In view of that, this paper proposes a novel network reconfiguration strategy with active improvement of system resilience that considers the differential impact of contingencies. First, the necessity of considering the impact of contingencies in transmission network reconfiguration is discussed. Then, based on Partitioned Multi-Objective Risk Method (PMRM), a novel resilience index is proposed to differentiate contingencies and highlight the impact of high-risk failures. Then, a global optimization model for network reconfiguration considering the active improvement of resilience is established, which improves the resistance to high-risk contingencies. In order to improve the solution efficiency, a practical solution strategy based on the window rolling mechanism is proposed, which can provide a network reconfiguration scheme that considers both rapidity and

robustness. The effectiveness of proposed method is verified by the IEEE 39-bus and IEEE 118-bus system.

**KEY WORDS:** blackout; power system resilience; network reconfiguration; partitioned multi-objective risk method; contingency

**摘要:** 近年来,我国能源电力加速转型,极端自然灾害频发,国际形势不稳定,使得常规安全风险与非常规安全风险交织,大停电风险有增加的趋势。稳健可靠的网架重构方案对防止恢复中再次发生系统崩溃具有重要意义,针对当前研究中未有效计及恢复中次生故障的不足,该文提出一种考虑次生故障差异化影响下系统韧性主动提升的网架重构策略。首先,讨论在网架重构恢复方案中考虑次生故障影响的必要性;然后,基于分割多目标风险分析方法提出一种系统韧性指标,旨在差异化处理次生故障并突出高风险故障对恢复过程的影响;进一步建立考虑韧性主动提升的网架重构全局优化模型,以增强系统对高风险故障的抵御能力。为提高模型的求解效率,提出一种基于窗口滚动机制的求解策略,可给出兼顾快速性与稳健性的网架重构方案。最后,采用新英格兰10机39节点系统和IEEE 118节点系统验证所提出方法的有效性。

**关键词:** 大停电; 电力系统韧性; 网架重构; 分割多目标风险分析法; 次生故障

## 0 引言

在“碳达峰、碳中和”战略指引下,我国能源电力加速转型,新能源占比日益提高,新形态电力系统安全稳定呈现新的复杂特征<sup>[1]</sup>。在极端自然灾害、地缘政治以及突发公共事件等复杂外部因素的

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(52107092); 河北省自然科学基金项目(E2019502195); 中央高校基本科研业务费专项基金项目(2021MS063)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52107092); Natural Science Foundation of Hebei Province (E2019502195); Fundamental Research Funds for the Central Universities (2021MS063).

影响下，电力系统常规安全风险与非常规安全风险交织，发生大停电事故的风险有增大的可能<sup>[2]</sup>。保障能源安全，需要坚持底线思维，电力系统必须做好随时应对大停电事故这类“黑天鹅”事件的准备，制定和完善快速、稳健的系统停电恢复方案，提升系统安全性与韧性，已成为重大和紧迫的国家需求<sup>[3]</sup>。

作为大停电后系统恢复承前启后的关键环节，网架重构阶段的主要任务是尽快为不具备自启动能力的主力机组以及重要负荷建立送电路径，建立相对稳定的网架，使系统逐步过渡到负荷全面恢复阶段<sup>[4]</sup>。国内外学者对这一阶段的系统恢复建模与决策优化等问题开展了大量研究<sup>[5]</sup>，根据建模思路和侧重点可大致分为骨干网架确定<sup>[6]</sup>、机组恢复顺序优化<sup>[7]</sup>、分时段重构优化<sup>[8]</sup>、送电路径优化<sup>[9]</sup>、分区重构<sup>[10-11]</sup>等研究。现有研究主要是以主力机组或重要节点恢复送电为驱动的决策优化，主要关注的是元件完全可用情况下网架重构过程的快速性。文献<sup>[12-13]</sup>虽考虑了元件故障的情况，但均是针对待恢复元件投运风险的考量，并未计及已恢复元件再次故障对重构过程的影响，即默认了元件一旦恢复，均转变为“绝对可靠”。然而这种“投运成功后再无故障”的假设显然是不合理的，特别是对于耗时较长的大规模电力系统停电恢复过程。文献<sup>[14]</sup>提出了一种自适应恢复决策支持系统(adaptive restoration decision support system, RDSS)，可以实现机组再次跳闸后恢复方案的自适应调整。然而，文献<sup>[14]</sup>没有考虑通过网架重构的预优化以提高对意外事件的抵御能力的重要性和可能性。实际上，2018年“3.21”巴西大停电分析报告指出，已恢复线路和机组的再次故障导致系统大量失负荷甚至再次解列，很大程度上延缓了系统的恢复进程<sup>[15]</sup>。这充分说明，在复杂网架重构过程中若能使系统抗扰性持续保持较高水平，对实现安全、快速的恢复过程具有重要意义，也亟待进一步研究。

随着全球范围内极端灾害威胁的增加，电力系统在极端灾害下的应对措施已成为近些年国内外学者关注的热点问题<sup>[16]</sup>。国内学者将极端事件下电力系统应具有 resilience 特性译成“恢复力”、“韧性”或“弹性”，形象地反映出系统对小概率-高损失事件的预防、抵御以及快速恢复负荷的能力<sup>[17-18]</sup>。同时也有学者对“韧性”、“弹性”等概念在我国电力系统的内涵与特征进行了富有意义的

探讨与展望<sup>[19-20]</sup>。然而，当前国内外学者对恢复力提升的研究主要集中于配电网<sup>[21]</sup>，而对输电网的研究相对较少<sup>[22]</sup>，并且在已有研究中，对极端事件发生后韧性系统响应的关键特征定义大多仅为“快速恢复”，即利用尚能运行的设备尽快完成系统供电恢复。但极端事件发生后(如极端气象、地震等灾害)常发生次生气象或地质灾害，输电线路分布广泛且常常暴露在外部环境中，因此在极端事件的后续影响下，输电线路发生意外的概率远高于正常情况。已有研究中，缺乏对已恢复元件再次故障的考量，恢复过程中系统可能由于抗扰能力不足而再次崩溃。可见，在评估恢复阶段中系统韧性水平时，不仅需要考虑恢复进程的快速性，还需充分计及已恢复元件再故障为代表的系统安全风险。

针对已有研究的不足，本文将电力系统韧性<sup>[18,23]</sup>的概念应用于电力系统在恢复过程中抗扰能力的评估，并基于新提出的韧性评价指标实现考虑系统韧性主动提升的网架重构决策。首先，基于分割多目标风险分析方法<sup>[24-26]</sup>(partitioned multi-objective risk method, PMRM)，提出一种新的电力系统韧性指标，以表征恢复过程中系统耐受次生故障而不引起过严重后果的能力。之后，提出考虑韧性主动提升的网架重构全局优化策略，增强系统抵御高风险次生故障的能力。进一步，建立基于窗口滚动机制的实用求解模型，大大提高了模型的求解速度。新英格兰 10 机 39 节点系统算例和 IEEE 118 节点算例验证了本文所提出指标、模型和算法的有效性。

## 1 考虑次生故障差异化影响的系统韧性定量表征

### 1.1 大停电后系统恢复中考虑次生故障的必要性

一般而言，极端事件下韧性电力系统的响应可分为以下几个阶段：准备与预防、抵御与吸收、适应与准备、快速恢复<sup>[18]</sup>。如图 1 中蓝线所示。

当前，已有输电网“恢复”阶段的研究主要集中于如何提高恢复速度，较少有关于已恢复设备再故障对系统可靠恢复影响的讨论。然而，极端事件下电力系统恢复的稳健性同样至关重要。输电元件分布广泛且暴露在外部环境中，系统恢复中输电元件发生故障的概率较高。此外，由于恢复状态是一种极特殊的系统运行状态，特别是网架重构阶段输电网结构不断调整，控制和保护装置的参数不匹配

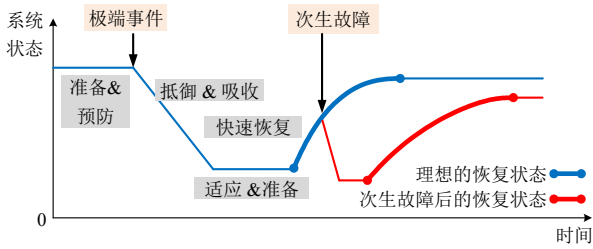


图1 极端事件下电力系统的响应特性  
Fig. 1 Diagram of power system response characteristics under extreme events

或不协调都可能导致线路等元件再次跳闸。

假设网架重构阶段恢复控制的优化目标仅是最小化恢复时间，则恢复后的网络将呈现冗余度和抗扰性较低的结构形态<sup>[4]</sup>。此时，若极端事件后次生灾害导致某些关键输电线路或机组出现故障，系统会因抗扰动能力不足而再次出现性能大幅度降低的情况，如图1中红线所示。因次生故障而引起停电区域的再次恢复可能会需要更长时间，极大地延缓恢复进程，给社会和经济带来负面影响。因此，在网架重构方案的优化中，不仅要考虑恢复的快速性，还要考虑恢复过程中系统应对次生故障的能力。实际上，这种抵御极端事件后续影响的能力就是电力系统恢复过程中的一个具体而有意义的韧性指标。在网架重构过程中，适时地调整网架结构，加强系统对某些高损失次生故障的抵御能力，合理权衡系统韧性与恢复速度之间的关系，有利于系统在极端事件背景下的稳健快速恢复。

### 1.2 次生灾害预想故障集的建立

对于大型输电系统，恢复过程中的次生故障数量和种类非常多，不同的次生故障会对系统造成不同的影响。而系统不可能防范所有的次生故障，也不可能将所有次生故障的影响都降低为零，并且这也不利于系统恢复的快速性。因此，本文从网架重构的实际情况和需求出发，提出系统“韧性”的特征在于停电恢复过程中能够耐受部分高损失预想故障扰动，在其影响下系统整体性能可能稍有降低，但诸如引起再次系统级停电的预想故障扰动极少。机组和线路的恢复是网架重构过程的重要环节，线路决定了系统的网络拓扑结构，关键线路的故障可能会造成系统的严重损失。因此，作为前期探索，本文以断线故障作为重点研究次生故障影响下的重构决策优化。

极端事件后系统很可能处于恶劣的工况或环境中，并由此发生单一故障或多种故障。通过对运

行工况的综合评估，并根据线路及杆塔在恶劣工况下设防标准(地震、台风等)，可得到线路在外部因素作用下的停运概率。同时，受内部因素的影响，线路的停运概率也与电网的实时运行状态有关<sup>[27]</sup>。在内外部因素的共同作用下，可初步确定单一元件的故障概率。并且极端事件具有时空相关性，在极端事件的后续影响下，空间距离或电气距离较近的若干线路可能发生多重故障<sup>[28]</sup>。

任何线路都有一定的故障概率，组合起来所形成的预想故障集难以穷举，概率极小的组合故障场景理应被筛除。特别是，网架重构中系统可调动的恢复资源决定了系统不可能防范所有的次生故障，韧性电力系统的内涵在于着重抵御有一定概率值的高风险故障。因此定义故障概率阈值  $F_{TH}$  并对预想故障进行筛选，将故障概率大于阈值  $F_{TH}$  的次生故障纳入预想故障集  $K$  中。

### 1.3 基于 PMRM 的系统韧性定量表征

PMRM 是一种风险分析方法，它将损失划分到若干不同的风险范围，并以条件期望突出高损失事件的影响。本文引入 PMRM 对网架重构中系统状态进行风险分析和韧性评估。如图2所示，本文将负荷损失划分到低、中、高风险区间，并认为其中造成中、高损失的次生故障是系统的主要风险压力。通过优化网架重构恢复方案，减小中、高损失次生故障的影响，将保障系统实现稳健的恢复过程，即图2所示的韧性主动提升策略。

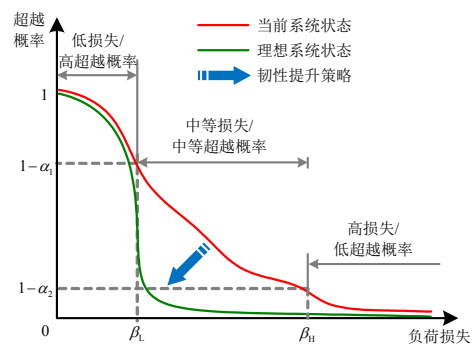


图2 PMRM 法示意图

Fig. 2 Schematic diagram of PMRM

在 PMRM 中经常用超越概率  $e_x$  来衡量系统损失大于某一给定值  $\beta$  的所有事件的概率之和。在图2中，损失分割点  $\beta_L$ 、 $\beta_H$  ( $\beta_L < \beta_H$ ) 将系统的负荷损失划分到  $[0, \beta_L)$ 、 $[\beta_L, \beta_H)$ 、 $[\beta_H, +\infty)$  3 个不同的风险区间。引入 3 个条件风险函数  $R_L$ 、 $R_M$  和  $R_H$ ，分别表示低、中、高损失的条件风险，其计算公式如式(1)–(3)所示：

$$R_H = E(P_{d,w}^L | P_{d,w}^L \geq \beta_H) = \frac{\sum_{w \in K} P_{d,w}^L F_w z_{H,w}}{\sum_{w \in K} F_w z_{H,w}} \quad (1)$$

$$R_M = E(P_{d,w}^L | \beta_L \leq P_{d,w}^L < \beta_H) = \frac{\sum_{w \in K} P_{d,w}^L F_w z_{M,w}}{\sum_{w \in K} F_w z_{M,w}} \quad (2)$$

$$R_L = E(P_{d,w}^L | P_{d,w}^L < \beta_L) = \frac{\sum_{w \in K} P_{d,w}^L F_w z_{L,w}}{\sum_{w \in K} F_w z_{L,w}} \quad (3)$$

式中： $P_{d,w}^L$ 表示在故障场景 $\omega$ 下系统的的负荷损失； $F_w$ 表示故障场景 $w$ 的发生概率； $K$ 为故障场景集； $z_{H,w}$ 、 $z_{M,w}$ 、 $z_{L,w}$ 分别为高、中、低风险标志因子，用来划分事件的风险类型，其计算公式如式(4)—(6)所示：

$$z_{H,w} = \begin{cases} 1, & P_{d,w}^L \geq \beta_H \\ 0, & P_{d,w}^L < \beta_H \end{cases}, w \in K \quad (4)$$

$$z_{M,w} = \begin{cases} 1, & \beta_L \leq P_{d,w}^L < \beta_H \\ 0, & P_{d,w}^L < \beta_L \text{ 或 } P_{d,w}^L \geq \beta_H \end{cases}, w \in K \quad (5)$$

$$z_{L,w} = \begin{cases} 1, & P_{d,w}^L < \beta_L \\ 0, & P_{d,w}^L \geq \beta_L \end{cases}, w \in K \quad (6)$$

系统恢复过程中可能会有不同严重程度的次生故障发生，较小的故障损失可能在系统可承受范围之内，而较大程度的损失可能使原本就处于低冗余恢复态的系统再次崩溃等，大大延误系统恢复进程。提升系统的韧性水平，也就是增强系统对高严重后果故障的抵御能力，提高系统在次生故障发生后的“存活”能力。为突出高风险次生故障的重要性，引入高风险紧迫性因子 $\gamma(0.5 < \gamma < 1)$ ，并对不同严重程度故障差异化对待。韧性水平指标 $R$ 如式(7)所示， $R$ 的值越小，系统的韧性水平就越高。

$$R = \gamma R_H + (1 - \gamma) R_M \quad (7)$$

## 2 考虑韧性主动提升的网架重构全局优化模型

前已述及，已有网架重构研究主要关注恢复的快速性，未合理计及已恢复元件再次故障对系统可靠恢复的影响。针对该不足，本文在网架重构过程中考虑次生故障的差异化影响，在所提韧性指标的指引下优化恢复方案，以期实现兼顾快速性和稳健性的网架重构过程。

### 2.1 全局目标函数

网架重构阶段是一个耗时较长的连续过程，为

便于研究，一般可以将其离散为多时步模型。从恢复快速性出发，网架重构方案优化往往考虑机组总出力最大化<sup>[29]</sup>。在此基础上，为提升系统恢复过程中的韧性，提高系统对次生故障的抵御能力，在优化目标中引入系统韧性指标 $R$ 。则考虑韧性主动提升的网架重构决策优化目标函数为

$$f = \sum_{g \in (G - G_{BS}), k \in W} P_{G,gk} \Delta T - \sum_{k \in W} \alpha_r R_k \quad (8)$$

式中： $P_{G,gk}$ 为机组 $g$ 在第 $k$ 时步的出力值； $R_k$ 为系统在第 $k$ 时步的韧性水平指标； $\alpha_g$ 为机组全局出力权重系数； $\alpha_r$ 为风险权重系数； $G$ 为所有机组的集合； $G_{BS}$ 为黑启动机组的集合； $W$ 为整个网架重构过程的时步集合( $k \in W$ )。

目标函数的第一项为最大化机组在网架重构过程中发出电能的总量，使系统中的待启动机组尽快恢复出力，为整个系统的恢复奠定基础，加速恢复进程；第二项为最大化系统韧性指标，使得网架重构恢复方案对高损失次生故障具有一定的抵御能力，保证恢复过程的稳健性，提高系统的抗打击能力。

### 2.2 约束条件

网架重构方案的优化应满足一定的约束条件，主要包括潮流约束、系统连通约束、机组启动约束、线路节点映射约束、线路投运数约束以及时步边界约束等。这些约束条件将在下一节中具体展开。

### 2.3 模型分析

在全局目标函数的指引下及各类约束条件的限制下，韧性主动提升策略充分考虑了未来各时步可能发生的次生故障，将故障影响划分到不同风险区间，并着重针对系统难以承受的高风险故障，在次生故障发生前优化恢复方案。

考虑韧性主动提升的全局优化在恢复过程中兼顾快速性与稳健性，并得到全局最优方案。但网架重构阶段是一个多时段的复杂过程，全局目标函数及约束条件涉及所有时步的决策变量、预想故障场景，使得求解空间中的决策域过大，模型直接求解困难，难以在实际电网中应用。

## 3 网架重构过程中基于滚动机制的韧性主动提升优化策略

针对 2 节考虑韧性主动提升的网架重构全局优化模型难以直接求解的不足，本节提出一种基于窗口滚动机制的实用模型及求解框架，在缩小求解空间的同时，充分考虑了未来可能发生的高风险次

生故障,未雨绸缪地优化系统恢复方案,实现稳健的重构过程。

### 3.1 网架重构决策的窗口滚动机制

如图3所示,设 $k$ 为时步编号, $m$ 为滚动窗口编号, $\Delta T$ 为一个时步的长度, $n$ 为整个网架重构过程的总时步数, $W_m$ 为第 $m$ 个滚动窗口下的时步集合,设 $W_m$ 包含 $O_s$ 个时步(图中 $O_s=4$ )。图中的“预想故障集”代表作用于某一时步的可能的次生故障。滚动机制首先指定一个固定的滚动窗口,在该窗口内建立并求解短期优化模型,然后不断更新窗口边界并移动滚动窗口,直至网架重构过程全部完成。以第 $m$ 滚动窗口 $W_m$ 为例,考虑到次生故障对第 $k$ 时步( $k=m$ )的影响,短期优化模型制定了滚动窗口下所有时步的恢复方案,即 $k \in [m, m+O_s-1]$ ,但

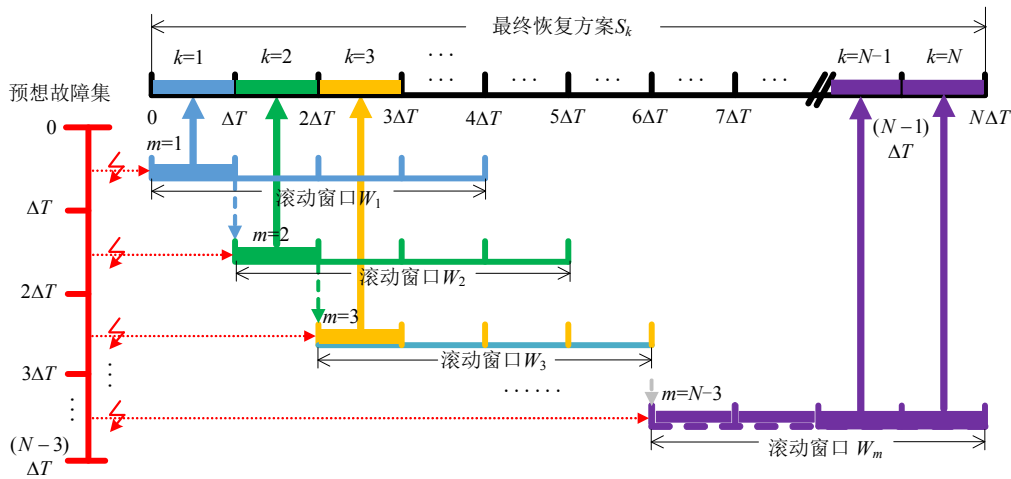


图3 基于滚动机制的韧性主动提升优化模型

Fig. 3 Optimization model considering active improvement of system resilience based on rolling mechanism

### 3.2 滚动窗口内网架重构方案优化模型

依据窗口滚动机制,整体的网架重构恢复方案由若干个窗口滚动优化结果组成。不失一般性地,本节首先建立第 $m$ 个滚动窗口 $W_m$ 下考虑韧性主动提升的网架重构优化模型。

#### 3.2.1 目标函数

在2.1节全局目标函数的基础上,结合窗口滚动机制,建立窗口目标函数,如式(9)所示:

$$f = \alpha_g \sum_{g \in (G-G_{BS}), k \in W} P_{G,gk} \Delta T + \sum_{g \in (G-G_{BS}), k \in W_m} P_{G,gk} \Delta T - \alpha_r R \quad (9)$$

式中: $\alpha_g$ 为全局电量权重系数; $\alpha_r$ 为变权重风险系数。式中第1项为系统的全局发电量,可保证系统在窗口滚动优化过程中兼具全局性;式中第2项为机组在窗口期 $W_m$ 内发出电能的总量;第3项为系统的韧性指标,其中 $\alpha_r$ 为变权重系数,用以协

仅取滚动窗口内的第一个时步( $k=m$ )的优化结果作为网架重构中第 $k$ 时步的最终恢复方案 $S_k$ ,并将其执行后的系统状态作为下一个滚动窗口 $W_{m+1}$ 的初始边界条件。对于其他时步,同样依据窗口滚动机制优化恢复方案,并不断更新边界条件,直至网架重构过程全部完成。极端事件后的恢复过程易受次生故障的影响,且设备元件的可用性会随时间变化。采用全局恢复方案计算耗时长,且恢复过程中的故障将会中断恢复方案并改变恢复条件,需要重新进行长时间计算。在极端事件背景下,全局恢复方案不再适用。而窗口滚动机制紧密适应极端事件下的恢复过程,充分考虑了故障时设备的可用性,而且采用短期目标,既避免了计算资源的浪费,又具有一定的全局性。

调不同阶段系统恢复的快速性与稳健性, $\alpha_{r,k}$ 越小,更重视恢复过程的快速性,反之更重视稳健性。变权重系数 $\alpha_{r,k}$ 的公式如下:

$$\alpha_{r,k} = (\sum_{i \in N} P_{d,ik}) / (P_{d,sum}), \quad k = m \quad (10)$$

式中: $P_{d,ik}$ 表示节点 $i$ 在第 $k$ 时步接入的负荷量; $P_{d,sum}$ 表示系统的负荷总量。

在目标函数的驱动下,系统会兼顾快速性和稳健性,在对未来可能发生的次生故障的判断中,优化并调整网架结构,提高系统面对高风险事件时的“存活”能力。

#### 3.2.2 约束条件

网架重构方案的优化应满足一定的约束条件,主要包括机组启动约束、潮流约束、系统连通约束等。

##### 1) 机组启动约束。

最大化机组输出功率是网架重构的重要目标之一, 机组启动需要满足一系列约束条件, 如启动功率约束、冷热启动约束等<sup>[30]</sup>, 具体公式在附录 A 中展示。

2) 潮流约束。

$$\sum_{g \in G_i} P_{G, gk} - \sum_{j(i, j, c) \in L} P_{ijck} + \sum_{j(j, i, c) \in L} P_{jick} = P_{d, ik} + \sum_{g \in G_i} C_{gk} P_{R, g}, \quad \forall k \in W_m, i \in N \quad (11)$$

$$P_{ijck} \leq \frac{1}{x_{ijc}} \theta_{ijk} + (1 - z_{ijck}) M, \quad \forall k \in W_m, (i, j, c) \in L \quad (12)$$

$$P_{ijck} \geq \frac{1}{x_{ijc}} \theta_{ijk} - (1 - z_{ijck}) M, \quad \forall k \in W_m, (i, j, c) \in L \quad (13)$$

$$-z_{ijck} P_{ijc}^{\max} \leq P_{ijck} \leq z_{ijck} P_{ijc}^{\max}, \quad \forall k \in W_m, (i, j, c) \in L \quad (14)$$

$$-\frac{\pi}{3} \leq \theta_{ijk} \leq \frac{\pi}{3}, \quad \forall k \in W_m, (i, j) \in L_c \quad (15)$$

式中:  $P_{ijck}$  表示线路  $i-j-c$  在第  $k$  时步的有功潮流值;  $P_{d, ik}$  表示节点  $i$  在第  $k$  时步接入的负荷量, 并且其值小于节点  $i$  的最大负荷量  $P_{dmax, i}$ ; 布尔变量  $C_{gk}$  表示机组  $g$  在第  $k$  时步的状态, 启动为 1, 停机为 0;  $P_{R, g}$  表示机组  $g$  的启动功率;  $x_{ijc}$  代表线路  $i-j-c$  的电抗值;  $\theta_{ijk}$  表示节点  $i$  与节点  $j$  在第  $k$  时步的相位差; 布尔变量  $z_{ijck}$  表示在第  $k$  时步线路  $i-j-c$  是否投运, 投运为 1, 否则为 0;  $P_{ijc}^{\max}$  代表线路  $i-j-c$  的最大潮流极限值;  $G_i$  为节点  $i$  上所接机组的集合;  $N$  为所有节点的集合;  $L_c$  为线路通路集合;  $M$  为数值很大的常数。

式(11)是节点的功率平衡约束, 保证各个节点上的有功功率平衡。式(12)、(13)是线性化的直流潮流方程<sup>[31-32]</sup>, 当线路  $i-j-c$  投运时,  $z_{ijck}$  为 1, 有功潮流为节点  $i, j$  之间的相位差与电抗值的比值; 当线路  $i-j-c$  不投运时,  $z_{ijck}$  为 0, 式(12)和(13)被松弛, 有功潮流由式(14)决定, 即为 0。式(14)为线路功率传输限值约束, 防止线路过载。式(15)为节点相角差约束。

3) 系统连通性约束。

在网架重构过程中, 待启动机组需要从已启动机组获得启动功率, 因此需要保证已启动机组和待启动机组的节点在拓扑结构上是连通的。本文借鉴文献[33]中基于网络流理论的连通性约束建立方法, 将系统视为一个单源多汇网络, 取系统中的黑启动机组节点为源点, 其余已启动机组和待启动机组为汇点, 剩余节点为中间节点, 保证源点、汇点

及中间节点的流量平衡以及线路上的流量不超限。

4) 线路、节点映射约束。

$$v_{ik} \leq M \left( \sum_{j(i, j, c)} z_{ijck} + \sum_{j(j, i, c)} z_{jick} \right), \quad \forall i \in N, k \in W_m \quad (16)$$

$$v_{ik} \geq \frac{1}{M} \left( \sum_{j(i, j, c)} z_{ijck} + \sum_{j(j, i, c)} z_{jick} \right), \quad \forall i \in N, k \in W_m \quad (17)$$

式中  $v_{ik}$  为在第  $k$  时步已恢复的节点。

式(16)与式(17)共同构成线路和节点的映射关系, 与节点  $i$  相连的任意一条线路投运时节点  $i$  将带电, 与节点  $i$  相连的所有线路均未投运时节点  $i$  将不带电。

5) 线路投运数约束。

$$\alpha_1 [(z_{ijc, k} - v_{ijc, k} + 1) - (z_{ijc, k-1} - v_{ijc, k-1} + 1)] + (z_{ijc, k} - z_{ijc, k-1}) \leq z_{\max}, \quad \forall i \in N, k \in W_m \quad (18)$$

式(18)为线路投运数约束, 前面一项为新增环路数<sup>[29]</sup>, 后面一项为新增线路数。在一个恢复时步内, 操作员能完成的操作数是有限的, 并且考虑到合环操作难度大、风险高, 需要较长时间完成。其中  $\alpha_1$  为合环操作权重, 且  $\alpha_1 > 1$ ;  $z_{\max}$  为操作员在一个时步的操作数上限。

6) 时步边界约束。

$$z_{ijck} - z_{ijc, k-1} \geq 0, \quad \forall (i, j, c) \in L, k \in W_m \quad (19)$$

$$P_{d, ik} - P_{d, i, k-1} \geq 0, \quad \forall (i, j, c) \in L, k \in W_m \quad (20)$$

式(19)为线路边界约束, 式(20)为负荷边界约束, 一般认为系统在恢复过程中, 已恢复的线路和负荷不会在下一时步主动停运。

### 3.3 系统韧性测度与决策变量的关联建模

本文以失负荷量的大小刻画不同次生故障对系统的影响。在预想故障集的作用下, 系统为满足一系列安全运行约束, 需要适当地切负荷。本节建立滚动窗口  $W_m$  下系统韧性测度与决策变量的关联模型。

建立关联模型主要是为了计算系统在预想故障下满足运行约束时的失负荷量, 进一步得到系统在当前网架结构下的韧性指标, 用以指导系统整体的恢复进程。相应的约束条件如下:

1) 潮流约束。

$$\sum_{g \in G_i} P_{gw}^F - \sum_{j(i, j, c) \in L} P_{jcw}^F + \sum_{j(j, i, c) \in L} P_{jicw}^F = P_{d, iw}^F + \sum_{g \in G_i} C_{g, w}^F P_{R, g}, \quad \forall i \in N, w \in K \quad (21)$$

$$P_{jcw}^F \leq \frac{1}{x_{ijc}} \theta_{ijw}^F + [1 - z_{ijc} (1 - e_{ijcw})] M, \quad \forall (i, j, c) \in L, w \in K \quad (22)$$

$$P_{ijcw}^F \geq \frac{1}{x_{ijc}} \theta_{ijw}^F [1 - z_{ijc}(1 - e_{ijcw})] M, \forall (i, j, c) \in L, w \in K \quad (23)$$

$$-z_{ijc}(1 - e_{ijcw}) P_{ijc}^{\max} \leq P_{ijcw}^F \leq z_{ijc}(1 - e_{ijcw}) P_{ijc}^{\max}, \quad \forall (i, j, c) \in L, w \in K \quad (24)$$

$$-\frac{\pi}{3} \leq \theta_{ijw}^F \leq \frac{\pi}{3}, \quad \forall (i, j) \in L_c, w \in K \quad (25)$$

$$P_{G,gk} - K_{p,g}^{\text{down}} \Delta T \leq P_{gw}^F \leq P_{G,gk} + K_{p,g}^{\text{up}} \Delta T, \quad \forall g \in G, w \in K, k = m \quad (26)$$

$$C_{gw}^F \leq C_{gk}, \quad \forall g \in G, w \in K, k = m \quad (27)$$

$$P_{d,iw}^F = e_{d,iw} P_{d,ik}, \quad \forall i \in N, w \in K, k = m \quad (28)$$

式中： $P_{gw}^F$ 表示在故障场景 $w$ 下机组 $g$ 的有功出力值； $P_{ijcw}^F$ 表示在故障场景 $w$ 下线路 $i-j-c$ 的有功潮流值； $P_{d,iw}^F$ 表示在故障场景 $w$ 下节点 $i$ 的负荷值；布尔变量 $C_{g,w}^F$ 表示在故障场景 $w$ 下机组 $g$ 的状态； $\theta_{ijw}^F$ 表示在故障场景 $w$ 下节点 $ij$ 的相角差； $z_{ijc}$ 为第 $m$ 时步线路 $i-j-c$ 的恢复状态；布尔变量 $e_{d,iw}$ 表示节点 $i$ 在故障场景 $w$ 下是否切负荷，切负荷为0，否则为1。

式(21)—(25)为系统在故障态下的潮流约束，与式(10)—(14)类似，是为了保证各节点有功功率平衡、各线路的功率传输不超过限值、各节点相角差不超过限值。 $e_{ijcw}$ 表示在预想故障集 $K$ 的作用下线路 $i-j-c$ 的状态。当故障场景 $w$ 使某条已恢复线路 $i-j-c$ 停运时， $e_{ijcw}$ 为1，则 $z_{ijc}(1 - e_{ijcw})$ 为0，根据式(22)—(24)，线路上的有功功率为0。式(26)—(28)为故障边界条件，式(26)表示故障后机组的出力调整，需满足上下爬坡约束，其中 $K_{p,g}^{\text{up}}$ 和 $K_{p,g}^{\text{down}}$ 分别为机组 $g$ 的上下爬坡率极限；式(27)表示处于启动状态的机组可能因次生故障而停运；式(28)表示已恢复的负荷可能因次生故障而切除。

2) 失负荷约束。

$$P_{d,iw}^L = P_{d,ik} - P_{d,iw}^F, \quad \forall i \in N, w \in K, k = m \quad (29)$$

$$P_{d,w}^L = \sum_{i \in N} P_{d,iw}^L, \quad w \in K \quad (30)$$

式中： $P_{d,iw}^L$ 为节点 $i$ 在故障场景 $w$ 下损失的负荷量； $P_{d,w}^L$ 为全系统在故障场景 $w$ 下损失的负荷量之和。

3) PMRM 韧性指标。

上述潮流约束及失负荷约束建立了预想故障作用下的失负荷模型，结合式(1)—(7)将故障场景按失负荷量的大小划分到不同风险区，进而得到系统当前时步的韧性指标 $R$ 。

至此建立了第 $m$ 个滚动窗口 $W_m$ 下的系统韧性测度与决策变量的关联模型。

### 3.4 考虑韧性主动提升的网架重构优化模型求解

3.1—3.3节建立了滚动窗口 $W_m$ 下考虑韧性主动提升的网架重构优化模型，该模型为混合整数规划(mixed-integer programming, MIP)模型，可以简化描述为

$$\begin{cases} \max f = \alpha_g \sum_{g \in (G - G_{ss}), k \in W_m} P_{G,gk} \Delta T + \sum_{g \in (G - G_{ss}), k \in W_m} P_{G,gk} \Delta T - a_{r,k} R \\ \text{s.t.} \begin{cases} \text{式(11)-(20)} \leftarrow \text{潮流约束、连通性约束等} \\ \text{式(21)-(30)} \leftarrow \text{故障场景约束} \\ \text{式(1)-(7)} \leftarrow \text{PMRM韧性指标约束} \end{cases} \end{cases} \quad (31)$$

上述模型制定了滚动窗口 $W_m$ 下的恢复方案，在此基础上进行交流潮流约束校核，若校核不通过，则添加不可行割并重新进行恢复方案的调整<sup>[29]</sup>，直至校核通过，并确定滚动窗口 $W_m$ 下最终的恢复方案。将第 $k$ 时步( $k=m$ )的优化结果作为网架重构的最终恢复方案 $S_k$ ，并更新下一个滚动窗口 $W_{m+1}$ 的初始边界条件。其余时步按同样步骤，优化并确定恢复方案，不断更新边界条件，直至网架重构过程全部完成。考虑韧性主动提升的网架重构优化策略总体框架如图4所示。

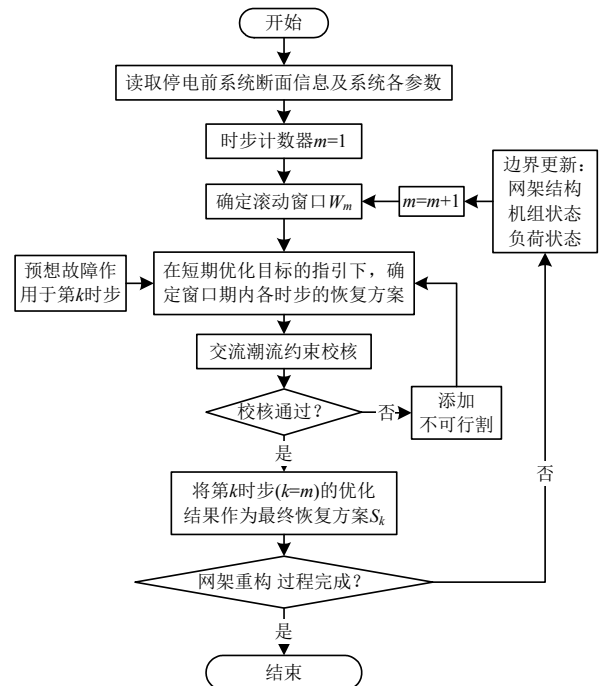


图4 考虑韧性主动提升的网架重构优化策略流程图

Fig. 4 Flowchart of optimization strategy for network reconfiguration considering the active improvement of resilience

### 4 算例分析

#### 4.1 算例 1：新英格兰 10 机 39 节点系统算例

本文首先采用新英格兰 10 机 39 节点系统为算例验证所提考虑韧性主动提升的网架重构策略的有效性。相关参数设置如下： $\Delta T=0.25\text{ h}$ ， $\beta_L=0.7\text{ MW}$ ， $\beta_H=2.5\text{ MW}$ ， $\alpha_g=0.01$ ， $\alpha_l=2$ ， $z_{\max}=8$ 。机组的相关参数设置如附表 B1 所示。假设节点 30 接入装机容量为 300 MW 的黑启动机组，并且在 0h 时刻自启动成功。以系统全部主力机组启动并网发电、系统恢复负荷量达到系统总负荷量的 70% 作为网架重构阶段完成的标志。采用 GAMS 建模求解，工程 MIP 求解器设定为 CPLEX(并设置为 4 线程)，NLP(nonlinear programming) 求解器设定为 KNITRO。计算平台为 PC 机，配置为 3.9 GHz AMD R5 CPU 和 16 GB RAM。

采用式(31)及图 4 所示的基于窗口滚动机制的优化模型及求解方法，即可得到各时段考虑韧性主动提升的网架重构方案  $S_k$ 。同时，为说明韧性主动提升恢复方法的有效性，根据是否考虑系统韧性以及是否采用窗口滚动优化策略，本文另外制定了两种对比方案。为便于对比，将上述确定的方案  $S_k$  命名为方案一。方案二和方案三为对比方案，其中方案二为不考虑系统韧性的窗口滚动优化恢复方案，其目标函数为式(9)删去韧性指标项。方案三为仅考虑机组总出力最大化的全局优化恢复方案，其优化目标为机组出力最大化(式(8)删去韧性指标项)，采用分时段全局优化思路<sup>[8]</sup>，并以数学规划方法建模求解。需要指出的是，考虑系统韧性主动提升的全局优化恢复方案由于模型中的变量及约束多，求解时间过长(运行 24 h 仍未得到结果)，无法满足停电恢复决策支持需求，因此未参与对比。图 5 为 3 种方案的恢复效果对比图，其中折线图为各时步的负荷恢复量，柱状图代表各时步的中高风险场景数。

方案一与方案二同为采用窗口滚动机制的恢复方案，二者所得系统每时步恢复的负荷量相同(折线图重叠)，即系统发电能力的恢复效果相同。而方案一的优化过程考虑了系统韧性的主动提升，因此方案一所得系统在预想故障下的中高风险场景数明显减少，系统抵御次生故障的能力增强。方案一优于方案二的原因在于方案一前探了未来可能发生的较严重的风险事件，通过优化调控网架和负荷的恢复进程，提升了系统的韧性水平。例如，在第

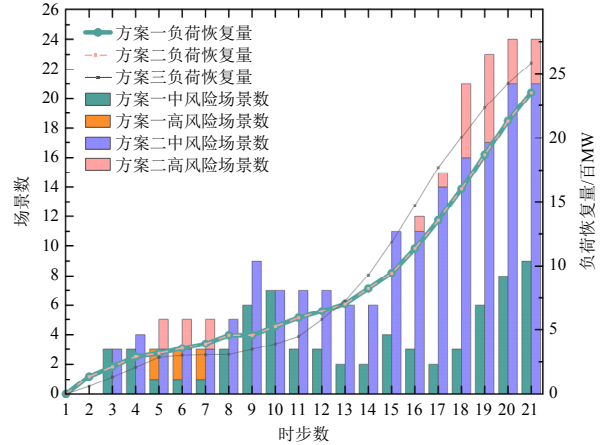


图 5 IEEE 39 节点系统恢复状态对比图

Fig. 5 Diagram of recovery status comparison of IEEE-39 bus system

11 时步和第 13 时步进行合环操作，在减小线路潮流压力的同时，也为系统提供了备用送电路径，若此时发生故障，故障对系统的影响也会大大降低。

方案二与方案三同为不考虑系统韧性的恢复方案，但方案二为窗口滚动优化方案，方案三为全局优化恢复方案。由二者的负荷恢复量可见，方案三所得系统在整个网架重构过程中恢复的发电量略高于方案二，且二者仅相差 2.9%。但方案二由于采用了窗口滚动优化策略，计算速度大幅提升，计算过程总耗时 17 s，而方案三计算耗时 6 195 s。可见，采用窗口滚动优化策略可以在兼顾全局优化效果的前提下大幅提升模型求解速度。

图 6、7 分别为方案一与方案二所得的各时步网架结构状态图。方案一与方案二在恢复时间和负荷恢复量值上完全一致，但后者却提高了系统对高风险事件的抵御能力。原因在于方案二未能充分挖

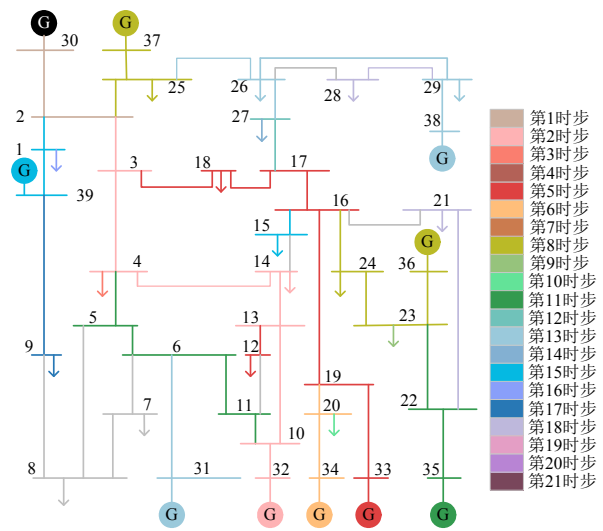


图 6 方案一网架结构状态图

Fig. 6 Network structure state of scheme 1



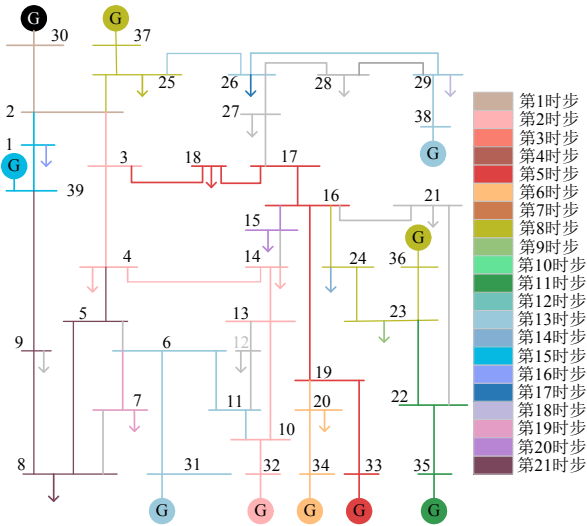


图7 方案二网架结构状态图

Fig. 7 Network structure state of scheme 2

掘网架重构的潜力，体现在以下两方面：

首先是方案二未能充分利用环网等网架结构提升系统对故障的抵御能力。如图7所示，在第12时步线路32-10、线路10-13或线路13-14断开，将导致机组32成为孤立电源，为满足有功平衡只能进行切机处理，并造成198.7MW的负荷损失。而在图6中，方案一提前恢复了线路10-11、11-6、6-5、5-4，形成环网结构，将上述负荷损失降低为零。

其次是方案二未能充分发挥网架重构过程中的负荷恢复优化及潮流分布优化在抵御次生故障方面的能力。仍以第12时步为例，线路3-18因故障断开，图7所示的网架结构将形成包括机组33、机组34在内的孤岛系统，且孤岛系统中的机组总出力为175MW，总负荷量为276.5MW，因有功功率不平衡需进行机组和负荷的调整，在机组上爬坡约束下，负荷节点20切除131.7MW负荷；而方案一提前对负荷及潮流分布进行优化，在同一故障下仅损失23.6MW的负荷。同样在线路19-20故障时，方案二损失负荷131.7MW，方案一损失69MW负荷。

图8为方案一与方案二在预想故障作用下的时步-超越概率-负荷损失曲面图，最上方两层为曲面图在时步-超越概率平面上的映射图，可见方案一中失负荷量较高的场景明显减少，所得系统对严重次生故障的抵御能力更强。且方案一的目标函数中的 $\alpha_{r,k}$ 为变权重风险系数，恢复前期 $\alpha_{r,k}$ 较小，更重视恢复过程的快速性；恢复后期 $\alpha_{r,k}$ 逐渐增大，更重视恢复过程的稳健性，因此与方案二相比，方案一在恢复后期的中高风险数明显减少。

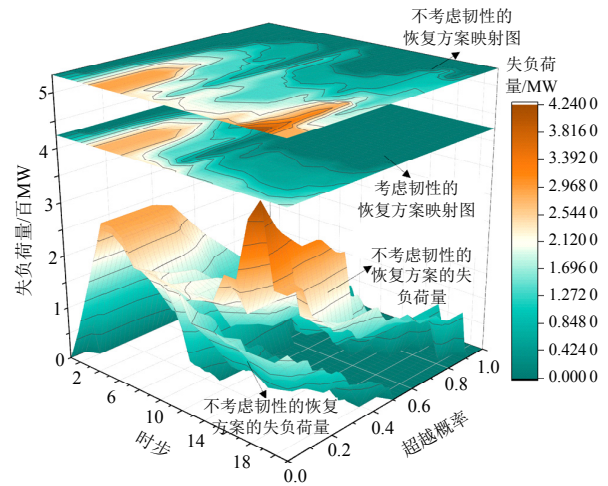
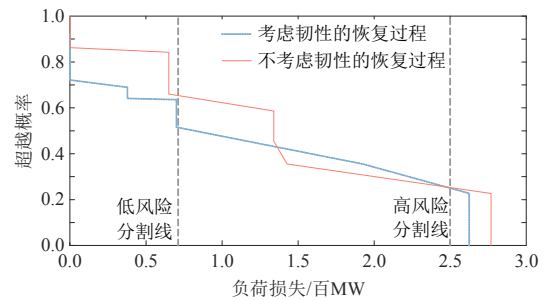


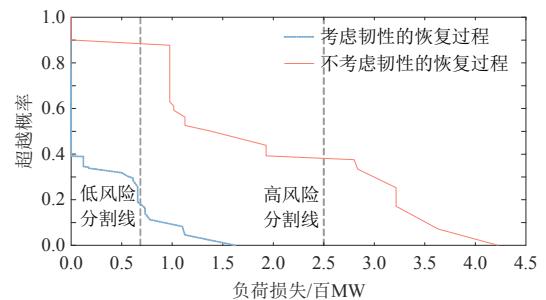
图8 时步-超越概率-负荷损失曲面图

Fig. 8 Diagram of timestep-exceeding probability-load loss

图9为两个典型时步下的超越概率-负荷损失曲线图，其中(a)和(b)分别为图8中以第7和第19时步时段末时刻为截面所得纵切图，二者可分别代表网架重构前期和后期的系统风险状态。根据式(10)，为了在恢复前期尽快恢复系统发电能力，系统风险权重系数 $\alpha_{r,k}$ 较小，在第7时步取值为0.117，恢复的主要侧重点在于提高恢复速度；且此时处于恢复初期，即便系统发生故障重新恢复，损失的时间成本也较小，因此考虑韧性的恢复方案与不考虑韧性的恢复方案所得系统的风险状态相差不大；随着恢复进程推进，越来越多的机组和负荷



(a) 第7时步



(b) 第19时步

图9 典型时步的超越概率-负荷损失曲线图

Fig. 9 Exceeding probability-load loss curves for typical time steps

投运，高风险故障对恢复进程的影响也越来越严重，应更重视系统恢复的稳健性， $\alpha_{r,k}$  随之增大，在第 19 时步取值为 0.563，因此考虑韧性的恢复方案所得系统处于中高风险状态的场景数远小于不考虑韧性的恢复方案。

#### 4.2 算例 2：118 节点系统算例

为进一步证明本文方法对于更大规模系统的有效性和适用性，采用修改的 IEEE 118 节点系统进行测试，其中系统拓扑图如图 10 所示，机组参数在附表 B2 展示。为突出说明本文所提恢复策略的有效性，对 118 节点系统进行了适当的简化，并假定系统中只有一个黑启动电源。假设节点 69 接入装机容量为 350 MW 的黑启动机组，并且在 0 h 时刻自启动成功。其他参数与算例 1 保持一致。

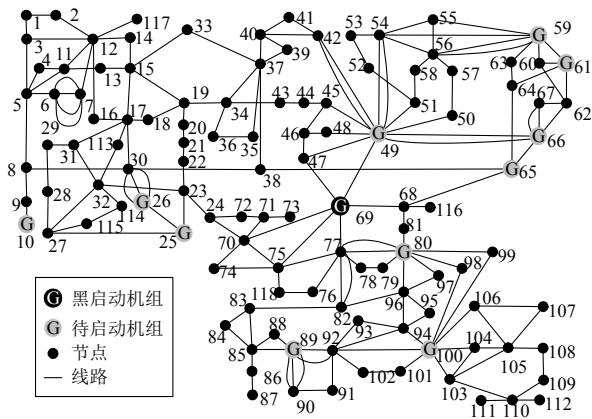


图 10 IEEE 118 节点系统拓扑图  
Fig. 10 IEEE 118-bus power system

与算例 1 相同，以考虑系统韧性主动提升的窗口滚动优化恢复方案作为方案一，以不考虑系统韧性的窗口滚动优化恢复方案作为方案二，对如上所述 118 节点系统进行测试，测试结果如图 11 所示。由于方案三采用的全局优化算法计算耗时过长(用

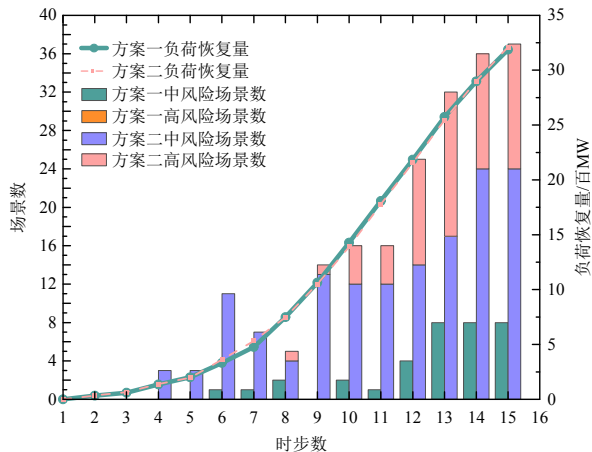


图 11 IEEE 118 节点系统恢复状态对比图  
Fig. 11 Diagram of recovery status comparison of IEEE 118-bus system

时 20015 s)，在 118 节点系统中不再适用，因此未参与恢复状态对比。而采用窗口滚动机制的方案二计算用时 36 s，远远快于方案三，再次体现出窗口滚动机制的计算优势。方案一与方案二所得系统的负荷量恢复情况基本一致，而考虑韧性主动提升的方案一所得系统在各时步下的中高风险场景数明显减少，系统抵御严重次生故障的能力增强。

图 12 为方案一与方案二所得系统的时步-超越概率-负荷损失曲面图，可见考虑韧性主动提升的恢复方案对故障的抵御能力明显优于不考虑韧性的恢复方案。

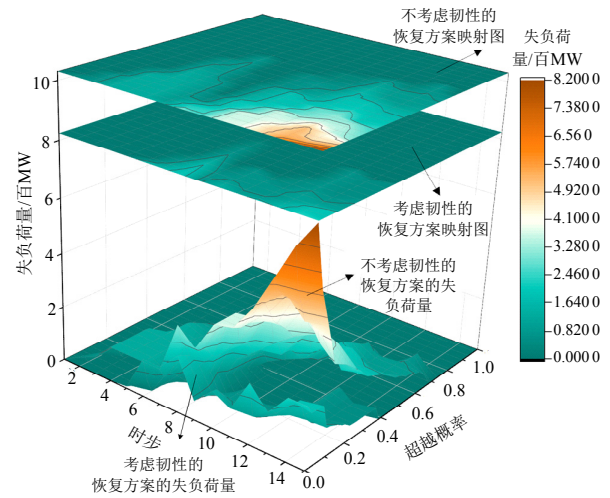
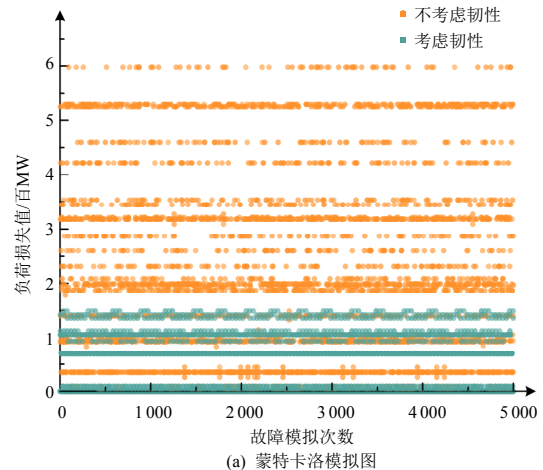


图 12 时步-超越概率-负荷损失曲面图  
Fig. 12 Diagram of timestep-exceeding probability-load loss

为了进一步说明所提方法对提高系统韧性的有效性，对方案一和方案二所得系统进行蒙特卡洛模拟。以系统恢复到第 13 时步时的状态为例，在方案一和方案二所得系统中分别施加 5000 次随机的次生故障，两种恢复方案下的负荷损失结果如图 13(a)所示。将负荷损失按照大小排序，结果在图 13(b)中展示。可以看出，所提韧性主动提升策



(a) 蒙特卡洛模拟图

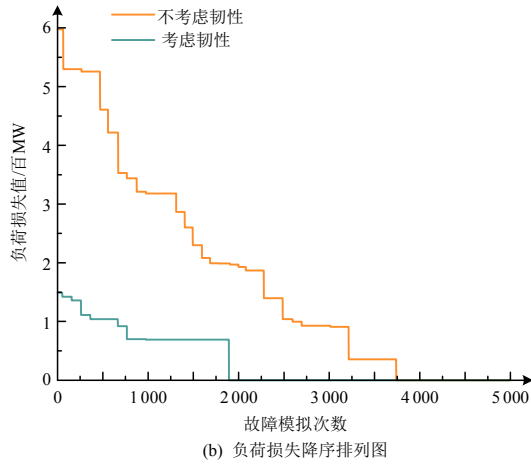


图 13 第 13 步蒙特卡洛故障模拟

Fig. 13 Monte Carlo simulation at the 13<sup>th</sup> time step

略可将大多数高风险降低成低风险，甚至零风险。

## 5 结论

在极端事件后的系统恢复过程中，输电元件存在再次跳闸的风险。在此背景下，本文提出一种考虑韧性主动提升的网架重构策略。定义一种新的系统韧性指标用以表征次生故障的差异化影响，建立考虑韧性主动提升的网架重构优化模型，并进一步提出基于窗口滚动机制的优化模型及实用方法。通过协调优化网架及负荷的恢复过程，使得系统重构兼顾快速性与稳健性。算例结果表明，所提方法可以降低系统在遭遇次生故障时的失负荷量，使系统在动态复杂的恢复过程中持续保持较强的韧性水平。

需要指出的是，由于本文所提出的韧性指标主要是尝试刻画极端事件下次生故障的差异化影响，因此也有望应用于极端事件应对的事前预防和事中调整等其他环节。兼顾极端事件下次生故障动态特性及影响的全过程停电防御与系统恢复将是下一步的研究重点。

## 参考文献

- [1] 辛保安, 单葆国, 李琼慧, 等. “双碳”目标下“能源三要素”再思考[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(9): 3117-3125.  
XIN Baoan, SHAN Baoguo, LI Qionghui, et al. Rethinking of the “Three elements of energy” toward carbon peak and carbon neutrality[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(9): 3117-3125(in Chinese).
- [2] 安学民, 孙华东, 张晓涵, 等. 美国德州“2.15”停电事件分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3407-3415.  
AN Xuemin, SUN Huadong, ZHANG Xiaohan, et al. Analysis and lessons of Texas power outage event on February 15, 2021[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3407-3415(in Chinese).
- [3] 王伟胜, 林伟芳, 何国庆, 等. 美国德州 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): 4033-4042.  
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): 4033-4042(in Chinese).
- [4] 周云海, 闵勇. 恢复控制中的系统重构优化算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(4): 67-70, 188.  
ZHOU Yunhai, MIN Yong. Optimal algorithm for system reconstruction[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(4): 67-70, 188(in Chinese).
- [5] 顾雪平, 白岩松, 李少岩, 等. 电力系统黑启动恢复问题的研究评述[J]. 电工技术学报, 2022, 37(13): 3183-3200.  
GU Xueping, BAI Yansong, LI Shaoyan, et al. Research review of power system black-start restoration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2022, 37(13): 3183-3200(in Chinese).
- [6] 谢彦祥, 刘天琪, 苏学能. Hadoop 架构下基于分布式粒子群算法的骨架网络重构方法[J]. 电网技术, 2018, 42(3): 886-893.  
XIE Yanxiang, LIU Tianqi, SU Xueneng. A novel skeleton network reconfiguration method based on distributed PSO algorithm and Hadoop architecture[J]. Power System Technology, 2018, 42(3): 886-893(in Chinese).
- [7] SUN Runjia, LIU Yutian, WANG Liang. An online generator start-up algorithm for transmission system self-healing based on MCTS and sparse autoencoder[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2019, 34(3): 2061-2070.
- [8] 顾雪平, 李少岩, 周光奇, 等. 计及特级负荷恢复的网架重构分时段全局优化方法[J]. 电工技术学报, 2017, 32(7): 138-149.  
GU Xueping, LI Shaoyan, ZHOU Guangqi, et al. Global optimization by multi-time-stage coordination for network reconfiguration considering vital load restoration[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(7): 138-149(in Chinese).
- [9] 周云, 严正, 李乃湖, 等. 系统恢复路径搜索新算法及其适用性研究[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(15): 4152-4161.  
ZHOU Yun, YAN Zheng, LI Naihu, et al. A new system

- restoration path search algorithm and its applicability research[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(15): 4152-4161(in Chinese).
- [10] LI Ze, XUE Yusheng, WANG Haohao, et al. Decision support system for adaptive restoration control of transmission system[J]. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2021, 9(4): 870-885.
- [11] 和敬涵, 李长城, 张沛, 等. 基于改进标签传播算法的电力系统并行恢复分区方法[J]. 电网技术, 2018, 42(6): 1776-1782.
- HE Jinghan, LI Changcheng, ZHANG Pei, et al. A partitioning method for power system parallel restoration based on modified label propagation algorithm[J]. Power System Technology, 2018, 42(6): 1776-1782(in Chinese).
- [12] 刘艳, 王涛, 王文炎. 用于网架重构方案运行风险评估的线路投运模型[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1124-1131.
- LIU Yan, WANG Tao, WANG Wenyan. Model of restoring transmission lines for operational risk assessment of network-reconfiguration scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1124-1131(in Chinese).
- [13] 孙磊, 刘伟佳, 林振智, 等. 计及线路投运风险的电力系统恢复路径优化[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 75-82, 95.
- SUN Lei, LIU Weijia, LIN Zhenzhi, et al. Determination of optimal restoration paths for power systems considering failure risk of restoring transmission lines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 75-82, 95(in Chinese).
- [14] GOLSHANI A, SUN Wei, ZHOU Qun, et al. Two-stage adaptive restoration decision support system for a self-healing power grid[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2017, 13(6): 2802-2812.
- [15] 常忠蛟, 刘云. 巴西“3.21”大停电后电网恢复情况分析[J]. 电网技术, 2021, 45(3): 1078-1088.
- CHANG Zhongjiao, LIU Yun. Analysis on brazilian power grid restoration after "March 21" blackout[J]. Power System Technology, 2021, 45(3): 1078-1088(in Chinese).
- [16] WANG Chong, HOU Yunhe, QIU Feng, et al. Resilience enhancement with sequentially proactive operation strategies[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2017, 32(4): 2847-2857.
- [17] 高海翔, 陈颖, 黄少伟, 等. 配电网韧性及其相关研究进展[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(23): 1-8.
- GAO Haixiang, CHEN Ying, HUANG Shaowei, et al. Distribution systems resilience: An overview of research progress[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(23): 1-8(in Chinese).
- [18] 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): 2735-2744.
- 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): 2735-2744(in Chinese).
- [19] 鞠平, 王冲, 辛焕海, 等. 电力系统的柔性、弹性与韧性研究[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(11): 1-7.
- JU Ping, WANG Chong, XIN Huanhai, et al. Flexibility, resilience and toughness of power system[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(11): 1-7(in Chinese).
- [20] 阮前途, 谢伟, 许寅, 等. 韧性电网的概念与关键特征[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(21): 6773-6784.
- RUAN Qiantu, XIE Wei, XU Yin, et al. Concept and key features of resilient power grids[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(21): 6773-6784(in Chinese).
- [21] 蔡胜, 谢云云, 张玉坪, 等. 考虑移动应急电源配置的微电网顺序恢复方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(7): 2677-2688.
- CAI Sheng, XIE Yunyun, ZHANG Yuping, et al. A sequential service restoration method for microgrids considering optimal allocation of mobile emergency generators[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(7): 2677-2688(in Chinese).
- [22] 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.
- 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(in Chinese).
- [23] HOLLING C S. Resilience and stability of ecological systems[J]. Annual Review of Ecology and Systematics, 1973, 4: 1-23.
- [24] HAIMES Y Y. Risk modeling, assessment, and management[M]. New York: John Wiley & Sons, Inc., 2009: 332-341.
- [25] 谢绍宇, 王秀丽, 王锡凡. 电力系统的分割多目标风险分析框架及算法[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(34): 53-60.
- XIE Shaoyu, WANG Xiuli, WANG Xifan. Risk

- Assessment framework and algorithm of power systems based on the partitioned multi-objective risk method[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(34): 53-60(in Chinese).
- [26] 谢绍宇, 王秀丽, 曲翀, 等. 分割多目标风险分析框架下不同风速模拟方法对电力系统可靠性评估的影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 81-89.  
XIE Shaoyu, WANG Xiuli, QU Chong, et al. Impacts of wind speed simulation methods on adequacy evaluation of power systems in the partitioned multi-objective risk analysis framework[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 81-89(in Chinese).
- [27] 程林, 何剑, 孙元章. 线路实时可靠性模型参数对电网运行可靠性评估的影响[J]. 电网技术, 2006, 30(13): 8-13.  
CHENG Lin, HE Jian, SUN Yuanzhang. Impact of transmission line's real-time reliability model parameter upon power system operational reliability evaluation[J]. Power System Technology, 2006, 30(13): 8-13(in Chinese).
- [28] 崔伟, 李武璟, 牛拴保, 等. 自然灾害下高风险多重故障集快速生成方法[J]. 电力自动化设备, 2021, 41(4): 197-203.  
CUI Wei, LI Wujing, NIU Shuanbao, et al. Rapid generation method of high risk multiple fault set under natural disaster[J]. Electric Power Automation Equipment, 2021, 41(4): 197-203(in Chinese).
- [29] 顾雪平, 李少岩, 梁海平, 等. 网架重构过程中消除线路过载的环网恢复决策优化[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(5): 1379-1388.  
GU Xueping, LI Shaoyan, LIANG Haiping, et al. Optimization decision-making method for looped network restoration to eliminate transmission line overload in network reconfiguration[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(5): 1379-1388(in Chinese).
- [30] 朱冬雪, 顾雪平, 钟慧荣. 电力系统大停电后机组恢复的多目标优化方法[J]. 电网技术, 2013, 37(3): 814-820.  
ZHU Dongxue, GU Xueping, ZHONG Huirong. A multi-objective optimization method for post-blackout unit restoration[J]. Power System Technology, 2013, 37(3): 814-820(in Chinese).
- [31] 杨知方, 钟海旺, 夏清, 等. 输电网结构优化问题研究综述和展望[J]. 中国电机工程学报, 2016, 36(2): 426-434.  
YANG Zhifang, ZHONG Haiwang, XIA Qing, et al. Review and prospect of transmission topology optimization[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(2):

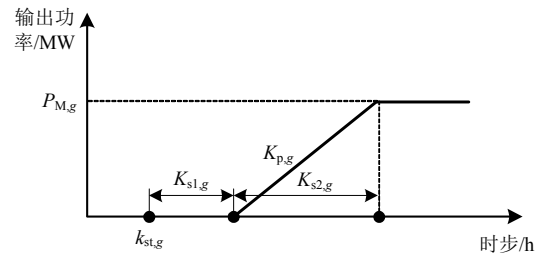
426-434(in Chinese).

- [32] FISHER E B, O'NEILL R P, FERRIS M C. Optimal transmission switching[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2008, 23(3): 1346-1355.
- [33] LI Shaoyan, GU Xueping, ZHOU Guangqi, et al. Optimisation and comprehensive evaluation of alternative energising paths for power system restoration[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(10): 1923-1932.

#### 附录A 机组启动约束

一般情况下, 机组启动的简化过程如图A1所示。将机组启动的连续变量以离散的时步变量表示,  $K_{s1,g}$  是机组  $g$  从启动到开始输出功率所需的时步,  $K_{s2,g}$  是机组  $g$  输出功率从 0 上升到最大值所需的时步,  $P_{M,g}$  是机组  $g$  的最大输出功率,  $k_{st,g}$  是机组  $g$  的启动时步,  $K_{p,g}$  是机组  $g$  的爬坡率。第  $k$  时步机组  $g$  的输出功率  $P_{gk}$  如式(A1)所示:

$$P_{gk} = \begin{cases} 0, & 0 < k < k_{st,g} + K_{s1,g} \\ K_{p,g}(k - k_{st,g} - K_{s1,g})h, & k_{st,g} + K_{s1,g} \leq k \leq k_{st,g} + K_{s1,g} + K_{s2,g} \\ P_{M,g}, & k_{st,g} + K_{s1,g} + K_{s2,g} \leq k \leq K_T \end{cases}, g \in G \quad (A1)$$



图A1 机组的输出功率曲线

Fig. A1 Output power curve of unit

机组输出功率的线性化表示如式(A2)—(A6)所示:

$$u_{1,k} > (k - k_{st,g} - K_{s1,g})/M \quad (A2)$$

$$u_{1,k} \leq 1 + (k - k_{st,g} - K_{s1,g}) \quad (A3)$$

$$u_{2,k} > (k - k_{st,g} - K_{s1,g} - K_{s2,g})/M \quad (A4)$$

$$u_{1,k} \leq 1 + (k - k_{st,g} - K_{s1,g} - K_{s2,g}) \quad (A5)$$

$$P_{gk} = K_{p,g}(k - k_{st,g} - K_{s1,g})hu_{1,k} + [P_{M,g} - K_{p,g}(k - k_{st,g} - K_{s1,g})h]u_{2,k} \quad (A6)$$

式中  $u_{1,k}$  及  $u_{2,k}$  均为布尔变量。

为了将机组的恢复状态变量纳入优化模型, 以  $C_{gk}$  表示机组  $g$  在第  $k$  时步是否启动,  $k_{st,g}$  与  $C_{gk}$  的关系如式(A7)—(A8)所示:

$$C_{gk} > (k - k_{st,g})/M \quad (A7)$$

$$C_{gk} \leq 1 + (k - k_{st,g})/M \quad (A8)$$

机组启动时, 需要外部电源提供启动功率, 布尔变量  $D_{gk}$  表示在第  $k$  时步机组  $g$  是否需要启动功率, 如式(A9)所示。待启动机组必须满足启动功率约束, 如式(A10)所示:

$$D_{gk} = \begin{cases} 0, & 0 < k < k_{st,g} \\ 1, & k_{st,g} \leq k \leq K_T \end{cases} \quad (A9)$$

$$\sum_{g \in G} P_{gk} - \sum_{g \in (G - G_{AS})} D_{gk} P_{R,g} \geq 0 \quad (A10)$$

其中,  $D_{gk}$  的线性化表示如式(A11)–(A13)所示:

$$u_{3,k} > (k - k_{st,g}) / M \quad (A11)$$

$$u_{3,k} \leq 1 + (k - k_{st,g}) \quad (A12)$$

$$D_{gk} = u_{3,k} - u_{1,k} \quad (A13)$$

机组在启动过程中有热启动机组及冷启动机组之分。机组在满足热启动的条件下,必须在最大临界热启动时间  $K_{ch,g}$  前启动,否则机组只能延长一段时间后再作冷启动,热启动的时间约束如式(A14)所示。当机组不满足热启动条件时,在最小临界冷启动时间  $K_{cc,g}$  之后才允许启动,冷启动的时间约束如式(A15)所示。

$$k_{st,g} \leq K_{ch,g}, \quad g \in G_{ch} \quad (A14)$$

$$k_{st,g} \geq K_{cc,g}, \quad g \in G_{cc} \quad (A15)$$

附录 B 算例机组参数

表 B1 新英格兰 10 机 39 节点系统机组参数  
Table B1 New England 10-unit 39-bus power system unit parameters

节点编号/ (机组编号)	$P_{M,g}/$ MW	$P_{cr,g}/$ MW	$K_{p,g}/$ (MW·h)	$T_{s1,g}/h$	$T_{s2,g}/h$	$T_{CC,g}/h$	$T_{CH,g}/h$
30(1)	300	—	225	—	—	—	—
31(2)	600	30.0	200	0.50	3.75	3.25	—
32(3)	250	12.5	160	0.67	2.31	—	—
33(4)	200	10.0	108	0.50	2.00	—	—
34(5)	300	15.0	100	1.10	1.67	—	4
35(6)	250	12.5	180	0.83	1.67	—	—
36(7)	330	16.5	150	1.10	2.75	—	—
37(8)	320	16.0	120	1.00	2.00	—	3
38(9)	300	15.0	200	0.83	1.50	—	—
39(10)	200	10.0	120	0.67	1.67	—	—

表 B2 IEEE118 节点系统机组参数

Table B2 IEEE 118-bus power system unit parameters

节点编号/ (机组编号)	$P_{M,g}/$ MW	$P_{cr,g}/$ MW	$K_{p,g}/$ (MW·h)	$T_{s1,g}/h$	$T_{s2,g}/h$	$T_{CC,g}/h$	$T_{CH,g}/h$
69(1)	350	—	225	—	—	—	—
10(2)	220	30.0	200	0.50	1.10	—	—
25(3)	300	12.5	160	0.67	1.88	—	—
26(4)	200	10.0	108	0.50	1.85	—	—
49(5)	150	15.0	100	0.85	1.55	—	4
59(6)	160	12.5	180	0.83	0.89	3	—
61(7)	390	16.5	150	1.10	2.60	—	—
65(8)	390	16.0	140	1.00	2.79	—	3
66(9)	516	15.0	200	0.83	2.58	—	—
80(10)	477	10.0	160	0.67	2.98	—	—
89(11)	607	15.0	200	0.85	3.04	—	—
100(12)	252	17.0	140	0.7	1.80	—	—



李少岩

在线出版日期: 2023-03-24。

收稿日期: 2022-09-20。

作者简介:

李少岩(1989), 男, 副教授, 主要研究方向为电力系统安全防御和恢复控制, shaoyan.li@ncepu.edu.cn;

赵汉广(1998), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为电力系统安全防御和恢复控制, 1765970311@qq.com;

顾雪平(1964), 男, 教授, 主要研究方向为电力系统安全防御与恢复控制, xpgu@ncepu.edu.cn;

何剑(1983), 男, 正高级工程师, 主要研究方向为电力系统可靠性, hejian@epri.sgcc.com.cn;

屠竞哲(1984), 男, 正高级工程师, 主要研究方向为电力系统运行控制与安全防御, tujingzhe@epri.sgcc.com.cn;

冀鲁豫(1987), 副高级工程师, 主要研究方向为电力系统非常规安全防御, jiluyu@epri.sgcc.com.cn。

(编辑 乔宝榆, 李新洁)

# A Novel Transmission Network Reconfiguration Strategy Considering Active Improvement of System Resilience Under the Differential Influence of Contingencies

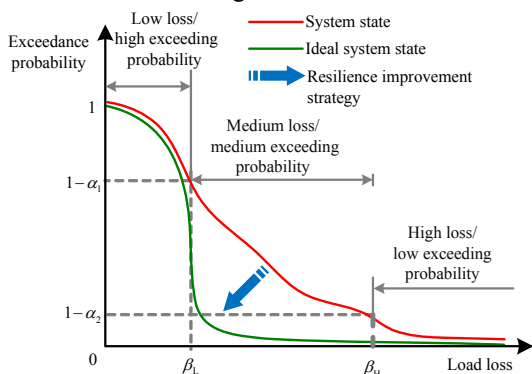
LI Shaoyan<sup>1</sup>, ZHAO Hanguang<sup>1</sup>, GU Xueping<sup>1</sup>, HE Jian<sup>2</sup>, TU Jingzhe<sup>2</sup>, JI Luyu<sup>2</sup>  
(1. North China Electric Power University 2. China Electric Power Research Institute)

**KEY WORDS:** blackout; power system resilience; network reconfiguration; Partitioned Multi-Objective Risk Method; contingency

In recent years, the green-oriented transition of energy has accelerated, and extreme events have occurred frequently. With the coexistence of conventional and unconventional security risks, the risk of power system outages increase. A robust and reliable network reconfiguration strategy is important to prevent the recurrence of collapse during restoration.

However, the existing research on the restoration process after extreme events mainly focus on improving the rapidity of restoration. If the optimization goal in the network reconfiguration stage is to minimize restoration duration only, the resilience level of system will be low. Some contingencies, such as the outage of critical lines or units, may greatly reduce the system function, or even cause a major blackout again.

In view of that, this paper proposes a novel network reconfiguration strategy with active improvement of system resilience that considers the differential impact of contingencies, as shown in Fig. 1. Based on partitioned multi-objective risk method (PMRM), contingencies are divided into low, medium and high risk ranges. By optimizing reconfiguration actions, reducing the impact of these high-loss contingencies, the resilience of the system could be improved and the rapidity of system restoration could also be guaranteed.



**Fig. 1 Schematic diagram of PMRM and the resilience improvement strategy**

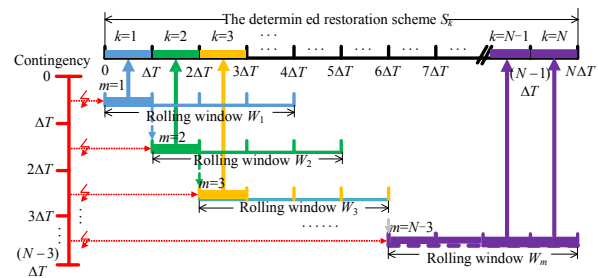
To realize the transmission network reconfiguration considering active improvement of system resilience, a

novel resilience index is proposed to differentiate contingencies and highlight the impact of high-risk failures during the network reconfiguration process. As shown in (1), high risk urgency factor is introduced as  $\gamma(0.5 < \gamma < 1)$ , and then  $R_{risk}$  can represent the resilience level of the power system. The smaller the value of  $R_{risk}$ , the higher the resilience level of the system.

$$R_{risk} = \gamma R_H + (1 - \gamma) R_M \quad (1)$$

where  $R_L$ ,  $R_M$  and  $R_H$  represent the risk of contingencies with low, medium and high loss respectively.

Based on the proposed resilience index  $R_{risk}$ , a global optimization model for network reconfiguration considering the active improvement of resilience is established. Then, in order to improve the solution efficiency, a practical solution strategy based on the window rolling mechanism is proposed. As shown in Fig. 2, the rolling mechanism specifies a fixed window, in which a short-term network reconfiguration optimization model is established. By successively solving multiple short-term mathematical programming model and iterative checking problems, the network reconfiguration scheme can be determined in acceptable time.



**Fig. 2 Optimization model considering active improvement of system resilience based on rolling mechanism**

The effectiveness of the proposed method is validated on the IEEE 39-bus and the IEEE 118-bus test systems. The results show that, the proposed method can reduce the load loss of system when encountering contingencies, and keep the system resilience at a higher level during the dynamic and complex restoration process.