

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.246173

基于雪消融优化算法的交直流混联电网连锁故障风险评估

王英英¹, 李勇¹, 李会新¹, 陈磊², 李逸飞², 陈红坤²

(1. 国家电网有限公司华中分部, 湖北 武汉 430077; 2. 武汉大学电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072)

摘要: 针对交直流混联电网连锁故障在不同演化阶段的风险评估问题, 提出了一种基于雪消融优化(snow ablation optimization, SAO)算法的连锁故障风险评估方法。首先, 阐述了交直流混联电网连锁故障在初始阶段、发展阶段和恶化阶段的主导作用因素, 建立了反映连锁故障演化特征的两级评估指标体系。然后, 制定了基于 SAO 算法的风险评估指标组合赋权策略, 确定了连锁故障风险评估流程。最后, 利用 Matlab/Simulink 平台搭建了基于改进 IEEE 30 节点的交直流混联电网仿真模型, 比较了所提方法与传统方法的指标权值差异, 对比了不同规模的直流闭锁对交直流混联电网连锁故障的影响。结果表明, 所提方法能够准确反映交直流混联电网连锁故障不同演化阶段的主导因素, 对高危线路风险评估的敏感度相比传统方法可提升 12.67%, 验证了所提方法的合理性与有效性。

关键词: 交直流混联电网; 连锁故障; 雪消融优化算法; 风险评估; 组合赋权策略

Snow ablation-based risk assessment method for cascading failures in an AC-DC hybrid power grid

WANG Yingying¹, LI Yong¹, LI Huixin¹, CHEN Lei², LI Yifei², CHEN Hongkun²

(1. Central China Branch of State Grid Corporation of China, Wuhan 430077, China; 2. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

Abstract: Aiming at the risk assessment problem of cascading failures in AC-DC hybrid power grid at different stages of evolution, this paper proposes a cascading failure risk assessment method based on the snow ablation optimization (SAO) algorithm. First, the dominant factors influencing cascading failures in the initial, development and deterioration stages of an AC-DC hybrid power grid are described, and a two-level index system reflecting the evolutionary characteristics of cascading failures is established. Then, a combination weighting strategy for risk assessment indices based on the SAO algorithm is formulated, and the risk assessment process for cascading failures is determined. Finally, a simulation model of an AC-DC hybrid power grid based on an improved IEEE 30-bus system is constructed using the Matlab/Simulink platform. The differences in the weights of the indices between the proposed method and the traditional method are compared, and the effects of different levels of DC converter station blocking on the cascading failures are revealed. The results show that the proposed method can accurately reflect the dominant factors at different stages of evolution of cascading failures of the AC-DC hybrid power grid, and the assessment sensitivity of the high-risk lines can be improved by 12.67% compared with the traditional method, verifying the reasonableness and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by the Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (No. 52140023000M).

Key words: AC-DC hybrid power grid; cascading failure; snow ablation optimization (SAO) algorithm; risk assessment; combination weighting strategy

0 引言

近年来, 我国加速推进直流输电工程建设, 已建成世界上规模最大、电压等级最高的交直流混联

电网, 进一步促进能源输出与负荷中心电力供应、节能减排技术的紧密结合^[1-3]。需要指出的是, 交直流混联电网有其独特的结构特点和运行特点, 在满足远距离、大容量输电需求的同时, 也对电网安全稳定运行带来了严峻的挑战, 电网局部故障的连锁反应演化为全局安全风险的可能性日趋增加^[4-6]。研究大规

基金项目: 国家电网有限公司科技项目资助(52140023000M)

模交直流混联电网的连锁故障演化特性,开展连锁故障风险评估无疑具有重要的现实意义和理论价值。

目前,国内外专家学者与科研机构针对交直流混联电网连锁故障风险评估问题开展了一定研究工作,在风险评估指标体系及评估方法方面取得了初步成果。文献[7]定量分析了交直流混联电网连锁故障风险与运行风险间的关系,构建了基于支路可靠性的连锁故障风险评估指标体系。文献[8]研究了交直流混联电网中交流线路和直流线路的耦合作用,提出了反映交直流交互影响的作用因子,量化了该因子在连锁故障风险评估中的影响。文献[9]分析了交直流混联电网的动态运行特性,考虑直流换相失败及交流线路过载等因素,建立了连锁故障风险评估指标体系。文献[10]梳理了交直流混联电网的连锁故障演化机理,仿真分析了级联故障和直流系统通信故障之间的相互作用,给出了抑制连锁故障的潜在方案。文献[11]建立了基于输电线路热极限的级联故障模型,分析了多重故障突发事件的危险高概率情景,提出了连锁故障风险评估方法。

需要指出的是,交直流混联电网连锁故障风险评估研究还处于起步阶段,特别是不同评估指标的合理赋权机制还有待进一步完善。一方面,连锁故障演变过程中主导因素随演化阶段不断变化,基于初始阶段信息的指标权重难以准确表征因素影响程度,考虑演化过程对指标权重进行自适应更新是一条可行的技术路径。另一方面,交流线路和直流线路存在耦合作用,厘清所有交流、直流线路相联系的风险评估指标耦合度并合理赋权的难度较大,若采用智能优化算法进行赋权^[12-14],无疑对智能优化算法的性能提出了更高要求。

针对上述问题,本文提出了一种基于雪消融优化(snow ablation optimization, SAO)算法的交直流混联电网连锁故障风险动态评估方法。首先,建立了考虑线路停运和直流闭锁的连锁故障两级指标体系;然后,提出了基于 SAO 算法的指标赋权方法,引入了考虑连锁故障不同阶段主导因素的自适应赋权机制,通过主客观赋权法及 SAO 算法得到指标综合权重,实现对交直流混联电网连锁故障风险评估;最后,基于 Matlab/Simulink 搭建了含多回直流线路的改进 IEEE 30 节点模型,揭示了不同规模的直流闭锁对交直流混联电网连锁故障的影响,验证了所提风险评估方法的合理性与有效性。

1 连锁故障演化规律及指标体系构建

1.1 交直流混联电网连锁故障演化阶段分析

图 1 为交直流混联电网连锁故障演化路径示意

图。本文将演化路径划分为初始阶段、发展阶段和恶化阶段,简要分析不同阶段的演化规律和主导作用因素。

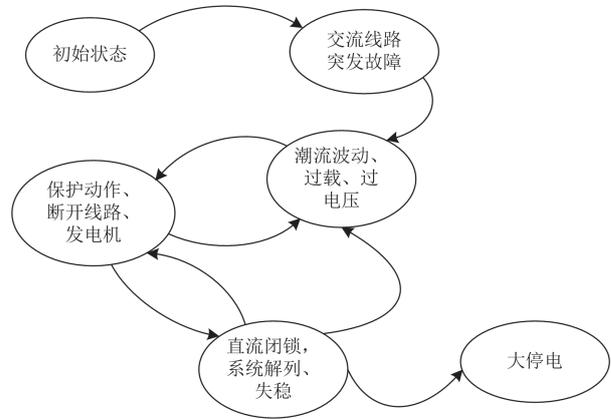


图 1 交直流混联电网连锁故障演化路径

Fig. 1 Evolution path of cascading faults in AC-DC hybrid grid

1) 初始阶段

交直流混联电网初始阶段下的故障主要由某个偶然事件造成,如线路由于环境等因素意外断裂或发生短路故障,多为一般性线路故障,此阶段对交直流混联电网的影响通常在可控范围内^[15-16]。

2) 发展阶段

交直流混联电网初始故障发生后,将引发潮流转移并导致周边线路过载和电压波动等问题。若线路潮流裕度较低,可能因为突增的潮流压力被迫停运。发展阶段呈现中长期特性,主要受电网潮流和电压影响,采取有效的控制措施原则上能够抑制连锁故障的快速蔓延^[17-18]。

3) 恶化阶段

连锁故障演化至该阶段,将涉及到直流换流站等核心装备。例如,故障近区电压降低导致换流站发生换相失败,连续换相失败可能导致直流闭锁。此外,由于无功盈余问题,近区出现暂态过电压,对电压敏感性设备造成冲击。在大量交流线路停运和直流闭锁等相继出现后,交直流混联电网存在严重的功率不平衡,进一步引发电网电压频率崩溃^[19]。

1.2 连锁故障演化特征两级指标体系

本文主要考虑交流线路停运与直流闭锁对交直流混联电网连锁故障的影响^[20-23],基于由美国橡树岭国家实验室(oak ridge national laboratory, ORNL)、Wisconsin 大学电力系统工程研究中心(PSerc)以及 Alaska 大学的研究员共同提出的 ornl-pserc-alaska(OPA)模型理论^[24],依据交直流混联电网连锁故障在不同发展阶段的主导作用因素,从潮流动态转移、交直流耦合影响、电网电压稳定性等多个角

度出发^[25-26], 建立反映连锁故障不同演化阶段特征的交-直流两级评估指标体系, 包括: 加权潮流熵、多直流作用因子、交直流交互作用因子及电压严重程度评估指标。

1) 加权潮流熵

加权潮流熵用于反映某一交流线路停运对其余交流线路潮流的影响程度, 计算如式(1)所示。

$$F_{j,i} = -\frac{1}{\ln l} \sum_{j=1}^{l-1} \beta_{j,i} \alpha_{j,i} \ln \alpha_{j,i} \quad (1)$$

其中,

$$\begin{cases} \beta_{j,i} = |P'_{j,i}/P_{j,\max}| \\ \alpha_{j,i} = P_{j,i} - P_{j0} / \sum_{j=1}^l (P_{j,i} - P_{j0}) \end{cases} \quad (2)$$

式中: $F_{j,i}$ 表示线路 i 停运时, 线路 j 的加权潮流熵; l 为线路数量; $\beta_{j,i}$ 、 $\alpha_{j,i}$ 分别表示线路 j 的负载率与潮流转移率; $P_{j,\max}$ 表示线路 j 的最大传输容量; P_{j0} 、 $P_{j,i}$ 分别表示线路 i 停运前后线路 j 的潮流。

通过引入加权潮流熵指标, 可以量化分析故障线路与正常线路之间潮流变化的关联性, 进而刻画正常线路对于潮流转移的敏感度, 揭示其潜在脆弱性^[27]。

2) 多直流作用因子

多直流作用因子(multi-DC interaction factor, MDIF)用于量化交直流混联电网连锁故障演化过程中, 某一直流换流站故障闭锁对其余直流线路电压特性的影响程度^[28], 如式(3)所示。

$$M_{j,i} = \Delta U_{DC}^S(j,i) / \Delta U_{DC,L}^S(i) \quad (3)$$

式中: $M_{j,i}$ 为直流换流站 i 闭锁对直流线路 j 的影响程度; $\Delta U_{DC}^S(j,i)$ 为直流线路 j 的电压变化; $\Delta U_{DC,L}^S(i)$ 为直流换流站 i 闭锁时的电压变化率, 上标“S”为换流站, 下标“DC”与“L”分别表示直流及直流闭锁。

3) 交直流交互作用因子

交直流交互作用因子(AC-DC interaction factor, ADIF)用于表征某一交流线路故障停运带来的潮流变化对直流换流站电压特性的影响程度, 如式(4)所示。

$$A_{j,i} = \Delta U_{AC}^S(j,i) / \Delta P_i \quad (4)$$

式中: $A_{j,i}$ 表示某一交流线路 i 故障停运带来的潮流变化对直流换流站 j 电压特性的影响程度; $\Delta U_{AC}^S(j,i)$ 表示交流线路 i 停运时, 直流线路 j 相关联的换流站电压变化率, 下标“AC”表示交流; ΔP_i 表示交流线路 i 停运前的有功功率。

交直流交互作用因子可以量化直流换流站电压对交流线路故障引发潮流转移的敏感性, 衡量直流换相失败风险^[29]。

4) 电压严重程度

电压严重程度反映交直流混联电网连锁故障演化过程中直流换流站电压变化的严重程度^[30-31], 如式(5)所示。

$$S_{j,i} = \begin{cases} -20U_{AC}^S(j,i) + 20 & U_{AC}^S(j,i) \leq 1 \\ 10U_{AC}^S(j,i) - 10 & U_{AC}^S(j,i) > 1 \end{cases} \quad (5)$$

式中: $S_{j,i}$ 表示交流线路 i 停运后, 直流线路 j 相关联的换流站电压变化严重程度; $U_{AC}^S(j,i)$ 为交流线路 i 停运后, 直流线路 j 相关联的换流站电压。

需要补充的是, OPA 模型理论的核心在于: 通过快、慢动态过程的交替仿真, 不断推进交直流混联电网故障演化, 基于复杂系统理论模型能够有效跟踪电网的运行状态和网架结构变化, 模拟连锁故障发展过程^[24]。由此, 结合多次仿真算例分析, 进一步保证风险评估指标的可信度和合理性。

2 连锁故障风险评估方法

2.1 评估指标主客观赋权机制

1) 基于关联度系数法的评估指标主观赋权

针对上述评估指标进行无量纲化处理, 如式(6)所示。

$$r_{m,j} = x_{m,j} / \left(\frac{1}{l} \sum_{j=1}^l x_{m,j} \right) \quad (6)$$

式中: $r_{m,j}$ 为线路 j 的评估指标 m 无量纲化处理后的值; $x_{m,j}$ 为评估指标 m 的实际值。

通过选取指标理想值 $x'_{m,j}$ 为基准, 获取指标关联度系数 $\Delta_m(j)$, 计算如式(7)所示。

$$\Delta_m(j) = |x'_{m,j} - x_{m,j}| \quad (7)$$

其中

$$\xi_m(j) = \frac{\min \Delta_m(j) + \rho \max \Delta_m(j)}{\Delta_m(j) + \rho \max \Delta_m(j)} \quad (8)$$

式中: $\xi_m(j)$ 为指标关联度系数; $\min \Delta_m(j)$ 为参考指标和实际指标绝对差的最小值; $\max \Delta_m(j)$ 为参考指标和实际指标绝对差的最大值; ρ 为分辨系数, 取经典型值 0.5^[32]。

在得到关联度系数 $\xi_m(j)$ 基础上, 可根据式(9)计算主观权重向量第 j 个元素 W_{1j} 。

$$W_{1j} = \frac{\sum_{m=1}^l \xi_m(j)}{\sum_{j=1}^3 \sum_{m=1}^l \xi_m(j)} \quad (9)$$

2) 基于 CRITIC 法求解的评估指标客观权重

$$\begin{cases} \sigma_j = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^l (x_{m,j} - \bar{x}_m)^2}{l-1}} \\ r_{m,n} = \text{cov}(x_m, x_n) / (\sigma_m \sigma_n) \\ \text{cov}(x_m, x_n) = \sum_{j=1}^l (x_{m,j} - \bar{x}_m)(x_{n,j} - \bar{x}_n) / l \\ f_n = \sum_{m=1}^4 (1 - r_{m,n}) \end{cases} \quad (10)$$

$$W_{2j} = \frac{f_j \sigma_j}{\sum_{j=1}^3 f_j \sigma_j} \quad (11)$$

式中： σ_j 为指标标准差； \bar{x}_m 、 \bar{x}_n 分别为评估指标 m 、 n 的平均值； $r_{m,n}$ 为指标 m 、 n 的相关系数； $\text{cov}(x_m, x_n)$ 为评估指标向量 x_m 、 x_n 间的协方差； σ_m 、 σ_n 分别为指标 m 和指标 n 的标准差； f_n 、 f_j 分别为指标 n 、 j 中包含的信息量； W_{2j} 为评估指标客观权重向量第 j 个元素。

2.2 评估指标综合权重优化策略

在风险评估过程中，各类指标的合理赋权具有关键作用。主观赋权方法能够考虑实际的决策以及专家经验，避免出现指标权重与指标实际重要程度相悖的情况。客观赋权方法可以避免主观因素所导致的偏差，但对于数据的要求较高，易忽略指标相关性。采用主客观综合赋权方法可以结合两类赋权方法优势，充分考虑专家意见并利用数据驱动的分析减少主观偏差，不足之处在于主观与客观权重分配比例难以确定^[33]。根据关联度系数法和 CRITIC 法，可知主客观综合权重向量 W 为

$$W = x_1 W_1 + x_2 W_2 \quad (12)$$

式中， x_1 和 x_2 分别为综合权重主客观权重系数。

为保障综合赋权的合理性，本文引入式(13)，实现各类指标综合权重与主、客观权重的偏差最小。为确定 x_1 、 x_2 ，建立适应度函数 $C(x_1, x_2)$ ^[34-35]。

$$C(x_1, x_2) = \min \left\| \sum_{i=1}^2 x_i W_i^T - W^T \right\|_2, x_1 > 0, x_2 > 0 \quad (13)$$

本文采用 SAO 算法求解式(13)，对 x_1 、 x_2 进行优化^[36]，流程图如图 2 所示。雪消融优化算法利用布朗运动模型来模拟蒸汽在空间中的扩散，此运动模式有助于算法在搜索空间中探索潜在区域，增强全局搜索能力，避免陷入局部最优，实现对解空间的有效覆盖^[37]。通过以雪分子作为优化过程候选解，随机生成雪分子群作为初始解，如式(14)所示。

$$Z = Z_{\min} + Z_{\text{rand}} (Z_{\max} - Z_{\min}) = \begin{bmatrix} Z_{1,1} & \cdots & Z_{1,\text{dim}} \\ \vdots & & \vdots \\ Z_{N,1} & \cdots & Z_{N,\text{dim}} \end{bmatrix} \quad (14)$$

式中： Z 为初始解的信息矩阵； Z_{\max} 、 Z_{\min} 分别表示初始解的上、下限； Z_{rand} 为通过随机数生成的矩阵，用于设定初始解。

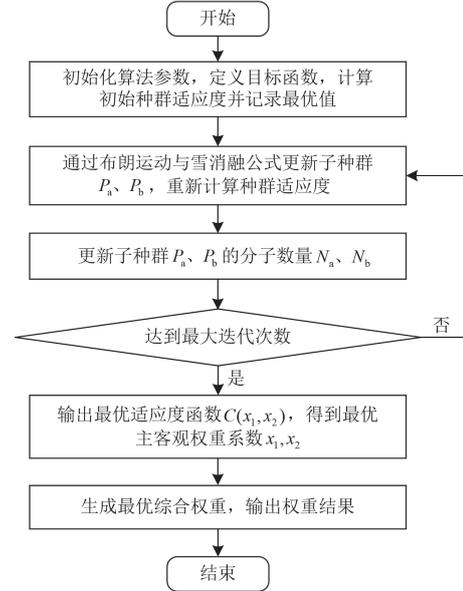


图 2 SAO 算法求解综合权重流程图

Fig. 2 Flowchart of solving the comprehensive weights using SAO algorithm

SAO 采用双种群机制，通过将种群分为两个子种群，一个专注于探索，另一个专注于开发，这种机制有助于保持种群多样性，避免早熟收敛^[37]。子种群中雪分子的数量随迭代求解过程实时调整。子种群 P_a 基于水蒸气不规则布朗运动进行探索，计算如式(15)和式(16)所示。

$$Z_i(t+1) = E_{\text{lite}}(t) + B_{\text{Mi}}(t) \otimes (\theta_1 \times (G(t) - Z_i(t)) + (1 - \theta_1) \times (\bar{Z}(t) - Z_i(t))) \quad (15)$$

$$\begin{cases} \bar{Z}(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N Z_i(t) \\ E_{\text{lite}}(t) \in [G(t), Z_{\text{second}}(t), Z_{\text{third}}(t), Z_c(t)] \\ Z_c(t) = \frac{1}{N_1} \sum_{i=1}^{N_1} Z_i(t) \end{cases} \quad (16)$$

式中： $Z_i(t+1)$ 为在 $t+1$ 时刻种群内第 i 个解； $E_{\text{lite}}(t)$ 随机取 $G(t)$ 、 $Z_{\text{second}}(t)$ 、 $Z_{\text{third}}(t)$ 和 $Z_c(t)$ 中的任一值； $B_{\text{Mi}}(t)$ 为基于布朗运动的高斯分布；“ \otimes ”为乘积运算； θ_1 为从区间 $[0,1]$ 任取的随机数； $G(t)$ 为 t 时刻种群内最优解； $Z_i(t)$ 为种群内第 i 个解； $\bar{Z}(t)$ 为种

与加权潮流熵占主导地位。基于雪消融算法优化权重系数得到综合权重，并与传统层次分析法计算的结果对比如表 2 所示。本文方法进一步强化了加权潮流熵在指标体系中的占比，与表 1 结果保持一致。

为验证雪消融优化算法的性能，特别是其布朗运动模型和双种群机制在全局寻优、快速性和收敛性等方面的优势，本文将其与灰狼优化(grey wolf optimization, GWO)算法进行了性能比较。

表 1 直流闭锁时评估指标的主客观权重

Table 1 Subjective and objective indicators' weight calculation results during DC blocking

权重计算方法	多直流作用因子	交直流交互作用因子	加权潮流熵	电压严重度
主观权重	0.133	0.287	0.426	0.154
客观权重	0.172	0.232	0.342	0.255

表 2 本文方法与传统方法的权重结果比较

Table 2 Comparison of weights using the proposed method and the traditional method

权重计算方法	多直流作用因子	交直流交互作用因子	加权潮流熵	电压严重度
本文方法	0.156	0.254	0.376	0.214
传统方法	0.125	0.312	0.373	0.19

图 5 为雪消融优化算法与 GWO 算法的适应度收敛曲线，设置种群数量为 50，迭代次数为 30。可知 SAO 算法在第 18 代收敛，适应度为 0.0663；GWO 算法在第 25 代收敛，适应度为 0.0703。由于收敛速度与寻优能力更好，SAO 算法更适用于求解本文所提的权重优化问题。

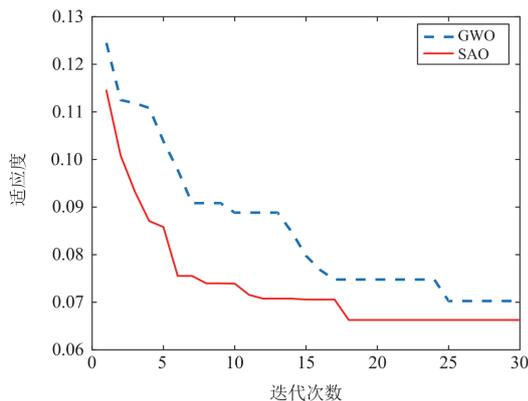
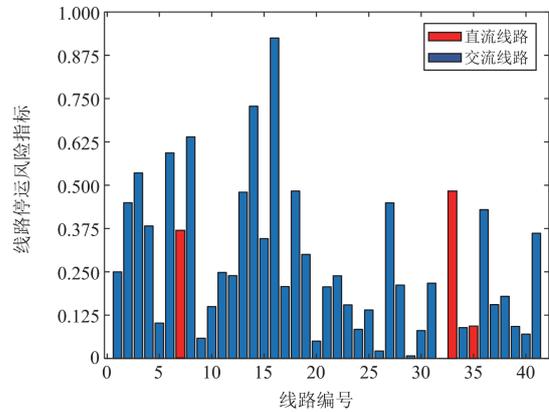


图 5 不同算法收敛情况对比图

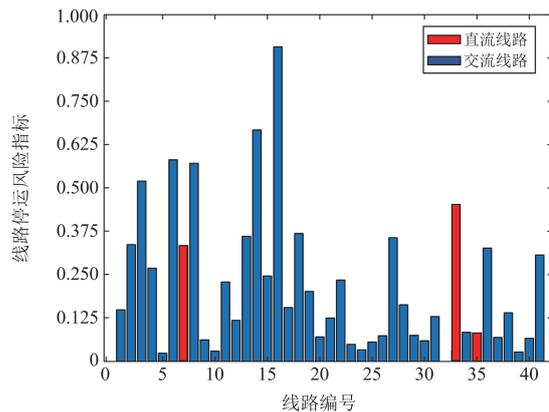
Fig. 5 Convergence situation of GWO and SAO

在断开直流线路 L_{23-24} (32) 后，图 6 给出了交直流混联电网的连锁故障风险评估结果。由于 L_{23-24} (32) 的输送功率中断，线路 L_{12-13} (16) 承担潮流

压力增大，成为当前关键线路，停运风险指标最大，将其选定为下一级故障线路。依据风险指标断开线路 L_{12-13} (16) 后，连锁故障风险评估结果如图 7 所示。可以看出，此时有 8 条交流线路的停运风险指标增大至 0.5 以上。



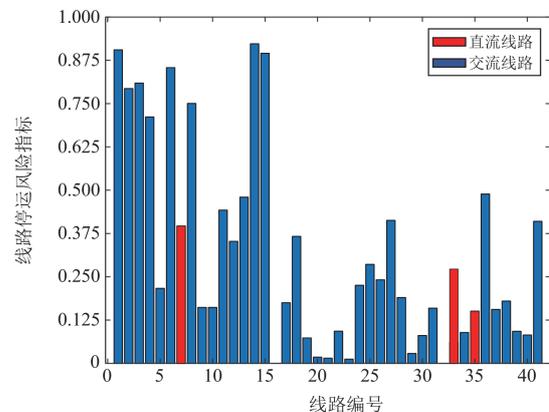
(a) 本文方法



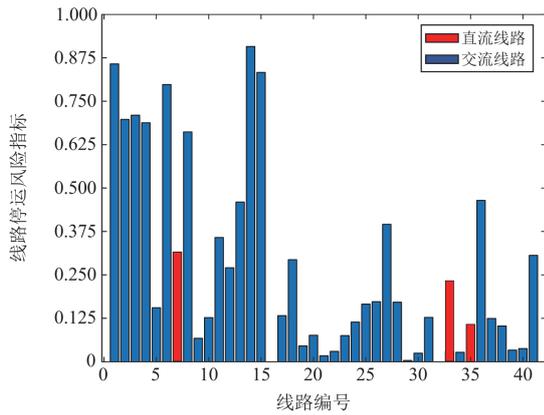
(b) 传统方法

图 6 断开 L_{23-24} (32) 的连锁故障风险评估结果

Fig. 6 Cascading fault risk assessment results after disconnecting L_{23-24} (32)



(a) 本文方法



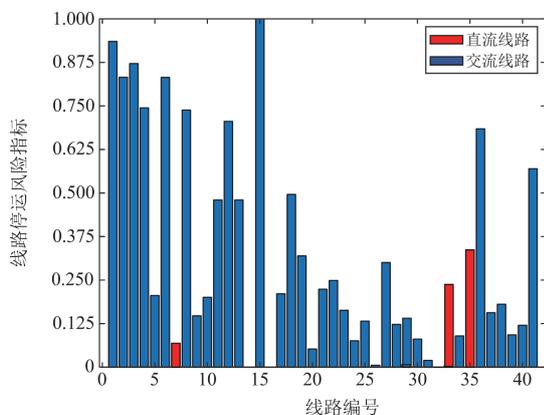
(b) 传统方法

图 7 断开 $L_{12-13}(16)$ 的连锁故障风险评估结果对比

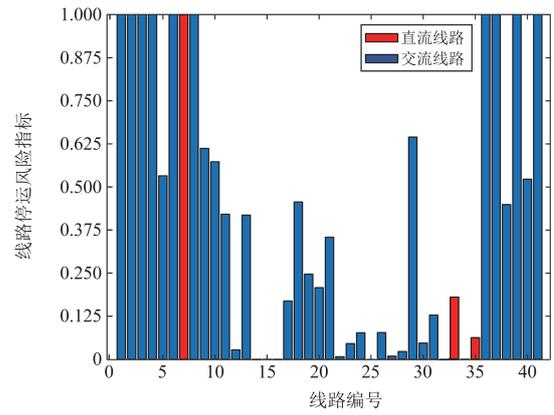
Fig. 7 Cascading fault risk assessment results after disconnecting $L_{12-13}(16)$

通过系统拓扑图, 可知线路 $L_{9-11}(13)$ 与线路 $L_{12-13}(16)$ 均断开后, G5 通过线路 $L_{9-10}(14)$ 向节点 16、17 处负荷输送功率, 线路 $L_{9-10}(14)$ 潮流压力增大, 成为停运风险指标最大的线路。因此, 选取 $L_{9-10}(14)$ 作为第三级故障线路将其断开, 连锁故障风险评估结果如图 8(a)所示。在第三级故障线路影响下, 此时交直流混联电网中停运风险高于 0.875 的交流线路有 2 条。通过选取停运风险最高的交流线路 $L_{4-12}(15)$ 作为第四级故障线路开断, 得到的风险评估结果如图 8(b)所示。

表 3 给出了本文方法与传统方法对各级故障下线路最高停运风险的对比结果。两者在对高危线路的停运风险评估结果上具有一致性。本文方法在初始故障下的线路最高停运风险值比传统方法高 1.98%, 在二级故障下指标值比传统方法高 3.84%, 分析结果证明本文方法的风险评估敏感度要优于传统方法。



(a) 断开 $L_{9-10}(14)$



(b) 断开 $L_{4-12}(15)$

图 8 多级线路断开的连锁故障风险评估结果

Fig. 8 Cascading fault risk assessment results after disconnecting multiple lines

表 3 各级故障下线路最高停运风险对比

Table 3 Comparison of maximum line outage risk at various levels of faults

线路停运风险指标	本文方法	传统方法
初始故障	0.925	0.907
二级故障	0.923	0.907
三级故障	1	0.963
四级故障	1	1

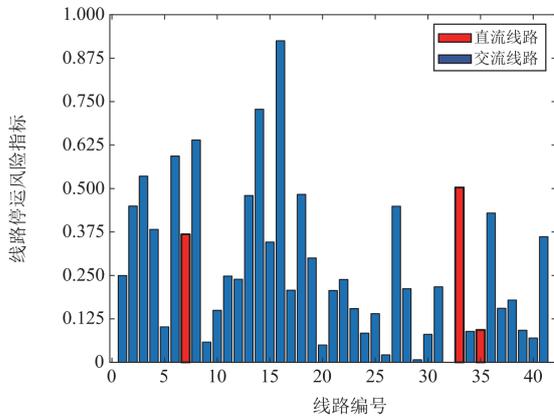
3.2 不同规模直流闭锁对连锁故障的影响

不同规模直流闭锁引发的连锁故障风险评估结果如图 9 所示, 具体风险指标如表 4 所示。

3.3 不同初始故障下的连锁故障风险评估

通过选取不同初始故障线路开展连锁故障风险评估, 得到的连锁故障序列及风险结果如表 5 所示。

由表 5 可知, 当初始故障发生在线路 1 处时, 本文方法的连锁故障风险为 0.774, 传统方法的连锁故障风险为 0.687, 意味着本文方法能找到对交直流混联电网危险性更高的连锁故障发展序列, 即



(a) 单直流闭锁

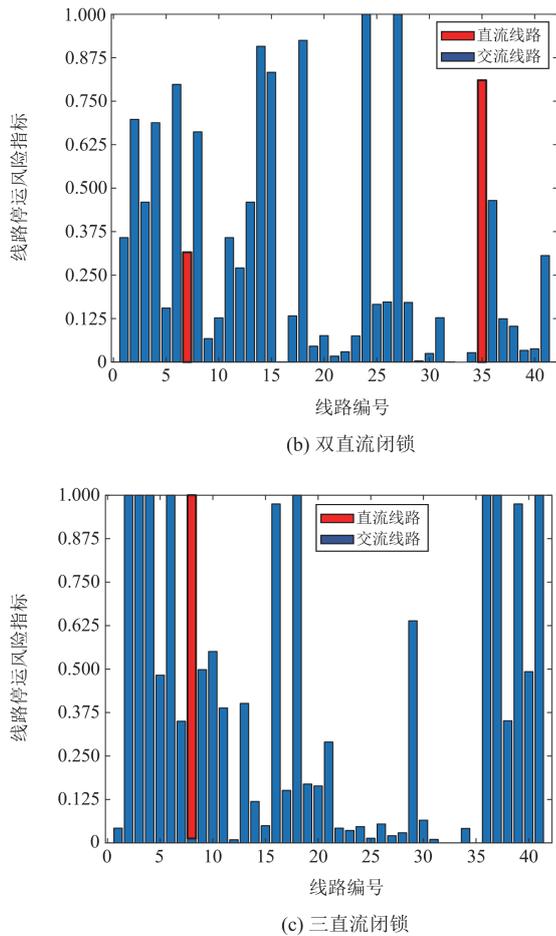


图9 不同规模直流闭锁的连锁故障风险评估结果
Fig. 9 Cascading fault risk assessment under different DC blocking conditions

表4 不同规模直流闭锁的线路停运风险指标值

Table 4 Line outage risk metrics under different DC blocking

直流闭锁场景	线路停运风险指标	
	平均风险	最大风险
单直流闭锁	0.264	0.925
双直流闭锁	0.319	1
三直流闭锁	0.445	1

表5 不同初始故障的连锁故障风险评估对比

Table 5 Comparison of cascading faults risk assessment with different initial faults

初始故障	连锁故障序列		连锁故障风险	
	传统方法	本文方法	传统方法	本文方法
1	1-14-15-7	1-18-3-14	0.687	0.774
6	6-18-9	6-18-3	0.635	0.709
10	10-32-16	10-32-12	0.593	0.654
14	14-15-7	14-15-36-26	0.396	0.441
18	18-9-36	18-3-14-36	0.591	0.650
23	23-17-35-12	23-17-14-36	0.619	0.661

1-18-3-14。本文方法辨识出来风险指标较传统方法提升了 12.67% $((0.774-0.687)/0.687)$ 。同理，当初始故障发生在线路 6、10、14、18、23 处时，本文方法风险指标较传统方法风险指标分别提升了 11.65%、10.28%、11.36%、9.98%和 6.79%，求得上述 6 个指标的提升平均值为 10.45%。

此外，通过参考文献[40]，可将故障风险指标的数值大小视为算法对连锁故障的敏感程度，本文借鉴其理论，将故障风险指标的数值大小视为辨识灵敏度。由此可得，相比传统算法，本文所提算法对交直流混联电网连锁故障的辨识灵敏度提升了 12.67%。结果表明本文方法计算的交直流混联电网连锁故障态势更为严重，符合多回交流线路停运和直流线路闭锁所引发的连锁故障蔓延趋势，本文方法更具可信度和合理性。

4 结论

本文提出了一种基于 SAO 算法的交直流混联电网连锁故障风险评估方法，结合理论建模、仿真分析及性能比较，验证了所提评估方法的有效性和合理性，相关结论如下所述。

1) 本文构建的两级指标体系能够综合反映交直流混联电网连锁故障在不同演化阶段下主导作用因素，SAO 算法的应用可保障指标权重设置的合理性，使其高危线路风险评估的敏感度相比传统方法提升 3.84%。

2) 本文方法能够有效评估不同规模的直流闭锁对交直流混联电网连锁故障的影响，并可基于不同初始故障，精准辨识风险较高的连锁故障序列，本文方法辨识出来的高危线路风险指标相比传统方法提升了 12.67%。

在后续研究中，将考虑直流输电系统控制策略的改进，深入探索抑制连锁故障蔓延的控保协同优化方法，综合校验所提风险评估方法在交直流混联电网的适用性，为进一步推动其应用奠定坚实的理论基础。

参考文献

[1] 林顺富, 李寅, 戴焯敏, 等. 考虑谐波耦合的多变流器并网系统建模及交直流谐波交互特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(10): 65-77.
LIN Shunfu, LI Yin, DAI Yemin, et al. Modeling of a multiple grid-connected-converter system considering harmonic coupling and analysis of AC/DC harmonic interaction characteristics[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(10): 65-77.

[2] 赖逸洋, 王增平, 王彤. 电流差动保护在柔直接入的

- 交流电网中适应性分析及改进措施研究[J]. 电力系统保护与控制, 2023, 51(3): 145-154.
- LAI Yiyang, WANG Zengping, WANG Tong. Adaptability analysis of current differential protection in an AC power grid with an MMC-HVDC and improvement measures[J]. Power System Protection and Control, 2023, 51(3): 145-154.
- [3] SU Changsheng, YIN Chunya, LI Fengting, et al. A novel recovery strategy to suppress subsequent commutation failure in an LCC-based HVDC[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2024, 9(1): 38-51.
- [4] 邓慧琼, 曾凡淦, 张晓飞, 等. 基于脆弱支路筛选的电网连锁故障多目标预防策略[J]. 电力工程技术, 2023, 42(2): 223-231.
- DENG Huiqiong, ZENG Fangan, ZHANG Xiaofei, et al. A multi-objective prevention strategy for grid cascading failure based on vulnerable lines screening[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(2): 223-231.
- [5] OUYANG Jinxin, YU Jianfeng, LONG Xiaoxuan, et al. Coordination control method to block cascading failure of a renewable generation power system under line dynamic security[J]. Protection and Control of Modern Power Systems, 2023, 8(1): 1-10.
- [6] 刘彤, 李少岩, 顾雪平, 等. 基于图注意力网络算法的电网连锁故障关键线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(15): 5448-5459.
- LIU Tong, LI Shaoyan, GU Xueping, et al. Critical line identification of cascading failures in power grid based on graph attention network algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(15): 5448-5459.
- [7] 莫石, 徐秋实, 卢子敬, 等. 模糊分割多目标风险框架下电网连锁故障运行风险评估[J]. 中国电力, 2024, 57(2): 41-48.
- MO Shi, XU Qiushi, LU Zijong, et al. Fuzzy partitioned multi-objective risk framework based operational risk assessment of cascading failure for power grid[J]. Electric Power, 2024, 57(2): 41-48.
- [8] 边晓燕, 杨云轶, 黄阮明, 等. 基于机电-电磁混合仿真的交直流混联受端电网连锁故障筛选指标及搜索策略[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(17): 6614-6628.
- BIAN Xiaoyan, YANG Yunyi, HUANG Ruanming, et al. Screening indices and search strategy for AC-DC hybrid receiving-end power grid cascading failures based on hybrid electromechanical-electromagnetic simulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(17): 6614-6628.
- [9] 张晶晶, 陈博进, 尉静慧, 等. 一种交直流系统连锁故障预测方法及风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(4): 125-132.
- ZHANG Jingjing, CHEN Bojin, WEI Jinghui, et al. AC-DC system cascading failure simulation method and risk assessment[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(4): 125-132.
- [10] DONG Xinzhou, GUAN Eryong, JING Liuming, et al. Simulation and analysis of cascading faults in hybrid AC/DC power grids[J]. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 2020, 115: 105492.
- [11] FEKRI M, NIKOUKAR J, GHAREHPETIAN G B. Vulnerability risk assessment of electrical energy transmission systems with the approach of identifying the initial events of cascading failures[J]. Electric Power Systems Research, 2023, 220: 109271.
- [12] ZHU Darui, CHENG Wenji, DUAN Jiandong, et al. Identifying and assessing risk of cascading failure sequence in AC/DC hybrid power grid based on non-cooperative game theory[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2022, 237: 109359.
- [13] 张晋铭, 欧阳森, 张杰宁, 等. 规模化屋顶光伏接入配电网的建设决策[J]. 电力自动化设备, 2024, 44(7): 287-294.
- ZHANG Jinming, OUYANG Sen, ZHANG Jiening, et al. Construction decision of large-scale roof top photovoltaic integrating into distribution network[J]. Electric Power Automation Equipment, 2024, 44(7): 287-294.
- [14] 孙天甲, 刘海洋. 大规模交直流混联电网送端交流故障对受端电网的影响[J]. 浙江电力, 2022, 41(7): 18-24.
- SUN Tianjia, LIU Haiyang. Influence of AC fault at sending end on receiving-end networks of large-scale AC/DC hybrid power grid[J]. Zhejiang Electric Power, 2022, 41(7): 18-24.
- [15] 黄楚茵, 夏成军. 一种交直流混联系统连锁故障链搜索方法[J]. 电气自动化, 2022, 44(5): 95-97, 101.
- HUANG Chuyin, XIA Chengjun. A search method for cascading fault chain of AC/DC hybrid system[J]. Electrical Automation, 2022, 44(5): 95-97, 101.
- [16] 马燕峰, 骆泽榕, 赵书强, 等. 基于改进蒙特卡洛混合抽样的含风光电力系统风险评估[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(9): 75-83.
- MA Yanfeng, LUO Zerong, ZHAO Shuqiang, et al. Risk assessment of a power system containing wind power and photovoltaic based on improved Monte Carlo mixed sampling[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(9): 75-83.
- [17] DAI Yitian, NOEBELS M, PREECE R, et al. Risk assessment and mitigation of cascading failures using critical line sensitivities[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2024, 39(2): 3937-3948.
- [18] 孙志媛, 梁水莹, 傅裕斌. 基于 PSNodeRank 算法的电力系统关键节点辨识方法[J]. 电力科学与技术学报,

- 2020, 35(2): 157-162.
- SUN Zhiyuan, LIANG Shuiying, FU Yubin. Research on identification method of key nodes of power system based on PSNodeRank algorithm[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(2): 157-162.
- [19] 邓祥力, 王伟, 刘世明. 基于博弈强化学习的电网故障序列搜索及防御策略研究[J]. 电网技术, 2021, 45(12): 4856-4868.
- DENG Xiangli, WANG Wei, LIU Shiming. Research on searching of fault sequence and defense strategy in power grid based on game reinforcement learning[J]. Power System Technology, 2021, 45(12): 4856-4868.
- [20] 张东辉, 陈新, 张旸, 等. 基于有源节点序阻抗模型的风电场稳定性分析及其振荡参与风险评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(10): 3832-3844.
- ZHANG Donghui, CHEN Xin, ZHANG Yang, et al. Stability analysis and resonance participation risk assessment of wind farm based on active node sequence impedance model[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(10): 3832-3844.
- [21] 周一辰, 孙佳辉, 李永刚, 等. 一种概率-Voronoi 自适应高维模型表达的新能源电力系统小干扰失稳风险评估方法[J]. 中国电机工程学报, 2024, 44(3): 932-948.
- ZHOU Yichen, SUN Jiahui, LI Yonggang, et al. A probabilistic-Voronoi adaptive high-dimensional model to evaluate small signal instability risk of renewable power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(3): 932-948.
- [22] 曹靖洺, 董朝宇, 王睿, 等. MMC-HVDC 交直流混联系统小扰动稳定域迭代求解和形态分析[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(16): 40-50.
- CAO Jingming, DONG Chaoyu, WANG Rui, et al. Iterative solving and morphological analysis of small-signal stability region for hybrid AC/DC system with MMC-HVDC[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(16): 40-50.
- [23] 束洪春, 邵宗学, 赵伟, 等. 含柔性直流的交直流混联电力系统紧急频率控制研究[J]. 电工技术学报, 2023, 38(20): 5590-5604.
- SHU Hongchun, SHAO Zongxue, ZHAO Wei, et al. Research on emergency power control of AC-DC hybrid power system with flexible DC[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(20): 5590-5604.
- [24] PARK B, SU Xiaowen, SUN Kai. An enhanced OPA model: incorporating dynamically induced cascading failures[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2022, 37(6): 4962-4965.
- [25] 薛峰, 彭慧敏, 王玉, 等. 多馈入直流换相失败与同步电网交互影响机理研究评述[J]. 高电压技术, 2024, 50(7): 2747-2759.
- XUE Feng, PENG Huimin, WANG Yu, et al. Review on the mechanism of the interaction between multi-infeed HVDC commutation failure and synchronous grid[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(7): 2747-2759.
- [26] 李妍莎, 蔡晔, 曹一家, 等. 基于潮流转移相似性的连锁故障高危环节辨识[J/OL]. 中国电机工程学报: 1-12 [2024-08-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230919.1451.013.html>.
- LI Yansha, CAI Ye, CAO Yijia, et al. High-risk links identification for cascading failures based on the power flow transfer similarity[J/OL]. Proceedings of the CSEE: 1-12[2024-08-02]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.2107.TM.20230919.1451.013.html>.
- [27] 谢李为, 李勇, 罗隆福, 等. 基于复杂网络与运行因素的电网薄弱点辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(4): 83-91.
- XIE Liwei, LI Yong, LUO Longfu, et al. A vulnerable points identification method based on complex network theory and an operation index[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(4): 83-91.
- [28] 张雨乐, 尹纯亚, 李凤婷, 等. 考虑多馈入系统无功电压特性的同时换相失败评估方法[J]. 电力系统保护与控制, 2024, 52(21): 170-187.
- ZHANG Yule, YIN Chunya, LI Fengting, et al. A simultaneous commutation failure assessment method considering reactive power and voltage characteristics in multi-infeed HVDC systems[J]. Power System Protection and Control, 2024, 52(21): 170-187.
- [29] 王超, 常海军, 摆世彬, 等. 高比例新能源与多直流场景下连锁故障防控策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(7): 49-57.
- WANG Chao, CHANG Haijun, BAI Shibin, et al. Study on the prevention and control strategy of cascading failure of bulk power system with multi-HVDC and high proportion of renewable energy[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(7): 49-57.
- [30] CHEN Changsheng, MA Shiyang, SUN Kai, et al. Mitigation of cascading outages by breaking inter-regional linkages in the interaction graph[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2023, 38(2): 1501-1511.
- [31] 周智行, 石立宝. 考虑风电不确定性及系统调频作用的电网连锁故障风险评估[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(10): 3305-3316, 3657.
- ZHOU Zhihang, SHI Libao. Risk assessment of power system cascading failure considering wind power uncertainty and system frequency modulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(10): 3305-3316, 3657.

- [32] 耿跃华, 李慧东, 葛磊蛟, 等. 电子式电流互感器电能贸易结算风险的灰色关联度评估方法[J]. 电测与仪表, 2021, 58(12): 57-62.
GENG Yuehua, LI Huidong, GE Leijiao, et al. A risk assessment evaluation method for trade settlement of electronic current transformers based on grey relevance degree algorithm[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2021, 58(12): 57-62.
- [33] 张明, 夏若平, 徐诗露, 等. 主客观变异系数组合赋权的电能质量综合评估方法[J]. 现代电力, 2023, 40(4): 441-447.
ZHANG Ming, XIA Ruoping, XU Shilu, et al. Comprehensive evaluation of power quality based on variation coefficient synthetic weighting of subjective and objective weights[J]. Modern Electric Power, 2023, 40(4): 441-447.
- [34] WANG Baohua, ZHANG Shun. A subjective and objective integration approach of determining weights for trustworthy measurement[J]. IEEE Access, 2018, 6: 25829-25835.
- [35] 王威, 谢丽蓉, 张琦, 等. 基于优化赋权模型预测控制的风储协调策略研究[J]. 太阳能学报, 2024, 45(5): 260-266.
WANG Wei, XIE Lirong, ZHANG Qi, et al. Research on wind storage coordination strategy based on predictive control of optimization empowerment model[J]. Acta Energiae Solaris Sinica, 2024, 45(5): 260-266.
- [36] XIAO Yaning, CUI Hao, ABDELAZIM G H, et al. MSAO: a multi-strategy boosted snow ablation optimizer for global optimization and real-world engineering application[J]. Advanced Engineering Informatics, 2024, 61: 102464.
- [37] DENG Lingyun, LIU Sanyang. Snow ablation optimizer: a novel metaheuristic technique for numerical optimization and engineering design[J]. Expert Systems with Applications, 2023, 225: 120069.
- [38] JIA Heming, YOU Fangkai, WU Di, et al. Improved snow ablation optimizer with heat transfer and condensation strategy for global optimization problem[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2023, 10(6): 2177-2199.
- [39] MAMPILLY B J, SHEEBA V S. Detection and classification of power system fault in IEEE 30 bus network using wavelet transform and novel hybrid bees Bayesian optimization algorithm based improved convolution neural network (ICNN)[J]. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 2023, 60: 103413.
- [40] 徐箭, 贺中豪, 廖思阳, 等. 考虑风电机组故障电压穿越特性的连锁故障关键线路辨识[J]. 电力系统自动化, 2024, 48(2): 82-94.
XU Jian, HE Zhonghao, LIAO Siyang, et al. Identification of critical lines for cascading failures considering fault voltage ride-through characteristics of wind turbines[J]. Automation of Electric Power Systems, 2024, 48(2): 82-94.

收稿日期: 2024-04-11; 修回日期: 2024-10-29

作者简介:

王英英(1982—), 女, 博士, 正高级工程师, 研究方向为交直流电网保护与控制; E-mail: 15926317495@126.com

陈磊(1982—), 男, 通信作者, 博士, 副教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统故障防御与稳定控制。E-mail: chen_lei@whu.edu.cn

(编辑 张颖)