

文章编号:1672-3961(2025)05-0040-11

DOI:10.6040/j.issn.1672-3961.0.2024.343

考虑初始故障状态和继发故障风险的关键线路辨识方法

李长城¹, 罗燕婷^{1*}, 王东宏², 康海鹏³, 潘松¹

(1.广西大学电气工程学院, 广西南宁 530004; 2.广西电网有限责任公司玉林供电局, 广西玉林 537006; 3.电力传输与功率变换控制教育部重点实验室(上海交通大学), 上海 200240)

摘要:为了有效识别复杂电力系统中的关键环节,提出一种考虑初始故障状态和继发故障风险的关键线路辨识方法。在初始故障发生阶段,基于加权潮流熵、加权网架熵和加权潮流冲击熵3个评估系统状态的指标表征初始故障水平;结合负荷损失风险与网架损失风险2个表征继发故障风险的指标,评估电网故障的演化发展;采用客观熵权法计算各个指标的权重,建立电网关键线路综合辨识指标。以IEEE 118节点测试系统作为算例进行仿真,结果表明,本研究方法辨识得到的关键线路受到攻击后,系统网络效能降幅最大且相较于其他方法多为最低,验证了所提方法的有效性。

关键词:初始故障;继发故障;网架损失风险;熵权法;网络效能

中图分类号:TM71

文献标志码:A

引用格式:李长城,罗燕婷,王东宏,等.考虑初始故障状态和继发故障风险的关键线路辨识方法[J].山东大学学报(工学版),2025,55(5):40-50.

LI Changcheng, LUO Yanting, WANG Donghong, et al. A critical line identification method considering source fault state and secondary fault risk[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2025, 55(5):40-50.

A critical line identification method considering source fault state and secondary fault risk

LI Changcheng¹, LUO Yanting^{1*}, WANG Donghong², KANG Haipeng³, PAN Song¹

(1. School of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, Guangxi, China; 2. Yulin Power Supply Bureau of Guangxi Power Grid Co., Ltd., Yulin 537006, Guangxi, China; 3. Key Laboratory of Control of Power Transmission and Conversion of the Ministry of Education (Shanghai Jiao Tong University), Shanghai 200240, China)

Abstract: To effectively identify the key links in complex power system, a critical line identification method considering source fault state and secondary fault risk was proposed. In the source fault phase, weighted power flow entropy, weighted grid entropy, and weighted power flow impact entropy—three indicators for evaluating the system state—were proposed to characterize the source fault level. Load loss risk and grid loss risk—two indicators for characterizing the secondary fault risk—were combined to evaluate the development of power system faults. The objective entropy weight method determined each metric's weight, producing composite indicators for critical line identification. Simulations were conducted on the IEEE 118-bus test system. The results demonstrated that attacks on the critical lines identified by this method led to the largest decline in system network efficiency, which was consistently lower compared to other methods, confirming the validity of the proposed approach.

Keywords: source fault; secondary fault; grid loss risk; entropy weight method; network efficiency

收稿日期:2024-12-30

基金项目:广西自然科学基金资助项目(2025GXNSFAA069510)

第一作者简介:李长城(1989—),男,广西玉林人,助理教授,硕士生导师,博士,主要研究方向为电力系统保护与控制、恢复等。

E-mail:lichangcheng@gxu.edu.cn

* 通信作者简介:罗燕婷(1999—),女,广西南宁人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统故障预防与控制。

E-mail:2212392083@st.gxu.edu.cn

0 引言

随着电力行业发展的全面推进^[1],电网的复杂程度越来越高,电力系统安全稳定运行时时刻面临挑战。2019年,英国电网发生大规模停电,影响约100万人^[2];2021年,欧洲地区发生两起解列事故^[3-4];2023年,巴西因线路保护误动跳闸引起一系列连锁反应,导致电网解列^[5]。多数停电事件是由于关键部件崩溃,功率传输能力受到限制,潮流大规模变化使电网安全运行水平急剧下降,继而引发连锁反应,导致大停电,造成严重的社会影响^[6-9]。因此,为提高电网的安全性和稳定性,快速准确识别电网的关键环节,定位诱发故障或加剧故障传播的关键线路具有重要意义。

关于电力系统关键线路的研究成果较为丰富。一类研究以电网的物理特征与潮流运行为切入点,通过分析系统运行特性评估线路关键性,例如:文献[10]通过直流潮流法计算依次断开的系统支路潮流增量,使用加权潮流冲击熵定义脆弱环节;文献[11]结合实际电网潮流与绝对潮流等因素对电力系统关键环节进行评估;文献[12]综合分析系统负载率与无功潮流变化情况,构建关键线路辨识指标;文献[13]利用线路潮流冲击带来的熵变特征建立辨识流程,给出线路指标。区别于潮流状态的分析重点,另一类研究主要以复杂网络理论角度分析电力系统的拓扑特征,提出度中心性^[14]、介数^[15]等指标,建立无标度网络模型^[16]等辨识电网的脆弱环节,例如:文献[17]基于小世界拓扑模型提出系统脆弱性评估的综合指标;文献[18]构建复杂网络理论中的接近中心性、线路度数等作为抗毁性指标,辨识关键节点与线路。有学者提出将电网运行状态与网架拓扑因素综合考虑,结合系统其他特征构建综合辨识指标,如文献[19]通过区分线路潮流运行范围,提出停运概率熵,综合评价停运概率分布与变化在辨识电力系统关键线路的有效性,结合网架结构熵提出辨识方法。以上方法多侧重于复杂网架或潮流状态,分析不够全面,仅以初始故障发生后电网的变化情况作为评估重点,未把后续继发故障情况考虑在内。

部分学者提出基于故障演化过程辨识关键线路。文献[20]建立连锁故障模型,配合随机化学法生成故障链集合,利用故障链聚类算法得出脆弱线路;文献[21]通过分析极端天气线路故障率,得到

事故链发展的负荷损失风险,基于故障网络图筛选关键线路。在考虑事故演化的电网脆弱性分析中,有研究结合深度学习技术分析线路脆弱度,如文献[22]将线路风险作为样本集,基于图注意力网络算法训练关键线路辨识模型。上述研究多基于故障链角度提出电力系统关键环节辨识指标,分析重点多从事务的发展演变筛选关键线路,并多以故障链的负荷损失风险作为关键性的考量条件,未把初始故障状态纳入分析。甄别电力系统中易引发故障与助推故障传播的关键环节具有重要意义,初始故障发生引起的电网状态波动及继发故障演化的风险程度都会影响关键线路的评估结果,综合考虑故障发展阶段可以从全局角度分析系统脆弱性。

针对现有关键线路研究的不足,本研究提出考虑初始故障状态和继发故障风险的关键线路辨识方法。在初始故障阶段采用加权潮流熵、加权网架结构熵与加权潮流冲击熵指标,以表征初始故障状态;在继发故障阶段采用负荷损失和结构损失的风险评估指标,以表征事故的演化损失程度。运用客观熵权法计算各指标权重,建立关键线路的综合辨识指标。本研究以IEEE118节点测试系统为算例进行仿真,通过网络效能评估方法验证所提综合指标的有效性。

1 电网故障阶段与关键线路辨识机制

在电力系统运行分析中,通常将故障演化过程视为由局部扰动引发的系统级失稳现象,其发展可划分为多个阶段,每一阶段均涉及系统参数的动态变化、保护与控制策略响应及故障传播机制。研究故障的阶段特征,深入理解其形成机理,综合辨识关键线路,可为系统稳定性评估、防控策略优化及应急响应提供理论支撑。研究表明,故障引发大停电过程可分为初始故障、继发故障和快速崩溃3个阶段^[23]。

(1)初始故障:故障发生前系统参数在正常运行范围内,若出现系统负载较重、保护装置存在一定概率的隐患或其他人为扰动因素等,可能直接导致系统元件发生故障,造成系统状态变化。

(2)继发故障:系统保护动作切除初始故障元件后,可能导致相邻线路的保护装置误动作,系统发生如负荷转移不平衡等情况,传输网络出现拥塞

与过载,接连导致其他元件发生故障,使事故进一步扩大。

(3)快速崩溃:随着故障在系统中传播,电力系统稳定性逐步恶化。此时,电网内部的参数波动可能达到临界值,短时间内出现大量元件退出运行,导致系统无法维持稳定运行而崩溃。

系统故障阶段的简要关系如图1所示。其中, T^0 为初始故障元件,故障发生原因可能为负载较

重、人为操作或网络攻击等; $T_m^1, T_m^2, \dots, T_m^n$ 为 m 个继发故障元件,继发故障阶段可能产生 n 个环节;实线表示上一元件对下一元件的直接影响;虚线表示上一元件可能影响下一元件,如某一线路断开造成其他线路过载,但线路保护是否动作与该线路的过载量及保护整定值有关。初始故障发生引起后续故障演化,使系统稳定性下降,最终导致电网快速崩溃,发生大停电事故。

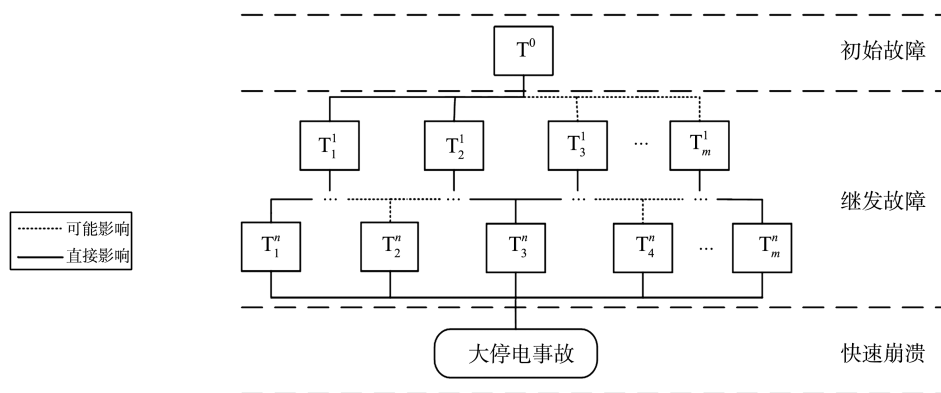


图1 故障阶段特性示意图

Fig.1 Schematic diagram of fault stage characteristics

在电力系统中,准确识别关键线路对保障系统稳定性和安全性至关重要。基于故障阶段特性,本研究将重点关注关键线路辨识。关键线路辨识流程为:定义关键线路标准,明确关键性的主要特征;收集电力系统运行状态、负荷分布等数据;选择适当的指标评估线路的关键性;采用综合评估方法对各指标进行评价,得到综合评估结果;根据综合评估结果对关键线路进行筛选,验证辨识结果的准确性与有效性。

现有研究提供了多种关于关键线路辨识的方法^[10-23],如文献^[23]利用潮流转移相似特性,将初始故障阶段与继发故障阶段的高危线路分开辨识,分析不同阶段的线路关键性。然而,电力系统作为一个复杂网络,呈现高度连通性与不确定性,仅考虑故障单一阶段无法从全局角度分析事故严重性。现有关键线路研究鲜有结合初始故障与继发故障情况特征进行综合分析的。

为此,本研究提出基于电网状态变化与继发故障演化风险的关键线路综合评估方法,通过量化初始故障引发的状态波动及继发故障传播的风险程度,精准甄别电力系统中易引发故障与持续助推故障传播的关键环节。该方法区别于传统关键线路评估中仅关注单一故障阶段的局限性,为电力系统稳定性分析与故障防控提供更全面的理

论依据。

2 初始故障阶段状态指标

根据电网连锁故障特征,初始故障环节涵盖的潮流状态、网架变化等因素构成停电连锁反应序列的驱动要素,在事故初始阶段具备关键作用。初始故障阶段中,不同的停电因素影响线路的关键程度,各种影响因素通过相互作用增加其他相关事故发生的可能性,也说明初始故障阶段不仅仅是事件的触发点,更是整条事故链中的关键环节。结合历史研究数据可知,电力系统负载率分布情况、网架变化都是引发停电的因素;澳大利亚“9·28”大停电事故和英国“8·9”大停电事故中,潮流大幅度无序转移造成线路过载跳闸或机组脱网是引起停电的关键环节^[24];巴基斯坦的4次停电事故与网架薄弱密不可分,传输通道线路断开导致地区电网断面解列^[25],加剧事故影响。

熵是描述复杂系统状态的物理量,与概率分布函数密切相关,具有普遍适用性。目前在各领域已有许多研究使用或涉及熵的概念,用以研究离散型或连续型等不同性质的对象。电力系统可靠性理论以概率论为基础,与熵原理存在紧密联系^[26]。熵越高,表示系统的不确定性越大,存在的信息量越

多,反之则说明系统有序性越强。传统潮流熵忽略各区间线路负载率不同的情况,仅考虑潮流变化集中于高负载率区间或低负载率区间的分布均衡性,容易出现计算潮流熵相等的结果,即进入自组织临界态的概率相等。然而,相较于低负载率区间的线路,高负载线路受攻击后更易发生故障。同理,对于传统的网架结构熵,节点的度集中分布在高度数区间或低度数区间是不符合实际情况的。因此,为了更全面地评估初始故障状态下的线路脆弱性,本研究将潮流变化、冲击强度与结构特征作为初始故障阶段评价指标,使用加权熵函数进行计算分析。

2.1 加权潮流熵

电网中潮流出现分布不均匀时有两种情况:一种是部分线路的负载率偏低,另一种是线路的负载率偏高。潮流熵可定量描述线路之间潮流分布过程的均衡性。使用加权函数综合考虑各区间线路负载率的分布,更能全面表征发生故障后线路潮流对电网的影响。定义在初始阶段故障状态下线路*i*最大有功传输容量为 P_{imax} ,实际潮流为 P_{i0} ,总线路数为 N ,则线路*i*负载率

$$\eta_i = \left| \frac{P_{i0}}{P_{imax}} \right|, \quad i = 1, 2, \dots, N. \quad (1)$$

设一常数序列 D^1 ,存在唯一整数 k ,使 $\eta_i \in (D_k^1, D_{k+1}^1]$, $k \in \{1, 2, \dots, n_s\}$,其中 n_s 为序列分区间数,则潮流处于该区间的概率

$$Y_\eta(k) = \frac{l_k}{\sum_{k=1}^{n_s} l_k}, \quad (2)$$

式中 l_k 为该区间线路数。

初始故障阶段线路 l_1 故障状态下加权潮流熵^[27]

$$H_{po}^{l_1} = - \sum_{k=1}^{n_s} G(k) Y_\eta(k) \ln Y_\eta(k), \quad (3)$$

式中, $G(k)$ 为平均负载率, $G(k) = \frac{1}{l_k} \sum_{i=1}^{l_k} \eta_i$ 。 $H_{po}^{l_1}$ 从负载率的角度量化故障后各线路的潮流分布,可有效表明线路处于重载或轻载的情况。 $H_{po}^{l_1}$ 越大,说明目标线路断开时造成的电网潮流分布越不均匀,意味着此时系统的跳闸概率越大。

2.2 加权网架结构熵

在实际电网中,节点作为各线路的连接环节,在电能传输中表现出重要作用。当承担大量传输负荷的节点或与其连接的电网支路发生故障时,系

统中会出现一定程度的潮流变化,各节点间的电能传输不均匀性扩大,导致连锁故障概率增加。在复杂网络理论中,节点的度越大,该节点在网络中的位置越关键。网架结构熵可以描述节点的度分布均衡性,使用加权网架结构熵可以有效反映系统进入自组织临界状态的概率。定义网架中节点*r*的度 d_r 为其他节点与之相连的总数,则

$$d_r = \sum_t^{n_d-1} b_{r-t}, \quad (4)$$

式中: n_d 为总节点数; b_{r-t} 为表示节点连接关系的参数,当节点*r*与节点*t*($t \neq r$)连接时, $b_{r-t} = 1$,当节点*r*与节点*t*不连接时, $b_{r-t} = 0$ 。

设一常数序列 D^2 ,存在唯一整数 a ,使 $d_r \in (D_a^2, D_{a+1}^2]$, $a \in \{1, 2, \dots, n_f\}$,其中 n_f 为序列分区间数,则节点的度处于该区间的概率

$$Y_d(a) = \frac{m_a}{\sum_{a=1}^{n_f} m_a}, \quad (5)$$

式中 m_a 为该区间节点数。

初始故障阶段线路 l_1 故障状态下加权网架结构熵^[28]

$$H_{st}^{l_1} = - \sum_{a=1}^{n_f} W(a) Y_d(a) \ln Y_d(a), \quad (6)$$

式中, $W(a)$ 为平均度, $W(a) = \frac{1}{m_a} \sum_{r=1}^{m_a} d_r$ 。 $H_{st}^{l_1}$ 可有效衡量故障发生后电网拓扑的均匀程度。 $H_{st}^{l_1}$ 越大,说明目标线路停运对系统进入自组织临界状态的影响越大,代表线路在电网结构中起着更加重要的枢纽作用,可综合反映线路与拓扑结构的紧密联系度。

2.3 加权潮流冲击熵

系统遭到攻击时会造成电网原始分布状态扰动,电流与功率的传播路径发生显著偏移与重组,进而触发电网中潮流状态的重新分配与调整。潮流冲击熵可以反映潮流变化对电网内部的突击性影响,使用加权函数可以更直观、全面地反映潮流转移变化情况对线路的冲击程度。定义在初始阶段故障状态下,其他线路*i*对故障线路分担的潮流转移量

$$\Delta P_i = \begin{cases} |P_{i,1}| - |P_{i,0}|, & |P_{i,1}| \geq |P_{i,0}| \\ 0, & |P_{i,1}| < |P_{i,0}| \end{cases}, \quad (7)$$

式中, $P_{i,1}$ 为出现故障线路后线路*i*的有功潮流, $P_{i,0}$ 为正常运行状态下线路*i*的初始有功潮流。故障线路出现对其他线路*i*的潮流转移冲击率

$$\sigma_i = \frac{\Delta P_i}{\sum_{i=1}^N \Delta P_i} \quad (8)$$

设一常数序列 D^3 , 存在唯一整数 g , 使 $\sigma_i \in (D_g^3, D_{g+1}^3]$, $g \in \{1, 2, \dots, n_c\}$, 其中 n_c 为序列分区间数, 则潮流转移冲击率处于该区间的概率

$$Y_\sigma(g) = \frac{l'_g}{\sum_{g=1}^{n_c} l'_g} \quad (9)$$

式中 l'_g 为该区间线路数。

在初始故障阶段线路 l_1 故障状态下加权潮流冲击熵^[29]

$$H_{\text{im},0}^{l_1} = - \sum_{g=1}^{n_c} \frac{Y_\sigma(g) \ln Y_\sigma(g)}{F(g)} \quad (10)$$

式中, $F(g)$ 为平均潮流转移冲击率, $F(g) = \frac{1}{l'_g} \sum_{i=1}^{l'_g} \sigma_i$ 。 $H_{\text{im},0}^{l_1}$ 表明目标线路停运时其他支路的受冲击情况, 以潮流变化率作为事件发生概率的评判标准, $H_{\text{im},0}^{l_1}$ 越小, 说明线路故障造成的潮流冲击越大, 转移到其他线路的潮流越不均衡, 对负载率小的支路易造成严重冲击, 使线路过载, 不利于电网的稳定运行。为统一量化标准, 本研究定义 $H_{\text{im}}^{l_1}$ 为 $H_{\text{im},0}^{l_1}$ 的倒数, 用 $H_{\text{im}}^{l_1}$ 作为评价指标。

初始故障阶段建立的 3 种指标侧重点各有不同: 加权潮流熵注重潮流的分布结果, 关注系统潮流的稳定性, 从负荷分配角度对线路进行评估; 加权网架结构熵着眼于系统的拓扑性质, 关注网络结构的复杂程度, 区别于以潮流为基础的评价指标; 加权潮流冲击熵关注潮流转移变化情况, 在一定程度上展现对元件故障的响应情况。通过结合这 3 个指标, 从潮流分布情况、变化结果及网架结构 3 个方面对电力系统进行全面分析, 可以更加全面、准确地辨识电力系统中的关键线路。

3 继发故障阶段风险指标

连锁故障是由一个元件或线路停止运行引起的一系列复杂动态过程, 继发故障表征故障链演化行为。故障点潮流转移到一网点, 使其他元件或线路过载越限, 继电保护装置动作, 随后该处潮流继续向另一网点转移, 引起一系列崩溃现象, 最终导致大停电发生。在考察事故情况时, 不仅需要考虑到线路单一阶段故障的潮流转移或结构变化, 还需要

对后继故障发生的一系列风险进行演化评估。风险评估方法综合考虑系统的不确定性与故障后果的严重度, 继发故障阶段风险计算模拟流程如图 2 所示。

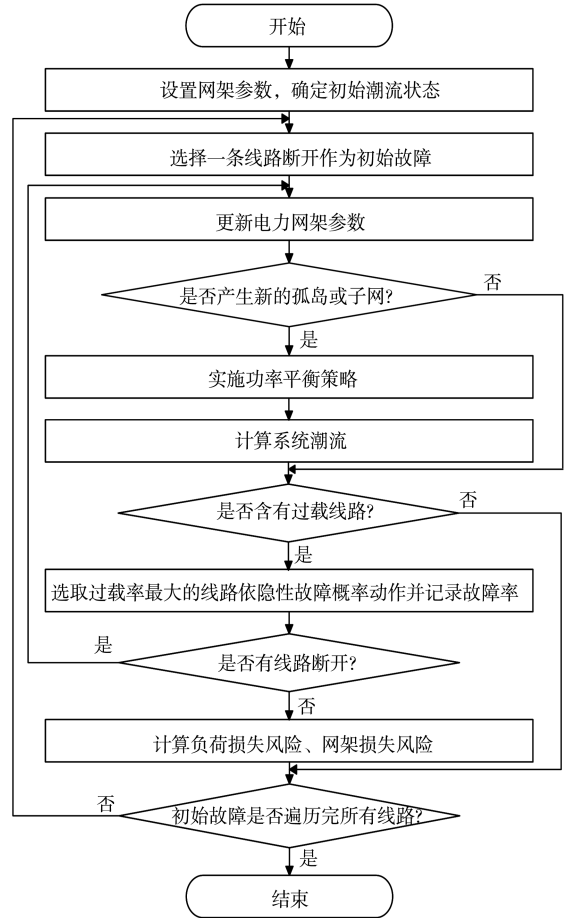


图 2 继发故障阶段风险计算模拟流程

Fig.2 The risk calculation and simulation process of the secondary fault

本研究在继发故障演化阶段考虑线路运行可靠性模型^[19], 提出基于负荷损失与结构损失的继发故障风险评估指标。线路运行可靠性模型为

$$Y_{q,e} = \begin{cases} Y_0, & P_q \leq P_{q,\text{limit}} \\ e^{\frac{\ln(1+Y_1-Y_0) \cdot \frac{P_q - P_{q,\text{limit}}}{P_{q,\text{max}} - P_{q,\text{limit}}}}{P_{q,\text{max}} - P_{q,\text{limit}}}} - (1-Y_0), & P_{q,\text{limit}} < P_q < P_{q,\text{max}} \\ Y_1, & P_q \geq P_{q,\text{max}} \end{cases} \quad (11)$$

式中, $Y_{q,e}$ 为线路 q 发生事故的概率, Y_0 为继电保护的隐性故障概率, P_q 为线路 q 的实时潮流, $P_{q,\text{limit}}$ 为线路 q 正常运行时的极限功率, $P_{q,\text{max}}$ 为线路 q 的传输极限功率, Y_1 为线路超出传输极限功率时线路断开的故障概率。

若当线路 i 故障, 有其他线路按故障概率断开, 则此次事故概率

$$Y_e^i = \prod_{l \in \Omega_{fi}} Y_{l,e}, \quad (12)$$

式中: $Y_{l,e}$ 为初始故障条件线路 i 故障下, 当前线路 l 的停运概率; Ω_{fi} 为继发故障阶段故障线路集合。 $Y_{l,e} = 1$ 代表线路 l 实时功率已超过运行极限, 线路 l 完全停运, 对应故障发展过程中最恶劣的情况。 $Y_e^i = 1$ 即事故链所有线路全部跳闸, 造成的损失与影响最严重。

在连锁故障阶段演化过程中, 定义负荷损失风险 R_{load}^i 与网架损失风险 R_{stru}^i 分别为

$$R_{load}^i = Y_e^i \cdot \sum_{r \in n_d} P_{r,ldcut}^i, \quad (13)$$

$$R_{stru}^i = Y_e^i \cdot M_{\Omega}^i, \quad (14)$$

式中: $P_{r,ldcut}^i$ 为线路 i 作为初始故障时, 节点 r 处的切负荷量; M_{Ω}^i 为继发故障阶段事故链中的线路数。

$P_{r,ldcut}^i$ 越大, 意味着线路 i 断开影响系统内重要负荷越多, 切除线路越多, 代表后续故障发展使系统网架破碎越严重。 R_{load}^i 与 R_{stru}^i 表征电网发生连锁故障的损失风险, 量化评估事故发生概率与后果。 R_{load}^i 与 R_{stru}^i 越大, 线路 i 断开导致的系统潜在安全威胁和可能的损失越大。

4 基于熵权法的关键线路综合辨识

熵权法是一种基于信息熵理论的客观赋权法, 可在多指标体系中应用。该方法综合考虑输入内容的客观信息与内在规律的联系, 避免主观权重的随意性和偏差, 通过科学计算的方法量化每个指标在决策中的影响程度。因此, 本研究采用熵权法计算各指标权重, 步骤如下。

(1) 收集初始数据, 建立评价矩阵

$$A = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & \cdots & A_{1n} \\ A_{21} & A_{22} & \cdots & A_{2n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_{m1} & A_{m2} & \cdots & A_{mn} \end{bmatrix}, \quad (15)$$

式中 A_{mn} 为第 m 条线路的第 n 个指标。

(2) 为了消除不同指标的量纲差异, 对所得指标进行标准化处理, 计算式为

$$E_{mn} = \frac{A_{mn} - A_{n,\min}}{A_{n,\max} - A_{n,\min}}, \quad (16)$$

式中, E_{mn} 为第 m 条线路第 n 个指标的归一化值, $A_{n,\min}$ 为第 n 个指标的最小值, $A_{n,\max}$ 为第 n 个指标的最大值。

(3) 通过信息熵计算指标权重, 计算式为

$$\begin{cases} V_{mn} = \frac{E_{mn}}{\sum_{m=1}^{n_l} E_{mn}} \\ h_n = \frac{-\sum_{m=1}^{n_l} V_{mn} \ln V_{mn}}{\ln n_l} \\ w_n = \frac{1 - h_n}{\sum_{n=1}^{z_s} (1 - h_n)} \end{cases}, \quad (17)$$

式中, V_{mn} 为指标占比, h_n 为线路各指标的信息熵, w_n 为评价指标所得权重, z_s 为指标总数。通过 h_n 计算指标的无序度, h_n 越大, 指标的信息量越低, 意味着该指标赋予的权重越小。

(4) 利用熵权法的计算构建第 m 条线路的综合指标

$$E_{ci}^m = w_1 H_{po}^m + w_2 H_{st}^m + w_3 H_{im}^m + w_4 R_{load}^m + w_5 R_{stru}^m. \quad (18)$$

本研究使用综合指标识别关键线路的步骤如下。辨识流程如图 3 所示。

(1) 选择一条线路断开作为初始故障, 计算加权潮流熵、加权网架熵与加权潮流冲击熵; 以该线路断开作为继发故障演化路径起点, 选取故障概率最大的线路作为后续断开线路, 计算负荷损失风险与网架损失风险。

(2) 通过熵权法计算各指标的权重, 构建综合指标。

(3) 依据综合指标对各线路重要度进行排序, 选取前 10 条关键线路。

(4) 使用网络效能验证结果有效性。

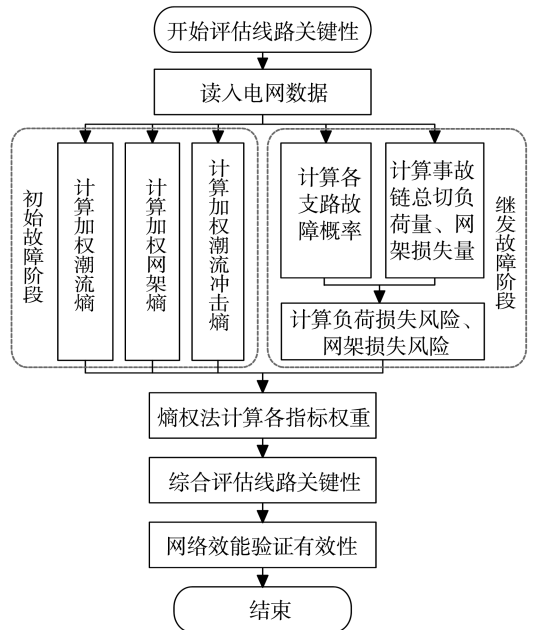


图 3 关键线路辨识流程

Fig.3 Identification process of critical lines

5 算例分析

5.1 IEEE 118 节点系统仿真

本研究基于 MATLAB 平台,以 IEEE 118 节点

测试系统^[19]为算例进行仿真分析。本系统包含 54 个发电机节点、64 个负荷节点及 186 条线路,拓扑结构如图 4 所示。

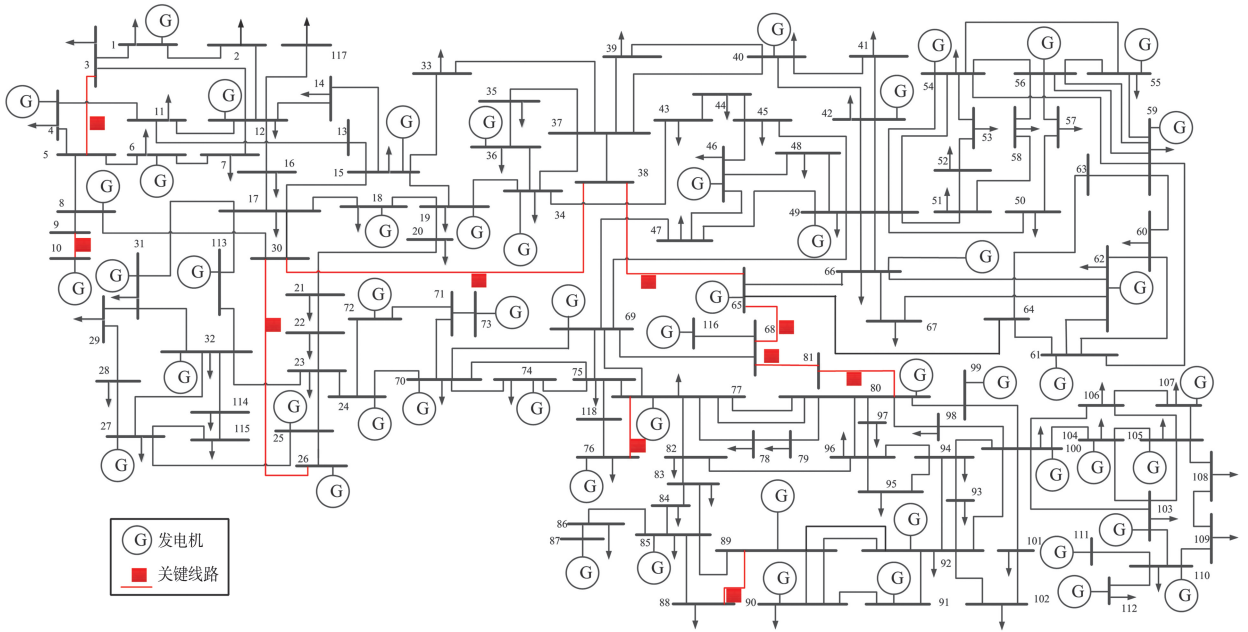


图 4 IEEE 118 节点测试系统
Fig.4 IEEE 118 bus test system

5.2 关键线路辨识结果分析

根据本研究提出的辨识指标进行仿真计算,经熵权法得出各指标的极值、信息熵及最终权重,如表 1 所示,线路综合指标如图 5 所示,得出综合指标前 10 条线路如表 2 所示。

表 2 前 10 条线路辨识结果

Table 2 Identification results of the top ten lines

线路	E_{ci}^m	初始故障状态			继发故障风险	
		H_{po}^m	H_{st}^m	H_{im}^m	R_{load}^m	R_{stru}^m
38—65	0.970 2	0.844 7	0.917 1	0.627 8	1.000 0	1.000 0
76—77	0.804 7	0.176 7	0.923 7	0.356 5	0.950 3	0.639 6
65—68	0.720 4	0.435 1	0.918 1	0.582 9	0.814 2	0.514 8
30—38	0.664 5	0.727 0	0.944 9	0.561 2	0.539 4	0.693 1
26—30	0.619 2	0.503 5	0.974 8	0.486 4	0.665 3	0.517 8
81—80	0.610 1	0.461 2	0.894 8	0.447 0	0.681 7	0.431 0
68—81	0.610 0	0.460 7	0.947 0	0.443 5	0.681 7	0.431 0
89—90	0.609 0	0.146 7	0.898 5	0.099 6	0.358 3	0.758 6
9—10	0.552 7	0.685 0	0.977 8	0.576 5	0.550 6	0.482 1
3—5	0.545 4	0.207 2	0.938 5	0.327 8	0.591 5	0.575 4

表 1 熵权计算数据

Table 1 The data for entropy weight calculation

指标	H_{po}^m	H_{st}^m	H_{im}^m	R_{load}^m	R_{stru}^m
最小值	6.664 2	0.607 7	0.000 8	0	0.006 4
最大值	8.139 4	1.073 8	0.046 4	82.419 6	20.166 5
信息熵	0.956 8	0.998 5	0.977 8	0.648 0	0.912 7
权重	0.085 3	0.003 0	0.043 8	0.695 5	0.172 4

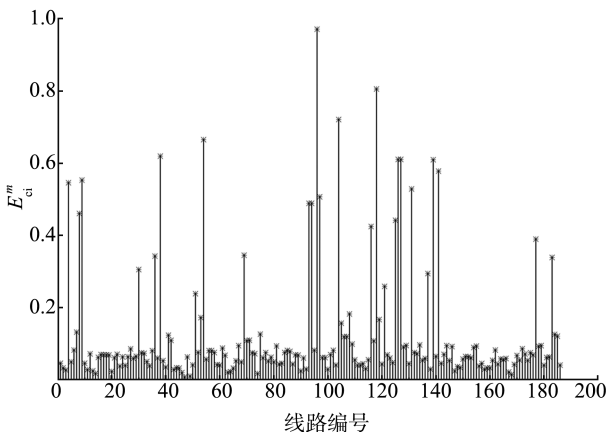


图 5 综合指标辨识结果

Fig.5 Identification results of comprehensive indicators

由表 1 可以看出,权重最高的是负荷损失风险,权重最低的是加权网架结构熵。这是因为 118 节点系统的拓扑联系紧密,有两节点之间出现多线路相连的情况,使大多线路归一化后的加权网架熵在 0.8~1.0 之间,线路之间差距不大,与其他指标相比属于信息含量少,因而加权网架熵所占权重最低;线路跳开时,节点间有其他传输线路,导致负荷损失较小甚至没有,大多线路归一化后的负荷损失风险为 0,出现负荷损失风险信息量大、权重最高的情况。

由表 2 可知,综合指标排名前 3 的线路为 38—

65、76—77 及 65—68。结合线路指标对照 IEEE 118 节点拓扑图可知:排名第 1 的线路 38—65 处于该电网结构的中心位置,承担重要的潮流传输作用,负荷损失风险与网架损失风险均最高,该线路断开继发故障后果严重,会导致全网 24 条线路停运,造成 94.17 MW 的负荷削减;排名第 2 的线路 76—77 的加权潮流熵与加权潮流冲击熵在前 10 条线路中较小,断开引起的全网综合潮流变化不大,但其故障会引起线路 75—118 过载,使节点 76 的发电机组退出运行,造成较大的负荷损失,且该线路引发的故障链事故概率为 0.92,使线路排名靠前的继发故障风险评分占比高;排名第 3 的线路 65—68 是连接两台重要发电机功率传输的通道,具有平衡机组出力的作用,故在全网线路排名中因潮流变化、负荷损失而排名靠前。

线路 30—38 与排名第 1 的线路相交于节点 38,它们两端节点的度均为 7。线路 30—38 的 H_{st}^m 为 0.727 0,在表 2 所示的前 10 条关键线路中排名第 2,亦属于关键网络位置,是负荷节点及发电机节点相连的重要枢纽。分析线路 89—90 的继发故障风险可知,该线路故障断开后造成的负荷损失与网架损失处于较高水平,但由于继发故障中涉及的过载线路存在多条故障概率低于 0.30 的情况,显著降低了整个事故的发生概率,在前 10 条关键线路的风险中 R_{load}^m 最低。可见,线路关键性由概率与损失规模的乘积效应共同决定。线路 9—10 是连接 450 MW 发电容量机组的唯一出力通道,其 H_{po}^m 与 H_{im}^m 均为第 3,可以看出该线路在网络潮流分布中具有重要地位,故在全网线路中排名靠前。

为说明综合辨识方法的合理性与可靠性,将本研究辨识结果与文献[13]中考虑系统熵变特征方法的辨识结果进行对比,结果如表 3 所示。

表3 辨识方法对比

Table 3 Comparison of identification method

排序	本文方法 所得关键线路	E_{ci}^m	熵变特征方法 所得关键线路 ^[13]	总熵 指标 ^[13]
1	38—65	0.970 2	23—25	7.322 1
2	76—77	0.804 7	38—37	6.636 9
3	65—68	0.720 4	30—17	6.365 4
4	30—38	0.664 5	65—68	6.357 3
5	26—30	0.619 2	69—75	5.209 3
6	81—80	0.610 1	64—61	5.434 4
7	68—81	0.610 0	68—81	5.345 6
8	89—90	0.609 0	38—65	5.063 5
9	9—10	0.552 7	89—90	5.063 4
10	3—5	0.545 4	63—59	4.626 7

熵变特征指标通过功率裕度熵变量化线路对电力系统裕度熵的影响程度,利用线路潮流冲击熵说明系统对扰动能量的抵抗能力,提出正、负熵流综合考量的总熵指标进行关键线路的排序筛选,未考虑后续故障的发生情况。由表 3 可以看出,用本研究综合指标辨识的前 10 条关键线路与熵变特征方法辨识出的结果存在相同的线路,证明考虑初始故障状态与继发故障风险的综合性影响获得的结果是合理有效的。

本研究方法与考虑熵变特征的辨识结果都认为线路 65—68、68—81、89—90 与 38—65 是所有线路中排序前 10 的关键线路。文献[13]以功率裕度熵变作为辨识 118 节点系统关键线路的指标,将线路 23—25 排在关键性第 1 的位置,而本研究方法辨识出该线路的综合指标为 0.074 6,并不在前 10 的排序中。从潮流状态分析,23—25 是两台发电机输电的重要线路,该线路断开会导致全网 98.84 MW 的负荷切除,造成 1 276.67 MW 的潮流变化。但考虑继发故障发展过程,经过隐性故障概率模型计算该线路造成的事故链跳闸概率低于 0.03,风险指标较小,导致该线路在本研究综合指标排序并未靠前。线路 38—65 断开不仅造成大量的功率缺失与潮流波动,还有极严重的事事故链发生风险,文献[13]的辨识方法未考虑故障的演变过程,将该线路排在第 8 的位置是不合理的。本研究提出结合初始故障状态和继发故障风险的方法可以有效辨识电力系统的关键线路。

5.3 指标有效性验证

为了验证综合指标的有效性和本研究结果的准确性,本研究将电网遭受攻击后的传输能力与负荷变化综合考虑,使用改进最短加权电气距离网络效能指标^[30],结合电网拓扑结构与运行状态辨识结果的有效性。定义网络效能为

$$E = \frac{1}{N_{Load} N_{Gen}} \sum_{r \in G_n} \sum_{t \in B_n} \frac{\min(P_r, P_t)}{X_{r-t}}, \quad (19)$$

式中, N_{Load} 为负荷节点数, N_{Gen} 为发电机节点数, G_n 为发电机节点集合, B_n 为负荷节点集合, $\min(P_r, P_t)$ 为发电机节点、负荷节点对之间的最小有功功率, X_{r-t} 为节点对 (r, t) 之间的电气距离。电力系统线路断开会使发电机与负荷间的电气距离变长,相较于线路断开前的 E , 断开后的 E 越低,证明攻击后的电网输电能力越差。

建立以下 5 种攻击方式:F1 代表基于本研究综合指标的线路排序进行攻击,F2 代表基于本研究状态指标的线路排序进行攻击,F3 代表基于本研究风险指标的线路排序进行攻击,F4 代表基于功率裕度

熵变指标的线路排序进行攻击^[13], F5 代表基于传输贡献度的线路排序进行攻击^[31]。

不同指标下的关键线路辨识结果如表 4 所示, 5 种攻击方式下的网络效能变化情况如图 6 所示。由图 6 可以看出: 在遭到第 1 次攻击时, 本研究综合指标方法与风险指标方法的 E 减少约 20%, 功率裕度熵变指标方法的 E 未见明显下降, 传输贡献度指标方法的 E 降幅小于本研究方法, 可见线路 38—65 是关键性第 1 的合理性; 随着攻击次数增加, 各攻击方式下的 E 显著降低, 本研究攻击方法在前 6 次攻击中 E 均处于最低; 相比 F5 的攻击方式, F4 的 E 下降较多, 可见考虑电网结构与运行特征综合指标的有效性; 在第 10 次攻击时, 本研究方法的 E 最终降至 0.619 0, 以 F2、F3、F4 和 F5 分别攻击关键线路, E 分别下降至 0.631 8、0.705 4、0.672 9 与 0.732 9, 降幅均小于本研究方法。由上述结果可以分析出, 当基于本研究的综合指标攻击关键线路时, 网络传输效率损失最严重, 较初始 E 减少约 40%, 验证了本研究提出的综合指标辨识效果较好。

表 4 不同指标下的关键线路辨识结果

Table 4 Identification results of critical routes under different indicators

排序	不同指标下的关键线路				
	综合指标	状态指标	风险指标	功率裕度熵变指标	传输贡献度
1	38—65	103—110	38—65	23—25	65—68
2	76—77	106—107	76—77	38—37	68—69
3	65—68	8—9	65—68	30—17	49—66
4	30—38	21—22	89—90	65—68	26—30
5	26—30	22—23	30—38	69—75	89—90
6	81—80	20—21	89—92	64—61	89—92
7	68—81	38—65	81—80	68—81	5—8
8	89—90	105—106	68—81	38—65	77—78
9	9—10	49—54	26—30	89—90	37—38
10	3—5	23—24	83—85	63—59	77—80

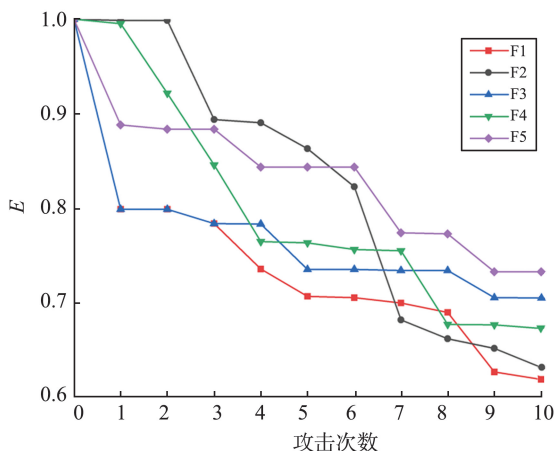


图 6 5 种攻击方式下的网络效能变化情况

Fig.6 Network efficacy dynamics across five attack scenarios

6 结论

本研究提出一种考虑初始故障状态和继发故障风险的关键线路辨识方法。该方法将事故发生时的初始故障状态和继发故障演化风险综合考虑, 从初始线路断开分析电网潮流状态、网架结构和受冲击程度的变化, 计算故障发生时的加权潮流熵、加权网架结构熵和加权潮流冲击熵; 通过建立事故链得到继发故障演化时的电网损失数据, 包括负荷损失风险与网架损失风险, 从概率、结果的角度量化故障演化情况, 结合故障开始与故障发展分析复杂电力系统的线路重要性。在 IEEE 118 节点系统中进行仿真试验, 通过与其他 4 种方法比较, 验证所提方法的有效性。结果表明, 本研究方法明显优于其他方法, 有效提高了电力系统关键线路的识别能力。

随着新型电力系统发展, 新能源电源接入电力系统容量剧增, 需求侧主动参与电网运行调度, 给关键线路辨识带来不确定因素。下一步研究线路关键性的时变规律时将考虑源荷不确定因素, 同时进一步结合电压、频率等动态特性, 深入分析其对关键线路辨识的影响机制。

参考文献:

- [1] 杨太华, 秦静, 李志翔. 基于不同政策环境的“一带一路”电力工程安全投资决策演化博弈分析[J]. 上海电力大学学报, 2021, 37(4): 373-379.
YANG Taihua, QIN Jing, LI Zhixiang. Evolutionary game analysis of safety investment in “the Belt and Road” power investment project based on different policy environment[J]. Journal of Shanghai University of Electric Power, 2021, 37(4): 373-379.
- [2] 孙华东, 许涛, 郭强, 等. 英国“8·9”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 中国电机工程学报, 2019, 39(21): 6183-6191.
SUN Huadong, XU Tao, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Great Britain power grid on August 9th, 2019 and its enlightenment to power grid in China[J]. Proceedings of the CSEE, 2019, 39(21): 6183-6191.
- [3] 王伟胜, 林伟芳, 何国庆, 等. 美国得州 2021 年大停电事故对我国新能源发展的启示[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(12): 4033-4042.
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.

- [4] 张鹏飞, 麻常辉, 李威, 等. 2021年欧洲电网两次解列事故分析及对中国电网安全的思考[J]. 电力系统自动化, 2021, 45(24): 22-29.
ZHANG Pengfei, MA Changhui, LI Wei, et al. Analysis of two splitting accidents of European power grid in 2021 and consideration on power grid security in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2021, 45(24): 22-29.
- [5] 王国春, 董昱, 许涛, 等. 巴西“8.15”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(24): 9461-9469.
WANG Guochun, DONG Yu, XU Tao, et al. Analysis and lessons of Brazil blackout event on August 15, 2023[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(24): 9461-9469.
- [6] 朱大锐, 王睿, 程文姬, 等. 基于改进 PageRank 算法的输电网关键节点辨识方法研究[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(5): 86-93.
ZHU Darui, WANG Rui, CHENG Wenji, et al. Critical transmission node identification method based on improved PageRank algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(5): 86-93.
- [7] ESLAMI A, HUANG C, ZHANG J S, et al. Cascading failures in load-dependent finite-size random geometric networks[J]. IEEE Transactions on Network Science and Engineering, 2016, 3(99): 183-196.
- [8] 樊陈, 姚建国, 张琦兵, 等. 英国“8·9”大停电事故振荡事件分析及思考[J]. 电力工程技术, 2020, 39(4): 34-41.
FAN Chen, YAO Jianguo, ZHANG Qibing, et al. Reflection and analysis for oscillation of the blackout event of 9 August 2019 in UK[J]. Electric Power Engineering Technology, 2020, 39(4): 34-41.
- [9] 严道波, 文劲宇, 杜治, 等. 2021年德州大停电事故分析及其对电网规划管理的启示[J]. 电力系统保护与控制, 2021, 49(9): 121-128.
YAN Daobo, WEN Jinyu, DU Zhi, et al. Analysis of Texas blackout in 2021 and its enlightenment to power system planning management[J]. Power System Protection and Control, 2021, 49(9): 121-128.
- [10] 徐岩, 郅静. 基于加权潮流熵的电网故障传播脆弱线路识别[J]. 现代电力, 2016, 33(3): 88-94.
XU Yan, ZHI Jing. Identification of vulnerable lines for fault propagation in powergrid based on the weighted power flow entropy[J]. Modern Electric Power, 2016, 33(3): 88-94.
- [11] 贾燕冰, 何海丹, 谢栋, 等. 基于绝对潮流的关键线路辨识方法[J]. 太原理工大学学报, 2017, 48(4): 602-607.
JIA Yanbing, HE Haidan, XIE Dong, et al. Identification of vulnerable line in power systems based on absolute flow[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2017, 48(4): 602-607.
- [12] 于群, 屈玉清, 石良. 基于综合关键度的电网关键线路辨识[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(3): 246-252.
YU Qun, QU Yuqing, SHI Liang. Identification of critical lines in power grid based on comprehensive critical degree[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(3): 246-252.
- [13] 魏震波, 易刚春, 关翔友, 等. 基于系统熵变特征分析的电网关键线路辨识方法[J]. 智慧电力, 2020, 48(11): 34-39.
WEI Zhenbo, YI Gangchun, GUAN Xiangyou, et al. Identification of critical lines in power system based on analysis of entropy variation characteristics[J]. Smart Power, 2020, 48(11): 34-39.
- [14] 胡钢, 王乐萌, 卢志宇, 等. 基于节点多阶邻居递阶关联贡献度的重要性辨识[J]. 山东大学学报(工学版), 2024, 54(1): 1-10.
HU Gang, WANG Lemeng, LU Zhiyu, et al. Importance identification method based on multi-order neighborhood hierarchical association contribution of nodes[J]. Journal of Shandong University (Engineering Science), 2024, 54(1): 1-10.
- [15] 徐岩, 雷小双, 秦彬, 等. 基于综合重要度的电网关键线路辨识方法[J]. 电力建设, 2019, 40(7): 85-90.
XU Yan, LEI Xiaoshuang, QIN Bin, et al. Method based on comprehensive importance for critical line identification in a power grid[J]. Electric Power Construction, 2019, 40(7): 85-90.
- [16] BARABASI A L, ALBERT R. Emergence of scaling in random networks[J]. Science, 1999, 286(5439): 509-512.
- [17] 丁明, 韩平平. 基于小世界拓扑模型的大型电网脆弱性评估算法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(8): 7-10.
DING Ming, HAN Pingping. Small-world topological model based vulnerability assessment algorithm for large-scale power grid[J]. Automation of electric power systems, 2006, 30(8): 7-10.
- [18] 林思宇, 文娟, 屈星, 等. 基于 TOPSIS 的配电网结构优化及关键节点线路识别[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2024, 21(3): 46-54.
LIN Siyu, WEN Juan, QU Xing, et al. Optimization of distribution network structure and identification of key nodes and lines based on TOPSIS method[J]. Complex System and Complexity Science, 2024, 21(3): 46-54.
- [19] 潘松, 李长城, 康海鹏, 等. 考虑停运概率熵和网架结构熵的电网关键线路辨识方法[J]. 电力系统自动化, 2025, 49(1): 139-149.

- PAN Song, LI Changcheng, KANG Haipeng, et al. Identification method for key lines of power grid considering outage probability entropy and grid structure entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2025, 49(1): 139-149.
- [20] 黎寿涛, 夏成军, 钟明明, 等. 基于故障链聚类算法的电网关键线路辨识[J]. 电力工程技术, 2022, 41(1): 84-92.
- LI Shoutao, XIA Chengjun, ZHONG Mingming, et al. Critical line identification of power grid based on fault chain clustering algorithm[J]. Electric Power Engineering Technology, 2022, 41(1): 84-92.
- [21] 王峥, 陆建忠, 牟善科, 等. 台风灾害下考虑脆弱线路加固的新型电力系统弹性提升方法[J]. 电测与仪表, 2024, 61(6): 94-102.
- WANG Zheng, LU Jianzhong, MOU Shanke, et al. Enhancing resilience of novel power system through consideration of hardening for vulnerable lines under hurricane disasters[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2024, 61(6): 94-102.
- [22] 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): 5448-5458.
- 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): 5448-5458.
- [23] 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]. 中国电机工程学报, 2024, 44(23): 9122-9133.
- LI Yansha, CAI Ye, CAO Yijia, et al. High-risk links identification for cascading failures based on the power flow transfer similarity[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(23): 9122-9133.
- [24] 沈政委, 孙华东, 仲悟之, 等. 基于关键事件的高比例新能源电力系统故障连锁演化规律分析[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(24): 57-65.
- SHEN Zhengwei, SUN Huadong, ZHONG Wuzhi, et al. Key event based analysis of evolution law of cascading failures in power system with high proportion of renewable energy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(24): 57-65.
- [25] 屠竞哲, 何剑, 安学民, 等. 巴基斯坦“2023.1.23”大停电事故分析及启示[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(14): 5319-5328.
- TU Jingzhe, HE Jian, AN Xuemin, et al. Analysis and lessons of Pakistan blackout event on January 23, 2023[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(14): 5319-5328.
- [26] 李志民, 李卫星, 李勃龙. 熵原理及其在电力系统可靠性中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001(3): 37-39.
- LI Zhimin, LI Weixing, LI Bolong. Entropy principle and its application in power system reliability[J]. Proceedings of the EPSA, 2001(3): 37-39.
- [27] 李美成, 梅文明, 刘永强, 等. 基于改进负载潮流熵指标准确辨识电网脆性支路的方法[J]. 电网技术, 2019, 43(3): 1026-1033.
- LI Meicheng, MEI Wenming, LIU Yongqiang, et al. Accurate identification method of brittle branches in power grid based on improved load flow entropy indexes[J]. Power System Technology, 2019, 43(3): 1026-1033.
- [28] 刘文颖, 蔡万通, 张宁, 等. 基于联合加权熵的电网自组织临界状态演化[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(6): 1363-1370.
- LIU Wenyong, CAI Wantong, ZHANG Ning, et al. Evolution of self-organizing of grid critical state based on united weighted entropy theory[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(6): 1363-1370.
- [29] 周依希, 李晓明, 瞿合祚, 等. 基于AHP-灰色关联度的复杂电网节点综合脆弱性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 86-93.
- ZHOU Yixi, LI Xiaoming, QU Hezuo, et al. Node integrated vulnerability assessment of complex power grid based on AHP-gray relational degree method[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(23): 86-93.
- [30] 吴昊, 朱自伟. 基于熵权-层次分析法综合指标的电网关键线路辨识[J]. 中国电力, 2020, 53(5): 39-47.
- WU Hao, ZHU Ziwei. Key lines identification in power grid based on comprehensive index calculated by the entropy weight-analytical hierarchy process[J]. Electric Power, 2020, 53(5): 39-47.
- [31] 鞠文云, 李银红. 基于最大流传输贡献度的电力网关键线路和节点辨识[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(9): 6-12.
- JU Wenyun, LI Yinhong. Identification of critical lines and nodes in power grid based on maximum flow transmission contribution degree[J]. Automation of Electric Power System, 2012, 36(9): 6-12.

(编辑:孙亚彤)