

高比例风电接入下电力系统连锁故障的关键传播模式辨识

李斯特¹, 赵影¹, 周永智²

(1.国网内蒙古东部电力有限公司 电力科学研究院, 内蒙古 呼和浩特 010020; 2.浙江大学 工程师学院, 浙江 杭州 310058)

摘要: 高比例风电接入电网产生的强不确定性,使得电力系统发生连锁故障的场景更多、机理更复杂。辨识连锁故障的关键传播模式对于预防大停电事故具有重要意义。文章首先考虑风电出力不确定性、元件故障等因素,建立连锁故障动态分析模型,获取海量初始场景下故障传播路径数据;然后,建立描述连锁故障时序传播过程的影响关联图,结合概率-后果提出故障关键传播模式辨识方法,筛选高比例风电接入下连锁故障的高风险传播环节;最后,利用 IEEE 118 节点验证所提方法在关键传播模式辨识的有效性。

关键词: 高比例风电; 连锁故障; 关键传播模式; 影响关联图

中图分类号: TK51 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2025)01-0083-08

0 引言

电力系统中连锁故障是造成大停电事故的主要原因^[1]。在新型电力系统建设背景下,大规模风电的接入会使得系统中的扰动更强,发生连锁故障的风险不断增加^[2-4]。因此,研究高比例风电接入下电力系统连锁故障演化机理,辨识连锁故障传播过程中的关键环节,特别是极易引起大停电的关键传播模式,对于连锁故障的预防和新能源的消纳具有重要意义^[5]。

针对连锁故障的关键传播模式,目前的研究方法主要包括拓扑分析^[6]和动态仿真^[7]两类。拓扑分析方法是把电力系统抽象为含点和边的拓扑图,分析不同元件间的连接关系,提出了如节点度数^[8]、线路电气介数^[9]等指标来定位故障传播的关键环节。然而,此类方法虽然速度较快,但因忽略电网潮流等物理特征,分析结果精度有限。动态仿真主要是考虑电力系统的物理过程,通过模拟故障的传播过程来辨识关键环节。例如,基于 ORNL-PSERC-Alaska (OPA)模型的元件重要度评估^[10]、基于潮流熵的关键元件评估^[11]等。上述方法须要对电力系统的动态物理过程进行建模分析,但由于连锁故障的小概率属性,导致分析效率相对较低。

随着新能源的大规模接入,现有研究已提出

了考虑新能源不确定性的连锁故障分析模型。考虑电气拓扑特性,文献[11]提出了基于随机潮流的连锁故障风险评估模型,分析了新能源不确定性对电网潮流越限诱发连锁故障的影响。文献[12]提出了基于区间电气介数的含风电电网连锁故障脆度分析方法,分析风电不确定性在连锁故障演化过程中的影响。考虑新能源和负荷的随机特性,文献[13]建立了连锁故障的高维事故链模型,分析故障传播对新能源脱网的影响。上述研究将风电不确定性纳入连锁故障模型中,为分析故障传播过程提供了基础。然而,高比例新能源接入对故障传播模式的影响尚不明晰,故障传播模式的关键度如何量化尚缺乏方法,上述研究尚未涉及。因此,亟需提出高比例风电接入下电力系统连锁故障的关键传播模式辨识方法,甄别发生概率大、影响程度高的关键环节,可有效降低风电脱网事件发生的频率,为保障系统安全运行和风电有效消纳提供支撑。

为有效量化不同故障元件间的关联性,近年来基于数据分析的故障传播模式挖掘受到广泛关注^[9]。其主要是记录故障传播的序列信息,利用数据分析方法来挖掘不同故障事件间的关联度,分析其在连锁故障中的影响程度。文献[14]考虑电网潮流特性提出了改进 Pagerank 算法,用于快速

收稿日期: 2023-05-18。

基金项目: 内蒙古电力公司项目(52660422000A)。

通信作者: 周永智(1987-),男,博士,副教授,研究方向为新能源电力系统分析。E-mail: zhouyongzhi@zju.edu.cn

辨识诱发大停电事故的关键线路。文献[15]基于仿真数据,利用线路故障概率来辨识关键环节。然而,上述研究均面向传统电力系统,未考虑高比例新能源出力的不确定性,其分析结果难以有效保障新能源的消纳与系统安全运行。此外,在传播关键度分析时,多将概率作为衡量指标,重点挖掘出现概率大的传播模式。然而,在风电出力强不确定性影响下,部分小概率的故障传播模式可能造成巨大的损失,因此,传统衡量指标支撑关键传播模式的精准辨识存在不足。

针对现有研究的不足,本文首先结合马尔科夫过程建立风电出力不确定性模型,提出考虑风电不确定性的连锁故障动态分析模型。基于海量初始场景下的故障传播数据,建立描述连锁故障传播过程的影响关联图,刻画不同故障元件间的时序影响关系。结合概率-后果等属性提出故障关键传播模式的量化方法,辨识高比例风电接入下连锁故障的高风险传播环节。

1 考虑高比例风电不确定性的电力系统连锁故障分析

1.1 基于马尔科夫过程的风电不确定性建模

受风速等气象因素的影响,风电机组出力呈现时变和随机特性。为有效刻画风速的不确定性^[9],本节采用马尔科夫随机模型来预测风速的时间序列,其主要是为了刻画各个状态在不同时刻对应概率的动态演化过程,进而求解不同时刻各状态对应的概率。相较于最终稳定状态的概率,所采用的马尔科夫随机过程模型能更加精准地刻画状态概率的动态变化过程(即同一状态在不同时刻的概率不相同),更适用于系统运行层面的风险分析和防控^[17]。在该模型中,任意时刻 t 的风速 $v_w(t)$ 假定为随机变量,取值为风速序列 $\{v_1, \dots, v_{k_w}\}$ 中的任意一元素,其状态空间模型如图 1 所示。

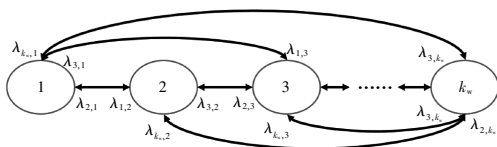


图 1 风电机组出力不确定性建模

Fig.1 Uncertainty modeling of wind power output

马尔科夫随机模型中,状态转移率只取决于当前状态,与之前的状态均无关。因此,含有大规模风电送出的互联大系统在任意时刻 t , 风速

$v_w(t)$ 的状态概率可表示为

$$p_{k_w}(t) = P\{v_w(t) = v_{k_w} | v_w(t_0)\} \quad (1)$$

式中: t_0 为当前的时刻。

基于图 1 求解式微分方程来确定任意时刻 t 的状态概率 $p_{k_w}(t)$, 即:

$$\frac{dp_{k_w}(t)}{dt} = \sum_{h_w=1, h_w \neq k_w}^{K_w} p_{h_w}(t) \cdot \lambda_{h_w, k_w} - p_{k_w}(t) \cdot \sum_{k_w=1, k_w \neq h_w}^{K_w} \lambda_{k_w, h_w} \quad (2)$$

式中: λ_{k_w, h_w} 为任一状态 h_w 向状态 k_w 的转移率。

式(2)求解确定的状态概率 $p_{k_w}(t)$ 是随时间变化的,各状态对应的风速为 $v_w(t)$ 。基于给定风速,可以通过文献[16]的风速-出力函数确定各时刻风机的输出功率。综合状态概率和输出功率,构建考虑状态概率时变特性的风电不确定性模型。

1.2 含高比例风电的电力系统连锁故障演化模型

风电出力的波动会使得系统供需失衡,若波动幅度较大将造成潮流大范围转移,引起部分线路因潮流过载而切除,诱发连锁故障,本文重点对该过程开展建模分析。因系统中线路断线等初始故障也是诱发连锁故障的主要因素,在连锁故障建模中还将考虑上述因素。本文将对过载型连锁故障进行建模分析^[19],其主要包含的过程有线路故障后判断是否出现孤岛、调整机组输出功率或切负荷来调整孤岛内的供需平衡、判断过载的线路。

在连锁故障建模中,本文将风电机组的出力 $P_{m_{iw}}$ 作为边界条件考虑到连锁故障模型中,其在实际模拟过程中可用蒙特卡洛采样^[5]来确定。

① 孤岛判断方法

线路的故障可能导致电力系统中出现孤岛,本文将电力系统抽象为连通图,采用遍历搜索辨识所有的孤岛 m ,具体流程见文献[20]。

② 孤岛内发用电平衡调整策略

连锁故障过程中,不同孤岛中发电机组的输出功率和负荷需求不相等,须要调整火电机组的输出功率和切负荷,以保证各孤岛内发用电平衡。根据孤岛 m 内发电机组和负荷情况,按比例分摊确定机组功率调整量和负荷切除量,其平衡系数为

$$D_m = \sum_{i=1}^{N_m} (P_{mik}^{\max} + P_{m_{iw}} - L_{mi}) \quad (3)$$

式中: P_{mik}^{\max} 为孤岛 m 节点 i 处火电机组 k 的发电容量; P_{miw} 为孤岛 m 节点 i 处风电机组 w 的输出功率; L_{mi} 为孤岛 m 中节点 i 处的电力负荷; N_{mi} 为孤岛 m 中节点个数。

若 $D_m > 0$,说明孤岛内发电容量大于负荷,则根据发电机组的可用容量按比例增加发电功率。因此,孤岛 m 内节点 i 处火电机组 k 的功率调整量为

$$\Delta P_{mik} = \sum_{i=1}^{N_{mi}} (L_{mi} - P_{miw} - P_{mik}) \cdot \frac{P_{mik}^{\max} - P_{mik}}{\sum_{i=1}^{N_{mi}} (P_{mik}^{\max} - P_{mik})} \quad (4)$$

式中: P_{mik} 和 ΔP_{mik} 分别为孤岛 m 节点 i 处火电机组 k 的发电功率和功率调整量。

相反,若 $D_m < 0$,说明孤岛内发电容量不足,则须要将发电机组的功率调整为最大值,并根据功率缺额削减负荷。因此,孤岛 m 内节点 i 处的负荷削减量 ΔL_{mi} 为

$$\Delta L_{mi} = L_{mi} \cdot \frac{\sum_{i=1}^{N_{mi}} (L_{mi} - P_{miw} - P_{mik})}{\sum_{i=1}^{N_{mi}} L_{mi}} \quad (5)$$

③孤岛内电力潮流再分配模型

基于调整后的不同节点的发电机组出力 and 电力负荷,本文采用直流潮流计算孤岛 m 内线路 l 的功率 P_{ml} ,其表达式为

$$P_{ml} = A_m \cdot (P_{mi} - L_{mi}) \quad (6)$$

式中: P_{mi} 为孤岛 m 中发电机组的输出功率; A_m 为功率传输分配系数矩阵。

④线路过载失效模型

若线路 l 的功率超过其额定容量,则保护装置动作,将其切除。在本文连锁故障模拟中,依据继电器的反时限特性^[19-22],每次迭代时优先切除各孤岛 m 内过载程度最大的线路,即:

$$l = \{l | \max(P_{ml} - P_{ml}^{\max})\} \quad (7)$$

式中: P_{ml}^{\max} 为孤岛 m 内线路 l 的传输容量。

1.3 海量场景下电力系统连锁故障模拟

考虑风电不确定性和线路断线等随机故障,本文利用蒙特卡洛采样^[5]确定初始故障后,对连锁故障传播进行模拟,如图2所示。

步骤主要包括:

①根据风速概率 $p_{k_s}(t)$ 和线路故障概率 P_l ,采样确定场景 s 下系统的初始状态,包括风机出力和线路运行状态等;

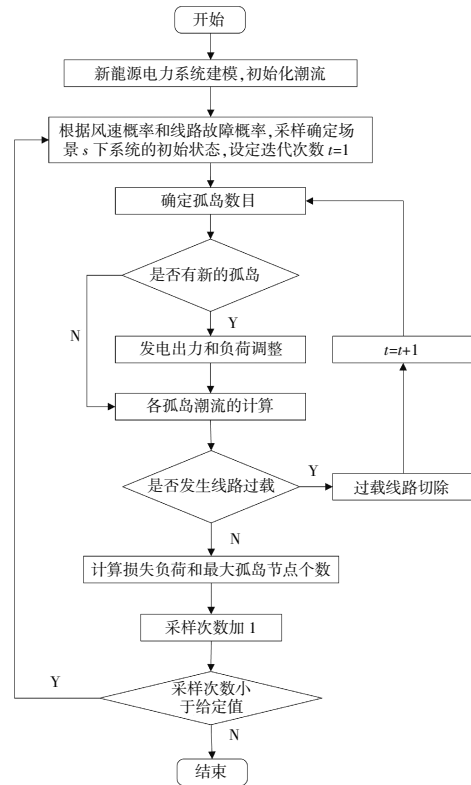


图2 海量场景下电力系统连锁故障模拟

Fig.2 Power system cascading failure modelling under numerous scenarios

②判断是否出现孤岛,确定各孤岛 m 内包含的节点和发电机组等;

③利用式(4),(5)调整各孤岛 m 内的发电机组出力和负荷,基于式(6)计算各孤岛 m 的线路潮流;

④利用式(7)寻找下一传播次序 j 时的过载线路。若存在过载线路,切除该线路,令 $j=j+1$,并返回步骤②;若不存在,前往步骤⑤;

⑤记录所有场景下系统负荷损失、过载线路编号等信息。

须要说明的是,风电不确定性对系统连锁故障的影响已在步骤①中考虑在内,后续将通过数据分析量化相关影响。

2 基于影响关联图的连锁故障关键传播模式辨识

关键传播模式辨识的过程主要包括以下3个过程,首先将连锁故障的传播过程抽象为故障链,实现传播过程的数学描述;然后,基于海量场景的故障传播数据来生成影响关联图,刻画不同故障线路间的相关性;最后,定义量化传播模式关键度

指标,基于影响关联度计算关键度指标,以此辨识影响程度大、传播概率高的传播模式。

2.1 连锁故障过程描述

结合不同场景 s 下传播次序 j 对应的元件失效情况,本文采用故障链 $F^{(s)}$ 来描述故障元件的传播过程。场景 s 下的故障链为

$$F^{(s)}=(f_1^{(s)}, f_2^{(s)}, \dots, f_j^{(s)}, \dots) \quad (8)$$

式中: $f_j^{(s)}$ 为场景 s 下时刻 j 的失效元件。

此外,在连锁故障过程中,定义损失链 $\Delta L^{(s)}$ 来表征传播次序 j 的系统累计负荷损失,即:

$$\Delta L^{(s)}=(\Delta L_1^{(s)}, \Delta L_2^{(s)}, \dots, \Delta L_j^{(s)}, \dots) \quad (9)$$

式中: $\Delta L_j^{(s)}$ 为场景 s 下时刻 j 的累计负荷损失量。

综合考虑故障链和损失链,构建连锁故障传播序列,其表达式为两者的集合,即:

$$PC^{(s)}=(pc_1^{(s)}, pc_2^{(s)}, \dots, pc_j^{(s)}, \dots) \quad (10)$$

式中: $pc_j^{(s)}$ 为场景 s 下时刻 j 时系统的故障状态, $pc_j^{(s)}=F^{(s)} \rightarrow pc_j^{(s)}$ 。因此,故障状态 $pc_j^{(s)}$ 同时包含系统损失和故障顺序等信息。

不同场景 s 的初始故障形成的连锁故障传播序列,为后续影响关联图构建提供输入,见图 3。

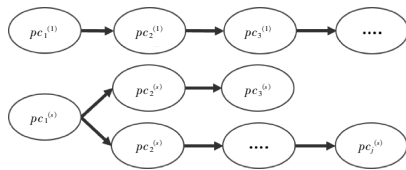


图 3 不同场景下连锁故障传播序列

Fig.3 Cascading failure chain under different scenarios

2.2 刻画故障传播序列的影响关联图构建

基于不同场景的故障序列,基于图论构建影响关联图^[21],刻画不同故障元件的传播特点,如图 4 所示。

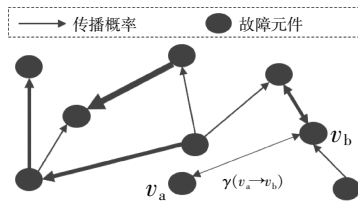


图 4 影响关联图构建示意

Fig.4 Diagram for developing interaction graph

图中,影响关联图的节点集合 (v_1, v_2, \dots, v_M) 表示在连锁故障过程中因过载失效的故障线路,其对应于式(8)故障链 $F^{(s)}$ 中的非重复元素,共有 M 条故障线路。节点间的连接关系表征不同故障线路间的传播关系,图 4 箭头所示。

基于上述定义,所构建的影响关联图为有向图,包含节点集合 V 和集合 $E, G=(V, E)$, 即:

$$\begin{cases} V=\{v_a|v_a \in (v_1, v_2, \dots, v_M)\} \\ E=\{(v_a, v_b)|v_a \rightarrow v_b\} \end{cases} \quad (11)$$

式中: v_a, v_b 分别为故障线路; $v_a \rightarrow v_b$ 为线路 v_a 向 v_b 的传播关系; E 表征所有故障线路间传播关系的集合。

在影响关联图中,故障线路间的传播概率可用概率传播矩阵 W 表示。结合不同场景下的连锁故障数据,由线路 v_a 向 v_b 的传播概率 $w(v_a \rightarrow v_b)$ 表示,即:

$$w(v_a \rightarrow v_b) = \frac{N_{v_a \rightarrow v_b}}{N_v} \quad (12)$$

式中: $N_{v_a \rightarrow v_b}$ 为传播关系 $v_a \rightarrow v_b$ 在故障链中出现的次数; N_v 为总故障关系数。

$w(v_a \rightarrow v_b)$ 的大小反映了在连锁故障过程中传播关系 $v_a \rightarrow v_b$ 出现的频繁程度。其值越大,表明线路 v_a 向 v_b 传播的概率越高;反之,若为 0,表明在连锁故障中 v_a 向 v_b 传播的概率极低甚至不出现。

除了传播概率外,传播模式造成的损失也是重要的影响因素。因此,本文定义关键传播模式为传播概率大且影响程度高的传播关系 $v_a \rightarrow v_b$ 。考虑传播概率可由矩阵 W 确定,本节首先定义传播关系的影响程度,用于刻画故障传播关系 $v_a \rightarrow v_b$ 造成的系统损失,其表达式为

$$\Phi(v_a \rightarrow v_b) = \frac{1}{N_{v_a \rightarrow v_b}} \sum_{s=1}^{N_{v_a \rightarrow v_b}} \frac{\Delta L(f_{j(v_b)}^{(s)}) - \Delta L(f_{j(v_a)}^{(s)})}{\Delta L(f_{j(v_b)}^{(s)})} \quad (13)$$

式中: $j(v_b)$ 为线路 v_b 在发生过载失效的时刻; $\Delta L(f_{j(v_b)}^{(s)})$ 为线路 v_b 发生过载失效时的累计负荷损失。

$\Phi(v_a \rightarrow v_b)$ 可反映传播关系 $v_a \rightarrow v_b$ 对连锁故障总损失的平均影响,其值越大代表影响程度越大。

综合传播概率和影响程度指标,定义传播关系 $v_a \rightarrow v_b$ 的关键度 $\gamma(v_a \rightarrow v_b)$ 为

$$\gamma(v_a \rightarrow v_b) = w(v_a \rightarrow v_b) \cdot \Phi(v_a \rightarrow v_b) \quad (14)$$

若 $\gamma(v_a \rightarrow v_b)$ 值较大,表明该传播路径为影响程度较大且传播概率较高,为关键传播路径。在图 4 中,传播模式的关键度指标可用有向箭头的粗细来表示。

除了传播模式关键度外,本文还重点对线路

的关键性做了分析。结合线路 v_a 在影响关联图中出现的次数,定义线路 v_a 的关键性指标为

$$\rho(v_a) = \frac{N_{v_a}}{N_v} \quad (15)$$

式中: N_{v_a} 为线路 v_a 在所有关系中的出现次数,其值越大对应的该线路越关键,对故障传播起到的作用越大。

2.3 基于影响关联图的关键传播模式辨识

基于建立的影响关联图,通过对关键度指标

$\gamma(v_a \rightarrow v_b)$ 进行排序,即可确定关键传播路径,最终实现关键传播路径的快速辨识。以此为基础,所提的方法可有效辨识新能源波动、元件初始故障等不确定因素影响下的关键传播模式,为故障的阻断提供支撑。

3 算例分析

3.1 算例说明

为量化新能源,本文采用 IEEE 118 节点系统来验证所提模型的有效性^[18-23],如图 5 所示。

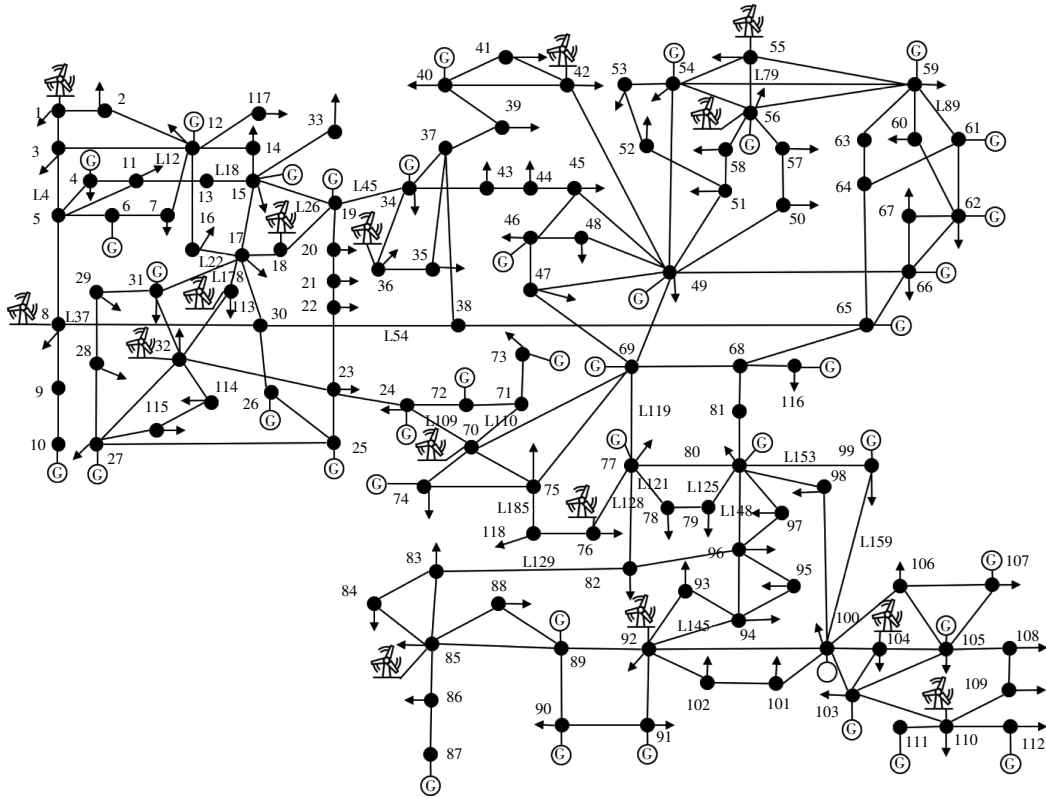


图 5 测试系统示意图

Fig.5 Graph of test systems

该系统共包含 54 台发电机组和 186 条线路,总负荷为 4 242 MW。本文将设置节点 1, 8, 18, 32, 36, 42, 55, 56, 70, 76, 85, 92, 104, 110 和 113 的机组为新能源机组,其出力不确定性模型见^[16]。为分析新能源不确定性对连锁故障的影响,本文设置 3 个案例,案例 1:无新能源接入;案例 2:风电装机容量占比为 20%;案例 3:风电装机容量占比为 40%。上述 3 个案例中的元件初始故障场景集相同,每一案例均仿真 50 000 次故障场景。

3.2 算例分析结果

不同案例下,系统负荷损失比例的累积分布

曲线如图 6 所示。

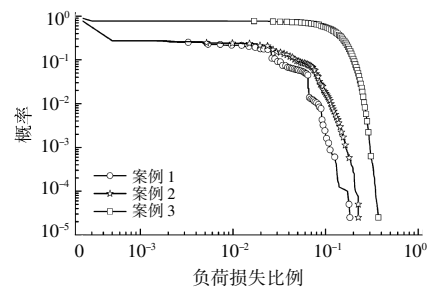


图 6 不同案例中负荷损失的累积

Fig.6 Distribution of load losses in different cases

由图 6 可知,随着风电装机容量占比的提高,

其对电力系统连锁故障的影响程度不断增加,使得故障损失和概率也相应提高。此外,系统发生严重故障事件的概率也因风电装机容量占比的增加而增加。以负荷损失超过总负荷的 0.17 为例,案例 1,2,3 分别对应的概率是 1.0×10^{-4} , 8.3×10^{-4} 和 2.2×10^{-2} , 说明了高比例新能源接入下系统发生大停电的风险增加。这主要是因为在新能源出力波动和初始故障叠加下, 线路发生过载的传播路径增加。

图 7 为不同案例中故障链长度的累积分布, 以刻画连锁故障的影响范围。

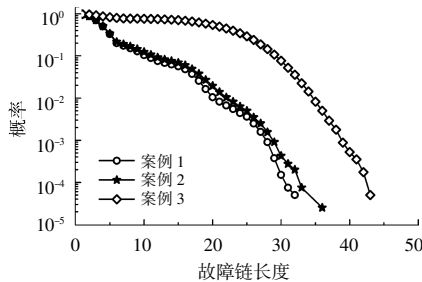


图 7 不同案例中故障链长度的分布

Fig.7 Distribution of failure chain length in different cases

由图 7 可以发现, 随着风电装机容量占比的提高, 连锁故障的影响范围也随之增加, 发生严重事件的概率也增加。以故障链长度超过 30 的为例, 案例 1,2,3 对应的概率分别为 1.5×10^{-4} , 4.3×10^{-4} 和 7.7×10^{-2} , 说明系统大范围故障传播的风险增加。

基于所有故障场景的故障链, 计算不同案例中线路关键性指标, 如图 8 所示。

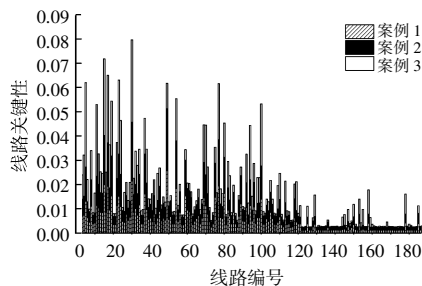


图 8 不同案例中线路的关键性指标

Fig.8 Criticality indices of power lines in different cases

由图 8 可以发现, 不同线路的关键性指标有较大差异, 说明所提方法能有效辨识系统中的关键线路, 为连锁故障的阻断提供支撑。此外, 风电装机容量占比的增加对不同线路关键性的影响程度不同。如线路 25 在案例 1,2,3 中关键性指标分

别为 0.011, 0.013 和 0.022, 表明其与风电装机容量的联系更紧密。相反, 线路 L179 在案例 1,2,3 中关键性指标分别为 0.001 3, 0.001 2 和 0.000 3, 表明其受风电装机容量占比的影响程度较小。

基于关键度的计算结果, 辨识出关键传播模式, 前十的模式如表 1 所示。

表 1 不同案例中故障关键传播模式的辨识结果

Table 1 Identification results of critical propagation patterns in different cases

序号	案例 1		案例 2		案例 3	
	传播关系	关键度 10^{-5}	传播关系	关键度 10^{-5}	传播关系	关键度 10^{-5}
1	L76→L119	8.63	L76→L119	11.9	L153→L119	30.6
2	L4→L12	2.46	L178→L54	4.9	L18→L12	23.5
3	L45→L12	1.99	L18→L54	4.63	L153→L110	18.3
4	L45→L125	1.61	L45→L119	2.72	L18→L54	18.1
5	L26→L22	1.18	L45→L12	1.75	L145→L119	16.6
6	L48→L54	1.14	L18→L185	1.68	L109→L119	11.2
7	L18→L89	1.12	L153→L125	1.56	L76→L119	8.57
8	L148→L129	0.78	L4→L54	1.53	L18→L121	7.85
9	L128→L121	0.77	L48→L54	1.36	L37→L22	7.77
10	L18→L54	0.76	L45→L185	1.31	L159→L119	7.54

由表 1 可知: 风电装机容量的变化, 将改变系统中连锁故障的关键传播模式; 风电装机容量的增加还将导致传播关系的关键度显著增加, 如案例 3 中最大关键度为案例 1 中的 3.5 倍。

为说明本文所提模型的有效性, 本文首先采用文献[15]的方法辨识出现概率大的关键传播模式。针对本文所提方法和文献[15]方法辨识的结果(分别对应案例 4 和 5), 对关键传播模式施加阻断控制, 而后统计系统的损失。所采用的阻断控制措施是短时调整关键传播线路的额定容量, 以降低其停运概率^[5]。在施加阻断控制措施后, 不同场景的故障损失如图 9 所示。

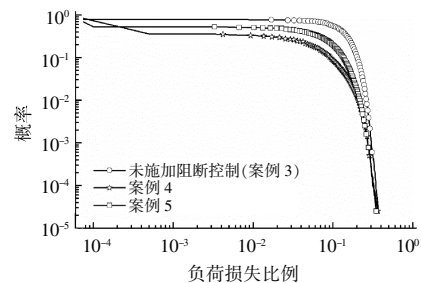


图 9 不同案例中基于辨识结果的阻断控制效果比较

Fig.9 Comparison of prevention control effects based on identification results in different cases

由图 9 可以看出, 在对本文所辨识的关键传

播模式施加阻断控制后,系统损失的减少量(对应于案例5)明显大于案例4。这主要是因为本文所提方法在辨识关键传播模式时同时考虑了概率和后果,辨识的结果更为准确,因此在其阻断后系统故障损失的减少量将更大。上述结果充分说明本文所提方法的有效性。

4 结论

针对高比例风电接入对电力系统连锁故障的影响,本文提出了基于故障数据提出关键传播模式的辨识方法,以筛选连锁故障的高风险传播环节,为未来连锁故障的防控提供支撑。算例结果表明,风电渗透率的升高将显著增加连锁故障造成负荷损失比例和范围,使得发生大停电的风险增加。此外,新能源渗透率的增加还将改变系统中故障的关键传播模式,进一步说明关键传播模式辨识的重要性。本文所提方法可有效辨识高比例风电接入下系统连锁故障的关键环节,为后续降低风电脱网风险将提供针对性地指导,支撑系统安全运行和新能源的有效消纳。此外,本文的连锁故障模型中重点考虑了风电出力波动对线路过载切除的影响。

参考文献:

- [1] 吴文可,文福拴,薛禹胜,等.基于马尔可夫链的电力系统连锁故障预测[J].电力系统自动化,2013,37(5):29-37.
- [2] 徐迪,王洪涛.基于随机潮流和风险价值的含大规模风电系统高风险连锁故障评估[J].电网技术,2019,43(2):400-409.
- [3] 胡源,薛松,张寒,等.近30年全球大停电事故发生的深层次原因分析及启示[J].中国电力,2021,54(10):204-210.
- [4] 曾辉,孙峰,李铁,等.澳大利亚“9·28”大停电事故分析及对中国启示[J].电力系统自动化,2017,41(13):1-6.
- [5] 柳璐.基于仿真数据分析和挖掘的连锁故障关键线路及传播模式辨识研究[D].杭州:浙江大学,2021.
- [6] 陈超洋,周勇,池明,等.基于复杂网络理论的大电网脆弱性研究综述[J].控制与决策,2022,37(4):782-798.
- [7] 刘友波,胡斌,刘俊勇,等.电力系统连锁故障分析理论与应用(一)-相关理论方法与应用[J].电力系统保护与控制,2013,41(9):148-155.
- [8] 刘志强.融合K-阶结构熵与区间电气介数的含风电网脆弱性评估[D].湘潭:湘潭大学,2020.
- [9] 王仁伟,张友刚,杨阳,等.基于电气介数的复杂电网脆弱线路辨识[J].电力系统保护与控制,2014,42(20):1-6.
- [10] Mei S, He F, Zhang X, et al. An improved OPA model and blackout risk assessment [J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2009, 24(2): 814-823.
- [11] 李勇,刘俊勇,刘晓宇,等.基于潮流熵的电网连锁故障传播元件的脆弱性评估[J].电力系统自动化,2012,36(19):11-16.
- [12] 张海锋,李德鑫,李秀杰,等.大规模风电接入对电网动态频率响应时空分布的影响[J].东北电力大学学报,2022,42(5):74-82.
- [13] 宾俊吉,廖凯,李波.计及源荷随机性的连锁故障高维模型及风险评估[J].电力系统及其自动化学报,2023,35(6):148-158.
- [14] 马致远,刘锋,沈沉,等.基于PageRank改进算法的电网脆弱线路快速辨识:(一)理论基础[J].中国电机工程学报,2016,36(23):6363-6370.
- [15] Luo C, Yang J, Sun Y, et al. Identify critical branches with cascading failure chain statistics and hypertext-induced topic search algorithm [A]. 2017 IEEE Power & Energy Society General Meeting [C]. Chicago: IEEE, 2017.1-5.
- [16] Ding Y, Singh C, Goel L, et al. Short-term and medium-term reliability evaluation for power systems with high penetration of wind power [J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2014, 5(3): 896-906.
- [17] 邓慧琼,曾凡滢,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.
- [18] Bao M, Ding Y, Shao C, et al. Nodal reliability evaluation of interdependent gas and power systems considering cascading effects [J]. IEEE Transactions on Smart Grid, 2020, 11(5): 4090-4104.
- [19] 包铭磊,杨阳,丁一,等.考虑天然气系统影响的电力系统连锁故障评估[J].电网技术,2019,43(1):32-40.
- [20] 陶华,杨震,张民,等.基于深度优先搜索算法的电力系统生成树的实现方法[J].电网技术,2010,34(2):120-124.
- [21] Yang S, Chen W, Zhang X, et al. A graph-based method for vulnerability analysis of renewable energy integrated power systems to cascading failures [J]. Reliability Engineering & System Safety, 2021, 207: 1-12.
- [22] 汪洋,杨仕伟,王宝华,等.基于深度置信网络的交直流配电网直流故障检测技术[J].电力工程技术,

2023,42(1):251–259.
[23] 张小莲,孙啊传,郝思鹏,等.风电场参与电网调频的

多机协同控制策略[J].发电技术,2024,45(3):448–457.

Identification of the critical propagation mode of failure chain for power systems with the high proportion of wind power

Li Site¹, Zhao Ying¹, Zhou Yongzhi²

(1.Electric Power Research Institute of State Grid Inner Mongolia Eastern Power Co., Ltd., Hohhot 010020, China;
2.College of Polytechnic Institute, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: The significant uncertainty of high-proportion wind power can make the scenarios of cascading failures in the power system more numerous and the mechanisms more complex. Identifying the key propagation modes of cascading failures is of great significance for preventing major power outages. This paper first considers factors such as wind power output uncertainty and component failure, establishes a dynamic analysis model for cascading failures. On this basis, failure propagation path data under massive initial scenarios are generated. Besides, an influence correlation diagram describing the sequential propagation process of cascading failures is established. Moreover, a method for identifying key failure propagation modes is proposed in combination with probability-consequences to screen high-risk propagation links of cascading failures under high-proportion wind power access. Finally, the IEEE 118 node is used to verify the effectiveness of the proposed method in identifying key propagation modes.

Keywords: high-proportion wind power; cascading failures; critical propagation patterns; influence correlation graph