

DOI: 10.19783/j.cnki.pspc.190547

含大规模风电并网电力系统的关键线路综合辨识

陶鸿飞¹, 谢栋², 赵福林³, 郭创新³, 杨才明², 沈勇¹

(1. 绍兴建元电力集团有限公司, 浙江 绍兴 312000; 2. 绍兴供电局, 浙江 绍兴 312000;
3. 浙江大学电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 风电的并网会给电力系统的稳定性带来影响, 也会影响电力系统中关键线路的辨识。针对风电出力的不确定性, 采用风电出力误差概率分布离散化的方法进行多场景的构建, 充分考虑风电的接入对电力系统的影响。线路的过载是引发电力系统线路故障的重要原因, 以线路负载率作为研究对象对潮流熵进行改进。在此基础上结合线路潮流介数, 提出综合潮流指标对线路的重要程度进行排序, 从而辨识出电力系统的关键线路。最后对 IEEE39 节点系统的关键线路辨识进行仿真计算, 验证了所提方法的有效性及其合理性。

关键词: 风电并网; 关键线路辨识; 改进潮流熵; 加权潮流介数; 综合潮流指标

Comprehensive identification of critical line in power systems with large-scale wind power integration

TAO Hongfei¹, XIE Dong², ZHAO Fulin³, GUO Chuangxin³, YANG Caiming², SHEN Yong¹

(1. Shaoxing Jianyuan Power Group Corporation, Shaoxing 312000, China; 2. State Grid Shaoxing Power Supply Company, Shaoxing 312000, China; 3. School of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: The integration of wind power will affect the stability of the power system as well as the identification of critical lines in the power system. Considering the uncertainty of wind power output, segmentation discretization method is adapted to construct wind power fluctuation prediction scenarios and the influence of wind power access on power systems. The overload of the line is an important cause of the fault of power system. In this paper, the line load rate is taken as the research object to improve the power flow entropy. On this basis, combined with the trend of the line, the synthetic power flow index is used to rank the importance of the line, so as to identify the key lines of the power system. Finally, simulation on the critical lines identification of IEEE 39-bus system validates the validity and effectiveness of the proposed method.

This work is supported by Key Program of National Natural Science Foundation of China (No. 51537010) and Collective Enterprises Science and Technology Project of State Grid Zhejiang Electric Power Company: Whole-Process Risk Assessment and Application of 'Prevention-Check-Emergency' Management and Control.

Key words: wind power integration; identification of critical line; modified power flow entropy; weighted power flow betweenness; synthetic power flow index

0 引言

近年来, 国内外电力系统发生了多次大停电事故, 造成了大量的经济损失。2003 年发生的美加大停电和 2008 年中国南方冰灾, 都造成了大范围、长时间的停电; 2018 年 3 月 21 日, 巴西电网因断路器过载保护引发连锁故障, 导致电网北部和东北部

14 个州大面积停电^[1]。这些停电事故的发生引起了电力工作人员的高度重视, 如何辨识电力系统中的关键设备风险, 成为减少大停电发生的重要研究内容^[2-3]。另一方面, 随着新能源的迅速发展, 风电并网规模不断扩大, 使得风力发电本身的随机性和波动性对电力系统的影响成为现今研究的一个热点问题。

对于电力系统关键线路辨识, 现有的研究大多从电网运行状态和网络拓扑结构这两个方面进行展开。在电网运行状态研究上, 文献[4]采用广义熵理论对负荷潮流增量进行研究, 建立了潮流分布熵和

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(51537010); 国网浙江省电力公司集体企业科技项目“地区电网全过程安全风险评估与“预防-校核-紧急管控系统应用”

潮流转移熵模型, 将潮流的冲击作为脆弱性评估指标, 但没有考虑到不同线路对于潮流冲击承受能力的差异。文献[5]利用改进传统广度优先遍历算法对潮流转移影响区域进行界定, 将潮流转移灵敏度作为系统启动安全评估的依据, 但其仅对区域安全进行研究, 未给出具体的线路辨识方法。文献[6]从潮流分布的聚集性和均匀性角度, 利用效用风险熵的概念对电网的脆弱支路进行辨识; 文献[7]利用动态潮流的方法对电网运行状态和连锁故障进行分析, 根据故障后电压稳定性来对关键线路进行辨识, 但两者都没有考虑发电机组出力波动带来的影响。

在网络拓扑结构研究方面, 文献[8]验证了中美两个地区电网都属于小世界网络, 定性地分析了电网的小世界特性。在此基础上, 文献[9]将支路阻抗作为线路权重, 提出使用带权重线路介数作为指标搜索最短路径的线路辨识方法, 但没有考虑到实际运行中潮流具有方向性和可分性的特点。为此, 文献[10]提出线路潮流介数的概念, 量化线路对全网潮流的传播贡献, 解决了线路潮流方向性和叠加性的问题。文献[11]通过静动态结合的方法对电网脆弱节点进行辨识, 但未计及线路方面的辨识。文献[12]基于网络最大流理论定义传输贡献度的概念对电网关键线路和节点进行辨识。除此之外, 复杂网络理论^[13-14]、自组织临界理论^[15]、元胞自动机^[16]、PageRank^[17]、源流路径链^[18]、事故链模型^[19]等方法也被应用到关键线路辨识中。

但是以上各种方法都没有考虑风电场接入的情况, 随着风电并网规模的不断扩大, 风电机组出力的不确定性对于电力系统实际运行已经产生了不容忽视的影响。为此, 本文采用风电预测误差概率分布离散化的方法进行风电多场景的构建, 实现对不确定性风电出力的模拟。在辨识方法上, 现有的方法大多以单一指标作为评价准则, 本文以线路负载率作为研究对象对潮流熵法进行改进, 并在此基础上结合潮流介数概念, 建立了综合潮流指标。该指标综合考虑电力系统的运行状态和网络拓扑结构, 可以据此对线路的重要程度进行排序, 从而辨识出电力系统的关键线路。最后, 通过对 IEEE39 节点系统进行仿真计算, 验证了本文所提方法的有效性及其合理性, 能够较好地辨识出大规模风电并网电力系统中的关键线路。

1 计及风电接入的场景分析

风电场的实际出力通过预测功率和预测误差之和来进行表示, 即

$$P_w = P_w^{\text{FCT}} + \varepsilon \quad (1)$$

式中: P_w^{FCT} 为风电预测功率, ε 为风电预测误差。

根据文献[20], TLS(t-location-scale)分布在拟合风电预测误差方面具有比正态分布和 Logistic 分布更好的效果, 故本文也以 TLS 分布为基础构建风电出力模型。首先, 基于历史数据对风电场实际出力与预测出力之间的误差进行计算, 然后根据预测误差数据进行 TLS 分布参数拟合, 得到风电预测误差的概率分布函数。

由于 TLS 分布为连续概率分布, 在实际计算中难以进行场景的构建, 因此可以采用预测误差概率分布离散化的方法进行处理。首先, 将风电预测误差用 “ -3σ ”、“ -2σ ”、“ $-\sigma$ ”、“ 0 ”、“ σ ”、“ 2σ ”、“ 3σ ” 这 7 个离散数值代替, 其中 σ 为 TLS 分布尺寸参数, 然后以这 7 个数值为中点进行概率分布区间划分, 每个区间的面积值即为该离散数值的概率。以某风电场预测出力在 800~850 MW 的历史数据为例, 获得其离散化概率模型如表 1 所示。

表 1 风电场预测误差 7 段离散化概率

Table 1 Seven discrete probability of wind farm prediction error

序号 i	ε	P_w	P_w^i
1	-3σ	$P_w^{\text{FCT}} - 3\sigma$	0.024 9
2	-2σ	$P_w^{\text{FCT}} - 2\sigma$	0.032 3
3	$-\sigma$	$P_w^{\text{FCT}} - \sigma$	0.117 6
4	0	P_w^{FCT}	0.357 4
5	σ	$P_w^{\text{FCT}} + \sigma$	0.319 0
6	2σ	$P_w^{\text{FCT}} + 2\sigma$	0.108 7
7	3σ	$P_w^{\text{FCT}} + 3\sigma$	0.040 1

当电网中含有多个风电场时, 可以对不同风电场离散误差场景进行组合, 以两个风电场为例, 对于每一个风电出力场景概率, 有

$$P_{w1,2}^{ij} = P_{w1}^i P_{w2}^j \quad (2)$$

式中: P_{w1}^i 为风电场 1 中场景序号为 i 的概率; P_{w2}^j 为风电场 2 中场景序号为 j 的概率; $i=1,2,\dots,7$, $j=1,2,\dots,7$ 。

在每一个风电场景下, 对电力系统进行线路辨识, 最后结合场景概率进行加权即可得到辨识结果。

2 关键线路辨识方法

2.1 改进潮流熵

当电力系统中某条线路发生故障时, 潮流的转移可能会使得其他线路过载, 进而引发连锁故障。为了评估线路的断开对于潮流分布的影响, 熵的概念被引入到电力系统分析中。熵是系统分布状态混乱性的量度, 在电力系统中, 可以定义潮流熵指标

来定量计算由于线路的切除给系统能量分布带来的影响, 进而辨识出关键的线路^[4]。文献[4]对潮流转移量进行分析, 当电网线路 l_{mn} 断开时, 由线路 l_{mn} 转移至 l_{ij} 的有功潮流增量 $\Delta\lambda_{ij}$ 为

$$\Delta\lambda_{ij} = P_{ij\leftarrow mn} - P_{ij} \quad (3)$$

式中: P_{ij} 为线路 l_{mn} 断开前 l_{ij} 的有功潮流; $P_{ij\leftarrow mn}$ 为线路 l_{mn} 断开后 l_{ij} 的有功潮流。

考虑到不同的线路额定容量不同, 仅对有功潮流转移量的大小进行衡量并不能完全反映系统的脆弱程度变化。为此, 采用以线路负载率作为研究对象对潮流熵的定义进行改进^[21], 定义线路负载率为

$$\mu_{ij} = \frac{P_{ij}}{P_{ij\max}} \quad (4)$$

式中: μ_{ij} 为线路 l_{ij} 的负载率; $P_{ij\max}$ 为线路 l_{ij} 所能传输的最大有功潮流。

系统正常运行时, 各个线路的负载率 μ_{ij} 在 $[0,1]$ 范围内分布, 当线路潮流发生重新分布时, 线路负载率也会发生变化, 因此将 $[0,1]$ 划分为 r 个区间, 为了在划分上更为精细, 负载率越大, 区间应越小, 故可以将区间以 $[0, \sqrt{\frac{1}{r}}], [\sqrt{\frac{1}{r}}, \sqrt{\frac{2}{r}}], \dots, [\sqrt{\frac{t}{r}}, \sqrt{\frac{t+1}{r}}], \dots, [\sqrt{\frac{r-1}{r}}, 1]$ 的方式进行划分。

为了评价线路负载率的分布情况, 定义线路潮流分布数 l_t 为线路负载率 $\mu_{ij} \in (\sqrt{t/r}, \sqrt{(t+1)/r}]$ 的线路数目, 当线路负载率大于最大负载率时, 需将线路断开再进行潮流计算, 重复上述步骤。

可得电力系统的改进潮流熵为

$$B'_{ij} = -\sum_{t=1}^{r-1} P(t) \ln P(t) \quad (5)$$

$$P(t) = \frac{l_t}{\sum_{t=1}^{r-1} l_t} \quad (6)$$

式中: B'_{ij} 为线路 l_{ij} 切除过后系统的潮流熵; $P(t)$ 为 l_t 线路数目占所有线路数目比例。

由于线路负载率越大, 其发生越界的可能性也越大, 因此可以对不同负载率区间进行加权, 即

$$\alpha_t = \frac{1}{1 - \mu_t / \gamma} \quad (7)$$

式中: γ 为线路最大过载率; μ_t 取相应 $(\sqrt{t/r}, \sqrt{(t+1)/r}]$ 的中点。为此可以得到改进后的潮流熵为

$$B_{ij} = -\sum_{t=1}^{r-1} \alpha_t P(t) \ln P(t) \quad (8)$$

2.2 加权潮流介数

在电力系统网络拓扑中, 常常以支路阻抗作为边的权重, 但是实际电网遵循基尔霍夫定律, 电流在传输过程中具有“可分性”, 所有线路都有可能成为电流的传播途径。文献[22]提出了电气介数的概念, 这种方法克服了拓扑分析中电流传播与实际情况不符合的问题, 但该方法仅关注了支路电流的大小, 而忽略了实际电网中电流具有方向性的特点。为此, 根据文献[23], 定义支路功率分布因子为

$$\beta_{i\leftarrow k}^{ij} = \frac{S_{i\leftarrow k}^{ij}}{S_k} = \tilde{y}_{ij} (\tilde{Z}_{ki} - \tilde{Z}_{kj}) \frac{U_i}{U_k} \quad (9)$$

式中: $S_{i\leftarrow k}^{ij}$ 为由发电节点 k 提供由 i 端流入支路 l_{ij} 中的传输功率; S_k 为发电节点 k 输出总功率; \tilde{y}_{ij} 为支路 l_{ij} 电导的共轭; \tilde{Z}_{ki} 为阻抗矩阵 \mathbf{Z} 的第 k 行第 i 列元素的共轭; \tilde{Z}_{kj} 为阻抗矩阵 \mathbf{Z} 的第 k 行第 j 列元素的共轭; U_i 和 U_k 分别为节点 i 和节点 k 的电压。

考虑到目前输电网无功功率的布点基本合理, 实际输电网中大容量远距离无功功率传输的情况较少, 可以假定系统节点电压幅值近似相等^[23]。因此, 当假定 $U_i = U_k$ 时, 由式(10)可得

$$\beta_{i\leftarrow k}^{ij} = \tilde{y}_{ij} (\tilde{Z}_{ki} - \tilde{Z}_{kj}) \quad (10)$$

根据定义可得经过支路 ij 的潮流为

$$S_{ij} = \sum_{k \in G} \beta_{i\leftarrow k}^{ij} S_k \quad (11)$$

在电力系统中, 大停电事故的发生往往是由个别元件故障开始, 而线路的过载会引起继电保护动作, 为此, 以线路的负载率作为评价标准更为贴切。

$$\eta_{ij} = \frac{\text{real}(S_{ij})}{P_{ij\max}} \quad (12)$$

式中: $\text{real}(S_{ij})$ 为支路 l_{ij} 传输的有功功率; $P_{ij\max}$ 为支路 l_{ij} 可传输的最大有功传输功率。

由于电力系统的网络拓扑可以认为是小世界模型, 其关键线路的辨识不仅仅依靠于潮流指标的计算, 还与线路所在的拓扑位置有关。在复杂网络理论中, 与节点相连的所有线路数量之和定义为节点度数, 取所有节点度数的平均值可得

$$\bar{K} = \frac{1}{N} \sum_{i \in D} K_i = \frac{2L}{N} \quad (13)$$

式中: D 为网络中的所有节点; N 为所有节点总数; L 为所有支路总数。

定义支路 l_{ij} 的联系度指标 K_{ij} 为

$$K_{ij} = \frac{\sqrt{K_i \cdot K_j}}{K} \quad (14)$$

结合式(12)可得支路 l_{ij} 的加权潮流介数:

$$F_{ij} = \eta_{ij} K_{ij} \quad (15)$$

2.3 综合潮流指标

从上面的分析可以看出,改进潮流熵描述了当线路切断后引起的潮流转移对系统安全性的影响,而加权潮流介数描述了线路在电力系统静态运行和拓扑分析上的重要程度,两者从不同层面辨识了线路的关键程度。为了综合评价某条线路的重要性,可以对这两种指标进行综合。

首先,为了避免线性归一化带来的遮蔽现象,采用效用理论^[24]对改进潮流熵和加权潮流介数进行归一化处理,可得

$$B_{ij}^* = \frac{e^{\frac{B_{ij} - B_{ij\min}}{B_{ij\max} - B_{ij\min}}} - 1}{e - 1} \quad (16)$$

$$F_{ij}^* = \frac{e^{\frac{F_{ij} - F_{ij\min}}{F_{ij\max} - F_{ij\min}}} - 1}{e - 1} \quad (17)$$

式中: $B_{ij\max}$ 和 $B_{ij\min}$ 分别为所有线路的 B_{ij} 最大值和最小值; $F_{ij\max}$ 和 $F_{ij\min}$ 分别为所有线路的 F_{ij} 最大值和最小值。

现定义线路综合潮流指标为

$$M_{ij} = \sqrt{\omega_B \times B_{ij}^2 + \omega_F \times F_{ij}^2} \quad (18)$$

改变 ω_B 和 ω_F 的大小可以实现对静态关键程度和动态关键程度的调整。

1) $\omega_B = 0$, $\omega_F = 1$, 此时只考虑线路静态拓扑的重要程度;

2) $\omega_B = 1$, $\omega_F = 0$, 此时只考虑线路潮流转移的重要程度;

3) $\omega_B = 0.5$, $\omega_F = 0.5$, 此时同等考虑线路潮流转移和静态拓扑的重要程度。

同样地可以对综合潮流指标进行归一化处理:

$$M_{ij}^* = \frac{e^{\frac{M_{ij} - M_{ij\min}}{M_{ij\max} - M_{ij\min}}} - 1}{e - 1} \quad (19)$$

然后将所有线路的 M_{ij}^* 值进行降序排列,即可确定系统中的关键线路。

2.4 关键线路辨识流程

结合在第1节中对风电场的分析,对每个风电场景下进行改进潮流熵和加权潮流介数的计算,在此基础上得到线路的综合潮流指标,最后通过场景概率加权降序排列,确定系统的关键线路,具体辨

识流程如图1所示。

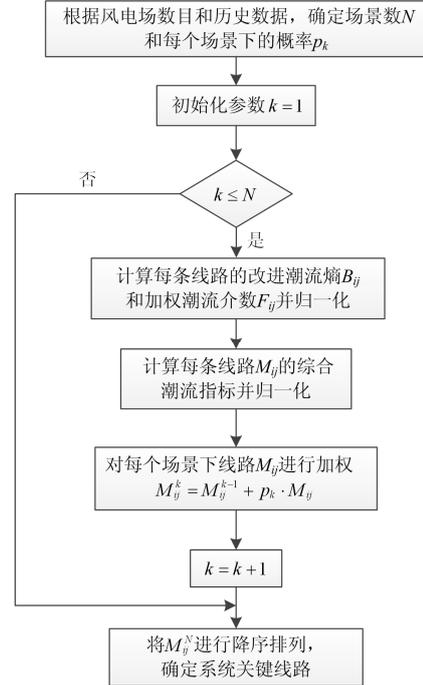


图1 关键线路辨识流程图

Fig. 1 Flow chart of critical line identification

1) 根据历史数据,采用预测误差概率分布离散化的方法获取风点出力场景,结合风电场数目确定场景数 N 和每个场景下的概率 p_k ;

2) 初始化场景计数 $k = 1$;

3) 判断场景计数是否小于等于场景总数 N ,若是继续下一步,若否则进行第8)步;

4) 计算每条线路的改进潮流熵 B_{ij} 和加权潮流介数 F_{ij} 并进行归一化处理;

5) 计算每条线路的综合潮流指标 M_{ij} 并进行归一化处理;

6) 在每个场景下结合场景概率 p_k 对 M_{ij} 进行加权, $M_{ij}^k = M_{ij}^{k-1} + p_k M_{ij}$;

7) 场景计数 $k = k + 1$;

8) 将 M_{ij}^N 进行降序排列,确定系统关键线路。

3 算例分析

本文基于 Matlab 平台,对标准 IEEE39 节点系统的关键线路进行辨识,其拓扑图如图2所示。

该系统含有10台发电机,19个负荷和46条线路。在算例中,首先对不同方法的辨识结果进行比较,然后利用最优潮流失负荷量^[25]对本文提出方法的有效性进行验证,最后在考虑风电场接入的情况对线路进行辨识。

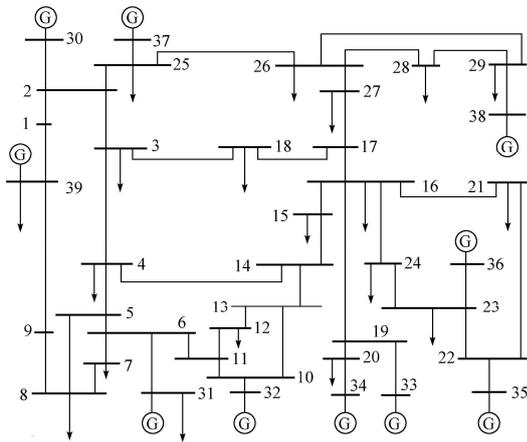


图 2 IEEE39 节点系统接线图

Fig. 2 Connection diagram of IEEE 39-bus system

3.1 不同方法辨识结果比较

首先根据第 2 节中的改进潮流熵法来对系统的关键线路进行辨识，取线路最大过载率 $\gamma=1.1$ 。为了更直观地比较将计算结果用柱状图如图 3 表示。

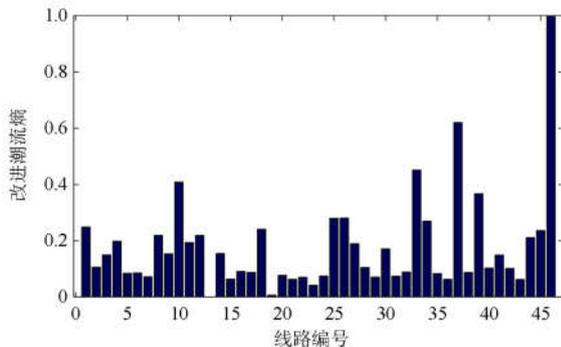


图 3 IEEE39 节点系统各线路改进潮流熵

Fig. 3 Power flow entropy of each branch in IEEE 39-bus system

根据 B_{ij} 的大小进行降序排列，取前 7 条线路作为关键线路，结果如表 2 所示。

表 2 基于改进潮流熵的关键线路辨识

Table 2 Critical line identification based on modified power flow entropy

排序	线路编号	线路	改进潮流熵
1	46	29-38	1.000 0
2	37	22-35	0.620 3
3	33	19-33	0.451 4
4	10	5-6	0.408 8
5	39	23-36	0.368 0
6	26	16-17	0.281 4
7	25	15-16	0.279 9

可以看出，在改进潮流熵指标下，线路 29-38 是最为关键的线路，该线路是 bus38 的唯一输出支路，并且连接在 bus38 的发电机最大有功出力为 865 MW，在所有发电机中排名第 3 位，是系统重要的出力机组。同样的，排在第 2 位的线路 22-35 和排在第 3 位的线路 19-33 也分别为 bus35 和 bus33 的唯一有功输出支路，在系统出力上起着重要作用。

在电力系统中，由于线路断开而导致发电机组的脱网会引起周围潮流的重新分布，容易导致区域功率供给不足和线路过载等故障，应给予充分的重视。

但是，改进潮流熵指标仅仅从线路断开后潮流的转移方面进行分析，并未计及线路在当前网络拓扑中起到的重要程度，当某条线路断开后通过其他机组的配合出力使得系统仍能正常运行，为此可以结合加权潮流系数对系统关键线路进行辨识。

在改进潮流熵法的基础上，分别根据加权潮流系数和综合潮流指标来进行计算，取 $\omega_B=0.5$ ， $\omega_F=0.5$ ，即同等考虑线路潮流转移和静态拓扑的重要程度，将三种辨识方法所得的结果进行比较，如表 3 所示。

表 3 关键线路辨识结果比较

Table 3 Comparison of critical line identification results

排序	改进潮流熵	加权潮流系数	综合潮流指标
1	29-38	19-20	29-38
2	22-35	16-17	19-20
3	19-33	16-19	16-17
4	5-6	19-33	19-33
5	23-36	10-32	16-19
6	16-17	22-35	22-35
7	15-16	29-38	10-32

由表 3 可以发现，改进潮流熵法和加权潮流系数法都辨识出线路 29-38、线路 22-35、线路 19-33、线路 16-17 这 4 条线路为系统关键线路，可以看出两者在关键线路的辨识上具有一定的一致性。但对于线路 5-6，在基于改进潮流熵法中其排名第 4 位，而在基于加权潮流系数法中其排名第 23 位，相差较大，这是因为线路 5-6 在传输 bus31 上发电机有功出力时起到了重要作用，但是从拓扑结构上来看，线路 4-14 与其具有相似的地位，所以在加权潮流系数法中并未把线路 5-6 作为关键线路。

在综合潮流指标下，除了改进潮流熵和加权潮流系数共同辨识出的 4 条线路外，线路 19-20、线路 16-19 和线路 10-32 也被辨识为关键线路。这是因为线路 19-20 在加权潮流系数下排名第 1 位，在

IEEE39 节点系统中, 线路 19-20 的断开使得 bus20 和 bus34 分列为孤岛, bus20 上负荷为 680 MW, 而 bus34 上机组最大有功出力为 508 MW, 直接导致 bus20 上失负荷 172 MW; 同样线路 16-19 或线路 10-32 的断开也会造成系统分列为两个孤岛, 使得电网连通性和安全性大大降低。

为了进一步验证综合潮流指标对关键线路的辨识效果, 采用最优潮流失负荷量^[25]来判别某条线路

断开后对系统影响。当线路断开后, 在满足功率平衡约束、电压约束、线路传输约束和发电机出力约束的情况下, 以系统有功功率削减量作为目标函数进行最优潮流计算, 所得结果即为最优潮流失负荷量。基于 IEEE39 节点系统, 对每条线路以不同次序进行断开校验, 所得系统最优潮流失负荷量如图 4 所示。

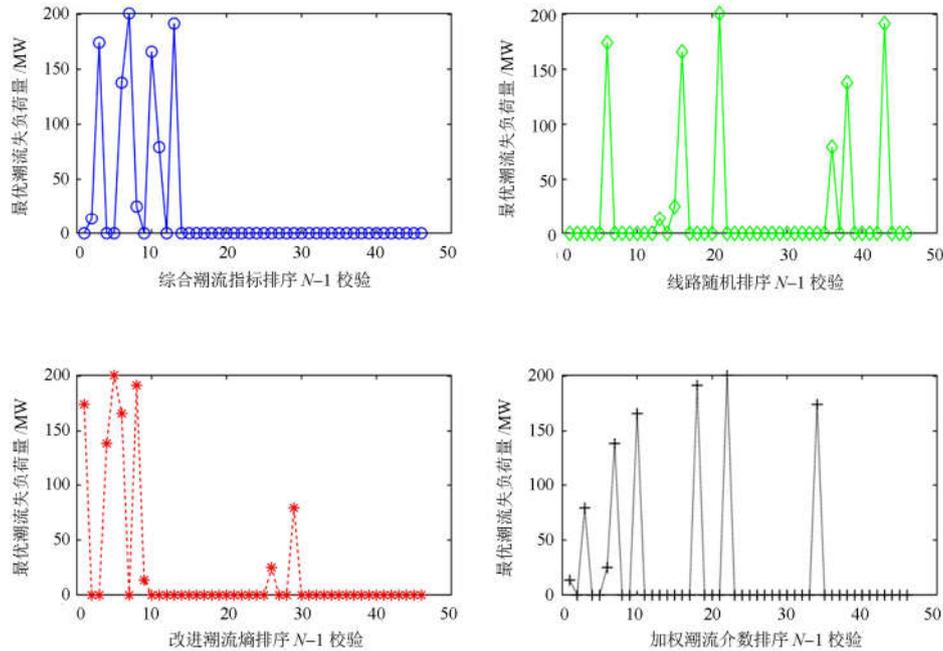


图 4 不同排序下系统最优潮流失负荷校验

Fig. 4 Optimal power flow loss check under different orders

通过比较可以发现, 对该节点系统进行线路断开校验, 最优失负荷量都在 200 MW 以下。在综合潮流指标排序下依次进行线路断开校验, 系统最优失负荷量大于 0 的线路都集中在前 14 条当中, 辨识效果最好, 其次是改进潮流熵法, 加权潮流介数法由于在潮流计算中采用了较多的简化, 虽然计算速度大大提升, 但也造成了精度上的降低。与其他三种校验方式相比, 本文提出的综合潮流指标克服了单一指标评价的不足, 对电力系统的关键线路辨识具有良好的效果。

3.2 计及风电并网下的关键线路综合辨识

随着大规模风电的接入, 电力系统的稳定性和可靠性会受到影响, 针对风电并网带来出力随机性和波动性的问题, 本文采用风电预测误差概率分布离散化的方法进行多场景的构建, 结合风电预测值对风电出力进行模拟, 并在此基础上进行关键线路综合辨识。

首先, 对单个风电场接入的情况进行分析, 在 IEEE39 节点系统中, 将 bus38 上的发电机组替换为一预测出力为 830 MW 的风电场, 取表 1 中的数据作为该风电场出力误差离散化概率, 其中 TLS 分布尺寸参数 $\sigma = 200$ MW。利用综合潮流指标对改进后的 IEEE39 节点系统进行线路辨识, 所得结果如表 4 所示。

表 4 计及单个风电场接入的关键线路辨识

Table 4 Critical line identification with single wind farm integration

排序	线路编号	线路	综合潮流指标
1	32	19-20	1.000 0
2	46	29-38	0.941 5
3	26	16-17	0.655 7
4	33	19-33	0.521 0
5	27	16-19	0.505 0
6	20	10-32	0.245 8
7	37	22-35	0.195 3

比较表 4 和表 3 中的综合潮流指标辨识结果可以发现, 两者辨识结果虽大致相同, 但线路 29-38 的重要性有所下降, 这是由于线路 29-38 是连接在 bus38 上发电机组的唯一有功输出通道, 当将发电机组改为风电场后, 其有功输出的稳定性降低, 周围机组因需要平衡风电场不稳定出力而应具有较高的可靠性。除此之外, 线路 10-32 的重要程度有所提升, 这是因为线路 10-32 所连的发电机组距离风电场较远, 其周围发电机组因需要平衡风电场不稳定出力从而使得 bus31 上发电机在供负荷上的作用增大。

然后考虑多个风电场接入的情况, 在上例接入单个风电场的基础上, 将 bus35 上的发电机组替换为一运行容量为 650 MW 的风电场, 取表 5 中的数据作为风电场 2 的出力误差离散化概率, 且 TLS 分布尺寸参数 $\sigma = 30$ MW, 再次利用综合潮流指标进行关键线路辨识, 结果如表 5 所示。

表 5 风电场 2 预测误差 7 段离散化概率

Table 5 Seven discrete probability of wind

farm 2 prediction error			
序号 i	ε	P_w	P_w^i
1	-3σ	$P_w^{\text{FCT}} - 3\sigma$	0.016 9
2	-2σ	$P_w^{\text{FCT}} - 2\sigma$	0.030 9
3	$-\sigma$	$P_w^{\text{FCT}} - \sigma$	0.121 5
4	0	P_w^{FCT}	0.364 2
5	σ	$P_w^{\text{FCT}} + \sigma$	0.325 1
6	2σ	$P_w^{\text{FCT}} + 2\sigma$	0.109 3
7	3σ	$P_w^{\text{FCT}} + 3\sigma$	0.032 1

将无风电场接入和两个风电场接入的线路辨识结果与单个风电场接入的结果进行比较, 如图 5 所示。其中线路排序是以单个风电场接入下综合潮流指标降序排列所得的线路顺序。

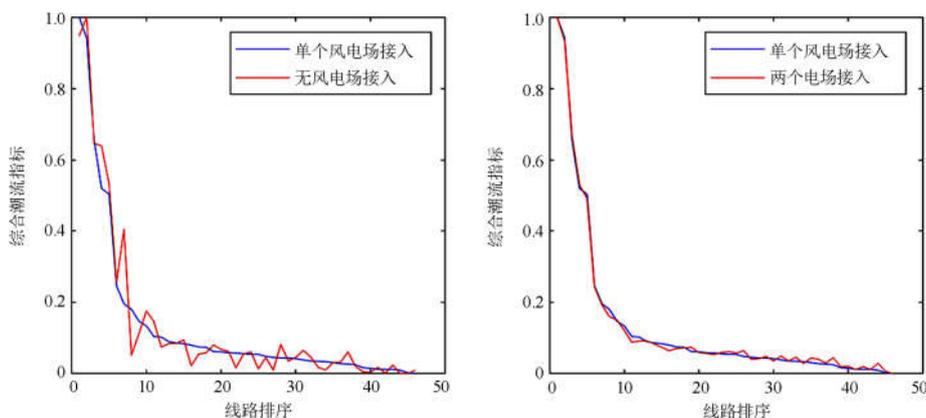


图 5 不同风电场接入下线综合潮流指标

Fig. 5 Synthetic power flow index of the line with different wind farms integration

可以看出, 单个风电场接入和两个风电场接入这两种情况下线路辨识结果大致相同, 只是少量线路的排序发生了前后的移动。这是因为 bus35 所接的风电场 2 出力误差波动较小, 并且在风电场 2 附近还有较多的发电机组进行功率平衡, 使得风电场 2 对线路辨识的结果影响较小。经过比较两次线路辨识结果可知, 风电并网对电力系统线路辨识的影响与风电场出力的波动和风电场周围发电机组的分布有关, 风电场出力波动越大, 周围可供平衡的发电机组越少, 对线路辨识的结果的影响越大。

4 结论

本文对潮流熵法进行了改进, 以线路负载率作为分析对象并进行非等区间离散划分和加权系数, 使其更客观地反映线路的断开对系统脆弱程度造成

的影响。在此基础上结合改进潮流介数法, 提出综合潮流指标。对 IEEE39 节点系统进行算例分析并采用最优潮流失负荷量来对各个方法的辨识结果进行比较, 发现综合潮流指标能够克服了单一指标评价的不足, 更为有效地辨识出系统的关键线路。

考虑到风电场的接入会对电力系统的稳定性造成影响, 本文采用 TLS 模型误差概率分布离散化的方法进行风电多场景的构建, 结合风电预测值对风电出力进行模拟。当电力系统中含有多个风电场时, 可以对不同风电场离散误差场景进行组合, 求出每个风电出力场景下的概率。通过对计及风电并网的影响, 该方法能够较好地反映出风电场的接入对于电力系统关键线路辨识的影响。

本文通过综合改进潮流熵和加权潮流介数对含大规模风电并网电力系统的关键线路进行辨识, 但

不同线路在运行过程中故障率有所差别, 结合线路故障率和事故后损失来对关键线路进行辨识将是本文后续工作的研究重点。

参考文献

- [1] 易俊, 卜广全, 郭强, 等. 巴西“3·21”大停电事故分析及对中国电网的启示[J]. 电力系统自动化, 2019, 43(2): 1-6.
YI Jun, BU Guangquan, GUO Qiang, et al. Analysis on blackout in Brazilian power grid on March 21, 2018 and its enlightenment to power grid in China[J]. Automation of Electric Power Systems, 2019, 43(2): 1-6.
- [2] 石立宝, 史中英, 姚良忠, 等. 现代电力系统连锁性大停电事故机理研究综述[J]. 电网技术, 2010, 34(3): 48-54.
SHI Libao, SHI Zhongying, YAO Liangzhong, et al. A review of mechanism of large cascading failure blackouts of modern power system[J]. Power System Technology, 2010, 34(3): 48-54.
- [3] BOMPARD E, WU D, XUE F. Structural vulnerability of power systems: a topological approach[J]. Electric Power Systems Research, 2011, 81(7): 1334-1340.
- [4] 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.
LI Yong, LIU Junyong, LIU Xiaoyu, et al. Vulnerability assessment in power grid cascading failure based on entropy of power flow[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(19): 11-16.
- [5] 闫常友, 周孝信, 康建东, 等. 潮流转移灵敏度以及安全评估指标研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(19): 7-13.
YAN Changyou, ZHOU Xiaoxin, KANG Jiandong, et al. Flow transferring sensitivity and security index analysis[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(19): 7-13.
- [6] 丁明, 过羿, 张晶晶. 基于效用风险熵的复杂电网连锁故障脆弱性辨识[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(17): 52-57.
DING Ming, GUO Yi, ZHANG Jingjing. Vulnerability identification for cascading failure of complex power grid based on effect risk entropy[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(17): 52-57.
- [7] 谭玉东, 李欣然, 蔡晔, 等. 基于动态潮流的电网连锁故障模型及关键线路识别[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(3): 615-635.
TAN Yudong, LI Xinran, CAI Ye, et al. Modeling cascading failures in power grid based on dynamic power flow and vulnerable line identification[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(3): 615-635.
- [8] 孟仲伟, 鲁宗相, 宋靖雁. 中美电网的小世界拓扑模型比较分析[J]. 电力系统自动化, 2004, 28(15): 21-24.
MENG Zhongwei, LU Zongxiang, SONG Jingyan. Comparison analysis of the small-world topological model of Chinese and American power grids[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28(15): 21-24.
- [9] CHEN X G, SUN K, CAO Y J, et al. Identification of vulnerable lines in power grid based on complex network theory[C] // 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting, June 24-28, 2007, Tampa, FL, USA.
- [10] 刘文颖, 梁才, 徐鹏, 等. 基于潮流介数的电力系统关键线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 90-98.
LIU Wenyong, LIANG Cai, XU Peng, et al. Identification of critical line in power systems based on flow betweenness[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 90-98.
- [11] 李利娟, 吴军, 刘红良, 等. 计及新能源影响静态结合的电网脆弱节点辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(2): 65-72.
LI Lijuan, WU Jun, LIU Hongliang, et al. Static and dynamic integration method on identifying vulnerability nodes considering new energy power[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(2): 65-72.
- [12] 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 Systems, 2012, 36(9): 6-12.
- [13] 倪向萍, 梅生伟, 张雪敏. 基于复杂网络理论的输电线路脆弱度评估方法[J]. 电力系统自动化, 2008, 32(4): 1-5.
NI Xiangping, MEI Shengwei, ZHANG Xuemin. Transmission lines vulnerability assessment based on complex network theory[J]. Automation of Electric Power Systems, 2008, 32(4): 1-5.
- [14] 曾凯文, 文劲宇, 程时杰, 等. 复杂电网连锁故障下的关键线路辨识[J]. 中国电机工程学报, 2014, 34(7): 1103-1112.
ZENG Kaiwen, WEN Jinyu, CHENG Shijie, et al. Critical line identification of complex power system in cascading failure[J]. Proceedings of the CSEE, 2014, 34(7): 1103-1112.
- [15] 岳贤龙, 王涛, 顾雪平, 等. 基于自组织临近理论的电

- 网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(15): 18-26.
- YUE Xianlong, WANG Tao, GU Xueping, et al. Vulnerable line identification of power grid based on self-organizing critical theory[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(15): 18-26.
- [16] 李辉, 贾晓风, 李利娟, 等. 基于元胞自动机的电网隐性故障传播模型关键线路辨识方法[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(6): 16-23.
- LI Hui, JIA Xiaofeng, LI Lijuan, et al. An approach for critical lines identification of power grid hidden fault propagation model based on cellular automata[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(6): 16-23.
- [17] 马志远, 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.
- MA Zhiyuan, LIU Feng, SHEN Chen, et al. Rapid Identification of vulnerable lines in power grid using modified PageRank algorithm—part I: theoretical foundation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36(23): 6363-6370.
- [18] 张富超, 谢成荣, 沈立新, 等. 基于源流路径链和输电介数的电网关键线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(21): 7-12.
- ZHANG Fuchao, XIE Chengrong, SHEN Lixin, et al. Identification of power grid critical lines based on path chains and transmission betweenness[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(21): 7-12.
- [19] 王涛, 高成彬, 顾雪平, 等. 基于事故链模型的电网关键线路辨识[J]. 高电压技术, 2014, 40(8): 2306-2313.
- WANG Tao, GAO Chengbin, GU Xueping, et al. Critical lines identification of power grid based on the fault chain model[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(8): 2306-2313.
- [20] 黎静华, 左俊军, 汪赛. 大规模风电并网电力系统运行风险评估与分析[J]. 电网技术, 2016, 40(11): 3503-3510.
- LI Jinghua, ZUO Junjun, WANG Sai. Analysis and assessment of operation risk for power system with large-scale wind power integration[J]. Power System Technology, 2016, 40(11): 3503-3510.
- [21] 韩畅, 林振智, 杨莉, 等. 台风条件下区域电力系统的重要线路多维度辨识[J]. 电力系统自动化, 2018, 42(15): 118-125.
- HAN Chang, LIN Zhenzhi, YANG Li, et al. Multi-dimensional critical line identification for regional power systems under typhoon[J]. Automation of Electric Power Systems, 2018, 42(15): 118-125.
- [22] 徐林, 王秀丽, 王锡凡. 电气介数及其在电力系统关键线路识别中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(1): 33-39.
- XU Lin, WANG Xiuli, WANG Xifan. Electric betweenness and its application in vulnerable line identification in power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(1): 33-39.
- [23] 贾燕冰, 何海丹. 基于绝对潮流介数和分布因子相关度的关键线路辨识方法[J]. 高电压技术, 2017, 43(1): 307-313.
- JIA Yanbing, HE Haidan. Identification of critical line in power systems based on absolute power flow betweenness and distribution factor correlation[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(1): 307-313.
- [24] LI R, LÜ Z Y, ZHAI C X, et al. The comprehensive identification model of critical lines in electric power grid based on utility theory and cooperative game[C] // 2016 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America, September 20-24, 2016, Morelia, Mexico: 5p.
- [25] 曹煜, 郭创新, 章禹, 等. 计及无功潮流影响的传输介数概念及其电网关键线路辨识研究[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(23): 9-16.
- CAO Yu, GUO Chuangxin, ZHANG Yu, et al. Study of the concept of transmission betweenness considering the effect of reactive power flow and its application in identification of critical lines in power grid[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(23): 9-16.

收稿日期: 2019-03-31; 修回日期: 2019-08-25

作者简介:

陶鸿飞(1966—), 男, 本科, 高级工程师, 研究方向为电力系统及其自动化技术; E-mail: taohongfei1662@163.com

谢 栋(1984—), 男, 硕士, 高级工程师, 研究方向为电力系统稳定分析; E-mail: xiedong1984@sjtu.edu.cn

赵福林(1994—), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力系统风险评估与可靠性研究。E-mail: zhaofulin@zju.edu.cn

(编辑 姜新丽)