

基于区间电气 DebtRank 算法的 含风电电力系统脆弱节点识别

李利娟^{1,2}, 李月¹, 丁钢伟¹, 吕志强¹, 曾亦惟¹

(1.湘潭大学 自动化与电子信息学院, 湖南 湘潭 411105; 2.湖南国家应用数学中心, 湖南 湘潭 411105)

摘要: 针对风电的随机性和波动性会影响电网脆弱性评估和关键节点辨识的问题, 文章提出了一种区间电气 DebtRank 算法来识别电网中的脆弱节点。该方法首先考虑了节点的偏移状态及节点特性, 改进了电气 DebtRank 算法; 然后, 用区间数表示风力发电的随机性和波动性, 提出了区间电气 DebtRank 算法来辨识含有风电接入电力系统情况下的脆弱节点; 最后, 通过 IEEE-118 节点系统的仿真对比分析表明, 所提方法辨识的脆弱节点遭到攻击时, 系统可供电能力下降到系统正常时的 33%, 系统的电能传输能力大幅降低。

关键词: 脆弱性评估; 关键节点; 偏移状态; 区间电气 DebtRank 算法

中图分类号: TK81 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5292(2025)04-0521-07

0 引言

近年来, 风电并网比例不断提高^[1]。风电出力随气候等因素波动频繁难以控制, 严重的风电爬坡事件可能导致电力系统潮流越限, 易诱发电力系统中脆弱节点或脆弱线路故障, 引发级联故障导致连锁故障, 进而引起大停电事故^[2]。当电力系统中脆弱节点发生故障时, 导致流经脆弱节点的潮流转移到其他元件上, 使电网各节点脆弱性也发生改变^[3]。因此, 脆弱节点对电网稳定运行具有重要影响, 辨识脆弱节点是保障电力系统安全稳定运行的重要环节^[4]。

现有研究主要从电力系统拓扑结构和物理特性以及实时运行状态方面进行电力系统脆弱节点辨识。通过研究网络拓扑特征参数, 从拓扑结构上评估电力系统脆弱性, 识别关键元件^[5]。文献[6]在电网导纳矩阵的基础上, 对常见的中心性指标进行重新定义, 使中心性指标不但与电网的物理拓扑相关, 而且与节点和线路之间的电气耦合程度和电气距离相关。在电网物理特性和实时运行状态研究方面, 通过定义相关指标描述电网元件的关键程度来评估脆弱性。文献[7]考虑节点与系统的相互影响, 从节点的抗干扰能力和综合影响两个方面构建评价指标, 识别脆弱节点。熵理论^[8]被广泛应用于电力系统脆弱性评估, 文献[9]提出

了一种基于电力系统熵变特征分析的模型, 用于识别脆弱环节, 该模型考虑了电力系统线路故障对系统的冲击和系统对故障消纳的耦合动态行为。上述研究在拓扑方面是从邻居的数量上考虑对节点重要性的影响, 为了考虑邻居节点质量和性能对节点重要性的影响, 将计算机网络中评估网页影响力的基于特征向量的方法进行改进并用于电力系统, 实现了电力系统中脆弱节点的辨识。文献[10]根据电网中不同节点类型的特点, 提出了一种改进的 PageRank 算法来快速识别关键节点, 该算法同时考虑了发电机节点、负荷节点和联接节点。文献[11]建立了电力系统有向加权网络模型, 提出了基于 PSNodeRank 算法的电网脆弱节点辨识方法, 对大电网节点重要性的复杂计算过程进行改进, 缩短了 PageRank 算法运算时间并减小了运算量。文献[12]指出电力线路介于正常和故障之间的重载状态对电力系统关键线路辨识准确性有重要影响。以上研究对电力系统进行脆弱节点的辨识仅考虑了节点在运行正常与故障两种状态及对节点自身参数的影响, 但忽略了节点过渡状态对节点脆弱性的影响。

由于风能的随机性和波动性, 当级联故障发生时, 通过输电线路功率的不确定性将进一步扩大故障规模。因此, 电网节点脆弱性评估问题变得

收稿日期: 2023-12-16。

基金项目: 国家自然科学基金(52077189)。

作者简介: 李利娟(1980-), 女, 博士, 教授, 研究方向为电网脆弱性、电力电子化电力系统安全稳定及机器学习在电力系统中的应用。

E-mail: lilj@xtu.edu.cn

更加复杂。电力系统中节点的故障概率与节点电压的偏差相关,当电网中某些节点处于可以运行但运行状态不佳(过渡状态)时,可能导致电力系统的潮流波动、节点电压下降等问题,使得该节点故障概率增加。因此,处于正常状态的节点从受到攻击或因元件自身老化、工作人员操作失误等原因到完全故障状态之间存在着一个过渡状态,该状态将会对电力系统脆弱性评估结果造成影响。所以,在电力系统脆弱节点辨识中,不能忽略节点的过渡状态的潜在影响。本文针对高比例风电电力系统节点过渡状态的影响,提出区间电气 DebtRank 算法来辨识含风电电力系统中脆弱节点,并将该方法在 IEEE-118 节点系统进行仿真分析,结果表明该方法的有效性。

1 电力系统节点状态定义

节点电压影响和决定了电力系统节点的运行^[13],节点电压故障概率随节点电压偏差的变化关系^[14]如图 1 所示。

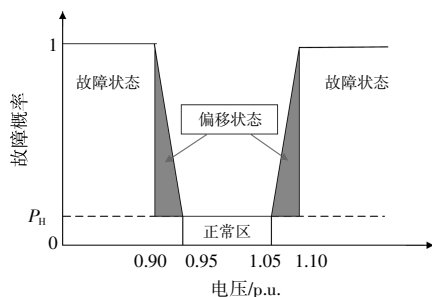


图 1 节点电压故障概率随节点电压偏差的变化关系
Fig.1 Variation of node voltage fault probability with node voltage deviation

当节点电压 U 为 0.95~1.05 p.u.时,节点处于正常状态,仅考虑由装置本身的缺陷或人为因素导致的隐患;当 $U < 0.90$ p.u.或 $U > 1.10$ p.u.时,电压偏差超过电网允许的范围,节点失效,此时故障概率为 1;而当 U 为 0.90~0.95 p.u.或 1.05~1.10 p.u.时,节点故障率将会随着电压偏差的增大而增大,定义该状态为偏移状态。

考虑含风电电力系统节点的状态时,当风力发电机的端电压降低到一定值且不脱离电网而继续维持运行时,即具有低电压穿越能力^[15],如图 2 所示。

图 3 为低电压穿越过程中的节点故障概率随节点电压变化的关系。

由图 2,3 可知:当 $U < 0.2$ p.u.时,风力机脱网,

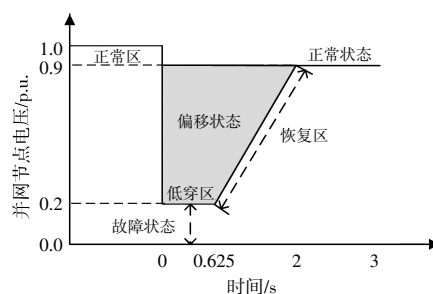


图 2 低电压穿越过程

Fig.2 Schematic diagram of low voltage ride-through process

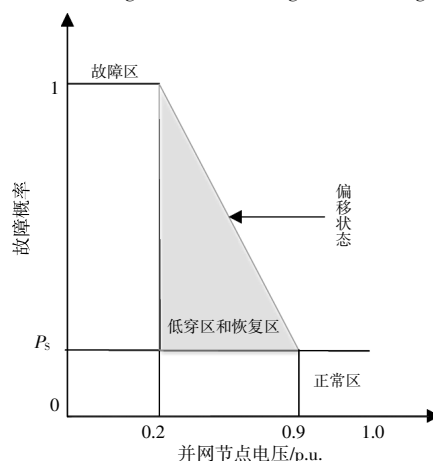


图 3 低电压穿越过程中的节点故障概率随节点电压变化的关系

Fig.3 Node fault probability as a function of node voltage during LVRT

风险值最高;而风力机机端电压在 $[0.9\sim 1.0]$ p.u.时,风力机保持正常运行,风险值最低;当 U 为 $0.2\sim 0.9$ p.u.,即处于低穿区或恢复区时,故障概率较正常区高。故当节点未与风力发电机相连时的 U 处于 $0.9\sim 0.95$ p.u.和 $1.05\sim 1.10$ p.u.时,节点状态设为偏移状态 O 。当节点与风力发电机相连的节点电压处于低电压穿越区和恢复区时,节点状态设为偏移状态 O 。在偏移状态下,电网中某些节点的电压偏差下降或上升到一定程度后,此时节点依旧运行但处于运行状态不佳状态,故障概率也会增加。因此,在脆弱节点辨识中不仅须要考虑节点具有正常和故障两种状态,还应将偏移状态考虑在内。

2 区间电气 DebtRank 算法

在电力系统脆弱节点脆弱性评估中,为有效地考虑处于正常与故障之间的偏移状态,本文对区间电气 DebtRank 算法进行了改进。

2.1 改进电气 DebtRank 算法

在电力系统脆弱性评估中,本文在识别脆弱

节点时先按节点特性将节点分为两类,一类是考虑负荷重要性和负荷容量的负荷节点;另一类是考虑发电机功率的发电机节点。改进电气 DR 算法表达式为^[16]

$$DR_i = \sum_j [h_j(t)p_j - h_i(1)p_i] \quad (1)$$

$$p_j = \frac{P_j}{\sum_j P_j} \quad (2)$$

$$p_i = \frac{P_i}{\sum_i P_i} \quad (3)$$

式中: p_j, p_i 分别为节点 j, i 的潮流与流入节点 j, i 的潮流总量比值; P_i, P_j 分别为节点 i 波动后,节点 i 和 j 的潮流; $\sum_j P_j$ 为流入节点 j 的总潮流; h_i, h_j 分别为节点 i, j 连续变量; $h_i(1)$ 为节点 i 的初始连续变量。

改进电气 DR 算法计算出的各节点 DR 值即为电力系统脆弱节点指标值,DR 值越大,节点越脆弱,进而可得出电网中脆弱节点排序结果。

2.2 区间电气 DebtRank 算法

针对接入风电功率为区间功率的情况,运用区间直流潮流^[17]将改进电气 DebtRank 算法在节点潮流转变为节点区间潮流、DR 值、排序方法 3 个方面进行改进,得到区间电气 DebtRank 算法。

①节点潮流变为节点区间潮流

风电场的波动性和随机性将造成的风电功率的不确定性,导致系统的潮流不确定性,从而增大节点的脆弱性。因此通过公式转换可获得发电机区间有功功率,由原本确定的潮流转变为区间潮流。对于接入风电场的电网,由于不同线路的潮流不同以及系统节点间负荷的不同,传统 DR 值均匀分布策略不适用。为此本文进一步提出区间电气 DebtRank 算法来评估含有风电场不确定性以及波动性的电网的节点重要性,定义一个区间电气 DR 值指标来辨识脆弱节点,将式(2),(3)转换为区间值 $p_{j\pm}$ 和 $p_{i\pm}$,且将静态脆弱指标值 DR 值转换为区间 DR 值,即:

$$p_{j\pm} = [p_j^-, p_j^+] = \left[\frac{P_j^-}{\sum P_j^-}, \frac{P_j^+}{\sum P_j^+} \right] \quad (4)$$

$$p_{i\pm} = [p_i^-, p_i^+] = \left[\frac{P_i^-}{\sum P_i^-}, \frac{P_i^+}{\sum P_i^+} \right] \quad (5)$$

$$\widetilde{DR}_i = [DR_i^-, DR_i^+] \Leftrightarrow \begin{cases} DR_i^- = \sum_j [h_j^-(t)p_j^- - h_i^-(1)p_i^+] \\ DR_i^+ = \sum_j [h_j^+(t)p_j^+ - h_i^+(1)p_i^+] \end{cases} \quad (6)$$

式中: \widetilde{DR}_i 为节点 i 的区间 DR 值; DR_i^- 和 DR_i^+ 分别为节点 i 的区间 DR 值下限和上限; h_j^- 和 h_j^+, h_i^- 和 h_i^+ 分别为节点 j 和节点 i 连续变量的下限和上限; p_j^- 和 p_j^+, p_i^- 和 p_i^+ 分别为节点 j 、节点 i 的潮流与节点 j 、节点 i 所有线路的潮流总量比值的下限和上限。

②排序方法的变化

利用区间电气 DebtRank 算法可以得到 DR 值区间数,又因为区间数的排序方法比改进电气 DebtRank 算法的单一数值 DR 值排序更加困难。因此,本文采用区间中值来体现节点脆弱性。区间中值表达式为

$$DR_i = \frac{DR_i^- + DR_i^+}{2} \quad (7)$$

3 算法流程

基于区间电气 DebtRank 算法的电力系统脆弱节点的辨识具体过程如图 4 所示。

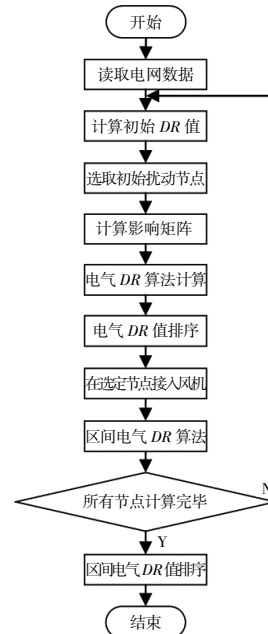


图 4 算法流程

Fig.4 Algorithm flow chart

步骤 1: 读取电网数据, 建立电网模型;

步骤 2: 将节点分为负荷节点和发电机节点, 计算各节点的初始 DR 值;

步骤 3: 选取初始扰动节点, 根据节点编号从小到大按序选择节点设置为偏移状态, 作为电网中的初始扰动节点, 计算节点波动后的潮流;

步骤 4: 根据初始 DR 值求解各节点之间的影响矩阵 X_{ij} ;

步骤 5: 通过式(1)求解各节点的 DR 值, DR 值越大, 表明节点越脆弱, 排名前十的节点则为脆弱节点;

步骤 6: 在 IEEE-118 节点系统中的 26, 55 和

103 号节点中接入风机, 用区间数表示各风机的输出功率;

步骤 7: 通过式(6)求解得到风电接入的电网中各节点的区间 DR 值, 取区间 DR 值的中值作为脆弱节点评估指标, 区间 DR 值中值越大, 表明节点越脆弱。

4 算例分析

4.1 未含风电的电力系统脆弱节点识别

本文以 IEEE-118 节点系统为例对所提方法进行验证, 系统各元件参数采用标准数据。该系统包含 118 个节点、186 条线路, IEEE-118 节点拓扑如图 5 所示。

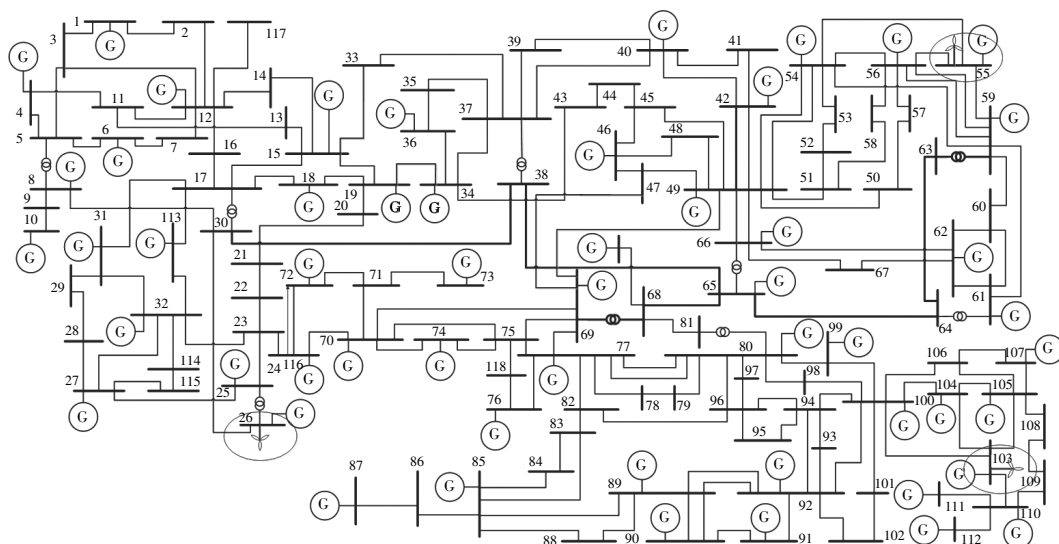


图 5 IEEE-118 节点拓扑

Fig.5 IEEE-118 node topology diagram

本文利用改进电气 DebtRank 算法对电网节点进行脆弱性分析, 基于 Matlab 平台建立算法模型, 辨识电网脆弱节点, 最后再考虑风电场接入的情况对节点进行辨识。算例仿真参数设置: 取当节点未与风力发电机相连时的节点电压为 0.90~0.95 p.u. 和 1.05~1.10 p.u. 的节点状态作为偏移状态 O ; 当节点与风力发电机相连的节点电压处于低电压穿越区和恢复区时的节点状态作为偏移状态 O' ; 隐故障概率 $P_H=0.02$; 短路故障发生概率 $P_S=0.089^{[18]}$ 。得到各节点的初始 DR 值, 将 IEEE-118 节点系统通过仿真运算, 得出 118 节点的初始 DR 值如图 6 所示。

由图 6 可见, 节点 80, 59, 89, 69 均具有较大的初始 DR 值, 且均为发电机节点。

考虑节点分类特性得到未接入风电的 IEEE-

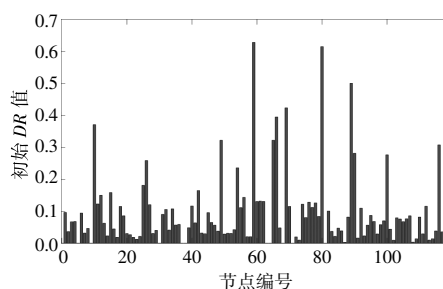


图 6 IEEE-118 节点系统的初始 DR 值

Fig.6 Initial DR value of IEEE-118 node system (considering node classification)

118 节点系统各节点的 DR 值, 如图 7 所示。

由图 7 可知, 在图 6 中具有较大初始 DR 值的节点均为排名前十的脆弱节点。排在第一的节点为 80 号节点, 它所连的发电机有功出力为 430.84 MW, 并且节点的度值为 7, 且全为出度; 89

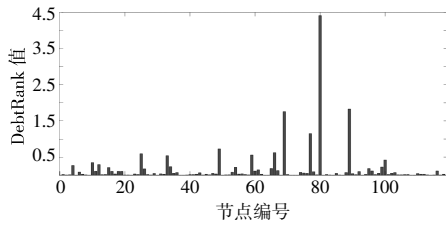


图7 IEEE-118 节点系统的 DR 值
Fig.7 DR value of IEEE-118 node system

节点为全网的出力排名第一的发电机,出线条数为 4 条,且 89 节点的有功出力占全网发电机总出力的 11.62%。说明了发电机节点在电网中是十分重要的。

表 1 为本文所提方法与 PageRank(PR)方法、LeaderRank(LR)算法、电气 LeaderRank(ELR)算法、电气介数(EBT)算法以及基于节点度方法排名前十的脆弱节点。

表 1 IEEE-118 节点系统的 6 种方法对比
Table 1 Comparison of six methods for IEEE-118 node system

排名	改进 DR 方法	PR 方法	ELR 方法	LR 方法	EBT 方法	基于节点度方法
1	80	110	80	80	65	49
2	89	111	69	89	68	100
3	69	89	89	69	80	80
4	77	87	92	100	38	12
5	49	80	118	49	30	92
6	66	69	49	59	81	77
7	25	66	100	66	100	69
8	59	26	12	92	49	59
9	33	10	17	65	77	37
10	100	86	77	12	69	17

由表 1 可知,本文所提方法与其余 5 种方法所识别的脆弱节点具有多个相同的节点,虽然也有些节点不一致,这是因为各方法所考虑的因素不同,表明了本文所提方法的正确性。为了进一步验证本文所提方法的有效性和优越性,按照表 1 中 6 种方法所识别的排名前十的脆弱节点进行连续攻击,观察 IEEE-118 节点系统的可供电能力指标^[9]的变化情况,如图 8 所示。

由图 8 可以看出,按本文所提方法攻击前三个节点时与按 ELR 方法攻击和按 LR 方法攻击的系统可供电能力下降速度大致相同,但是在中间几个节点遭到攻击时,系统可供电能力下降速度比 ELR 方法略慢,但是从第 5 个节点遭到攻

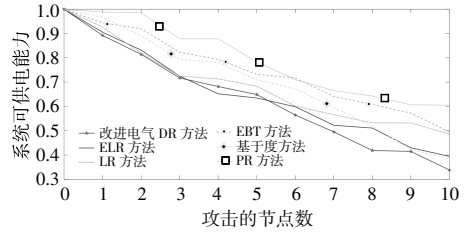


图 8 不同节点攻击方式下 IEEE-118 节点系统的系统可供电能力变化

Fig.8 Variation of system powerable capacity of IEEE-118 node system under different node attack methods

击开始,系统可供电能力比 ELR 方法的下降速度更快。且本文所提方法的系统可供电能力下降速度明显快于 LR 方法、PR 方法、EBT 方法以及基于节点度方法。可见本文所提方法识别的排名前十脆弱节点比其他 5 种方法识别的节点更为脆弱,证明了本文方法的正确性。

4.2 含风电的电力系统脆弱节点识别

随着大规模风电的接入,由于风电并网带来出力随机性和波动性的问题,电网的稳定性和可靠性会受到影响。本文设 26,55 和 103 号节点电源中接有风力发电机,考虑该节点的发电出力为区间数。运用式(6)得出含风电的 IEEE-118 节点系统各节点的区间 DR 值,如图 9 所示。

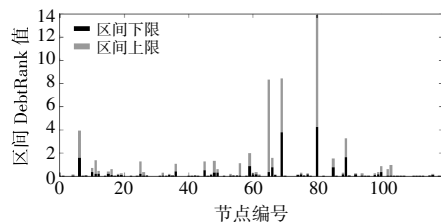


图 9 含风电的 IEEE-118 节点系统各节点的区间 DR 值
Fig.9 Interval DR values for each node of the IEEE-118 node system with wind power

根据区间 DR 值的大小对各节点进行排序,取各节点的区间中值排在前十的脆弱节点如表 2 所示。

表 2 含风电的 IEEE-118 节点系统脆弱节点(前十)
Table 2 Vulnerable nodes of IEEE-118 node system with wind power (top 10)

排名	节点编号	区间 DR 值		
		区间下限	区间上限	中值
1	80	4.266 313	9.618 859	6.942 586
2	69	3.798 802	4.618 889	4.208 846
3	65	0.362 123	7.970 115	4.166 119
4	6	1.588 109	2.340 114	1.964 113
5	89	1.731 739	1.932 521	1.832 134

续表 2

排名	节点编号	区间 DR 值		
		区间下限	区间上限	中值
6	59	0.875 044	1.099 489	0.987 267
7	66	0.781 040	0.803 740	0.792 390
8	85	0.759 018	0.764 141	0.761 579
9	11	0.219 903	1.173 211	0.696 557
10	48	0.322 657	0.999 402	0.661 030

由图 9 和表 2 可以看出,排名前三的节点分别为 80,69 和 65 号节点,这 3 个节点均在拓扑中间位置,节点度数较高,均是重要的发电机节点,这些节点故障将会对周边节点和系统造成很大的影响。可见本文提出方法能较好地体现风力发电机接入电网后的电气性能。

为验证考虑风力发电不确定性的节点脆弱性辨识方法的可行性,将所得接入风电的结果与未接入风电的结果进行对比,结果如表 3 所示。

表 3 有、无风电接入的 IEEE-118 节点系统脆弱节点结果对比(前十)

Table 3 Comparison of vulnerable nodes results of IEEE-118 node system with and without wind power access (top ten)

排名	节点编号	接入风电		未接入风电	
		区间 DR 值下限	区间 DR 值上限	节点编号	DR 值
1	80	4.266 313	9.618 859	80	4.410 251
2	69	3.798 802	4.618 889	89	1.828 472
3	65	0.362 123	7.970 115	69	1.756 414
4	6	1.588 109	2.340 114	77	1.149 355
5	89	1.731 739	1.932 521	49	0.727 609
6	59	0.875 044	1.099 489	66	0.623 611
7	66	0.781 040	0.803 740	25	0.593 343
8	85	0.759 018	0.764 141	59	0.558 538
9	11	0.219 903	1.173 211	33	0.538 532
10	48	0.322 657	0.999 402	100	0.421 824

由表 3 可知,考虑接入风电的区间 DR 值均大于未考虑风电的 DR 值,表明了风力发电机的接入增加了系统的波动性,加大了系统潮流的变化率,与电网实际情况大致相同,说明本文提出的采用区间数表示风力发电出力的不确定性能够全面和真实地表示电力系统的实际运行情况。风电的接入对节点脆弱性排名具有影响,节点 65,59,48 在有风电场接入时排名上升幅度较大,比较典型的有紧邻风电的节点 59,在无风电场接入的情况下脆弱性排名靠后,在接入风电场后,该节点脆弱性排名上升到第 6 名,这说明电力系统中节点

的脆弱性会随着风电出力的波动性和随机性而增加,一旦发生故障将会造成较大范围的潮流转移和重新分配,对电力系统的安全稳定性造成一定冲击。并且接入风电后识别出的脆弱节点与未接入风电识别出的脆弱节点大部分一致,但所排顺序不一致,说明本文所提方法的正确性且表明了风电的不确定性。

5 结论

针对含可再生能源的电网以及电网节点的偏移状态问题,本文结合节点特性分类,采用区间数来表示风机出力,提出了改进电气 DebtRank 算法,并对 IEEE-118 节点系统进行算例仿真分析,结果表明该方法能够快速准确地识别系统的脆弱节点。将接入风电与未接入风电所识别出的电力系统前十脆弱节点进行对比,发现大部分一致,表明了本文所提方法的正确性,并能够快速、准确地辨识风电并网后系统脆弱节点。可以高效地选出系统的脆弱节点,对风电并网情况下的电网脆弱性评估具有一定的参考价值。

参考文献:

- [1] 叶茂,刘艳,顾雪平,等.大停电背景下考虑系统暂态安全的动态风电穿透功率极限计算[J].电力自动化设备,2018,38(11):167-173.
- [2] 杨田,刘晓明,吴其.风力发电选址和渗透率对连锁故障影响的研究[J].可再生能源,2018,36(11):1631-1637.
- [3] 李利娟,吴军,刘红良,等.计及新能源影响静动态结合的电网脆弱节点辨识[J].电网保护与控制,2019,47(2):64-72.
- [4] Banghua Xie, Xiaoge Tian, Liulin Kong, et al.The vulnerability of the power grid structure: A system analysis based on complex network theory [J].Sensors, 2021,21(21):1-29.
- [5] Amin Abedi,Gaudard Ludovic,Romerio Franco. Review of major approaches to analyze vulnerability in power system [J].Reliability Engineering & System Safety, 2019,183(3):153-172.
- [6] 陈绍南,梁朔,李珊,等.基于电气中心性指标的电网脆弱性评估[J].供用电,2021,38(8):70-76.
- [7] Daguì Liu, Xuandan Wang, Huaqiang Li, et al. Identification of power grid critical nodes based on voltage anti-interference factors and comprehensive influence factors[A].2018 Chinese Control And Decision

- Conference (CCDC)[C].Shenyang:IEEE,2018.113-117.
- [8] 刘志刚,张乔,何晓凤,等.电力系统脆弱线路辨识研究现状[J].西南交通大学学报,2021,56(4):673-688.
- [9] 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):34-39,79.
- [10] Su Q, Chen C, Sun Z, et al. Identification of critical nodes for cascade faults of grids based on electrical PageRank [J].Global Energy Interconnection,2021,4(6):587-595.
- [11] 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.
- [12] Lijuan Li, Yiwei Zeng, Jie Chen, et al. Electrical DebtRank algorithm - based identification of vulnerable transmission lines in power systems [J].Frontiers in Energy Research,2021(9):786439.
- [13] GB/T 12325-2008,电能质量供电电压偏差[S].
- [14] 姜盛波,杨军,吴赋章,等.基于改进 PageRank 算法的电网关键节点辨识方法[J].电力建设,2018,39(11):34-41.
- [15] 李文津,汤广福,康勇.含动态直流泄能电阻的 MMC-HVDC 提高风电场低电压穿越能力研究[J].电网技术,2014,38(5):1127-1135.
- [16] 郑恒峰,李柏青,刘道伟,等.基于电压相量时序轨迹特征的电网静态稳定态势在线评估指标 [J]. 电网技术,2021,45(2):640-648.
- [17] 刘志强. 融合 K-阶结构熵与区间电气介数的含风电电网脆弱性评估[D].湘潭:湘潭大学,2020.
- [18] 卓毅鑫,林湘宁,李正天,等.基于概率分析的风电场电压跌落评估方法研究[J].太阳能学报,2017,38(3):676-683.
- [19] 张涛,孙晓伟,徐雪琴,等.基于有功潮流介数的电网关键线路辨识[J].电网技术,2016,40(1):193-198.

Identification of vulnerable nodes in power system containing wind power based on interval Electrical DebtRank algorithm

Li Lijuan^{1,2}, Li Yue¹, Ding Gangwei¹, Lü Zhiqiang¹, Zeng Yiwei¹

(1.College of Automation and Electronic Information, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China; 2.Hunan National Center for Applied Mathematics, Xiangtan University, Xiangtan 411105, China)

Abstract: In response to the issue that the randomness and volatility of wind power can affect the vulnerability assessment of the power grid and the identification of critical nodes, this paper proposes an interval-based Electrical DebtRank algorithm to identify vulnerable nodes within the power grid. The method first incorporates the node's offset status and characteristics to improve the traditional Electrical DebtRank algorithm. Then, interval numbers are used to represent the randomness and volatility of wind power generation, leading to the development of the interval-based Electrical DebtRank algorithm to identify vulnerable nodes in a wind-integrated power system. Finally, simulation results on the IEEE-118 bus system demonstrate that when the vulnerable nodes identified by the proposed method are attacked, the system's power supply capability drops to 33% of its normal state, with a significant reduction in the system's power transmission capacity.

Keywords: vulnerability assessment; critical nodes; migration status; interval Electrical DebtRank algorithm