

考虑分布式电源出力随机特性的配电网节点脆弱性评估

王子欣^{1,2}, 苗世洪^{1,2}, 郭舒毓^{1,2}, 韩 佶^{1,2}, 殷浩然^{1,2}, 毛万登³

(1. 华中科技大学 电气与电子工程学院 强电磁工程与新技术国家重点实验室, 湖北 武汉 430074;

2. 电力安全与高效湖北省重点实验室, 湖北 武汉 430074;

3. 国网河南省电力公司电力科学研究院, 河南 郑州 450052)

摘要:随着分布式电源的接入及配电网规模的不断扩大,配电网的安全性与可靠性面临挑战,配电网脆弱环节辨识问题亟待解决。考虑分布式电源出力随机性对配电网节点脆弱性的影响,建立基于拉丁超立方抽样的风电与光伏随机出力模型;基于复杂网络理论与配电网辐射状的拓扑条件提出改进节点度、改进介数等节点脆弱度指标;利用分布式电源随机出力模型的采样结果得到节点脆弱度指标的分布特性;提出基于样本修正权重的模糊综合评价方法,对考虑分布式电源出力随机性的配电网节点脆弱性进行分析。改进的IEEE 123节点系统算例结果验证了所提方法的可行性与有效性。

关键词:分布式电源;随机性;拉丁超立方抽样;复杂网络理论;脆弱性评估

中图分类号:TM 711

文献标志码:A

DOI:10.16081/j.epae.202106013

0 引言

配电网是电力系统的重要组成部分。随着越来越多的分布式电源(DG)接入,配电网在结构和特性等方面都发生了较大改变^[1]。由于潮流的不确定性与节点间电气量的相互影响,配电网系统的脆弱性特征日益显现,严重制约了配电网安全经济运行水平。因此,开展配电网节点脆弱性评估,具有重要的理论与现实意义。

复杂网络理论以网络形式研究系统,关注系统中相互关联的拓扑结构,避免了复杂的动力学分析,揭示了系统的整体动态行为特征,具有计算效率高、符合系统运行机理的特点,已广泛应用于大电网连锁故障分析^[2]、电力系统运行状态及演化趋势模拟^[3]、大电网脆弱性评估^[4-13]等方面,取得了较好的效果。在脆弱性评估方面,国内外学者已开展了大量的研究工作,但现有研究主要集中在输电网的脆弱性评估。文献[4]基于复杂网络理论构造基于线路电抗的加权电网拓扑模型,针对电网连锁故障的情况,对整个输电网的脆弱性进行评估,但其未对电网的局部脆弱性进行评估。针对该问题,文献[5]构建互补性脆弱度指标集和综合脆弱度指标,进而提出一种输电线路脆弱度评估方法,但其指标过于简单。为此,文献[6]从系统元件的重要性出发,分析元件脆弱性的情况,指出重要性指标可以在一定程度上应用于脆弱性分析,扩展了脆弱性指标的范围;

文献[7-8]综合考虑风险理论和复杂系统理论,提出静态综合指标,对电网进行脆弱性评估;文献[9]将复杂网络影响模型与马尔科夫链相结合,考虑发电节点-负荷节点对的匹配关系及相互影响因素,提出一种新的脆弱环节挖掘方法;文献[10]通过功率传输路径、功率加权传输距离等定义对已有的电网复杂网络模型进行改进,使之符合电网基本电气规律和物理特性约束。

由于拓扑结构的差异,输电网脆弱性评估方面取得的研究成果无法直接应用于配电网。目前,在配电网脆弱性评估方面的研究较少。文献[11]对中压配电网拓扑结构的抗毁能力指标进行定义,在此基础上对配电网拓扑结构进行研究,并最早将复杂网络理论引入配电网可靠性分析。在此基础上,文献[12]将配电网节点的度、介数、凝聚度和紧密度指标相结合,利用逼近理想解排序TOPSIS(Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)与灰色关联度方法对节点脆弱性进行评估,但其指标并未针对配电网结构特性进行改善,不符合实际情况。为了使指标更适用于配电网脆弱性评估,文献[13]引入潮流熵和节点注入功率的概念,分别提出配电网节点、线路综合脆弱性评估指标。

综上所述,虽然输电网脆弱性评估方法已有很多研究且相对较为成熟,但配电网脆弱性评估方法还有待研究和完善,其不足之处主要表现在以下两方面:脆弱性指标未针对配电网辐射状的拓扑条件进行改进;未考虑DG出力随机性对配电网脆弱性的影响。

针对上述问题,本文首先基于拉丁超立方抽样建立DG随机出力模型,并以复杂网络理论为基础,针对配电网辐射状的拓扑条件提出脆弱性评估指标体系;然后,基于随机出力模型的采样结果得到脆弱

收稿日期:2020-08-15;修回日期:2021-04-21

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(SGHADK00PJS2000026)

Project supported by the Science and Technology Project of Headquarters of State Grid Corporation of China(SGHADK00PJS2000026)

度指标的分布特性;最后,将脆弱度指标的熵值与分布的方差作为权重系数,通过样本修正权重的模糊综合评价法对节点脆弱度进行分析。

1 DG 随机出力模型

1.1 风机随机出力模型

风能具有波动性、间歇性的特点,这与风速的随机性有关。现有文献大多采用威布尔分布来描述风速^[14]。双参数威布尔分布的分布函数为:

$$F_w(v) = 1 - \exp[-(v/c)^k] \quad (1)$$

其中, $F_w(v)$ 为双参数威布尔分布的分布函数, v 为风速; c 为威布尔分布尺度参数; k 为威布尔分布形状参数。

在稳定性分析中,对于多台风机并列运行的情况往往采用1台或多台等值机考虑。对于单台风机,风速决定其有功出力,对应关系为:

$$P_w(v) = \begin{cases} 0 & v < v_{ci}, v > v_{co} \\ P_r \frac{v - v_{ci}}{v_r - v_{ci}} & v_{ci} \leq v \leq v_r \\ P_r & v_r < v \leq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

其中, $P_w(v)$ 为风机的有功出力; v_{ci} 为风机的切入风速; v_r 为风机的额定风速; v_{co} 为风机的切出风速; P_r 为风机的额定输出功率。

1.2 光伏发电机组的随机出力模型

光伏发电机组的出力具有很强的随机性,与光照强度的变化有很强的相关性。研究表明,光照强度在短时间尺度或长时间尺度内都服从Beta分布。光伏出力也满足Beta分布^[15],概率密度函数为:

$$f_L(P_a) = \frac{\Gamma(\alpha + \beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} \left(\frac{P_a}{P_{\max}}\right)^{\alpha-1} \left(1 - \frac{P_a}{P_{\max}}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

其中, $\Gamma(\cdot)$ 为伽马函数,也称为欧拉第二积分; $f_L(P_a)$ 为光伏出力 P_a 概率密度函数; α 、 β 为Beta分布的形状参数; P_{\max} 为光伏发电机组的最大出力。

光伏发电机组采用恒功率因数控制,假设光伏发电机组的功率因数为1,则其没有无功出力。

1.3 随机出力场景的拉丁超立方抽样

拉丁超立方抽样是一种从多元参数分布中近似随机抽样的方法,属于分层抽样技术。相比蒙特卡洛抽样法,其能够以较小的采样次数获得较高的采样精度,且确保抽样值能覆盖整个样本空间。采用拉丁超立方抽样技术对DG随机出力进行抽样的步骤如下^[14]。

1) 根据DG出力分布的概率特性,分出 N_i 个等概率区间。

2) 设 $1 \leq i \leq N_i$, 对任一概率区间 $[(i-1)/N_i, i/N_i]$, 随机抽取一个数 p_i , 可表示为:

$$p_i = \frac{r}{N_i} + \frac{i-1}{N_i} \quad (4)$$

其中, r 为位于区间 $[0, 1]$ 且均匀分布的随机变量。

3) 通过概率分布函数的逆变换可以得到对应概率区间的样本值,表示为:

$$x_i = F^{-1}(p_i) \quad (5)$$

其中, x_i 为抽样值; $F^{-1}(\cdot)$ 为概率分布函数的逆函数。

通过上述步骤可以得到DG随机出力的 N_i 个抽样值。

2 基于复杂网络理论的节点脆弱性评估指标集

复杂网络理论主要关注个体间的拓扑结构关联性,其常见的拓扑参数包括度和介数等。电网的拓扑结构是其最本质的特征之一,因此从网络拓扑角度分析其脆弱性是非常有必要的。文献^[16]指出配电网的网络拓扑若为辐射状,则需要满足2个条件:条件1,网络是连通的;条件2,网络中有 $N_a - N_s$ 条闭合的支路,其中 N_a 和 N_s 分别为配电网的节点总数和电源节点数量。

本文针对配电网辐射状的拓扑条件,考虑DG随机出力对节点特性的影响,改进复杂网络理论的拓扑参数,得到节点脆弱性评估指标。

1) 改进节点度指标 D_i 。

节点度越大则有更多的节点与其相连,节点在网络中的地位就越重要。考虑到配电网辐射状的拓扑结构及闭环设计、开环运行的特点,正常运行时结构较为稀疏,导致很多节点的度相同,没有区分度,故传统度的定义不适合作为评估指标。针对配电网结构特点对节点度指标进行如下改进。

由于网络是由节点与边构成的统一整体,节点的重要度受其相邻节点的影响,建立重要度贡献矩阵 H_E 。另外,考虑到节点度仅仅体现了节点的局部特性而无法描述节点的全局重要性,为了使指标更可靠,引入网络效率的定义,节点 i 的网络效率 I_i 为:

$$I_i = \frac{1}{n} \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{1}{d_{ij}} \quad (6)$$

其中, n 为网络拓扑的节点数; d_{ij} 为节点 i 与节点 j 之间的最短距离。节点网络效率的意义在于其衡量了该节点到网络中其他节点的平均难易程度,节点的网络效率越大说明该节点在网络全局所处的位置越重要。

节点间主要的重要性贡献体现在相邻节点间,贡献值与节点自身的度和网络效率有关,度和网络效率值越大,则贡献值越大,该贡献值包含节点的局部特性与全局特性,定义为:

$$H_{Eij} = \delta_{ij} D_{ej} I_j / k_m^2 \quad (7)$$

其中, H_{Eij} 为重要度贡献矩阵 H_E 中的第 i 行第 j 列元素; δ_{ij} 为邻接矩阵中的第 i 行第 j 列元素; D_{ej} 为节点 j

的度; k_m 为节点平均度值。贡献值体现的是该节点的周围节点的重要程度,贡献值越大则该节点的周围节点越重要,因此该节点的重要性也会相应提高。

综上,通过节点的网络效率和相邻节点的重要度贡献,定义节点*i*的改进度指标 D_{i1} 为:

$$D_{i1} = \left(D_{ei} + \sum_{j=1, j \neq i}^n H_{Eij} \right) I_i \quad (8)$$

式(8)在节点度的基础上综合了节点的全局重要性和局部特性,符合节点脆弱性评估的要求。

2)改进节点介数指标 D_{i2} 。

随着配电网的不断发展,配电网中的DG渗透率不断提高,在一定程度上改善了配电网的用电可靠性。因此,配电网节点脆弱性评估不能忽略DG出力的影响,考虑路径末端DG出力大小,定义节点*i*的改进介数指标 D_{i2} 为:

$$D_{i2} = \sum_{i, e \in V_1; w \in V_2} \frac{\sqrt{S_{pe} S_{lw}}}{S_b} R_{ew}(i) \quad (9)$$

其中, V_1 为等值电源节点集合; V_2 为等值负荷节点集合; S_{pe} 和 S_{lw} 分别为电源节点*e*输出的视在功率和负荷节点*w*消耗的视在功率; S_b 为系统的基准容量; $R_{ew}(i)$ 为节点*e*与节点*w*之间最短路径是否经过节点*i*的比较函数,若经过则其值为1,否则为0。

3)网络凝聚度指标 D_{i3} 。

考虑到对于配电网辐射状的拓扑结构,线路辐射的交汇点往往脆弱性程度较高,为客观评估其脆弱程度,引入节点收缩后的网络凝聚度指标,定义为:

$$\begin{cases} C = 1/(nL) \\ L = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1, j \neq i}^n \frac{d_{\min,ij}}{n(n-1)/2} \end{cases} \quad (10)$$

其中, L 为节点间的平均最短路径; $d_{\min,ij}$ 为电网中任意两节点*i*与*j*间的最短路径。将节点收缩是指将与节点*i*相连接的 k_i 个节点均与节点*i*融合,即用1个新节点代替这 k_i+1 个节点,原先与这些节点关联的边均与新节点关联。

网络凝聚度反映的是节点的全局脆弱性,节点收缩之后的网络凝聚值越大,说明该节点在辐射状线路拓扑中的连通性越好,节点脆弱性程度越高,若节点收缩之后的网络拓扑一致,则节点有相同的脆弱性。

在此基础上,定义节点*i*的网络凝聚度指标 D_{i3} 为:

$$D_{i3} = (C_i^* - C_i)/C_i^* \quad (11)$$

其中, C_i 、 C_i^* 分别为节点*i*收缩前、后的网络凝聚度。

4)改进连接损耗指标 D_{i4} 。

传统的连接损耗定义为当一个节点从网络中断开后导致无法连接到电源节点的负荷节点数目占的比例。显然,在配电网闭环设计、开环运行的条件下,连接损耗越大,则该节点断开后断电的节点越

多,该节点对网络的影响就越大。连接损耗符合严格意义上的脆弱性指标要求,但传统定义中并未考虑DG出力大小的影响,因此加入电源节点功率的权重,定义改进连接损耗指标 D_{i4} 为:

$$D_{i4} = 1 - \sum_{i, e \in V_1} \frac{S_{pe}}{S_{\text{sum}}} E_e(i) / n \quad (12)$$

其中, S_{sum} 为所有等值电源输出的总视在功率; $E_e(i)$ 为判断函数,若节点*i*与电源节点*e*相连通,则其值为1,否则为0。显然,只有当节点与所有的电源节点均连通时,连接损耗才为0,当所有节点和电源节点均断开时,连接损耗为1,仍然符合连接损耗的定义。

3 基于样本修正权重的模糊综合评价法

3.1 指标权重的确定

1)基于样本方差与指标熵值的客观修正权重。

本文采用熵值法和脆弱度指标多次采样结果的分方差对客观权重进行修正。热力学中,熵是对系统状态不确定性的一种度量。熵的大小与数据的离散程度成正相关,若计算出某组数据的熵越大,则说明其离散程度越大,表示该指标很有区分度,有较高的参考价值。

将脆弱度评估指标看作节点的属性,构建决策矩阵:

$$M = \begin{bmatrix} M_{11} & \cdots & M_{14} \\ \vdots & & \vdots \\ M_{n1} & \cdots & M_{n4} \end{bmatrix} \quad (13)$$

其中, M_{ij} 为节点*i*第*j*项脆弱度指标在 N_i 次采样中的均值。

在决策矩阵的基础上,计算第*j*项脆弱度指标的熵值 e_j 为:

$$e_j = -g \sum_{i=1}^n \left(\frac{M_{ij}}{\sum_{i=1}^n M_{ij}} \ln \frac{M_{ij}}{\sum_{i=1}^n M_{ij}} \right) \quad (14)$$

其中,常数 $g > 0$,其值与 n 有关,一般取 $g = 1/\ln n$; $e_j \geq 0$ 。

得到基于熵值法的权重 s_j 为:

$$s_j = \frac{1 - e_j}{4 - \sum_{h=1}^4 e_h} \quad (15)$$

经 N_i 次采样后节点*i*第*j*项脆弱度指标的方差 V_{ij} 可表示为:

$$V_{ij} = E^2(\hat{M}_{ij} - E(\hat{M}_{ij})) \quad (16)$$

其中, \hat{M}_{ij} 为一个随机变量,其包含了 N_i 次采样的节点*i*第*j*项脆弱度指标; $E(\cdot)$ 表示求期望值。

方差表示随机变量与其均值的偏离程度,其值越大表示DG随机出力的过程对节点脆弱度指标的影响越大,越具有参考价值^[17]。

综上,归一化处理后得到客观修正权重 ω_j 为:

$$\omega_j = \frac{\frac{s_j}{\sum_{i=1}^n V_{ij}} + \frac{\sum_{i=1}^n V_{ij}}{\sum_{h=1}^4 s_h + \sum_{i=1}^n \sum_{h=1}^4 V_{ih}}}{2} \quad (17)$$

2) 基于层次分析法的主观修正权重。

客观修正权重只与数据有关,这保证了其客观性,但这也是客观权重的缺陷,决定权重大小的仅仅是数据的方差与离散程度。实际中,指标的重要程度与指标的数值分布并不一定有必然的联系,指标是否重要,还需要经过缜密的判别,考虑专家的意见。

本文基于层次分析法(AHP)将专家决策过程中的定性与定量因素有机结合,得到主观修正权重。采用三标度法减小计算量和专家决策的困难度。三标度法的判断尺度见表1。

表1 判断尺度量化规则

Table 1 Quantification rules of judgment scales

标度	含义
0	列指标较行指标重要
1	列指标与行指标具有同等的重要性
2	行指标较列指标重要

3) 综合权重的确定。

综合权重指综合考虑主观修正与客观修正后得到的权重。一般情况下,考虑主观与客观是并列的,即2种指标在综合权重中的占比相同。设4项脆弱性指标的主观权重为 $f=(f_1, f_2, f_3, f_4)$,其综合权重可以表示为:

$$a_j = \frac{\omega_j + \mu f_j}{\sum_{h=1}^4 (\omega_h + \mu e_h)} \quad (18)$$

其中, a_j 为第 j 项脆弱度指标的综合权重; μ 为主观权重相对客观权重的比例系数,当其值取1时,表示主观修正权重与客观修正权重以相同重要性参与综合权重。

3.2 隶属函数与模糊综合评价

本文的脆弱性评估结果分为5级:

$$\hat{V} = \{\hat{v}_1, \hat{v}_2, \hat{v}_3, \hat{v}_4, \hat{v}_5\} = \{\text{很低, 低, 中等, 高, 很高}\} \quad (19)$$

其中, \hat{V} 为脆弱性评估等级集合; $\hat{v}_1 - \hat{v}_5$ 为不同的脆弱性评估等级。模糊综合评价法需要得到各节点对每个脆弱性评估等级集合元素的隶属度,利用3.1节中的决策矩阵 M 通过隶属函数来确定隶属度。三角形或正态型分布更适用于脆弱性评估等级集合是定量描述的情况,本文选取三角形分布作为模糊综合评价的隶属函数,再采用综合得分法将定性描述转化为定量描述。隶属函数具体参数设置以及得到模

糊综合评价矩阵 R 的过程见文献[18]。

设综合权重向量为 $A=(a_1, a_2, a_3, a_4)$,节点 i 在第 p 组采样数据中的综合评价模糊子集 $B_i(p)$ 为:

$$B_i(p) = A \circ R_i(p) = [b_{i1}(p), b_{i2}(p), b_{i3}(p), b_{i4}(p), b_{i5}(p)] \quad (20)$$

$$b_{iq}(p) = \sum_{j=1}^4 a_j r_{ij}(v_q) \quad q=1, 2, \dots, 5 \quad (21)$$

其中, $R_i(p)$ 为评价矩阵 R 中的元素; $r_{ij}(v_q)$ 为脆弱度 v_q 对应的隶属度函数;算子“ \circ ”采用 $M(+, \circ)$ 模型,该模型不仅考虑了节点中所有指标的影响,而且保留了单个指标的评判信息,具有很高的参考价值。

对 $B_i(p)$ 元素进行归一化处理^[19]:

$$\hat{b}_{iq}(p) = \frac{b_{iq}(p)}{\sum_{z=1}^5 b_{iz}(p)} \quad q=1, 2, \dots, 5 \quad (22)$$

其中, $\hat{b}_{iq}(p)$ 为节点 i 对脆弱性评估等级集合中第 q 个元素的隶属度,表示节点 i 可以被第 q 个元素评价的程度。

得到综合评估结果后采用综合得分法进行定量描述,具体方法为给脆弱性评估等级集合的元素赋予不同的分值,本文取 $\hat{V}=\{\hat{v}_1, \hat{v}_2, \hat{v}_3, \hat{v}_4, \hat{v}_5\}=\{40, 60, 70, 80, 100\}$,将分数期望值作为节点脆弱性评估结果:

$$Z_i = \frac{1}{N_t} \sum_{p=1}^{N_t} \sum_{q=1}^5 \hat{b}_{iq}(p) \hat{v}_q \quad (23)$$

按节点分数期望值的高低就可以对节点的脆弱度进行排序。

4 算例验证

4.1 节点脆弱性指标权重的求取

为了分析DG随机出力特性对配电网脆弱性的影响,在IEEE 123节点系统中接入不同类型的DG,在节点4接入装机容量为1 MW的光伏发电机组,设Beta分布的参数为 $\alpha=\beta=0.9$ ^[20],在节点11、111接入装机容量为0.8 MW的风力发电机组,风力数据来自吉林省某地量测值^[14],通过极大似然拟合得到双参数威布尔分布的尺度参数为7.2814,形状参数为2.0135,风机切入风速为4 m/s,切出风速为25 m/s,额定风速为10 m/s,从而形成改进的IEEE 123节点系统。本文采用该系统作为测试系统,系统拓扑图见附录A图A1。该系统的节点规模较大,电压等级为4.16 kV,基准容量为1 MV·A,正常运行时,配电网开关的运行状态见附录A表A1,其余线路参数见文献[21]。在正常运行情况下,该系统符合第2节中对于辐射状拓扑结构的定义,属于辐射状拓扑网络,适用于本文的脆弱性评估指标集。

经拉丁超立方抽样法得到1000个DG出力场

景,如附录 A 图 A2 所示。拉丁超立方抽样法抽取的样本值基本覆盖了整个样本空间,使评估结果更贴近实际情况。

根据式(6)~(12)计算每个节点的脆弱度指标并进行归一化处理,得到在 DG 的 1000 个随机出力场景下节点的脆弱度指标分布,限于篇幅,仅给出节点 8 的结果,如附录 A 图 A3 所示。

由图 A3 可见:节点脆弱度指标 D_1 和 D_3 只与配电网的拓扑结构和节点局部特性有关,与 DG 随机出力无关,故图 A3 中 D_1 和 D_3 的分布仅为一条线;脆弱度指标 D_2 与 D_4 相比,落在范围区间外的节点指标更加分散,这是由于节点的改进介数 D_2 考虑了所有最短路径的情况,一个节点的指标会受到多个 DG 随机出力的影响。

采用 AHP 三标度法构建比较矩阵 B ,如式(24)所示。比较矩阵的构建考虑以下因素:节点改进度指标 D_1 不仅考虑节点的局部特性,还针对配电网辐射状拓扑结构和配电网运行特性考虑周围节点的贡献及网络效率,涉及面最广最具有代表性,故重要度较高;节点改进介数指标 D_2 在考虑节点能量传输特性的基础上还考虑 DG 出力,节点的连接损耗指标 D_4 在考虑配电网运行特性的基础上考虑电源功率,故两者在评估中的重要性处于同一水平;网络凝聚度指标 D_3 仅考虑节点的拓扑特性,涉及的要素最少,故重要性较低。

$$B = \begin{bmatrix} D_1 & D_2 & D_3 & D_4 \\ 1 & 2 & 2 & 2 \\ 0 & 1 & 2 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 2 & 1 \end{bmatrix} \begin{matrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ D_4 \end{matrix} \quad (24)$$

构造判断矩阵,按一致性指标验证后得到专家权重指标。

根据式(13)~(15),综合 1000 个随机出力场景计算客观修正权重,对于不同出力场景熵值不同的情况,采用数学期望值解决^[22]。

在求取综合权重时,取 $\mu=1$,表示客观权重和主观权重的重要性相同,得到综合权重计算结果如表 2 所示。

表 2 综合权重计算结果

Table 2 Calculation results of comprehensive weight

指标	客观修正权重	主观修正权重	综合权重
D_1	0.1065	0.3059	0.2062
D_2	0.3584	0.2472	0.3028
D_3	0.1454	0.1998	0.1726
D_4	0.3897	0.2472	0.3185

表 2 中,综合权重是主客观修正相结合的结果。在实际中,对于不同地区的电网,可以依据系统长期运行情况对权重进行更改^[23]。若电网的数据较为充足,通过对大量数据的分析获得了专家权重,则可以

适当增大主观修正权重的比例;如果电网没有足够多的数据,则可以采用上文主客观修正相结合的方法,提升权重的可靠性。

4.2 节点脆弱性分析

基于节点脆弱度指标的分布结果,采用求数学期望的方式得到各指标的定量描述,基于模糊综合评价法,代入综合权重得到各节点的脆弱性评估结果。脆弱性排序前 15 的结果如附录 A 表 A2 所示。

由表 A2 可知,在不同的指标下,不同节点的排序并不相同,这是因为每个指标都是从不同方面对节点的脆弱度进行描述,各指标都有一定的局限性:改进度指标虽然考虑了配电网的辐射状拓扑特性、配电网运行特性及周围节点的贡献,但并没有考虑 DG 的影响;网络凝聚度虽然着重评价了辐射状线路交汇点的脆弱性,但是也没有考虑 DG 出力的影响;改进介数虽然考虑了能量传输与 DG 的影响,但没有考虑节点的局部特性;连接损耗着重考虑了配电网运行方式对供电稳定性的影响,但未考虑周围节点贡献及局部特性等方面的影响。本文考虑各指标的互补性,综合所有指标进行评估,取得了很好的效果。以节点 67 为例,该节点脆弱性在改进介数指标和连接损耗指标方面并不突出,但是在改进度指标和网络凝聚度指标方面却有着较高的评价,这是由于改进度指标与网络凝聚度指标主要体现节点在配电网辐射状拓扑中的脆弱性。从节点所处配电网拓扑位置进行分析,节点 67 是联络配电网另一侧的关键节点,周围节点的贡献度高,同时也是路径分岔的交汇点,若该节点退出运行则对该侧几条支路的冲击比较严重,故节点 67 的改进度指标和网络凝聚度指标较高。

从配电网辐射状拓扑条件出发,通常认为越靠近电源侧的节点脆弱度越高,但当配电网结构复杂并考虑 DG 随机出力的影响后,则呈现不同的结果。从综合评价的结果来看,节点 13 的脆弱度最高,而与输电网侧相连的首节点 150 脆弱度仅排在第四位。这是由于考虑 DG 随机出力后,即使首节点因故障退出运行, DG 也能在一定程度上承担供电需求;另外,节点 13 处在重要的配电线路上,其不仅影响源节点的供电,同时也影响 DG 的供电,而且处于拓扑结构的中心,该节点一旦发生故障将对系统产生很大的影响。

4.3 可行性验证

为验证本文所提方法的可行性,采用文献[13]的方法对考虑相同 DG 分布的改进的 IEEE 123 节点系统进行计算。由于文献[13]的评估指标仅适用于 DG 出力恒定的情况,故取随机出力的期望值作为恒定出力进行计算。与本文方法结果的对比见表 3。

由表 3 中可以看出,本文方法得到的排序前 15

表3 节点脆弱性排序对比

Table 3 Comparison of node vulnerability ranking

方法	排序前15节点
本文方法	13, 8, 1, 150, 7, 60, 149, 67, 54, 57, 152, 52, 53, 160, 18
文献[13]方法	13, 8, 150, 60, 57, 54, 7, 160, 53, 18, 52, 152, 1, 67, 149

的结果与文献[13]方法得到的结果中节点重合度高,但排列的顺序有所不同。其原因在于文献[13]并没有考虑DG出力的随机性,而是将DG当作恒定的电源来评价,且使用的指标重点考虑节点的局部特性而欠缺考虑全局特性。节点1的脆弱性排序在本文方法下比较靠前,而在文献[13]方法下比较靠后,一方面原因是文献[13]的指标中采用不适合脆弱性评估的节点电压,导致其结果没有本文方法下的可靠以及客观,另一方面原因是文献[13]缺乏全局性的指标,从全局考虑节点1退出运行不仅影响源节点供电,也影响DG供电,因此本文方法下的排序结果中节点1更靠前,结果更加合理。虽然排序结果不同,但是脆弱度高的节点重合度很高,这也说明了本文方法结果的正确性。

为了从客观的角度验证节点的脆弱度评估结果是否有效,引入失负荷率:

$$I = \frac{P_{\text{loss}}}{\sum P_{\text{load}}} \times 100\% \quad (24)$$

其中, I 为系统的失负荷率; P_{loss} 为节点受到攻击断开后导致不能正常供电的负荷之和; $\sum P_{\text{load}}$ 为正常运行时的总负荷量。

当配电网的节点受到攻击时,整个系统失负荷率越大,则说明系统受到的影响越大,该节点的脆弱度就越高。但对于考虑了DG的配电网而言,在节点断开后,一部分负荷能转化为孤岛稳定运行,这部分不视为负荷丢失^[24]。为验证指标的正确性,假设节点受攻击断开后配电网中其余满足条件的部分均能成功转入孤岛运行,此时系统的失负荷率可以作为验证指标的重要参考。取随机出力的期望值作为恒定出力,计算每个节点断开后的失负荷率,并将该结果与脆弱度评估结果进行比较,结果如图1所示。

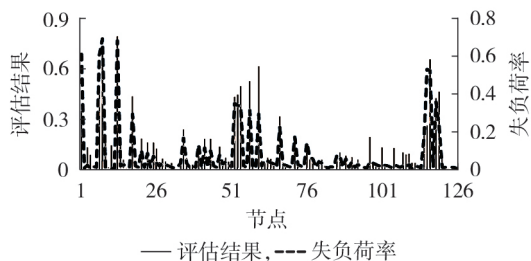


图1 脆弱度评估结果与失负荷率

Fig.1 Vulnerability evaluation results and load loss rate

图1显示本文方法的脆弱度评估结果与失负荷率具有基本相同的趋势,验证了本文方法脆弱性评估结果的合理性。

需要指出的是,虽然失负荷率与节点脆弱性排序趋势基本相同,但是具体到每个节点,脆弱性排序与失负荷率的大小仍存在较大差异。以节点60与节点52为例,虽然失负荷率的变化趋势与脆弱性评估结果相同,但节点60的脆弱度要明显大于节点52,而在失负荷率上并不能体现这一点。这是由于本文所提出的配电网节点脆弱性评估方法综合考虑了多种指标以及DG的随机出力特性,结果更加全面细致。失负荷率作为对比指标,仅能从客观角度对评估结果的合理性进行佐证,而不能代替本文所提方法。

5 结论

本文综合考虑DG出力随机性,基于复杂网络理论与配电网辐射状的拓扑条件得到配电网节点脆弱性指标,并结合样本修正权重的模糊综合评价法对节点的脆弱性进行评估,结论如下。

1)引入拉丁超立方抽样法模拟DG随机出力,并将其用于脆弱度指标计算。结果表明:在DG随机出力场景下,部分节点的脆弱性波动较大,其脆弱度指标存在分布区间,分布区间可为样本修正权重提供依据。

2)提出改进度、改进介数、网络凝聚度等节点脆弱性评估指标,这些指标考虑节点的全局特性与局部特性,克服了采用单一指标进行评估的片面性,可以更客观地反映配电网脆弱性评估结果。

3)提出配电网节点脆弱性评估方法,能够更加全面地衡量DG出力随机性对节点脆弱性的影响。算例结果表明,该方法具有较高的理论价值与实际意义。

附录见本刊网络版(<http://www.epae.cn>)。

参考文献:

- [1] 张建华,曾博,张玉莹,等. 主动配电网规划关键问题与研究展望[J]. 电工技术学报, 2014, 29(2): 13-23.
ZHANG Jianhua, ZENG Bo, ZHANG Yuying, et al. Key issues and research prospects of active distribution network planning [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.
- [2] 丁雪阳,刘新东. 基于最优风险指标的连锁故障模型和薄弱线路辨识[J]. 电力系统自动化, 2011, 35(18): 7-10, 86.
DING Xueyang, LIU Xindong. A cascading failure model and high-risk line identification based on an optimal risk index [J]. Automation of Electric Power Systems, 2011, 35(18): 7-10, 86.
- [3] CARRERAS B A, NEWMAN D E, DOBSON I, et al. Evidence for self-organized criticality in electric power system blackouts [J]. IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Regular Papers, 2004, 51(9): 1733-1740.
- [4] 丁明,韩平. 加权拓扑模型下的小世界电网脆弱性评估[J]. 中国电机工程学报, 2008, 28(10): 20-25.

- DING Ming, HAN Pingping. Vulnerability assessment to small-world power grid based on weighted topological model[J]. Proceedings of the CSEE, 2008, 28(10): 20-25.
- [5] 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.
- [6] 苏慧玲, 李扬. 从电力系统复杂网络特征探讨元件的脆弱性[J]. 电力系统自动化, 2012, 36(23): 12-17, 77.
SU Huiling, LI Yang. Electrical component vulnerability analysis from complex network characteristics of power systems[J]. Automation of Electric Power Systems, 2012, 36(23): 12-17, 77.
- [7] 肖盛, 张建华, 肖河. 基于复杂网络理论与风险理论的地区电网脆弱性评估[J]. 电网与清洁能源, 2013, 29(6): 21-28.
XIAO Sheng, ZHANG Jianhua, XIAO He. Vulnerability assessment of a regional power grid based on complex network theory and risk theory[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 29(6): 21-28.
- [8] 王志强, 李欣, 李岩, 等. 基于复杂网络与风险的电网综合脆弱性评估[J]. 现代电力, 2014, 31(3): 49-55.
WANG Zhiqiang, LI Xin, LI Yan, et al. Comprehensive vulnerability evaluation of power grid based on complex network and risk theory[J]. Modern Electric Power, 2014, 31(3): 49-55.
- [9] 李帅. 基于复杂网络理论的电力网络脆弱性研究[D]. 长沙: 国防科学技术大学, 2015.
LI Shuai. Research on the power grid vulnerability based on the theory of complex network[D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2015.
- [10] 徐敬友, 陈冲, 罗纯坚, 等. 基于改进复杂网络模型的电网关键环节辨识[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(10): 53-61.
XU Jingyou, CHEN Chong, LUO Chunjian, et al. Identification of power grid key parts based on improved complex network model[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(10): 53-61.
- [11] 杨丽徙, 曾新梅, 方强华, 等. 基于抗毁性分析的中压配电网网络拓扑结构[J]. 电力系统自动化, 2013, 37(8): 65-69.
YANG Lixi, ZENG Xinmei, FANG Qianghua, et al. Medium voltage distribution network topology based on survivability analysis[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(8): 65-69.
- [12] 吴辉, 彭敏放, 张海燕, 等. 基于复杂网络理论的配电网节点脆弱度评估[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2017, 14(1): 38-45.
WU Hui, PENG Minfang, ZHANG Haiyan, et al. Node vulnerability assessment for distribution network based on complex network theory[J]. Complex Systems and Complexity Science, 2017, 14(1): 38-45.
- [13] 史文超, 李晓明, 王孝琳, 等. 配电网脆弱性评估方法[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(12): 125-131.
SHI Wenchao, LI Xiaoming, WANG Xiaolin, et al. Vulnerability assessment method for distribution network[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2018, 30(12): 125-131.
- [14] 陈璨, 吴文传, 张伯明, 等. 基于多场景技术的有源配电网可靠性评估[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(34): 67-73, 11.
CHEN Can, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. An active distribution system reliability evaluation method based on multiple scenarios technique[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(34): 67-73, 11.
- [15] 陈璨, 吴文传, 张伯明, 等. 考虑光伏出力相关性的配电网概率潮流[J]. 电力系统自动化, 2015, 39(9): 41-47.
CHEN Can, WU Wenchuan, ZHANG Boming, et al. Probabilistic load flow of distribution network considering correlated photovoltaic power output[J]. Automation of Electric Power Systems, 2015, 39(9): 41-47.
- [16] LAVORATO M, FRANCO J F, RIDER M J, et al. Imposing radiality constraints in distribution system optimization problems[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2012, 27(1): 172-180.
- [17] 许鹏程, 刘文霞, 陈启, 等. 基于重要抽样与极限学习机的大电网可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(2): 204-210.
XU Pengcheng, LIU Wenxia, CHEN Qi, et al. Reliability evaluation of large power system based on combination of important sampling and extreme learning machine[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(2): 204-210.
- [18] 丁明, 过羿, 张晶晶, 等. 基于效用风险熵模糊综合评判的复杂电网节点脆弱性评估[J]. 电工技术学报, 2015, 30(3): 214-223.
DING Ming, GUO Yi, ZHANG Jingjing, et al. Node vulnerability assessment for complex power grids based on effect risk entropy-weighted fuzzy comprehensive evaluation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(3): 214-223.
- [19] 肖白, 刘亚伟, 施永刚, 等. 基于主成分分析的中压配电网供电可靠性评估[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(10): 7-12.
XIAO Bai, LIU Yawei, SHI Yonggang, et al. Power supply reliability assessment of mid-voltage distribution network based on principal component analysis[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(10): 7-12.
- [20] KERSTING W H. Radial distribution test feeders[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 1991, 6(3): 975-985.
- [21] CHEN Y, WEN J Y, CHENG S J. Probabilistic load flow method based on nataf transformation and Latin hypercube sampling[J]. IEEE Transactions on Sustainable Energy, 2013, 4(2): 294-301.
- [22] 王森, 王蕾, 陈飞, 等. 大数据环境下基于影子价格的配电网综合评价方法[J]. 电力自动化设备, 2019, 39(10): 94-101.
WANG Sen, WANG Lei, CHEN Fei, et al. Comprehensive evaluation method of distribution network based on shadow price under big data environment[J]. Electric Power Automation Equipment, 2019, 39(10): 94-101.
- [23] 肖白, 郭蓓, 季帅, 等. 考虑区域配电网风险承受能力差异的网架规划方法[J]. 电力自动化设备, 2020, 40(3): 68-75.
XIAO Bai, GUO Bei, JI Shuai, et al. Grid planning method considering difference in risk bearing capacity among regional distribution networks[J]. Electric Power Automation Equipment, 2020, 40(3): 68-75.
- [24] 张涛, 孙晓伟, 徐雪琴, 等. 基于有功潮流系数的电网关键线路辨识[J]. 电网技术, 2016, 40(1): 193-198.
ZHANG Tao, SUN Xiaowei, XU Xueqin, et al. Identification of critical lines in power grid based on active power flow betweenness[J]. Power System Technology, 2016, 40(1): 193-198.

作者简介:



王子欣

王子欣(1998—),男,浙江衢州人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划(E-mail: zixinwang98@126.com);

苗世洪(1963—),男,湖北随州人,教授,博士研究生导师,博士,通信作者,研究方向为电力系统保护与控制、压缩空气储能、配电网与微电网新技术等(E-mail: shmiao@hust.edu.cn);

郭舒毓(1996—),男,山西临汾人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统规划、输电线路故障定位(E-mail: sy_guo@hust.edu.cn)。

(编辑 王锦秀)

Node vulnerability evaluation of distribution network considering randomness characteristic of distributed generation output

WANG Zixin^{1,2}, MIAO Shihong^{1,2}, GUO Shuyu^{1,2}, HAN Ji^{1,2}, YIN Haoran^{1,2}, MAO Wandeng³

(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology(AEET),

School of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Hubei Electric Power Security and High Efficiency Key Laboratory, Wuhan 430074, China;

3. Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Along with the access of distributed generation and continuous expansion of distribution network scale, the safety and reliability of distribution network face challenges, and the problem of vulnerable link identification for distribution network needs to be solved urgently. Considering the influence of the randomness of distributed generation output on the vulnerability of distribution network nodes, a random output model of wind power and photovoltaic based on Latin hypercube sampling is established. The node vulnerability evaluation indexes of improved node degree, improved betweenness, etc, are proposed based on the complex network theory and radial topological condition of distribution network. The sampling results of random output model of distributed generation are used to obtain the distribution characteristic of node vulnerability index. A fuzzy comprehensive evaluation method based on sample correction weights is proposed to analyze the node vulnerability of distribution network considering the randomness of distributed generation. The feasibility and effectiveness of the proposed method are verified by the case results of an improved IEEE 123-bus system.

Key words: distributed power generation; randomness; Latin hypercube sampling; complex network theory; vulnerability evaluation

(上接第16页 continued from page 16)

Robust planning of energy storage in distribution network considering source-network-load flexible resources

ZHU Xiaorong, LU Guowei, XIE Wanying

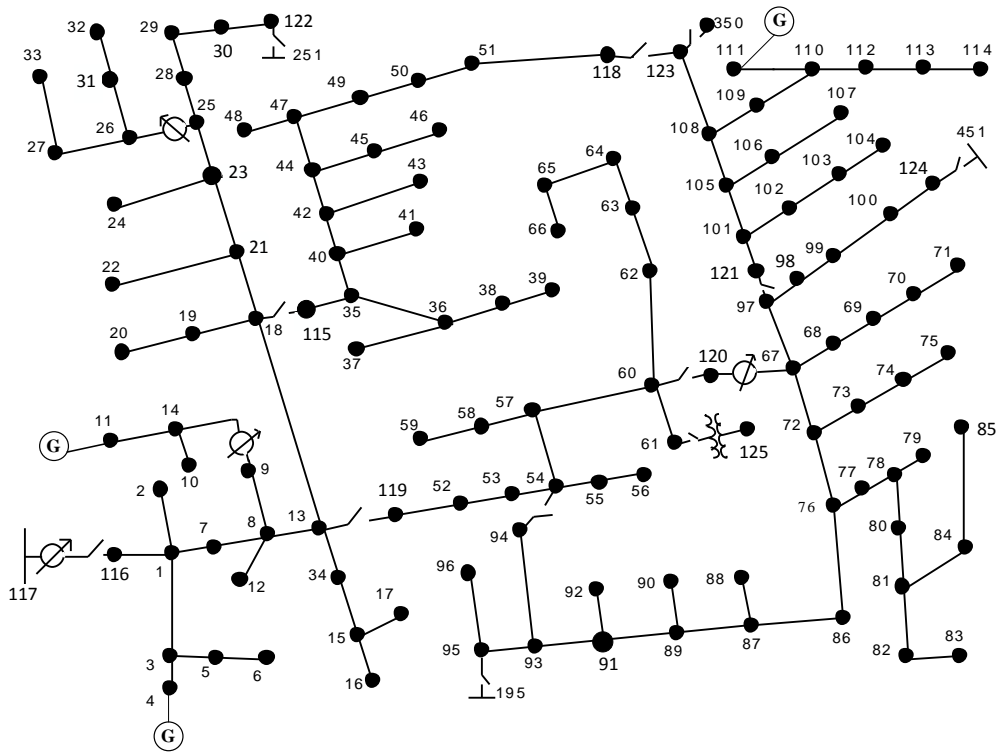
(State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: The increase of permeability of distributed generations such as wind power and photovoltaic power in distribution network causes the drastic fluctuation of net load, which leads to the sharp increase of distribution network's flexibility demand. Therefore, an optimal configuration method of energy storage in distribution network considering source-network-load flexible resources is proposed. Firstly, based on the flexibility theory, the characteristics of flexible resources in the distribution network are analyzed, and the flexibility supply-demand balance index to measure the distribution network's overall flexibility and the flexibility response ability index of branch to measure the network's flexibility are established. Then, K -means method and robust optimization theory are used to establish uncertain operation scenario sets from multiple time scales. Finally, an economical and flexible multi-objective optimization model is established with the minimum annual comprehensive cost of distribution network and the maximum daily average flexibility as its optimization objectives, which is solved by the multi-objective composite differential evolution algorithm with embedded power flow calculation. Based on IEEE 33-bus distribution network system, a numerical example is designed and simulated, and the results verify the rationality and effectiveness of the proposed model considering source-network-load flexible resources in solving the energy storage configuration scheme.

Key words: distribution network; optimal configuration of energy system; flexible resources; differential evolution algorithm; robustness

附录A:



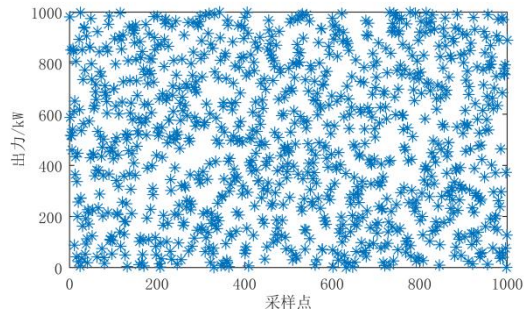
图A1 改进的IEEE 123节点系统拓扑图

Fig.A1 Topological diagram of improved IEEE 123-bus system

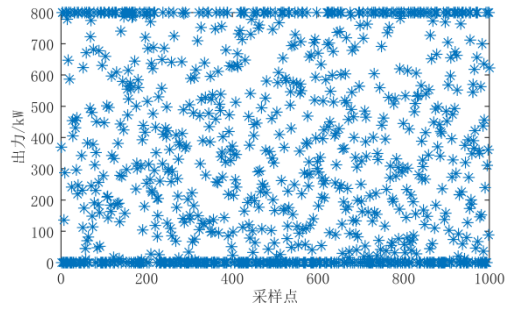
表A1 IEEE 123节点系统开关运行状态

Table A1 Switch operating states of IEEE123-bus system

首节点	末节点	状态
13	152	闭合
18	135	闭合
60	160	闭合
61	610	闭合
97	197	闭合
150	149	闭合
250	251	开断
450	451	开断
54	94	开断
151	300	开断
300	350	开断



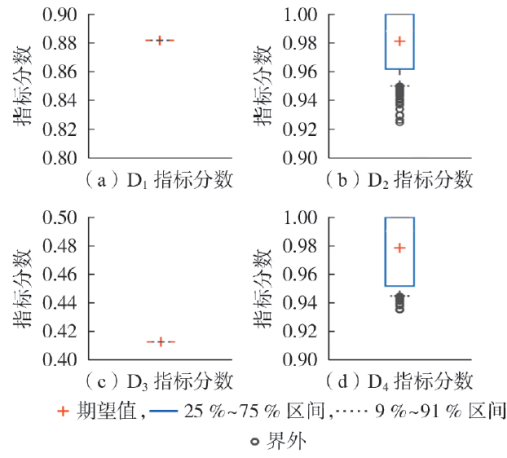
(a) 光伏出力



(b) 风机出力

图A2 DG出力采样

Fig.A2 Sampling of DG output



图A3 节点8脆弱度指标分布图

Fig.A3 Distribution map of vulnerability index for Node 8

表A2 脆弱度评估结果

Table A2 Vulnerability evaluation results

排序	改进度		改进介数		网络凝聚度		改进连接损耗		综合评价	
	节点	指标	节点	指标	节点	指标	节点	指标	节点	分值
1	13	1.00	8	1.00	13	1.00	1	1.00	13	84.98
2	18	0.96	13	0.98	67	0.98	8	0.98	8	82.43
3	67	0.95	1	0.81	60	0.91	13	0.94	1	80.17
4	60	0.89	7	0.78	57	0.84	7	0.90	150	77.45
5	8	0.88	149	0.65	54	0.84	149	0.82	7	76.50
6	150	0.76	150	0.65	52	0.79	150	0.82	60	74.45
7	1	0.71	152	0.64	53	0.79	152	0.63	149	73.87
8	72	0.64	52	0.64	152	0.79	52	0.63	67	73.52
9	57	0.63	53	0.61	18	0.79	53	0.62	54	73.44
10	97	0.62	54	0.61	160	0.77	54	0.61	57	73.21
11	21	0.60	57	0.59	72	0.56	57	0.59	152	72.53
12	54	0.59	60	0.59	76	0.53	60	0.57	52	72.02
13	76	0.57	67	0.58	97	0.50	67	0.52	53	71.86
14	35	0.56	160	0.54	35	0.48	160	0.50	160	69.67
15	23	0.54	18	0.36	101	0.44	18	0.33	18	69.10