

DOI: 10.7667/PSPC201835

# 基于综合功率介数的主动配电网脆弱性分析

张家美<sup>1,2</sup>, 黎灿兵<sup>1,2</sup>, 彭敏放<sup>2</sup>, 彭泽武<sup>3</sup>

(1. 能源互联网智能信息分析与综合优化湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410082; 2. 湖南大学电气与信息工程学院, 湖南 长沙 410082; 3. 广东电网公司信息中心, 广东 广州 510080)

**摘要:** 考虑到主动配电网在智能电网发展中的重要性以及在潮流分布与运行方式上的复杂性, 进行了符合主动配电网运行实际的脆弱性分析。将主动配电网视为有向网络, 将系统潮流分布方向作为网络邻接矩阵的方向矢量, 从而得到考虑方向性的网络介数指标, 以衡量各节点在网络连通性中的重要性。考虑发电机-负荷因素, 分析功率在支路间的分布情况, 提出功率因数指标, 以评定各节点在功率传输中的作用。使用熵值法确定各指标权重, 提出综合功率介数的概念, 并对主动配电网的脆弱环节进行识别。以年为时间尺度, 对网络脆弱性的年变化趋势进行研究, 发现了较强的季节特性。使用添加了分布式电源与电池储能系统的 IEEE 33 节点系统, 计算了网络在受到按脆弱性识别结果进行攻击时的失负荷率, 验证了所提方法的正确性。

**关键词:** 熵值法; 综合功率介数; 脆弱性; 主动配电网; 季节性

## Vulnerable links analysis based on integrated active power betweenness in active distribution network

ZHANG Jiamei<sup>1,2</sup>, LI Canbing<sup>1,2</sup>, PENG Minfang<sup>2</sup>, PENG Zewu<sup>3</sup>

(1. Hunan Key Laboratory of Intelligent Information Analysis and Integrated Optimization for Energy Internet, Changsha 410082, China; 2. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China; 3. Department of Information, Guangdong Power Grid Corporation, Guangzhou 510080, China)

**Abstract:** In view of the importance of the active distribution networks in the development of smart grids and the complexity of operation mode and power flows, vulnerability analysis of active distribution network is conducted. The active distribution network is regarded as a directed network, and the direction of the system power flow is taken as the direction vector of the adjacency matrix. Thus, the network betweenness is obtained to measure the role of each node in the network. Given the importance of each node in power transmission, the generator-load factor is considered synthetically, and power factor indicator is proposed. Using the entropy method to determine the weight of each factor, the concept of integrated power betweenness is proposed to identify the vulnerable links of the active distribution network. Based on the time scale of the year, the study of the trend of the vulnerability of the network reveals that the vulnerability of the active distribution network has strong seasonality. In IEEE 33-bus system with distributed power supply and battery energy storage system, the load-loss rate of the network when it is attacked by the vulnerability identification result is calculated, and the correctness of the proposed method is verified.

This work is supported by Distinguished Youth Fund of Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2017JJ1011).

**Key words:** entropy method; integrated power betweenness; vulnerability; active distribution network; seasonality

## 0 引言

传统配电网闭环设计, 开环运行, 成辐射状, 结构简单。但随着智能电网概念的提出与发展, 多种分布式电源(DG)、储能装置和微电网接入配电网

中, 使配电网的结构和功能发生了极大的改变<sup>[1-4]</sup>。主动配电网(ADN)不再只是电网末端, 还成为各种清洁能源的输入端与用户信息的采集端, 具有强大的功能与复杂的结构<sup>[5-8]</sup>。潮流的不确定性与节点之间复杂的相互作用导致产生了各种涌现性行为 and 明显的非线性特性, 大大增加了系统的脆弱性, 给配电网的运行和控制带来风险。当前配电网规模不断

基金项目: 湖南省自然科学基金杰出青年基金(2017JJ1011)

扩大, 功能越来越强, 承担着输送清洁能源、进行需求响应的责任<sup>[9-11]</sup>, 其关键环节的断裂将导致主网功率缺额, 引发系统振荡。因此对 ADN 脆弱性进行研究, 提前做好预防措施, 将能大幅提高电力系统的安全稳定性。

电力系统的脆弱性研究一般是建立模拟事故发生过程的时域仿真模型<sup>[12-13]</sup>, 包括: 自组织临界性模型和事故链搜索模型。但系统的结构一旦确定, 其特征和运行方式即可确定。此时结合电网自身特点, 从网络拓扑等宏观的角度对系统的脆弱性进行评估, 可简化分析过程, 节省计算空间。文献[14]基于小世界网络模型, 提出了将线路阻抗作为权重的阻抗加权介数指标, 来衡量网络脆弱性, 简单易行。文献[15]基于直流潮流计算, 提出了电气介数的概念, 克服了电抗加权介数假设潮流沿最小路径传播的不足。文献[16]在电气介数的基础上, 考虑了潮流实际分布与输电线路容量, 提出了基于直流潮流的电气介数, 更加符合电力系统物理实际。文献[17]使用效用风险熵权对节点脆弱性进行综合评判, 解决了已有方法分析不够全面的缺点。以上文献对大电网的脆弱性进行了深入的研究, 但目前关于配电网的脆弱性研究还相对较少。已有研究中, 文献[18]借鉴了大电网中抗毁性分析的思想, 将复杂网络理论应用到中压配电网中, 进行中压配电网网络结构抗毁性评估, 为方法的直接引用。文献[19]在大电网已有的度值、介数、凝聚度和紧密度指标的基础上进行改进, 在配电网中, 结合主观和客观信息给各指标赋值, 提出综合逼近理想排序和灰色关联度方法。文献[20]运用云计算方法, 设计了一种分层控制结构, 利用风险评估指标来进行配电网脆弱性分析, 但针对的都是传统配电网。如今随着新能源的发展与渗透, 配电网具备了更多的功能与特点, 对于 AND 脆弱性的分析亟待进行。

本文充分考虑了 DG 与电池储能系统(BESS)对配电网运行方式的影响, 提出了符合其运行实际的 AND 脆弱性分析方法。基于功率传输的方向性, 对传统的网络介数进行改进; 分析系统潮流分布, 计算各节点的功率因数。使用熵值法确定各指标权重, 提出综合功率介数指标来进行系统脆弱节点的识别。最后通过计算系统节点受到攻击时的失负荷率指标验证了本文所提方法的正确性, 并分析了 AND 脆弱性的年变化特征。

## 1 主动配电网建模

在 AND 中, 由 DG 提供清洁能源, 其中风机、光伏发电机的出力模型<sup>[21]</sup>分别为

$$P_{\text{WTG}} = \begin{cases} 0 & 0 < v \leq v_{\text{ci}} \\ P_r \cdot \frac{v - v_{\text{ci}}}{v_r - v_{\text{ci}}} & v_{\text{ci}} < v \leq v_r \\ P_r & v_r < v \leq v_{\text{co}} \\ 0 & v > v_{\text{co}} \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $P_{\text{WTG}}$  为风机实际功率;  $v_{\text{ci}}$ 、 $v_r$ 、 $v_{\text{co}}$  分别为切入风速、额定风速和切出风速;  $P_r$  为风机额定功率。

$$P_{\text{PVG}} = A\eta r \quad (2)$$

式中:  $P_{\text{PVG}}$  为光伏发电机实际功率;  $A$  为光伏板总面积;  $\eta$  为光电转换效率;  $r$  为实际光照强度。

在 AND 中, 由储能系统来平抑 DG 对配电网造成的影响, 本文中使用的电池储能系统(BESS)<sup>[22]</sup>。当 DG 输出功率大于负荷总量时, 产能过剩, 储能系统充电; 当 DG 输出功率小于负荷总量时, 产能不足, 储能系统放电, 充电时 BESS 满足式(3)。

$$S_{\text{BESS}}(t+1) = S_{\text{BESS}}(t) + \Delta t \cdot P_{\text{BESS}}^{\text{c}} \cdot \eta_{\text{BESS}}^{\text{c}} \quad (3)$$

放电时 BESS 满足式(4)。

$$S_{\text{BESS}}(t+1) = S_{\text{BESS}}(t) - \Delta t \cdot P_{\text{BESS}}^{\text{d}} \cdot \eta_{\text{BESS}}^{\text{d}} \quad (4)$$

式中:  $S_{\text{BESS}}(t)$  为  $t$  时刻储能的荷电状态;  $P_{\text{BESS}}^{\text{c}}$ 、 $P_{\text{BESS}}^{\text{d}}$  分别为  $t$  时刻储能的充放电功率;  $\eta_{\text{BESS}}^{\text{c}}$ 、 $\eta_{\text{BESS}}^{\text{d}}$  分别为  $t$  时刻储能的充放电效率。

## 2 构建综合功率介数

网络介数可准确地衡量主动配电网中各节点在网络连通性中的重要性。但将其作为衡量节点脆弱性的唯一指标, 太过片面。网络中, 承担较大功率传输任务的节点相比于其他节点具有更重要的电气作用。而网络介数无法考虑功率在线路间的分流以及在各节点、线路间的分布情况。因此本文还考虑了每个节点在系统功率传输中的功率流量, 即功率因数指标。综合这两个因素, 可得到综合功率介数的概念, 如式(5)所示。

$$S_i = w_1 \cdot b_i^* + w_2 \cdot p_i^* \quad (5)$$

式中:  $S_i$  为节点  $i$  的综合功率介数;  $w_1$ 、 $w_2$  分别为网络介数和功率因数的权重;  $b_i^*$ 、 $p_i^*$  分别为节点  $i$  的网络介数和功率因数归一化之后的值。

其中各属性的归一化公式为

$$b_i^* = \frac{b_i}{\sum_{i=1}^n b_i} \quad (6)$$

$$p_i^* = \frac{p_i}{\sum_{i=1}^n p_i} \quad (7)$$

式中:  $b_i$  为节点  $i$  的网络介数;  $p_i$  为节点  $i$  的功率因数;  $n$  为节点个数。

### 2.1 基于有向图的网络介数

对于网络介数, 传统的做法是将各线路的阻抗作为各边的权重, 从而构造各节点之间的关联矩阵<sup>[23]</sup>。但此方法无法体现网络的方向性, 因此本文使用风速、光照强度的概率密度函数对历史数据进行拟合, 通过风机、光伏发电机的出力模型得到系统中各 DG 出力。将 DG 接入配网系统中, 使用 BESS 对波动功率进行平抑, 并进行潮流分析。将所得潮流结果作为邻接矩阵的方向矢量, 构造具有方向性的邻接矩阵。使用弗洛伊德(Floyd)算法计算出网络中各节点到其他所有节点的最短路径。使用求得的网络中各节点的最短路径计算出 AND 各节点的网络介数, 如式(8)所示。

$$b_k = \sum_{i \in V} \sum_{j \in V, j \neq i} \frac{n_{ij}(k)}{n_{ij}} \quad (8)$$

式中:  $b_k$  为节点  $k$  的网络介数;  $n_{ij}$  表示考虑方向性后网络中任意两节点  $i$  和节点  $j$  之间所有最短路径数目;  $n_{ij}(k)$  表示所有最短路径中经过节点  $k$  的最短路径数目;  $V$  表示网络中所有节点的集合。

### 2.2 功率因数

将考虑了发电机负荷重要度后流过各节点的功率作为该节点的功率因数。使用功率因数来衡量网络中各节点在功率传输中的重要性, 如式(9)所示。

$$p_i = \sum_{g \in G} \sum_{l \in L} \sqrt{\omega_g \omega_l} \cdot P_i^g \quad (9)$$

式中:  $\omega_g$  表示发电机  $g$  的权重, 取发电机实际出力;  $\omega_l$  表示负荷  $l$  的权重, 取负荷实际值;  $G$  表示网络中的发电机集合;  $L$  表示网络中的负荷集合;  $P_i^g$  表示网络中发电机  $g$  注入节点  $i$  的功率。

式(9)中考虑了每个节点总的注入功率, 即每个节点在系统功率传输中的功率流量。每个节点总的功率流量可由基尔霍夫电流定律推导而得, 即由流入各节点的电流等于流出各节点的电流, 可得流入各节点的功率等于流出各节点的功率。流出该节点的功率包括流向其他支路的功率与流向与该节点相连的负荷的功率, 如式(10)所示。

$$\sum_{g \in G} P_i^g = \sum_{l \in L} P_i^l + P_i^{\text{load}} \quad (10)$$

式中:  $P_i^g$  表示网络中发电机  $g$  注入节点  $i$  的有功功率;  $P_i^l$  表示网络中支路  $l$  从节点  $i$  获取的有功功率;  $P_i^{\text{load}}$  表示节点  $i$  的负荷值。

### 2.3 熵值法确定权重

熵的概念源于热力学, 是对系统状态不确定性的一种度量<sup>[24]</sup>。熵值越大, 数据的无序性越高, 所含有的信息量越少; 熵值越小, 数据的无序性越小, 所含有的信息量越大。可以通过熵值法确定网络介数和功率因数的权重, 进而确定综合功率介数。

构建介数指标与功率指标的双属性决策矩阵如式(11)。

$$D = \begin{matrix} & \begin{matrix} B & P \end{matrix} \\ \begin{matrix} a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_w \end{matrix} & \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \\ \vdots & \vdots \\ x_{w1} & x_{w2} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (11)$$

式中:  $a_m (m=1, 2, \dots, W)$  为进行计算的样本节点;  $W$  为样本个数;  $B$  为样本节点的网络介数属性;  $P$  为样本节点的功率因数属性。

计算各节点对各属性的贡献度。

$$C_{mn} = \frac{x_{mn}}{\sum_{m=1}^W x_{mn}} \quad n=1, 2; \quad m=1, 2, \dots, W \quad (12)$$

式中:  $C_{mn}$  为第  $n$  个属性下、第  $m$  个样本  $a_m$  的贡献度;  $x_{mn}$  为第  $m$  个样本点的第  $n$  个属性值;  $W$  为样本个数。

计算所有节点对各属性的贡献度, 即各属性输出熵为

$$e_n = -K \sum_{m=1}^W C_{mn} \ln C_{mn} \quad (13)$$

$$K = \frac{1}{\ln q} \quad (14)$$

式中,  $q$  为属性个数, 本文中  $q=2$ 。

各属性的权系数为

$$w_n = \frac{1 - e_n}{\sum_{n=1}^q (1 - e_n)} \quad (15)$$

式中:  $e_n$  为属性  $n$  的输出熵;  $q$  为属性个数。

代入数值可得网络介数权重  $w(B)=0.4931$ , 功率因数权重  $w(P)=0.5069$ 。

## 3 失负荷率

在系统节点受到攻击时, 系统失负荷率越大, 系统稳定性遭到的破坏程度越大, 但转化为孤岛能稳定运行的部分, 不视为负荷丢失<sup>[15]</sup>。为验证计算指标的正确性, 假设系统受到攻击后能成功转入孤岛运行, 将此时系统的失负荷率作为验证节点脆弱性的指标。

$$I = \frac{P_{\text{loss}}}{\sum P_{\text{load}}} \times 100\% \quad (16)$$

式中： $I$  为系统失负荷率； $P_{\text{loss}}$  为系统受到攻击后的失负荷量； $\sum P_{\text{load}}$  为系统正常稳定运行时的总负荷量。

#### 4 脆弱环节识别流程

1) 监测某地的可再生资源年分布情况，使用风速、光照强度的概率密度函数对历史数据进行拟合。通过风机、光伏发电出力模型计算 DG 出力，并分析 DG 出力的年变化情况。

2) 考虑 BESS 对 DG 出力的平抑情况，对 AND 进行潮流分析，获取 AND 中的潮流分布情况。

3) 以网络中各边的阻抗值作为权重，以网络中潮流的实际分布方向作为方向矢量，形成邻接矩阵。

4) 根据邻接矩阵，使用式(8)得到各节点考虑方向性的网络介数；根据系统潮流分布，使用式(9)得到各节点功率因数指标。

5) 使用熵值法确定网络介数指标和功率因数指标的权重，构建综合功率介数指标，并对 AND 的脆弱环节进行识别。

6) 使用式(16)计算系统遭到按脆弱性排序结果进行攻击时的失负荷率，来验证指标的正确性。

7) 重复进行 2)—7)操作，以获取主动配电网各节点的年综合功率介数变化情况，分析主动配电网脆弱环节的年变化趋势。

#### 5 算例分析

本文选择 IEEE 33 节点系统进行研究，其相关参数见文献[25]。在 IEEE 33 节点系统中的 7、18 节点接入额定容量为 1 000 kW 的风力发电机，在 22、30 节点接入额定容量为 1 200 kW 的光伏发电机，在节点 3、8、18、32 节点接入额定功率为 200 kW 的 BESS，其拓扑结构如图 1 所示。

##### 5.1 主动配电网脆弱环节识别

使用功率因数和综合功率介数分别对接入 DG、BESS 后的 IEEE 33 节点系统进行脆弱环节识别，识别结果如表 1 所示。

从表 1 可以看出，功率因数和综合功率介数的识别结果较为相似，脆弱性排名前十的节点中有 7 项是相同的，但排序却有较大不同。在综合功率介数的识别结果中，DG 接入点(30, 22, 7, 18)的位置均靠前，从物理意义上讲，这些节点的断裂将导致较大的失负荷率与功率转移，将给网络造成冲击，

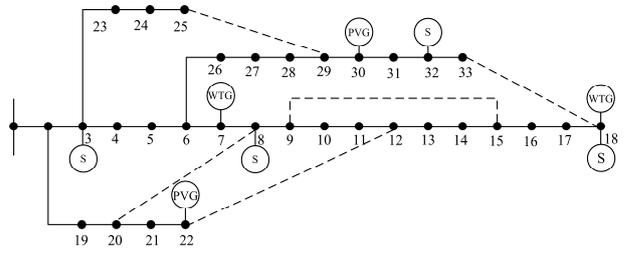


图 1 接入 DG 与 BESS 后的 IEEE 33 节点系统网络拓扑图

Fig. 1 IEEE 33-nodes system network topology graph with DG and BESS

表 1 接入 DG 与 BESS 后脆弱环节识别结果

Table 1 Vulnerable links identification with DG and BESS

功率因数	节点脆弱性排名	综合功率介数	节点脆弱性排名
0.065 890 182	3	0.068 222 495	30
0.054 476 74	30	0.049 362 429	18
0.051 243 601	23	0.046 461 841	17
0.048 530 032	2	0.045 315 971	7
0.046 165 842	24	0.042 774 522	22
0.043 620 567	7	0.042 101 498	3
0.040 158 9	18	0.041 796 022	16
0.040 158 9	17	0.040 190 512	29
0.038 606 859	22	0.039 873 934	21
0.038 606 859	21	0.037 185 445	15

因此具有更重要的物理意义。而在功率因数的识别结果中，这些节点却没有排在比较靠前的位置。在功率因数的识别结果中，靠前的节点为 3、23、2、24，这是由于节点 23、24 上所带负荷较大，故流经该支路的功率较大。这些节点的断裂虽会造成 23-25 支路的失负荷，但是影响范围较小，且不会造成大规模的负荷转移，对网络的冲击较小，从实际意义上来说其重要性远不如 DG 接入点。功率因数从功率角度对网络脆弱性进行了分析，能够识别出网络中功率传输较大的节点，但无法考虑功率流动的方向性与网络的连通性。因此相比于功率因数，综合功率因数具有更强的实际意义。

##### 5.2 识别方法正确性检验

根据各节点脆弱性识别结果，选取按综合功率介数由高到低排名前五的节点进行攻击。根据式(16)计算每次攻击后的负荷损失率，结果如表 2 所示。

从表 2 可以看出，系统受到按综合功率介数由高到低的顺序进行攻击时的系统负荷损失率依次下降，即对系统脆弱性较大节点的攻击的确会对系统造成更严重的破坏。这一结果也验证了本文所提方法的正确性。

表 2 节点受攻击时的负荷损失率

Table 2 Load loss rate table when the node is attacked

节点排序	节点	负荷损失率/%
1	30	27.99
2	18	27.46
3	17	25.84
4	7	25.03
5	22	23.69

### 5.3 主动配电网与传统配电网的脆弱性比较

使用本文所提方法分别对 IEEE 33 节点系统在无 DG 接入时、有 DG 接入时、有 DG 及 BESS 接入时网络各节点的综合功率介数进行计算, 结果如图 2 所示。

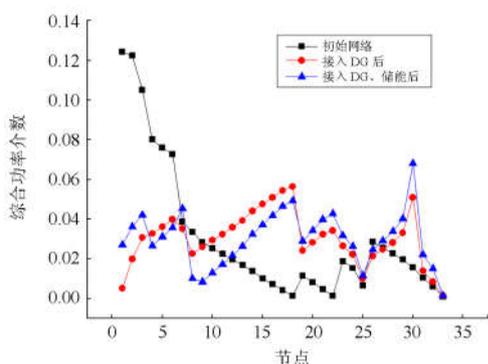


图 2 接入 DG、BESS 前后各节点综合功率介数图

Fig. 2 Integrated power betweenness of each node before and after accessing DG and BESS

从图 2 中可以看出, 在初始网络中, 靠近主网的节点的综合功率介数较大, 其余节点的综合功率介数较小, 各节点间综合功率介数落差较大, 系统脆弱性表现出一种单峰分布的状态, 即整个配电网对主网的依赖性较强, 一旦靠近主网的节点发生故障将导致整个配电网的崩溃。接入 DG 之后, 靠近主网的节点的综合功率介数大大削减, 靠近 DG 处节点的综合功率介数有所上升, 整个网络中各个节点的综合功率介数处于一种多峰分布的状态。这是由于配电网中的负荷不再只依靠主网提供电能, 负荷需求被分摊到了各个 DG 上。此时靠近主网处节点的故障不会导致整个配电网的崩溃, 但网络中的潮流分布比较复杂, 节点的脆弱性无法直接观测得到。加入 DG 与 BESS 后, 网络各节点综合功率介数的峰谷差增大, 网络脆弱性的分布特点更加突出。这是由于储能平抑了 DG 过剩或不足的产能, 使网络中的潮流分布更加稳定。比较结果显示, 相比于传统配电网, AND 的脆弱性分布更加复杂, 单一对配网与主网连接处进行保护并不能保证整个网络的安全, AND 需要更加有针对性的保护措施。

### 5.4 主动配电网脆弱性年变化趋势分析

由于 DG 出力的随机性与波动性会对节点的脆弱性造成影响, 因此本文以年为时间尺度对脆弱节点的季节变化趋势进行了研究。通过查询 NASA 气象数据库获得某地风能、太阳能的年分布数据。设风机切入风速  $v_{ci}=3.5\text{ m/s}$ , 额定风速  $v_r=13.5\text{ m/s}$ , 切出风速  $v_{co}=15\text{ m/s}$ 。使用 DG 出力模型分别计算该地一年中风机、光伏发电机的出力情况, 计算结果如图 3 所示。

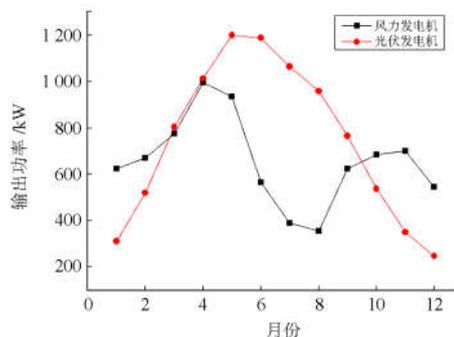


图 3 风机、光伏发电机年出力分布图

Fig. 3 Wind turbines and photovoltaic power generation year output map

从图 3 可以看出, 该地区的风机和光伏发电机的年出力情况有着很大差异。首先该地区的风机和光伏发电机在同一时间段内的出力相差较大; 其次该地区的风机和光伏发电机出力的年变化规律完全不同; 并且, 风机和光伏发电机的出力高峰时段相互交错, 具有一定的互补性。由这种产能结构的特点推想可知, 一年中系统潮流的分布情况变化较大。因此 ADN 的脆弱节点不是固定不变的, 而是随着季节的变化而变化的。有必要对主动配电网脆弱性的年变化情况进行研究, 以便提前有针对性地对系统进行防护, 保证系统的安全稳定运行。

本文按照第 4 节给出的识别流程, 对系统中各节点全年每个月的综合功率介数进行了计算, 可得系统的脆弱性变化趋势如图 4—图 7 所示。

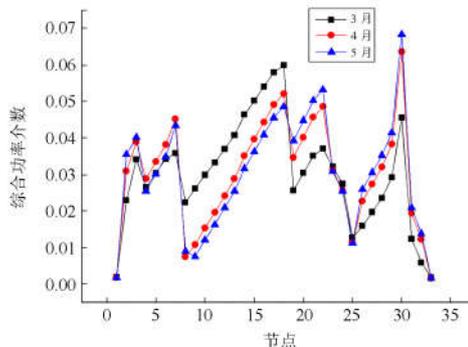


图 4 春季各节点综合功率介数

Fig. 4 Integrated power betweenness of each node in spring

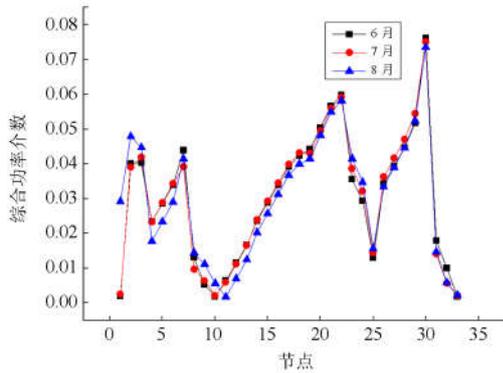


图 5 夏季各节点综合功率介数

Fig. 5 Integrated power betweenness of each node in summer

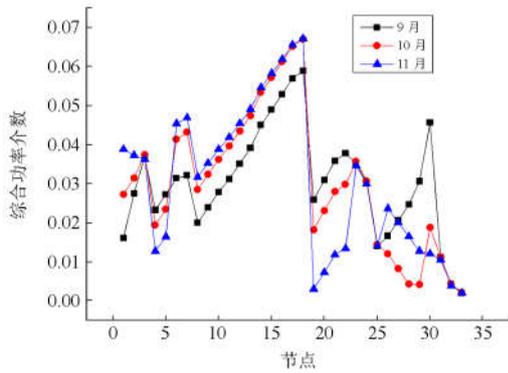


图 6 秋季各节点综合功率介数

Fig. 6 Integrated power betweenness of each node in autumn

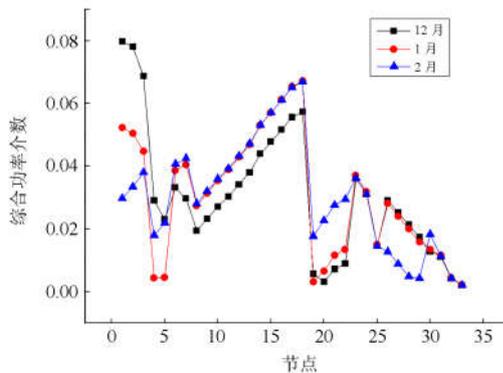


图 7 冬季各节点综合功率介数

Fig. 7 Integrated power betweenness of each node in winter

从系统脆弱性的年变化情况可以看出，和大电网明显不同的是，由于风机和光伏发电出力的变化，ADN 中各节点的综合功率介数变化具有季节性。春季，DG 接入处及其附近综合功率介数均较大，这是由于春季风能、光能均充足；夏季，由于光能尤为充足，因此光伏发电接入处及其附近节点综合介数相比于其他位置更大；秋冬季节，由于光能明显减弱，风能充足，因此 7、18 节点及其附

近节点综合介数明显增加。同时由于冬季风能、光能都有一定程度的下降，DG 产能不足，靠近主网附近的节点的综合功率介数增大，配网对主网的依赖能力有一定回升。并且可以观测到配网对主网的依赖性只有冬季较强，其余季节配网与主网的能量交互并不多。这是由于储能的接入使配网对 DG 的消纳能力增强，配网受主网的影响降低，自身的脆弱性特点更加稳定。

以上分析显示了主动配电网的脆弱环节具有很强的季节性。根据本文所提出的 AND 脆弱环节年变化趋势分析方法，有针对性地对重要节点进行识别、防护，能有效降低 AND 运行风险，提高其安全可靠。

### 6 结论

本文充分考虑了 AND 的结构、运行特点，给出了符合 AND 需求的脆弱性分析方法。基于功率传输的方向性，对传统的网络介数进行改进，使用功率因数衡量各节点在功率传输中的作用，通过熵值法确定各指标权重，得到综合功率介数指标并对主动配电网的脆弱环节进行识别。其中充分考虑了 AND 中 DG 出力的波动性与 BESS 的平抑作用。除此之外，本文以年为时间尺度，对主动配电网各节点的年脆弱性进行了分析，发现了 AND 脆弱环节的年变化趋势，为有针对性地对 AND 进行防护打下了基础。

### 参考文献

[1] 韩笑, 周明, 李庚银, 等. 基于无迹变换随机潮流建模的主动配电网优化调度[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(3): 9-17.  
 HAN Xiao, ZHOU Ming, LI Gengyin, et al. Stochastic optimal dispatching of active distribution networks based on stochastic power flow modeling using unscented transformation[J]. Power System Protection and Control, 2018, 46(3): 9-17.

[2] 张建华, 曾博, 张玉莹. 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. Design and implementation of user energy management system on active distribution network[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2014, 29(2): 13-23.

[3] 郑程拓, 丁晓群, 郑能, 等. 计及主动管理的含风电源主动配电网无功补偿规划[J]. 陕西电力, 2017, 45(6): 30-35.  
 ZHENG Chengtuo, DING Xiaoqun, ZHENG Neng, et al. Reactive power compensation planning for active

- distribution network with wind power considering active management[J]. Shaanxi Electric Power, 2017, 45(6): 30-35.
- [4] 钟迪, 李启明, 周贤, 等. 多能互补能源综合利用关键技术研究现状及发展趋势[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 1-5.  
ZHONG Di, LI Qiming, ZHOU Xian, et al. Research status and development trends for key technologies of multi-energy complementary comprehensive utilization system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 1-5.
- [5] 蒲天骄, 陈乃仕, 王晓辉, 等. 主动配电网多源协同优化调度架构分析及应用设计[J]. 电力系统自动化, 2016, 40(1): 17-23.  
PU Tianjiao, CHEN Naishi, WANG Xiaohui, et al. Key issues and research prospects of active distribution[J]. Automation of Electric Power Systems, 2016, 40(1): 17-23.
- [6] 蒲天骄, 李焜, 陈乃仕, 等. 基于 MAS 的主动配电网多源协调优化调度[J]. 电工技术学报, 2015, 30(23): 67-75.  
PU Tianjiao, LI Ye, CHEN Naishi, et al. Multi-source coordinated optimal dispatch for active distribution network based on multi-agent system[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2015, 30(23): 67-75.
- [7] 陈权, 李令冬, 王群京. 光伏发电并网系统的仿真建模及对配电网电压稳定性影响[J]. 电工技术学报, 2013, 28(3): 241-247.  
CHEN Quan, LI Lingdong, WANG Qunjing. Simulation model of photovoltaic generation grid-connected system and its impacts on voltage stability in distribution grid[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(3): 241-247.
- [8] 廖攀. 主动配电网无功电压全局优化控制策略[J]. 陕西电力, 2016, 44(7): 29-32.  
LIAO Zhi. Global optimization and control strategy of reactive voltage in active distribution network[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(7): 29-32.
- [9] 张旭升, 李瑞生, 黄利军, 等. 基于分层储能的主动配电网需求响应控制策略研究及实现[J]. 电力系统保护与控制, 2017, 45(15): 40-49.  
ZHANG Xusheng, LI Ruisheng, HUANG Lijun, et al. Research and application on demand response based on hierarchical power storage[J]. Power System Protection and Control, 2017, 45(15): 40-49.
- [10] 董文杰, 田廓. 考虑电动汽车接入的智能配电网投资规划模型[J]. 陕西电力, 2016, 44(9): 32-36.  
DONG Wenjie, TIAN Kuo. Smart distribution investment planning model considering the integration of electric vehicles[J]. Shaanxi Electric Power, 2016, 44(9): 32-36.
- [11] 韩中合, 祁超, 向鹏, 等. 分布式能源系统效益分析及综合评价[J]. 热力发电, 2018, 47(2): 31-36.  
HAN Zhonghe, QI Chao, XIANG Peng, et al. Benefit analysis and comprehensive evaluation for distributed energy system[J]. Thermal Power Generation, 2018, 47(2): 31-36.
- [12] 龚媛, 梅生伟, 张雪敏, 等. 考虑电力系统规划的 OPA 模型及自组织临界特性分析[J]. 电网技术, 2014, 38(8): 2021-2028.  
GONG Yuan, MEI Shengwei, ZHANG Xuemin, et al. An improved OPA model considering planning and self-organized criticality analysis[J]. Power System Technology, 2014, 38(8): 2021-2028.
- [13] 丁明, 肖遥, 张晶晶, 等. 基于事故链及动态故障树的电网连锁故障风险评估模型[J]. 中国电机工程学报, 2015, 35(4): 821-829.  
DING Ming, XIAO Yao, ZHANG Jingjing, et al. Risk assessment model of power grid cascading failures based on fault chain and dynamic fault tree[J]. Proceedings of the CSEE, 2015, 35(4): 821-829.
- [14] 刘耀年, 术茜, 康科飞, 等. 基于电抗加权介数指标的电网脆弱线路识别[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(23): 89-100.  
LIU Yaonian, SHU Qian, KANG Kefei, et al. Risk identification of vulnerable lines in power grid based on the weighted reactance betweenness index[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(23): 89-100.
- [15] 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.  
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.
- [16] 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.  
WANG Renwei, ZHANG Yougang, YANG Yang, et al. Vulnerable line identification of complex power grid based on electrical betweenness[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 1-6.
- [17] 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.
- [18] 杨丽徙, 林茂盛, 张宏伟, 等. 中压配电网典型网络结构抗毁性评估[C] // 中国电机工程学会电力系统自动化专业委员会三届一次会议暨 2011 年学术交流会, 6 月 14 日, 2012, 南京, 中国: 1-7.  
YANG Lixi, LIN Maosheng, ZHANG Hongwei, et al. Invulnerability evaluation of typical network structures for medium voltage distribution networks[C] // The first Conference of the Third professional committee Council of CSEE Automation of Electric Power Systems and Academic Conference in 2011, June 14, 2012, Nanjing, China: 1-7.
- [19] 吴辉, 彭敏放, 张海艳, 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 System and Complexity Science, 2017, 14(1): 38-45.
- [20] 袁瑶, 王征, 张龙斌, 等. 基于云计算的配电网脆弱性分析系统的设计[J]. 科技创新导报, 2013(14): 38-39.  
YUAN Yao, WANG Zheng, ZHANG Longbin, et al. Design of vulnerability analysis system for distribution network based on cloud computing[J]. Science and Technology innovation Herald, 2013(14): 38-39.
- [21] 许苑, 王科, 陈波. 含分布式电源的配电网风险评估技术[J]. 电力系统及其自动化学报, 2013, 25(4): 117-121.  
XU Yuan, WANG Ke, CHEN Bo. Reliability and risk assessment techniques for distribution networks with distributed generations[J]. Proceedings of the CSU-EPSSA, 2013, 25(4): 117-121.
- [22] 刘波, 邱晓燕. 主动配电网储能优化规划[J]. 仪器仪表学报, 2016, 17(5): 1180-1186.  
LIU Bo, QIU Xiaoyan. Optimized energy storage planning of active distribution network[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 17(5): 1180-1186.
- [23] 王涛, 高成彬, 顾雪平, 等. 基于功率介数的电网关键环节辨识[J]. 电网技术, 2014, 38(7): 1907-1913.  
WANG Tao, GAO Chengbin, GU Xueping, et al. Power betweenness based identification of power grid critical links[J]. Power System Technology, 2014, 38(7): 1907-1913.
- [24] 王涛云, 马宏忠, 崔杨柳, 等. 基于可拓分析和熵值法的 GIS 状态评估[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(8): 115-120.  
WANG Taoyun, MA Hongzhong, CUI Yangliu, et al. Condition evaluation of gas insulated switchgear based on extension analysis and entropy method[J]. Power System Protection and Control, 2016, 44(8): 115-120.
- [25] 侯宇翔, 彭敏放, 朱亮, 等. 考虑联络线转供及孤岛划分的配电网风险评估[J]. 电力自动化设备, 2017, 37(10): 79-85.  
HOU Yuxiang, PENG Minfang, ZHU Liang, et al. Distribution network risk assessment considering connection lines transfer and islanding[J]. Electric Power Automation Equipment, 2017, 37(10): 79-85.

收稿日期: 2018-01-17; 修回日期: 2018-06-26

作者简介:

张家美(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为智能配电网、电力系统规划与调度; E-mail: 850861772@qq.com

黎灿兵(1979—), 男, 通信作者, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为电力系统规划与调度、电网分析与控制、电力系统综合节能; E-mail: licanbing@qq.com

彭敏放(1964—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为智能配电网、复杂电网络分析综合与诊断、智能信息处理。E-mail: pengminfang@hnu.edu.cn

(编辑 魏小丽)