

DOI: 10.7667/PSPC151337

# 基于短路容量的含大规模新能源接入的 电网状态脆弱性评估方法研究

丁少倩<sup>1</sup>, 林涛<sup>1</sup>, 翟学<sup>1</sup>, 徐遐龄<sup>2</sup>, 毕如玉<sup>1</sup>, 秦晓菁<sup>1</sup>

(1. 武汉大学电气工程学院, 湖北 武汉 430072; 2. 华中电力调控分中心, 湖北 武汉 430077)

**摘要:** 为了准确分析大规模新能源接入电网后负荷节点的运行特性, 根据戴维南等值理论, 将大规模新能源接入后的电网络等值为3节点系统。在该等值系统的基础上建立了基于短路容量的状态脆弱性评估模型及指标, 使状态脆弱性评估体系更完善。在计算所得的状态脆弱性指标的基础上, 采用PAM聚类算法和Homogeneity-Separation(HS)评价指标来自动聚类分级后, 辨识出系统的脆弱节点。基于该方法, 对改造的IEEE39节点算例进行了仿真分析。通过与传统的电压裕度指标评估结果比较, 仿真结果表明, 利用短路容量可以准确评估负荷节点的状态脆弱性; 且应用PAM聚类算法进行薄弱节点辨识方法的可行性及适用性, 具有在线评估的应用前景。

**关键词:** 电力系统; 状态脆弱性; 短路容量; 脆弱性评估指标; 聚类算法; 大规模新能源

## Research on state vulnerability assessment method of grid with large scale new energy sources based on short-circuit capability

DING Shaoqian<sup>1</sup>, LIN Tao<sup>1</sup>, ZHAI Xue<sup>1</sup>, XU Xialing<sup>2</sup>, BI Ruyu<sup>1</sup>, QIN Xiaojing<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. Central China Electric Power Dispatching and Communication Center, Wuhan 430077, China)

**Abstract:** In order to accurately analyze the running features of load nodes with large-scale new energy sources access to the grid, according to the Thevenin equivalent theory, the electric network system including large-scale new energy sources can be equivalent to 3 nodes. On the basis of the equivalent system, the state vulnerability assessment method and index based on short-circuit capability for load nodes are built up, which makes the system of state vulnerability assessment more perfect. Based on the results of state vulnerability index, the PAM clustering algorithm and Homogeneity-Separation (HS) index are used to find out the nodes which need more attention. In addition, the improved IEEE-39 node system is simulated and analyzed. The result is compared with that of traditional voltage margin index assessment, simulation shows the effectiveness of this state vulnerability assessment method based on short-circuit capability and the rationality of using the PAM clustering algorithm to identify weak nodes, which have the application of on-line prospect.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51177111).

**Key words:** power system; state vulnerability; short-circuit capacity; vulnerability assessment; clustering algorithm; large-scale new energy

## 0 引言

电力系统状态脆弱性是目前的研究热点之一<sup>[1-4]</sup>, 它是指电网受到扰动或者故障之后, 状态变量发生

的变化以及向临界值逼近的特点, 从运行状态角度反映抵抗连锁故障或连锁扰动的能力<sup>[5]</sup>, 因此, 科学、有效地评价当前系统的脆弱特性, 辨识电网存在的潜在危险, 这不但可以对可能存在的薄弱环节及时提出合理有效的改进措施, 而且可为电网的安全运行及早期预警提供有价值的参考。

近年来, 新能源发电的迅猛发展, 大规模清洁

**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(51177111); 太阳能高效利用湖北省协同创新中心重大专项(HBSZD2014003)

能源发电系统接入负荷中心<sup>[6-8]</sup>, 其功率输出的间歇性、随机性导致大面积停电事故发生的概率大大增加, 充分暴露了大规模新能源发电系统接入负荷中心后电网的脆弱性。这是由于与同步发电机相比, 在同样的电网扰动条件下, 风电场和光伏电站与同步发电机相比对接入负荷节点电压的支撑能力较弱, 其输出功率也会受到影响; 当电压跌落较为严重时, 可能导致风电场和光伏电站脱网进而造成对电网的连锁扰动/故障, 使得大规模新能源接入后的负荷节点的状态脆弱性值得研究。

针对状态脆弱性的研究方法主要裕度法、灵敏度法、能量函数法以及基于概率论和风险理论的评估分析方法。文献[9-11]采用连续潮流法来求解状态脆弱性中的临界点, 通过比较运行点与临界点的裕度指标来评估节点的状态脆弱性, 但其收敛性难以保证。文献[12]采用灵敏度法分析相关扰动下, 电压稳定负荷裕度对系统变量的灵敏度来评估系统的电压脆弱性; 文献[13-15]从能量函数法的角度出发, 分析扰动后制约系统暂态稳定性的最脆弱的支路和割集, 辨识网络中潜在的薄弱环节; 文献[16-17]用基于概率论和风险理论的电压风险指标, 从系统不确定性角度来定量评估故障后全网电压的脆弱性。

本文针对复杂电网, 提出了基于短路容量的状态脆弱性评估方法及指标, 即通过比较系统实际提供的负荷节点短路容量和保持电压稳定的最小短路容量来评估脆弱性的短路容量指标评估负荷节点的状态脆弱性, 考虑了大规模新能源接入电网的情况, 使状态脆弱性评估体系更完善。同时, 针对脆弱性指标只是一种相对性指标, 辨识脆弱节点的阈值难以确定等问题, 从状态脆弱性的角度出发, 采用PAM聚类算法和Homogeneity-Separation(HS)评价指标来自动聚类分级后, 辨识出系统中的脆弱节点, 为复杂电网的以及早期预警运行提供决策依据。

## 1 基于短路容量的负荷节点状态脆弱性评估方法及指标

短路容量<sup>[18]</sup>是节点电压强度的标志, 反映该节点的电压稳定性以及带负荷的能力。在有新能源接入的情况下, 本文引入短路容量的概念, 采用基于短路容量的状态脆弱性研究方法, 即通过比较系统实际提供的负荷节点短路容量和保持电压稳定的最小短路容量来评估负荷节点的状态脆弱性。

### 1.1 负荷节点状态脆弱性评估指标

基于计算或观测系统运行所得的潮流数据对负荷节点进行戴维南等值, 除该节点保留外, 系统的

其余部分用电压源和阻抗代替, 等效后的电网模型为2节点系统<sup>[19]</sup>。而如果所观测节点包含新接入的电源时, 则等值后的电网络模型为图1所示的3节点系统。

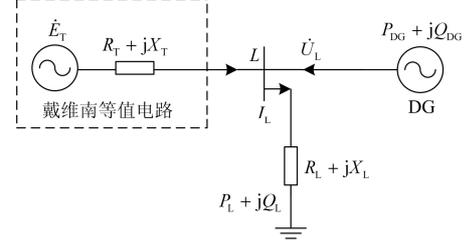


图1 电源接入后的电网戴维南等值系统

Fig. 1 Thevenin equivalent system after accessing the power

图1中, 戴维南等值电势为 $\dot{E}_T$ , 相角为0, 戴维南等值阻抗为 $Z_T = R_T + jX_T$ ,  $U_L$ 、 $\theta$ 为负荷节点L的电压幅值和相角; 负荷功率为 $\dot{S}_L = P_L + jQ_L$ , 新接入电源的有功和无功分别为 $P_{DG}$ 、 $Q_{DG}$ 。

由图1可知, 负荷节点的复功率可表示为

$$P_L + jQ_L = \dot{U}_L \frac{\dot{E}_T^* - \dot{U}_L^*}{R_T - jX_T} + (P_{DG} + jQ_{DG}) = (U_L \cos \theta + jU_L \sin \theta) \cdot \left( \frac{E_T - U_L \cos \theta + jU_L \sin \theta}{R_T - jX_T} \right) + (P_{DG} + jQ_{DG}) \quad (1)$$

可得负荷有功功率及无功功率表达式为

$$P_L = \frac{U_L E_T (R_T \cos \theta - X_T \sin \theta) - U_L^2 R_T}{R_T^2 + X_T^2} + P_{DG} \quad (2)$$

$$Q_L = \frac{U_L E_T (R_T \sin \theta + X_T \cos \theta) - U_L^2 X_T}{R_T^2 + X_T^2} + Q_{DG} \quad (3)$$

在式(2)和式(3)中消去 $\theta$ , 得到:

$$\left( (P_L - P_{DG}) + \frac{U_L^2 R_T}{R_T^2 + X_T^2} \right)^2 + \left( (Q_L - Q_{DG}) + \frac{U_L^2 X_T}{R_T^2 + X_T^2} \right)^2 = \frac{U_L^2 E_T^2}{R_T^2 + X_T^2}$$

通过对上式进行简化, 得到:

$$(U_L^2)^2 + (2(P_L - P_{DG})R_T + 2(Q_L - Q_{DG})X_T - E_T^2)U_L^2 + Z_T^2 \left( (P_L - P_{DG})^2 + (Q_L - Q_{DG})^2 \right) = 0 \quad (4)$$

式(4)为一个一元二次方程, 求解得到:

$$V_{crit} = \left[ \pm \sqrt{\frac{E_T^2/2 - (P_L - P_{DG})R_T - (Q_L - Q_{DG})X_T}{\left( (P_L - P_{DG})R_T + (Q_L - Q_{DG})X_T - E_T^2/2 \right)^2}} \right]^{1/2} \sqrt{-Z_T^2 \left( (P_L - P_{DG})^2 + (Q_L - Q_{DG})^2 \right)} \quad (5)$$

由于在稳定性临界点时, 电压存在一个解, 故

$$\begin{aligned} & ((P_L - P_{DG})R_T + (Q_L - Q_{DG})X_T - E_T^2/2)^2 - \\ & Z_T^2((P_L - P_{DG})^2 + (Q_L - Q_{DG})^2) = 0 \end{aligned} \quad (6)$$

根据式(5)得负荷节点临界电压模值。

$$V'_{cr1} = \sqrt{E_T^2/2 - Z_T S' \cos(\theta - \varphi'_L)} \quad (7)$$

式中:  $S' = \sqrt{(P_L - P_{DG})^2 + (Q_L - Q_{DG})^2}$ ;  $\varphi'_L = \arctan \frac{(Q_L - Q_{DG})}{(P_L - P_{DG})}$ 。

根据文献[18]中电路方程求导, 可以得到拐点处的临界电压模值。

$$V_{cr2} = \frac{E_T}{\sqrt{2(1 + \cos(\varphi_T - \varphi'_L))}} \quad (8)$$

式中:  $E_T$  为戴维南等值电势;  $\varphi_T$  为戴维南等值阻抗角。

联立式(7)及式(8), 根据短路容量的定义<sup>[18]</sup>, 可求得:

$$S_{SC-min} = 2\sqrt{(P_L - P_{DG})^2 + (Q_L - Q_{DG})^2} \cdot [1 + \cos(\varphi_T - \varphi'_L)] \quad (9)$$

根据电压稳定理论, 可定义负荷所需最小短路容量  $S_{SC-min}$  和系统提供的短路容量的  $S_{SC}$  的比值为负荷节点的状态脆弱性指标:

$$\omega_{ri} = \frac{S_{SC-min}}{S_{SC}} \quad (10)$$

指标  $\omega_{ri}$  计及了系统侧、负荷侧因素及新接入的电源对节点状态脆弱性的影响。为了使状态脆弱性的指标更加清晰了, 需要将上述指标归一化, 即

$$\tilde{\omega}_{ri} = \frac{\omega_{ri} - \omega_{ri\_min}}{\omega_{ri\_max} - \omega_{ri\_min}} \quad (11)$$

式中:  $\omega_{ri\_max}$ 、 $\omega_{ri\_min}$  分别为所有节点负荷状态脆弱性指标的最大值与最小值;  $\tilde{\omega}_{ri}$  为归一化之后节点  $i$  的状态脆弱性指标。

由式(11)可知, 有以下结论:

(1) 负荷节点的经归一化后的状态脆弱性指标  $\tilde{\omega}_{ri}$  都介于 0 和 1 之间, 即  $0 < \tilde{\omega}_{ri} \leq 1$ 。

(2) 在当前运行状态下, 当  $\tilde{\omega}_{ri}$  越接近于 1, 代表系统提供的短路容量的  $S_{SC}$  越接近于负荷所需最小短路容量  $S_{SC-min}$ , 表明电压稳定裕度越小, 该负荷节点越脆弱; 反之,  $\tilde{\omega}_{ri}$  越小, 表明该负荷节点运行状态越稳定。

## 1.2 系统侧提供短路容量的计算方法

采用两点法来得到图 1 中系统侧部分的戴维南等值电路参数<sup>[20]</sup>。

运行点的数据反映了电网的运行状况, 而选取领域点的目的是为了计算戴维南等值参数。按照一定的迁移规律, 只改变被观察负荷节点处的有功功率和无功功率大小, 严格保持电网其他节点的功率以及系统的运行方式、拓扑结构不变, 则可得被观察负荷节点处的运行领域点。为避免出现“0/0 模式”的数据漂移情况, 因此, 应预先设定的门槛值<sup>[21]</sup>, 使领域点与运行点的运行数据之差大于这个门槛值。

对于负荷节点  $L$  处的电压和电流, 取初始运行点与邻域点两个点的数据, 运行点及其邻域点的节点电压和电流分别以  $V_0 \angle \varphi_{V0}$ 、 $I_0 \angle \varphi_{I0}$  和  $V_1 \angle \varphi_{V1}$ 、 $I_1 \angle \varphi_{I1}$  来表示。假定从运行点到邻域点戴维南参数保持不变, 则根据电路原理:

$$\begin{cases} E_T e^{j\varphi_T} = I_0 Z_T e^{j(\varphi_{I0} + \varphi_T)} + V_0 e^{j\varphi_{V0}} \\ E_T e^{j\varphi_T} = I_1 Z_T e^{j(\varphi_{I1} + \varphi_T)} + V_1 e^{j\varphi_{V1}} \end{cases} \quad (12)$$

进行简化并计算后, 可得到戴维南等值阻抗模、和戴维南等值电势等戴维南网络的参数。其中, 戴维南等值阻抗模:

$$Z_T = \frac{V_1 \cos \varphi_{V1} - V_0 \cos \varphi_{V0}}{\beta \cos \varphi_D - \alpha \sin \varphi_D} \quad (13)$$

戴维南等值电势为

$$E_T = I_0 \sqrt{(R_T + R_L)^2 + (X_T + X_L)^2} \quad (14)$$

由文献[18]可计算得出系统提供的短路容量。对于实际系统, 运行点及其邻域点的节点电压和负荷电流、功率因数角可以通过测量及其计算得出。

## 2 基于 PAM 聚类算法的脆弱节点自动识别

目前脆弱性理论的研究中普遍存在的一个不足之处在于: 脆弱性指标只是表示相对大小, 虽然给出了脆弱性量化指标, 但仅仅从数值上难以辨识节点究竟是脆弱性指标是否越限; 并且没有相关文献涉及到脆弱性指标门槛值的求取, 只是由相关人员主观界定, 即目前没有有效的方法或门槛值来划分脆弱节点与非脆弱节点。

本文基于计算所得的负荷节点的状态脆弱性指标, 经观察可知, 脆弱节点和非脆弱节点在指标数值上有明显的分层, 故可根据脆弱性指标数值的间距大小来自适应辨识脆弱节点。文中采用 PAM 聚类算法, 以 Homogeneity-Separation(HS) 指标为有效性指标, 将电网中负荷节点的状态脆弱性指标结果

进行聚类分析, 可以得到脆弱节点等级最优划分方案。从而根据得到的PAM聚类算法聚类所得状态脆弱性指标最高的一类节点为脆弱节点, 可使脆弱节点得到重点监督, 以便采取相应的防护措施。

### 2.1 PAM 聚类算法的优点和不足

(1) 与 K-平均算法相比, PAM 算法比更健壮, 对“噪声”和孤立点数据不敏感, 能够处理不同类型的数据点。

(2) PAM 算法具有灵活、高效、较好的可伸缩性等特点。它对小的数据集非常有效, 对于中大型数据库中数据的聚类, 也可借助该方法进行聚类<sup>[22]</sup>。

(3) PAM 聚类算法需要用户预先指定聚类的个数, 但在大多数实际应用中, 最终的聚类个数是未知的, 这在一定程度上限制了该聚类算法的应用。

### 2.2 最佳聚类划分数 $k$ 的选取方法

PAM 聚类算法在脆弱节点等级划分方面的应用以确定的电网的脆弱节点等级划分数  $k$  为前提对脆弱性指标进行分块划分的。在实际应用中,  $k$  是难以界定的。本文以类内类间划分 Homogeneity-Separation(HS)评价指标<sup>[23]</sup>来确定脆弱节点等级划分的最佳分类数。

HS 指标分为同质性(Hom)指标与分离性(Sep)指标。其公式为

$$HS(k) = |Hom(k) - Sep(k)| \quad (15)$$

$$k_{opt} = \arg \max_{2 \leq k \leq n} \{HS(k)\} \quad (16)$$

式中:  $HS(k)$  表示数据集聚成  $k$  类时的 HS 指标值;

$k_{opt}$  表示最佳分类数。

其中

$$Hom(k) = \frac{2}{\sum_{i=1}^k n_i(n_i - 1)} \sum_{i=1}^k \sum_{\substack{t \in C_i \\ s < t}} R(s, t) \quad (17)$$

$$Sep(k) = \frac{1}{\sum_{i,j=1; i < j}^k n_i \times n_j} \sum_{\substack{i,j=1 \in C_i \\ i < j \in C_j}} R(s, t) \quad (18)$$

式中:  $k$  是数据集划分的聚类数目;  $n_i$  是指第  $i$  个聚类  $C_i$  的样本数目;  $s$  和  $t$  均表示某个样本;  $R(s, t)$  表示样本  $s$  与样本  $t$  之间的相似度。

评价的过程实为一优化过程, HS 指标值越大, 表明聚类质量越高。通过不断地进行计算直至 HS 指标最大值的出现, 其对应的聚类数作为脆弱性指标的最佳分类数  $k_{opt}$ 。

### 2.3 改进 PAM 聚类算法在脆弱节点辨识中的应用

本文假设电网中有  $n$  个负荷节点, 则状态脆弱性指标数据集可设为  $\tilde{\omega}_r = [\tilde{\omega}_{r1}, \tilde{\omega}_{r2}, \dots, \tilde{\omega}_{rm}]^T$ 。结合

PAM 聚类算法以及 HS 评价指标来确定最佳分类数。步骤归纳如下:

(1) 实验中脆弱节点等级划分方案  $k$  的范围为  $[2, k_{max}]$ , 根据普遍使用的经验规则  $k_{max} \leq \sqrt{n}$ , 取  $k_{max} = Int(\sqrt{n})$ 。

(2) 由计算所得的状态脆弱性指标数据集  $\tilde{\omega}_r$ , 从  $k_{min}$  循环至  $k_{max}$  调用 PAM 聚类算法, 以 HS 有效性指标为评价标准对每个聚类结果进行评估。

(3) 比较各个 HS 指标值, 取对应 HS 指标值最大的聚类数作为最佳分类数  $k_{opt}$ 。

(4) 输出最佳分类数、有效性指标值和聚类结果。

将状态脆弱性指标数据集  $\tilde{\omega}_r$  分为  $k_{opt}$  类时, 数值最高的一类状态脆弱性指标对应的负荷节点即为电网需要重点监督的脆弱节点。

## 3 仿真分析

该测试算例是在 IEEE39 节点系统的基础上改造得到的, 具体网架参数和负荷数据见文献[19]。在改造后的测试算例中, 31 节点设为平衡节点, 其他参数不变。为研究大规模系能源接入负荷节点后的电网的状态脆弱性, 假设有一个  $P_{DG}=1.2$ ,  $Q_{DG}=0.4$  (均为标么值) 的大规模新能源系统通过变压器连接到节点 7。

### 3.1 基于短路容量的负荷节点状态脆弱性分析

基于短路容量的负荷节点状态脆弱性评估模型流程框图如图 2 所示。

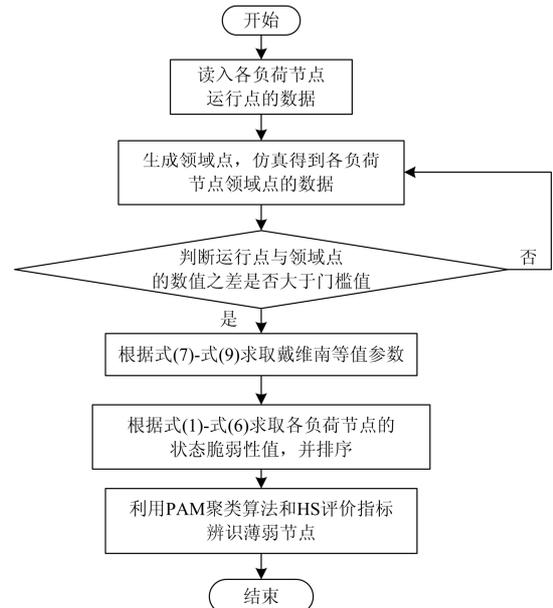


图 2 基于短路容量的状态脆弱性分析流程

Fig. 2 Analysis process of state vulnerability based on short-circuit capacity

首先通过仿真得到各负荷节点的运行点与领域的数据之后, 根据 1.2 节所述的各项解析公式, 可以求得戴维南等值参数(等值电势  $E_T$  和等值阻抗  $Z_T$ ), 如表 1 所示。

表 1 各负荷节点的戴维南等值结果

Table 1 Thevenin equivalent results of load nodes

| 负荷节点 | 等值电势 $E_T$ / p.u. | 等值阻抗 $Z_T$ / p.u. |
|------|-------------------|-------------------|
| 3    | 1.0011+j0.06945   | 0.0841+j0.8546    |
| 4    | 1.0454-j0.21435   | -0.0621+j0.7458   |
| 7    | 1.0313-j0.15741   | -0.1031+j0.8612   |
| 8    | 1.0156+j0.09845   | 0.0985+j0.7684    |
| 12   | 0.9967-j0.08251   | 0.0347+j0.3178    |
| 15   | 0.9978+j0.06124   | 0.0734+j0.3345    |
| 16   | 1.0103-j0.10983   | -0.0557+j0.5475   |
| 18   | 1.0015-j0.07854   | -0.0454+j0.6814   |
| 20   | 1.0513-j0.12738   | -0.1031+j0.9512   |
| 21   | 1.0017-j0.0678    | -0.0327+j0.6457   |
| 22   | 1.0021+j0.10245   | 0.0654+j0.8478    |
| 24   | 1.0496-j0.22745   | -0.1021+j0.8058   |
| 25   | 1.0312-j0.10875   | -0.0684+j0.8745   |
| 26   | 1.0120+j0.06124   | 0.0534+j0.9145    |
| 27   | 1.0025+j0.09744   | 0.0945+j0.6745    |
| 28   | 1.0123-j0.11423   | -0.0456+j0.8475   |
| 29   | 1.0019-j0.03735   | 0.0247+j0.5177    |

在电网的戴维南等值的基础上, 利用式(1)~式(11), 基于短路容量指标的来计算负荷节点的状态脆弱性, 如表 2 所示。

表 2 前 12 名基于短路容量负荷节点状态脆弱性指标排序

Table 2 Top 12 of state vulnerability load nodes based on the short-circuit capacity margin

| 排序 | 负荷节点 | $\omega_{ri}$ | $\tilde{\omega}_{ri}$ |
|----|------|---------------|-----------------------|
| 1  | 12   | 0.006749      | 1                     |
| 2  | 15   | 0.006119      | 0.9067                |
| 3  | 16   | 0.006022      | 0.8923                |
| 4  | 4    | 0.005625      | 0.8335                |
| 5  | 24   | 0.005523      | 0.7887                |
| 6  | 28   | 0.005240      | 0.7764                |
| 7  | 8    | 0.004823      | 0.7146                |
| 8  | 20   | 0.004270      | 0.6327                |
| 9  | 3    | 0.002842      | 0.4210                |
| 10 | 21   | 0.002638      | 0.3909                |
| 11 | 23   | 0.00239       | 0.3541                |
| 12 | 7    | 0.002159      | 0.3199                |

从表 1 中的数值分布可以看出, IEEE39 节点系统中, 节点 21、23、7 的归一化状态脆弱性指标为 0.3909、0.3541 和 0.3199, 要远小于其他节点。按照上文的理论分析来看, 其负荷节点的电压稳定域

度最高, 其负荷节点运行状态最好。

节点 12、节点 15 和节点 16 是的归一化状态脆弱性指标分别是 1、0.9067 和 0.8923, 相对较大。意味着所有的负荷节点中, 节点 12、15 及 16 的运行状态最为脆弱, 当系统出现扰动时, 最容易出现电压失稳。

### 3.2 与连续潮流计算结果比较

基于电力系统分析综合程序 PSASP6.28 软件, 设置算例中所有负荷节点功率同步增长, 基于电压裕度指标<sup>[5]</sup>计算分析负荷节点电压变化情况, 进一步分析该负荷节点带负荷的能力, 所得 PV 曲线如图 3 所示。

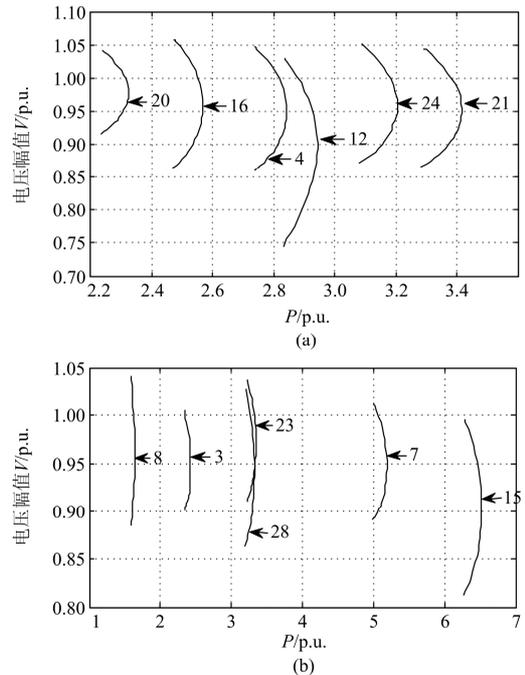


图 3 基于负荷同比增长的负荷节点 PV 曲线图

Fig. 3 Curve of PV of load nodes based on load increased

设负荷节点  $i$  的初始运行电压为  $V_i$ , 随着功率的增加, 电压跌落至极限点, 这时节点  $i$  的电压为  $V'_i$ , 基于电压裕度指标为

$$\lambda_i = \frac{V_i - V'_i}{V_i} = \frac{\Delta V_i}{V_i} \quad (19)$$

将指标  $\lambda_i$  做归一化处理, 得到归一化指标  $\tilde{\lambda}_i$ 。通过计算, 得到基于连续潮流法的电压裕度指标排序如表 3 所示。

其中节点 3 的状态脆弱性指标为 0.2875, 相对较小, 节点 12 的状态脆弱性指标为 1, 指标值最大。所得的具体仿真结果对比如图 4 所示。

表 3 前 12 名基于电压裕度指标负荷节点排序  
Table 3 Top 12 of the ordering of load nodes based on the voltage margin index

| 排序 | 负荷节点 | $\lambda_i$ | $\bar{\lambda}_i$ |
|----|------|-------------|-------------------|
| 1  | 12   | 11.4393     | 1.0000            |
| 2  | 15   | 9.3946      | 0.8213            |
| 3  | 16   | 9.2707      | 0.8104            |
| 4  | 4    | 7.9550      | 0.6954            |
| 5  | 24   | 7.2211      | 0.6313            |
| 6  | 21   | 6.1904      | 0.5412            |
| 7  | 28   | 5.8705      | 0.5132            |
| 8  | 8    | 5.3002      | 0.4633            |
| 9  | 23   | 4.9487      | 0.4326            |
| 10 | 7    | 4.5887      | 0.4011            |
| 11 | 20   | 4.3995      | 0.3846            |
| 12 | 3    | 3.2891      | 0.2875            |

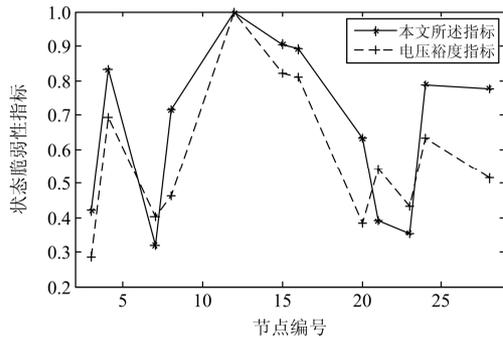


图 4 负荷节点排序结果对比

Fig. 4 Chart of comparison of the ordering results of load nodes

由图 4 可知, 本文提出的基于短路容量的状态脆弱性评估方法和基于文献[5]的电压裕度指标的排序结果基本一致, 验证了本文所提方法的有效性。

将表 2 与表 3 中排序对比, 两种方法的排序结果存在一定的变化: 基于短路容量的状态脆弱性指标排序中靠近发电机的负荷节点 21、23、7 的顺序相对于其在基于电压裕度指标的排序中的顺序明显靠后。

从电压稳定性出发, 对于电压稳定性较好的节点, 电压安全裕度越大, 其状态脆弱性指标越小, 导致其在脆弱性排序将越靠后。节点 21、23、7 所带负荷较轻, 且紧靠发电机, 无功功率充足, 电压稳定性比较好, 运行状态比较稳定。故与传统节点电压裕度指标相比, 本文所述评估指标所得结果更符合该系统的实际情况, 更客观地反映了系统节点的运行状态, 评估精度更高。

本文所述评估方法不但能有效对负荷节点的状态脆弱性进行评估, 而且计算简单, 便于在线运行, 为电网的安全运行提供有价值的参考数据。

### 3.3 改进 PAM 聚类算法在脆弱节点辨识中的应用

根据表 2 中基于短路容量的状态脆弱性指标的计算结果作为数据集  $\tilde{\omega}_r$ , 采用 PAM 聚类算法进行脆弱节点等级的划分, 等级划分数  $k$  的取值范围为 2~4, 不同划分方案情况下 HS 评价指标的计算结果如图 5 所示。

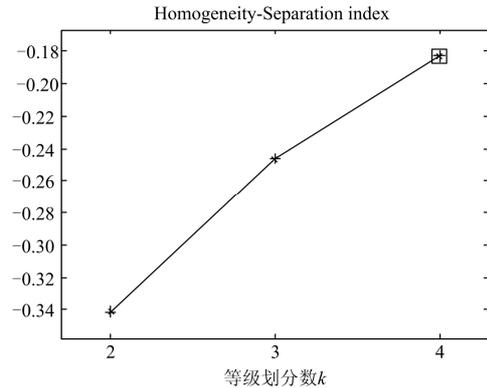


图 5 状态脆弱性指标聚类结果

Fig. 5 Condition of clustering results of state vulnerability indexes

结合图 5 中不同脆弱节点等级划分方案下的 HS 指标曲线图, 划分数为 4 时的 HS 指标值高于其他划分方案, 因此, 该脆弱节点等级划分方案选取划分数为 4 时的方案为最佳划分方案, 最终脆弱节点等级结果如表 4 所示。

表 4 聚类结果

Table 4 Curve of clustering results

|       | 等级  | 节点编号           |
|-------|-----|----------------|
| 脆弱节点  | I   | 12、15、16       |
|       | II  | 4、24、28、8、20   |
| 非脆弱节点 | III | 3、21、23、7      |
|       | IV  | 27、18、26、29、25 |

由表 4 可知, 节点 12、15 和 16 为脆弱节点等级最高的 I 级节点。结合表 2 观察可知, 与其他节点相比, I 级节点状态脆弱性指标最大, 且排名第 3 的节点 16 与排位第 4 的节点 4 的状态脆弱性指标值相差 0.0588, 指标数值之间差距较大, 出现数据断层, 说明算法结果与观测相吻合, 故 I 级节点为需要加强监视的脆弱节点。

通过采用改进的 PAM 聚类算法将 17 个负荷节点的状态脆弱性指标合理地划分为若干个脆弱节点等级, 脆弱节点等级最高的负荷节点相对较为脆弱, 其他节点运行状态相对稳定。鉴于此特性, 重点对各个负荷节点进行脆弱节点等级划分是有效辨识薄弱负荷节点的有效方法。这些脆弱性等级的脆弱节点对系统的规划和运行有一定的指导作用, 可为相

关工作人员提供直观的决策支持。

### 4 结论

利用戴维南等值理论，定义了基于短路容量的电网状态脆弱性评估模型及指标，同时考虑了大规模新能源接入负荷节点的情况，使状态脆弱性评估体系更完善；然后将改进的 PAM 聚类算法应用到脆弱节点等级的划分中，建立了基于改进 PAM 聚类算法的脆弱节点划分的详细流程。结合 IEEE39 节点算例的仿真，结果表明：

(1) 本文提出的基于短路容量的状态脆弱性指标提高了节点状态脆弱性的评估精度，能准确地对电网的状态脆弱性进行评估；

(2) 通过算例验证了改进的 PAM 聚类算法和 HS 有效性指标可有效辨识电网中的脆弱节点，验证了评估方法的有效性及其优越性。

(3) 基于短路容量的电网状态脆弱性评估方法，概念清晰，无需大量复杂计算，不仅适用于离线应用，并且可结合 PMU / WAMS 技术应用于大型输电电网的脆弱性的在线监测。这更有利于电网规划和调度运行，可为相关电力工作者提供技术支撑，有助于深入开展对电网进行脆弱性评估的探索研究。

### 致谢

感谢国家自然科学基金委员会通过面上项目(51177111)和太阳能高效利用湖北省协同创新中心给予本研究的支持和帮助。

### 参考文献

[1] 林涛, 范杏元, 徐遐龄. 电力系统脆弱性评估方法研究综述[J]. 电力科学与技术学报, 2010, 25(4): 20-24.  
LIN Tao, FAN Xingyuan, XU Xialing. Summary of power system vulnerability assessment methods[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2010, 25(4): 20-24.

[2] 曹一家, 陈晓刚, 孙可. 基于复杂网络理论的大型电力系统脆弱线路辨识[J]. 电力自动化设备, 2006, 26(12): 1-6.  
CAO Yijia, CHEN Xiaogang, SUN Ke. Identification of vulnerability lines of large interconnected power system based on complex networks theory[J]. Electric Power Automation Equipment, 2006, 26(12): 1-6.

[3] 刘小丽, 毛弋, 梁杉. 基于综合介数的电网脆弱线路辨识[J]. 电力系统保护与控制, 2016, 44(2): 116-121.  
LIU Xiaoli, MAO Yi, LIANG Shan. Identification of vulnerable lines in power grid based on comprehensive betweenness index[J]. Power System Protection and

Control, 2016, 44(2): 116-121.

[4] 李艳卿, 李华强, 李迁. 基于支路综合脆弱性的电网抗毁性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(7): 80-85.  
LI Yanqing, LI Huaqiang, LI Qian. Power system invulnerability assessment based on branch comprehensive vulnerability[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(7): 80-85.

[5] 谢春瑰, 方菲, 吕项羽, 等. 电网脆弱性评估方法研究[J]. 电网与清洁能源, 2013, 19(5): 35-38.  
XIE Chungui, FANG Fei, LÜ Xiangyu, et al. Research on power grid vulnerability assessment methods[J]. Power System and Clean Energy, 2013, 19(5): 35-38.

[6] 类延民, 李华强, 林茂君. 含风电场的电力系统节点电压脆弱性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(16): 58-62.  
LEI Yanmin, LI Huaqiang, LIN Maojun. Assessment of node voltage vulnerability of power system with wind farm[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(16): 58-62.

[7] JANAKA B E, LEE H, WU X G. Dynamic modeling of doubly fed induction generator wind turbines[J]. IEEE Transactions on Power Systems, 2003, 18(2): 803-809.

[8] 申永涛, 刘宗歧, 刘文霞. 风电接入对电力系统节点脆弱性的影响分析[J]. 现代电力, 2013, 30(6): 1-5.  
SHEN Yongtao, LIU Zhongqi, LIU Wenxia. Impact of wind power integration on power system node vulnerability[J]. Modern Electric Power, 2013, 30(6): 1-5.

[9] 安俊俊. 基于改进连续潮流法的静态电压稳定分析的研究[D]. 郑州: 郑州大学, 2014.  
AN Junjun. The static voltage analysis research based on the improved continuous power flow[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2014.

[10] 赵晋泉, 王毅. 一种模拟负荷动态恢复特性的连续潮流模型[J]. 中国电机工程学报, 2009, 29(7): 59-63.  
ZHAO Jinquan, WANG Yi. A novel continuation power flow model for simulating time-domain dynamic load restoration[J]. Proceedings of the CSEE, 2009, 29(7): 59-63.

[11] 王成山, 魏炜. 一种改进的步长控制连续性潮流计算方法[J]. 电工技术学报, 2004, 19(2): 58-63.  
WANG Chengshan, WEI Wei. An improved continuation method with controlled step size[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2004, 19(2): 58-63.

[12] ZARATE L A L, CASTRO C A. Fast computation of security margins to voltage collapse based on sensitivity analysis[J]. IEE Proceedings of Generation, Transmission and Distribution, 2006, 153(1): 35-43.

- [13] 孔祥玉, 赵帅, 房大中. 能量函数方法在大电网追加紧急控制中的应用[J]. 电力系统及其自动化学报, 2014, 36(1): 8-12.  
KONG Xiangyu, ZHAO Shuai, FANG Dazhong. Append emergency control strategy based on energy function method in large power system[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2014, 36(1): 8-12.
- [14] 黄燕, 李华强, 黄涛. 基于复杂网络和暂态能量函数的支路暂态脆弱性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(20): 69-74.  
HUANG Yan, LI Huaqiang, HUANG Tao. Branch transient vulnerability assessment based on the complex network and transient energy function[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(20): 69-74.
- [15] 李迁, 李华强, 黄昭蒙. 基于暂态能量函数混合合法的电力系统脆弱性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(20): 1-6.  
LI Qian, LI Huaqiang, HUANG Zhaomeng. Power system vulnerability assessment based on transient energy hybrid method[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(20): 1-6.
- [16] 吴文可, 文福拴, 薛禹胜. 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.  
WU Wenke, WEN Fushuan, XUE Yusheng. Cascading failure prediction of power system based on Markov chain[J]. Automation of Electric Power Systems, 2013, 37(5): 29-37.
- [17] 张海翔, 吕飞鹏. 基于连锁故障序列分析的电网脆弱性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(17): 32-38.  
ZHANG Haixiang, LÜ Feipeng. Vulnerability evaluation of power grid based on the analysis of cascading failure sequence[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(17): 32-38.
- [18] 邓桂平, 孙元章, 徐箭. 一种考虑母线短路容量的电压稳定解析方法[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(8): 15-19.  
DENG Guiping, SUN Yuanzhang, XU Jian. A new voltage stability analysis method by considering short circuit capacity[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(8): 15-19.
- [19] 赵晋泉, 杨友栋, 高宗和. 基于局部相量测量的电压稳定评估方法[J]. 电力系统自动化, 2010, 34(20): 1-6.  
ZHAO Jinquan, YANG Youdong, GAO Zonghe. A review on on-line voltage stability monitoring indices and methods based on local phasor measurement[J]. Automation of Electric Power Systems, 2010, 34(20): 1-6.
- [20] 李连伟, 吴政球, 钟浩, 等. 基于节点戴维南等值的静态电压稳定裕度快速求解[J]. 中国电机工程学报, 2010, 20(4): 79-83.  
LI Lianwei, WU Zhengqiu, ZHONG Hao, et al. Fast estimation method for steady-state voltage stability margin based on node Thevenin equivalent[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 20(4): 79-83.
- [21] 王爱民. 现代电网中戴维南等值方法探讨[J]. 内蒙古电力大学, 2009, 27(增刊 2): 119-121.  
WANG Aimin. Analysis on the Thevenin equivalent parameters for power systems[J]. Inner Mongolia Electric Power, 2009, 27(S2): 119-121.
- [22] 陈志强, 刘钊, 张建辉, 等. 聚类分析中 PAM 算法的分析与实现[J]. 计算机与现代化, 2003(9): 1-6.  
CHEN Zhiqiang, LIU Zhao, ZHANG Jianhui, et al. Analysis and implementation of PAM algorithm[J]. Computer and Modernization, 2003(9): 1-6.
- [23] 王开军, 李健, 张军英. 聚类分析中类数估计方法的实验比较[J]. 计算机工程, 2007, 34(9): 198-202.  
WANG Kaijun, LI Jian, ZHANG Junying. Experimental comparison of clusters number estimation for cluster analysis[J]. Computer Engineering, 2007, 34(9): 198-202.
- [24] 姚玉斌, 朱发国, 陈学允. 考虑功频特性的连续潮流法的静态电压稳定分析[J]. 电力系统自动化, 1999, 23(15): 37-39.  
YAO Yubin, ZHU Faguo, CHEN Xueyun. Static voltage stability analysis method considering frequency characteristics based on continuation power flow method[J]. Automation of Electric Power Systems, 1999, 23(15): 37-39.

收稿日期: 2015-08-01; 修回日期: 2015-11-04

作者简介:

丁少倩(1988-), 女, 通信作者, 硕士, 研究方向为电力系统运行与控制、新能源发电与智能电网; E-mail: dingshaoqian1@163.com

林涛(1969-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为电力系统运行与控制、电力系统继电保护、新能源发电与智能电网、电能质量分析与控制。E-mail: nicolanan@126.com

(编辑 张爱琴)