

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20221819

基于 VIKOR 法和复杂网络理论的电网结构脆弱性综合评价

江 欢¹, 武家辉¹, 萨妮耶·麦合木提¹, 张 强², 姚 磊², 寇 洋¹

(1. 新疆大学可再生能源发电与并网控制教育部工程研究中心, 新疆 乌鲁木齐 830047;
2. 国网新疆综合能源服务有限公司, 新疆 乌鲁木齐 830011)

摘要: 针对电力系统结构脆弱性问题, 利用多指标评价优势, 结合 Pajek 工具识别电网关键节点。首先, 基于复杂网络理论, 综合考虑电力网络的拓扑特性, 建立电力系统结构脆弱性综合评价指标集。其次, 在评价方法上, 采用模糊综合评价法和 CRITIC 法分别计算各项评价指标的主、客观权重。最后, 提出 VIKOR 综合评价方法来计算各节点权重值并得到重要度排序结果。以 IEEE-118 系统为例并与其他评价法对比分析, 结果表明所提方法有效。

关键词: 复杂网络理论; Pajek; 关键节点识别; CRITIC; VIKOR

中图分类号: TM744 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)03-0216-05

1 引言

大量事实证明, 当电力系统某些脆弱节点发生故障时会引发连锁反应, 严重时将导致系统大规模停电。因此, 若能有效辨识这些脆弱节点, 提前防御, 就能提高电力系统鲁棒性。复杂网络理论作为分析大型复杂系统有力的工具被应用于研究电网结构脆弱性。周依希等^[1]选用节点度、凝聚度和电气介数指标来分析结构脆弱性; 魏刚^[2]则从重要节点故障时对电网结构稳定性影响的角度出发, 定义了介度熵指标反映电网局部与全局的结构特性。在评价方法上, 袁博等^[3]提出超文本主题搜索 HITS 算法分析电网拓扑结构的脆弱性; 为分析复杂网络节点的重要度, 尹梦梦等^[4]提出一种基于熵权法和 VIKOR 的新方法, 通过指标的遗憾值来优化被评价方案的客观赋权。由此可见, 现有研究大多从节点重要性指标结合单一主、客观评价法入手分析电网结构脆弱性, 较少考虑现代电力系统复杂化程度高、规模大的特点, 且主、客观评价法之间偏差较大, 评价结果具有片面性。为此, 本文通过 Pajek 结合电网结构和脆弱性综合指标集绘制可视化拓扑图, 并计

算各指标基础数据, 选用融合了主观偏好和客观实际的 VIKOR 法计算节点重要度值排序。最后, 以 IEEE-118 系统为例, 验证了该方法的合理性。

2 电力系统脆弱性分析

2.1 复杂网络理论

复杂网络最典型的特点是网络结构错综复杂, 分析困难。Pajek 根据各节点的特性将网络分解成较小的网络再进行分析, 能反映出节点间的连接关系, 实现电网结构的可视化。

用无向图 $G = (V, E)$ 表示复杂网络。其中 $V = \{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 为节点集合, $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 为与节点相连接边的集合, 共有 n 个节点和 m 条边。用邻接矩阵 $L = [L_{ij}]_{n \times m}$ 来描述图 G , 即:

$$L_{ij} = \begin{cases} 1 & (v_i, v_j) \in E; i \neq j \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (1)$$

2.2 电网结构脆弱性评价指标

2.2.1 系统显著性评价指标

(1) 度中心性指标。度^[5]指复杂网络中与节点相连接的边数。可用 $C_d^k(v_i)$ ($C_d^k(v_i) \in [0, 1]$), 且 $\sum_{i=1}^n C_d^k(v_i) = 1$, 其值越大则节点越重

收稿日期: 2022-09-01, 修回日期: 2022-10-19

基金项目: 国家自然科学基金项目(52167016); 新疆维吾尔自治区自然科学基金项目(2020D01C068)

作者简介: 江欢(1997-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统脆弱性分析, E-mail: 1327372254@qq.com

通讯作者: 武家辉(1988-), 女, 博士、副教授、博导, 研究方向为风电并网系统稳定性研究、复杂能源系统稳定与控制, E-mail: 1284892085@qq.com

要)表示度中心性指标:

$$C_d^k(v_i) = k(v_i) / \sum_{j=1}^n k(v_j) \quad (2)$$

式中, $k(v_i)$ 为节点度值。

(2)接近中心性指标^[6]。接近度为 v_i 至复杂网络中其他节点最短路径之和的倒数。接近中心性指标 $C_c(i)$ ($C_c(i)$ 值越大则节点越重要)为:

$$C_c(i) = (N - 1) / \sum_{i \neq j} d_{ij} \quad j \neq i \quad (3)$$

式中, N 为总节点数; d_{ij} 为两节点 i 、 j 间最短的路径长度。

(3)介数中心性指标。介数中心性^[5] $C_b(v_i)$ 指经过 v_i 的最短路径数量 $B(v_i)$ 与所有最短路径总数 $B(G)$ 之比。计算公式为:

$$C_b(v_i) = B(v_i) / B(G) \quad (4)$$

则介数中心性指标 $C_b^k(i)$ ($C_b^k(i) \in [0, 1]$ 且 $\sum_{i=1}^n C_b^k(i) = 1$, 其值越大则节点越重要)可表示为:

$$C_b^k(i) = C_b(i) / \sum_{j=1}^n C_b(j) \quad (5)$$

(4)PageRank 指标。PageRank(P_{PR})^[7] 值反映网络中节点的脆弱性,与其相邻节点重要度及链接节点数量有关,其值越大,节点越重要。其计算公式为:

$$P_{PR}(v_i) = \frac{1-q}{N} + q \sum_{v_j \in M_{v_i}} \frac{P_{PR}(v_j)}{L(v_j)} \quad (6)$$

式中, q 为阻尼因子; M_{v_i} 为节点 v_i 的入链节点集; $L(v_j)$ 为节点 v_j 的链出节点数。

2.2.2 系统破坏性评价指标

(1)韧性度指标^[8]。韧性度指标 $T(Gv_i)$ 从对整个网络破坏范围的大小来反映节点对系统的影响,其计算公式为:

$$T(Gv_i) = [1 + m(Gv_i)] / [\omega(Gv_i)] \quad (7)$$

式中, $m(Gv_i)$ 为去掉 v_i 后剩余网络中最大分支的节点数; $\omega(Gv_i)$ 为连通分支总数。

(2)凝聚度指标^[9]。依次收缩网络中相应节点后,计算剩余网络的凝聚度 $\partial[G]$ 。计算公式为:

$$\partial[G] = \frac{1}{nl} = \frac{(n-1)}{\sum_{i \neq j \in V} D_{ij}} \quad (8)$$

式中, n 为节点数; l 为平均距离; D_{ij} 为网络中两节点间的最短距离。

定义网络凝聚度指标 $S(v_i)$ ($S(v_i)$ 值越大则该节点的重要程度越高)为:

$$S(v_i) = 1 - \partial[G] / \partial[Gv_i] \quad (9)$$

式中, Gv_i 为将节点 v_i 收缩后得到的网路。

3 VIKOR 综合评价模型

为分析电网结构脆弱性,从显著性和破坏性两个角度构建综合评估指标集,见图 1。

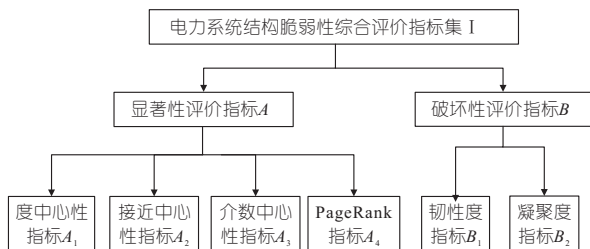


Fig. 1 System vulnerability comprehensive evaluation index set

3.1 模糊综合评价法

电力系统结构脆弱性的评价指标存在模糊性且难以定量描述的问题,因此采用模糊综合评价法^[10]来对系统进行主观分析。其主要步骤如下。

步骤 1 建立指标矩阵和评语集。假设共选取 M 个指标,指标矩阵可表示为 $U = \{U_1, U_2, \dots, U_M\}$ 。建立评语集 $V = \{V_1, V_2, \dots, V_N\}$, 即各评定等级集合。

步骤 2 建立因素的隶属程度的评判矩阵。在构造评语集后,量化每个因素,确定各等级的隶属度,得到模糊判断矩阵 R :

$$R = (r_{ij})_{N \times M} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1M} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2M} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r_{N1} & r_{N2} & \dots & r_{NM} \end{bmatrix} \quad (10)$$

式中, r_{ij} 为被评对象从 U_i 来看对 V_j 的隶属程度。

步骤 3 计算权重并分析模糊综合评价结果。将指标权重 ω 与模糊关系矩阵 R 结合,计算得模糊综合评价权重值 B :

$$B = \omega \times R = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (11)$$

3.2 CRITIC 客观评价法

为得到更客观、全面的赋权结果,选用 CRITIC 客观赋权法^[11]修正主观权重。计算权重前,因 B 类指标为逆向指标,故先将指标无量纲化得到评价矩阵。其中共有 x 个待选方案, M 个评价指标。CRITIC 法主要步骤如下。

步骤 1 指标归一化。归一化表达式为:

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij} - \min(a_j)}{\max(a_j) - \min(a_j)} \quad (12)$$

式中, a_{ij} 、 a'_{ij} 分别为归一化前后的指标值; $\min(a_j)$ 、 $\max(a_j)$ 分别为指标最小、最大值。

步骤 2 确定对比强度 S_j 、冲突性相关系数 ρ_{ij} :

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{x} \sum_{i=1}^x (a'_{ij} - \bar{a}_j)^2} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$\rho_{ij} = \frac{\sum (i - \bar{i})(j - \bar{j})}{\sqrt{\sum (i - \bar{i})^2 \sum (j - \bar{j})^2}} \quad (14)$$

式中, i, j 为两组数据; \bar{i}, \bar{j} 分别为指标 i, j 的均值。

步骤 3 确定各指标综合信息量 C_j :

$$C_j = S_j \sum_{i=1}^n (1 - \rho_{ij}) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

步骤 4 计算权重系数 ω_j :

$$\omega_j = C_j / \sum_{j=1}^n C_j \quad (16)$$

由式(15)可知, C_j 越大, 则指标 j 拥有的信息量越多, 权重值也越大。

3.3 VIKOR 综合评价方法

VIKOR 法是一种基于各方案评价值与理想解贴近度的多准则优化方法^[12]。通过最大化群体效用和最小化个体遗憾的方法对被评价方案进行折中排序。计算步骤如下。

步骤 1 计算正负理想解 X_i^+, X_i^- :

$$\begin{cases} X_i^+ = \max_j f_{ij} \\ X_i^- = \min_j f_{ij} \end{cases} \quad f_{ij} \in [0, 1] \quad (17)$$

式中, f_{ij} 为第 j 个评价事物在第 i 个指标上的标准值。

步骤 2 确定群体效益值 S_i 、个体遗憾值 R_i :

$$\begin{cases} S_i = \sum_{j=1}^n \frac{X_j^+ - X_{ij}}{X_j^+ - X_j^-} \\ R_i = \max_{1 \leq j \leq n} \frac{X_j^+ - X_{ij}}{X_j^+ - X_j^-} \end{cases} \quad (18)$$

式中, X_{ij} 为方案 j 在第 i 个指标上的指标值。

步骤 3 计算 VIKOR 指数 Q_i :

$$Q_i = \delta \frac{S_i - S_i^-}{S_i^* - S_i^-} + (1 - \delta) \frac{R_i - R_i^-}{R_i^* - R_i^-} \quad (19)$$

式中, δ 为决策系数, $\delta \in [0, 1], \delta > 0.5$ (或 $\delta < 0.5$) 表示依据最大化(或最小化)群体效用的决策机制来进行决策, $\delta = 0.5$ 表示采用均衡折中的方式进行决策; S_i^-, S_i^* 分别为最小、最大 S_i 值; R_i^-, R_i^* 分别为最小、最大 R_i 值。

4 算例分析

4.1 节点脆弱性评价指标分析

以 IEEE-118 系统为例分析电网结构脆弱性, 用 Pajek 绘制该系统网络图, 见图 2。

依据 Pajek 计算得到各节点度中心性、接近中心性和介数中心性的指标数据。再将式(7)~

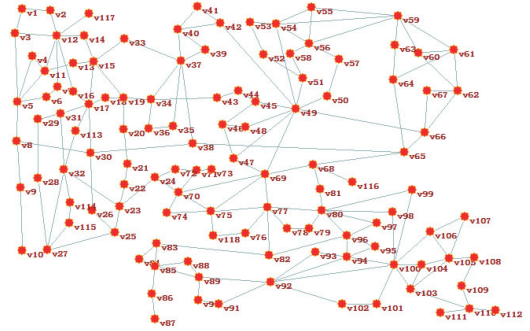


图 2 IEEE-118 节点系统拓扑模型

Fig. 2 IEEE-118 node system topology model

(9) 与 Pajek 相结合计算韧性度及凝聚度指标, 通过式(6)可得 P_{PR} 值。由于各指标间量纲和数量级的差异, 因此根据式(12)将指标标准化。最后各节点重要度值排序前 15 项见表 1。由表 1 可知, 节点 12、59、77、92 虽然度中心性相同, 但在其他指标排序中结果完全不同。例如节点 49, 在度中心性及 PageRank 指标中重要度排序第 1, 而在接近中心性及介数中心性中排名第 4, 在凝聚度中排名第 12。由此可见, 虽为同一节点, 但选取不同角度进行分析时会存在明显差异, 这说明在综合评价中选用多指标分析的必要性。

表 1 IEEE-118 系统节点重要度排序

Tab. 1 IEEE-118 System node importance ranking

排	度中心性	接近中心性	介数中心性	PageRank	韧性度	凝聚度						
序	节点重要度	节点重要度	节点重要度	节点重要度	节点重要度	节点重要度						
1	49	1.000	69	0.235	69	0.316	49	0.021	110	1.000	69	0.179
2	80	0.667	68	0.229	77	0.294	12	0.020	8	0.667	65	0.175
3	100	0.667	65	0.227	80	0.291	100	0.019	85	0.667	38	0.175
4	12	0.583	49	0.224	49	0.275	80	0.017	9	0.661	68	0.173
5	59	0.583	77	0.217	65	0.273	17	0.016	12	0.661	77	0.173
6	77	0.583	38	0.216	38	0.264	37	0.016	68	0.661	30	0.172
7	92	0.583	75	0.211	30	0.227	92	0.015	71	0.661	80	0.170
8	17	0.500	70	0.208	68	0.209	77	0.015	86	0.661	81	0.169
9	37	0.500	66	0.207	100	0.208	85	0.014	1	0.328	100	0.169
10	54	0.500	81	0.207	70	0.163	69	0.014	2	0.328	98	0.169
11	56	0.500	80	0.205	24	0.135	5	0.014	3	0.328	99	0.169
12	69	0.500	47	0.203	81	0.134	59	0.014	4	0.328	49	0.168
13	89	0.500	42	0.200	23	0.131	32	0.014	5	0.328	82	0.167
14	5	0.417	30	0.199	17	0.129	110	0.014	6	0.328	75	0.167
15	15	0.417	24	0.194	37	0.111	15	0.013	7	0.328	96	0.166

4.2 综合评价

为纠正传统评价方法客观性不足、优化结果偏差大的缺点, 采用主客观相结合的 VIKOR 综合评价法进行分析。在各指标权重的选取上认为 6 个指标同等重要。由分析和式(10)~(16)计算可得各指标的主、客观权重见图 3。由图 3 可知, 在该系统的拓扑结构中, 主观权重值最大的为节点 49。由图 2 可知, 该节点的位置处于系统中心, 有 9 条支路与它相连接, 因此该节点的重要程度最高。其次节点 80、69、77 的重要程度较高。

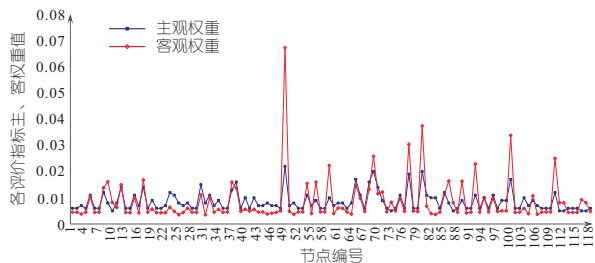


图 3 各评价指标主观权重图

Fig. 3 Subjective weight chart of each evaluation index

利用 VIKOR 法计算节点的综合权重。根据式(17)可得指标正、负理想解,结果见表 2。

表 2 正负理想解计算结果

Tab. 2 Calculation results of positive and negative ideal solutions

指标项	正理想解 X_i^+	负理想解 X_i^-
模糊综合评价	0.222	0.048
Critic 权重	0.520	0.027

通过式(18)、(19)可计算出 S_j 、 R_j 、 Q_j , 计算结果排序前 15 项见表 3。

表 3 S_j 、 R_j 、 Q_j 值

Tab. 3 S_j , R_j and Q_j

排序	节点	S_j	节点	R_j	节点	Q_j
1	49	0	49	0	49	0
2	80	0.295 4	80	0.233 7	80	0.402 5
3	77	0.368 7	100	0.261 6	100	0.478 1
4	69	0.394 2	77	0.288 3	77	0.498 3
5	100	0.397 2	69	0.324 5	69	0.552 2
6	65	0.567 7	110	0.331 1	110	0.653 8
7	68	0.595 5	92	0.347 6	92	0.688 8
8	38	0.611 0	59	0.352 1	59	0.711 1
9	110	0.620 7	17	0.395 2	65	0.728 1
10	30	0.641 7	89	0.399 6	17	0.740 3
11	17	0.644 1	56	0.401 9	68	0.754 5
12	92	0.657 5	37	0.402 0	37	0.756 0
13	12	0.658 5	54	0.405 4	38	0.756 6
14	37	0.662 0	9	0.407 4	12	0.764 1
15	70	0.672 4	12	0.410 0	54	0.786 1

由表 1、3 可知,在度中心性、PageRank 指标里排序前 15 的关键节点中有 12 个位于综合评价结果排序前 15 的节点中;在接近中心性、介数中心性、凝聚度指标中排序前 15 的关键节点中有 11 个位于综合评价结果排序前 15 的节点中。

为进一步验证所提方法的合理性,选取重要度排序前 15 的节点与其他方法结果做对比。在评估 IEEE-118 系统节点重要性时,方法 1 采用改进的 HITS(Hyperlink-Induced Topic Search)算法,方法 2 采用 EBT(电气介数)算法^[13],各方案排序结果见表 4。由表 4 可知,因识别关键节点的方法不同,会导致最终节点重要度排序的结果有差异。将本文方法分别与方法 1、2 对比,节

表 4 节点重要度结果对比

Tab. 4 Comparison of node importance results

排序	本文	方法 1	方法 2	排序	本文	方法 1	方法 2
1	49	80	65	9	65	65	77
2	80	89	68	10	17	12	69
3	100	69	80	11	68	25	17
4	77	49	38	12	37	26	37
5	69	59	30	13	38	77	23
6	110	100	81	14	12	17	70
7	92	66	100	15	54	37	96
8	59	92	49				

点重要度综合排序前 15 的节点中有 12 个与方法 1 结果相同,有 11 个与方法 2 结果相同。其中重要度排序前 3 的 49、80、100 节点在方法 1、2 排序结果前 15 的节点中均有出现。这进一步说明了重要节点识别结果的合理性。

4.3 基于综合评价法的灵敏度分析

灵敏度分析可用于分析决策参数在微小范围内波动是否会影响评估结果^[14]。若本文所得评价结果对指标权重灵敏度低,则表明评价结果稳定,鲁棒性好。因此,假设本文评价结果的指标权重呈现图 4 所示变化率,分析权重变化后的节点重要度排序,结果见图 4。由图 4 可知,当指标权重在一定范围内变化时,节点重要度排序不变,故本文所建立的电力系统脆弱性综合评价法鲁棒性较好。

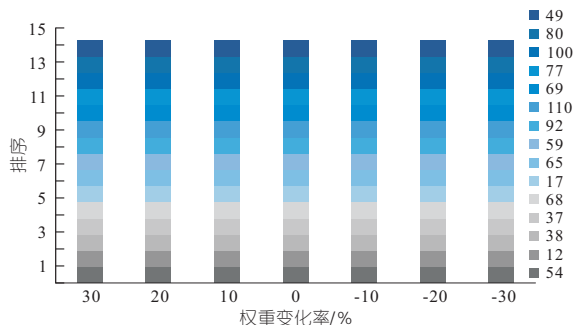


图 4 综合评价结果的灵敏度分析

Fig. 4 Sensitivity analysis of comprehensive evaluation results

5 结论

提出一种将 Pajek 和 VIKOR 法相结合的节点脆弱性排序新方法,从指标显著性和破坏性两方面入手构建脆弱性指标集,以 IEEE-118 系统为例,将所得结果与其他方法结果对比,验证了所提方法的有效性。

参考文献:

[1] 周依希, 李晓明, 瞿合祚, 等. 基于 AHP-灰色关联度的复杂电网节点综合脆弱性评估[J]. 电力系统保护与控制, 2018, 46(23): 86-93.

