

# 考虑RSR法的交直流混联电网结构脆弱性研究

彭寅章<sup>1</sup>,王琛<sup>2</sup>,南东亮<sup>1</sup>,肖超<sup>3</sup>,杨帅<sup>1</sup>

(1. 国网新疆电力有限公司电力科学研究院,新疆 乌鲁木齐 830013;

2. 国网新疆电力有限公司,新疆 乌鲁木齐 830011;

3. 国网河南省电力公司电力科学研究院,河南 郑州 450052)

**摘要:**交直流混联电网能够在较大范围内均衡电力系统运行时的潮流,有利于提升新能源大规模接入电网的接入容量及接入范围,是现代电网发展的重要趋势。为分析交直流混联系统的结构脆弱性,避免电网大停电事故的发生,提出一种基于秩和比(RSR)法的电网结构脆弱性分析方法。首先,基于复杂网络结构特性建立脆弱性指标集,其次选用RSR法结合主、客观评价法得到节点脆弱性综合权重值,最后,为验证所提方法的有效性,以EPRI-36节点交直流混联系统为基础算例进行节点脆弱性分析,结果表明该方法具有可行性。

**关键词:**交直流混联电力系统;潮流;新能源;脆弱节点识别;CRITIC法;RSR法;指标集;综合权重  
**中图分类号:**TM74 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed24902

## Research on Structural Vulnerability of AC-DC Hybrid Power Grid Based on RSR Method

PENG Yinzhang<sup>1</sup>, WANG Chen<sup>2</sup>, NAN Dongliang<sup>1</sup>, XIAO Chao<sup>3</sup>, YANG Shuai<sup>1</sup>

(1. *Electric Power Research Institute of State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830013, Xinjiang, China*; 2. *State Grid Xinjiang Electric Power Co., Ltd., Urumqi 830011, Xinjiang, China*; 3. *Electric Power Research Institute of State Grid Henan Electric Power Company, Zhengzhou 450052, Henan, China*)

**Abstract:** AC-DC hybrid power grid can balance the power flow during the operation of the power system in a large range, which is conducive to improving the access capacity and access range of large-scale access of new energy to the power grid, which is an important trend in the development of modern power grid. In order to analyze the structural vulnerability of AC-DC hybrid system and avoid the occurrence of power grid outage, a rank-sum ratio (RSR) method was proposed to analyze the structural vulnerability of power grid. Firstly, the vulnerability index set was established based on the structural characteristics of the complex networks. Secondly, the RSR method combined with the subjective and objective evaluation method was used to obtain the comprehensive weight value of node vulnerability. Finally, to verify the validity of the proposed method, AC-DC mixed with EPRI-36 node system node vulnerability analysis based on an example, the results show that the method is feasible.

**Key words:** AC-DC hybrid power system; flow; new energy; vulnerable node identification; criteria importance thought intercriteria correlation (CRITIC) method; rank-sum ratio (RSR) method; indicator set; comprehensive weight

直流输电广泛用于大容量、远距离输电,能加速实现我国电力西电东送计划和全国电网系统大规模互联<sup>[1]</sup>。随着特高压电网及交直流混联系统的规划建设和直流线路的相继投运,交直流互联系统成为未来电力系统发展的一个重要趋势<sup>[2]</sup>。直流输电接入电网后使得电力系统的运行方式更加具有灵活性,与此同时,电网结构的复杂程度也越来越高。当电力系统受外力干扰发生扰动时,系统的局部故障更易于传播蔓延至整

个电网,从而引发故障连锁反应<sup>[3]</sup>,因此,若能准确识别出交直流混联电网中的关键且脆弱度高的节点,对提前预知交直流混联系统的大停电事故、提高电网系统的整体的安全稳定运行具有重要意义。

目前,对于交直流混联电网的关键节点分析模型和可靠性评估的研究较少,辨别方法均针对纯交流系统。文献[4]主要考虑城市电网结构的节点度和该节点所连线路的相对重要程度,定义

**作者简介:**彭寅章(1992—),男,博士研究生,主要研究方向为特高压直流输电控制与保护,Email:pyz1006\_xju@163.com

了桥重要度指标来辨识电力系统中节点脆弱度较高的关键节点。文献[5]研究了“发电机-负荷”节点功率对线路潮流的影响,基于此提出了一种负荷转移系数的电气介数法来研究电网的结构脆弱性。文献[6]从电网节点移除后剩余系统的潮流转移情况出发,定义了节点潮流转移度、节点位置重要度指标,运用多属性决策法得到电网节点综合脆弱度情况的综合排序。

此外,有学者在此基础上对交直流混联系统的脆弱性展开研究。文献[7]考虑交直流设备运行风险和系统运行状态风险两部分建立风险评估体系,提出“模糊云”的评价方法实现对交直流系统运行风险的量化评估。文献[8]基于传统静态安全域,全新定义了交直流电力系统的静态安全域,扩大了静态安全域的使用范围,研究表明该方法能更全面、更清晰地反映出电网的薄弱环节。文献[9]为对交直流混合微电网进行坚强度研究,考虑系统的结构和容量,建立了不同层次交直流混合微电网的网络坚强度评估指标体系,提出一种基于IIE-AHP-PCA的分层组合评价法。文献[10]提出一种基于熵权法的交直流电网系统关键线路的识别研究,建立了结合输电线路结构脆弱度和运行脆弱度的综合评价法来量化评估电网的脆弱线路。

上述文献大多选用基于复杂网络的关键节点评估指标结合电网节点综合评价法研究分析电力系统结构脆弱性,较少考虑交直流混联电网的脆弱节点评估,且采用单一评价法,使系统评估结果具有片面性。为此,本文提出一种基于RSR法的交直流电网的脆弱节点综合评估方法。综合考虑系统拓扑结构构建了节点脆弱性评估指标集,在评价方法上,采用RSR综合评价模型将模糊综合评价法与CRITIC客观权重方法相结合,解决了单一主、客观评价法评价结果不准确的问题。最后,文中以EPRI-36节点系统为例,验证所提交直流混联电网结构脆弱性综合性评价方法的合理性。

## 1 交直流混联电网结构脆弱性评估指标体系

本文基于复杂网络原理,根据交直流混联电网的结构特点分别选取了具有代表性的5种脆弱度评估指标构建了节点结构脆弱度指标集进行交直流电网系统结构的脆弱性的评估,下面分别

介绍各指标定义。

### 1.1 度中心性指标

节点度值指复杂网络中与节点相连接边的数量<sup>[11]</sup>,可用 $D(d_i)$ 来表示度中心性指标:

$$D(d_i) = d_i / \sum_{j=1}^n d_j \quad (1)$$

式中: $d_i$ 为节点 $i$ 的度值; $n$ 为节点数。

$D(d_i) \in [0, 1]$ ,其值越大,则节点越重要。

### 1.2 中介度中心性指标

中介度中心性指经过 $i$ 的最短路径数量 $L(i)$ 与所有最短路径总数 $L(G)$ 之比<sup>[12]</sup>,中介度中心性指标 $L_b^k(i)$ 可表示为

$$L_b^k(i) = \frac{L(i)/L(G)}{\sum_{j=1}^n L_b(j)} \quad (2)$$

式中: $L_b(j)$ 为经过节点 $j$ 的 $L(j)$ 与 $L(G)$ 之商。

$L_b^k(i) \in [0, 1]$ ,其值越大,则节点越重要。

### 1.3 紧密度度中心性指标

紧密度为 $i$ 至复杂网络中其它节点的最短路径长度之和<sup>[13]</sup>。可用 $C_c(i)$ 表示紧密度中心性指标:

$$C_c(i) = \sum_{j=1}^n d_{ij} \quad (3)$$

式中: $d_{ij}$ 为节点 $i$ 和节点 $j$ 间最短的路径长度。

$C_c(i)$ 值越大,则节点越重要。

### 1.4 权重中心性指标

权重中心性(hyperlink-induced topic search, HITs)将节点分为中心性和权威度两种属性,HITs算法以返回复杂网络中高质量的权威节点为目的<sup>[14]</sup>。用邻接矩阵 $L=[L_{ij}]_{n \times m}$ 来表示节点间的链接情况,则权重中心性指标的计算公式为

$$\begin{cases} H(i) = \sum_{x=1}^n A(x) \\ A(i) = \sum_{j=1}^m H(y) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $H(i)$ , $A(i)$ 分别为复杂网络的权威度值和中心度值; $x$ 为指向节点 $i$ 的节点; $y$ 为节点 $i$ 指向的节点。

### 1.5 聚集度系数指标

聚类系数体现了节点四周的关联情况<sup>[15]</sup>,若节点 $i$ 的度值为 $k_i$ ,则 $k_i$ 个节点中至多有 $k_i(k_i-1)/2$ 条边,若这 $k_i$ 个节点间实际上有 $t_i$ 条边,则节点 $i$ 的聚集度系数可表示为

$$C_i = 2t_i / [k_i(k_i - 1)] \quad (5)$$

## 2 考虑RSR法的综合评价模型

将所选系统节点结构脆弱性指标按序确定为指标 $X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$ ,得到电力系统的结构脆弱性综合评估指标集,如表1所示。

表1 电力系统结构脆弱性综合评价指标集

Tab.1 Comprehensive evaluation index set of power system structural vulnerability

维度	指标	编号
综合评价指标集	度中心性	$X_1$
	中介度中心	$X_2$
	紧密度中心	$X_3$
	HITs	$X_4$
	聚集度系数	$X_5$

### 2.1 模糊综合评价确定主观权重

本文为解决系统节点脆弱度评价指标值存在一定的模糊性、数据难以定量描述的问题,选用模糊综合评价法<sup>[16]</sup>来主观分析系统节点的脆弱性。该方法计算流程如下:

1)确定指标矩阵及相应的评语集。例如,选取 $M$ 个评价指标,用 $U=\{U_1, U_2, \dots, U_M\}$ 表示指标矩阵;用评语集 $V=\{V_1, V_2, \dots, V_N\}$ 表示各评价等级的集合。

2)确定指标的隶属程度的评判矩阵。在构造评语集后,对每个指标进行量化,确定各等级的隶属度,得到模糊判断矩阵:

$$R = (r_{ij})_{N \times M} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \cdots & r_{1M} \\ r_{21} & r_{22} & \cdots & r_{2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{N1} & r_{N2} & \cdots & r_{NM} \end{bmatrix} \quad (6)$$

式中: $r_{ij}$ 为被评对象从 $U_i$ 来看对 $V_j$ 的隶属程度。

3)计算得到指标的权重值,即

$$B = \omega \times R = (b_1, b_2, \dots, b_n) \quad (7)$$

式中: $\omega$ 为指标权重值; $B$ 为模糊综合评价的权重值。

### 2.2 CRITIC法确定客观权重

若只使用主观评价法可导致所得结果主观性较强,缺乏客观性,因此本文选用CRITIC客观赋权法<sup>[17]</sup>进行修正。例如共有 $N$ 个评价对象, $M$ 个评价指标。该方法计算流程如下:

1)评价指标归一化处理:

$$a'_{ij} = \frac{a_{ij} - \min(a_j)}{\max(a_j) - \min(a_j)} \quad (8)$$

2)计算对比强度 $S_j$ 、冲突性相关系数 $\rho_{ij}$ :

$$S_j = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (a'_{ij} - \bar{a}_j)^2} \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

式中: $a_j$ 为指标数值; $a_{ij}$ 为第 $j$ 个评价对象第 $i$ 个指标的初值; $\bar{a}_j$ 为第 $j$ 个指标的均值。

$$\rho_{ij} = \frac{\sum (i - \bar{i})(j - \bar{j})}{\sqrt{\sum (i - \bar{i})^2 \sum (j - \bar{j})^2}} \quad (10)$$

式中: $i, j$ 表示两组数据; $\bar{i}, \bar{j}$ 分别为指标的均值。

3)计算各指标综合信息量 $C_j$ :

$$C_j = s_j \sum_{i=1}^n (1 - \rho_{ij}) \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (11)$$

4)确定权重系数 $\omega_j$ :

$$\omega_j = \frac{C_j}{\sum_{j=1}^n C_j} \quad (12)$$

若 $C_j$ 越大,则表示指标 $j$ 所拥有的信息量越多,即该指标的权重值也越大。

### 2.3 基于RSR法的综合评价方法

RSR法能反映评价对象多指标综合评价的优劣,是一种非参数统计学的评价方法,不受指标集中异常指标数据的干扰,综合能力较强。该方法主要通过秩转换将指标数据转化为无量纲统计值 $RSR$ ,其值越大,则说明评价对象整体情况越优<sup>[18]</sup>。因此本文选用RSR法综合评价系统节点的综合脆弱性情况。

RSR法的计算流程如下:

1)编秩:对于正向型指标:

$$R = 1 + (n - 1) \frac{X - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (13)$$

对于负向型指标:

$$R = 1 + (n - 1) \frac{X_{\max} - X}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (14)$$

式中: $R$ 为秩次; $n$ 为评价对象数量; $X$ 为初始指标值; $X_{\max}$ 为最大初始指标值; $X_{\min}$ 为最小初始指标值。

2)计算评价指标指标RSR值:

$$RSR_i = \frac{1}{mn} \sum_{j=1}^m R_{ij} \quad i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m \quad (15)$$

式中: $R_{ij}$ 为第 $i$ 行第 $j$ 列数据的秩; $m$ 为指标的个数。

3)确定RSR值的分布情况:用概率单位 $Probit$ 表达的RSR值的特定向下累计频率来确定RSR分布。

4)计算回归方程及分档排序:拟合RSR值根

据回归方程  $RSR=a+b \times PROBIT$  计算得到,并根据所得  $RSR$  值对评价对象依次进行分档排序。

### 3 算例分析

#### 3.1 节点脆弱性评价指标分析

本文以 EPRI-36 系统模型为例进行交直流混联电网拓扑结构的脆弱性分析。该系统共有发电机节点 8 个,节点 1 为平衡节点,悬浮节点 50、节点 51、节点 52 不参与排序。文中利用 Pajek 绘制得到 EPRI-36 节点系统结构图,如图 1 所示。

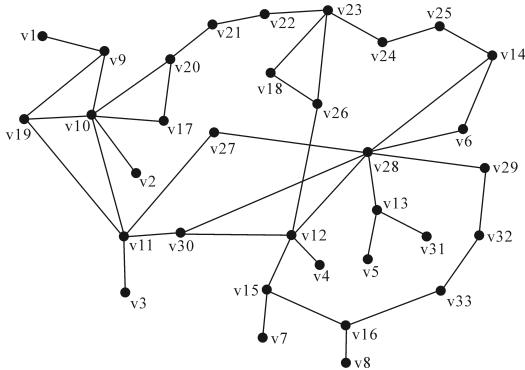


图1 EPRI-36节点系统拓扑模型

Fig.1 EPRI-36 topology model of the node system

为得到各脆弱性指标的权重值,文中将 Pajek 与式(1)~式(5)结合计算得到各节点度中心性、中介度中心性、紧密度中心性、权重中心性和聚集度中心性指标数据。由于各指标间量纲和数量级的差异,因此根据式(8)将指标标准化。最后各节点脆弱性指标值如图 2 所示。

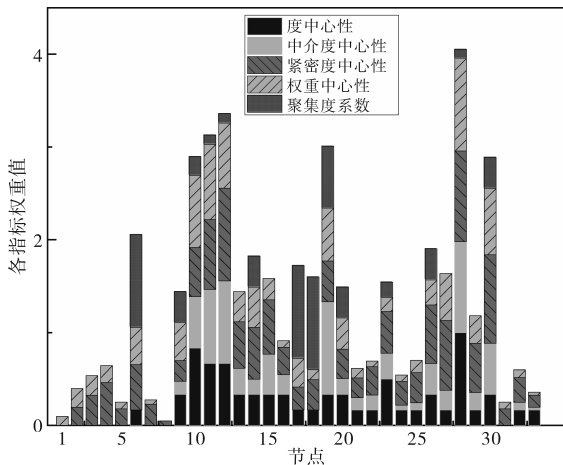


图2 EPRI-36系统各节点脆弱性指标值

Fig.2 Vulnerability index of each node in EPRI-36 system

由图 2 可知,在度中心性指标中排名较高的节点 11、节点 12,节点 9、节点 13 虽然度中心性相同,但在其它指标排序中结果完全不同。例如节点 11,在度中心性指标中重要度排序第 3,而在权

重中心性中排名第 2。以上分析表明虽为同一节点,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。

#### 3.2 综合评价

传统评价方法客观性不足,优化结果偏差较大,因此本文选用 RSR 法结合主客观评价法来分析交直流混联电网的结构脆弱性。RSR 综合评价法参与计算的是秩次,可消除异常值的干扰,解决指标值为零时在统计处理中的问题。

将节点脆弱度指标数据归一化后利用模糊综合评价法求解各指标主客观权重,利用 CRITIC 法计算各指标的客观权重。在各指标权重的选取上认为 5 个指标重要程度一致。由上述分析和式(6)~式(12)计算可得各指标主、客观权重如图 3 所示。

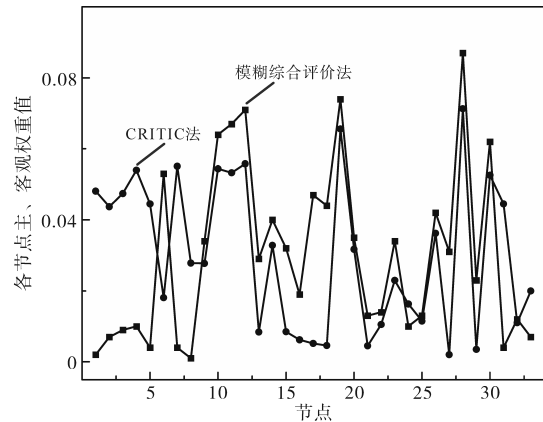


图3 各评价指标主、客观权重图

Fig.3 Subjective and objective weight of each evaluation index

由图 3 可知,节点 28、节点 19、节点 12 的主观权重值排名前三,对比以上节点在该系统的拓扑图中的位置确认所得结果的合理性,根据图 1,节点 28 处于系统中心,有 7 条支路与它相连接,因此该节点的重要程度最高。节点 19 为发电机节点并带有负荷,节点 12 为联络节点,起着连接网络上下两部分的关键作用,易引发系统连锁故障,故重要程度高。

利用 RSR 综合评价法计算 EPRI-36 节点系统的综合权重。根据式(13)~式(15)可计算出  $RSR$  值,利用  $RSR$  值和回归方程即可得到  $Probit$  值以及分档等级情况,计算结果排序前 10 名如表 2 所示。

根据图 2 和图 3 可知,在度中心性、权重中心性、中介度中心性等指标中排序前 10 名的关键节点中有节点 28、节点 11、节点 10、节点 12、节点 14 等节点同样位于综合评价结果排序前 10 的节点

表2 RSR值、Probit值和分档等级  
Tab.2 RSR value, Probit value and grade

排序	节点	RSR值	Probit值	分档等级
1	28	1	7.429	0
2	19	0.97	6.876	0.233 7
3	12	0.939	6.55	0.261 6
4	10	0.879	6.335	0.288 3
5	11	0.864	6.169	0.324 5
6	30	0.818	6.030	0.331 1
7	26	0.667	5.908	0.347 6
8	14	0.636	5.799	0.352 1
9	6	0.606	5.651	0.395 2
10	20	0.606	5.516	0.399 6

中,只是排序先后略有差别。该系统节点重要性整体排序情况如图4所示。

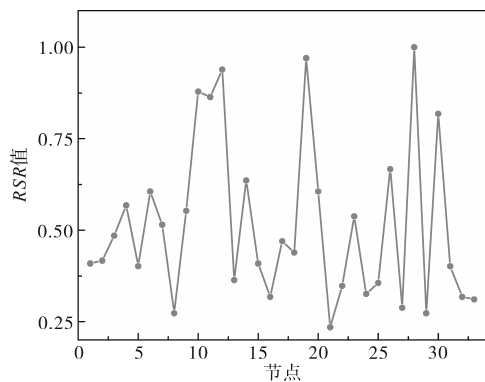


图4 EPRI-36节点系统各节点RSR值  
Fig.4 RSR values of EPRI-36 nodes

为进一步验证本文所提交直流混联系统拓扑结构节点重要度评价法的合理性,文中将计算节点结构重要度排序前10的节点与其它文献中的不同方法取得的结果做对比。在研究EPRI-36系统节点重要度时,方法一采用基于马尔科夫链的状态演化模型<sup>[19]</sup>,方法二采用节点相对参与因子法<sup>[20]</sup>,各方案的排序结果如表3所示。

表3 节点重要度结果对比  
Tab.3 Comparison of node importance results

排序	本文	方法一	方法二
1	28	16	9
2	19	29	23
3	12	12	10
4	10	27	11
5	11	26	25
6	30	34	26
7	26	13	12
8	14	28	27
9	6	17	24
10	20	11	28

从表3可以看出,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。将本文所提方法分别与方法一、方法二相比,节点重要度综合排序前10的节点中节点28、节点12、节点11、节点26均在方法一、方法二中出现。这进一步说明了重要节点识别结果的合理性。

## 4 结论

本文提出一种融合主观评价法与客观评价法的RSR综合评价新方法。建立了基于复杂网络理论的交直流混联电网的结构脆弱性综合评价指标集,以EPRI-36节点系统为例,得到了系统节点结构脆弱度排序情况。通过将本文所提方法得到的计算结果与其他不同学者的相关研究结果做对比分析,结果表明本文所提综合评价法具有可行性。

### 参考文献

- [1] 刘映尚,张建新,徐光虎,等.南方区域复杂交直流互联电网系统运行特性与安全稳定控制[J].南方电网技术,2020,14(5):44-50.  
LIU Yingshang, ZHANG Jianxin, XU Guanghu, et al. Operation characteristics and security&stability control of the complex AC-DC interconnected power grid in southern china[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(5): 44-50.
- [2] 别朝红,林超凡,李更丰,等.能源转型下弹性电力系统的发展与展望[J].中国电机工程学报,2020,40(9):2735-2745.  
BIE Zhaohong, LIN Chaofan, LI Gengfeng, et al. Development and prospect of resilient power system in the context of energy transition[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(9): 2735-2745.
- [3] 南斌,董树锋,徐成司,等.基于改进离差最大化方法的电网关键线路综合辨识[J].电网技术,2022,46(10):4076-4084.  
NAN Bin, DONG Shufeng, XU Chengsi, et al. Comprehensive identification of critical lines in power grid based on improved maximizing dispersions method[J]. Power System Technology, 2022, 46(10): 4076-4084.
- [4] 于光耀,孙冰,王旭东,等.考虑节点的桥重要度的城市电网结构脆弱性分析[J].电力系统及其自动化学报,2020,32(7):103-108,116.  
YU Guangyao, SUN Bing, WANG Xudong, et al. Structural vulnerability analysis of urban power grid based on bridge importance of nodes[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2020, 32(7): 103-108, 116.
- [5] 丁少倩,林涛,徐遐龄,等.基于负荷转移系数的电气介数在电网结构脆弱性评估方法中的应用[J].电测与仪表,2016,53(18):6-9.  
DING Shaoqian, LIN Tao, XU Xialing, et al. Research on struc-

- ture vulnerability of grid assessment method based on the electrical betweenness of load transfer coefficient[J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2016, 53(18): 6-9.
- [6] 刘海涛,牛健,刘兵,等.大规模互连电网关键节点识别与应对策略研究[J]. *电力科学与技术学报*, 2020, 35(4): 114-121. LIU Haitao, NIU Jian, LIU Bing, et al. Research on identification method of critical node and countermeasures in large-scale interconnected power grids[J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2020, 35(4): 114-121.
- [7] 刘俊磊,彭红英,钱峰,等.交直流混合输电运行风险模糊云评价模型[J]. *太阳能学报*, 2021, 42(6): 87-96. LIU Junlei, PENG Hongying, QIAN Feng, et al. Fuzzy cloud evaluation model for operation risk of AC/DC hybrid transmission[J]. *Acta Energetica Sinica*, 2021, 42(6): 87-96.
- [8] 陈晖,陈中.交直流系统静态安全域刻画与运行裕度计算[J]. *高电压技术*, 2018, 44(4): 1328-1334. CHEN Hui, CHEN Zhong. Steady-state security region characterization and operation margin calculation of AC/DC power system[J]. *High Voltage Engineering*, 2018, 44(4): 1328-1334.
- [9] 朱永强,王甜婧.交直流混合微电网网络坚强度评估的指标体系及方法[J]. *电网技术*, 2018, 42(2): 455-463. ZHU Yongqiang, WANG Tianjing. Index system and method for evaluating strength of hybrid AC/DC microgrid[J]. *Power System Technology*, 2018, 42(2): 455-463.
- [10] 曾磊磊,杨琦,曾鑫.交直流混联电网的关键脆弱线路辨别[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2016, 28(7): 106-111. ZENG Leilei, YANG Qi, ZENG Xin. Identification of key vulnerable lines in AC/DC hybrid power grid[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2016, 28(7): 106-111.
- [11] 陈超洋,周勇,池明,等.基于复杂网络理论的大电网脆弱性研究综述[J]. *控制与决策*, 2022, 37(4): 782-798. CHEN Chaoyang, ZHOU Yong, CHI Ming, et al. Review of large power grid vulnerability based on complex network theory[J]. *Control and Decision*, 2022, 37(4): 782-798.
- [12] 何铭,邹艳丽,梁明月,等.基于多属性决策的电力网络关键节点识别[J]. *复杂系统与复杂性科学*, 2020, 17(3): 27-37. HE Ming, ZOU Yanli, LIANG Mingyue, et al. Critical node identification of a power grid based on multi-attribute decision[J]. *Complex System and Complexity Science*, 2020, 17(3): 27-37.
- [13] 陈绍南,梁翔,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. CHEN Shaonan, LIANG Shuo, LI Shan, et al. Power grid vulnerability evaluation based on electrical centrality indicators[J]. *Distribution & Utilization*, 2021, 38(8): 70-76.
- [14] 袁博,张文一,张雪敏.基于改进HITS算法的电网脆弱集合快速评估[J]. *电力系统及其自动化学报*, 2020, 32(4): 145-150. YUAN Bo, ZHANG Wenyi, ZHANG Xuemin. Rapid identification of vulnerable set in power grid based on modified HITS algorithm[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2020, 32(4): 145-150.
- [15] 王子欣,苗世洪,郭舒毓,等.基于复杂系统理论的电力通信耦合网络模型构建及节点重要度评估方法[J]. *高电压技术*, 2022, 48(1): 84-94. WANG Zixin, MIAO Shihong, GUO Shuyu, et al. Construction of power communication coupling network model and node importance evaluation method based on complex system theory[J]. *High Voltage Engineering*, 2022, 48(1): 84-94.
- [16] 冯婷婷,戴晖,丁亮,等.基于多级模糊综合评价方法的配电网运行状态评估模型[J]. *电工技术*, 2022(12): 160-163. FENG Tingting, DAI Hui, DING Liang, et al. Evaluation model of distribution network operation state based on multi-level fuzzy comprehensive evaluation method[J]. *Electric Engineering*, 2022(12): 160-163.
- [17] 赵书强,汤善发.基于改进层次分析法、CRITIC法与逼近理想解排序法的输电网规划方案综合评价[J]. *电力自动化设备*, 2019, 39(3): 143-148, 162. ZHAO Shuqiang, TANG Shanfa. Comprehensive evaluation of transmission network planning scheme based improved analytic hierarchy process, CRITIC method and TOPSIS[J]. *Electric Power Automation Equipment*, 2019, 39(3): 143-148, 162.
- [18] 刘良帅,杜晓东,王立斌,等.基于秩和比法的配网台区运行状态评价[J]. *河北电力技术*, 2021, 40(6): 34-37. LIU Liangshuai, DU Xiaodong, WANG Libin, et al. Operation status evaluation of distribution station area based on RSR method[J]. *Hebei Electric Power*, 2021, 40(6): 34-37.
- [19] 谭玉东.复杂电力系统脆弱性评估方法研究[D].长沙:湖南大学, 2013. TAN Yudong. Research on complex power system vulnerability assessment methods[D]. Changsha: Hunan University, 2013.
- [20] 卢海,刘婷,赵艳军,等.基于动静混合分析方法的电网结构性薄弱区域识别[J]. *广东电力*, 2013, 26(10): 58-64. LU Hai, LIU Ting, ZHAO Yanjun, et al. Recognition of power grid constitutive property weak area based on dynamic and static hybrid analysis method[J]. *Guangdong Electric Power*, 2013, 26(10): 58-64.

收稿日期:2023-01-10

修改稿日期:2023-02-20