[文章编号] 1003－4684(2026)01-0057-05

基于 FAHP-熵权法的输电线路风偏闪络风险评估

赵 国[1]，祝和平[1,2]

(1 湖北工业大学电气与电子工程学院，湖北 武汉 430068；
2 湖北工业大学太阳能高效利用及储能运行控制湖北省重点实验室，湖北 武汉 430068)

[摘 要] 输电线路风偏闪络会严重影响线路安全稳定运行。为评估输电线路风偏闪络风险，根据线路风偏闪络影响因素，运用模糊数学理论构建了基于 FAHP-熵权法组合赋权的输电线路风偏闪络风险评估模型。选用风速、降雨强度、湿度、档距及海拔高度 5 个因素作为主要影响指标，并设置了Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ 级 4 种风险评估等级。通过实际线路实时监测数据验证了风险评估模型的准确性，评估结果可为线路运维人员提前感知线路风险等级、做好应对措施提供参考，并为电网安全稳定运行提供技术支撑。

[关键词] 输电线路；风偏闪络；组合赋权；风险评估
[中图分类号] TM762 [文献标识码] A

当输电线路受到强风作用时，会导致输电导线与绝缘子发生风偏运动，使得导线与杆塔之间的电气间隙过小，从而可能导致导线对杆塔放电，进而引发风偏跳闸[1-3]。输电线路发生风偏跳闸后，重新合闸的成功率较低，严重影响了线路的供电可靠性[4-6]。目前国内外针对输电线路风偏的研究大多是计算导线以及绝缘子的风偏角或导线的最小电气间隙，而对于某输电杆塔的风偏风险评估较少。文献[7]构建了一种基于风向和风速预测的概率模型对风偏放电概率进行预测告警，但该方法并未考虑降雨情况，使得结果不准确。文献[8]建立了一种基于 BP 神经网络的风偏风险评估模型，但该模型考虑的影响因素不全面，忽略了降雨强度以及湿度对输电线路风偏角的影响，使得结果不准确。文献[9]构建了一种输电线路风偏闪络预警模型，该模型依据数值天气预报来进行评估预警，可为安装在线装置困难而又处于强风区的重要输电线路提供一种可行、有效的风偏闪络风险管控手段，但是该方法不能针对其他类型杆塔进行风偏预警。

根据上述研究，可以得出结论：目前常用的风险评估方法不能很好地适用于各种类型的输电杆塔，且采用的风偏角和最小电气间隙值仅基于规程数据，评估结果不够准确。因此，本文提出了一种基于 FAHP-熵权法组合赋权的输电线路风偏闪络风险评估模型。该模型能够综合考虑多个因素条件并结合实时数据进行风偏闪络风险评估，并通过山东省实际输电线路的实时数据验证了该模型的准确性。

1 输电线路风偏闪络风险评估模型

输电线路风偏闪络受多种因素影响，考虑到因素之间相互作用的关系可能会对结果造成偏差，而计算影响因素的权重可减小因素之间的相互影响，从而提高评估模型的准确性。因此，本文综合考虑模糊层次分析法（fuzzy analytical hierarchy process，FAHP）与熵权法的优缺点，将两种方法得到的权重进行最优结合，使得本文提出的模型更加合理、准确。

1.1 模糊层次分析法

在风偏闪络风险指标的重要性分析方面，专家通常难以给出量化的评价。与层次分析法相比，FAHP 运用模糊数学中的隶属度理论，能够构建更好反映问题模糊性的判断矩阵。

依据表 1 中的比较原则，可将输电线路风偏闪络风险评估指标进行划分并建立模糊判断矩阵：

$$\boldsymbol{H} = (h_{ij})_{n\times n} \tag{1}$$

式中：h_{ij} 为指标 i 与 j 进行比较后的结果值；n 表示模糊判断矩阵的指标总数。

对矩阵 $\boldsymbol{H}$ 中的每一行进行求和，再根据式(2)和式(3)进行计算可得到模糊一致矩阵 $\boldsymbol{H}'$。

[收稿日期] 2023－04－11
[第一作者] 赵 国(1985－)，男，江苏南京人，湖北工业大学副教授，研究方向为新能源发电技术。
[通信作者] 祝和平(1999－)，男，湖北武汉人，湖北工业大学硕士研究生，研究方向为电气工程。

$$r_i = \sum_{j=1}^{n} h_{ij} \tag{2}$$

$$h'_{ij} = \frac{r_i - r_j}{2n} + 0.5 \tag{3}$$

$$\boldsymbol{H}' = (h'_{ij})_{n\times n} \tag{4}$$

式中：r_i 代表 $\boldsymbol{H}'$ 中第 i 行数值的总和；h'_{ij} 表示第 i 行与第 j 行的一致性结果。

表 1 指标重要性比较原则

重要性取值	定义
0.1	指标 i 比指标 j 极端不重要
0.3	指标 i 比指标 j 明显不重要
0.5	指标 i 比指标 j 同等重要
0.7	指标 i 比指标 j 明显重要
0.9	指标 i 比指标 j 极端重要
0.2、0.4、0.6、0.8	指标 i 与指标 j 重要性比较介于奇数取值之间

通过几何平均算法可解得 $\boldsymbol{H}'$ 的权重向量，最后对其进行标准化可得出最终权重值 α_i。

$$R_{\mathrm{GM},i} = \left(\prod_{i=1}^{n} r_{ij}\right)^{1/n} \tag{5}$$

$$\alpha_i = \frac{R_{\mathrm{GM},i}}{\sum_{i=1}^{n} R_{\mathrm{GM},i}} \tag{6}$$

式中：$R_{\mathrm{GM},i}$ 代表指标 i 的几何平均数；α_i 表示 FAHP 得出的最终权重值。

1.2 熵权法

信息熵理论指出，指标的信息熵越小，提供的信息量越大，这表明指标在评估中的作用越显著[10]。因此，在综合评价中，这些指标应更为重要。根据信息熵理论，可根据线路风偏闪络风险影响因素的信息熵值计算权重值。首先将影响因素指标值标准化处理，分为四等分范围，并计算范围内的分布概率。具体计算如下：

$$x'_{ij} = \frac{x_{ij} - \min\{x_{ij}\}}{\max\{x_{ij}\} - \min\{x_{ij}\}} \tag{7}$$

$$P_{ik} = P\left(\frac{k-1}{4} < x'_{ij} \leqslant \frac{k}{4}\right) \tag{8}$$

式中：x_{ij} 表示第 j 个样本中指标 i 的数值；$\max\{x_{ij}\}$ 与 $\min\{x_{ij}\}$ 分别代表样本中指标的最大值和最小值；x'_{ij} 则是标准化计算后指标 i 在第 j 个样本中的值；而 P_{ik} 则代表示指标 i 在范围 k 内的分布概率。

接着，根据计算得到的熵权 β_i 对指标进行加权平均，得到各指标的熵权加权平均分值，作为评价对象的最终权值。

$$e_i = -\ln(4) - 1\sum_{k=1}^{4} P_{ik} \cdot \ln P_{ik} \tag{9}$$

$$f_i = \frac{1 - e_i}{n - \sum_{i=1}^{n} e_i} \tag{10}$$

$$\beta_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^{n} f_i} \tag{11}$$

式中，β_i 表示熵权法得出的最终权重值。

1.3 组合赋权法

FAHP 所得到的权重值虽然利用模糊性淡化了人的主观性，但仍然受人的主观因素影响，使得结果并不精确；而熵权法虽然以客观角度得到权重值，但受指标的数量和质量影响，得到的结果也不精确[11]。因此将 FAHP 与熵权法得到的权重值进行组合，可得到兼顾主观性与客观数据的最优权重值：

$$\omega_i = \frac{\alpha_i \beta_i}{\sum_{i=1}^{n} \alpha_i \beta_i} \tag{12}$$

式中：ω_i 表示 FAHP 与熵权法组合得出的最优权重值。

1.4 模糊综合评价

1）设立风险评估等级和评价目标集　对影响因素进行全面筛选，选出具有代表性的因素组成影响要素集。评价目标集需进行等级划分，本文将Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级风险设置为评价目标集。

2）制定隶属度函数　隶属度函数可根据 4 个评估等级的模糊范围来设定，根据不同级别的隶属度函数以及影响因素指标值可计算得到判断矩阵 R。评估等级之间存在模糊性，可采取三角隶属度分布来建立隶属度函数。

图 1 为本文所构建的三角隶属度函数分布，对于本文所设立的风险等级的隶属度函数可用式(13)～(16)表示。

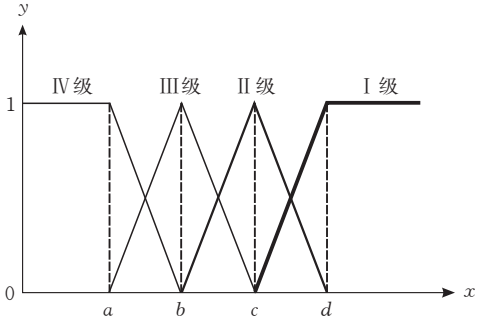

图 1 正向指标三角隶属度函数分布

$$y_1(x) = \begin{cases} 1 & x \leqslant a \\ \dfrac{b-x}{b-a} & a < x < b \\ 0 & x \geqslant b \end{cases} \tag{13}$$

$$y_2(x) = \begin{cases} \dfrac{x-a}{b-a} & a < x \leqslant b \\ 0 & x \leqslant a, x \geqslant c \\ \dfrac{c-x}{c-b} & b < x < c \end{cases} \tag{14}$$

$$y_3(x)=\begin{cases}\dfrac{x-b}{c-b} & b<x\leqslant c\\ 0 & x\leqslant b,x\geqslant d\\ \dfrac{d-x}{d-c} & c<x<d\end{cases}\tag{15}$$

$$y_4(x)=\begin{cases}0 & x\leqslant c\\ \dfrac{x-c}{d-c} & c<x<d\\ 1 & x\geqslant d\end{cases}\tag{16}$$

反向指标通过逆序排列正向指标的 4 个隶属度函数获得。上式中：a，b，c，d 分别为指标不同等级的模糊阈值。

3)模糊综合评价　根据判断矩阵以及 FAHP 与熵权法组合得到的权重值，可进行模糊综合评价：

$$\boldsymbol{B}=w_i\times R=[w_1\quad w_2\quad\cdots\quad w_n]\times\begin{bmatrix}r_{11}&r_{12}&\cdots&r_{1m}\\ r_{21}&r_{22}&\cdots&r_{2m}\\ \vdots&\vdots&&\vdots\\ r_{n1}&r_{n2}&\cdots&r_{nm}\end{bmatrix}=[b_1\quad b_2\quad\cdots\quad b_m]\tag{17}$$

式中：m 表示被评目标的总值；$\boldsymbol{B}$ 表示模糊评价的结果，最终的评价目标是根据 $\boldsymbol{B}$ 中元素最大数值对应的目标所确定。

4)有效性指标验证　对于模糊综合评价结果，需要验证其有效性，因此对结果进行以下检验：

$$\lambda=\frac{r\varepsilon-1}{2\delta(r-1)}\tag{18}$$

式中：r 表示评价结果 $\boldsymbol{B}$ 中元素的数量；ε 表示结果中的最大值；δ 表示结果中的第二大值；只有当 λ 的数值大于 0.5 时，结果才具有有效性。

2　风偏闪络风险指标与评估体系

2.1　输电线路风偏闪络风险指标

输电线路风偏闪络的根本缘由是风荷载的作用，使得导线发生摆动，带动绝缘子串或跳线发生位移，位移后导致其与塔杆之间的距离小于耐受电压间隙，进而发生放电闪络现象，可能会导致线路跳闸和塔杆损伤等危害[12]。此外，强风暴雨天气也常常出现，在这种环境下，输电线路周围空气湿度不断变化，湿度的变化对输电线路风偏闪络造成一定影响[13]。因此，雨量和湿度也是影响输电线路风偏闪络的重要因素。对于输电线路本身，档距的变化会导致输电导线长度的变化，输电导线越长，受风力作用越强烈，容易使线路发生风偏闪络风险。

地形地貌对输电线路风偏闪络风险的影响主要是因为它会改变输电线路所在的风场，使得线路所在的风场与预测的风场不同。不同地形地貌对风场的影响程度也不同。按照我国的《设计规范》，在设计时需要考虑微地形、微气象条件的影响。研究表明，与风向平行的坡地的地面风速比空旷地面处高 20%～30%，而在山顶、高地的迎风坡与风向平行的谷底和河谷等处，地面风速甚至比空旷地面处高出 40%～50%[15]。

架空输电线路运行环境复杂，线路风偏闪络的影响因素众多。本文查阅大量文献，研究输电线路风偏闪络特征并咨询专家意见，最终选择从风速、降雨强度、湿度、档距以及海拔高度 5 个风偏闪络影响指标进行分析，构建输电线路风偏闪络风险评估体系。

2.2　输电线路风偏闪络风险评估等级确定

本文根据实际输电线路风偏闪络的危害设立 4 个风险等级：安全、低、中等、高，其预警等级分别为Ⅳ、Ⅲ、Ⅱ、Ⅰ，其中Ⅰ级为最严重风险，需采取紧急预备措施。根据线路评估等级，电网运维人员可快速采取应对措施，保障电网安全稳定运行。

2.3　输电线路风偏闪络风险评估体系

图 2 展示了输电线路风偏闪络风险评估体系的结构，包括评估因素集和评估目标集。评估因素集包括风速、降雨强度、湿度、档距以及海拔高度 5 个因素，这些因素会对输电线路风偏闪络产生影响。评估目标集为本文所设立的 4 个风险评估等级。在评估过程中，可以根据评估结果采取相应的措施，以减少输电线路风偏闪络对电网系统的影响。

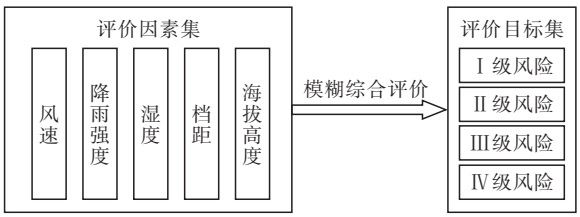

图 2　输电线路风偏闪络风险评估体系

2.4　输电线路风偏闪络影响因素隶属度函数计算

根据线路风偏闪络影响要素以及工程经验，可确定 4 个风险等级中风偏影响要素的取值范围，如表 2 所示，该模型的评估目标集包括 4 个等级。

表 2　输电线路风偏闪络风险评估阈值

参数	Ⅳ 级	Ⅲ 级	Ⅱ 级	Ⅰ 级
风速/(m·s^{-1})	1	5	15	25
降雨强度/(mm·h^{-1})	3.3	4.2	8.4	34.6
湿度/%	60	70	80	90
档距/km	0.1	0.3	0.5	0.8
海拔高度/km	1	2	3	4

2.5　输电线路风偏闪络评估步骤

基于 FAHP-熵权法组合赋权的输电线路风偏闪络风险评估步骤如图 3 所示。

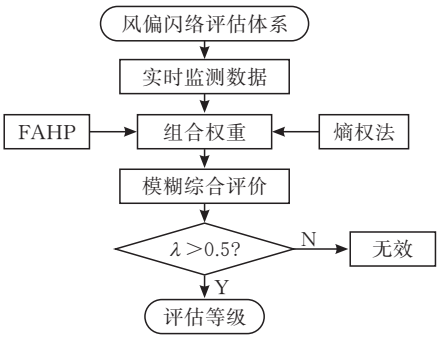

图 3 输电线路风偏闪络风险评估步骤

3 实例分析

3.1 杆塔概况

为验证本文提出的基于 FAHP-熵权法组合赋权的输电线路风偏闪络风险评估模型的准确性，选取了山东省一条 500 kV 输电线路为例，平均选取 5 个杆塔 A_1、A_2、A_3、A_4、A_5，记录某时段的实时数据。

某日该线路沿线天气为雷雨、局部暴雨。根据监控系统得到 5 座杆塔的实时数据，如表 3 所示。

表 3 线路杆塔指标数据

参数	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
风速/(m·s^{-1})	16.2	8.5	7.4	15.9	19.4
降雨强度/(mm·h^{-1})	21.5	18.2	17.1	20.6	20.3
湿度/%	82	69	78	83	90
档距/km	0.45	0.38	0.37	0.42	0.32
海拔高度/km	3.2	2.8	2.5	3.3	3.5

3.2 计算指标权重

根据上述组合赋权的闪络风险评估体系构建过程，按照指标重要性原则构建模糊判定矩阵

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0.5 & 0.7 & 0.8 & 0.7 & 0.8\\ 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.7 & 0.7\\ 0.2 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.4\\ 0.3 & 0.3 & 0.5 & 0.5 & 0.6\\ 0.2 & 0.3 & 0.6 & 0.4 & 0.5\end{bmatrix}$$

根据 FAHP 对专家评价矩阵进行平均化处理，得到主观权重矢量：

$$\boldsymbol{\alpha}=[0.26\quad 0.22\quad 0.17\quad 0.18\quad 0.17]$$

采用熵权法得到客观权重向量：

$$\boldsymbol{\beta}=[0.26\quad 0.15\quad 0.16\quad 0.25\quad 0.18]$$

运用组合赋权法，由式(12)可得到最优综合权重：

$$\boldsymbol{w}=[0.25\quad 0.18\quad 0.17\quad 0.22\quad 0.18]$$

3.3 模糊综合评价

本文以杆塔 A_1 为例，给出具体模糊综合评价结果。首先根据实时数据构建模糊判定矩阵 $\boldsymbol{R}$：

$$\boldsymbol{R}=\begin{bmatrix}0 & 0 & 0.97 & 0.03\\ 0 & 0 & 0.55 & 0.45\\ 0 & 0 & 0.5 & 0.5\\ 0 & 0.3 & 0.7 & 0\\ 0 & 0 & 0.9 & 0.1\end{bmatrix}$$

基于 $\boldsymbol{w}$ 和 $\boldsymbol{R}$，运用式(17)计算得到：

$$B=[0\quad 0.065\quad 0.738\quad 0.197]$$

由结果可知，B 中元素数量为 4，最大隶属度为 0.738，第二大隶属度为 0.197，由于 $\lambda=1.816$ 大于 0.5，所以判断结果有效，杆塔 A_1 风险评估等级为Ⅱ级。

同理计算可得 5 座杆塔的风偏闪络风险等级如表 4 所示。

根据表 4 评估结果可看出 A_2、A_3 杆塔存在风偏闪络的可能性，A_1、A_4 杆塔风偏闪络的可能性较高，而 A_5 杆塔风偏闪络的可能性极大。根据线路工作人员监测，当日 A_5 杆塔发生严重的风偏闪络，且重合闸不成功，需制定相应防治措施；A_1 和 A_4 杆塔虽然未发生闪络跳闸现象，但在塔身发现了导线风偏放电的痕迹。因此，本文构建的输电线路风偏闪络风险评估模型所评估结果与实际结果基本相符，从而证明了本模型的准确性。

表 4 杆塔风偏闪络风险评估结果

杆塔	风险评估等级
A_1	Ⅱ 级
A_2	Ⅲ 级
A_3	Ⅲ 级
A_4	Ⅱ 级
A_5	Ⅰ 级

4 结论

本文采用 FAHP-熵权法组合赋权，建立输电线路风偏闪络风险评估模型。通过分析输电线路受风偏闪络影响的因素，筛选出相关指标构建评价因素集，最终基于模糊综合评价得出风险评估结果。主要结论如下：

1)运用 FAHP-熵权法组合赋权，综合主观评价与客观分析，对影响输电线路风偏闪络的因素指标进行权重计算，使计算结果更具科学性。

2)制定了 4 种评估等级，分别为Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ级，帮助工作人员根据线路风险评估结果采取相应措施，降低损失。

3)通过实例验证了评估模型的实用性和有效性，为输电线路的安全高效运行提供了帮助。

[参 考 文 献]

[1] 杨肖辉，张东，李晓光，等.750kV 输电线路风偏跳闸原

因分析及改造措施研究[J].电气工程学报，2017，12(01)：40-46.

[2] SHEHATA A Y, EL DAMATTY A A, SAVORY E. Finite element modeling of transmission line under downburst wind loading[J]. Finite Elements in Analysis and Design, 2005, 42(01): 71-89(in Chinese).

[3] MCCLURE G, LAPOINTE M. Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines [J]. Computers & Structures, 2003, 81(08): 825-834 (in Chinese).

[4] 张振泉，张东，李晓光，等.一起 750kV 输电线路风偏跳闸原因分析及改造措施研究[J].电瓷避雷器，2017(02)：168-173.

[5] 胡毅.500kV 输电线路风偏跳闸的分析研究[J].高电压技术，2004(08)：9-10.

[6] ZhAO G, WAN C, ZUO W, et al. Research on multiobjective optimal operation strategy for wind-photovoltaic-hydro complementary power system[J]. International Journal of Photoenergy, 2022, 2022：1-23.

[7] JIAN W , XIONG X , ZHE L , et al. Wind forecast-based probabilistic early warning method of wind swing discharge for OHTLs[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2016 (05)：1.

[8] 赵雪飞. 特高压输电线路的风偏风险评估研究[D]. 武汉：华中科技大学，2019.

[9] 王海涛，谷山强，吴大伟，等.基于数值天气预报的输电线路风偏闪络预警方法[J].电力系统保护与控制，2017，45(12)：121-127.

[10] 程启月.评测指标权重确定的结构熵权法[J].系统工程理论与实践，2010，30(07)：1225-1228.

[11] 李娜娜，何正友.组合赋权法在电能质量综合评估中的应用[J].电力系统保护与控制，2009，37(16)：128-134.

[12] 肖东坡.500 kV 输电线路风偏故障分析及对策[J].电网技术，2009，33(05)：99-102.

[13] 熊小伏，翁世杰，王建，等.考虑降雨修正的干字型耐张塔跳线风偏放电在线预警方法[J].电力系统保护与控制，2015，43(05)：136-143.

[14] MCCLURE G, LAPOINTE M. Modeling the structural dynamic response of overhead transmission lines[J]. Computers & Structures, 2003, 81(8/11): 825-834.

[15] 邹丹旦，余霜鸿，邵戎，等.考虑复杂山地风加速的架空线路风偏闪络故障分析[J].电瓷避雷器，2022(04)：185-193.

Research on Risk Assessment of Windage Yaw Flashover of Transmission Lines Based on FAHP-Entropy Weight Method

ZHAO Guo[1,2], ZHU Heping[1,2]

(1 *School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei Uni. of Tech., Wuhan* 430068, *China*;
2 *Hubei Univ. of Tech. Key Laboratory of Solar Energy Efficient Utilization and Energy Storage Operation Control, Wuhan* 430068, *China*)

Abstract: Windage yaw flashover of transmission line will seriously affect the safe and stable operation of the line. In order to evaluate the risk of windage yaw flashover of transmission lines, according to the influencing factors of windage yaw flashover of transmission lines, a risk assessment model of windage yaw flashover of transmission lines based on FAHP-entropy weight method is constructed by using fuzzy mathematics theory. Five factors of wind speed, rainfall intensity, humidity, span and altitude were selected as the main influencing indicators, and four risk assessment levels of grade IV, grade III, grade II and grade I were set up. Finally, the accuracy of the risk assessment model is verified by the real-time monitoring data of the actual line. The evaluation results can help the line operation and maintenance personnel to perceive the line risk level in advance, do a good job in response measures, and provide technical support for the safe and stable operation of the power grid.

Keywords: transmission lines; wind partial flashover; combination empowerment; risk assessment

[责任编校：赵　瞳]