

基于环境参量和主成分分析的 OPGW 光缆状态风险评估方法

冯学斌¹,侯继勇¹,武健¹,展思杰²

(1.中国电力科学研究院有限公司,北京 100192;2.国网山东省电力公司 信息通信公司,济南 250001)

摘要:由于复杂环境下的光纤复合架空地线(OPGW)长期受到环境变化的作用,光缆结构中的光纤、金属单线、油脂和光单元管等部分会遭受不同程度的影响,最终导致电力通信故障。提出一种基于环境参量和主成分分析的 OPGW 光缆状态风险评估方法,根据架空线路中光纤光栅传感器采集的环境参数,采用主客观权重法和主成分分析法对 OPGW 光缆的状态进行评估,数据分析结果表明该方法可以有效反映 OPGW 光缆的运行状态。

关键词:光纤复合架空地线;环境参数;主客观权重;主成分分析;光纤布喇格光栅传感器

中图分类号:TN253 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2021)10-0044-04

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2021.10.010

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



State risk assessment method of OPGW optical cable based on environmental parameters and principal component analysis

FENG Xuebin¹, HOU Jiyong¹, WU Jian¹, ZHAN Sijie²

(1. China Electric Power Research Institute, Beijing 100192, China;

2. Information and Telecommunication Company of State Grid Shandong Electric Power Company, Ji'nan 250001, China)

Abstract: As the optical fiber composite overhead ground wire (OPGW) in a complex environment will be affected by environmental changes for a long time, and the optical fiber, metal single wire, grease and optical unit tube in the optical cable structure will be affected to varying degrees, eventually leading to power communication failure. A risk assessment method for OPGW optical cable status based on environmental parameters and principal component analysis is proposed. According to the environmental parameters collected by fiber grating sensors in overhead lines, subjective and objective weighting method and principal component analysis are used to evaluate the OPGW optical cable status and data analysis. The data analysis results show that this method can effectively reflect the operating status of OPGW optical cable.

Key words: optical fiber composite overhead ground wire; environmental parameter; subjective and objective weight; principal component analysis; fiber Bragg grating sensor

0 引言

智能电网是当今电网发展的新趋势^[1],输电线路的状态监测是实现智能电网的必要手段^[2]。集架空地线和通信光纤于一身的光纤复合架空地线(OPGW)作为一种电力特种光缆是电力系统信息通信的重要载体^[3]。

收稿日期:2021-06-17。

基金项目:国家电网有限公司总部科技项目(5442XX190009)资助。

作者简介:冯学斌(1978—)男,硕士,高级工程师,长期从事电力通信光缆技术及应用研究工作,完成了输电线路大跨越技术、新型电力特种光缆技术、光缆运行维护技术和光缆质量评估技术等多项国家电网公司科技项目,曾荣获省部级科技进步二等奖1项、三等奖3项。



OPGW 光缆的状态主要通过分布式光纤传感技术^[4](如分布式光纤应变温度监测系统(BOTDA/R)、分布式光纤测温系统(DTS)和光时域反射仪(OTDR)等进行应力应变、温度和光路损耗等监测。由于分布式光纤传感技术的监测距离受限,且需要对接入光缆内的纤芯进行监测,因此导致了部分在运 OPGW 光缆的状态无法通过分布式光纤传感监测直接获得^[5]。目前,基于环境参量的 OPGW 光缆状态评估模型主要采用单一参量通过设定某种故障风险的环境参量阈值来对 OPGW 光缆的状态进行评估,而故障风险状态通常不是由单一参量来表征,进而该评估方法并不能准确反映 OPGW 光缆的状态。但是,若采用多环境参量建立评估模型则面临数据维度较多、状态对比的维度

不统一以及数据量过大等问题。

本文提出一种基于环境参量和主成分分析的 OPGW 光缆状态评估方法,在没有直接测量的情况下实现 OPGW 光缆状态的风险评估。

1 基于环境参量和主成分分析的 OPGW 光缆状态评估方法

本文提出的基于环境参量和主成分分析的 OPGW 光缆状态评估方法总体技术方案如图 1 所示。首先,通过架空线路微气象站内的光纤光栅传感器获取影响 OPGW 光缆状态的环境参量,包括温度、湿度、光照、雨量和风速等物理量;然后,根据各种环境参量对 OPGW 光缆影响的程度,通过专家经验计算出主观权重;再依据采集的环境参数值计算客观权重后,将主观权重和客观权重组合形成描述 OPGW 光缆环境参量的权重值;最后,通过主成分分析法对包含权重的环境参量进行处理,得到单一时刻描述 OPGW 光缆状态的一维投影值,进而对 OPGW 光缆的状态进行评估。

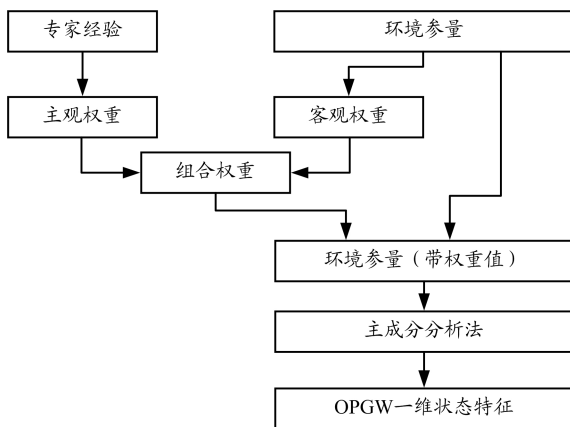


图 1 基于环境参量和主成分分析的 OPGW 光缆状态评估方法总体技术方案

1.1 主客观组合权重分析

1.1.1 基于层次分析法(AHP)的主观权重系数

本文首先采用 AHP 并结合专家经验对 OPGW 光缆环境参量进行主观权重赋值。AHP 是通过将定量分析与定性分析相结合,根据专家的经验判断并衡量各参量之间的相对重要程度,合理地给出每个参量的权重,用于解决多参量决策分析的问题^[6]。由于各环境参量对 OPGW 光缆影响的程度不同,本文在进行状态评估时对指标间的重要性先进行由高到低的排序,重要性越高的指标排序越靠前,再将排序以 AHP 量化,得出每个指标的权重形成权重向量^[7],记为: $w_j^{(1)}$ ($1 \leq j \leq$

n)。对主观权重进行归一化处理得到:

$$w_j^{(1)} = \frac{w_j^{(1)}}{\sum_{j=1}^n w_j^{(1)}} \quad (1)$$

1.1.2 基于熵值法的客观权重系数

本文采用熵值法对 OPGW 光缆的环境参量进行客观权重赋值。熵(Entropy)是根据概率论来确定信息不确定性的一个度量^[8]。设有 m 个待评价对象, n 项环境参量,形成原始指标数据矩阵 $X=(x_{ij})_{m \times n}$ 。对于某项参量 x_j ,第 k 个待评价对象 x_{kj} 与第 l 个评价对象 x_{lj} 之间的差距越大,则该参量在综合评价中所起的作用越大。其中, $0 < k, l \leq m$ 。如果某项环境参量值全部相等,则该环境参量在状态评估中几乎不起作用^[9]。在 OPGW 光缆的状态风险评估中,某一项环境参量的离散程度越大说明该参量对 OPGW 光缆的影响程度越大,所占的指标权重也越大。

熵值法的实现过程^[10]如下:

①列出环境参量的数据矩阵。

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \ddots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{pmatrix} \quad (2)$$

其中, x_{ij} ($1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n$) 为第 i 个 OPGW 区段中第 j 项环境参量的数值。

②计算第 j 项环境参量下第 i 个区段占该项环境参量的权重。

$$P_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sum_{i=1}^m x_{ij}} \quad (3)$$

③计算第 j 项环境参量的熵值 e_j 。

$$e_j = -k \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln(P_{ij}) \quad (4)$$

其中, k 代表一个常量系数,令 $k=1/\ln m$ 。

④计算第 j 项指标的差异系数。

$$g_j = 1 - e_j \quad (5)$$

第 j 项环境参量中 x_{ij} 的差异系数越大,对状态评价的作用越大,熵值越小。

⑤求权数。

$$g_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^n g_j} \quad (6)$$

⑥计算各指标的综合得分。

$$w_j^{(2)} = \sum_{j=1}^n g_j P_{ij} \quad (7)$$

1.1.3 基于最大离方差的组合权重系数

鉴于主观权重和客观权重在 OPGW 光缆环境参量权重赋值中的优缺点,本文将结合主观权重和客观权重的优势,通过最大离方差组合权重法获得 OPGW 光缆环境参量的权重向量^[11]。组合权重的方法将比单一主观权重法或客观权重法更能通过测试指标体现 OPGW 光缆状态的实际情况。

基于最大离方差的组合权重方法的原则^[12-13]可以描述为:

$$\begin{cases} W = \varphi_1 w_j^{(1)} + \varphi_2 w_j^{(2)} \\ \varphi_1^2 + \varphi_2^2 = 1 \end{cases} \quad (8)$$

其中, w 为最终的权重向量, φ_1 为主观权重的系数, φ_2 为客观权重的系数。

在使用最大离差方法计算出权重向量之前,首先根据式(9)得到标准评估矩阵 v_{ij} ,以标准化指标数据。

$$v_{ij} = \frac{\max(x_i) - x_{ij}}{\max(x_i) - \min(x_i)} \quad (9)$$

其中, x_j 表示第 j 种环境参量的集合。第 i 组测试数据的方差 f_{ij} 为:

$$f_{ij} = \sum_{i=1}^m |v_{ij} w_j - v_{ij} w_j| \quad (1 \leq i \leq m, 1 \leq j \leq n) \quad (10)$$

总的方差 f 可以通过式(11)计算:

$$f = \sum_{j=1}^n f_j = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m f_{ij} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^m |v_{ij} - v_{tj}| w_j \quad (11)$$

现在计算系数向量就可以转换成通过最大化方差求最优解的问题,最优解的模型^[14]描述如式(12)、式(13)所示。

$$\max f = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^m |v_{ij} - v_{tj}| \varphi w_j \quad (12)$$

$$\text{s.t.} \begin{cases} \varphi \varphi^T = 1 \\ \varphi \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

其中, φ 为主观权重和客观权重在形成组合权重过程中的系数。计算得到的组合权重系数可以表示如下:

$$\varphi_i = \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^m |v_{ij} - v_{tj}| w_j^T}{\sqrt{\sum_{j=1}^n \left(\sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^m |v_{ij} - v_{tj}| w_j^T \right)^2}} \quad (1 \leq i \leq 2) \quad (14)$$

2 基于主成分分析的 OPGW 光缆状态评估

OPGW 光缆线路的环境参量有多个,如何通过这

些数据准确反映线路的状态是当下面临的主要问题之一^[15-16]。本文采用主成分分析法对包含权重的环境参量数据进行降维,再通过降维后的一维主成分对 OPGW 光缆的状态进行评估。

本文使用主成分分析法进行 OPGW 光缆状态评估的步骤如下:

①构建包含权重的标准化矩阵。

标准化后的原始数据矩阵 v 与每个环境参量的权重结合,形成包含权重的标准化矩阵 T ^[17]。

$$T = (w_j v_{ij})_{m \times n} = \begin{pmatrix} w_1 v_{11} & w_2 v_{12} & \cdots & w_n v_{1n} \\ w_1 v_{21} & w_2 v_{22} & \cdots & w_n v_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_1 v_{m1} & w_2 v_{m2} & \cdots & w_n v_{mn} \end{pmatrix} \quad (15)$$

②计算 T 的协方差矩阵 C 。

T 的协方差矩阵 C ^[18]可以表示为:

$$C = \text{cov}(T) = T^T T \quad (16)$$

③计算 C 的特征值矩阵 G 与特征向量矩阵 A 。

特征值矩阵 G ^[19]表示为:

$$G = \text{evalue}(C) = \begin{pmatrix} \lambda_1 & & & \\ & \lambda_2 & & \\ & & \ddots & \\ & & & \lambda_n \end{pmatrix} \quad (17)$$

其中, $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ 为矩阵 C 的特征值。

特征向量矩阵 A 表示为:

$$A = \text{evector}(C) \quad (18)$$

④求矩阵 T 的主成分投影值向量 D 。

首先,找出最大特征值 $G_{\max}$ 对应的特征向量 d_i ,主成分是输入样本的协方差矩阵的具有最大特征值对应的特征向量^[20];然后,将 d_i 标准化为 d_0 :

$$d_0 = \frac{1}{\sqrt{d_1^2 + d_2^2 + \cdots + d_m^2}} \quad (19)$$

投影值向量 D 可表示为:

$$D = d \times d_0^T \quad (20)$$

⑤确定评估规则。

经处理后的 m 组数据均获得了其一维的主成分,再根据主成分的大小判断 m 组数据描述的 OPGW 光缆的风险程度,投影值向量 D 越大表示该组数据的 OPGW 光缆出现故障的风险越高^[21]。

3 风险评估

根据上述方法,本文对线路中的一条 OPGW 光缆采集的环境参量数据进行处理,用于对其风险进行评估,时间为 2020 年 7 月 1 日到 7 月 10 日,共 10 天。

首先,本文根据 OPGW 光缆方面的专家经验对 5 种环境参量下 OPGW 光缆影响程度的排序情况,采用了 AHP 对环境参量进行主观赋权;然后,采用熵值法对数据进行客观权重计算;最后,将主客观权重按基于离差平方和的最优赋权方法计算得出主观权重、客观权重、组合权重及归一化结果,如表 1 所示。

表 1 主观权重、客观权重、组合权重及归一化结果

序号	指标	主观权重	归一化主观权重	客观权重	归一化客观权重	组合权重	归一化组合权重
1	温度	9	0.346	1.6	0.314	2.1	0.295
2	风速	7	0.269	1.9	0.373	2.4	0.337
3	湿度	6	0.231	0.6	0.118	1.3	0.183
4	雨量	3	0.116	1.1	0.216	0.8	0.112
5	光照	1	0.038	0.5	0.049	0.52	0.073

环境参量监测数据与组合权重结合生成的加权数据通过主成分分析法处理后得到描述 OPGW 光缆状态风险指数的一维主成分。上述处理过程不仅将多维的环境参量数据降为一维数据,便于对 OPGW 光缆不同日期的状态风险进行比较,而且在一维主成分中保留了影响 OPGW 光缆状态的主要环境信息。

由于各环境参量对 OPGW 光缆状态的影响程度不同,权重值越高代表该参量对 OPGW 光缆的影响程度越大。本文将一维主成分归一化处理,根据 10 天的环境数据求出每日的故障风险指数后得到的状态评估结果如图 2 所示,指数越大代表该日期中的 OPGW 光缆所处的环境条件越恶劣,越容易造成结构损伤,最终导致断裂的概率越大,因而风险程度越高。

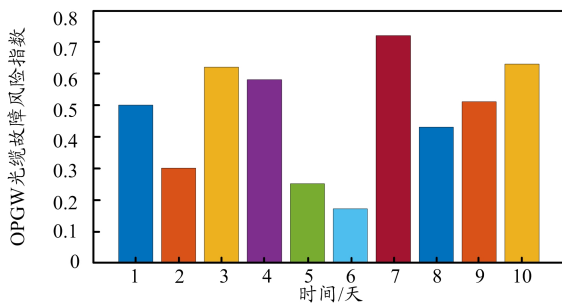


图 2 OPGW 光缆风险状态评估结果

4 结束语

本文根据光纤光栅传感器采集的描述 OPGW 光缆运行环境的温度、湿度、光照、雨量和风速等物理量,通过主客观权重法和主成分分析法建立了评估 OPGW 光缆故障状态风险的方法,该方法可以在不直接测量 OPGW 光缆纤芯参数的条件下对包含权重的

环境参量矩阵进行降维处理,从而获取描述 OPGW 光缆风险的一维状态值,该方法可以减少数据降维过程中信息的丢失。目前,本研究内容在环境参量的完备性、主观赋权准确性等方面还缺乏系统的验证,在下一步工作中将通过试验室测试和现场测试获取足够的数据进行完善。

参考文献:

- [1] 陈树勇,宋书芳,李兰欣,等. 智能电网技术综述[J]. 电网技术,2009,33(8):1-7.
- [2] 谢开,刘永奇,朱治中,等. 面向未来的智能电网[J]. 中国电力,2008(6):19-22.
- [3] 焦晓波,周雅,李宏君. OPGW 在电力光传输网中的应用与发展[J]. 光通信研究,2010(4):49-51.
- [4] 赵宏波,丁健,赵子岩. 基于 BOTDR 的 OPGW 光缆应力应变测量[J]. 电力系统通信,2010,31(1):20-23.
- [5] 孙少华,侯继勇,冯学斌,等. 基于 BOTDA 的 OPGW 应变性能研究[J]. 光通信技术,2021,45(3):54-57.
- [6] 邓雪,李家铭,曾浩健,等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识,2012,42(7):93-100.
- [7] 朱建军. 层次分析法的若干问题研究及应用 [D]. 沈阳:东北大学,2005.
- [8] 聂宏展,吕盼,乔怡,等. 基于熵权法的输电网规划方案模糊综合评价[J]. 电网技术,2009,33(11):60-64.
- [9] 杨宇. 多指标综合评价中赋权方法评析 [J]. 统计与决策,2006(13):17-19.
- [10] 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.
- [11] 沈阳武,彭晓涛,施通勤,等. 基于最优组合权重的电能质量灰色综合评价方法[J]. 电力系统自动化,2012,36(10):67-73.
- [12] 赵怡,邓红霞,张玲,等. 基于最大类间方差的权重自适应活动轮廓模型[J]. 计算机工程与设计,2018,39(2):486-491.
- [13] 张杰龙. 基于组合权重的中长期负荷预测研究及系统实现 [D]. 长沙:湖南大学,2016.
- [14] 刘俊华,罗隆福,张志文,等. 电力变压器灰色关联故障诊断模型的组合权重法[J]. 高压电器,2012,48(1):90-94.
- [15] 罗健斌. 基于光纤传感技术的高压输电线路覆冰状态监测研究[D]. 广州:华南理工大学,2013.
- [16] 钱一民. 基于 OPGW 光纤通信的输电线路在线巡视与监测新技术研究[D]. 武汉:华中科技大学,2013.
- [17] 解素雯. 基于主成分分析与因子分析数学模型的应用研究 [D]. 淄博:山东理工大学,2016.
- [18] 陈佩. 主成分分析法研究及其在特征提取中的应用[D]. 西安:陕西师范大学,2014.
- [19] 胡静. 基于多元统计分析的故障诊断与质量监测研究 [D]. 杭州:浙江大学,2015.
- [20] 李靖华,郭耀煌. 主成分分析用于多指标评价的方法研究——主成分评价[J]. 管理工程学报,2002(1):39-43,3.
- [21] 王晖,陈丽,陈昱,等. 多指标综合评价方法及权重系数的选择[J]. 广东药学院学报,2007(5):583-589.