

环境因素对避雷器泄漏电流影响研究

衡思坤¹, 王琛¹, 张自伟¹, 郑许林¹, 高赫², 周光宇¹

(1. 国网连云港供电公司, 江苏 连云港 222003;

2. 国网江苏省电力有限公司连云港检修公司, 江苏 连云港 222003)

摘要: 避雷器泄漏电流幅值会受环境气象条件影响, 建立泄漏电流幅值模型对于避雷器健康状况判断具有重要意义。通过分析避雷器周围的环境因素, 建立基于多元线性回归的避雷器泄漏电流数学模型。首先, 收集影响泄漏电流幅值主要因素的数据, 包括温度、湿度、大气压强与光照强度; 然后, 基于散点图与趋势线对这些因素进行分析, 借助 MATLAB 软件对收集到的数据建模, 获得基于最小二乘法的多元线性回归模型, 并通过基于方差膨胀因子的共线性进行诊断; 最后, 运用所获得的模型对未来 10 d 泄漏电流进行了预测。预测结果表明, 所提模型精度较高, 可满足工程实用要求。

关键词: 多元线性回归; 泄漏电流幅值; 最小二乘法; 方差膨胀因子

中图分类号: TM862

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2019)01-0114-05

0 引言

金属氧化物避雷器以其优异的非线性特性、大流通容量等优点, 成为电力系统过电压保护的主要设备^[1-11], 能有效抑制电力系统中操作过电压与大气过电压。由于工作环境恶劣, 避雷器的保护也显得尤为重要。

泄漏电流是判断避雷器健康状况的重要特征参数, 其大小又受诸多环境因素的影响, 这种影响关系难以定性描述。文献[12]采用灰关联度来分析环境因素对泄漏电流的影响, 但灰关联度分析主要用于寻找最有影响力的因素, 并不能全面反映环境因素对泄漏电流的影响。针对泄漏电流影响因素的复杂性与不确定性, 即多变量和随机性特征, 将定量预测中多元线性回归分析^[13-19]应用于泄漏电流的测量, 该回归分析方法简单、处理速度快且外推性好, 能对未来状况进行较好预测, 以辅助泄漏电流的测量。经实验验证, 在多种环境因素干扰下, 泄漏电流幅值与温湿度有关, 进而定量明确温湿度对泄漏电流幅值的影响。利用拟合模型, 能够将实际测得的泄漏电流幅值转化为标准温湿度下电流幅值, 有利于进一步判断避雷器的健康状况。

1 多元线性回归分析

1.1 多元线性回归模型原理

设自变量参数 x_1, x_2, \dots, x_k 为影响 y 的 k 个因素, 且存在如下线性关系:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_k x_k + \varepsilon \quad (1)$$

收稿日期: 2018-09-25; 修回日期: 2018-11-06

式中: y 是可测的随机变量; $\beta_i (i = 0, 1, \dots, k)$ 是未知参数, 即回归系数; ε 是不可观测的随机误差, 并满足:

$$\begin{cases} E(\varepsilon) = 0 \\ D(\varepsilon) = \sigma^2 < \infty \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ 是未知参数。

取 n 组不同的 $(x_{i1}, \dots, x_{in}) (i = 1, \dots, n)$, 分别进行 n 次独立运算, 得到 y 的 n 个独立观测值 y_1, y_2, \dots, y_n , 则有:

$$\begin{cases} y_i = \beta_0 + \beta_1 x_{i1} + \dots + \beta_k x_{ik} + \varepsilon_i \\ E(\varepsilon_i) = 0, D(\varepsilon_i) = \sigma^2, i = 1, 2, \dots, n \end{cases} \quad (3)$$

式(3)为多元线性回归模型^[5], $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n$ 相互独立。在实际应用中, 该模型通常采用向量与矩阵形式表示。

1.2 显著性检验

利用最小二乘法求解多元线性回归方程时, 必须对方程进行显著性检验。对于给定的显著性水平 α , 可以查 F 分布获得临界值 $F_\alpha(k, n - k - 1)$ 。当 $F > F_\alpha(k, n - k - 1)$ 时, 认为 y_i 所组成的矩阵与 x_{in} 所组成的矩阵之间存在线性相关关系, 所建立的线性回归方程是显著的, 否则该线性回归方程是不显著的。

1.3 多重共线性分析

多重共线性是指多元回归模型的自变量间存在近似线性关系, 其使估计精确性大幅度降低, 估计值稳定性变差, 甚至导致部分回归系数无法通过显著性检验; 正负号倒置, 无法从回归方程中得到合理物理意义解释, 降低回归方程的应用价值。因此采用基于方差因子膨胀法的多重共线性诊断。

2 影响泄漏电流幅值的多元线性回归模型的建立

2.1 自变量选取

由于所研究的避雷器均在东部沿海地区,温湿度等对避雷器工作环境有着重要的影响,且 A、B、C 三相同时受外界环境干扰。以 A 相泄漏电流幅值为例进行分析,泄露电流的测量元件采用精密电流互感器,误差不超过 0.5%。自变量选取可以通过画散点图与趋势线相结合的方式来实现^[20]。假设 X_1 为温度数据, X_2 为湿度数据, X_3 为光照数据, X_4 为大气压强数据, $X_1 \sim X_4$ 是自变量, Y 为 A 相泄漏电流基波幅度,为因变量。图 1—图 4 分别为 A 相泄漏电流基波幅度与各影响因素的散点图与趋势线。

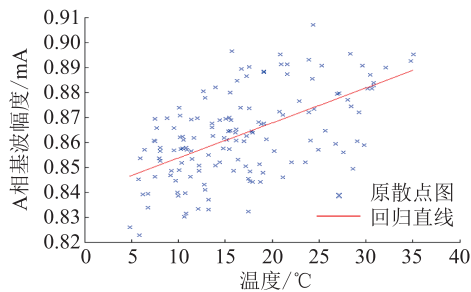


图 1 A 相泄漏电流基波幅度与温度

Fig.1 A-phase leakage current fundamental amplitude and temperature

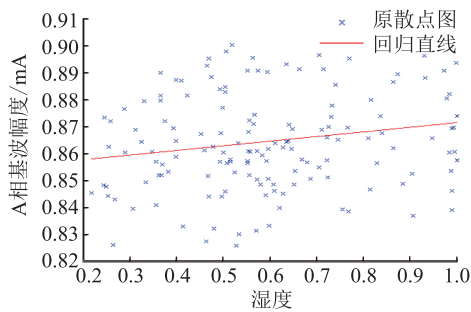


图 2 A 相泄漏电流基波幅度与湿度

Fig.2 A-phase leakage current fundamental amplitude and humidity

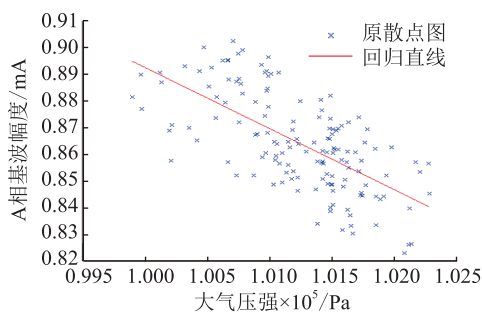


图 3 A 相泄漏电流基波幅度与大气压强

Fig.3 A-phase leakage current fundamental amplitude and atmospheric pressure

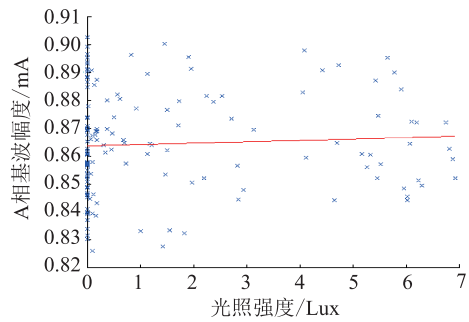


图 4 A 相泄漏电流基波幅度与光照强度

Fig.4 A-phase leakage current fundamental amplitude and light intensity

通过分析图 1—图 4 可知,大气压强对 A 相泄漏电流基波幅度呈现反向线性关系,温度与湿度对 A 相泄漏电流基波幅度呈现正向线性关系,光照强度对 A 相基波幅度几乎无影响。其中,温度与大气压强对 A 相基波幅度的影响尤其显著,湿度对 A 相基波幅度线性关系影响次之。先保留上述所有影响因素,通过下一步观察各趋势线信息来综合确定影响因素的引入。

表 1 列出各趋势线的详细信息。趋势线是数据趋势的图形表示形式,由最小二乘法原理获得,这些趋势线的可靠性用 R^2 (拟合度) 进行描述,当 R^2 越接近 1 时,趋势线越可靠。

表 1 各趋势线信息

Table 1 Trend line information

因变量	自变量	R^2	标准误差	P 值(显著性)
Y	X_1	0.346 0	0.014 3	7.25×10^{-15}
Y	X_2	0.038 9	0.016 2	0.015 5
Y	X_3	0.003 8	0.018 0	0.455 0
Y	X_4	0.433 0	0.013 5	1.85×10^{-19}

通过分析表 1 中各影响因素趋势线的详细信息可知,除光照强度 X_3 趋势线的 R^2 较低外,其他趋势线 R^2 都较为理想, P 值(显著性)均十分显著,因此将 X_1, X_2, X_4 作为引入模型的输入变量。

2.2 利用最小二乘法建立多重回归模型

如表 1 所列, X_1, X_2, X_4 趋势线信息显著性满足 $P \leq 0.05$ 时有意义。利用 MATLAB 对以上 3 个变量建立多元线性回归模型,模型 1 以温度、湿度与大气压强作为自变量,模型 2 以温度与湿度作为自变量,模型 3 以温度与大气压强作为自变量,而模型 4 以湿度与大气压强作为自变量,所获得的结果如表 2、表 3 所列。

表 2 拟合优度检验分别列出模型的 R 值(决定系数)、 R^2 值、调整的 R^2 值以及标准估计误差。 R^2 值越大,反映 2 个变量的共变量比率越高,模型与数

表2 拟合优度检验
Table 2 Goodness-of-fit test

模型	R	R^2	调整后 R^2	均方根误差
1	0.758 3	0.575	0.566	0.019 0
2	0.743 0	0.552	0.546	0.012 2
3	0.672 3	0.452	0.445	0.013 4
4	0.679 0	0.461	0.454	0.013 3

表3 回归系数的最小二乘法估计结果

Table 3 Least squares estimation results of regression coefficients

变量	B	标准误差	P 值(显著性)
常量	0.799 350 0	0.287 150 00	$1.853 7 \times 10^{-160}$
X_1	0.002 051 1	0.000 158 56	$6.978 6 \times 10^{-26}$
X_2	0.051 011 0	0.005 587 90	$5.714 9 \times 10^{-16}$

据的拟合程度越好。观察表2可知,基于湿度与大气压强所建立的多元线性回归模型拟合度不超过0.5,而利用3个变量所建立的多元线性回归模型拟合度,与根据温度与湿度所建立的多元线性回归模型拟合度几乎相同,说明利用温度与湿度拟合的线性模型就足以表征该线性曲线。

表3中 B 是拟合函数的系数,利用表3中模型各自变量的回归系数,建立基于最小二乘法的回归模型:

$$Y = 0.799 35 + 0.002 051 1X_1 + 0.051 011X_2 \quad (4)$$

2.3 多重共线性诊断

采用基于方差膨胀因子的多重共线性诊断,考虑到自变量 X_i 与其余自变量的多元线性回归相关,计算该模型的判定系数,并将其定义为第 i 个自变量的方差膨胀因子:

$$V_i = \frac{1}{1 - R_i^2} \quad (5)$$

当自变量 X_i 存在依赖于其他自变量的线性关系时, R_i^2 接近于1,则 V_i 趋向于无穷大;反之, R_i^2 接近于0,则 V_i 趋向于1。 V_i 越大说明线性依赖关系越严重,即存在共线性。通常情况下,基于方差膨胀因子的多重共线性诊断规则为:当 $V_i < 5$,认为不存在共线性(或共线性较弱);当 $5 \leq V_i \leq 10$,认为存在中等程度共线性;当 $V_i > 10$,认为共线性严重。表4为利用方差膨胀因子法得到的温湿度共线性关系。观察各变量的 V 值均小于2,说明解释变量之间共线性并不强,几乎没有共线性关系。

3 模型预测结果

将之后10 d的实测数据与以温湿度为自变量

表4 温湿度方差膨胀因子

Table 4 Temperature and humidity variance inflation factors

自变量	V
X_1	1.331 9
X_2	1.331 9

的回归模型预测数据进行比对,实测数据与预测数据示意图如图5—图7所示。

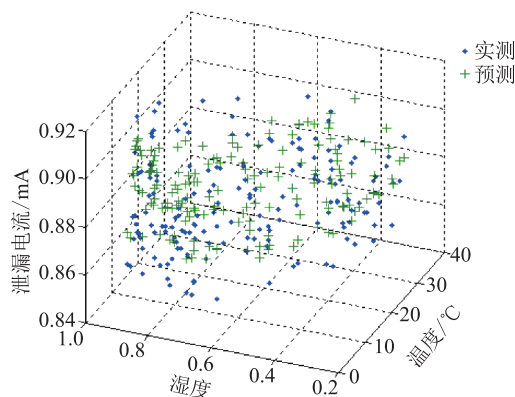


图5 实测与预测数据散点图

Fig.5 Measured and predicted data scatter plot

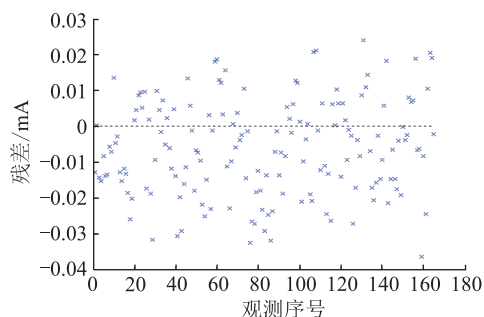


图6 残差值序列图

Fig.6 Residual difference sequence

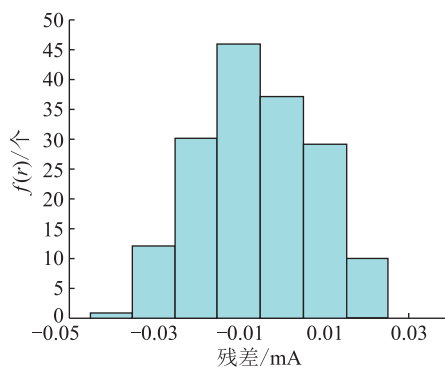


图7 残差分布

Fig.7 Residual distribution diagram

通过图6可知,残差值随机在水平轴 $y = 0$ 上下不规则的波动,说明残差值间相互独立,最大残差值在0.03 mA左右,占绝对数值0.8 mA的3.75%。可见,模型预测结果与真实数据的误差很小,且残

差的分布也近似满足正态分布。图7为残差分布图,描述了残差区间与测量数据个数 $f(r)$ 的关系,分布也近似正态分布。由此可知,当数据量足够大时,均值误差也会变得很小。

4 结语

通过对影响避雷器泄漏电流的环境因素进行分析,建立了基于温度与湿度的多元线性回归模型,并利用该模型对避雷器的泄漏电流进行预测。实验结果表明,模型预测精度较高,可方便将实测泄露电流值校正为统一温湿度下的泄露电流值,该方法在避雷器故障判断与分析方面,具有较高的工程实用价值。

参考文献:

- [1] 贾逸梅,栗福珩. 在线监测氧化锌避雷器泄漏电流的方法[J]. 高电压技术, 1991(3): 30-35.
JIA Yimei, LI Fuheng. Method for monitoring leakage current of zinc oxide arrester online[J]. High Voltage Engineering, 1991(3): 30-35.
- [2] 李晓,谢剑翔. 220 kV 老旧避雷器泄漏电流超标的诊断分析[J]. 广东电力,2017,30(8):113-116.
LI Xiao, XIE Jianxiang. Diagnostic analysis on over-standard of leakage current of 220 kV old arrester[J]. Guangdong Electric Power, 2017,30(8):113-116.
- [3] 周原,董秋灵,江晓敏,等. 一起避雷器退运解体试验及数据对比分析[J]. 广东电力,2017,30(2):137-142.
ZHOU Yuan, DONG Qiuling, JIANG Xiaomin, et al. Analysis and data comparison for out-of-service and disassembly experiments on arrester[J]. Guangdong Electric Power, 2017,30(2): 137-142.
- [4] 施景垒,肖雷,陈平春,等. 一起避雷器隐患的发现与缺陷分析[J]. 电力工程技术, 2016, 35(2): 84-86.
SHI Jinglei, XIAO Lei, CHEN Pingchun, et al. Detection and analysis of a hidden defect [J]. Electric Power Engineering Technology, 2016, 35(2):84-86.
- [5] 王静君,李文书,杜积贵. 氧化锌避雷器带电测试方法应用分析[J]. 电力工程技术, 2013, 32(2): 57-59.
WANG Jingjun, LI Wenshu, DU Jigui. Applications and analysis of hot line detecting methods for MOA [J]. Electric Power Engineering Technology, 2013. 32(2): 57-59.
- [6] 甘强,陈轩,邵新苍,等. 基于电压补偿原理的避雷器泄漏试验方法研究[J]. 电力工程技术, 2014, 33(4): 66-68.
GAN Qiang, CHEN Xuan, SHAO Xincang, et al. Research on arrester leakage test based on voltage compensation[J]. Electric Power Engineering Technology, 2014, 33(4): 66-68.
- [7] 郭磊,张科,陈瑞,等. 金属氧化物避雷器状态评价方法及应用分析[J]. 电瓷避雷器, 2013(6): 95-99.
GUO Lei, ZHANG Ke, CHEN Rui, et al. State evaluation method and application analysis of metal oxide arresters[J]. Insulators and Surge Arresters, 2013(6): 95-99.
- [8] 秦娜. 氧化锌避雷器在线监测数据处理方法的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2003.
QIN Na. Study on data processing method of on-line monitoring ZnO surge arresters [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2003.
- [9] 陈锡磊,杨科,何整杰,等. 电流分布不均匀性对多柱并联 ZnO 避雷器能量吸收能力的影响[J]. 陕西电力,2017,45(3):82-85.
CHEN Xilei, YANG Ke, HE Zhengjie, et al. Influence of current distribution inhomogeneity on energy absorption capacity of multi-column parallel ZnO arrester[J]. Shaanxi Electric Power, 2017,45(3):82-85.
- [10] 孙科. 基于相角差法 MOA 在线监测数学模型的研究[D]. 成都:西南交通大学, 2008.
SUN Ke. Investigation of the MOA's model on-line monitoring based on phase difference method [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2008.
- [11] 朱宝森,宋瑶,魏新劳. 基于电压过零点电流幅值分析的 MOA 阻性电流提取方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(16):165-172.
ZHU Baosen, SONG Yao, WEI Xinlao. An extracting method based on analysis of current magnitude at zero-point of voltage for resistive current of MOA [J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(16): 165-172.
- [12] 丁国成. 金属氧化物避雷器在线监测的基础研究[D]. 河北:华北电力大学, 2006.
DING Guocheng. Fundamental study of on-line monitoring for metal oxide surge arrester [D]. Hebei: North China Electric Power University, 2006.
- [13] 徐志钮,赵丽娟,丁傲,等. 一种新的 MOA 阻性电流提取算法[J]. 电力自动化设备, 2010, 30(12):47-51.
XU Zhiniu, ZHAO Lijuan, DING Ao, et al. Calculation of MOA resistive current[J]. Electric Power Automation Equipment, 2010, 30(12): 47-51.
- [14] 彭鹏,彭佳红. 基于多元线性回归模型的电力负荷预测研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2011, 7(9): 158-161.
PEN Peng, PEN Jiahong. Research on the prediction of power load based on multiple linear regression model [J]. China Safety Production Science and Technology, 2011, 7(9): 158-161.
- [15] 田娟,董贵明. 基于多元线性回归的地下水开采可靠度模型[J]. 水电能源科学, 2011, 29(1): 43-44.
TIAN Juan, DONG Guiming. Multiple remote power control system based on SOC system[J]. Water Resources and Power, 2011, 29(1): 43-44.
- [16] 付倩娆. 基于多元线性回归的雾霾预测方法研究[J]. 计算机科学, 2016, 43(6A): 526-528.
FU Qianrao. Research on haze prediction based on multivariate linear regression [J]. Computer Science, 2016, 43(6A): 526-528.
- [17] 陈振林,许晔. 基于多元线性回归分析的高精度温度测量[J]. 电子测量与仪器学报, 2000, 14(3): 9-12.

- CHEN Zhenlin, XU Ye. Measuring technology on displacement in the process of high frequency vibration [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2000, 14(3): 9-12.
- [18] 周晨,冯宇东,肖匡心,等. 基于多元线性回归模型的东北地区需水量分析[J]. 数学的实践与认识, 2014, 44(1): 118-123.
- ZHOU Chen, FENG Yudong, XIAO Kuangxin, et al. Research on water requirement in northeast area based on multiple linear regression model[J]. Journal of Mathematics in Practice and Theory, 2014, 44(1): 118-123.
- [19] 陈海鹏,卢旭旺,申铨京,等. 基于多元线性回归的螺纹钢价格分析及预测模型[J]. 计算机科学, 2017, 44(11A): 61-64.
- CHEN Haipeng, LU Xuwang, SHEN Xuanjing, et al. Analysis and prediction on rebar price based on multiple linear regression model [J]. Computer Science, 2017, 44(11A): 61-64.
- [20] 田久乐,赵蔚. 基于同义词词林的词语相似度计算方法[J]. 吉林大学学报(信息科学版), 2010, 28(6): 602-608.
- TIAN Jiule, ZHAO Wei. Words similarity algorithm based on synonym word forest [J]. Journal of Jilin University (Information Science Edition), 2010, 28(6): 602-608.

作者简介:



衡思坤

衡思坤(1963),男,学士,研究员级高级工程师,从事高压电气设备技术管理和在线监测技术研究及应用工作(E-mail: lyghsk2002@163.com);

王琛(1984),男,学士,工程师,从事电网运检工作(E-mail:wangchen5537@126.com);

张自伟(1985),男,硕士,高级工程师,从事电力系统分析与管理工作。

Influence of environmental factors on the leakage current of arrester

HENG Sikun¹, WANG Chen¹, ZHANG Ziwei¹, ZHEN Xulin¹, GAO He², ZHOU Guangyu¹

(1. State Grid Lianyungang Power Supply Company, Lianyungang 222003, China;

2. State Grid Jiangsu Electric Power Co., Ltd. Lianyungang Maintenance branch, Lianyungang 222003, China)

Abstract: Leakage current amplitude of lightning arrester is affected by ambient weather conditions. The model of leakage current is significance for health diagnosis of lightning arrester. In this paper, a model of leakage current of lightning arrester is established with multiple linear regression and ambient weather analysis. Firstly, the factors effect on the leakage current is collected. These factors include ambient temperature, humidity, atmospheric pressure and light intensity. Then, the factors are analyzed by using scatter diagram and trend line and the multiple linear regression model of leakage current is given with the least square. This proposed model is diagnosed with the varianceinflationfactor. Finally, the proposed model is used to predict the leakage current of lightning arrester for next ten days. The predicted results show that the proposed model have high accuracy and can be used in actual engineering.

Keywords: multiple linear regression; leakage current amplitude; least square; varianceinflationfactor

(编辑 杨卫星)