

基于漏电流与湿度关系辨识的供电线路绝缘状态评估

李毅¹, 熊小伏², 黄明¹, 杜向阳², 王浩宁¹, 陈星田³, 韩俊峰³

¹国网重庆市电力公司武隆供电分公司, 重庆

²输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室(重庆大学), 重庆

³重庆元虎科技有限公司, 重庆

Email: 498138306@qq.com

收稿日期: 2021年1月21日; 录用日期: 2021年2月13日; 发布日期: 2021年2月24日

摘要

目前农村电网多采用三级漏电保护模式, 分别安装在公用变压器、电表箱和客户端, 或跳过电表箱的二级漏电保护模式。由于线路环境复杂和施工不规范, 且山区农村电网易受到泥石流, 树木折断倾轧等自然灾害影响, 输电线路时常发生漏电、短路等故障情况。因此, 有必要考虑环境因素对农村电网供电线路绝缘状态的影响。本文基于环境湿度对漏电流的影响, 提出了一种供电线路绝缘状态评估方法, 并通过算例分析方法的有效性进行了验证, 为漏电保护的发展提供了参考价值。

关键词

状态评估, 漏电流, 线路绝缘, 湿度

Evaluation of Insulation Status of Power Supply Line Based on Identification of Relationship between Leakage Current and Humidity

Yi Li¹, Xiaofu Xiong², Ming Huang¹, Xiangyang Du², Haoning Wang¹, Xingtian Chen³, Junfeng Han³

¹State Grid Chongqing Electric Power Co., Wulong Power Supply Branch Company, Chongqing

²State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology (Chongqing University), Chongqing

³Chongqing Yuanhu Technology Co., Ltd., Chongqing

文章引用: 李毅, 熊小伏, 黄明, 杜向阳, 王浩宁, 陈星田, 韩俊峰. 基于漏电流与湿度关系辨识的供电线路绝缘状态评估[J]. 智能电网, 2021, 11(1): 39-46. DOI: 10.12677/sg.2021.111005

Abstract

At present, the rural power grid mostly adopts the three-level leakage protection mode, which is installed in the public transformer, meter box and client respectively, or skipping the two-level leakage protection mode of meter box. As the line environment is complex and the construction is not standard, and the rural power net ease in mountainous areas is affected by natural disasters such as debris flow and trees breaking and rolling, etc., the power transmission lines often suffer from leakage, short circuit and other faults. Therefore, it is necessary to consider the influence of environmental factors on the insulation state of rural power supply lines. Based on the influence of environmental humidity on leakage current, this paper puts forward a method for evaluating the insulation status of power supply lines, and verifies the effectiveness of the method through an example analysis, which provides reference value for the development of leakage protection.

Keywords

Status Assessment, Leakage Current, Line Insulation, Humidity

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

在低压配电线路上安装漏电保护开关是安全用电的有效措施。随着我国农村电网建设和电力市场的不断发展,电网公司和电力用户都对系统的安全性和可靠性提出了更高的要求。因此,为确保电网的稳定运行,促进我国农村的快速发展,有必要对如何提高漏电保护灵敏度、实现线路绝缘状态的准确评估进行关键方法研究。

漏电保护是低压用电保护中的一项重要保护技术[1],广泛用于防止漏电火灾和防止人身触电伤亡事故的发生。随着漏电保护技术的应用,单一的保护功能不能满足实际需要,对漏电保护的有效性、可靠性要求也越来越高[2][3]。目前,已有许多学者在该方面进行了大量研究[4][5]。常用的漏电保护器件主要分为三个类型,分别是电压型、电流型和脉冲型三种[6][7],电压型主要是对电力传输过程中的电压进行检测,电流型漏电保护器可以对线路实行分级保护[8],脉冲型电流保护器主要指防止突然漏电的情况[9]。为了减少人身触电事故发生,目前农村低压电网最常用的是电流型漏电保护器,此类保护器通过检测零序电流的大小,与设定电流值对比来工作。由于剩余电流不仅包含漏电电流,还包含容性电流,该种检测技术具有局限性,检测结果具有较大误差,对此,文献[10][11]提出了一种新型的检测技术——阻性漏电电流检测技术。然而在实际生产生活中,由于低压电网存在各种漏电因素,如接线错误、谐波影响以及三相负载不平衡等,零序电流通常会瞬间增加几百或几千毫安,如果漏电保护器运行档位设定在强调人身保护效果的最小电流动作值,则保护器会频繁动作,无法正常供电[12][13],供电可靠性与保障人身安全两者存在着无法兼容的矛盾。因此,为了解决上述传统总漏电保护器频繁跳闸、复电时间长的

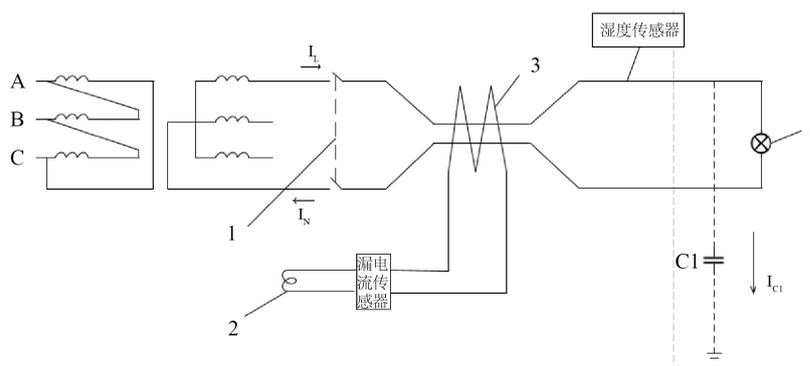
问题,文献[14]提出使用低压电网智能化远程控制系统。文献[15]根据当前漏电保护器应用现状,对人体触电典型特征数据进行了采集,对在农村低压电网中应用新型漏电保护器的方式方法进行了分析和研究。

现有漏电保护模型更侧重于中单一特征量的变化规律,难以反映长时环境等因素对线路漏电流的影响。针对这一问题,本文提出了一种基于漏电流与环境湿度关系辨识的供电线路绝缘状态评估方法。该方法有效评估了环境湿度对供电线路漏电流的影响程度,为判断供电线路绝缘的真实状态提供了参考依据。

2. 算法描述

2.1. 系统设计思路

漏电保护器俗称漏电开关,是指用于 1 kV 以下低压配电系统中电路或电器因绝缘受损而发生对地短路时防人身触电和电气火灾的保护电器。三相供电线路的环境湿度与漏电流测量原理如图 1 所示,其中,湿度传感器用于测量三相供电线路周围的环境相对湿度。关键部件是漏电流传感器,它由铁芯和绕在铁芯上二次线圈组成检测元件,电源相线和中性线穿过环形铁心构成了互感器的一次线圈 N1,缠绕在环形铁芯上的绕组构成了互感器的二次线圈 N2。C1 为配电系统相线的对地电容,当通电时,相线的电流将分为二路:一路通过电容流向大地,另一路通过负载流回。正常情况下,通过漏电流传感器一次线圈电流的相量和为零,二次侧感应电流也为零;当用电设备绝缘损坏发生漏电时,漏电流传感器一次线圈流过电流的向量和不等于零[16],当二次侧感应电流达到漏电动作电流时,便会通过漏电脱扣器使开关迅速自动断开电源,从而起到漏电保护作用。环境湿度对接地电容 C1 的影响在于,环境湿度越大,电容的介电常数越大,相应的电容 C1 值越大,从而使得通过接地电容流向大地的电流 I_{C1} 越大,最终使得通过相线的电流与通过零线的电流差,即泄漏电流越大[17]。



1. 断路器; 2. 漏电脱扣器; 3. 电流互感器; 4. 负载

Figure 1. Schematic diagram of leakage current measurement for three-phase power supply line

图 1. 三相供电线路的漏电流测量原理图

基于漏电流与环境湿度关系辨识的供电线路绝缘状态评估流程如图 2 所示。首先,监测并统计过去一年某地区三相供电线路的环境湿度以及漏电流的数据,再基于最小均方二乘拟合得到漏电流关于环境湿度的拟合目标曲线。

2.2. 基于最小二乘法的评估模型建立

最小二乘拟合函数法适用于对某一过程进行实时不间断模拟和预测未知值,因此,可用于对供电线路的绝缘状态评估。基于供电线路漏电流与湿度关系辨识的供电线路绝缘状态评估步骤如下:首先,利

用湿度传感器、漏电传感器获取供电设备的环境湿度数据和漏电流数据，通过积累得到近一年的环境湿度和漏电流数据，如表 1 所示(仅显示前 3 个月数据)，其中环境湿度单位为%，漏电流单位为 μA ；其次，利用 Matlab 对环境湿度和漏电流进行拟合，得到目标的拟合轨迹和函数方程；最后，设定评估状态的临界值，对一定环境湿度下供电线路产生的漏电流进行评估，由此确定三相供电线路的绝缘状态。



Figure 2. Leakage protection evaluation process algorithm

图 2. 漏电保护评估流程算法

Table 1. Ambient humidity and leakage current raw data

表 1. 环境湿度与漏电流原始数据

时间	1-1	1/2	1/3	1/4	1/5	1/6	1/7	1/8	1/9	1/10
湿度	68	73	74	83	78	78	78	75	84	85
漏电流	250	250	300	340	320	320	310	260	360	360
时间	1/11	1/12	1/13	1/14	1/15	1/16	1/17	1/18	1/19	1/20
湿度	88	86	81	79	79	80	82	84	89	86
漏电流	400	360	300	300	310	300	350	360	390	410
时间	1/21	1/22	1/23	1/24	1/25	1/26	1/27	1/28	1/29	1/30
湿度	76	79	84	88	70	74	68	73	74	76
漏电流	280	280	360	380	270	280	250	250	260	260
时间	2/1	2/2	2/3	2/4	2/5	2/6	2/7	2/8	2/9	2/10
湿度	88	87	87	87	84	83	78	78	79	80
漏电流	400	410	380	370	350	340	320	310	320	330
时间	2/11	2/12	2/13	2/14	2/15	2/16	2/17	2/18	2/19	2/20
湿度	88	87	87	87	84	83	78	78	79	80
漏电流	400	410	380	370	350	340	320	310	320	330
时间	2/21	2/22	2/23	2/24	2/25	2/26	2/27	2/28	2/29	2/30
湿度	88	86	81	79	79	80	82	84	89	86
漏电流	400	360	300	300	310	300	350	360	390	410
时间	3/1	3/2	3/3	3/4	3/5	3/6	3/7	3/8	3/9	3/10
湿度	76	79	84	88	70	74	68	73	74	76
漏电流	280	280	360	380	270	280	250	250	260	260

Continued

时间	3/11	3/12	3/13	3/14	3/15	3/16	3/17	3/18	3/19	3/20
湿度	68	73	74	83	78	78	78	75	84	85
漏电流	250	250	300	340	320	320	310	260	360	360
时间	3/21	3/22	3/23	3/24	3/25	3/26	3/27	3/28	3/29	3/30
湿度	88	86	81	79	79	80	82	84	89	86
漏电流	286	330	289	352	299	305	400	402	395	320

由表 1 中得到的数据, 假设三相供电线路的漏电流 y 是环境湿度 x 的函数, 即 $y = f(x)$, 令

$$f(x) = a_1 r_1(x) + a_2 r_2(x) + \dots + a_m r_m(x) \quad (1)$$

其中, $r_j(x)$ 是选定的一组线性无关的函数, a_j 是待定系数 ($j=1, 2, \dots, m$, $m < n$, n 为观测点的个数, m 为线性无关组中元素个数)。记

$$J(a_1, a_2, \dots, a_m) = \sum_{l=1}^n |f(x_l) - y_l|^2 \quad (2)$$

为选取合适的 a_1, a_2, \dots, a_m , 使 J 达到最小, 需利用极值的必要条件 $\frac{\partial J}{\partial a_k} = 0$ ($k=1, 2, \dots, m$), 得到关于 a_1, a_2, \dots, a_m 的线性方程组:

$$\sum_{l=1}^n r_j(x_l) \left[\sum_{p=1}^m a_p r_p(x_l) - y_l \right] = 0, j=1, 2, \dots, m \quad (3)$$

即

$$\sum_{p=1}^m a_p \left[\sum_{l=1}^n r_j(x_l) r_p(x_l) \right] = \sum_{l=1}^n r_j(x_l) y_l, j=1, 2, \dots, m \quad (4)$$

记

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} r_1(x_1) & \dots & r_m(x_1) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_1(x_n) & \dots & r_m(x_n) \end{bmatrix}_{n \times m}, \mathbf{A} = [a_1, a_2, \dots, a_m]^T, \mathbf{Y} = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T \quad (5)$$

此时, 方程组(4)可表示成

$$\mathbf{R}^T \mathbf{R} \mathbf{A} = \mathbf{R}^T \mathbf{Y} \quad (6)$$

当选取的函数 $\{r_1(x), r_2(x), \dots, r_m(x)\}$ 线性无关时, $\mathbf{R}^T \mathbf{R}$ 可逆, 于是方程组(6)有唯一解

$$\mathbf{A} = (\mathbf{R}^T \mathbf{R})^{-1} \mathbf{R}^T \mathbf{Y} \quad (7)$$

由 Matlab 拟合后可得, $a_1 = 0.1714$, $a_2 = -19.83$, $a_3 = 802.6$, 从而得到三相供电线路的漏电流 y 和环境湿度 x 的函数, 即 $f(x) = 0.1714x^2 - 19.83x + 802.6$ 。

3. 算例分析

3.1. 三相绝缘状态的判别

由上述算法可得到目标漏电流与环境湿度的函数关系, 即目标的拟合方程[18], 结果如图 3 所示。

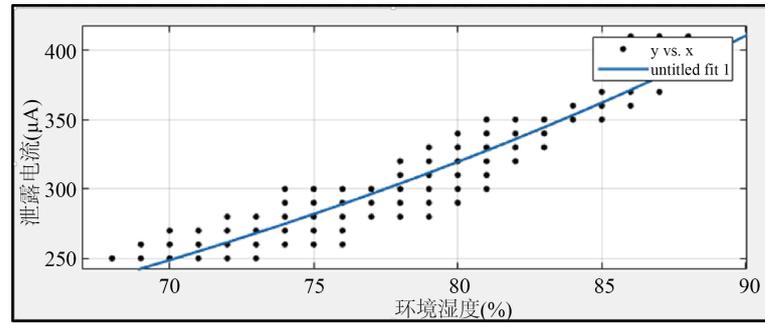


Figure 3. The fitting equation of environmental humidity and leakage current
图 3. 环境湿度与漏电流拟合方程

在三相供电线路的不同地点测量环境湿度与漏电流值，分别进行上述算法拟合，得到三组不同的相关系数，如表 2 所示[19]。

Table 2. Correlation between leakage current and ambient humidity
表 2. 泄漏电流与环境湿度的相关性

(-1 ≤ 相关系数 ≤ 1)				
地点	I1	I2	I3	I _{平均}
湿度	0.9412	0.8975	0.9213	0.9200

对供电线路绝缘状态进行评估，由湿度传感器测得的实际环境湿度为 W (%)，由漏电流传感器测得的漏电流为 i_0 (μA)，由图 3 可知此时环境湿度 W (%)对应的漏电流值为 i'_0 (μA)。令 $\hat{\delta}(m) = i_0 - i'_0$ ，设定 $\hat{\delta}(m)$ 的临界值为 $\hat{\delta}_{zd}$ ，其中由于目标拟合轨迹均是在绝缘正常情况下拟合得到的，故而临界值可设定为所有原始数据点在垂直方向上距离曲线的最大值。评估判据如下：

case1: 若 $i_0 > i'_0$ 且 $\hat{\delta}(m) > \hat{\delta}_{zd}$ ，则三相供电线路绝缘异常；

case2: 若 $i_0 \leq i'_0$ 时或 $i_0 > i'_0$ 且 $\hat{\delta}(m) \leq \hat{\delta}_{zd}$ ，则三相供电线路绝缘正常。

上述评估方法充分考虑了环境湿度与漏电流的测量误差，由算例分析结果可知，相关系数维持在 0.9 左右，符合相关系数按照 0.8~1.0 为强相关这一标准，因此，该漏电监测效果稳定，可为低压漏电检测提供参考依据。

3.2. 有效性验证

基于表 1 数据和图 3 拟合曲线，验证本文所提评估方法的有效性。未来某一周该地区三相供电线路湿度 W (%)和漏电流 i_0 (μA)数据如表 3 所示[20]，可验证其三相供电线路绝缘是否正常。

Table 3. Humidity and leakage current data of three-phase power supply line in this area in the coming week
表 3. 未来某一周该地区三相供电线路湿度和漏电流数据

	第一天	第二天	第三天	第四天	第五天	第六天	第七天
湿度	85	78	89	84	77	86	90
漏电流	330	320	400	360	280	340	500

由农村低压电网三相供电系统当天实际的情况可知，该周内，第一至六天线路均绝缘良好，漏电保护装置不动作；第七天线路绝缘损坏，脱扣器动作，切断电路。

表3中给出的数据即为当天的三相供电线路的环境湿度值 W (%)及供电线路的实际漏电流值 i_0 (μA)，由图3的拟合曲线可得到环境湿度 W (%)对应的拟合漏电流值 i'_0 (μA)。拟合曲线中，各数据点垂直方向距离曲线的最大值为 80 (μA)，故而绝缘状态评估的临界值 δ_{zd} 为 80 (μA)。

前六天中 $|\delta(m)| = |i_0 - i'_0| \leq 80$ ；第七天中 $i_0 > i'_0$ 且 $|\delta(m)| = |i_0 - i'_0| > 80$ ，即前六天中线路绝缘正常，第七天线路绝缘损坏，脱扣器动作，故而拟合曲线与实际情况相符合。

4. 总结

本文根据实际农村电网的漏电保护要求和农村用电安全，提出了基于供电线路漏电流与湿度关系辨识的供电线路绝缘状态评估，该方法逻辑简单且稳定性好，对于提升农村电网漏电保护可靠性具有良好的匹配效果。结果表明：环境湿度与漏电流的相关系数维持在 0.9 左右，可以准确反映出环境湿度变化时所引起的线路漏电流变化，一旦发生漏电或触电事故时，漏电流达到其事先设定的动作电流值，就会立即跳闸、断电，对农村漏电保护的监测和评估具有重要参考意义。

参考文献

- [1] 齐俊奎. 低压配电系统中漏电保护[J]. 装备制造, 2010(4): 275.
- [2] 肖建英. 漏电保护在电气安全方面的应用[J]. 电子技术与软件工程, 2019(12): 228.
- [3] 柳玉高. 浅析低压漏电保护器在供电系统中的应用[J]. 电子制作, 2014(6): 232.
- [4] 王平. 一种改进式新型漏电保护器的设计[J]. 电工电气, 2017(5): 68-70.
<http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1007-3175.2017.05.019>
- [5] 刘理云, 刘日新. 一种智能选择性漏电保护系统的设计[J]. 自动化与仪器仪表, 2015(11): 186-187.
<http://dx.chinadoi.cn/10.14016/j.cnki.1001-9227.2015.11.186>
- [6] 林康. 漏电保护器在低压供电线路中的选择与应用[J]. 自动化与仪器仪表, 2017(12): 145-146.
<http://dx.chinadoi.cn/10.14016/j.cnki.1001-9227.2017.12.145>
- [7] 邓广龙. 低压供电线路中漏电保护器的应用研究[J]. 科技创新与应用, 2016(13): 175.
- [8] 韦桂丘. 浅谈漏电保护器的应用[J]. 大众科技, 2016, 18(1): 50-51+54.
<http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1008-1151.2016.01.017>
- [9] 武明, 蒋维成. 从两起漏电事故看漏电保护器与安全用电的关系[J]. 电气时代, 2014(2): 50-51.
- [10] 吴兵. 新型漏电检测技术在低压配电系统中的应用[J]. 工程技术研究, 2019, 4(15): 223-224.
- [11] 王德坤. 新型低压配电系统阻性漏电电流检测技术[J]. 建筑电气, 2018, 37(2): 62-64.
<http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1003-8493.2018.02.013>
- [12] 陈文才. 浅析漏电保护器在农网使用管理中存在的问题及对策[J]. 水利科技与经济, 2008, 14(2): 106-108.
<http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1006-7175.2008.02.008>
- [13] 向冬. 农网管理中漏电保护器存在的问题及对策探讨[J]. 广东科技, 2013, 22(20): 37-38.
<http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1006-5423.2013.20.022>
- [14] 陈晟, 黄杰. 低压电网智能化远程控制系统在山区农村台区的应用[J]. 制造业自动化, 2012, 34(18): 143-145.
- [15] 郑少雷. 漏电保护器在农村低压电网中的应用研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 华北电力大学, 2015.
- [16] 黄晓燕. 漏电电流的测试[J]. 科技资讯, 2010(19): 139. <http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1672-3791.2010.19.115>
- [17] 牛新渠. 电气设备和线路的对地电容对漏电保护器的影响[J]. 建筑工人, 2000(4): 16-17.
<http://dx.chinadoi.cn/10.3969/j.issn.1002-3232.2000.04.013>
- [18] 崔聪, 咸日常, 咸日明, 荣庆玉, 翟春恒, 梁东. 基于最小二乘法的 10kV 配电变压器空载损耗工艺系数研究[J]. 变压器, 2019, 56(5): 16-20.
- [19] Wang, J., Xi, Y., Fang, C., Cai, L., Wang, J. and Fan, Y. (2019) Leakage Current Response Mechanism of Insulator String with Ambient Humidity on Days Without Rain. *IEEE Access*, 7, 55229-55236.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2910660>
- [20] Meyer, L.H., Oliboni, C.R.P., Graziano, G.C., Mustafa, T.I.A.H., Almaguer, H.A.D., Molina, F.H., et al. (2011) A

Study of the Correlation of Leakage Current, Humidity and Temperature of 25 kV Insulators in Urban and Rural Areas. 2011 *Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Cancun, 16-19 October 2011, 398-402. <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2011.6232679>