

# Research on the Insulation Diagnosis Technology Based on the On-Line Monitoring Data of Electronic Transformers

Xin Zheng, Jun Li, Ming Lei, Lieqi Yan

State Grid Hubei Electric Power Company Measuring Center, Wuhan Hubei  
Email: shzhengxin@163.com

Received: Dec. 5<sup>th</sup>, 2017; accepted: Dec. 19<sup>th</sup>, 2017; published: Dec. 27<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

At present, the electronic transformer has been used in large scale because of its excellent performance. State Grid Corp will strive to solve the problem of reliability and accuracy of digital measurement in the "13th Five-Year" period. On-line monitoring system of the digital measurement primary equipment is a kind of methods measuring the insulation condition of equipment. And the deployment of the on-line monitoring system was lack of statistical judgment for the data collection before, so that the real-time situation of a device cannot be mastered by monitoring data. In this paper, we will focus on a kind of insulation diagnosis technology based on on-line monitoring data, and use the principle of statistical analysis to determine the insulation and life prediction of the equipment.

## Keywords

Electronic Instrument Transformer, On-Line Monitoring, Dielectric Loss, Expert Analysis System, Efficiency of Loss

---

# 基于电子式互感器在线监测数据的绝缘诊断技术研究

郑欣, 李俊, 雷鸣, 鄢烈奇

国网湖北省电力公司计量中心, 湖北 武汉  
Email: shzhengxin@163.com

收稿日期：2017年12月5日；录用日期：2017年12月19日；发布日期：2017年12月27日

## 摘要

目前，电子式互感器因其性能优越而得到大规模的使用。国家电网公司也力争在“十三五”期间解决数字化计量准确性及可靠性问题。对具有数字计量一次设备部署在线监测系统是一种直观得知设备绝缘情况的手段。而之前所部署的在线监测系统缺乏对采集回数据进行统计判断的研究，以至于不能通过监测数据来掌握一次设备的实时情况。本文将着重介绍一种基于在线监测数据的绝缘诊断技术，利用统计分析的原理来判断一次设备的绝缘及寿命预测问题。

## 关键词

电子式互感器，在线监测，介质损耗，专家分析系统，失效率

Copyright © 2017 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

电子式互感器在铁芯磁饱和、避免铁磁谐振等方面的突出特点，使其在国内智能变电站建设中得到广泛使用。而其绝缘性能一直成为关注的焦点。国家电网公司正着手解决以电子式互感器为代表的智能设备目前存在的检测方法、运维管理和溯源等一系列问题。

装载在电子式互感器上、或以电子式互感器为监测对象的在线监测系统也在近些年由研究领域转移到一定范围内的定点试用环节。总体来说在现阶段的数字式计量设备在线监测系统还处于初步发展阶段[1]。其中绝缘类的在线诊断方式大部分都是基于装设的传感器等设备在线传回的数据分析推断得来。

本文将描述一种基于电子式互感器在线监测系统采集回的数据，利用概率学的原理对其进行分析判断的方法。

## 2. 电子式互感器在线监测现状

在60年代，美国率先提出在线监测的概念[2]。加拿大在1975年研制在线监测油中气体的装置[3]。而日本早在80年代开始，就开始研究电气设备绝缘类监测手段和绝缘判断的数据分析工作。

数字化计量装置加装在线监测装置的研究及应用工作在我国才刚刚开始起步。在清华大学、西安交通大学、华中科技大学等国内著名大学有着很好的研究基础。国家电网公司和南方电网的许多省份都部署了电子式互感器在线监测装置。

之前高压电气设备在线监测系统主要监控的是影响高压设备绝缘寿命的关键信息，比如泄露全电流及其容性和阻性分量；变压器套管、电容式电压互感器的介质损耗等等[4]；电子式互感器的在线监测系统还需要涵盖其二次输出的数字信号、采样频率等数字化信息。

利用专家库、神经网络等智能诊断手段对带电设备进行绝缘特性分析，是在线监控系统重要研究内容。而这些分析判断工作都是基于一些离散的数据而进行的，往往误判率很高。本文提出一种基于概率统计的理论的数据分析方法，对采集回的离散数据进行统计分析。

### 3. 绝缘类监测对象

局部放电、介质损耗、绕组变形、泄漏电流和  $\text{SF}_6$  的密度及温湿度是电子式互感器监测的重要指标,也是研究运行中电气设备带电状态的主要方向。根据采集回的数据进行综合分析,得出其变化趋势,可以提早发现高压设备潜在威胁,并对剩余寿命进行预测。带电状态下监测这些电气量对于全过程掌控电气设备寿命有着重要的意义。

介质损耗(dielectric loss)由于导电或交变电场中极化弛豫过程在电介质中引起的能量损耗,由电能转变为类似于光能和热能等等形式的能量[5]。介质损耗在长时间的运行工作环境中,会不断对设备的绝缘介质造成影响,最终损害设备的安全。

#### 3.1. 介质损耗的表示方法

介质损耗可以分为电导损耗、极化损耗和电晕损耗等形式。总体来说,介质损耗是一种在高压设备绝缘层表面流过的电流与绝缘材料之间造成的电压降。监测介质损耗可以直观得知高压设备的绝缘发展变化情况。

在交流电周围的电场里面,电流和电压向量之间的功率因数夹角  $\Phi$ ,其正切值余角  $\delta$ ,简称介损角。正切值  $\tan\delta$  又可分为介质损耗因数,即指  $\delta$  角正切值,简称介损正切。介质损耗因数可以用有功功率和无功功率的比值来表示,其具体的定义如下:

$$\tan\delta = \frac{P}{Q} \quad (1)$$

#### 3.2. 介质损耗的监测原理

由电流、电压互感器传送的电流、电压信号  $U_i$ 、 $U_u$ ,如果不考虑分压器的相位误差, $U_u$  应该与  $U_i$  相位相差  $(90-\delta)^\circ$ ,因此  $U_u$  经过  $90^\circ$  移相后,  $U_u$  变成  $U'_u$ ,与  $U_i$  之间的夹角变成  $\delta$ 。具体示意图如图 1 所示。

电介质在交变电场的作用下,会在有功功率下产生热能消耗、在无功率作用下完成能量交换。而电介质损耗发热消耗能量后可能引起电介质的热击穿,从而监测同相分量和正交分量的正切值  $\tan\delta$ ,成为电力系统实时监控外绝缘情况的一个重要指标。

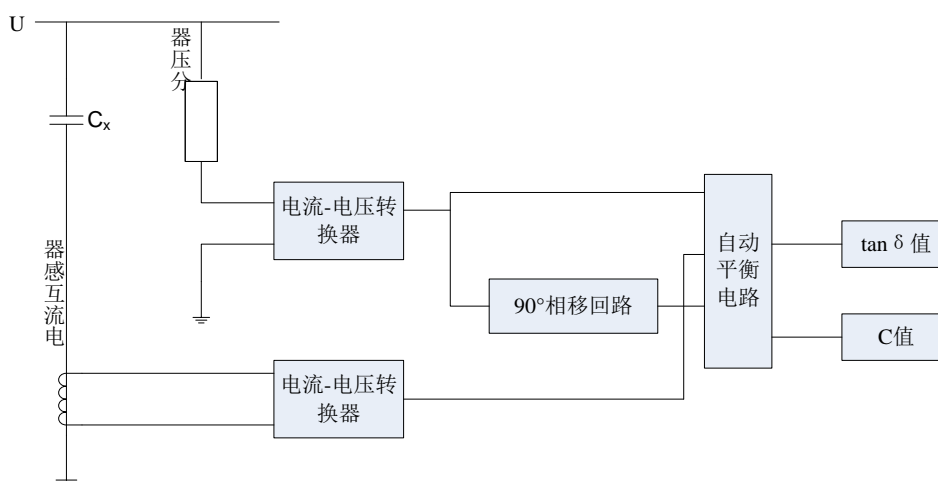


Figure 1. Schematic diagram of  $\tan\delta$  and C of dielectric dissipation

图 1. 介质损耗  $\tan\delta$ 、C 值在线监测原理图

### 3.3. 系统测量精度的相关问题

#### 3.3.1. 系统谐波

高压电力主干网上常常是充斥着各种频率的谐波。谐波的控制和治理是部署在线监测系统绕不开的话题。而电压谐波给  $\tan\delta$  的监测带来了不小的压力。可通过低通滤波除去高次谐波，将常见的谐波含量限制在 1.0% 以内[6]。

#### 3.3.2. 门电路的延时

在本文所描述的  $\tan\delta$  这种测量方法中，会使用到一些门电路来完成逻辑闭锁和逻辑信号转换。门电路的延时总数可以控制在  $1\ \mu\text{s}$  以内，对  $\tan\delta$  产生的误差不会超过 0.03%。

#### 3.3.3. 过零点的漂移

任何仪器在零点示值附近发生的系统误差，从而带来的测量不准确问题称为零点漂移[7]。当现场测量数据发生零点漂移的时候，可以通过调整接地点的位置和接地极的埋地深度来调整。或者通过交流信号正半周和负半周互相抵消来消除系统误差的方式来处理。

## 4. 绝缘诊断技术

### 4.1. 绝缘诊断技术概述

电气设备的绝缘诊断技术基于监测到的设备的绝缘信号信息，根据采集系统上的传感器采集回来的信号，对高压设备的绝缘状态进行分析和推理判断，找出故障的部件和严重损毁程度。然后根据分析出的结果得出设备剩余寿命和设备的维修策略，进一步得出设备的轮换维护时间表。可以在技术上得到在线监测设备绝缘状态，及时得出绝缘结论，给出分析统计报告[8]。

### 4.2. 现场测试数据

对于传统的介质损耗  $\tan\delta$  试验，根据有关试验数据表明， $\tan\delta$  值虽然已经达到标准允许值的 2~3 倍，仍不至于形成绝缘的损坏；但是在工作场所场强高、散热困难的情况下， $\tan\delta$  值虽只有标准值的 1.5 倍到 2 倍，引起绝缘损坏的概率大大增加。

根据 220 kV 舵落口变电站的舵宗一回的 A 相电流互感器为例，2006 年~2012 年的测试数据如表 1。

由测试数据看到测试数据的离散度很高，还包含了大量的试验误差。因此，不能依据单一来源的数据来判断设备的好坏。需要依据更加科学的方法来制定判别甄选策略。

Table 1. List of  $\tan\delta$

表 1.  $\tan\delta$  值列表

年份	$\tan\delta$ 值(%)
2006	2.8
2007	3.2
2008	3.8
2009	3.5
2010	2.6
2011	3.3
2012	2.9

### 4.3. 建立数学模型

首先在建立数学模型前，基于设备故障处理和轮换的现实情况，需要考察其提出方案的经济性。任何一个系统或设备都需要考虑两个指标：经济与技术。两个指标互相影响，互相作用，驱使人们在制定策略时在两者之间找到一个最佳方案。我们假定设备从开始工作到设备失效的一段时间为  $T$ ，由于产品失效是随机产生的，所以设失效关于随机变量的时间分布  $T$  函数为：

$$F(t) = P(T \leq t) \quad (2)$$

电子式互感器在现场运行多年，通过在线监控系统采集到的各个采样点对于失效设备的发生时间为  $t_1, t_2, t_3, \dots, t_n$ ，可以用这  $n$  个数的值来估算设备的平均寿命：

$$\bar{t} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n t_i \quad (3)$$

根据设备工作到时刻  $t$  后单位时间发生失效的概率  $\lambda(t)$  称为设备在时刻  $t$  的失效率函数[9]：

$$\lambda(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{1}{\Delta t} \cdot P, \text{ 在 } (t, t + \Delta t) \text{ 内失效} \quad (4)$$

用频率的概率含义来解释  $\lambda(t)$  的定义，设在  $t = 0$  时有  $N$  个设备在工作，到  $t$  时刻已有  $n(t)$  个产品失效，还有  $N - n(t)$  个产品在继续工作，在  $t$  到  $t + \Delta t$  时间内又有  $\Delta n$  个产品失效，则在时刻  $t$  尚有  $N - n(t)$  个产品在继续工作的条件下，在  $t$  到  $t + \Delta t$  时间段内失效的频率为：

$$\frac{\Delta n}{N - n(t)} = \frac{\text{在时间 } (t, t + \Delta t) \text{ 内失效的产品数}}{\text{在时刻 } t \text{ 仍正常工作的产品数}} \quad (5)$$

失效率能非常灵敏的反映设备失效的变化速度。如图 2 所示，失效率曲线共有三段，第一阶段：早期失效期，开始的时候失效率  $\lambda$  高，可靠性较差，原因是在设备早期投运的阶段因为设计错误、工艺缺陷和运行人员操作熟练程度不够所导致。第二阶段：中期平稳期，在此阶段  $\lambda$  基本上保持不变，由于各方面因素磨合完毕，设备性能也处于最佳状态，对于设备来说，这个阶段是缺陷出现可能性最小的阶段。第三阶段：晚期损耗期，失效率随着时间的推移而逐渐上升，这是由于设备的老化和损耗引起的。失效一般集中在某一时刻发生，且在时间分布上呈正态分布。

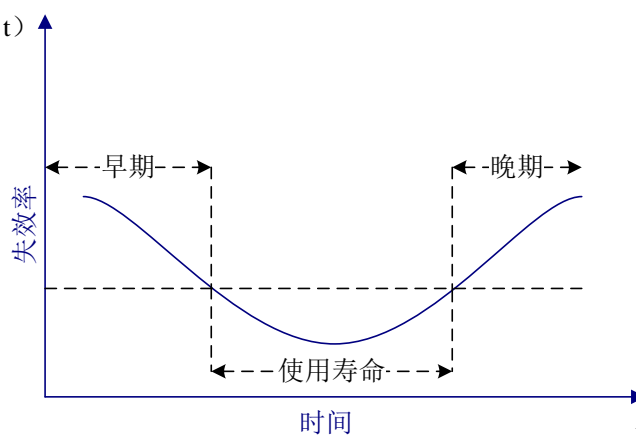


Figure 2. Schematic diagram of product failure rate  
图 2. 产品失效率示意图

#### 4.4. 概率统计分析

设备的绝缘信息通常是分散的，这往往都是由于绝缘材料的不均匀和同一批次的产品的差异性所导致的。在系统对设备进行信息采样过程中，会带来测量仪器和传感器的系统误差和测试误差。因此可以用概率统计的方法予以修正。并运用统计的原理对采样数据进行科学的处理。

在设备运行信息采样中，如果在一段时间内的  $n$  个时间点进行采样，依次表示为  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ ，可以由此得出随机变量的算术平均值：

$$\bar{\xi} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \tag{6}$$

算术平均值在数值上趋近于随机变量在理论上的真值，所以可以当做约定真值使用，即数学期望值。测量时的随机误差符合正态分布[10]的规律。正态分布概率密度函数表示为：

$$\varphi(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-a)^2}{2\sigma^2}} \tag{7}$$

式中， $a$  为随机变量  $x$  的数学期望值， $\sigma$  为随机变量  $x$  的标准偏差。 $\sigma$  越大表明，采集回的数据越离散，分布的域越广。有两种分布  $\sigma_2 > \sigma_1$ ，如图 3 所示。

#### 4.5. 实际案例

例如，在采样 220 kV 设备过电压信息数据时，可以将此类型分为两类事件处理：“设备未过压”和“设备过电压”。简单记为事件 A 和事件 B，事件 A 和事件 B 必有一件事件发生，也意味着 A 和 B 不可能同时发生。其事件的概率事件记为  $P(A)$  和  $P(B)$ 。

那么在  $n$  个时间点下，出现了  $r$  次过电压，另外有  $n-r$  次未过压。这样的分布称为二次分布，若设备在某一特定环境中出现过电压的概率为  $P = 0.08$ ，那么发生 2 次和 3 次过电压的概率可计算：

$$P_r = C_n^r \times P^r \times (1-P)^{n-r} \tag{8}$$

$$P_2 = C_{10}^2 \times 0.08^2 \times (1-0.08)^{10-2} = 0.147 \tag{9}$$

$$P_3 = C_{10}^3 \times 0.08^3 \times (1-0.08)^{10-3} = 0.035 \tag{10}$$

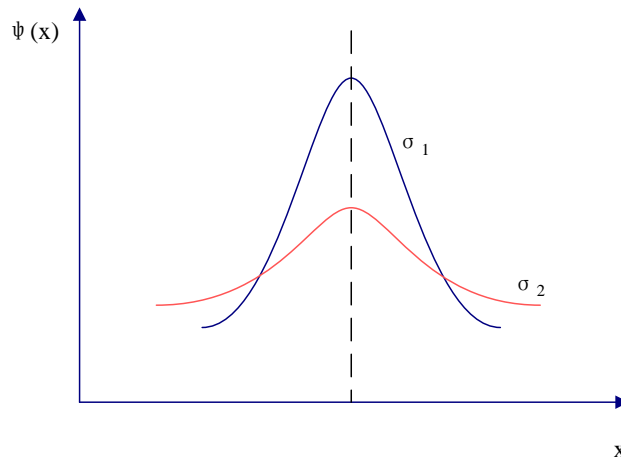


Figure 3. Schematic diagram of  $\sigma$   
图 3.  $\sigma$  示意图

可以在计算结果中看到, 如果设置得到时间点越多, 单位时间内发生的概率越小。并且在单位时间段内, 发生的事件的次数越多, 其发生的概率越低。

## 5. 总结

本文介绍了一种基于电子式互感器在线监测系统所采集数据的绝缘诊断技术。本文以介质损耗  $\tan\delta$  值为例, 主要论述了在线监测系统采集  $\tan\delta$  值的原理以及采集回的数据分析处理过程。基于采集回的数据进行统计分析来推算电子式互感器的绝缘性能情况, 及预测一次设备剩余寿命等等内容。本文所描述的方法适用于各种在线监测系统所部署的专家绝缘分析系统内, 成为一个判断一次设备绝缘情况的判据。今后还可以根据不同情况, 添加神经网络及贝叶斯网络算法来辅助推演。

## 参考文献 (References)

- [1] 陈应林, 黄德祥. 数字式电能计量系统及检定装置设计[J]. 电力自动化设备, 2009, 29(4): 114-117.
- [2] Basak, A. (1999) Condition Monitoring of Power Transformers. *Engineering Science & Education Journal*, **8**, 41-46. <https://doi.org/10.1049/esej:19990107>
- [3] 佟继春. 用于变压器油中多种溶解气体在线监测的智能化传感器研究[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 重庆大学, 2004.
- [4] 白维, 曾成碧, 王涛. 高压电气设备绝缘在线监测的研究[J]. 中国测试技术, 2006, 32(1): 288-288.
- [5] 陈季丹. 电介质物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1982.
- [6] 李国庆, 庄重, 王振浩. 电容型电气设备介质损耗角的在线监测[J]. 电网技术, 2007, 31(7): 55-58+68.
- [7] 董垠峰. 零点漂移的原理及处理方式[J]. 盐业与化工, 2015, 44(8): 41-44.
- [8] 严璋, 黄鞠铭. 绝缘诊断技术的新动向——第三届中日绝缘诊断技术讨论会侧记[J]. 高电压技术, 1995(1): 90-92.
- [9] 汤胜道, 汪凤泉. 失效率随时间而变的  $n$  中取  $k$  表决系统可靠性分析[J]. 系统工程学报, 2005 20(5): 555-558.
- [10] 米特洛波尔斯基. 正态分布[M]. 北京: 科学出版社, 1959.

### 知网检索的两种方式:

1. 打开知网页面 <http://kns.cnki.net/kns/brief/result.aspx?dbPrefix=WWJD>  
下拉列表框选择: [ISSN], 输入期刊 ISSN: 2161-8763, 即可查询
2. 打开知网首页 <http://cnki.net/>  
左侧“国际文献总库”进入, 输入文章标题, 即可查询

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>  
期刊邮箱: [sg@hanspub.org](mailto:sg@hanspub.org)