

基于电容分压的电力变压器套管绝缘在线检测的研究

刘云鹏, 律方成, 李成榕, 王胜辉

(华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003)

On-line Monitoring Transformer's Bushing Insulation Based on Its Tap Capacitive Divider

LIU Yun-peng, LU Fang-cheng, LI Cheng-rong, WANG Sheng-hui

(Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

摘要: 在线检测变压器高压套管的介质损耗是判断其绝缘状况的有效手段。笔者通过与套管末屏串联的分压电容提取工频电压信号,采用绝对测量和相对测量相结合的方法准确地测量了套管的介质损耗,并应用传输线理论分析了其误差特性。现场运行证明,该方法是有效的。

关键词: 高压套管; 介质损耗; 在线检测; 电容分压

中图分类号: TM835 **文献标识码:** A

Abstract: On-line monitoring the dielectric loss of power transformer bushing has been proven to be effective tool in evaluating the condition of its insulation. The measured signal is abstracted from capacitor, which is in series with the bushing tap. In this paper, the absolute and relative methods are combined, and the phase error in transmission process is analyzed based on transmission line theory. Field monitoring result shows that this method is effective.

Key words: power transformer's bushing; dielectric loss; on-line monitoring; capacitive divider

1 引言

电力变压器高压套管的绝缘特性好坏是影响电力变压器安全可靠运行的主要因素之一。其中高压套管的介质损失角正切($\tan\delta$)能非常有效地反映其绝缘状况,监测 $\tan\delta$ 是其在线监测技术的主要手段之一。目前国内多采用穿心式结构的电流传感器监测高压容性设备的介质损耗,分为无源与有源两种类型。无源传感器结构简单,使用寿命长,但易受温度、输入电流和负载特性变化的影响^[1,2];有源传感器采用零磁通技术等提高了被测信号的信噪比^[3,4]。由于现场环境差、干扰复杂,长时间运行传感器的角差、比差的稳定性会下降,因而采用传感器提取微弱信号问题仍较突出。为此采用了一种基于末屏电容分压的高压套管在线监测方法^[5,6]。主要思想是在末屏回路中串入分压测量电容,提取准确的电压信号,

一方面比较同相、同电压等级下高压电器设备的测量结果,通过相对结果的比较反映设备的绝缘状况;另一方面结合母线电压计算出介质损失角正切。监测系统的结构框图见图1。

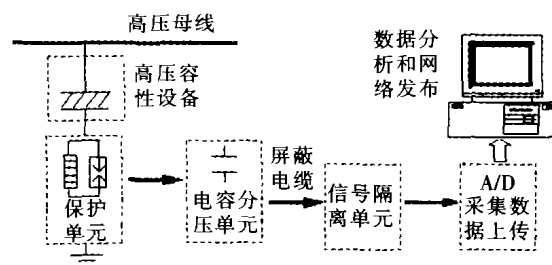


图1 套管末屏传感器结构示意图

2 套管末屏传感器的设计

电力变压器高压套管主要是电容式结构,是在导杆上包以多层绝缘构成的,其等效电路为一串同轴圆柱形电容器串联,构成电容分压器。其中高压套管导杆对地的主电容 C 通常是几百pF,而从其外层引出的末屏电容的容抗是 C 的几十分之一。这里主要研究在套管末屏上串入合理可靠的分压电容,提取出反映套管介质损耗的工频电压信号,如图1中电容分压单元所示。工频分压电容 C_f 与套管电容 C 构成电容分压器,满足 $C_f \gg C$,其正常输出工频电压峰值 U_p 接近40V,可以保证电压信号的准确度和测量的安全性。对于110kV及以上变压器高压套管,该电容通常选0.4~5 μ F。

为防止末屏开路 and 抑制高压系统的多种类型的过电压信号设计了保护单元(SU)。采用压敏电阻(金属氧化物阀片MOV)和气体放电管的混合保护,并通过长时间连续放电试验,可靠地把端口电压限制在100V(峰值)以内^[7]。

3 套管绝缘在线检测原理

当高压套管发生绝缘劣化时,其故障特征一方

面表现为一个或多个分层小电容击穿短路,导致 C 增加;另一方面表现为 $\tan\delta$ 增大。笔者基于绝对测量和相对测量相结合的原理对套管末屏绝缘在线检测进行研究。

绝对测量是准确提取高压母线的电压 U 和套管末屏传感器的电压信号 U_1 , 进一步计算这两个电压向量的夹角的正切 $\tan\theta$ 。在工频电压下,套管末屏传感器等值为电容 C_f , 其测量原理及向量见图 2(a), (b), $\tan\theta$ 表示母线电压 U 和分压电容电压 U_1 之间夹角的正切。当 $C_f \gg C$ 时, $\tan\delta \approx \tan\theta$, 即:

$$\tan\theta = \frac{\omega C_f C R}{C_f + C} = \frac{\omega C R}{1 + \frac{C}{C_f}} = \frac{\tan\delta}{1 + \frac{C}{C_f}} \approx \tan\delta$$

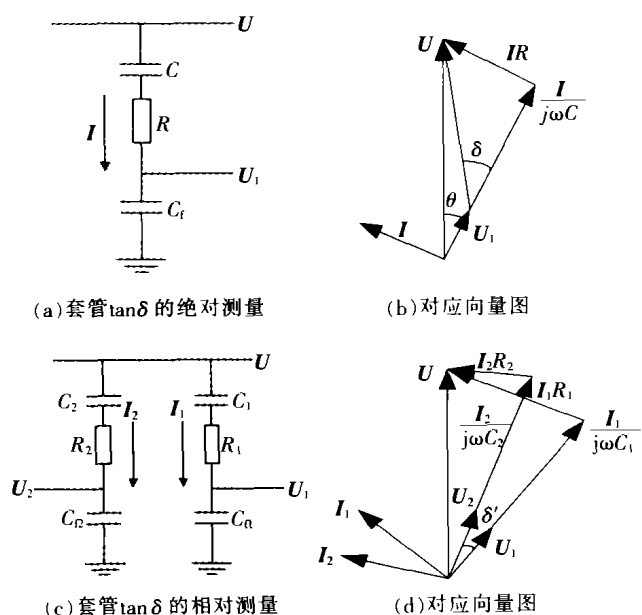


图2 套管 $\tan\delta$ 测量原理图

相对测量是以同相、同电压等级设备提取的电压信号为基准,测量它们之间介质损耗角的相对变化 $\tan\delta'$, 其测量原理和相应的向量见图 2(c), (d)。当 $C_{f1} \gg C_1, C_{f2} \gg C_2$ 以及 $\tan\delta_1 \times \tan\delta_2 \ll 1$ 时:

$$\tan\delta' = \frac{\tan\delta_1 - \tan\delta_2}{1 + \tan\delta_1 \times \tan\delta_2} \approx \tan\delta_1 - \tan\delta_2$$

为验证电容分压测量方法的有效性,在实验室采用 QS 西林电桥进行了对比试验。试品电容 C 为 1814 pF, 分压电容 C_f 为 0.04 μ F, 试验电压为 10 kV, 通过在试品下端串联不同的电阻改变其介质损耗角, 试验结果见表 1。说明采用分压电容检测高压套管的介质损耗是满足测量的可信度、准确度和稳定度要求的。

采用绝对测量与相对测量相结合的测量原理,

表1 介损测量对比试验结果

串联电阻/k Ω	tan δ /%		绝对误差	相对误差/%
	西林电桥	分压电容		
0	0.10	0.101	0.001	1.00
10	0.60	0.602	0.002	0.33
20	1.30	1.304	0.004	0.31

具有如下的优点:①利用同相、同电压等级的各个设备的测量数据来比较角差或幅值,相对可以在一定程度上克服外界环境和干扰的影响,使其相互抵消。②相对传统的穿心传感器信号,套管末屏传感器提取的工频电压信号可达到 40 V,保证了数据的可靠性。③利用绝对测量等效量可以得出一定量的绝缘指标,使得运行人员能够方便准确地判断套管的绝缘状况,同时利用相对结果去定性分析绝缘状况的变化趋势,帮助运行人员全面了解和判断绝缘状况。

4 监测电压信号传输过程中相位误差分析

套管绝缘在线检测前端处理主要有末屏容性分压传感器、可靠性保护单元、信号隔离单元、数据采集和通信单元等,然后通过 485 总线与上位机连接,见图 1。其中传输电缆对测量相角的影响较大,这里应用均匀传输线理论来分析其相位误差。假定电缆为分布参数电路模型,那么套管绝缘在线检测回路的等效电路见图 3。

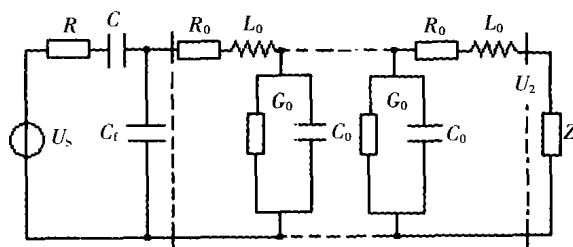


图3 等效计算电路

为了分析 U_s 和 U_2 之间的相位关系,由戴维南定理知,图 3 虚线左边的电路可以等效为电压源 E_s 和阻抗 Z_s 的串联,见图 4。

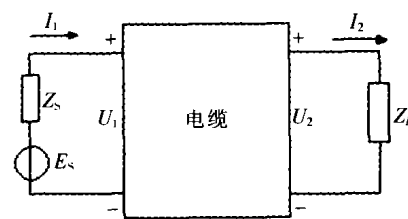


图4 简化等效电路

$$\text{其中: } Z_s = \frac{Z_L Z}{Z_L + Z}; \quad E_s = \frac{Z_L}{Z_L + Z} U_s \quad (1)$$

其中: Z_L 为末屏传感器等值阻抗。由图 4 的边界条件可得如下方程:

$$U_1(x) = E_s(x) - I_1(x) Z_s; \quad I_2(x) = U_2(x) / Z_L \quad (2)$$

由式(1), 式(2)结合电缆的均匀传输线方程可以求出 U_s 和 U_2 的电压传递函数。

$$\frac{U_s}{U_2} = \frac{Z_L + Z}{Z_L} \left(\frac{Z_s + Z_L}{Z_L} \operatorname{ch}\gamma l + \frac{Z_C^2 + Z_L Z_s}{Z_L Z_C} \operatorname{sh}\gamma l \right)$$

其中: l 表示电缆的长度, γ 为传播常数, Z_C 为特征阻抗。

假定 δ' 即为母线电压和电缆末端电压向量的相位差。变电站现场运行设备的典型参数如下:

$R_0=7\times 10^{-3}\Omega$, $C_0=2\times 10^{-10}\text{F}$, $L_0=3\times 10^{-7}\text{H}$,
 $G_0=5\times 10^{-10}\text{S}$, $l=300\text{m}$, $f=50\text{Hz}$, $C=8\times 10^{-10}\text{F}$,
 $C_f=4.4\mu\text{F}$, $C_l=0.1\mu\text{F}$, $\delta=0.003^\circ$ 。

计算结果表明: R_0, C_0, G_0, L_0 (分别表示同轴电缆单位长度的电阻、电导、电容、电感)这4个参数对相角误差的影响相似,其中 δ' 对 R_0 的灵敏度最高, R_0 的变化对相角误差的影响见表2。

表2 电缆参数 R_0 变化对相角误差的影响

$R_0/(\Omega\cdot\text{m}^{-1})$	$\delta'/(^{\circ})$	绝对误差/ $(\times 10^{-3})$	相对误差/%
0.001	0.002 906 7	9.332 5	3.111
0.004	0.002 942 4	5.763 5	1.921
0.007	0.002 978 1	2.194 5	0.731
0.010	0.003 013 7	1.374 6	0.458
0.050	0.003 489 6	48.962	16.321

从上述分析中知,只要选择合适的电缆和终端阻抗,可以将电缆引起的相移误差减小到满足测量准确度的要求。

5 套管绝缘在线检测的实际应用

套管绝缘在线检测的参量包括母线电压、套管泄漏电流、 $\tan\delta$ 和温湿度等。表3是对山东某一110kV变电站的主变套管的绝缘在线检测结果。同时图5给出了其中一台变压器三相高压套管 $\tan\delta$ 长期在线检测的变化曲线,通过该曲线可以判定基于末屏传感器的套管绝缘检测系统的工作是稳定可靠的。

表3 套管绝缘在线检测参数

相别	线电压/kV	泄漏电流/mA	套管电容/pF	温度/ $^{\circ}\text{C}$	湿度/%	$\tan\delta$
A	117	4.068	190.68	27	42	0.003 12
B	118	4.078	190.56	27	42	0.004 88
C	118	4.083	190.77	27	42	0.005 01

6 结论

笔者设计了变压器套管末屏电容分压传感器,

(上接第120页)

整条电缆。另外,由于电缆油在电缆的中心油道中,所以多点取样也存在一定的困难。

参考文献:

- [1] 王文华. 气相色谱分析在变压器上的应用[J]. 变压器, 1994(5): 12-17.
- [2] 郑肇曠, 王琨明. 高压电缆线路[M]. 北京: 水利电力出版社, 1983.
- [3] 高洁, 汤烈贵. 纤维素科学[M]. 北京: 化学工业出版社, 1996.
- [4] GB/T 17623-1998. 绝缘油中溶解气体组分含量的气相色谱测定法[S].
- [5] 刘子玉, 王惠明. 电力电缆结构设计原理[M]. 西安: 西安交

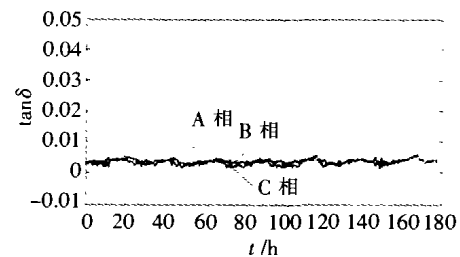


图5 套管介质损耗在线检测曲线

提出在套管绝缘在线检测中采用相对测量与绝对测量相结合的原理,可以定量判断套管的绝缘性能以及动态分析其绝缘变化的趋势。同时应用均匀传输线理论计算套管绝缘检测的电压信号在传输过程的误差,通过选择合适参数消除该误差。

参考文献:

- [1] 贺景亮, 赵生和, 陈鹏云, 等. 无源介损传感器的稳定性分析[J]. 高电压技术, 1995, 21(4): 39-41.
- [2] 吕延锋, 钟连宏, 王建华. 电气设备绝缘介质损耗测量方法的研究[J]. 高电压技术, 2000, 26(5): 38-40.
- [3] 黄新红, 张军辉, 严璋. 高压电气设备绝缘特性带电检测仪信号采集系统的研究[J]. 西安交通大学学报(自然科学版), 1997, 31(11): 40-44.
- [4] 史保壮, 杨莉, 王红斌. 网络型变电站绝缘在线监测及诊断系统[J]. 高电压技术, 2001, 27(8): 33-34.
- [5] 黄建华, 金园, 何青. 电容型设备绝缘在线监测系统及其选用原则[J]. 高电压技术, 2001, 27(10): 13-16.
- [6] Lu Fangcheng, Wang Nan. Measurement of $\tan\delta$ Based on Absolute and Comparative Method [A]. Proc. of 2001 ISEIM [C], Himeji, Japan, 2001.
- [7] 刘云鹏, 律方成. 介损在线监测信号保护单元研究[J]. 华北电力技术, 2002(7): 4-7.

作者简介:刘云鹏(1976-),男,博士研究生,从事电气设备在线检测和故障诊断方面的研究。

通大学出版社, 1995.

- [6] D Couderc, P Bourassa. Gas-in-oil Criteria for the Monitoring of Self-contained Oil-filled Power Cables [A]. IEEE Annual Report-Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena[C]. San Francisco, 1996.
- [7] Tsuchie M. Recent Diagnostic Technology on Oil-immersed Power Transformers in Japan[J]. Transmission and Distribution Conference and Exhibition 2002: Asia Pacific., IEEE/PES, 2002, 2(10): 1 496 -1 499.
- [8] M Duval. A Review of Faults Detectable by Gas-in-oil Analysis in Transformers [J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2002, 18(3): 8 -17.

作者简介:陈志勇(1975-),男,河南濮阳人,硕士研究生,研究方向为高压充油电缆的老化研究与在线监测。