

变压器电介质频率响应测试系统研制

刘君 张华强 王华 胡敏恒 李波
(成都电业局,四川成都 610041)

摘要: 为将电介质频率响应法的变压器绝缘状态评估应用于生产实际,阐释了电介质频率响应原理,研制了微电流测试系统、信号采集、信号处理、上位机软件等组成的电介质频率响应系统,并应用于现场 220 kV 变压器状态测试评估。

关键词: 变压器; 电介质频率响应; 复电容; 油纸绝缘

Abstract: In order to apply the insulation condition evaluation of transformers in dielectric frequency response method to the actual operation, the theory of dielectric frequency response is introduced firstly. Then the dielectric frequency response system is studied which consists of the micro current measurement system, signal acquisition, signal processing and software etc. At last, the system is applied to the field testing and evaluation for the condition of 220 kV transformers.

Key words: transformer; dielectric frequency response; complex capacitance; oil-paper insulation

中图分类号: TM845 文献标志码: A 文章编号: 1003-6954(2013)04-0083-04

变压器承担着电压的转化及能量传输,是电力系统最重要设备之一,其绝缘状态关系着牵引供电系统运行的安全性及可靠性。变压器长期经受过负荷冲击,绝缘故障(尤其是绕组变形等机械作用引起的绝缘故障)的发生频率较高^[1,2]。油纸绝缘状态及其性能将严重影响变压器绝缘的电气寿命和机械寿命,如何对变压器油纸绝缘状态进行评估一直是业内广泛关注的技术难题^[3,4]。变压器绝缘状态评估传统测试法(如绝缘电阻测量、介质损耗正切测量等)局限于单个信息,提供的绝缘信息少,所受干扰因素多,难以建立绝缘状态与测试结果对应关系。电介质响应法作为一种新的绝缘测试方法,其研究始于 20 世纪 80 年代,90 年代后回复电压法、极化去极化电流法等时域电介质响应法陆续涌现^[5,6],而频率响应法由于所获信息量大、测试电源电压低而受到广泛关注^[7-9]。因此有必要开展电介质频率响应法的变压器绝缘状态评估^[9,10]。下面阐释了电介质频率响应原理,研制了微电流测试系统、信号采集、信号处理、上位机软件等组成的电介质频率响应系统,并应用于现场 220 kV 变压器状态测试评估。

1 电介质频率响应原理

在平板电容两端加上时变电压 $U(t)$,将产生空

间均匀电场 $E(t) = U(t)/d$, d 为电极间距离。电极两端产生电位移 $D(t)$,由真空即时贡献 $\epsilon_0 E(t)$ (ϵ_0 为真空介电常数)和惯量延迟的极化响应 $P(t)$ 所组成^[11,12],即

$$D(t) = \epsilon_0 E(t) + P(t) \quad (1)$$

根据电介质物理,极化响应的傅里叶变换可表示为^[19]

$$p(\omega) = \epsilon_0 [\epsilon_\infty - 1 + \chi(\omega)] E\omega \quad (2)$$

式中 ϵ_∞ 为极高频介电常数; ω 为角频率; $\chi(\omega)$ 为频率相关的复极化系数。

由于麦克斯韦方程式定义的全电流包括电导电流及位移电流^[19],即电流密度为

$$J = \sigma_0 E + \partial D / \partial t \quad (3)$$

式中 σ_0 为直流电导率,式(3)的傅里叶变换为

$$J(\omega) = \sigma_0 E(\omega) + j\omega D(\omega) \quad (4)$$

即

$$J(\omega) = j\omega\epsilon_0 \left\{ \epsilon_\infty + \chi(\omega) - j \left[\frac{\sigma_0}{\epsilon_0\omega} + \chi''(\omega) \right] \right\} \cdot E(\omega) \\ = j\omega\epsilon_0 [\epsilon'(\omega) - j\omega''(\omega)] E(\omega) \quad (5)$$

式中 $\epsilon'(\omega)$ 为复介电常数 $\epsilon(\omega)$ 实部; $\epsilon''(\omega)$ 为虚部;复极化常数的实部表示了位移电流与激励电场垂直的部分,对损耗无贡献;而其虚部给出了位移电流与激励电场同相位的部分,为损耗部分。因此,极化过程可以通过测试激励电压下的响应电流幅值和相位来研究^[11,12]。系统响应电流为

$$\begin{aligned}
 I(\omega) &= j\omega C_0 \left\{ \varepsilon_\infty + \chi'(\omega) - j \left[\frac{\sigma_0}{\varepsilon_0 \omega} + \chi''(\omega) \right] \right\} \cdot U(\omega) \\
 &= j\omega [C'(\omega) - jC''(\omega)] \cdot U(\omega) \\
 &= j\omega C(\omega) U(\omega) \quad (6)
 \end{aligned}$$

式中 $I(\omega)$ 为响应电流; $U(\omega)$ 为激励电压; C_0 为几何电容; $C'(\omega)$ 、 $C''(\omega)$ 分别为复电容 $C(\omega)$ 的实部及虚部。在不同频率范围内, 油纸复合绝缘老化、温度、微水含量将改变其值。

2 电介质频率响应测试系统

所研制的电介质频率响应测试系统包括微电流测试系统、信号采集、数据处理、上位机软件等, 图1为装置系统图。

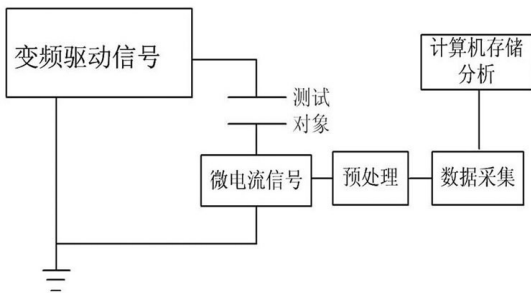


图1 电介质频率响应测试系统图

2.1 微电流测试系统

变频驱动系统采用 XD5A 超低频信号发生器, 频率范围为 0.001 ~ 1 000 Hz, 误差为 < 1.5%, 最大输出电压/电流为 100 V / 50 mA, 正弦信号失真度为 < 0.2%。如果测试对象的电容为 1 000 pF, 根据欧姆定律, 流过试样电流为

$$I = U \cdot j\omega C \quad (7)$$

在 0.001 Hz 驱动电压 100 V 情况下, 流过的电流为 0.628×10^{-9} A。因此, 响应信号非常微弱, 测得的信号非常容易受到外界噪声干扰。因此, 对信号提取以及信号调理电路要求非常高。

(1) 信号提取

根据图1所示的电介质频率响应现场测试系统图, 测试对象为流过待测试样的微电流。为方便测量, 通过 $I-V$ 转换电流将待测电流信号转换为电压信号。反馈电流放大测量电路在频率响应特性及转换线性方面的优异性能, 测量电路的设计是基于反馈式电流放大器型 $I-V$ 转换电路, 如图2所示。根据电路原理, 可以得出

$$V_o = -I_s R_f \quad (8)$$

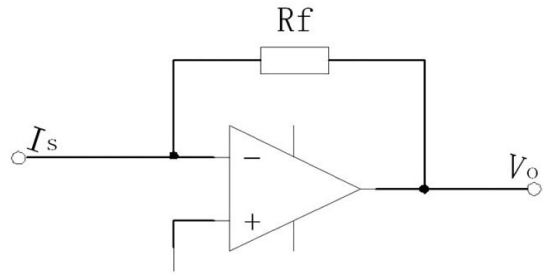


图2 $I-V$ 转换电路原理

根据需要放大倍数, 通过选取适当的 R_f 值即可实现。微电流测试时, 运放的输出误差还受失调电压 V_{OS} 、偏置电流 I_b 影响, 选择的运放需满足: 偏置电流 I_b < 被测电流 I_s , 输入阻抗 $R_i \gg$ 反馈电阻 R_f ; 增益、共模抑制比高; 失调电压及漂移小; 噪声小。因此, 根据以上所提到的对运放的要求, 该测试仪选用 TI 公司的 OPA128LM 低噪声放大器。

(2) 信号放大

由于 R_f 一般达到 M 级, 其杂散电容使测试信号产生畸变。图3所示的电路为杂散电容消除电路, 其中 C_f 为电路中的杂散电容, R_1 与 C_1 为外加的 RC 网络。通过调整电阻 R_1 和电容 C_1 的取值, 使其满足

$$R_1 C_1 = R_f C_f \quad (9)$$

从而达到消除寄生电容的影响。

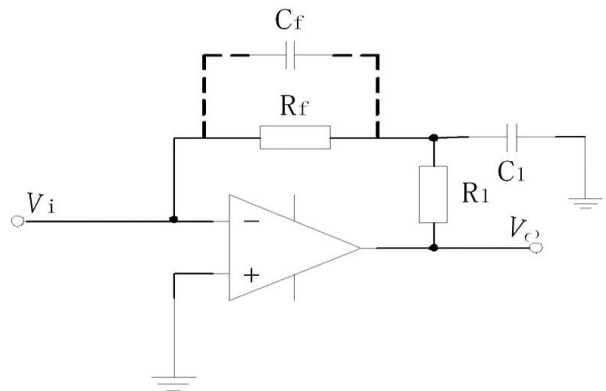


图3 杂散电容消除电路

由于待测电流信号为 10^{-9} A, 所需放大倍数较高, 设计两级放大电路。系统电路如图4所示, 通过一个 500 M Ω 电阻和 120 pF 的电容的并联电路作为油纸复合绝缘的模型, R_f 为 10 M Ω , 其引入的杂散电容通常为 0.5 pF, 则根据式(5)~(3)选取 R_1 为 5 k Ω , C_1 为 1 nF, 配合组成杂散电容消除电路; 在第二级放大电路中, 放大倍数为 $R_3/R_2 = 10$, 其阻值分别为 100 k Ω 和 10 k Ω , 由于这两个电阻为 k Ω 级, 故其杂散电容可忽略不计, 微电流测试电路如图4所示。

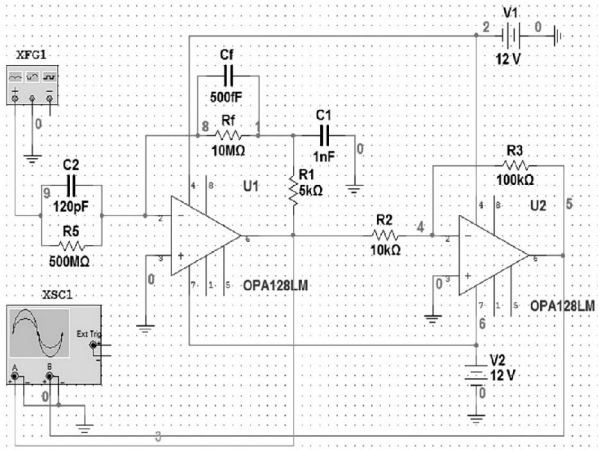


图4 系统电路原理图

2.2 数据采集

数据采集是采用 NETVI - 4712 型 8 通道数据采集仪。其采样频率为 2.5 K ~ 50 M ,A/D 分辨率为 12 bit ,直流精度为 ±0.2% (FS) ,交流精度为 ±0.5% (1 000 Hz) ,通道间相差 < 1° (3 × 10⁵ Hz) 输入信号带宽为 0 ~ 15 MHz。采集软件是基于 DaqView 2.11 为基层软件开发 ,系统能够对不同频率条件下的介质响应信号采集 ,其采集界面如图 5 所示。

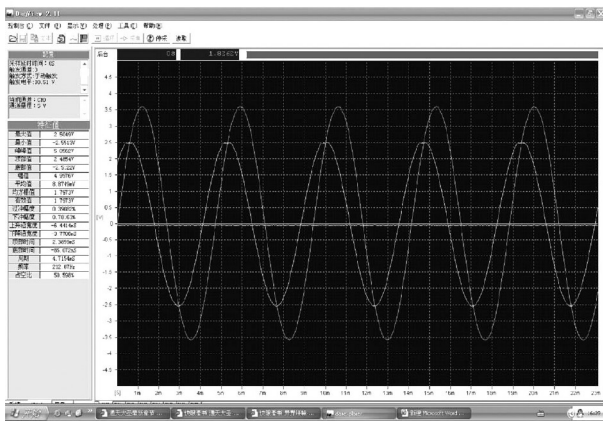


图5 数据采集界面

2.3 上位机软件

采用 C + + builder 编制上位机软件 ,对采集信号进行处理。通过几何可换算为复介电常数 ,通过测试输出电压与微电流幅值及相角差来计算待测对象复电容的实部及虚部 ,并可通过几何 C₀ 按式 (6) 换算为复介电常数。输出电压与微电流之间的相角利用过零比较法得到 ,上位机界面如图 6 所示。

所建立的电介质频率响应现场测试系统如图 7 所示。系统测试频率范围为 0.001 ~ 1 000 Hz ,最大输出电压/电流为 100 V / 50 mA ,测试对象范围为 100 pF ~ 100 μF。

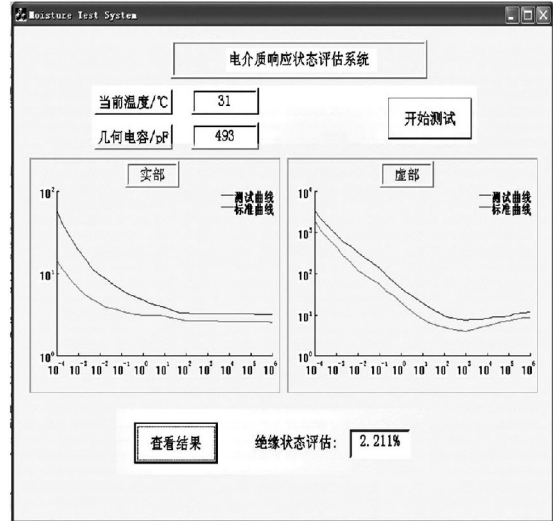


图6 测试系统上位机软件界面



图7 电介质响应现场测试系统

3 变压器电介质频率响应测试

基于电介质响应的基本原理 ,选取两台 220 kV 油浸式变压器进行电介质响应测试 ,进行电介质频率响应测试评估。1 号变压器投运时间为 2009 年 9 月 , 2 号变压器投运时间为 2004 年 8 月。变压器停电后 ,解除连接在变压器高低压套管的所有引线 ,将变压器整体隔离 ,低压侧套管并联 ,高压侧套管并联 ,对高低压套管间变压器主绝缘进行电介质频率响应测试 ,接线方式如图 8 所示 ,测试结果如图 9 所示。

由图 9 可以看出 ,所研制的变压器电介质频率响应测试系统能有效地测试出 220 kV 变压器主绝缘电介质频率响应。由于 1 号主变压器投运时间较 2 号主变压器晚 5 年 ,测试结果能反映出 1 号主变

压器绝缘状态优于2号主变压器。

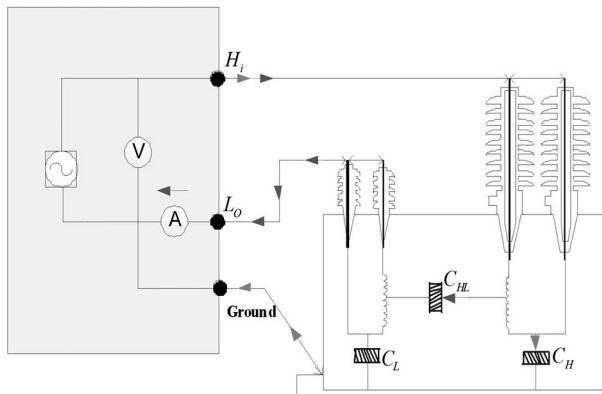


图8 现场接线原理图

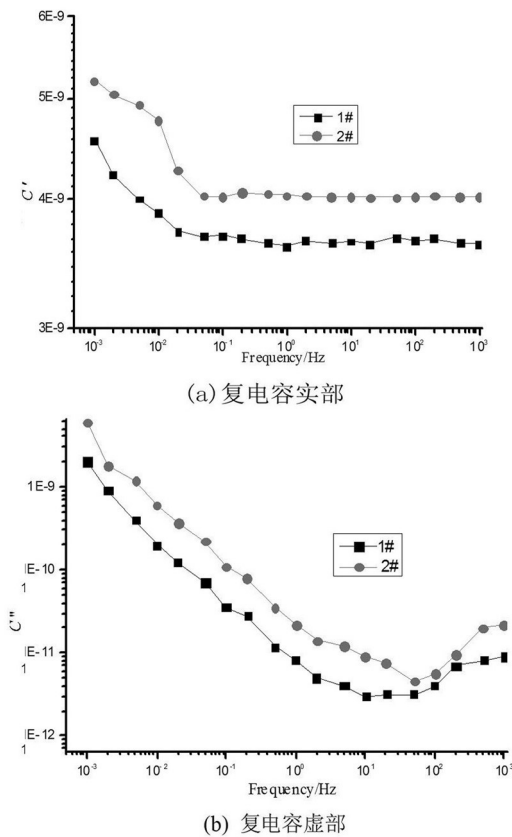


图9 变压器高低压绕组主绝缘电介质频率响应

4 结论

根据电介质理论 阐释了电介质频率响应原理，研制了微电流测试系统、信号采集、信号处理、上位机软件等组成的电介质频率响应系统，并应用于现场220 kV 变压器主绝缘电介质频率响应测试。所研制的变压器电介质频率响应测试系统能有效地测试出220 kV 变压器主绝缘电介质频率响应。测试结果能反映其绝缘状态。

参考文献

[1] M. Wang, A. J. Vandermaar, K. D. Srivastava. Review of Condition Assessment of Power Transformers in Service [J]. IEEE Elec. Insul. Mag., 2002, 18(6): 12-25.

[2] L. E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, T. J. Painter. Aging of Oil-impregnated Paper in Power Transformers [J]. IEEE Trans. Power. 2004, 19(1): 230-239.

[3] 刘君, 吴广宁, 周利军, 等. 油纸绝缘体系微水扩散的分子模拟 [J]. 高电压技术, 2010, 36(12): 2907-2912.

[4] T. K. Saha, Z. T. Yao. Experience with Return Voltage Measurements for Assessing Insulation Conditions in Service-aged Transformers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18(1): 128-135.

[5] T. K. Saha, P. Purkait. Investigation of Polarization and Depolarization Current Measurements for the Assessment of Oil-paper Insulation of Aged Transformers [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2004, 11(1): 144-154.

[6] Linhjell D, Lundgaard L. Dielectric Response of Mineral Oil Impregnated Cellulose and the Impact of Aging [J]. IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007, 14(1): 156-169.

[7] Jun Liu, Lijun Zhou, Guangning Wu, et al. Dielectric Frequency Response of Oil-paper Composite Insulation Modified by Nanoparticles [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2012, 19(2): 510-520.

[8] S. L. M. Berleze, R. Robert. Response Functions and After-effect in Dielectrics [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2003, 10(4): 665-669.

[9] J. Blennow, S. M. Gubanski. Field Experiences with Measurements of Dielectric Response in Frequency Domain for Power Transformer Diagnostics [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation. 2006, 21(2): 681-688.

[10] L. J. Zhou, G. N. Wu, J. Liu. Modeling of Transient Moisture Equilibrium in Oil-paper Insulation [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(3): 872-878.

[11] Jonscher A. K. Dielectric Relaxation in Solids [M]. London: Dielectrics Press Limited, 1996: 66-110.

[12] 殷之文. 电介质物理学 [M]. 北京: 科学出版社, 2003: 57-65.

作者简介:

刘君(1984),男,博士,主要从事高压电气设备绝缘状态评估及其方法研究。

(收稿日期: 2013-04-22)