

变压器绝缘状态诊断及介质谱分析 技术

目录

- 常规的绝缘测试方法回顾
- 介质谱分析技术 (DFR/FDS) 简介
- 案例分析
- 结论

常规变压器绝缘测试方法回顾

常规变压器绝缘测试方法及其局限

■ 绝缘油微水测试

- 油中水含量随温度、负载的变化波动剧烈
- 测试误差较大

■ 变压器绝缘电阻（极化指数）测试

- 受试品体积影响较大
- 温度补偿难度较大
- 绝缘油对极化指数判据造成干扰

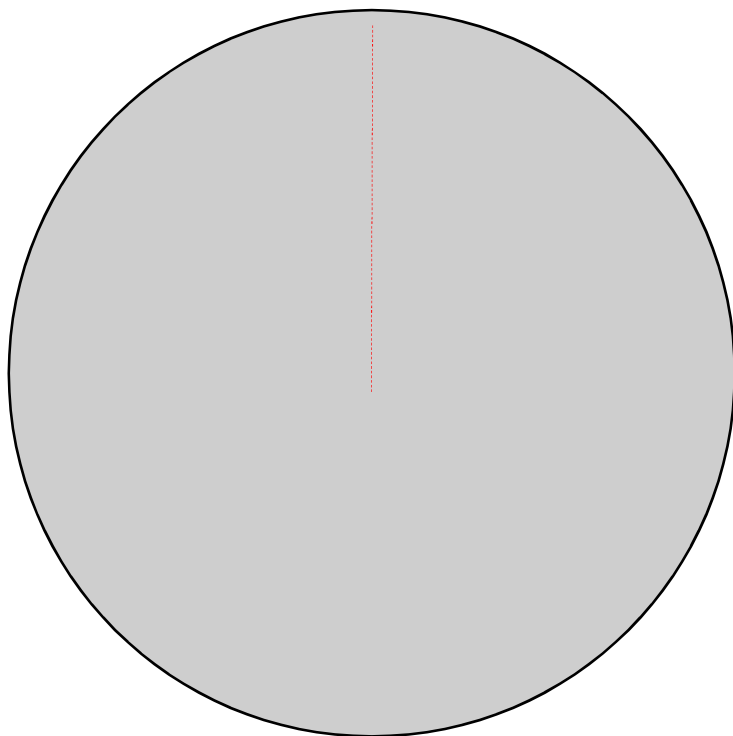
■ 介损测试

- 工频介损对绝缘状态的变化灵敏度欠佳
- 无法判定异常原因

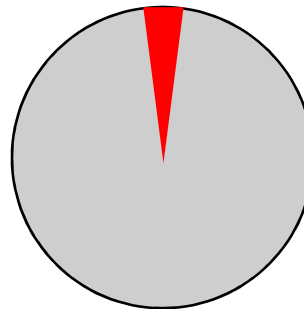
电力变压器内部水分分布

- 变压器绝缘系统由绝缘纸板（赛璐璐）和矿物油构成，几乎所有的水分都集中在绝缘纸板中：
 - 25 吨油在常温下含水量 = 0.5 kg
 - 2.5 吨绝缘纸3%湿度时的水含量= 75 kg

25吨20ppm湿度油中水的质量

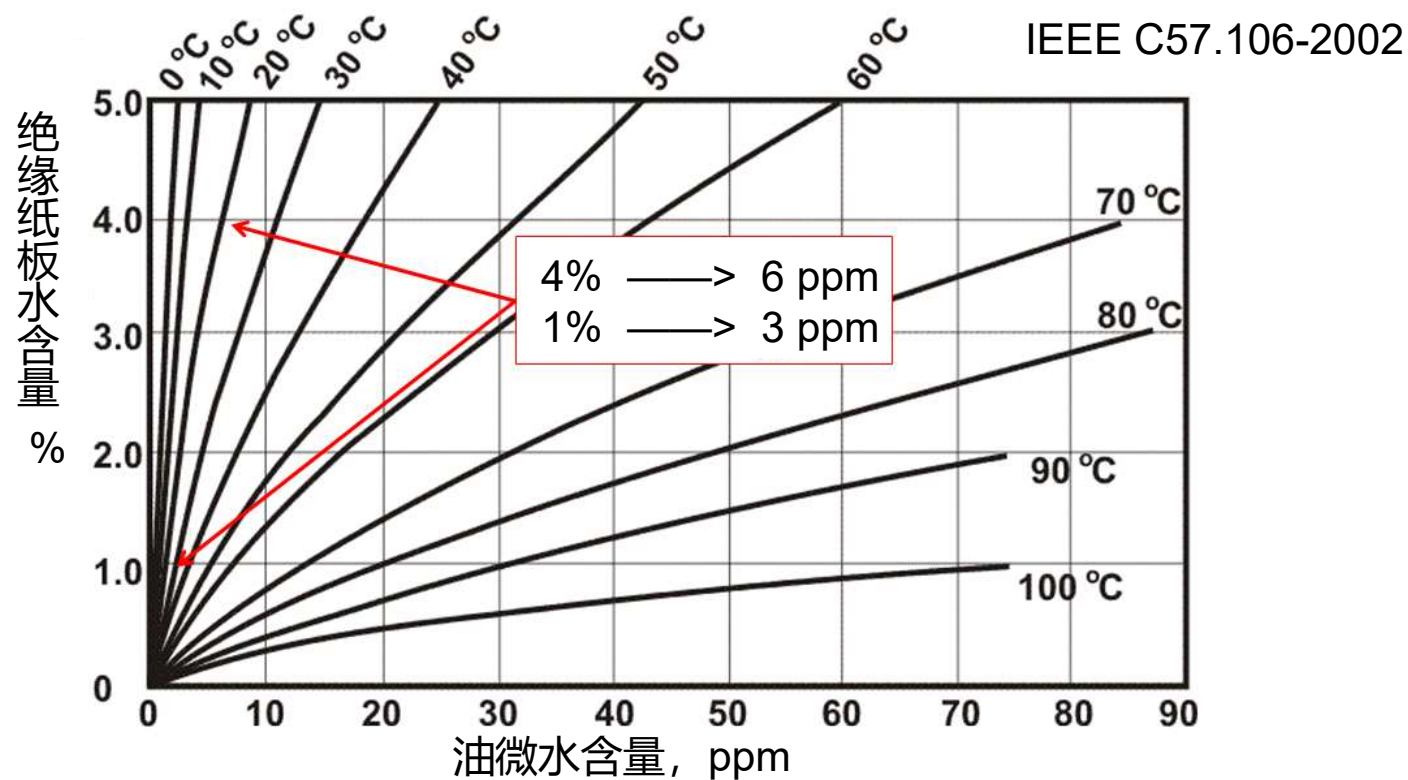


2.5 吨3%湿度绝缘纸中水的质量

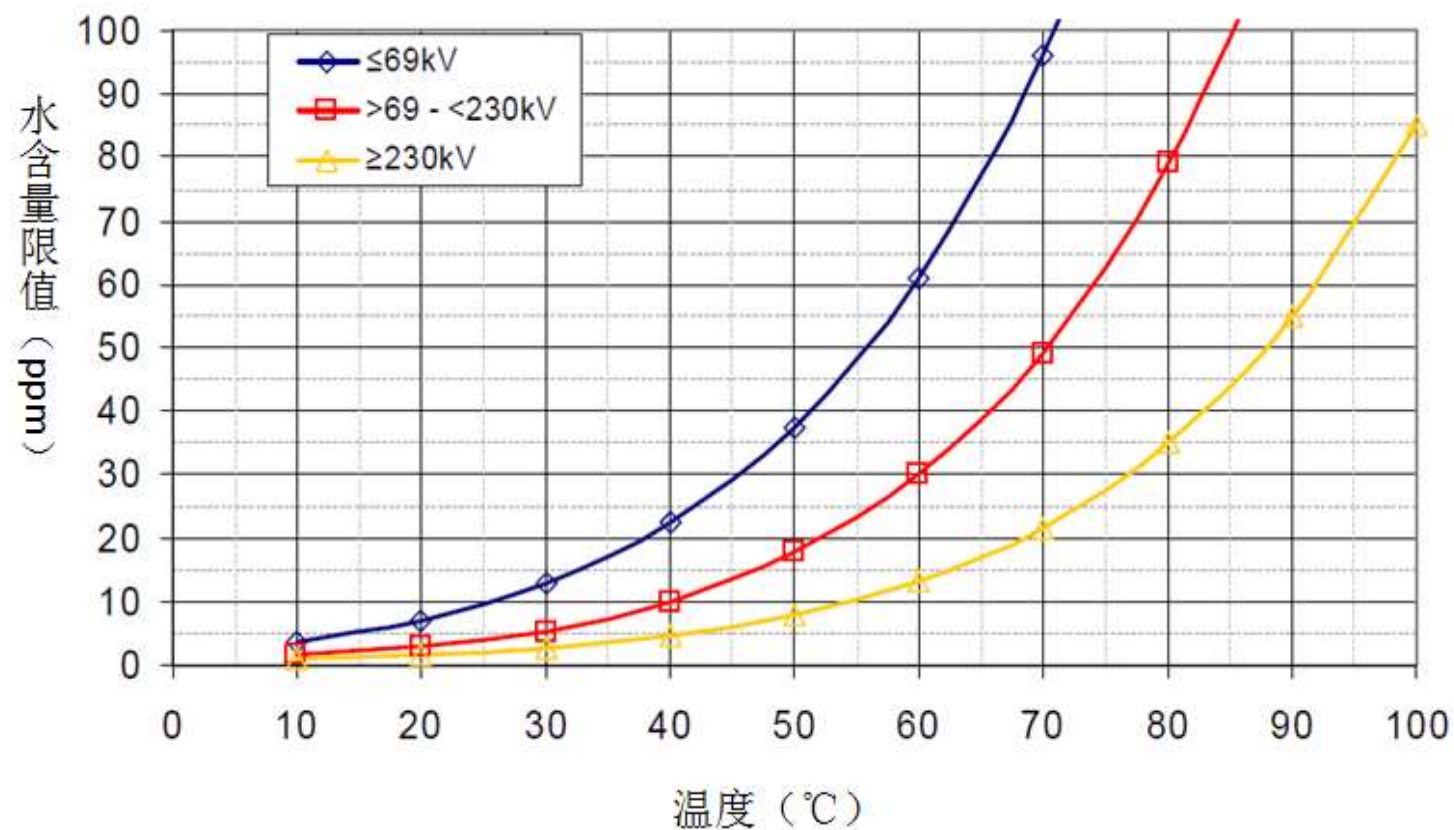


油微水测试理论基础

■ 油纸系统水分平衡曲线



不同电压等级的变压器最大油微水值

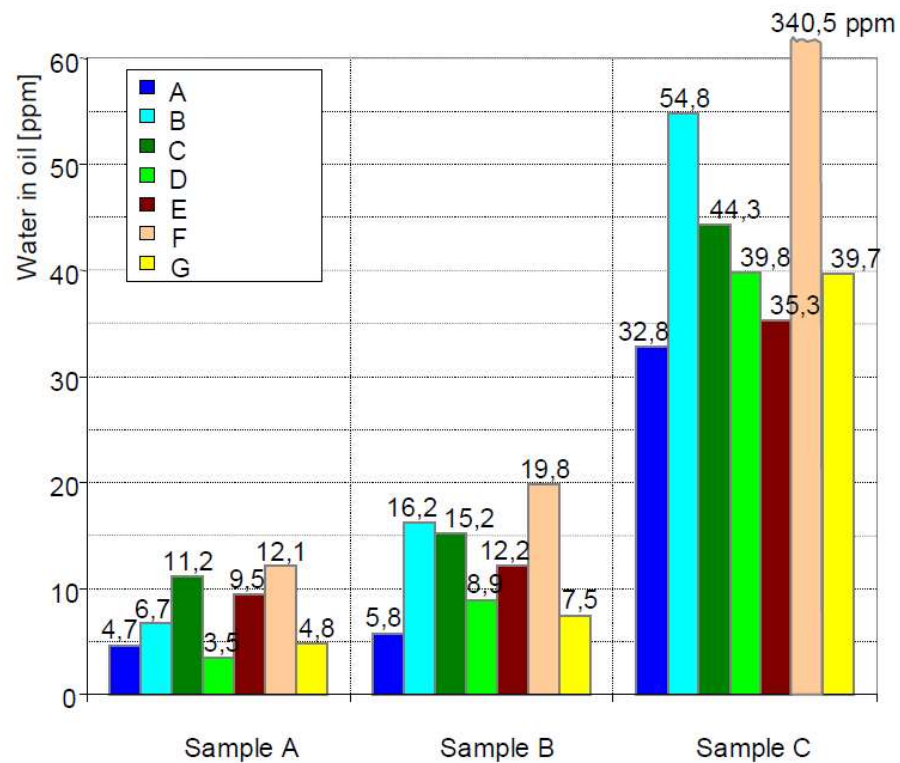


油微水测试误差

■ 欧洲7个实验室对相同油样的测试结果统计

■ 油微水测试注意点

- 趁热取油样
- 取样时严格遵循国际标准



绝缘电阻测试温度相关性

■ 一台老化变压器各温度下的绝缘电阻

Temperature (°C)	IR (GΩ)	DAR (R_{60s}/R_{30s})	PI
21	5.63	1.46	2.67
26	4.15	1.38	2.60
34	2.31	1.27	2.25
51	1.05	1.40	1.91

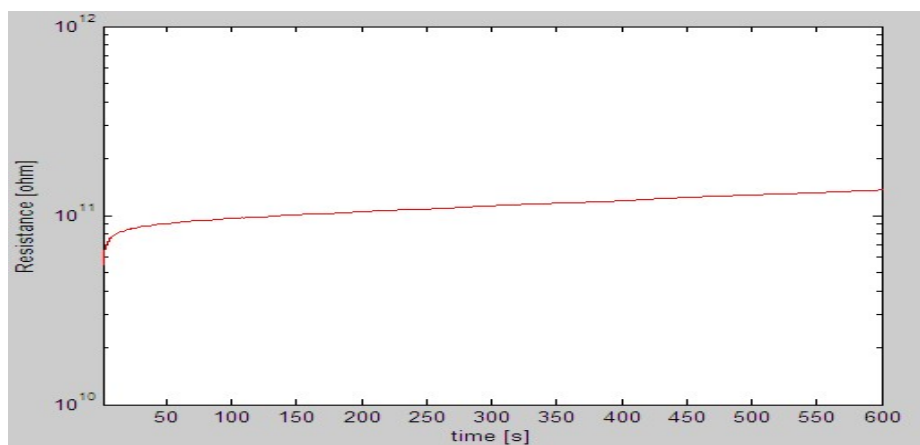
极化指数测试结果判断标准

■ IEEE 43-2000标准:

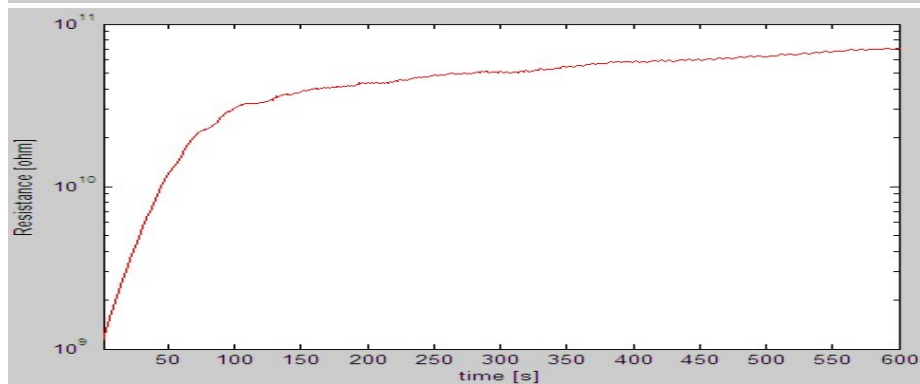
绝缘状况	PI 结果
差	< 1
一般	1 – 2
可接受	2 – 4
好	> 4

绝缘电阻测试方法局限性

■ 绝缘油对极化指数的影响

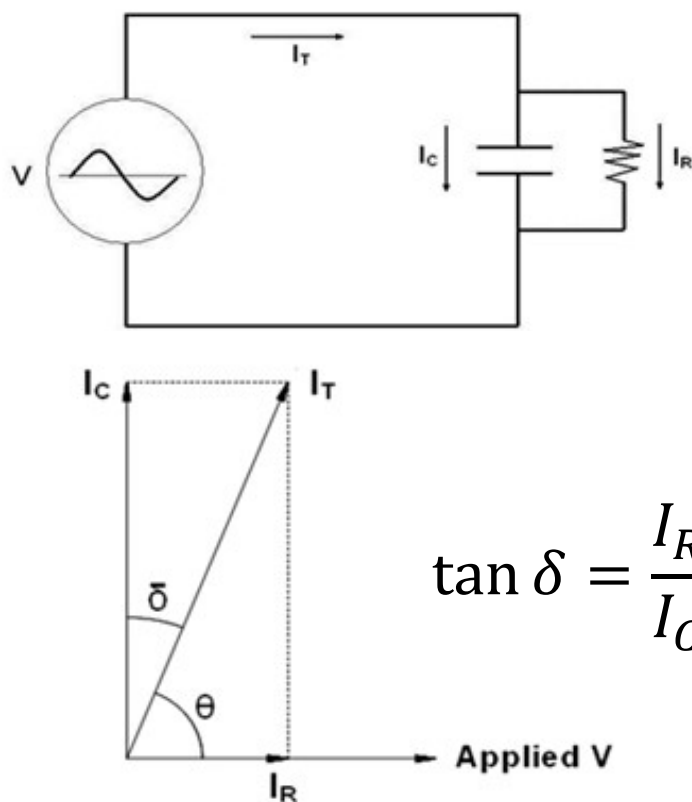


新油变压器: $PI = 1.49$



旧油变压器: $PI = 4.55$

介损($\tan \delta$) 测试基础



- **完美的绝缘**– $\tan \delta = 0$
- **泄漏会导致介损增加**– 电阻的介损值是100%
- 如果绝缘介损过大，会导致热量无法散发而爆炸
- 介损值是反映绝缘质量的参数
- 通常在工频 **50/60 Hz**下，使用**1-10 kV**电压进行介损测试

介损测试结果判定标准

	20° C介损典型数值		
	“新”	“旧”	警戒值
绝缘油变压器	0.2-0.4%	0.3-0.5%	> 0.5%
套管	0.2-0.3%	0.3-0.5%	> 0.5%

IEEE 62-1995: “常规测试得到的介损值能够反映设备对地绝缘和绕组间绝缘的状况。大部分老化的变压器介损值会低于0.5% (20°C); 当介损值介于0.5%到1%之间时, 可能问题不大; 但当介损值大于1%时应进行进一步评估”。

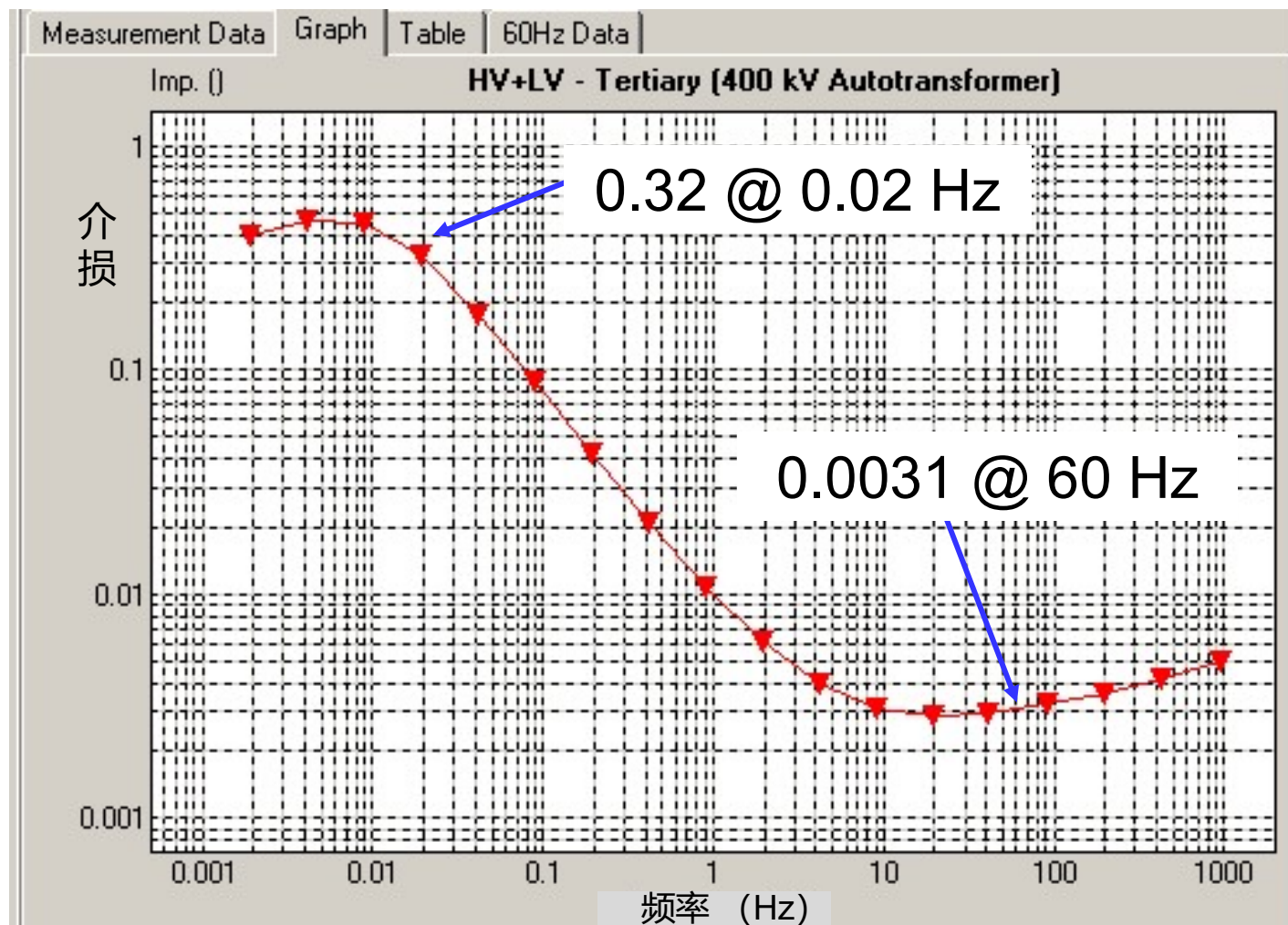
介质谱分析技术 (DFR) 简介

介质谱分析（**DFR**）技术历史

- 1990：ABB 测量了变压器的绝缘特性曲线并建立了模型 (NORD-IS 1990)
- 1993：Peter Werelius 博士研制出了可用于工业绝缘特性测量的测量仪器。
- 1995：第一台商用介质谱分析仪IDA 200 问世
- 1995-2005：普及
- 2006：被CIGRE推荐为行业标准
- 2007：其他竞争对手研制同类产品
- 2009：CIGRE将DFR技术写入标准D1.01.14并发布
- 2013：DFR被写入国际标准IEEE C57.152-2013
- 2017：DFR被写入国际标准IEEE C57.140-2017
- 2018：南网与IEEE共同制定套管DFR测试标准
IEEE PC57.12.200

绝缘特性曲线

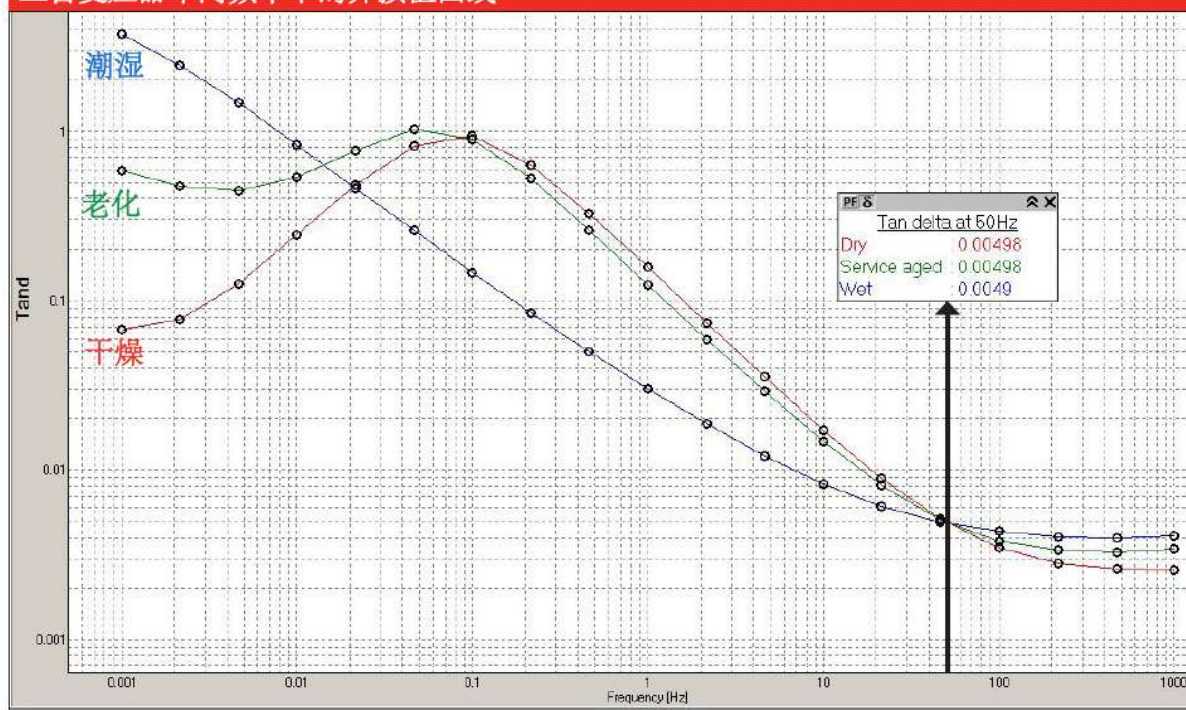
- 介损随频率改变



Megger_R

工频介损与介质谱对比

三台变压器不同频率下的介损值曲线



三台变压器有相同的工频介损 (0.5%)。

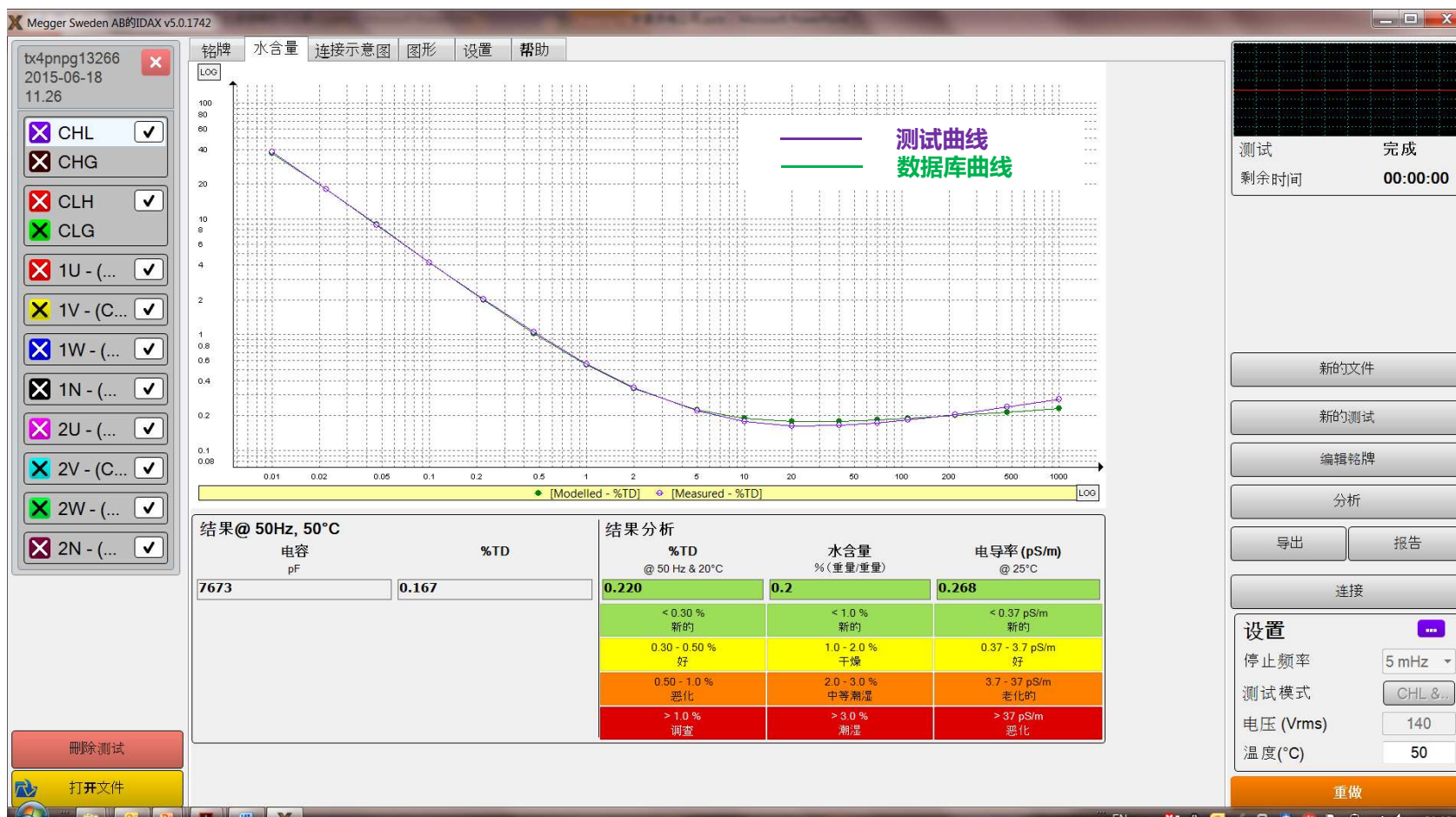
一台是受潮的变压器，3.3% 水含量，但是绝缘油是良好的，电导率低 (1pS/m)。

另一台是干燥的变压器，0.5% 水含量，但是绝缘油接近寿命的终点 (29pS/m)。

第三台是典型的运行时间较长的变压器，水含量为2%，绝缘油的电导率为 (22 pS/m)。

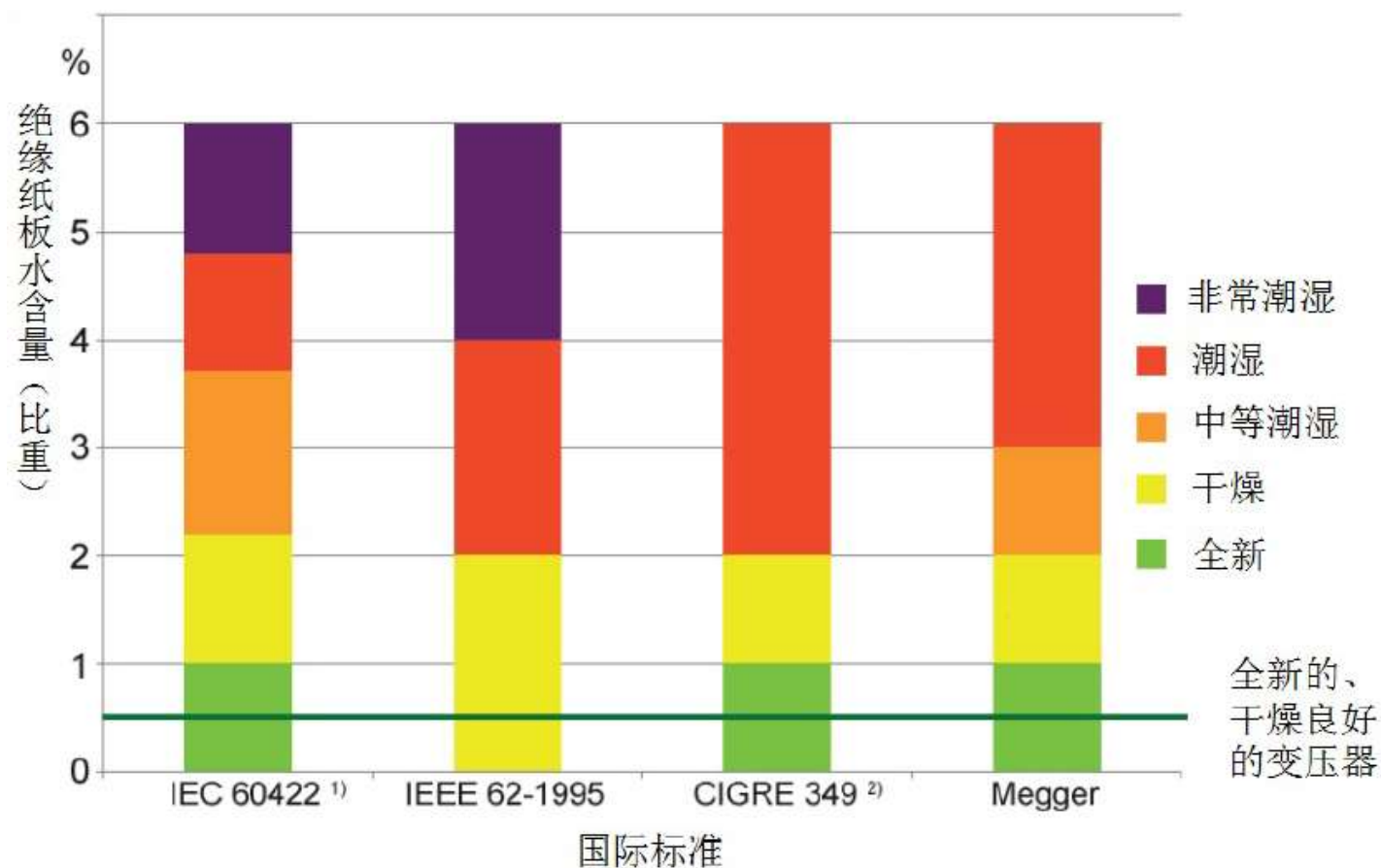
这三台变压器需要不同的维护措施，但是如果仅从工频介损值很难判断该做何种维护。

介质谱分析技术测定绝缘纸水含量



Megger[®]

绝缘纸水含量标准

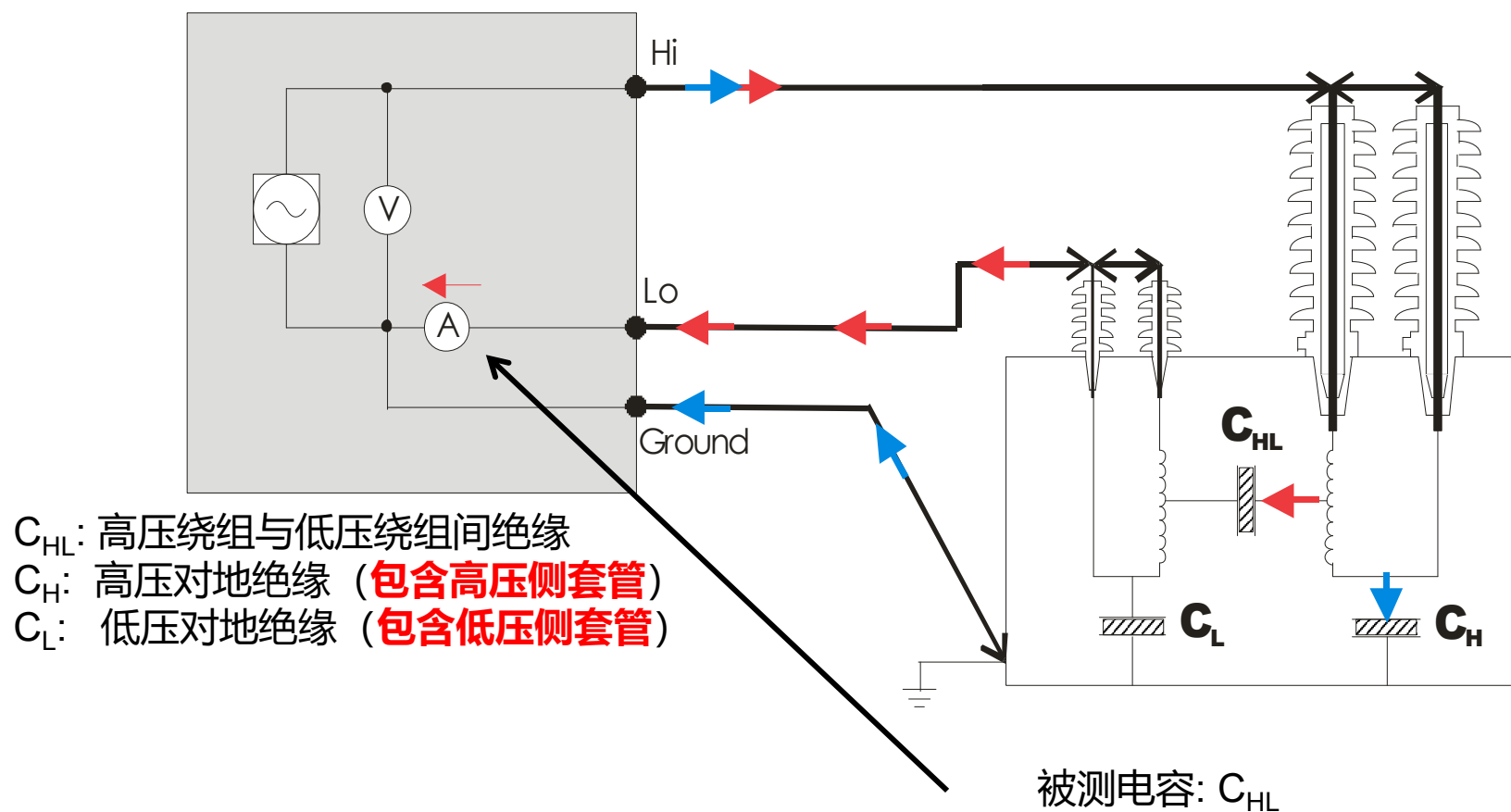


Megger[®]

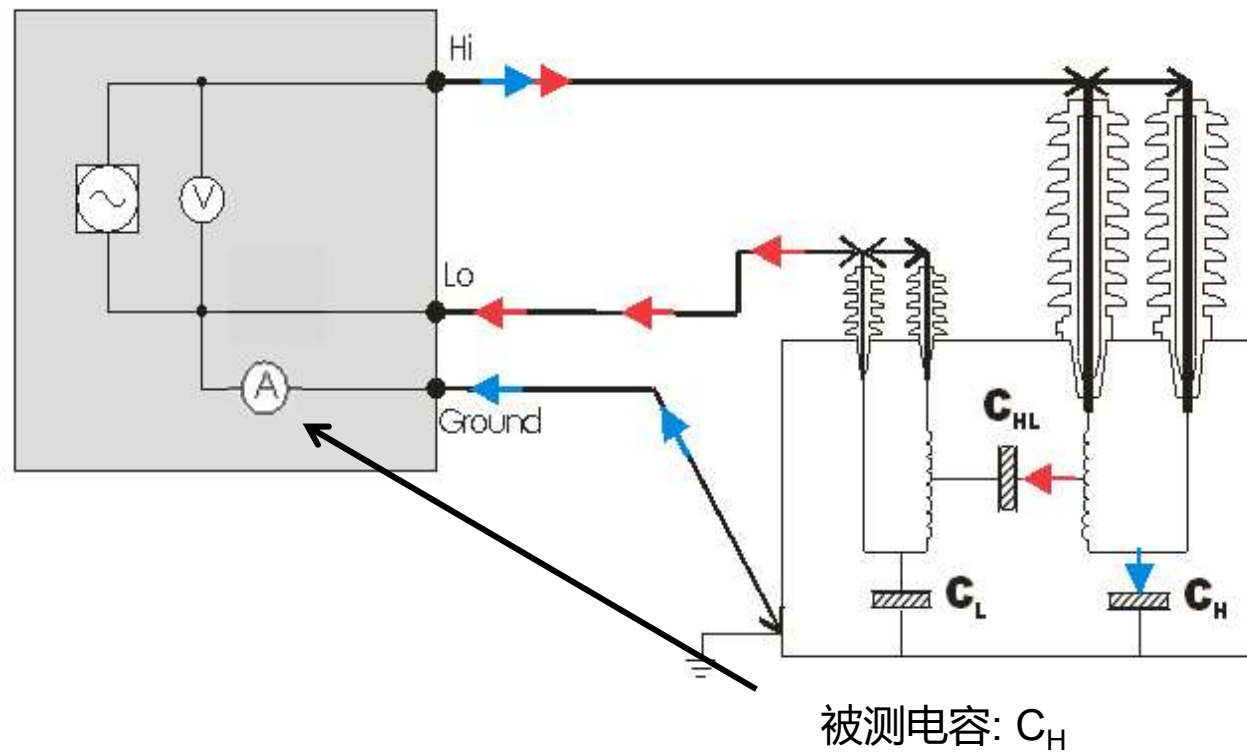
实测案例分析

Megger[®]

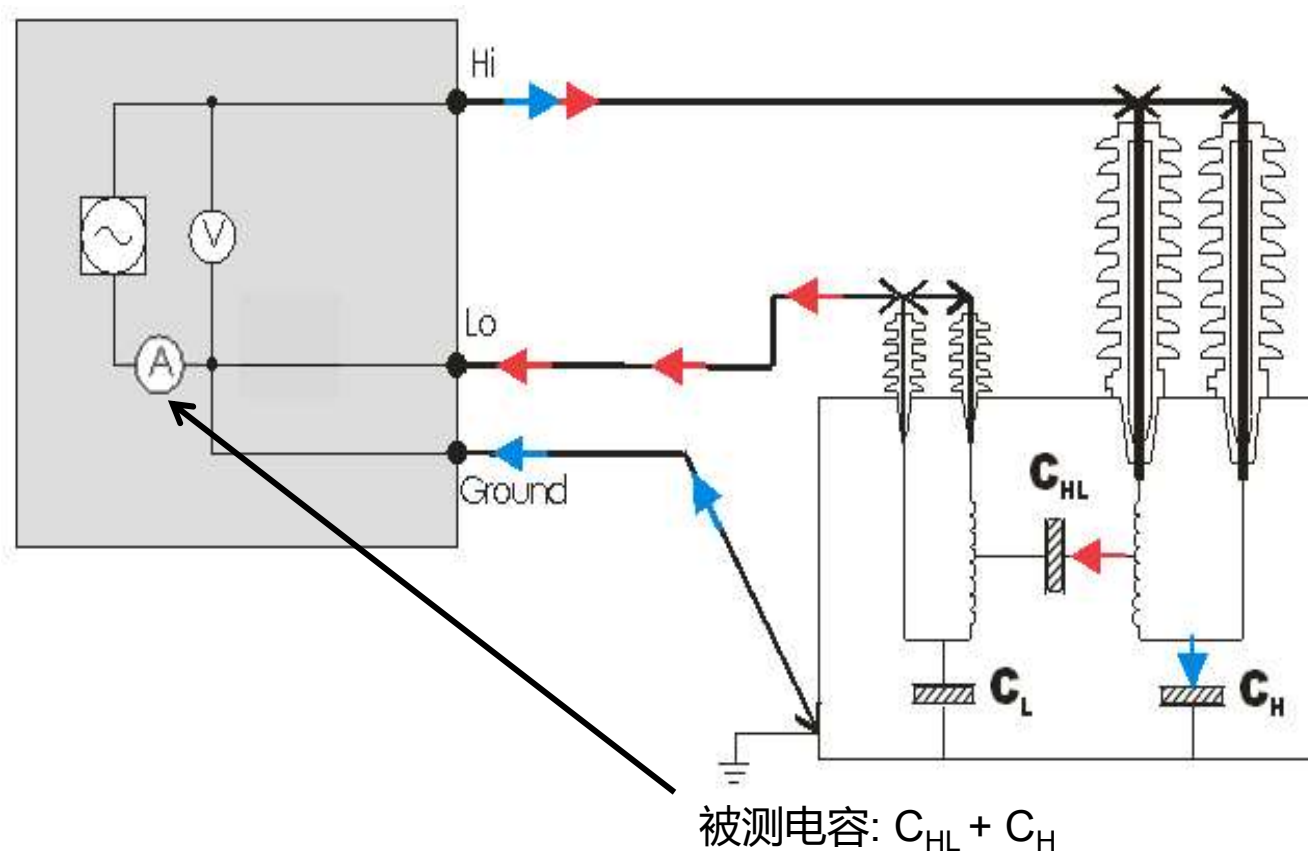
介质谱测试接线图



介质谱测试接线图



介质谱测试接线图



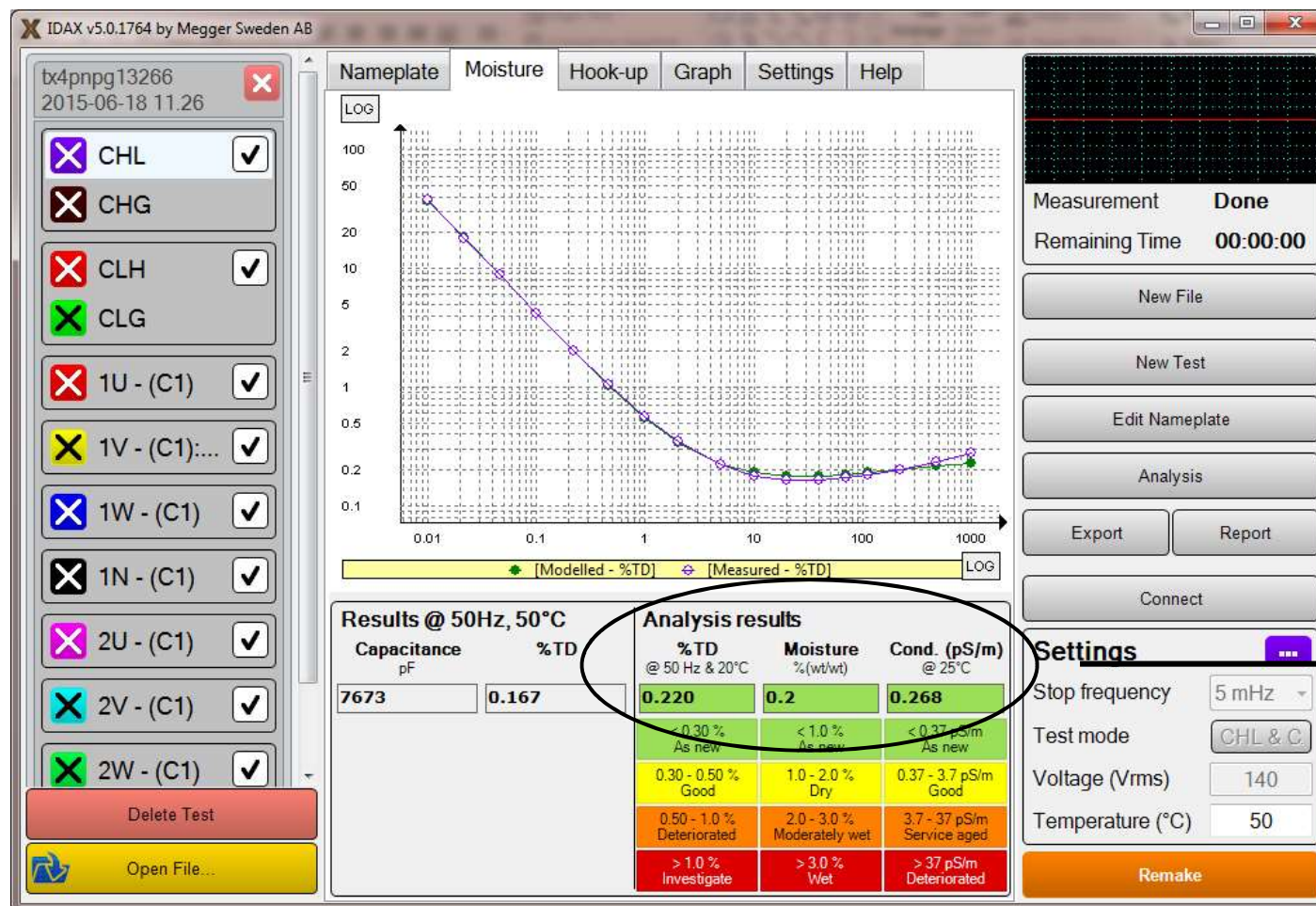
案例1

- 马来西亚某变电站132/66kV、24MVA变压器及其套管测试



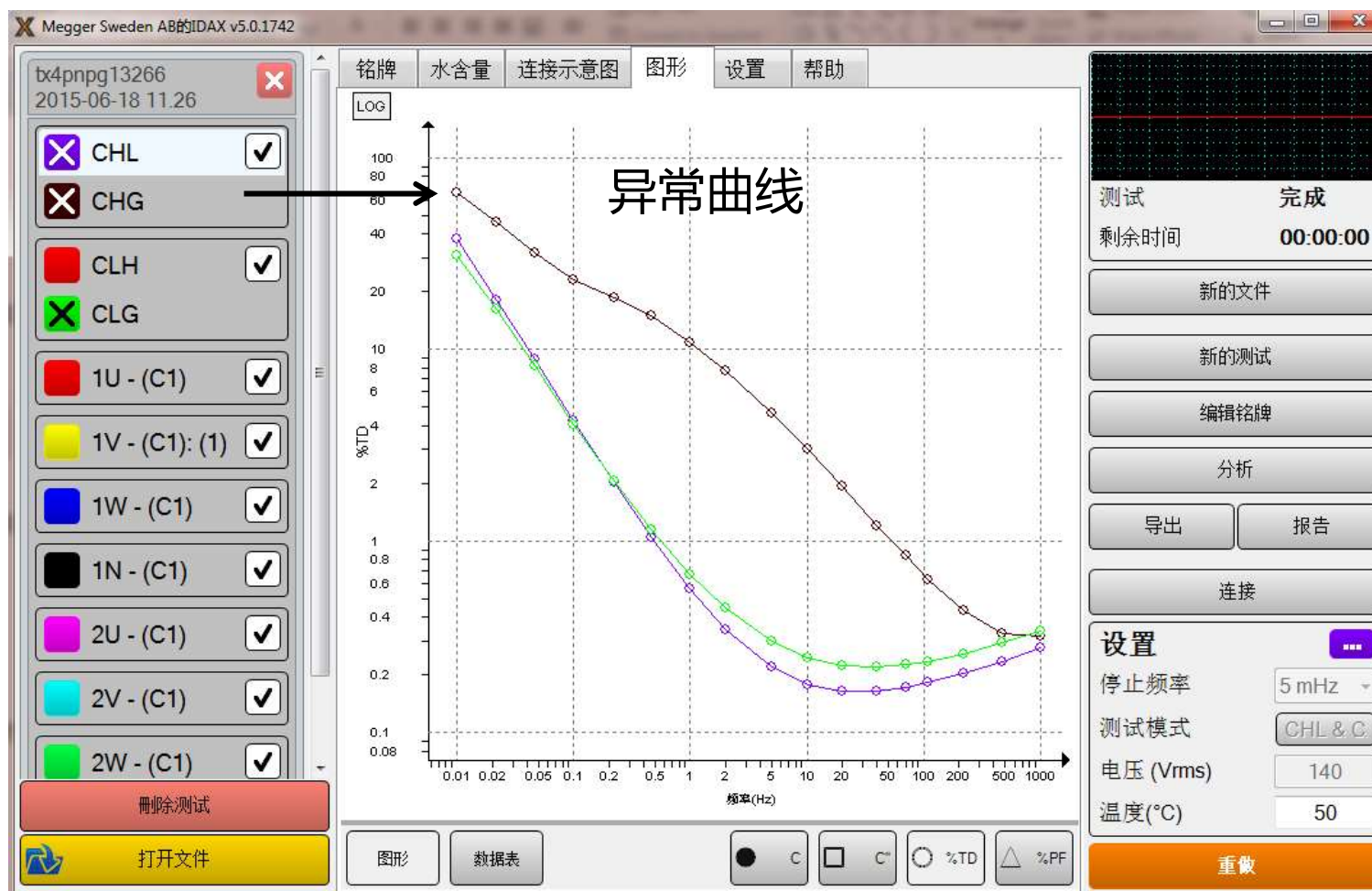
Megger[®]

变压器主绝缘—— C_{HL}



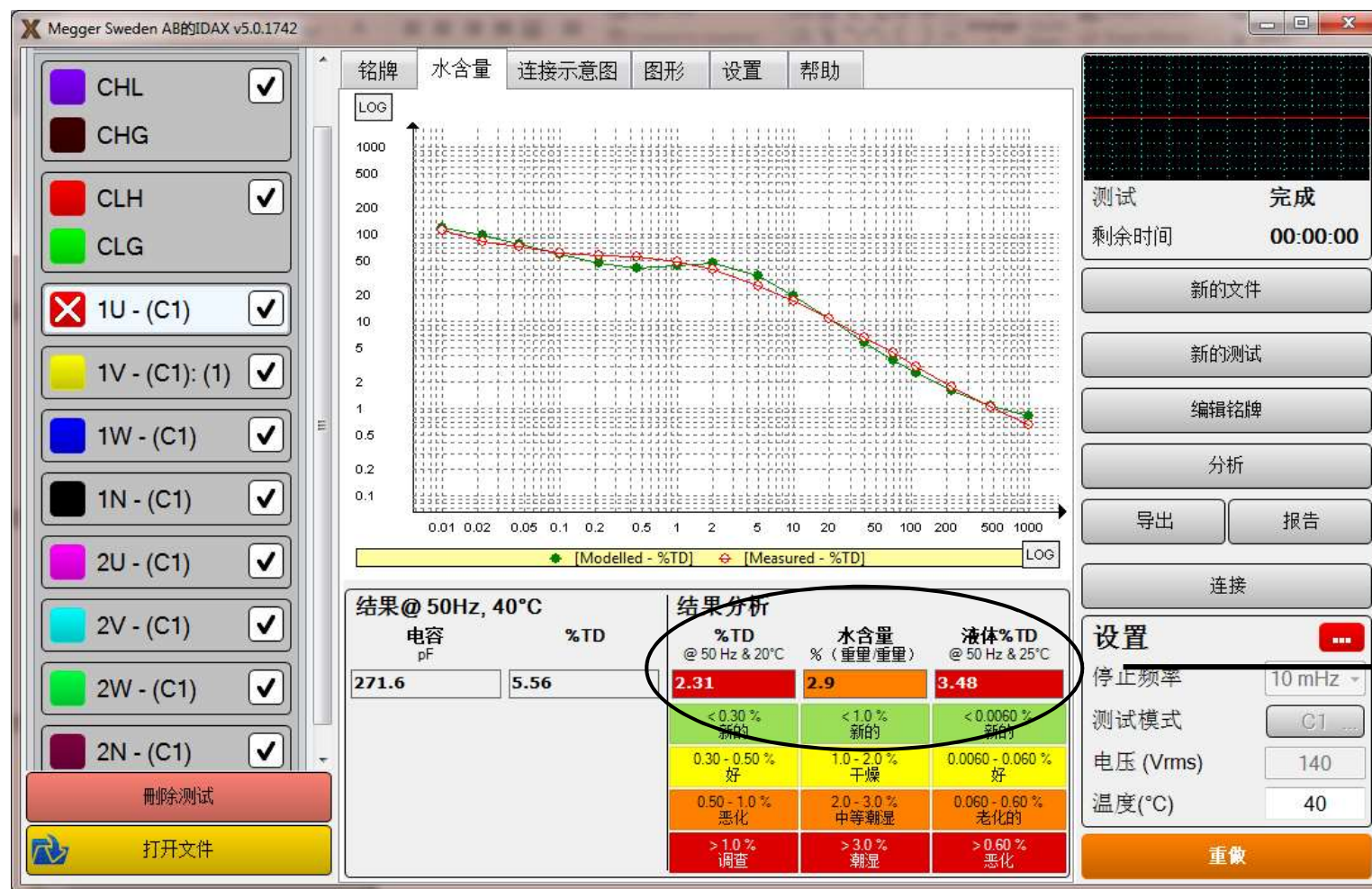
绝缘良好

变压器绝缘 —— 三种绝缘



Megger[®]

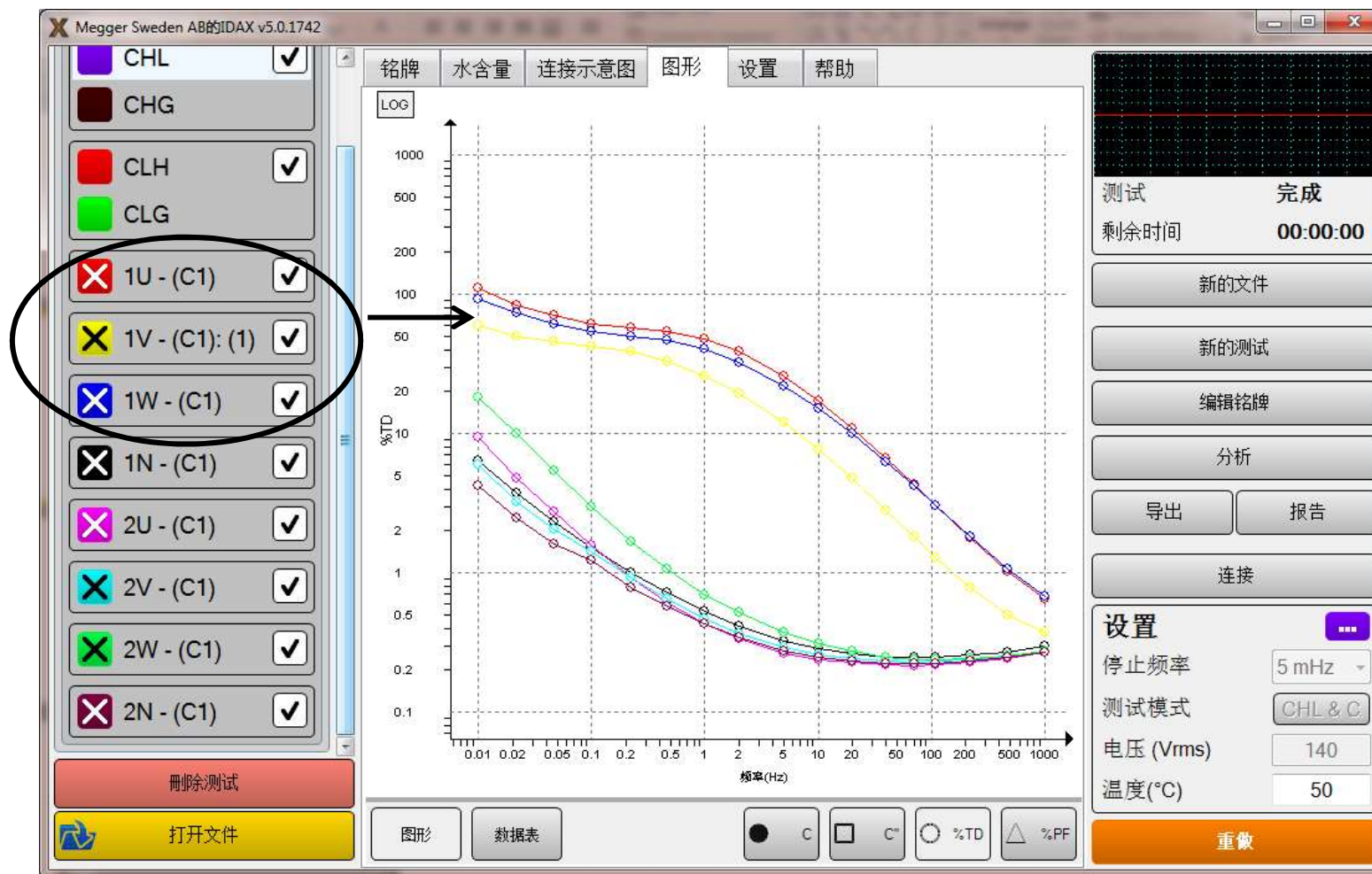
高压A相套管DFR曲线



绝缘
失效!

Megger[®]

所有套管DFR曲线一览



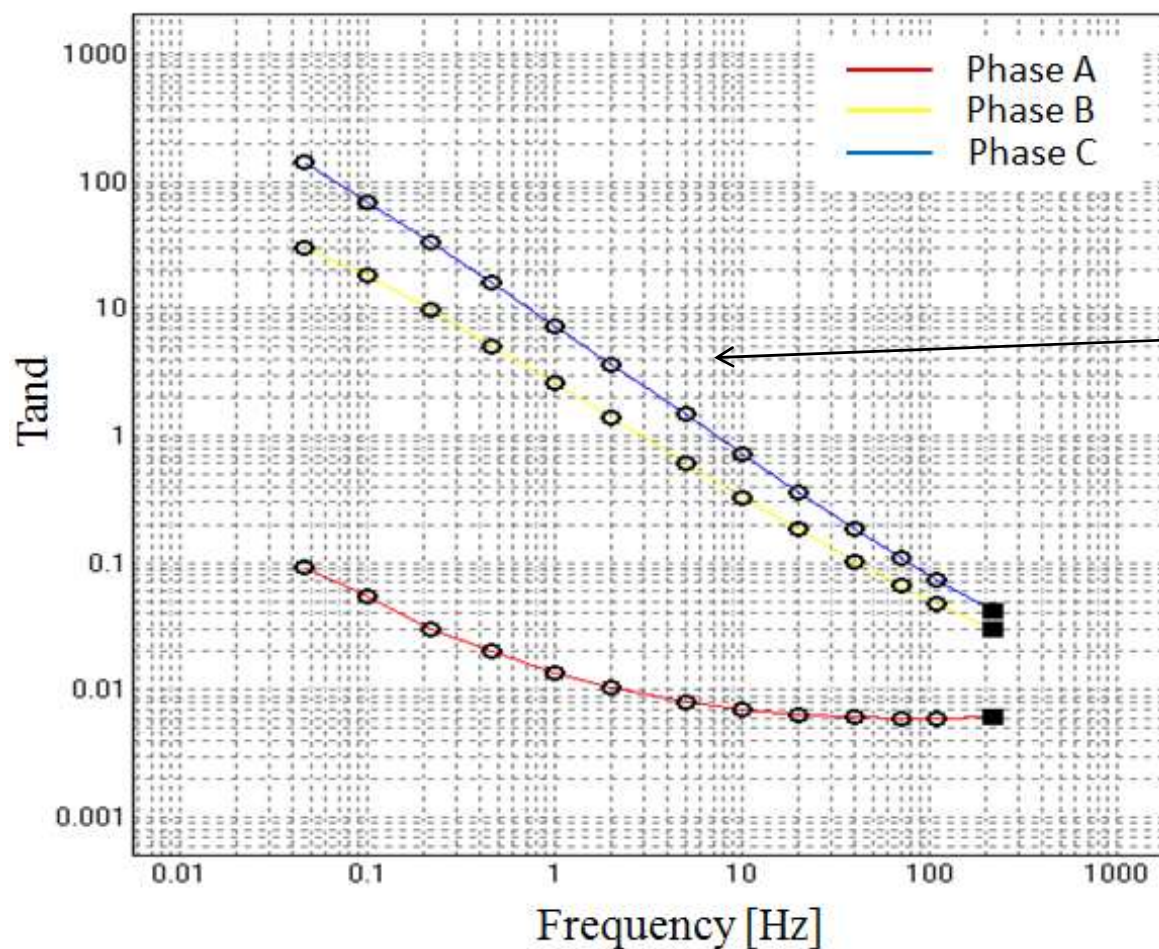
Megger

案例 2

■ 秦山核电 520/24kV、410MVA变压器

		A相	B相	C相
$C_{HL}+C_L$ (常规介损)	电容 (pF)	13537	13385	13422
	介损 (%)	0.363	1.827	5.31
C_L	电容 (pF)	4584	4573	4555
	介损 (%)	0.606	4.95	15.2
	电容 (pF)	8953	8812	8867
C_{HL}	介损 (%)	0.238	0.206	0.23
	水含量 (%)	0.3	0.5	0.2
	电导率 (pS/m)	0.001	0.019	0.037

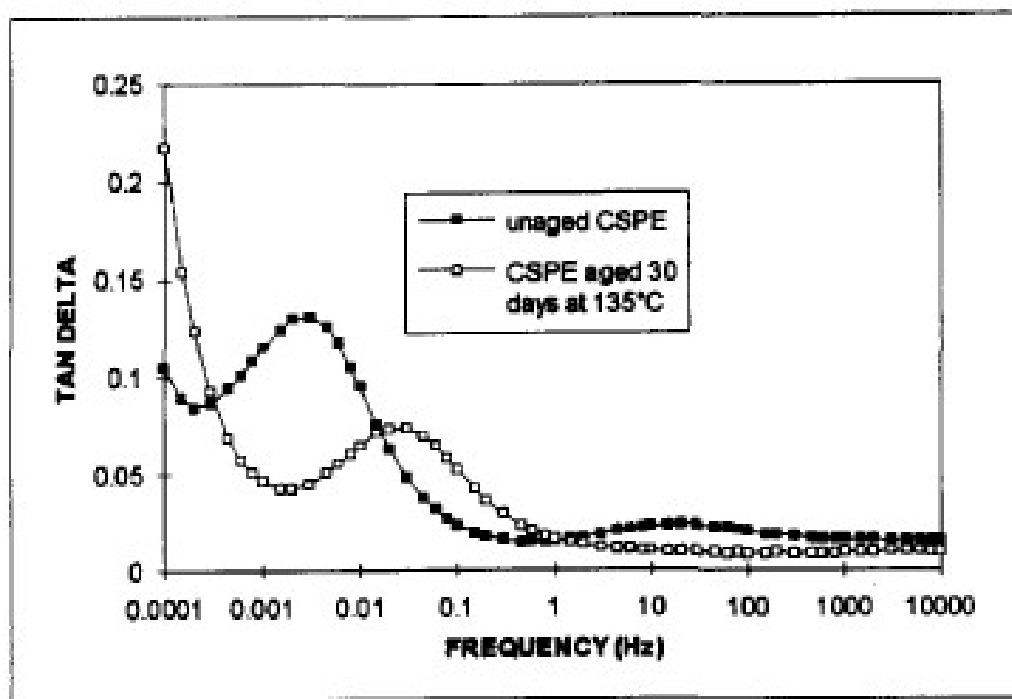
对地电容DFR测试结果



对数坐标下DFR曲线呈直线表明电阻性电流 (σ_{DC}) 占主导, 绝缘极化电流分量被“湮没”。

案例3

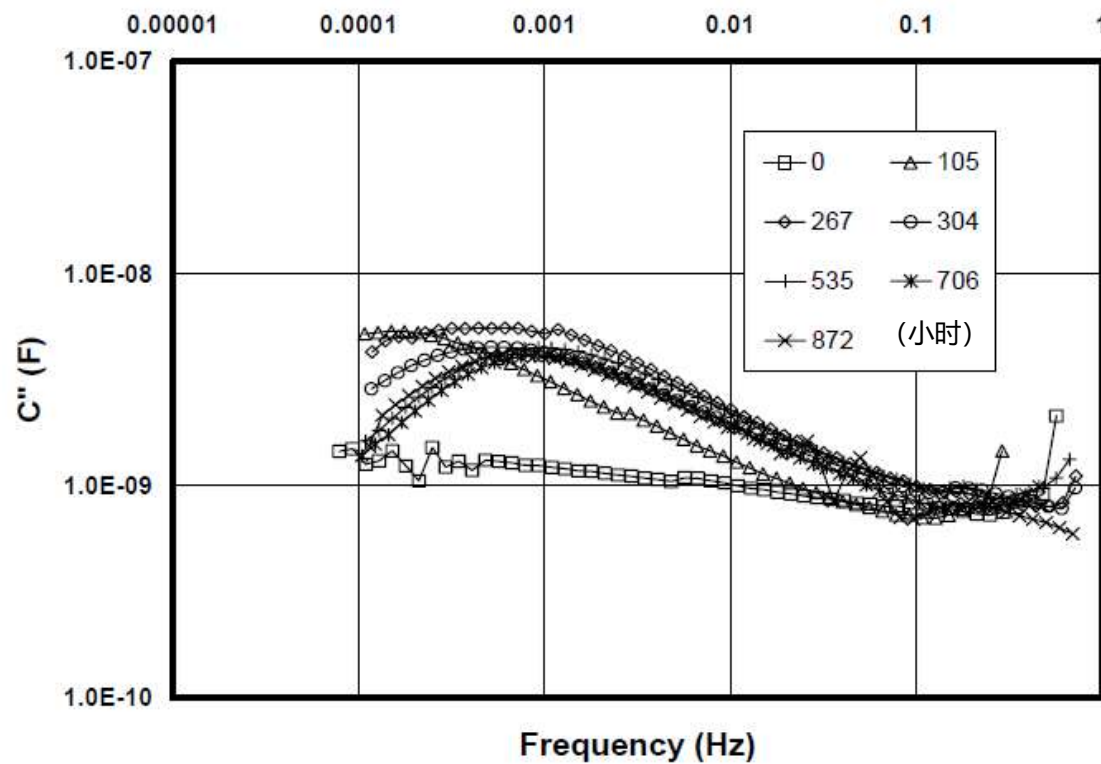
■ 橡胶电缆老化



美国核电站EPR电缆老化对比试验

案例4

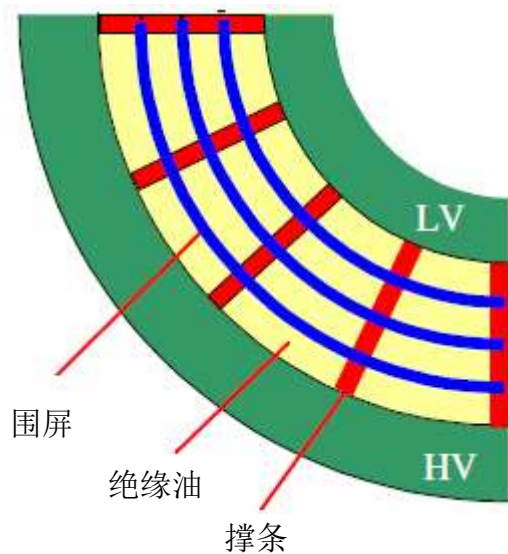
■ 电机定子绕组绝缘（Epoxy-Mica）老化试验



特征：峰值偏移

变压器绝缘系统模型——XY模型*

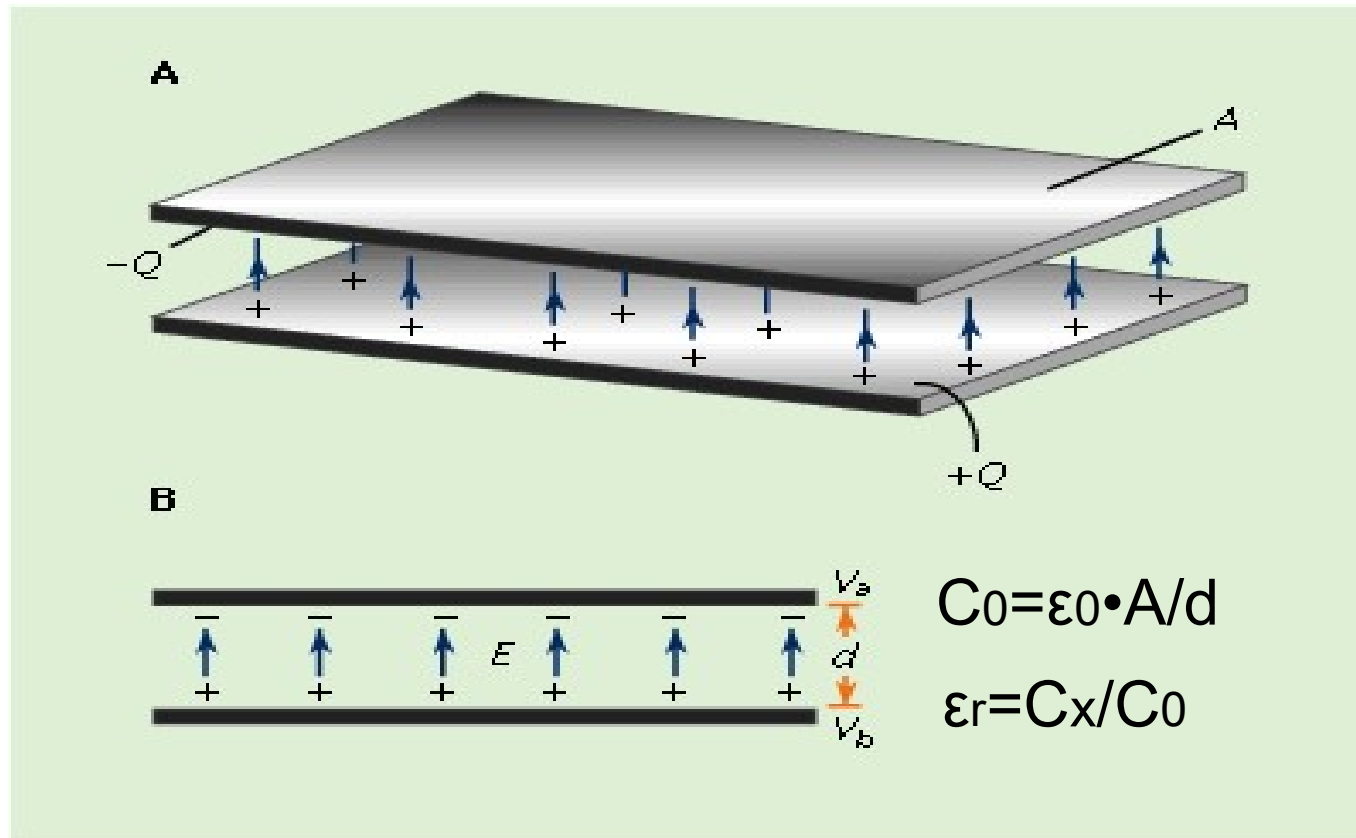
- XY 模型描述了绝缘纸板和绝缘油的相对体积



$$X = \frac{\text{围屏总厚度}}{\text{绕组间距离}}$$

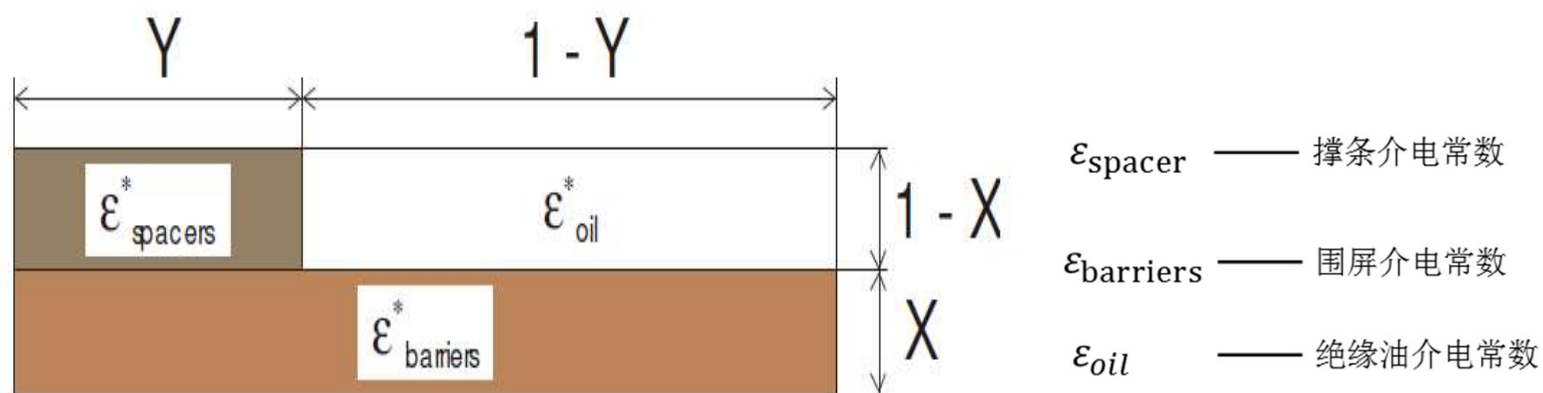
$$Y = \frac{\text{撑条总宽度}}{\text{绕组平均周长}}$$

绝缘材料的电介质常数*



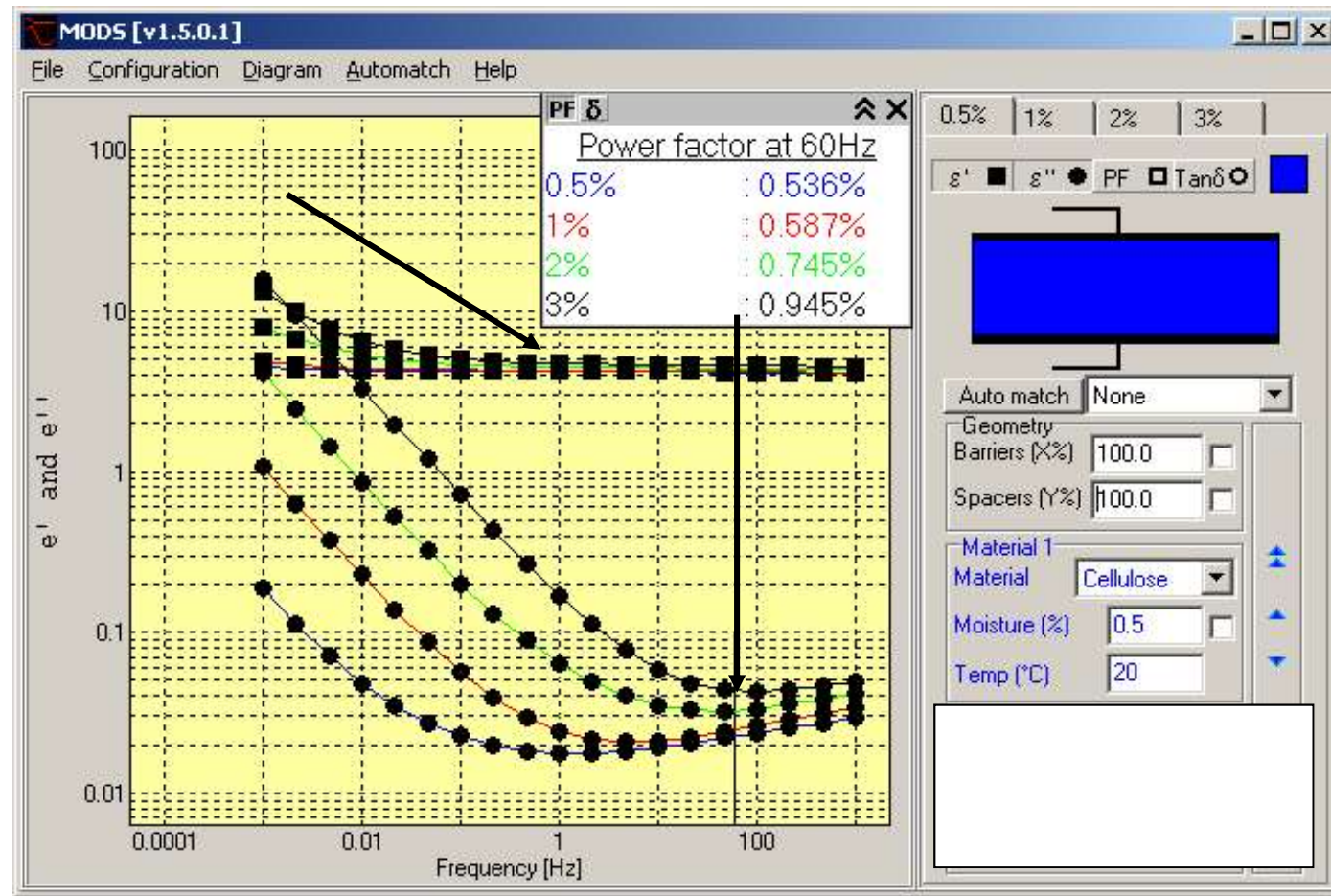
变压器绝缘模型——XY模型*

■ XY模型计算公式



$$\epsilon(\omega, T) = \frac{Y}{\frac{1-X}{\epsilon_{\text{spacers}}} + \frac{X}{\epsilon_{\text{barriers}}}} + \frac{1-Y}{\frac{1-X}{\epsilon_{\text{oil}}} + \frac{X}{\epsilon_{\text{barriers}}}}$$

不同水含量绝缘纸板的介质谱曲线*



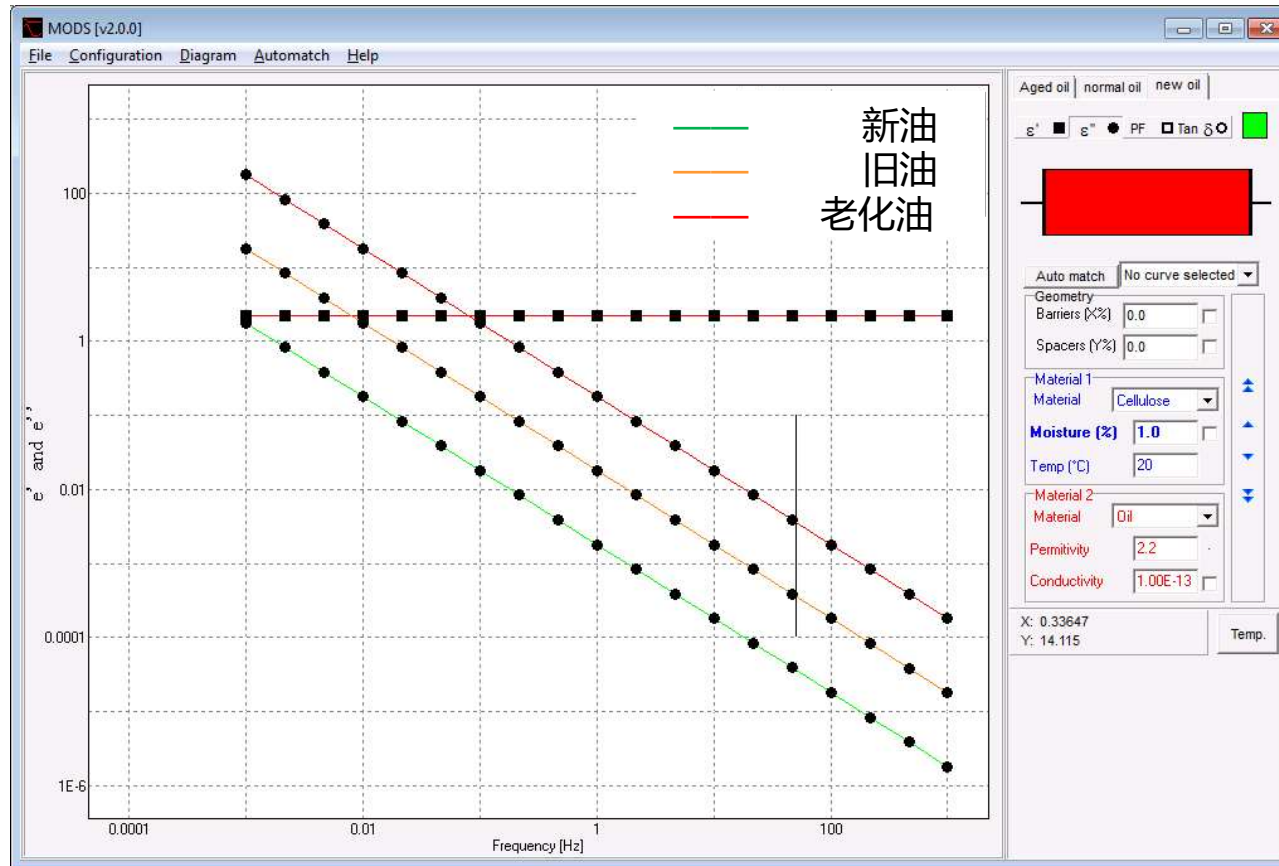
绝缘纸板模型*

$$\varepsilon''_{ce} = \underbrace{\frac{\sigma_{dc}}{\varepsilon_0 \omega}}_{\text{电导损耗}} + \underbrace{A \omega^{-n} \cot\left((1-n)\frac{\pi}{2}\right) + \text{Im}\left\{\frac{\Delta\varepsilon_1}{1+(j\omega\tau_1)^{1-\alpha_1}} + \frac{\Delta\varepsilon_2}{1+(j\omega\tau_2)^{1-\alpha_2}}\right\}}_{\text{极化损耗}}$$

水含量 (20°C)	σ_{dc} (pS/m)	A	n	$\Delta\varepsilon_1$	τ_1 (s)	α_1	$\Delta\varepsilon_2$	τ_2 (ps)	α_2
1%	0.013	0.005	0.6	3.9	4600	0.37	3.7	0.3	0.8
4%	0.71	0.02	0.55	37	255	0.41	4.1	20	0.71

Parameter	Temp(°C)	Moisture content (%)				Comments
		1	2	3	4	
A	20	0.005	0.07	0.059	0.02	Have a tendency to increase with increasing both temperature and moisture content.
	50	0.073	0.076	0.2	0.21	
	80	0.33	0.35	1.75	5.9	
n	20	0.6	0.5	0.57	0.55	Increase with temperature. Typically around 0.6. Always less than 1.
	50	0.71	0.6	0.61	0.89	
	80	0.6	0.64	0.63	0.87	
$\Delta\epsilon_1$	20	3.9	2.6	10.1	37	Have a tendency to increase with increasing moisture content.
	50	2.2	15	23	25	
	80	6.3	8.2	12.6	17	
$\tau_1(s)$	20	4600	2600	1010	255	Decrease with increasing both temperature and moisture content.
	50	35	100	72	25	
	80	16	4.2	0.37	0.07	
α_1	20	0.37	0.24	0.49	0.41	No clear variation. A value between 0.2 and 0.5 was attained.
	50	0.34	0.39	0.44	0.33	
	80	0.3	0.45	0.35	0.3	
$\Delta\epsilon_2$	20	3.7	3.8	3.9	4.1	Almost no variation with temperature. Slightly increase with moisture content.
	50	3.7	3.8	3.9	4.1	
	80	3.7	3.79	4.3	4.2	
$\tau_2(s)$	20	$3.00 \cdot 10^{-11}$	$7.00 \cdot 10^{-11}$	$1.30 \cdot 10^{-10}$	$2.00 \cdot 10^{-10}$	Decreasing with increasing temperature and tendency to increase with increasing moisture content.
	50	$8.00 \cdot 10^{-12}$	$1.00 \cdot 10^{-11}$	$3.00 \cdot 10^{-11}$	$3.00 \cdot 10^{-11}$	
	80	$3.00 \cdot 10^{-12}$	$4.10 \cdot 10^{-12}$	$1.00 \cdot 10^{-11}$	$1.00 \cdot 10^{-11}$	
α_2	20	0.8	0.76	0.73	0.71	Slight decrease with increasing both temperature and moisture content.
	50	0.76	0.75	0.71	0.71	
	80	0.74	0.72	0.69	0.7	
$\sigma_{\pm}(S/m)$	20	$1.34 \cdot 10^{-14}$	$8.43 \cdot 10^{-14}$	$2.60 \cdot 10^{-13}$	$7.14 \cdot 10^{-13}$	More intense with increasing both temperature and moisture content.
	50	$2.86 \cdot 10^{-13}$	$2.73 \cdot 10^{-12}$	$7.11 \cdot 10^{-12}$	$1.20 \cdot 10^{-11}$	
	80	$8.51 \cdot 10^{-12}$	$5.11 \cdot 10^{-11}$	$1.00 \cdot 10^{-10}$	$2.22 \cdot 10^{-10}$	

不同老化程度的绝缘油介质谱曲线*



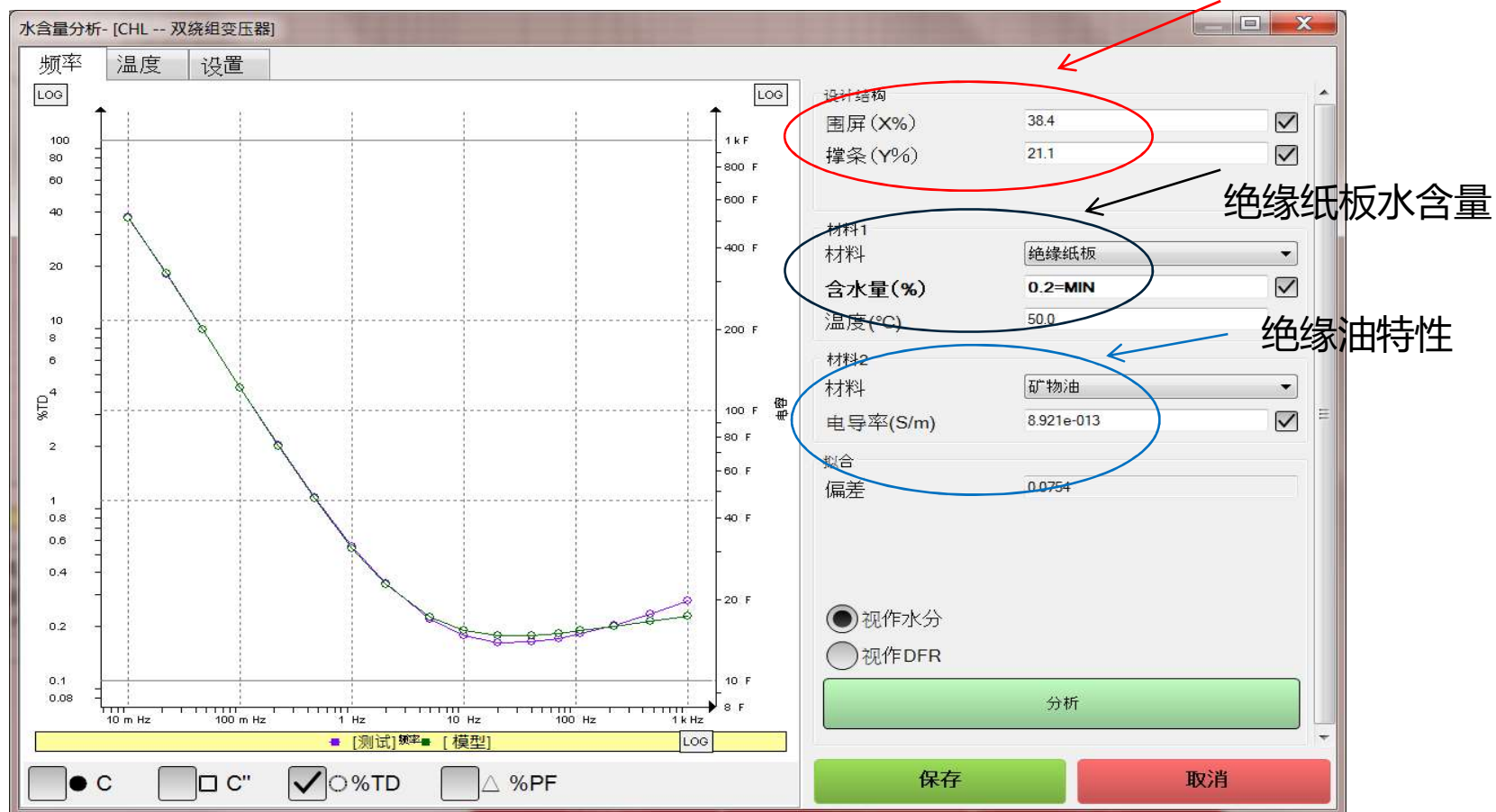
绝缘油模型*

- 仅电导损耗——对数坐标下绝缘油的介质谱是一条直线

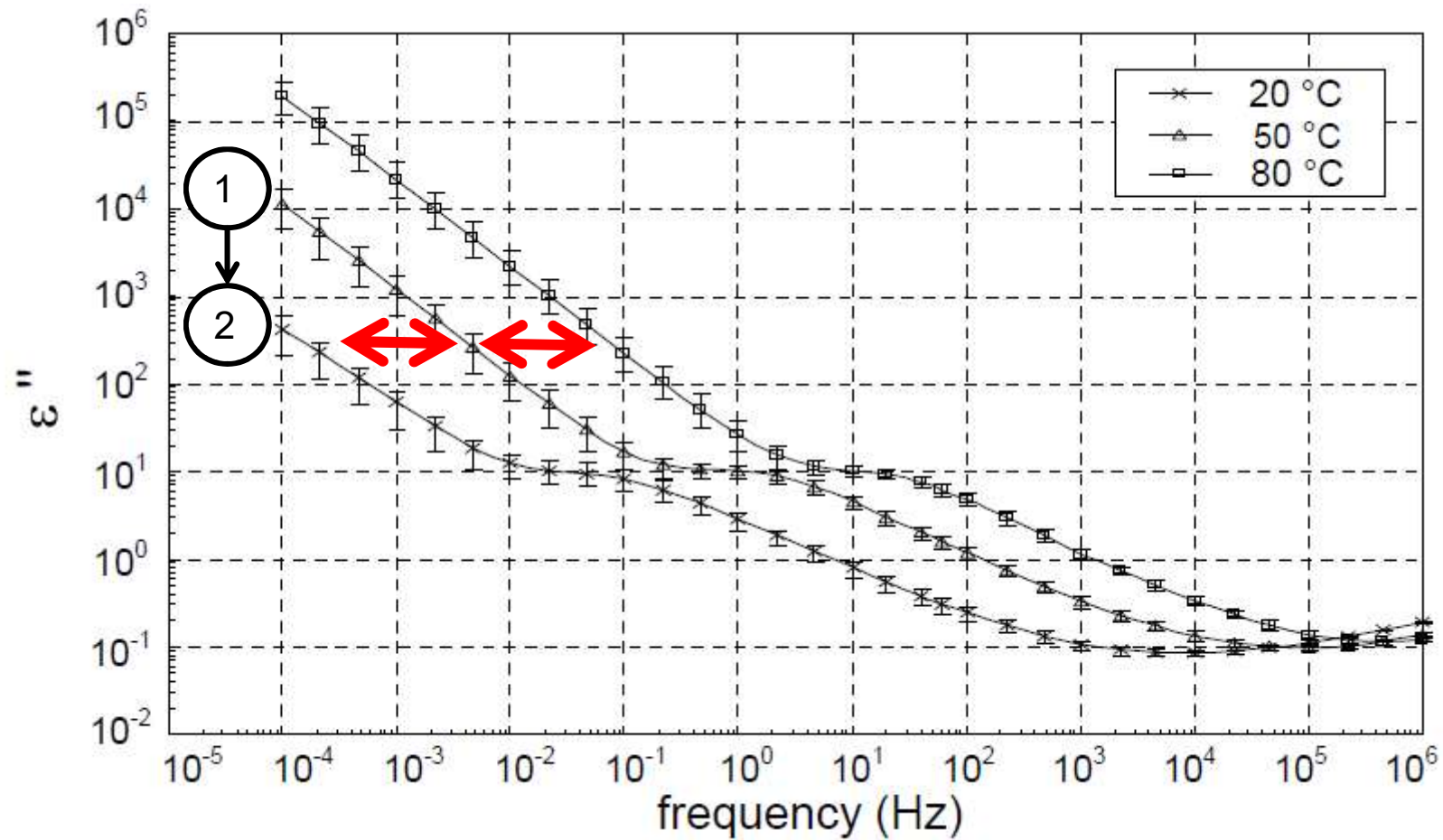
$$\varepsilon''_{r,oil} = \frac{\sigma_{dc}}{\underbrace{\varepsilon_0 \omega}_{\text{电导损耗}}}$$

绝缘油状况	σ_{dc} (pS/m)
新油	< 0.37
旧油	0.37 – 3.7
老化油	3.7 - 37

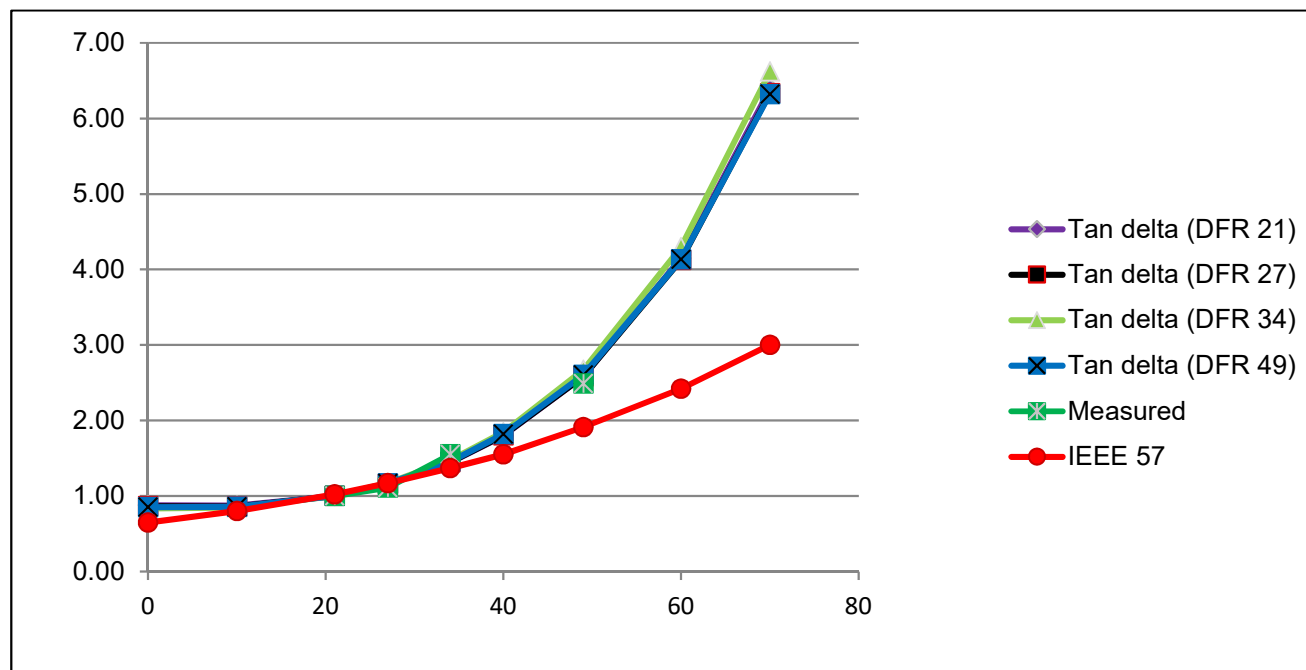
介质谱测试详细分析结果*



智能温度校正*

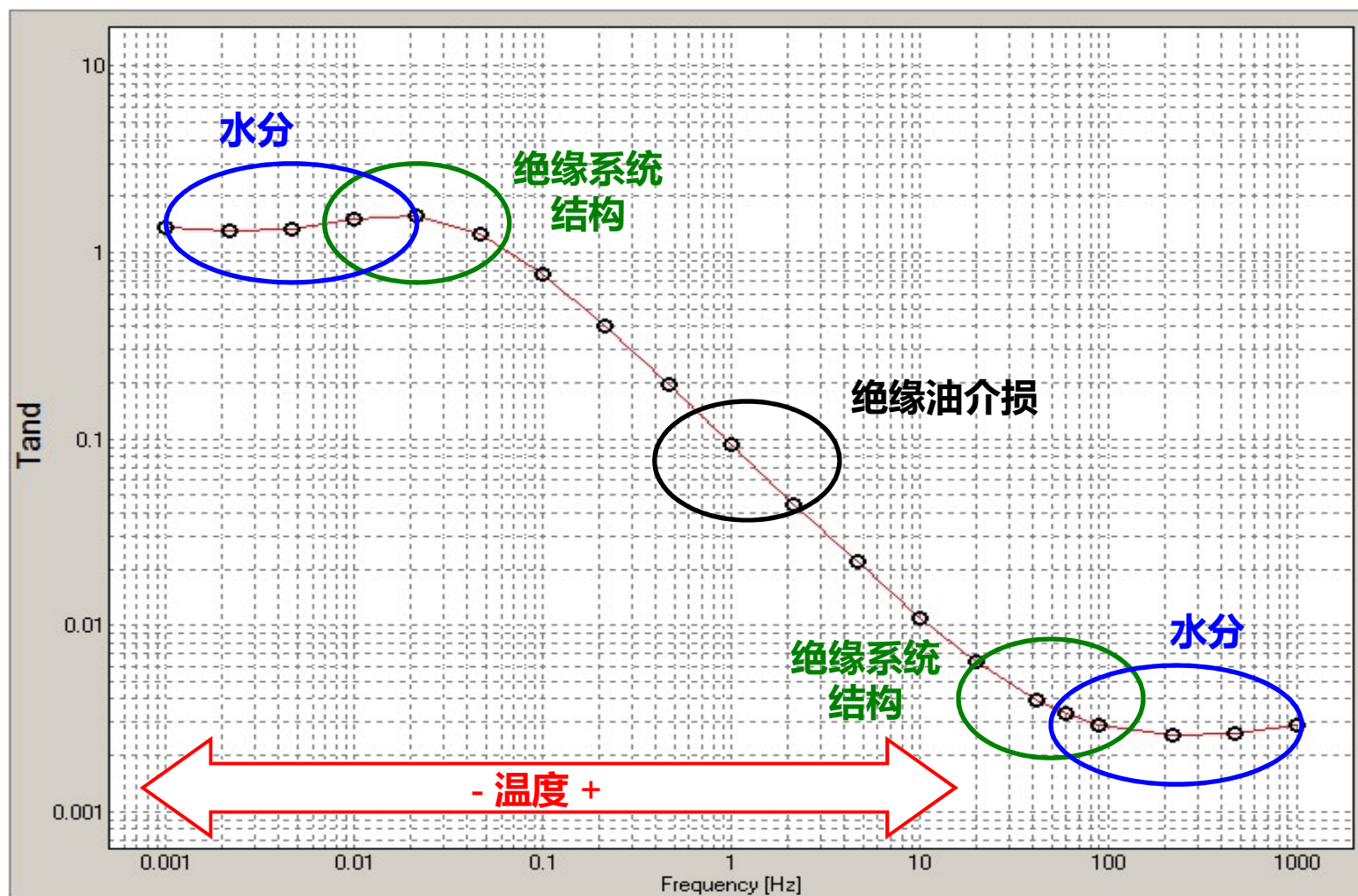


智能温度校正



温度(°C)	电容(pF)	介损测试值(%)	实际校正因数	智能校正值@20°C	IEEE C57.12.90校正因数	标准校正值@20°C
21	1978	0.329	1.04	0.31	1.02	0.32
26	1976	0.367	1.20	0.31	1.14	0.32
34	1978	0.516	1.53	0.34	1.37	0.38
49	1974	0.832	2.70	0.31	1.91	0.44

影响介质谱的因素*



IDAX300仪器及软件介绍

IDAX 300 – 介质谱分析仪



Megger[®]

IDAX 系统

硬件

- 测量信号: 0 – 200 V 峰值 0 – 50 mA 峰值
- 频率: 0.0001 Hz – 10000 Hz (IDAX-300)
- 样品范围: 10 pF – 100 μ F
- 双通道测量 (IDAX-300)

软件

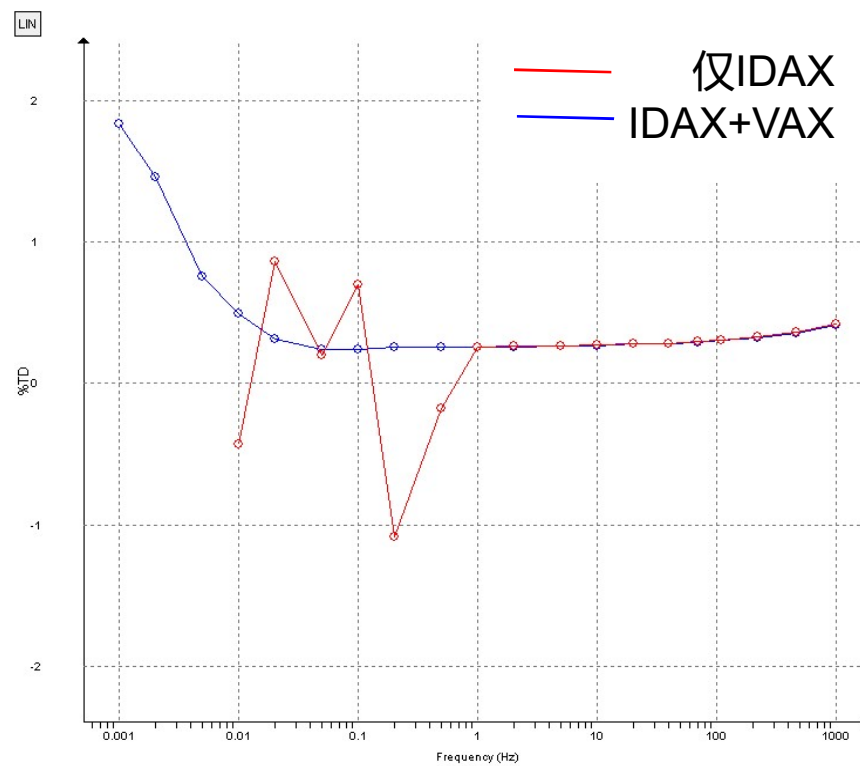
- IDAX控制分析软件
- 含水量分析软件 (MODS)

VAX020 – 2kV电压放大器



Megger[®]

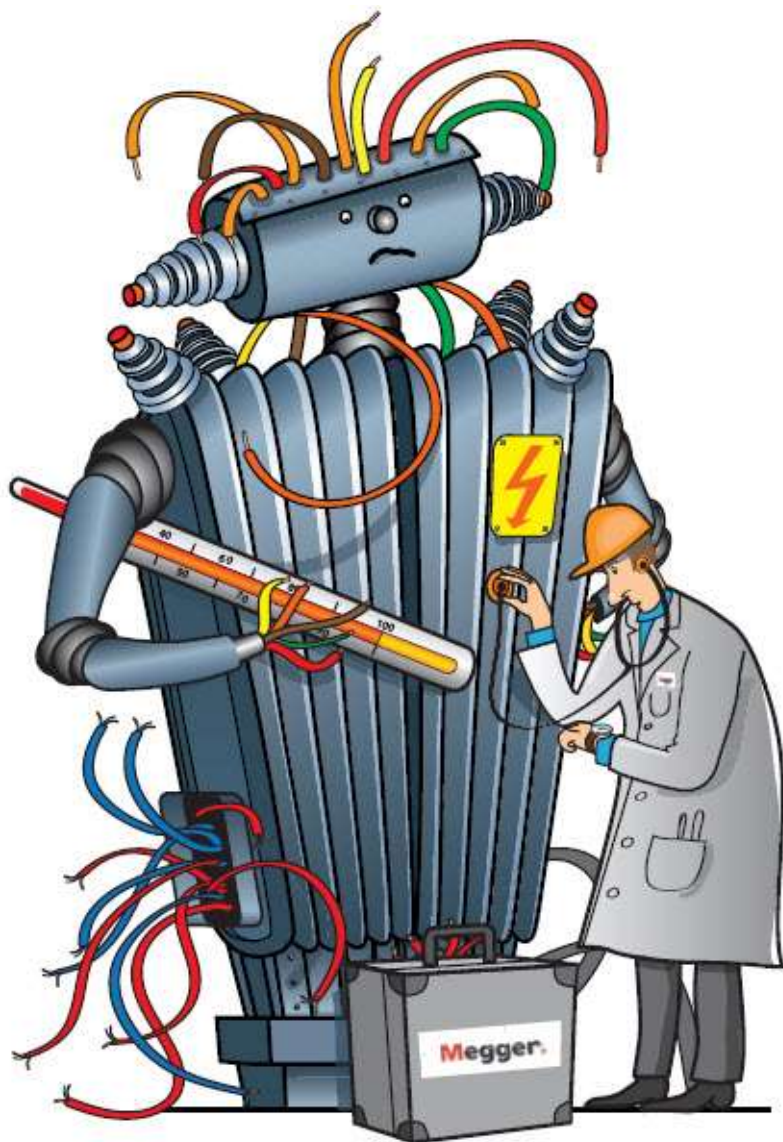
现场套管测试干扰解决方案——VAX020



[BACK](#)

结论

- 介质谱分析测试的是各个不同频率下的电容值和介损值，并绘制成电容和介损的频率曲线。
- 介质谱曲线能够更为清晰地反映绝缘的状态，并且有助于判断测试结果是否存在异常。
- 专业分析软件能够根据介质谱曲线计算出变压器和套管绝缘纸的水含量和绝缘油的介损。

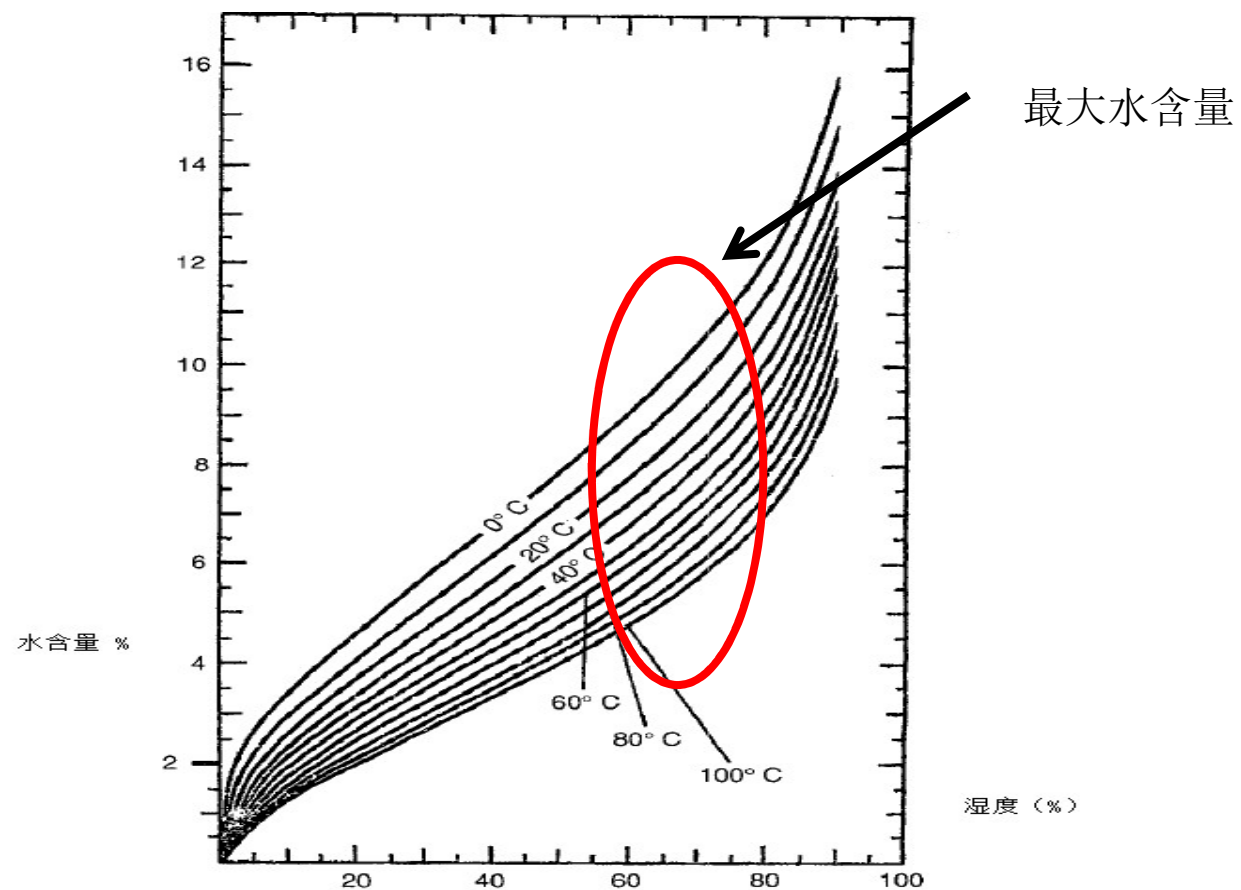


谢谢

Megger[®]

变压器绝缘系统水分测定

空气湿度和水分含量关系



电力变压器水含量

- 变压器绝缘系统由赛璐璐和矿物油构成，几乎所有的水分都集中在赛璐璐中：
 - 25 吨油在常温下含水量 = 0,5 kg
 - 2.5 吨赛璐璐 3% 湿度时的水含量 = 75 kg
- 绝缘油的水含量和温度以及油的纯度有关：
 - 老化的油水含量比新油高
 - 含水量低不宜检测
 - 检测绝缘油水含量推测固体水含量结果误差 ± 200% !

电力变压器水含量

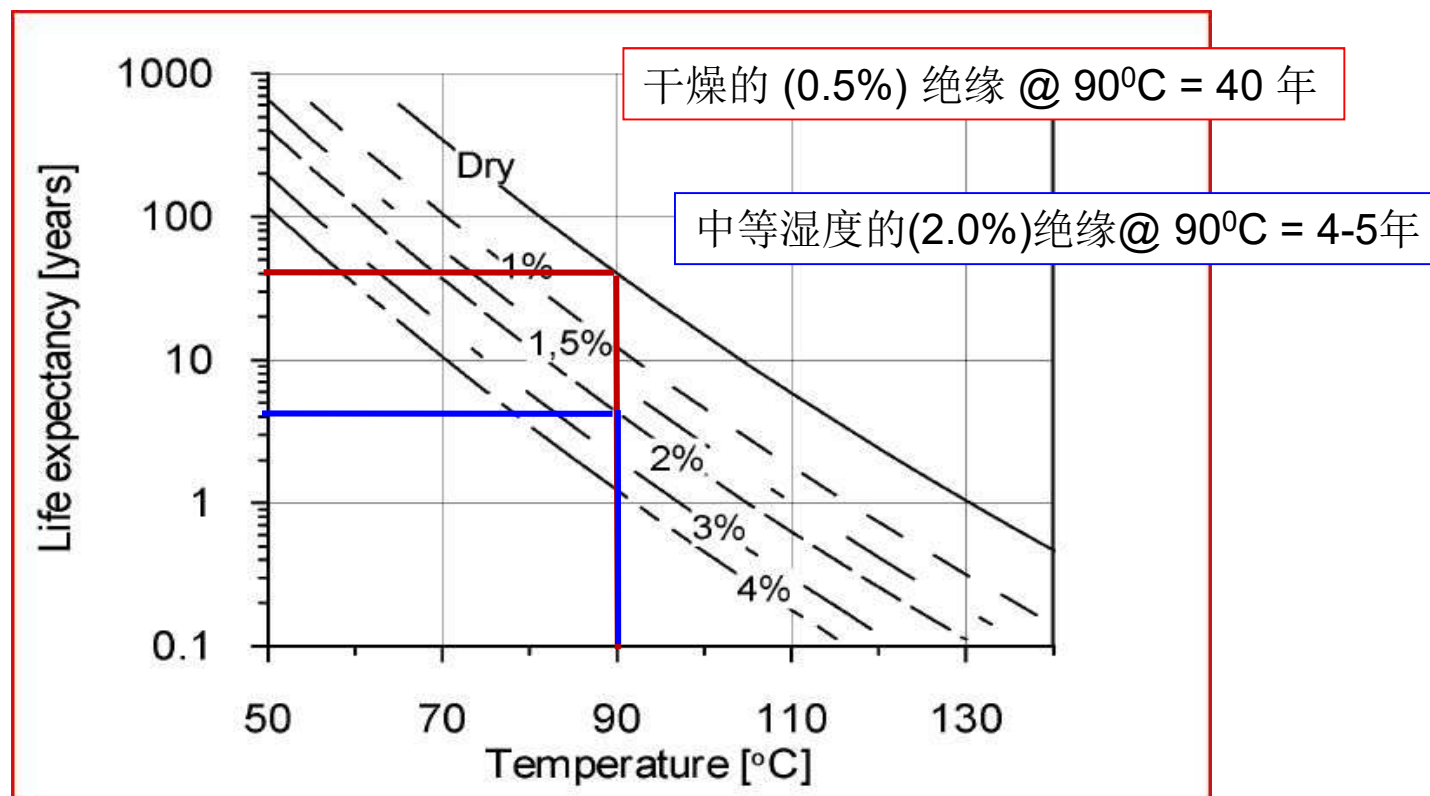
- 变压器绝缘系统由赛璐璐和矿物油构成，几乎所有的水分都集中在赛璐璐中：
 - 25 吨油在常温下含水量 = 0,5 kg
 - 2.5 吨赛璐璐 3% 湿度时的含水量 = 75 kg
- 绝缘油的水含量和温度以及油的纯度有关：
 - 老化的油含水量比新油高
 - 含水量低不宜检测
- 含水量改变绝缘纸板的特性

电力变压器水含量

- 变压器绝缘系统由赛璐璐和矿物油构成，几乎所有的水分都集中在赛璐璐中：
 - 25 吨油在常温下含水量 = 0,5 kg
 - 2.5 吨赛璐璐 3% 湿度时的水含量 = 75 kg
- 绝缘油的水含量和温度以及油的纯度有关：
 - 老化的油含水量比新油高
 - 含水量低不宜检测
- 含水量改变绝缘纸板的特性
- 水分加速老化

电力变压器水含量

- 水份加速绝缘老化

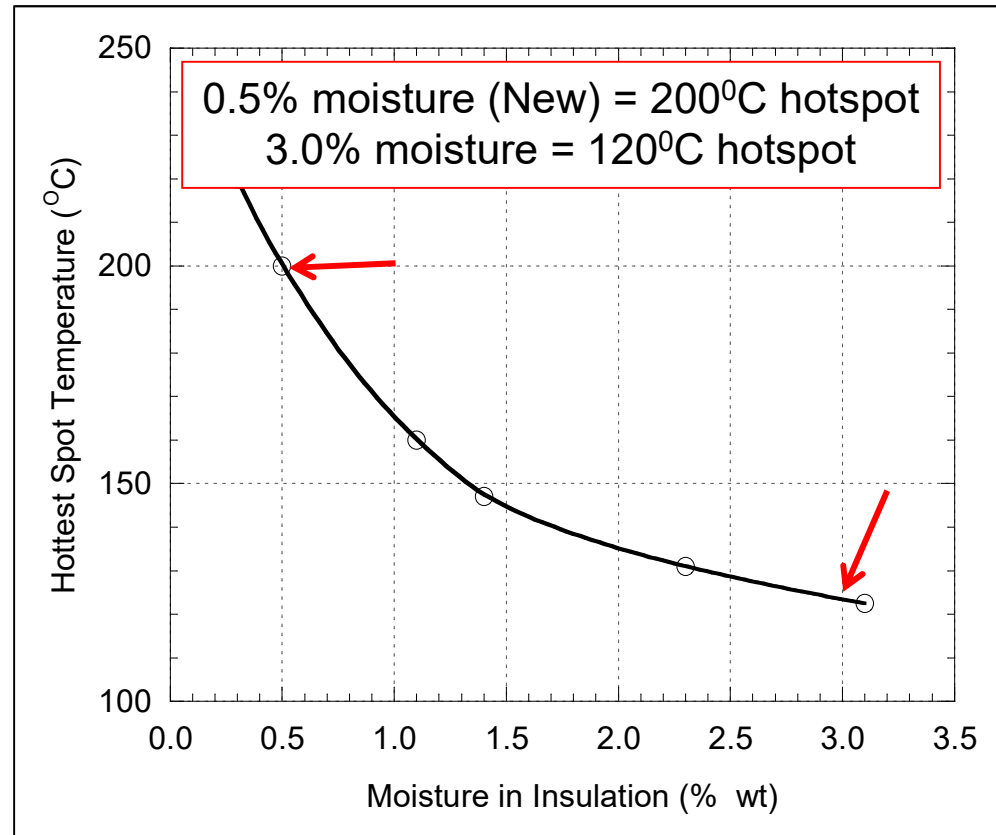


电力变压器水含量

- 变压器绝缘系统由赛璐璐和矿物油构成，几乎所有的水分都集中在赛璐璐中：
 - 25 吨油在常温下含水量 = 0,5 kg
 - 2.5 吨赛璐璐 3% 湿度时的水含量 = 75 kg
- 绝缘油的水含量和温度以及油的纯度有关：
 - 老化的油含水量比新油高
 - 含水量低不宜检测
- 含水量改变绝缘纸板的特性
- 水分限制了变压器的过载能力

电力变压器水含量

- 绝缘水含量决定了产生气泡的温度(IEEE Std C57.91-1995)
- 知道水含量以后可以做出正确的决定
 - 继续运行
 - 除水
 - 更换新变压器
 - 拆解或者重新安置?

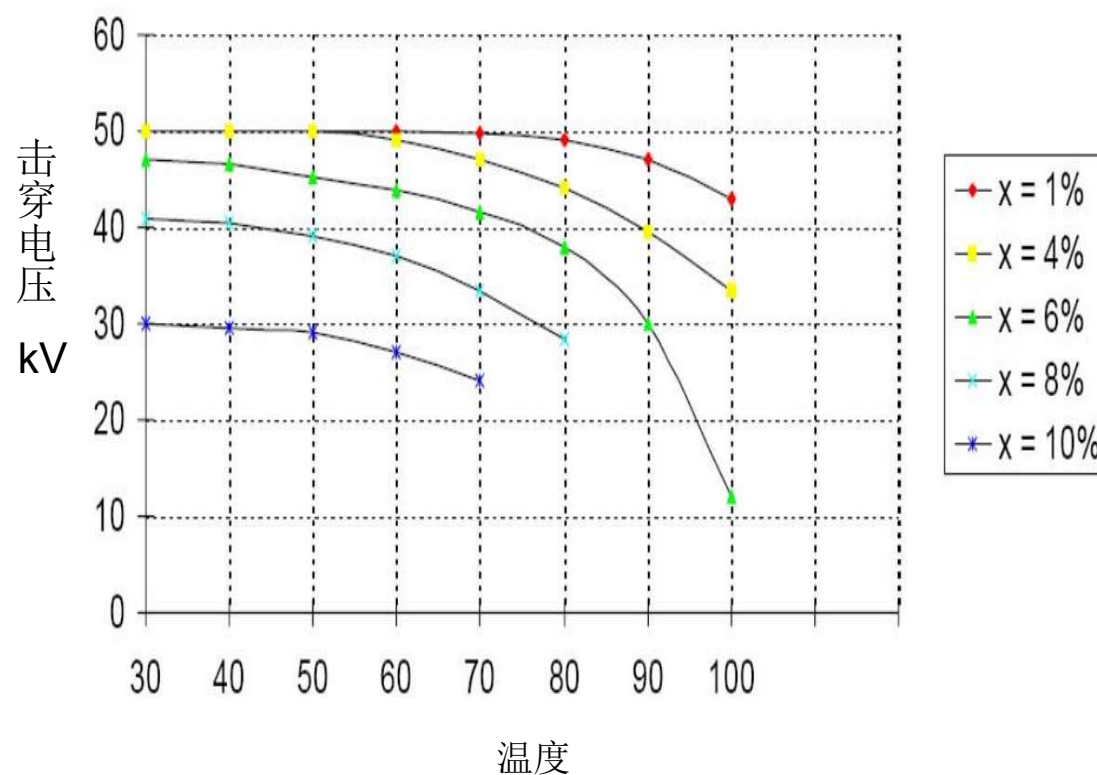


电力变压器水含量

- 变压器绝缘系统由赛璐璐和矿物油构成，几乎所有的水分都集中在赛璐璐中：
 - 25 吨油在常温下含水量 = 0,5 kg
 - 2.5 吨赛璐璐 3% 湿度时的含水量 = 75 kg
- 绝缘油的水含量和温度以及油的纯度有关：
 - 老化的油含水量比新油高
 - 含水量低不宜检测
- 含水量改变绝缘纸板的特性
- 水分限制了变压器的过载能力
- 水分降低了绝缘强度

电力变压器水含量

- 击穿电压随水含量上升而下降
- 知道水含量以后可以做出正确的决定
 - 继续运行
 - 除水
 - 更换新变压器
 - 拆解或者重新安置?



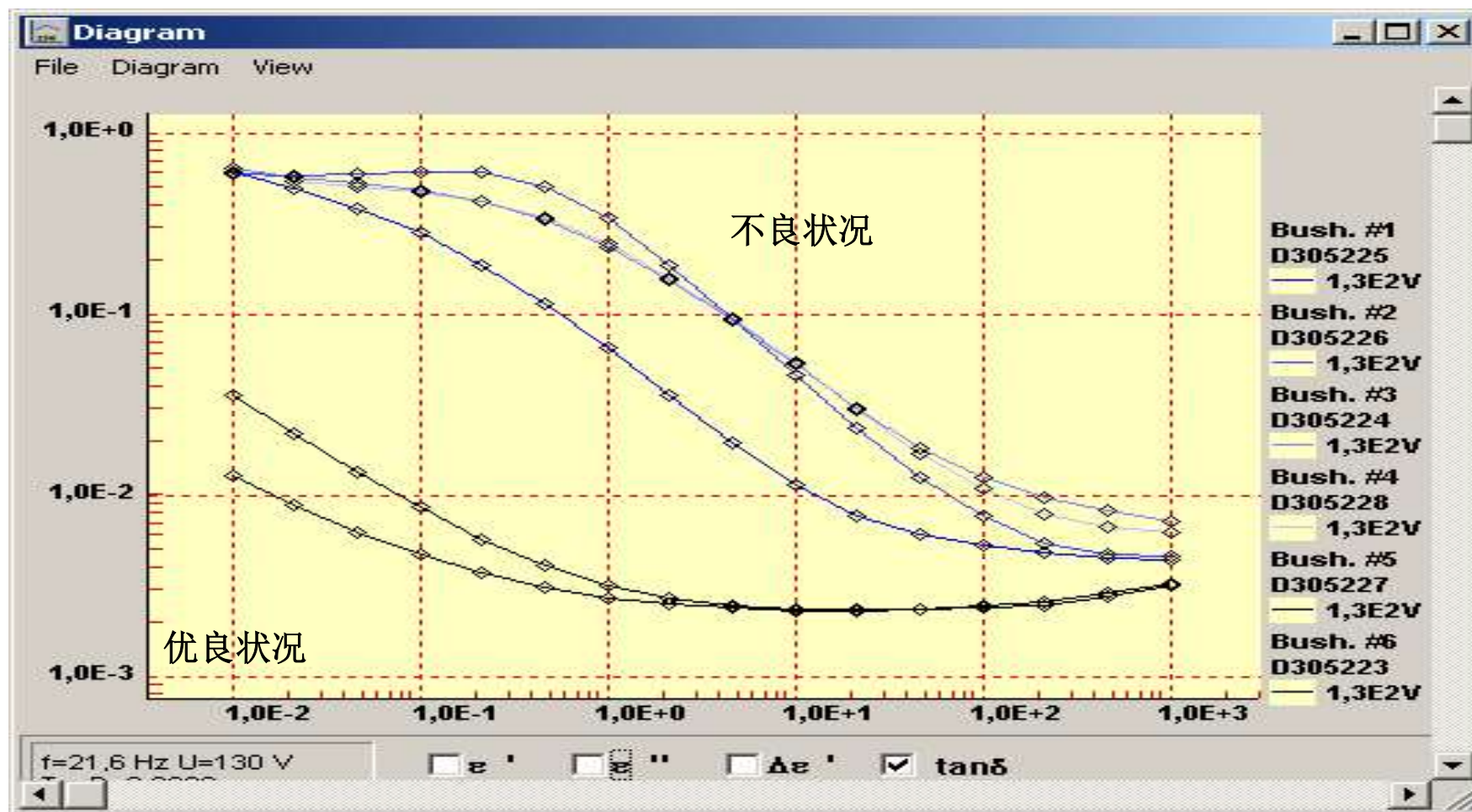
出处: Tom Prevost, EHV Weidmann, 2006

套管故障

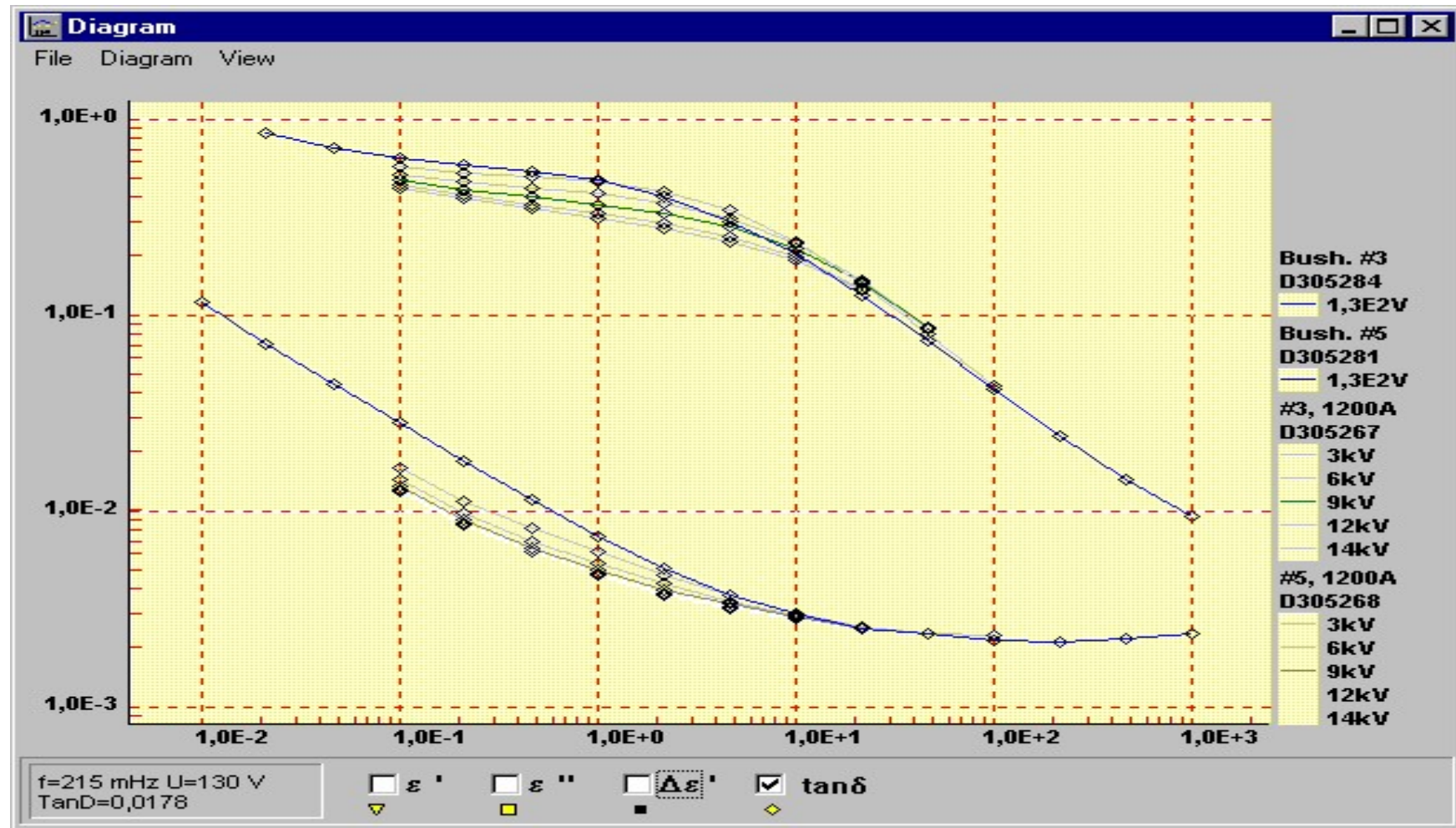


Megger[®]

套管DFR曲线

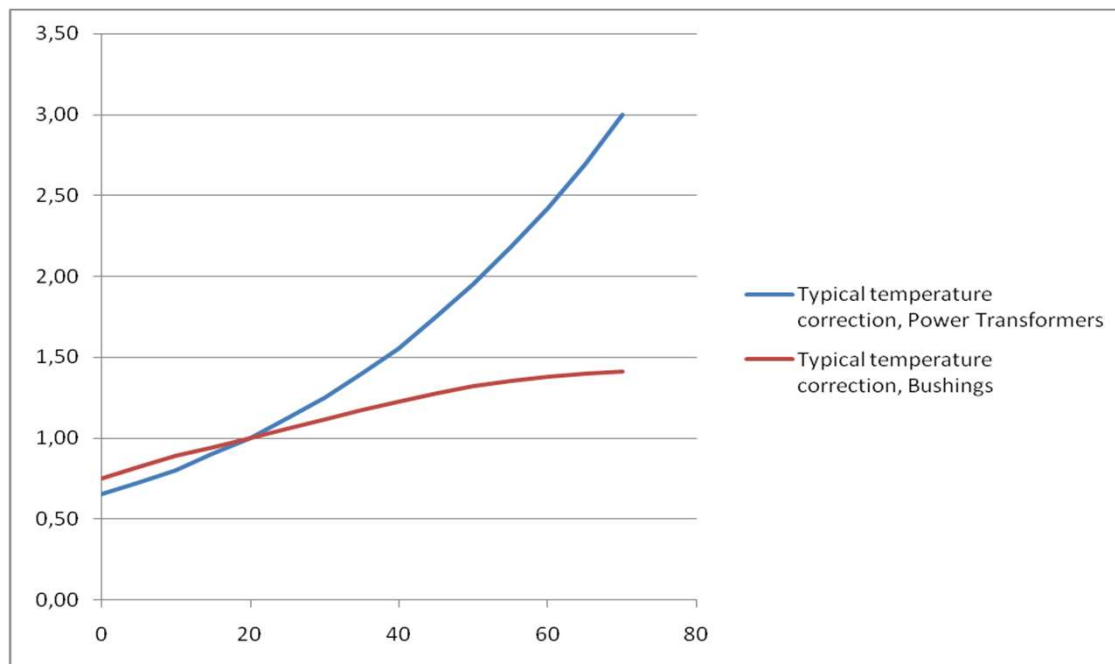


高压(0.13-14kV)DFR测量

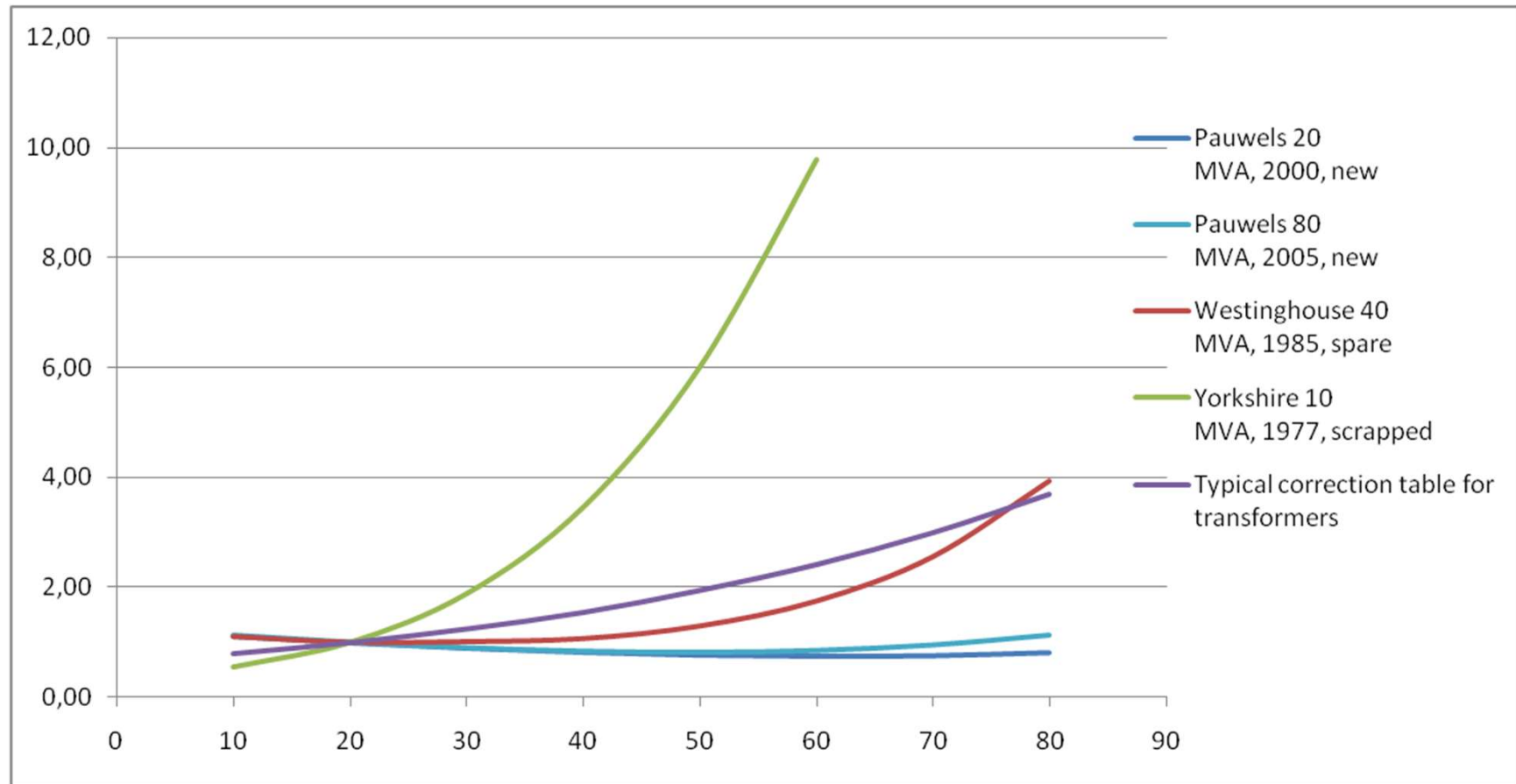


传统温度校正（单一系数校正）局限性

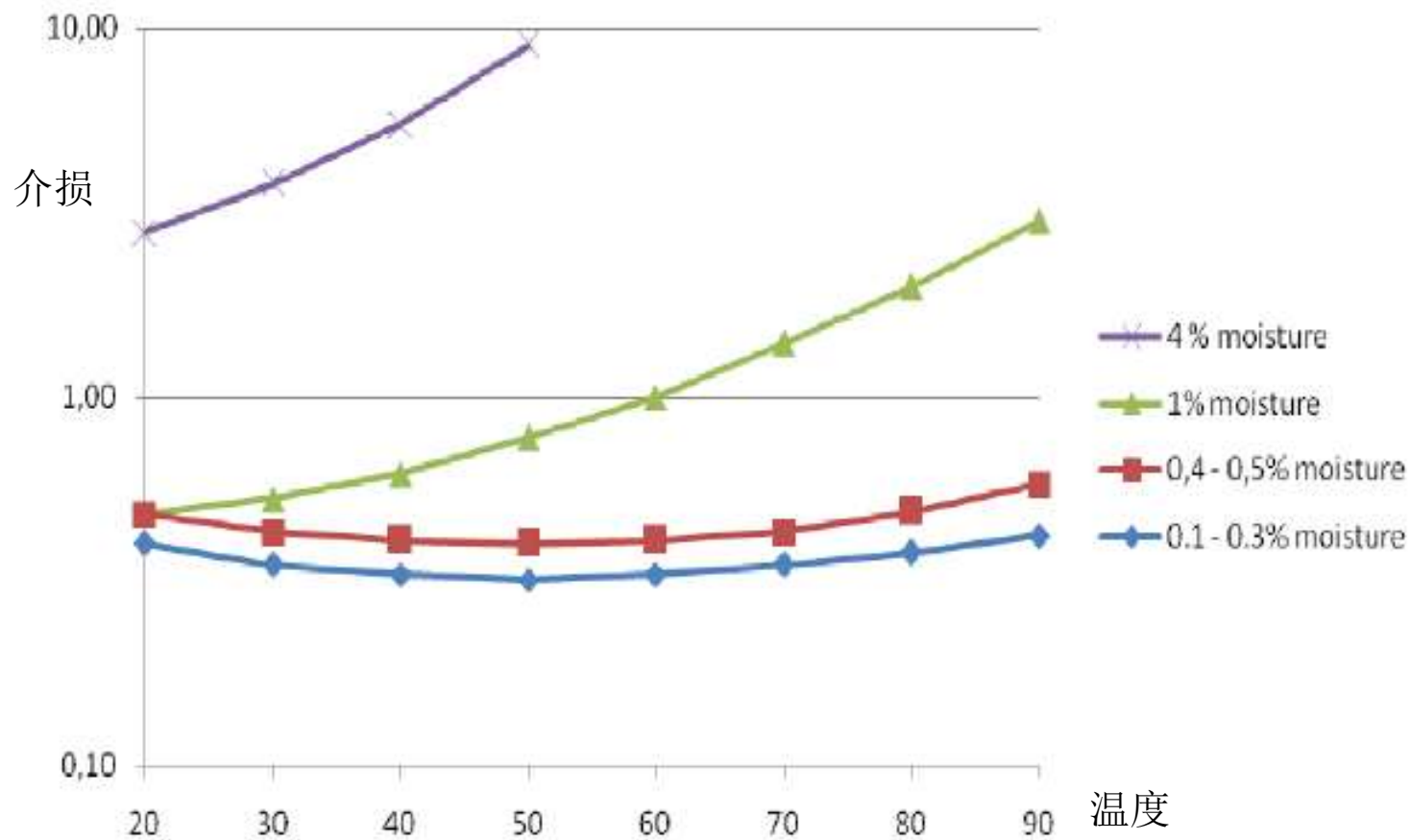
- 不同变压器校正曲线不同
- 绝缘含水量不同校正曲线不同



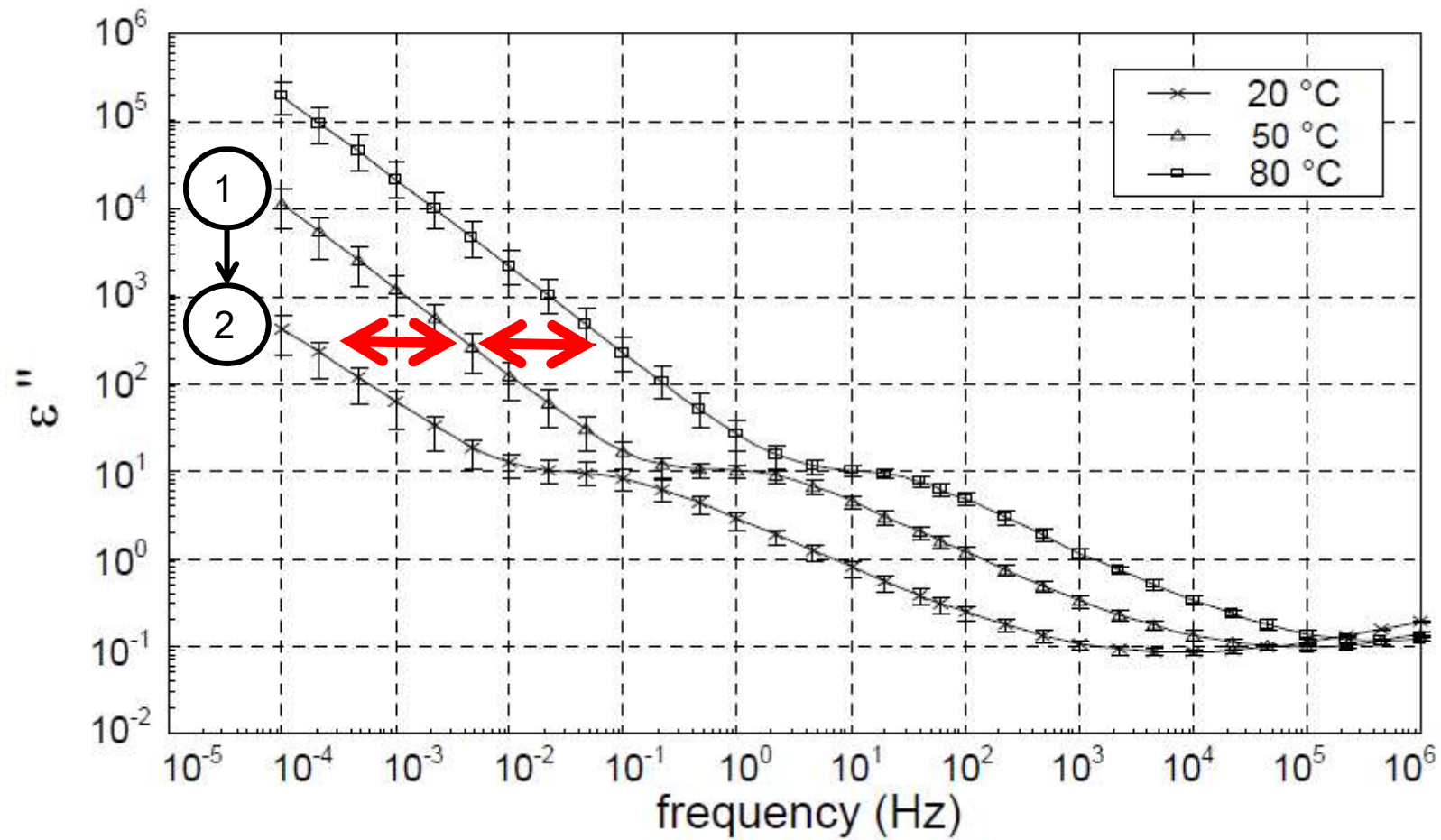
不同变压器的校正因数



不同含水量绝缘的校正因数



智能温度校正



IDAX 300 总结

- 变压器水分检测仪器
- 内置分析软件
- 任何温度下DFR测量
- 轻便快速准确
- 其他用途
 - 电流变压器
 - 绝缘子
 - 电机
 - 电缆
- 揭示了高功率因数的原因 – 水含量, 油品质还是污染?
- 广泛记录并被有效证明的方法