

# 去极化电流解谱分析油纸绝缘等效电路参数研究

郑君亮, 江修波, 蔡金锭, 彭积城

(福州大学电气工程与自动化学院, 福建 福州 350108)

**摘要:** 介质响应法可以有效地判断油纸绝缘的状态, 保证变压器运行的可靠性, 延长老旧变压器的使用寿命。变压器油纸绝缘等效电路参数的求解对于深入分析介质响应特征量随绝缘状态变化的规律有重要意义。基于去极化电流解谱的方法对等效电路参数的求解进行了改进。根据时域介电谱理论, 估算出各条支路的时间常数, 再逐条求出每条支路的极化电阻、极化电容。该方法计算简单, 而且还体现了物理意义。最后, 用该方法对三台变压器进行解谱分析, 计算得到的等效电路参数和原参数的误差很小, 验证了该方法的有效性和可行性。

**关键词:** 变压器; 油纸绝缘; 等效电路; 去极化电流; 解谱; 参数

## Research on spectrum analysis of the depolarization current to identify the parameter of oil/paper insulation equivalent circuit

ZHENG Jun-liang, JIANG Xiu-bo, CAI Jin-ding, PENG Ji-cheng

(College of Electrical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

**Abstract:** The dielectric response diagnosis technology is an effective method for diagnosing oil-paper insulation state, ensuring the reliability of the transformer's operation and prolonging its lifespan. In order to further study the relation between the dielectric response characteristics and the insulation state change, indentifying the equivalent circuit parameter is needed. This paper improves the computing method by the spectrum analysis of depolarization current, estimates the time constant of each branch based on the time domain dielectric spectroscopy theory, and then calculates the polarization resistance and capacitance of each branch one by one. The method is easy and can reflect the physical significance. Finally, this method is applied to analyze three transformers and the error between calculated parameter and the original parameter is small, proving the method's accuracy and feasibility.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 61174117).

**Key words:** transformer; oil-paper insulation; equivalent circuit; depolarization current; spectrum analysis; parameter

中图分类号: TM411 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2014)21-0054-05

## 0 引言

电力变压器是电力系统中最重要的一环, 其安全运行直接影响着供电的安全性和可靠性<sup>[1-2]</sup>。介质响应法可以获取有效诊断电力变压器油纸绝缘状态的特征量, 进而准确地判断绝缘所处的状态, 保证变压器运行的可靠性, 延长老旧变压器的使用寿命<sup>[3-4]</sup>。为了从介质响应测量中挖掘出更多反映绝缘老化的特征信息, 也为了从理论上分析介质响应特征量随绝缘状态变化的规律, 必须对变压器绝缘等效电路参数进行求解。目前, 求解等效电路参数的方法还存在着一些问题。文献[5]利用回

复电压法的特征量来求解等效电路参数, 把参数辨识模型转化为数学优化问题, 具有多个未知参数, 加大了辨识难度。文献[6]对去极化电流采用一系列指数多项式的叠加来拟合, 再利用最小二乘法算出等效电路参数。该方法同样存在计算复杂的问题。文献[7]将一系列指数多项式的拟合转为单指数的拟合, 但是其通过统计斜率的分布来确定时间常数的大小, 统计斜率的分布增加了工作量, 还会对时间常数的求解造成一定的误差。文献[8]采用微分去极化电流来求解等效电路参数, 微分需要较高的采样精度, 噪声也会对微分产生较大的影响, 从而影响了计算结果的准确度。鉴于以上问题, 本文介绍了一种通过解谱去极化电流求解等效电路参数的新方法。该方法解决了以往求解模型参数中存在的计

基金项目: 国家自然科学基金(61174117)

算量大、计算结果不能确实反映绝缘介质、易受噪声影响等问题。其求解过程为先根据时域介电谱理论估算出时间常数, 再根据时间常数选取合适的去极化电流数据点, 用去极化电流公式进行拟合计算, 按时间常数由大到小的顺序, 依次求出各支路的去极化电流、极化电阻和极化电容值。

## 1 油纸绝缘等效电路及参数解析

在绝缘介质两端施加  $t_c$  时间的直流电压  $U_0$ , 绝缘介质就会流过少量的电流, 包括吸收电流, 电容电流和电导电流。流过绝缘介质的总电流称为极化电流  $i_p$ 。当直流电压断开后, 绝缘介质存储了一些能量, 相当于电容器。将绝缘介质短接后, 电介质内存储的能量将释放出来, 即产生去极化电流  $i_d$ <sup>[9]</sup>。

变压器油纸绝缘系统主要由变压器油, 绝缘纸和纸板构成, 是一种复合型的电介质。从而, 油纸绝缘介质中存在多种不同弛豫时间的弛豫过程, 特别是绝缘老化和受潮, 将会导致更多不同的弛豫过程产生。单一绝缘介质可采用 RC 串联支路来描述。所以, 可采用  $n$  个不同时间常数的 RC 串联支路并联来描述变压器油纸绝缘的极化特性, 并与电阻支路、电容支路并联, 构成基于扩展德拜模型的介质响应等效电路<sup>[10]</sup>, 如图 1。其中,  $R_g$  为绝缘电阻, 反映油纸组合绝缘的电导情况;  $C_g$  为几何电容;  $R_{pi}$  和  $C_{pi}$  分别为极化电阻和极化电容, 代表不同弛豫过程的电阻和电容值。

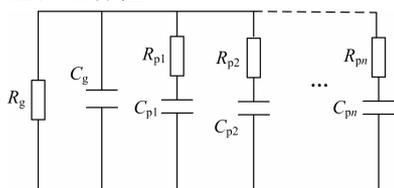


图 1 基于扩展德拜模型的等效电路

Fig. 1 Dielectric response equivalent circuit based on extended Debye model

德拜等效电路中的几何电容为真空几何电容和无损极化的等效电容之和, 是由变压器绝缘结构和介质基本特性决定的。在变压器运行过程中, 几何电容几乎不随老化或受潮改变, 可以通过仪器测量。绝缘电阻值会随绝缘状态变化。已有许多学者通过实验证明了, 随着绝缘状态的恶化, 绝缘电阻将不断减小。绝缘电阻可以根据式 (1) 计算<sup>[10-11]</sup>。

$$R_g = \frac{U_0}{i_p(t_m) + i_d(t_m)} \quad (1)$$

式中:  $U_0$  为施加的直流电压;  $i_p$  为极化电流;  $i_d$  为

去极化电流;  $t_m$  为测量的最大时间。

绝缘状态的变化同样会引起极化电阻和极化电容的变化。而极化电阻和极化电容则需通过计算去极化电流得出。根据该等效电路模型, 短路时的去极化电流可表达为

$$i_d(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-\left(\frac{t}{\tau_i}\right)} \quad (2)$$

其中

$$A_i = U_0 \frac{1 - e^{-\left(\frac{t_c}{\tau_i}\right)}}{R_{pi}} \quad (i=1, \dots, n) \quad (3)$$

$$\tau_i = R_{pi} C_{pi} \quad (i=1, \dots, n) \quad (4)$$

式中:  $t_c$  为极化时间;  $R_{pi}$  和  $C_{pi}$  为弛豫支路的极化电阻和极化电容;  $\tau_i$  为弛豫支路的时间常数。

根据去极化电流式 (2)~式 (4) 计算出等效电路的极化电阻和极化电容。但是, 去极化电流包含了多个弛豫支路的未知量, 直接求解工程量大。下面介绍一种对去极化电流进行解谱求解极化电阻和极化电容的方法。

## 2 去极化电流解谱方法

去极化电流

$$i_d(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-\frac{t}{\tau_i}} = \sum_{i=1}^n A_i f(t, \tau_i)$$

所以

$$f(6\tau, \tau) = e^{-\frac{6\tau}{\tau}} = 0.0025 = 0.01832 f(6\tau, 3\tau)$$

从上式可看出, 当时间常数相差 3 倍时, 经过  $6\tau$  时间后, 前一项去极化电流的值已经很低了, 对后一项去极化电流  $6\tau$  时间后的值影响很小, 基本可以忽略不计。所以, 可以认为  $6\tau$  时间后的去极化电流都是由时间常数更大的支路提供的。当时间常数相差更多时, 影响会更小。

根据时域介电谱理论<sup>[8,12]</sup>, 对去极化电流  $i_d$  应用微分变换得到的曲线  $-t \cdot di_d/dt$  能清晰地反映出介质内部存在的弛豫过程特性。在多项弛豫谱线叠加的情况下, 虽然无法直接从峰值点对应的去极化时间准确读出各项弛豫机构的时间常数, 但实际上, 峰值点位置仅相对于弛豫时间常数产生略微偏移, 仍然可以根据峰值点时间估算出弛豫时间常数的取值范围。

扩展德拜模型的每条 RC 串联支路的时间常数都不同, 通过微分去极化电流估算出每条支路的时间常数大小。令时间常数从小到大排列  $\tau_1 < \tau_2 < \dots < \tau_{(n-1)} < \tau_n$ 。当去极化时间大于  $k\tau_{(n-1)}$  ( $k=1, 2, \dots$ ) 时, 时

间常数为  $\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_{(n-1)}$  支路去极化电流的影响可以忽略不计。根据估算的时间常数值, 选取合适的  $k$  值、即当去极化时间  $t_d$  大于  $k\tau_{(n-1)}$  时, 去极化电流可认为是由最大时间常数  $\tau_n$  支路贡献的。在去极化时间  $t_d$  大于  $k\tau_{(n-1)}$  后, 选取去极化电流采样值, 用单指数式 (5) 进行拟合计算<sup>[13]</sup>, 就能算出时间常数为  $\tau_n$  的支路去极化电流, 及该支路的极化电阻和极化电容。式 (5) 中包含有两个未知数  $A_n, \tau_n$ 。所以至少需要选取两个点进行计算, 可以适量多取几个点以提高精度。

$$i_n = A_n e^{-\frac{t}{\tau_n}} \quad (5)$$

指数函数是非线性曲线, 用拟合度指标来  $R_{new}$  (见式 (6)) 来判断拟合的准确度。 $R_{new}$  越接近 1, 认为拟合度越好。当所取指数函数计算值与取样点的拟合度指标达到一定值时即认为拟合准确。

$$R_{new} = 1 - \sqrt{\frac{\sum (y - y^*)^2}{\sum y^2}} \quad (6)$$

其中:  $y$  为仿真值;  $y^*$  为计算值。

在拟合计算中, 根据微分去极化电流估算出时间常数  $\tau_n$  的取值范围, 设置  $\tau_n$  的取值范围, 可以提高计算速度和准确性。解出  $A_n, \tau_n$  后, 利用式 (3)、式 (4) 可以算出该弛豫支路的极化电阻  $R_{pn}$  和极化电容  $C_{pn}$ 。

将原去极化电流减去最大时间常数  $\tau_n$  支路提供的电流  $i_n$ , 得到的新的去极化电流曲线。就可以通过上述方法算出第二大时间常数  $\tau_{(n-1)}$  支路提供的电流  $i_{(n-1)}$  及其极化电阻  $R_{p(n-1)}$  和极化电容  $C_{p(n-1)}$ 。其他支路也通过同样方法, 按时间常数由大到小进行解谱计算得出。

利用去极化电流进行解谱求解等效电路参数的流程如图 2 所示。

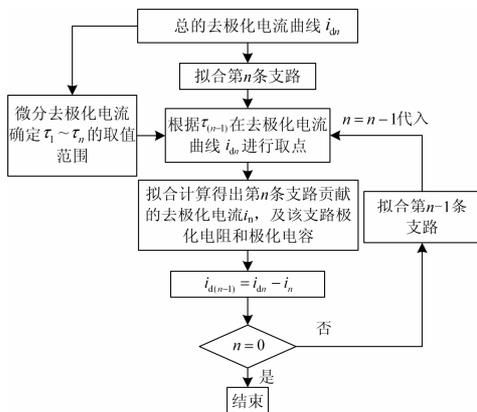


图 2 参数求解流程图

Fig. 2 Flow diagram of identifying parameter

### 3 去极化电流解谱算例

#### 3.1 T1 变压器解谱

为了检验去极化电流解谱求参数的有效性, 采用扩展德拜模型, 对已识别出参数的变压器进行仿真得出去极化电流, 然后采用上述的去极化电流解谱法进行等效电路参数的求解, 并与原参数比较。

T1 变压器等效电路各支路的实际参数如表 1 中的实际值所示。该变压器的电压等级为 220 kV, 容量为 180 MVA。

##### 3.1.1 确定时间常数范围

利用表 1 中的实际值搭建仿真模型, 对仿真得出的去极化电流进行微分计算, 得到  $-t \cdot di_d/dt$  曲线, 见图 3。从去极化电流微分曲线上, 可以估算出各个时间常数的取值范围。 $\tau_1$  为 0.01~0.03 s,  $\tau_2$  为 0.03~0.08 s,  $\tau_3$  为 0.2~0.6 s,  $\tau_4$  为 2~6 s,  $\tau_5$  为 70~130 s,  $\tau_6$  为 600~1 200 s。

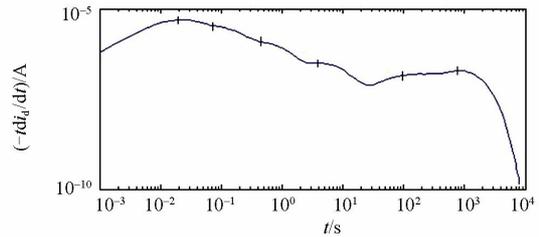


图 3 去极化电流微分曲线

Fig. 3 Curve of differential depolarization current

##### 3.1.2 对去极化电流进行拟合解谱

在去极化电流上选取  $t_d > 6\tau_5$  的数据点, 代入式 (6) 进行拟合计算, 得出该支路的极化电阻  $R_{p6}$ 、极化电容  $C_{p6}$  及其所贡献的去极化电流  $i_6$ 。将原去极化电流减去  $i_6$ , 得到新的去极化电流曲线。再在该曲线上选取  $t_d > 6\tau_4$  的数据点, 拟合计算, 得出该支路的极化电阻  $R_{p5}$ , 极化电容  $C_{p5}$  及其所贡献的去极化电流  $i_5$ 。再用同样的方法拟合计算出其他支路的极化电阻、极化电容和极化电流。

##### 3.1.3 结果及分析

将解谱计算得到的各支路去极化电流相加, 与仿真得到的去极化电流进行比较, 见图 4。从图 4 可以看出, 解谱计算得到的去极化电流与仿真得到的去极化电流基本重合。用拟合度指标  $R_{new}$  来判断他们的吻合程度, 计算得出  $R_{new}=0.99$ , 说明两条曲线基本吻合, 拟合结果准确。T1 变压器解谱得到的等效电路参数见表 1 中的计算值, 从表 1 可以得出计算值与实际值很接近, 相对误差很小。验证了去极化电流解谱法的可行性。

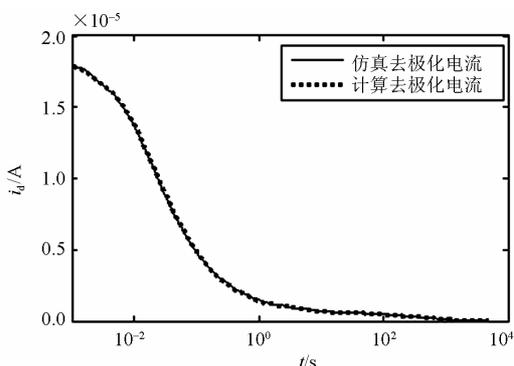


图 4 T1 计算去极化电流与仿真去极化电流的比较  
Fig. 4 Comparison of T1's computed and simulated depolarization current

表 1 T1 参数计算结果

Table 1 Computed result of T1's parameter

支路	$R_p/G\Omega$ (实际值)	$R_p/G\Omega$ (计算值)	相对误差	$C_p/nF$ (实际值)	$C_p/nF$ (计算值)	相对误差
1	0.233 9	0.234 8	0.38%	0.067 38	0.066 73	0.96%
2	0.329 4	0.329 9	0.15%	0.214 2	0.210 4	1.77%
3	0.777 5	0.762 8	1.89%	0.534 5	0.535 3	0.15%
4	2.797	2.772	0.89%	1.421	1.423	0.14%
5	9.219	9.216	0.03%	9.608	9.546	0.65%
6	4.206	4.185	0.50%	181.6	182.2	0.33%

### 3.2 T2 变压器解谱

T2 变压器的电压等级为 220 kV, 容量为 120 MVA。与 T1 变压器用同样的方法进行解谱计算, 得出的结果如图 5 和表 2 所示。从图 5 看出, 解谱得到的去极化电流与仿真得到的去极化电流基本重合, 其拟合度指标  $R_{new}=0.99$ , 说明两条曲线基本吻合, 拟合结果准确。从表 2 可以看出计算值与实际值很接近, 相对误差小。

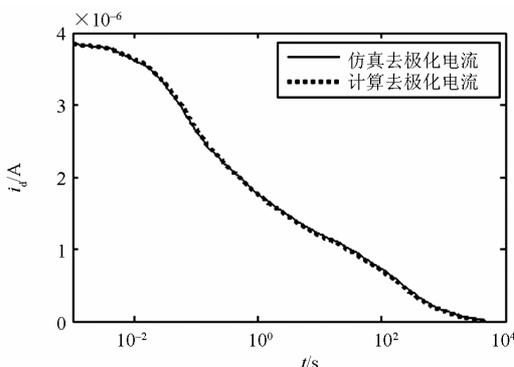


图 5 T2 计算去极化电流与仿真去极化电流的比较  
Fig. 5 Comparison of T2's computed and simulated depolarization current

### 3.3 T3 变压器解谱

T3 变压器的电压等级为 110 kV, 对其进行解谱

表 2 T2 参数计算结果

Table 2 Computed result of T2's parameter

支路	$R_p/G\Omega$ (实际值)	$R_p/G\Omega$ (计算值)	相对误差	$C_p/nF$ (实际值)	$C_p/nF$ (计算值)	相对误差
1	1.549	1.561	0.77%	0.037 6	0.036 73	2.31%
2	2.865	2.795	2.44%	0.146 1	0.142 2	2.67%
3	3.681	3.632	1.33%	0.746 1	0.7335	1.69%
4	5.694	5.663	0.54%	4.415	4.329	1.95%
5	2.859	2.868	0.31%	77.86	77.03	1.07%
6	6.057	6.045	0.20%	235.3	234.4	0.38%

计算, 得出的结果如图 6 和表 3 所示。其拟合度指标  $R_{new}=0.99$ , 说明解谱得到的去极化电流与仿真得到的去极化电流基本吻合, 拟合结果准确。从表 3 可以看出计算值与实际值很接近, 相对误差很小。再次验证了该方法的有效性。

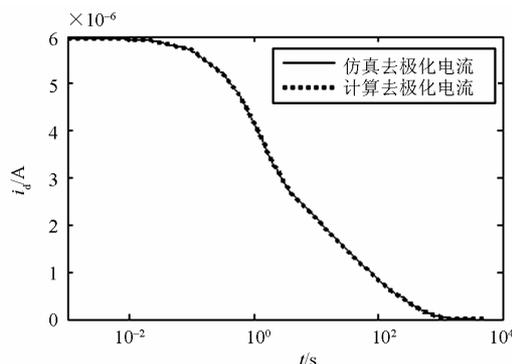


图 6 T3 计算去极化电流与仿真去极化电流的比较  
Fig. 6 Comparison of T3's computed and simulated depolarization current

表 3 T3 参数计算结果

Table 3 Computed result of T3's parameter

支路	$R_p/G\Omega$ (实际值)	$R_p/G\Omega$ (计算值)	相对误差	$C_p/nF$ (实际值)	$C_p/nF$ (计算值)	相对误差
1	0.690 0	0.694 4	0.64%	1.680	1.650	1.79%
2	1.890	1.903	0.69%	4.860	4.677	3.77%
3	1.750	1.739	0.63%	31.41	30.48	2.96%
4	2.300	2.246	2.35%	151.4	152.7	0.86%

## 4 总结

本文通过解谱去极化电流来辨识油纸绝缘等效电路的参数。先对去极化电流进行微分计算, 估算出各时间常数的取值范围。再根据时间常数, 选取合适的点, 在提高计算准确度的同时减少盲目取点带来的工作量。然后, 利用去极化电流公式将多支路的计算转化为单支路的计算, 减少了未知参数, 降低计算难度。最后, 对三台变压器进行解谱计算, 验证了该方法的正确性和可行性。

大量研究表明, 在变压器运行过程中, 几何电容几乎不随老化或受潮而改变。绝缘电阻值会随着

绝缘状态的恶化，而不断减小。有研究表明，更换变压器油后，较小时间常数支路的极化电阻明显增大。更多的绝缘状态对极化电阻、极化电容的影响需要进一步的研究。今后，可以用该方法辨识变压器等效电路的参数，研究老化对各参数的影响，从而对利用等效电路参数的变化来评估变压器油纸绝缘老化状态提供参考。

参考文献

[1] 周宁, 马建伟, 胡博, 等. 基于故障树分析的电力变压器可靠性跟踪方法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(19): 72-77.  
ZHOU Ning, MA Jian-wei, HU Bo, et al. Reliability tracing technique for power transformers using the fault tree analysis method[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(19): 72-77.

[2] 项文强, 张华, 王姮, 等. 基于 L-M 算法的 BP 网络在变压器故障诊断中的应用[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(8): 100-103.  
XIANG Wen-qiang, ZHANG Hua, WANG Heng, et al. Application of BP neural network with L-M algorithm in power transformer fault diagnosis[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(8): 100-103.

[3] 廖瑞金, 杨丽君, 郑含博, 等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 1-12.  
LIAO Rui-jin, YANG Li-jun, ZHENG Han-bo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-12.

[4] 王世强, 魏建林, 张冠军, 等. 温度对油纸绝缘介电响应特性的影响[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 50-55.  
WANG Shi-qiang, WEI Jian-lin, ZHANG Guan-jun, et al. Effect of temperature on dielectric response characteristics of oil impregnated pressboard[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 50-55.

[5] 江修波, 黄彦婕, 赖祥生. 改进蚁群算法及其在变压器绝缘介质响应等效电路参数辨识中的应用[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1982-1988.  
JIANG Xiu-bo, HUANG Yan-jie, LAI Xiang-sheng. Improved ant colony algorithm and its application in parameter identification for dielectric response equivalent circuit of transformer[J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(8): 1982-1988.

[6] 李军浩, 胡泉伟, 吴磊, 等. 极化/去极化电流测试技术的仿真研究[J]. 陕西电力, 2011, 39(4): 1-5.  
LI Jun-hao, HU Quan-wei, WU Lei, et al. Simulation study of polarization and depolarization current measurements technology[J]. Shaanxi Electric Power, 2011, 39(4): 1-5.

[7] 王骞, 臧春艳, 张明丽. 油纸绝缘结构介质响应电路

模型的参数辨识方法研究[J]. 高压电器, 2012, 48(6): 7-11.  
WANG Qian, ZANG Chun-yan, ZHANG Ming-li. Research on the method of parameter identification for dielectric response equivalent circuit of oil-paper insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2012, 48(6): 7-11.

[8] 郭艳雪, 蔡金锭. 采用时域介电谱法确定变压器油纸绝缘等效电路参数[J]. 供用电, 2012, 29(6): 52-54.  
GUO Yan-xue, CAI Jin-ding. Equivalent circuit parameter of transformer oil-paper insulation identified by time domain dielectric spectrum method[J]. Distribution & Utilization, 2012, 29(6): 52-54.

[9] 魏建林, 王世强, 彭华东, 等. 变压器油纸绝缘的介电响应特性研究—加速热老化的介电谱[J]. 电工技术学报, 2012, 27(5): 56-62.  
WEI Jian-lin, WANG Shi-qiang, PENG Hua-dong, et al. Investigation of dielectric response characteristics of transformer oil-paper insulation dielectric spectroscopy of accelerated thermal aging[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 56-62.

[10] SAHA T K, PURKAIT P, MTILLER F. Deriving an equivalent circuit of transformers insulation for understanding the dielectric response measurements[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2005, 20(1): 149-157.

[11] 马元. 变压器绝缘老化检测试验与寿命评估方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.  
MA Yuan. Studies on methodology of insulation status measurement and life assessment of power transformers[D]. Jinan: Shandong University, 2010.

[12] 李景德, 曹万强, 李向前, 等. 时域介电谱方法及其应用[J]. 物理学报, 1996, 45(7): 1225-1231.  
LI Jing-de, CAO Wan-qiang, LI Xiang-qian, et al. Time domain dielectric spectroscopy method and its application[J]. Acta Physica Sinica, 1996, 45(7): 1225-1231.

[13] 尉建军, 全力, 彭桂雪, 等. 基于最小二乘支持向量机的励磁特性曲线拟合[J]. 电力系统保护与控制, 2010, 38(11): 15-17.  
WEI Jun-jun, QUAN Li, PENG Gui-xue, et al. Curve fitting of excitation characteristics based on the least squares support vector machine[J]. Power System Protection and Control, 2010, 38(11): 15-17.

收稿日期: 2014-02-10; 修回日期: 2014-04-30  
作者简介:

郑君亮 (1989-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力变压器油纸绝缘老化诊断; E-mail: dayin0591@qq.com  
江修波 (1960-), 男, 教授, 硕士生导师, 从事电力系统运行、电气设备检测以及电力变压器绝缘老化测试研究;  
蔡金锭 (1954-), 男, 博士, 教授, 博导, 从事人工智能技术在电力工程和电力电子故障诊断领域的应用研究。