

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.08.011

应用极化电流辨识油纸绝缘系统等值电路参数

蔡 锋, 江修波, 蔡金锭

(福州大学电气工程与自动化学院, 福州 350108)

摘要: 变压器油纸绝缘系统的介质响应特性可以用扩展德拜模型等值电路来描述, 研究变压器油纸绝缘系统等值电路参数的辨识方法具有十分重要的意义。文中提出一种应用极化电流辨识变压器油纸绝缘系统扩展德拜等值电路参数的方法, 利用极化电流曲线末端主要取决于大时间常数指数项的特点, 先在曲线末端不为零处选取初始点计算得到大时间常数支路参数的估计值, 再以估计值为基础进行多次修正计算, 待参数计算值稳定后再进行检验计算, 从而求得各个参数较为准确的数值解; 逐条计算, 可以求出所有极化支路的参数。文中应用该方法对多台变压器进行等值电路参数辨识, 计算得到的等值电路参数与实际值误差较小, 拟合极化电流曲线和测量极化电流曲线基本重合。

关键词: 极化电流; 扩展德拜模型; 参数辨识

Extended Debye Equivalent Circuit Parameter Identification Based on Polarization Current

CAI Feng, JIANG Xiubo, CAI Jinding

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

Abstract: Dielectric response characteristics of transformer oil-paper insulation system can be described using extended equivalent circuit of the Debye model. Study on extended Debye model equivalent circuit parameter identification method of oil-paper insulation system is of great significance. This paper proposes a method using polarization current curve to identify extended Debye equivalent circuit parameters of oil-paper insulation transformer. Because the terminal of polarization current curve depends on the large time constant exponential, so firstly, it can take the points at the end of the curve to calculate estimated values of the parameters, to modify the calculation based on estimated values to get accurate values, then check the calculation to obtain more accurate values. One branch respectively, all polarization branch parameters can be obtained. Using this method, the equivalent circuit parameters of several transformers are identified. The calculated equivalent circuit parameters are accurate and polarization current curves fitting good, the feasibility of this method is verified.

Key words: polarization current; extended Debye model; parameter identification

0 引言

电力变压器是电力系统中的重要设备, 其正常运行具有十分重要的意义, 一旦发生事故, 将造成局部, 甚至是大范围的停电事故, 造成重大的经济损失^[1]。变压器油纸绝缘系统主要由变压器油、绝缘纸板以及撑条构成。在运行过程中由于受电、热、水分以及氧化等因素的共同作用, 变压器油纸绝缘系

统将发生绝缘老化, 引起绝缘系统的介质响应特性发生变化, 可以通过测试油纸绝缘系统的介质响应特性来对变压器进行绝缘老化状况分析^[2]。变压器油纸绝缘系统的介质响应特性可以用扩展德拜模型等值电路来描述^[1-3]。变压器在运行过程中, 其几何电容几乎不发生变化^[4-5]。扩展德拜模型等值电路中各极化支路的参数对温度较为敏感, 随着温度的升高, 油和纸的电导率随之增加, 导致绝缘电阻减小; 等值电路参数中的极化电阻将逐渐减小, 极化电容逐渐增大^[6-8]。当绝缘系统的含水量增大时, 绝

收稿日期: 2016-02-19; 修回日期: 2016-03-13

基金项目: 国家自然科学基金(61174117)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (61174117).

缘介质的极化特性会发生变化,绝缘系统的极化能力和电导率增大,使得绝缘电阻减小,绝缘系统等值电路参数中极化电容增大,极化电阻减小^[9-11]。为了更好地研究绝缘状态与介质响应特性之间的联系,探讨变压器油纸绝缘系统的扩展德拜模型等值电路的参数辨识方法具有十分重要的意义^[12]。目前辨识扩展德拜模型等值电路参数的方法有3种,一种是依据去极化电流数据来求取;一种是依据回复电压的初始斜率及其极化谱来求取;还有一种是根据FDS的实验数据来求取^[12-16]。文中提出一种利用极化电流辨识油纸绝缘系统扩展德拜等值电路参数的方法,相对于使用去极化电流进行参数辨识,利用极化电流不仅能辨识得到各极化支路的参数,还可辨识得到绝缘电阻 R_g 的数值,相对而言也可缩短测量时间。

1 极化电流原理分析

变压器油纸绝缘系统的介质响应特性可以用扩展德拜模型等值电路来描述^[1-3]。文中利用扩展德拜模型等值电路来等效实际的油纸绝缘系统,并应用图1所示的等值电路进行仿真分析。

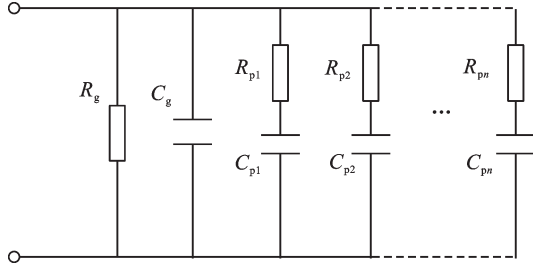


图1 基于扩展德拜模型的介质响应等值电路

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

变压器油纸绝缘系统的扩展德拜模型等值电路由几何电容 C_g 、绝缘电阻 R_g 以及 n 条弛豫极化支路构成,弛豫极化支路由极化电阻 R_{pi} 和极化电容 C_{pi} 串联构成($i=1, 2, \dots, n$),见图1。

对油纸绝缘系统施加电压源 U_0 ,极化电流 i_p 随时间不断衰减并逐渐趋近稳定值,该稳定值就是绝缘系统的泄漏电流。极化电流由3部分组成,分别是泄漏电流 I_r 、几何电流 i_d 和吸收电流 i_a ,且 $i_p=i_d+i_a+I_r$ ^[17]。泄漏电流 I_r 即为加压后流过绝缘电阻 R_g 的稳定电流, $I_r=U_0/R_g$ 。几何电流 i_d 是加压时电压源对绝缘介质几何电容的瞬时充电电流,由快速极化过程形成,幅值很大,衰减极快,衰减时间在微秒级别^[18]。所以实际中难以精确测量加压后很短时间内的极化电流数值,文中极化电流从10 ms之后开始

测量。吸收电流是一个随时间不断衰减的电流,它的衰减速度比几何电流慢的多,吸收电流是由变压器油纸绝缘系统中不同部分的弛豫极化过程形成的,从扩展德拜等值电路来看,吸收电流由弛豫极化支路产生,吸收电流 i_a 可以用一系列指数项之和的形式来表示,其表达式为

$$i_a = \sum_{i=1}^n A_i e^{-t/\tau_i} \quad (1)$$

式(1)中: n 为弛豫极化支路数; A_i 为指数项系数, $A_i=U_0/R_{pi}$; τ_i 称为指数项时间常数,亦即相应弛豫极化支路的弛豫时间常数, $\tau_i=R_{pi}C_{pi}$ ($i=1, 2, \dots, n$),由于几何电流衰减极快,衰减时间在微秒级别,近似认为10 ms之后极化电流的表达式为

$$i_p=i_a+I_r=A_1 e^{-t/\tau_1}+A_2 e^{-t/\tau_2}+\dots+A_n e^{-t/\tau_n}+I_r \quad (2)$$

可知若能辨识得到 A_i 、 τ_i 、 I_r 的数值,将其代入方程组(3),便可求得油纸绝缘系统扩展德拜模型等值电路参数 R_{pi} 、 C_{pi} 、 R_g 的数值。

$$\begin{cases} I_r=U_0/R_g \\ A_i=U_0/R_{pi} (i=1, 2, \dots, n) \\ \tau_i=R_{pi}C_{pi} (i=1, 2, \dots, n) \end{cases} \quad (3)$$

2 参数辨识方法

对测量得到的极化电流曲线,其表达式见式(2),其中 $\tau_i > \tau_{i+1}$ ($i=1, 2, \dots, n-1$), n 为弛豫极化支路数。时间常数大的指数项衰减慢,对极化电流曲线末端影响大;而时间常数小的指数项衰减快,对极化电流曲线末端部分影响小,则可近似忽略时间常数较小的指数项对曲线末端部分的影响^[19]。

设极化电流曲线中时间常数较大的指数项 i_{p1} 和时间常数较小的指数项 i_{p2} 的表达式见式(4)、(5)。

$$i_{p1}(t)=A_1 e^{-t/\tau_1} \quad (4)$$

$$i_{p2}(t)=A_2 e^{-t/\tau_2} \quad (5)$$

式(4)、(5)中: $A_1=U_0/R_{p1}$; $A_2=U_0/R_{p2}$ 。

设 $\tau_1=k\tau_2$,即 $k=R_{p1}C_{p1}/(R_{p2}C_{p2})$,计算点对应时刻 $t=m\tau_1$ 。因为时间常数大的弛豫极化支路的极化电容也较大,即满足 $C_{p1}>C_{p2}$ 。可得

$$\frac{i_{p1}(t)}{i_{p2}(t)} = \frac{A_1}{A_2} e^{m(k-1)} = \frac{C_{p1}}{C_{p2}} \frac{1}{k} e^{m(k-1)} > \frac{1}{k} e^{m(k-1)} \quad (6)$$

当 $k>1$ 时函数 $e^{m(k-1)}/k$ 是关于 k 的单调增函数,文中首先取 $m=2$ 进行计算,且一般满足 $\tau_i \geq 3\tau_{i+1}$ 。当 $k=4$ 时, $e^{m(k-1)}/k$ 等于101,故此时 i_{p2} 数值占 i_{p1} 比例小于1%,可近似忽略 i_{p2} 对 i_{p1} 的影响,即当计算点对应时刻足够大时可忽略较小时间常数指数项的影响。其他时间常数更小的指数项对 i_{p1} 的影响可类似

分析。

利用曲线末端部分主要取决于大时间常数指数项的特点来计算等值电路参数。在极化电流曲线末端部分不为零处选取初始计算点,如此选取的初始计算点对应时刻会在待求的支路时间常数附近。如果计算点对应时刻太大,时间常数大的指数项也衰减很多,计算误差可能较大。

同样设极化电流曲线中时间常数较大的指数项和时间常数较小的指数项见式(4)、(5)。在曲线末端选取初始计算点,对应时刻为 t_1 、 t_2 ,其中 $t_1 > t_2$ 。可知 τ_1 的计算公式见式(7)。

$$\tau_1 = \frac{t_1 - t_2}{\ln(i_{p1} t_2) - \ln(i_{p1} t_1)} \quad (7)$$

假如所选取的计算点对应时刻足够大,则可以忽略 i_{p2} 对 i_{p1} 的影响,由式(8)计算得到较准确的 τ_1 数值。

$$\tau_1 = \frac{t_1 - t_2}{\ln(i_p t_2) - \ln(i_p t_1)} \quad (8)$$

如果选取的计算点对应时刻不够大,即此时受较小时间常数支路的影响较大,如果仍按式(8)计算,则有

$$\tau_1 = \frac{t_1 - t_2}{\ln(i_p t_2) - \ln(i_p t_1)} = \frac{t_1 - t_2}{\ln(i_{p1} t_2 + i_{p2} t_2) - \ln(i_{p1} t_1 + i_{p2} t_1)} \quad (9)$$

可知,当计算点对应时刻不够大时,由于受到较小时间常数支路的影响,计算得到的 τ_1 数值会比真实值小。如果所选取计算点对应时刻大小合适,则计算得到的解误差较小,故获取对应时刻大小合适的计算点是求解的关键。

首先在曲线末端部分不为零处选取初始计算点, $t_{1,1}$ 表示初始计算点对应时刻, $t_{1,i}$ 表示第 i 次计算点的对应时刻, $\tau_{1,i}$ 表示时间常数 τ_1 的第 i 次计算结果。该初始计算点对应时刻可能偏小也可能足够大,将其代入式(8)计算得到 $\tau_{1,1}$,将 $\tau_{1,1}$ 作为 τ_1 真实值的估计值。令 $m=2$,再取 $t_{1,2}=m\tau_{1,1}$ 并由式(8)计算得到 $\tau_{1,2}$,再取 $t_{1,3}=m\tau_{1,2}$ 计算得到 $\tau_{1,3}$,如此进行多次修正计算。假设计算 p 次后求得的 τ_1 已基本不变,再以 $t_{1,p+1}=(m+1)\tau_{1,p}$ 代入式(8)进行检验计算。如果检验前第 p 次的计算点对应时刻够大,即较小时间常数支路的影响可以忽略,则检验计算求得的 τ_1 并不会增大(考虑计算误差,允许增大1%以内),则取检验前的第 p 次计算结果作为最终的解。若检验前第 p 次计算点对应时刻并不够大,即较小时间常数支路仍有较大影响,则进行检验计算时,因为所取计算点对应时刻增大,较小时间常数支路的影响变小,检验计算求得的 τ_1 数值会增大;此时应重新选取对应时刻更大的初始点来计算得到 $\tau_{1,1}$,再取 $t_{1,2}=(m+1)$

$\tau_{1,1}$ 计算得到 $\tau_{1,2}$,进行多次修正计算,假设计算 p 次后求得的 τ_1 已经变化不大,再以 $t_{1,p+1}=(m+2)\tau_{1,p}$ 进行检验计算。如此便可求出较大时间常数指数项的参数值,其他指数项的参数可类似求解。

利用上述原理可求解极化电流表达式中的未知参数 I_r 、 A_i 、 τ_i 。求解绝缘系统等值电路参数的具体步骤如下。

1)极化电流末端部分表示为 $i_p(t)=A_i e^{-t/\tau_i}+I_r$,在曲线末端部分不为零处选取至少3个等间距的时间点 t_1 、 t_2 、 t_3 ,即满足 $t_1-t_2=t_2-t_3>0$ 。首先令 $m=2$,并将初始计算点代入式(9),得到如下方程组。

$$\begin{cases} i_p(t_1)=A_i e^{-t_1/\tau_i}+I_r \\ i_p(t_2)=A_i e^{-t_2/\tau_i}+I_r \\ i_p(t_3)=A_i e^{-t_3/\tau_i}+I_r \end{cases} \quad (10)$$

变换化简,可得

$$\ln(i_p t_2 - i_p t_1) - \ln(i_p t_3 - i_p t_2) = (-t_2/\tau_i) - (-t_3/\tau_i) \quad (11)$$

可求得参数 τ_1 的第1次计算结果 $\tau_{1,1}$,将 $\tau_{1,1}$ 作为时间常数 τ_1 的估计值,再取 $t_{1,2}=m\tau_{1,1}$,代入方程(11)进行修正计算得到 $\tau_{1,2}$;计算 p 次后求得的 τ_1 已经基本不变,再取 $t_{1,p+1}=(m+1)\tau_{1,p}$ 进行检验计算,若检验计算求得的 τ_1 数值没有增大,说明第 p 次计算点的对应时刻大小合适,较小时间常数支路的影响可以忽略, τ_1 取第 p 次的计算结果。若检验计算求得的 τ_1 数值增大,应增大初始点并重新计算和检验。求出 τ_1 数值后,将第 p 次计算点代入方程组(10)求出第 $i=1$ 个指数项参数 A_i 、 I_r 。再从极化电流曲线中减去该指数项和泄漏电流对应部分,得到剩余曲线。

2)在剩余曲线末端不为零处取2个时间点 t_4 、 t_5 ,且 $t_4 > t_5$,首先令 $m=2$ 。可知剩余曲线末端部分可表示为: $i_{p2}=A_2 e^{-t/\tau_2}$,得到如下方程组

$$\begin{cases} i_{p2} t_4 = A_2 e^{-t_4/\tau_2} \\ i_{p2} t_5 = A_2 e^{-t_5/\tau_2} \end{cases} \quad (12)$$

可求得参数 τ_2 的第1次计算结果 $\tau_{2,1}$,再进行修正计算,如此计算 n 次后求得的 τ_2 已基本不变,再取 $t_{4,n+1}=(m+1)\tau_{2,n}$ 进行检验计算,若检验计算求得的 τ_2 没有增大,则 τ_2 取第 n 次的计算结果。若检验计算得到的 τ_2 数值增大,应重新选取对应时刻更大的初始点并重新计算和检验。求出 τ_2 数值后,取第 n 次计算点代入方程组(12),求出第 $i=2$ 个指数项的表达式,再从剩余曲线中减去该指数项对应的曲线,得到新的剩余曲线。

3)继续上述2)过程,求出所有指数项的表达式。在每次求出指数项表达式后,将计算得到的各支路

极化电流以及泄漏电流相加得到拟合极化电流,检查拟合极化电流和测量极化电流曲线是否基本重合,若满足则可结束计算过程,如此便可求出所有参数 I_r 、 A_i 、 τ_i ,再将其代入方程组(3),可求出油纸绝缘系统的等值电路参数 R_{pi} 、 C_{pi} 、 R_g 。

利用极化电流辨识油纸绝缘系统等值电路参数的流程图见图 2。

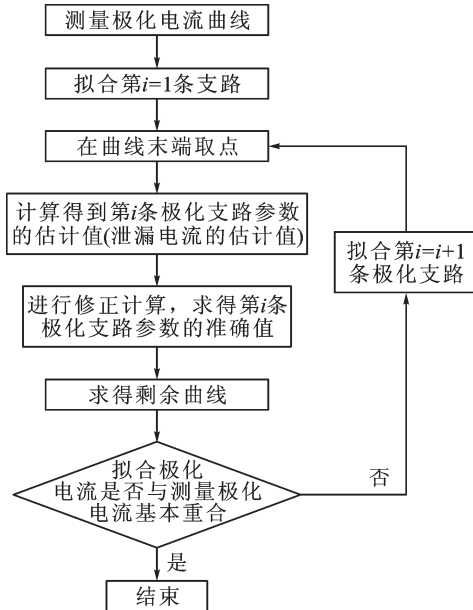


图 2 扩展德拜等值电路参数辨识流程图

Fig. 2 Flow chart of extended Debye model parameter identification

3 实例分析

为检验应用极化电流辨识油纸绝缘系统等值电路参数的可行性,参考文[20]中对一台 45 MVA 变压器油纸绝缘系统等值电路参数的辨识结果,其等值电路参数见表 1。

表 1 T_0 等值电路参数

Table 1 Equivalent circuit parameters of T_0				
极化支路	45 MVA 变压器 T_0			$R_g/G\Omega$
	$R_{pi}/G\Omega$	C_{pi}/nF	τ_i/s	
1	7.0	950.0	6 650.00	2.5
2	6.0	150.0	900.00	
3	4.5	30.0	135.00	
4	3.5	8.5	29.75	
5	6.0	0.9	5.40	
6	2.5	0.3	0.75	

利用上述等值电路搭建仿真模型,令直流电压源 U_0 为 1 000 V,测量的最大时间 t_m 为 20 000 s,仿真得到测量极化电流曲线,对该极化电流曲线使用上述方法进行等值电路参数辨识,可得到各个等值电路参数计算结果见表 2。

将计算得到的各极化支路的极化电流和泄漏电流相加得到拟合极化电流曲线,测量极化电流曲线和拟合极化电流曲线见图 3。

表 2 T_0 计算等值电路参数

Table 2 Calculation equivalent circuit parameters of T_0

极化支路	45 MVA 变压器 T_0						R_g 计算结果/ R_g 计算误差/%	
	$A_i/\mu A$	τ_i/s	R_{pi} 计算结果/ $G\Omega$	R_{pi} 相对误差/%	C_{pi} 计算结果/ nF	C_{pi} 相对误差/%	果/ $G\Omega$	差/%
1	0.142 9	6 647.000 0	6.997	0.042 86	950.000 0	0.000 00	2.500	0.000
2	0.166 9	898.700 0	5.993	0.116 70	149.900 0	0.066 67		
3	0.224 7	134.000 0	4.451	1.089 00	30.110 0	0.366 70		
4	0.287 6	29.140 0	3.477	0.657 10	8.383 0	1.376 00		
5	0.169 7	5.091 0	5.891	1.817 00	0.864 1	3.989 00		
6	0.412 0	0.709 7	2.427	2.920 00	0.292 4	2.533 00		

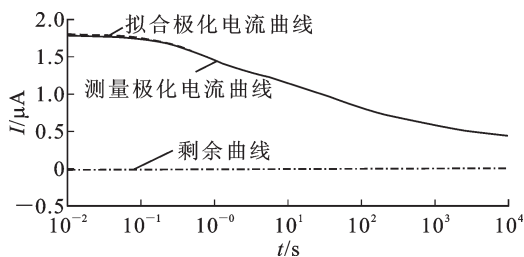


图 3 T_0 拟合极化电流曲线

Fig. 3 Fitting polarisation current curve of T_0

由图 3 可知,拟合极化电流曲线与测量极化电流曲线基本重合;从表 2 可以看出,变压器 T_0 的等

值电路参数计算结果与实际值较为接近,计算结果的误差较小。

再利用文[21]中对 3 台变压器 T_1 、 T_2 、 T_3 的扩展德拜模型等值电路参数辨识结果,其相关信息和等值电路参数见表 3、4,表 4 中: T_1 中压侧 R_g 为 12.260 $G\Omega$; T_2 中压侧 R_g 为 11.290 $G\Omega$; T_3 低压侧 R_g 为 1.517 $G\Omega$ 。

依据上述变压器 T_1 、 T_2 、 T_3 的等值电路参数搭建仿真模型,令测量的最大时间 t_m 为 8 000 s,电源电压 $U_0=2$ 000 V,极化电流从 $t=10$ ms 开始测量,仿真得到各台变压器的测量极化电流曲线。对 T_1 、 T_2 、 T_3

表3 3台变压器基本信息

Table 3 Basic information of three transformers

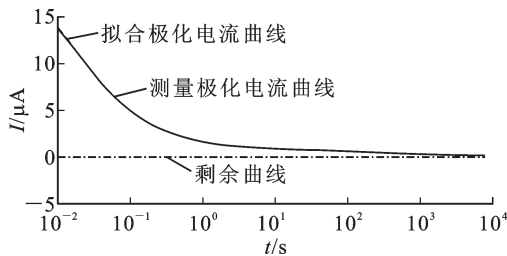
变压器	运行状态	变压器型号	容量/(kVA)	制造厂家
T ₁	新投运	SFSZ10-180000/220	180 000	中国特变电工衡阳变压器厂
T ₂	已退运	cub-MRM/220	120 000	日本三菱变压器厂
T ₃	运行5年	SZg-31500/110	31 500	南京电力变压器厂

表4 3台变压器扩展德拜等值电路参数

Table 4 Equivalent circuit parameters of T₁, T₂, T₃

极化支路及 R _g 的值	T ₁ 中压侧		T ₂ 中压侧		T ₃ 低压侧	
	R _μ /GΩ	C _μ /nF	R _μ /GΩ	C _μ /nF	R _μ /GΩ	C _μ /nF
1	0.233 9	0.067 38	1.549	0.037 60	0.097 35	2.581
2	0.329 4	0.214 20	2.865	0.146 10	0.265 70	4.635
3	0.777 5	0.534 50	3.681	0.746 10	0.681 30	11.820
4	2.797 0	1.422 00	5.694	4.415 00	0.611 10	67.930
5	9.219 0	9.609 00	2.859	77.860 00	0.724 30	310.100
6	4.206 0	181.600 00	6.057	235.300 00	2.555 00	474.000

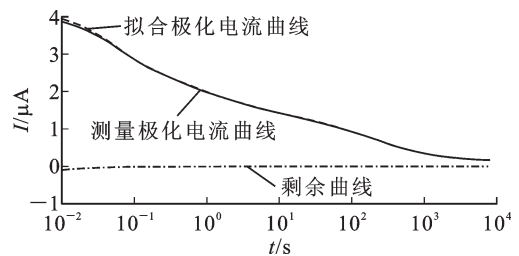
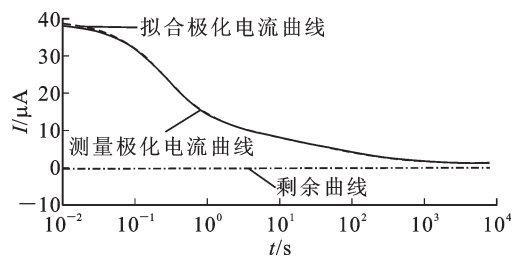
的测量极化电流曲线,运用上述参数辨识方法,可以得到它们的测量极化电流与拟合极化电流曲线见图4~6;T₁、T₂、T₃的等值电路参数计算结果见表5~7。

图4 T₁拟合极化电流曲线Fig. 4 Fitting polarisation current curve of T₁

可知,这3台变压器的拟合极化电流曲线与测量极化电流曲线基本重合;各台变压器等值电路参数的计算结果与实际值较为接近,各参数计算结果误差较小,验证了利用该方法进行油纸绝缘系统等值电路参数辨识的可行性。

4 结语

正确辨识油纸绝缘系统的扩展德拜等值电路参数,对于揭示油纸绝缘系统的介质响应特性和绝

图5 T₂拟合极化电流曲线Fig. 5 Fitting polarisation current curve of T₂图6 T₃拟合极化电流曲线Fig. 6 Fitting polarization current curve of T₃

缘状态之间的关系具有十分重要的意义。文中提出了一种利用极化电流来辨识油纸绝缘系统的扩展德拜模型等值电路参数的方法,利用极化电流曲线末端主要取决于大时间常数指数项的特点,先在曲

表5 T₁等值电路参数计算结果Table 5 Calculation equivalent circuit parameters of T₁

极化 支路	T ₁ 中压侧						R _g 计算结 果/GΩ	R _g 相对误 差/%
	A _i /μA	τ _i /s	R _μ 计算结果/GΩ	R _μ 相对误差/%	C _μ 计算结果/nF	C _μ 相对误差/%		
1	0.475 6	763.700 0	4.205 0	0.023 78	181.600 0	0.000 00	12.26	0.00
2	0.216 9	88.580 0	9.221 0	0.021 69	9.606 0	0.031 22		
3	0.715 1	3.976 0	2.797 0	0.000 00	1.421 0	0.070 32		
4	2.586 0	0.414 5	0.773 4	0.527 30	0.535 9	0.261 90		
5	6.171 0	0.069 7	0.324 1	1.609 00	0.215 1	0.420 20		
6	8.542 0	0.015 4	0.234 1	0.085 51	0.065 8	2.345 00		

表 6 T_2 等值电路参数计算结果Table 6 Calculation equivalent circuit parameters of T_2

极化 支路	T_2 中压侧						R_g 计算结 R_g 相对误	
	$A_i/\mu A$	τ_i/s	R_{pi} 计算结果/ $G\Omega$	R_{pi} 相对误差/%	C_{pi} 计算结果/nF	C_{pi} 相对误差/%	果/ $G\Omega$	差/%
1	0.330 8	1 423.000 0	6.046	0.181 6	235.400 0	0.042 5	11.280 00	0.088 57
2	0.700 7	222.000 0	2.854	0.174 9	77.790 0	0.089 9		
3	0.356 0	24.660 0	5.618	1.335 0	4.389 0	0.588 9		
4	0.559 6	2.627 0	3.574	2.907 0	0.735 0	1.488 0		
5	0.727 5	0.383 6	2.749	4.049 0	0.139 5	4.517 0		
6	1.352 0	0.052 3	1.479	4.519 0	0.035 4	5.851 0		

表 7 T_3 等值电路参数计算结果Table 7 Calculation equivalent circuit parameters of T_3

极化 支路	T_3 低压侧						R_g 计算结 R_g 相对误	
	$A_i/\mu A$	τ_i/s	R_{pi} 计算结果/ $G\Omega$	R_{pi} 相对误差/%	C_{pi} 计算结果/nF	C_{pi} 相对误差/%	果/ $G\Omega$	差/%
1	0.794 6	1 197.000 0	2.517 0	1.487 0	475.400	0.295 4	1.516 00	0.065 92
2	2.782 0	221.800 0	0.718 8	0.759 4	308.500	0.516 0		
3	3.313 0	40.480 0	0.603 7	1.211 0	67.060	1.281 0		
4	2.986 0	7.635 0	0.669 8	1.688 0	11.400	3.553 0		
5	7.799 0	1.172 0	0.256 4	3.500 0	4.568	1.446 0		
6	20.640 0	0.242 5	0.096 9	0.462 2	2.503	3.022 0		

线末端部分不为零处取初始计算点求出相应指数项时间常数的近似值, 再进行多次修正计算并检验, 得到对应时刻大小合适的计算点, 以该计算点进行计算可以忽略时间常数较小指数项的影响, 进而计算出各参数的解。文中运用该方法对多台变压器进行了分析计算, 各台变压器等值电路参数的计算结果与实际值较为接近, 各参数计算值的误差较小, 该方法为辨识油纸绝缘系统的扩展德拜模型等值电路参数提供了一种新的思路。

参考文献:

- [1] 黄彦婕. 基于时域介质响应理论的变压器油纸绝缘状态诊断[D]. 福州: 福州大学, 2011.
HUANG Yanjie. Research on diagnosis of oil-paper insulation condition in transformer based on time domain dielectric response theory[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2011.
- [2] 张 涛. 基于回复电压特征量的变压器油纸绝缘状态诊断研究[D]. 福州: 福州大学, 2010.
ZHANG Tao. Research on diagnosis of oil-paper insulation condition in transformer based on return voltage characteristic quantities[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2010.
- [3] 杨丽君, 齐超亮, 吕彦冬, 等. 热老化时间及测试温度对油纸绝缘时域介电特性的影响[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(31): 162-169.
YANG Lijun, QI Chaoliang, LYU Yandong, et al. Study on influences of thermal aging time and testing temperatures on time-domain dielectric characteristics of oil-paper insulation[J]. Proceedings of the CSEE, 2013, 33(31): 162-169.
- [4] 郑君亮, 江修波, 蔡金锭, 等. 去极化电流解谱分析油纸绝缘等效电路参数研究[J]. 电力系统保护与控制, 2014, 42(21): 54-58.
ZHENG Junliang, JIANG Xiubo, CAI Jinding, et al. Research on spectrum analysis of the depolarization current to identify the parameter of oil-paper insulation equivalent circuit[J]. Power System Protection and Control, 2014, 42(21): 54-58.
- [5] 朱晓伟, 梁榕珊. 温度对油纸绝缘结构的击穿特性影响的研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2014, 35(1): 64-68.
ZHU Xiaowei, LIANG Rongshan. Study on influence of temperature on breakdown characteristic of oil-paper insulation[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2014, 35(1): 64-68.
- [6] 高 竣, 刘捷丰, 廖瑞金, 等. 热老化程度及测试温度对扩展 Debye 模型参数的影响研究[C]//2013 年中国电机工程学会年会论文集. 成都: [s.n.], 2013: 1160-1167.
GAO Jun, LIU Jiefeng, LIAO Ruijin, et al. Study on the influence of thermal aging state and testing temperature on the parameters of extended debye model[C]//Proceedings of Chinese Society for Electrical Engineering in 2013. Chengdu: [s.n.], 2013: 1160-1167.
- [7] 刘 刚, 廖瑞金, 冯 运, 等. 温度对变压器油纸绝缘系统回复电压参数影响规律的研究[J]. 高压电器, 2010, 46(1): 80-84.
LIU Gang, LIAO Ruijin, FENG Yun, et al. Temperature influence on parameters of return voltage measurement of

- oil-paper insulation system in transformer[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(1): 80-84.
- [8] 廖瑞金, 郝建, 杨丽君, 等. 变压器油纸绝缘频域介电谱特性的仿真与实验研究[J]. 中国电机工程学报, 2010, 30(22): 113-119.
- LIAO Ruijin, HAO Jian, YANG Lijun, et al. Simulation and experimental study on frequency-domain dielectric spectroscopy of oil-paper insulation for transformers[J]. Proceedings of the CSEE, 2010, 30(22): 113-119.
- [9] 江贵贵. 变压器油纸绝缘状态检测的回复电压法应用研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2013.
- JIANG Guigui. Research on response voltage method for detecting state of oil-paper insulation in transformer[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2013.
- [10] 李安娜, 蔡金铤. 油纸绝缘等效电路参数辨识与老化评估[J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29(1): 48-54.
- LI Anna, CAI Jinding. Equivalent circuit parameter identification and aging assessment for oil-paper insulation[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(1): 48-54.
- [11] 林智勇, 蔡金铤. 变压器等效电路参数变化对极化谱的影响分析[J]. 电子测量与仪器学报, 2014, 28(3): 292-298.
- LIN Zhiyong, CAI Jinding. Analysis for influence of transformer equivalent circuit parameters change on polarization spectrum[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2014, 28(3): 292-298.
- [12] 林智勇, 蔡金铤. 油纸绝缘极化等效电路参数计算方法[J]. 电机与控制学报, 2014, 18(8): 62-66.
- LIN Zhiyong, CAI Jinding. Novel method to calculate polarized equivalent circuit of oil-paper insulation[J]. Electric Machines and Control, 2014, 18(8): 62-66.
- [13] 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 Chunyan, ZHANG Mingli. 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.
- [14] 汤明杰, 雷 敏, 白 帆, 等. 采用向量匹配法的油纸绝缘系统扩展 Debye 模型参数识别[J]. 高电压技术, 2014, 40(2): 548-556.
- TANG Mingjie, LEI Min, BAI Fan, et al. Parameter identification based on vector fitting method for extended Debye model of oil-paper insulation system[J]. High Voltage Engineering, 2014, 40(2): 548-556.
- [15] 袁 泉. 变压器油纸绝缘老化的频域介质响应试验及仿真研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2010.
- YUAN Quan. Research on experiment and simulation of frequency-domain dielectric response for transformer oil-paper insulation aging[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.
- [16] 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电路参数辨识中的应用[J]. 高电压技术, 2011, 37(8): 1982-1988.
- JIANG Xiubo, HUANG Yanjie, LAI Xiangsheng. 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.
- [17] 金维芳. 电介质物理学[M]. 北京: 机械工业出版社, 1997.
- JIN Weifang. Dielectric physics[M]. Beijing: China Machine Press, 1997.
- [18] 陈化钢. 电力设备预防性试验方法及诊断技术[M]. 北京: 中国科学技术出版社, 2001.
- CHEN Huagang. Method of preventive test and diagnosis for power equipment technology[M]. Beijing: China Science and Technology Press, 2001.
- [19] 吴文宣, 张孔林, 李安娜, 等. 基于油纸绝缘变压器弛豫响应的电压谱函数模型[J]. 电力科学与技术学报, 2014, 29(3): 80-85.
- WU Wenxuan, ZHANG Konglin, LI Anna, et al. Research on voltage spectral function model based on oil-paper insulation transformer relaxation response[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2014, 29(3): 80-85.
- [20] SAHA T K, PURKAIT P, MULLER F. Deriving an equivalent circuit of transformers insulation for understanding the dielectric response measurements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(1): 149-157.
- [21] 熊维兵, 蔡金铤. 油纸绝缘系统等效电路参数的计算及应用[J]. 福州大学学报(自然科学版), 2013, 41(2): 186-191.
- XIONG Weibing, CAI Jinding. The calculation and application of oil-paper insulation system equivalent circuit parameters[J]. Journal of Fuzhou University (Natural Science Edition), 2013, 41(2): 186-191.

蔡 锋(1989—), 男, 硕士研究生, 从事电力变压器油纸绝缘老化研究。

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。

蔡金铤(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。