

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2020.11.032

基于去极化电流 Prony 拟合的油纸绝缘德拜参数辨识方法

高 浩, 刘庆珍, 蔡金锭

(福州大学电气工程与自动化学院福建省新能源发电与电能变换重点实验室, 福州 350108)

摘要: 提出一种利用自适应采样间隔 Prony 算法对去极化电流数据进行拟合, 进而辨识出德拜等效电路参数的方法。根据扩展德拜等效模型下去极化电流指数函数叠加的物理性质, 对传统单采样间隔 Prony 算法进行改进: 根据不同大小时间常数去极化电流子谱线的衰减特性实现采样间隔的自适应选择, 利用自适应采样间隔对去极化电流数据进行多次 Prony 拟合, 得到相应时间常数的子谱线弛豫参数, 进而辨识出油纸绝缘的德拜电路参数; 搭建扩展德拜模型仿真平台得到 PDC 仿真数据进行拟合, 验证了自适应采样间隔 Prony 算法对德拜电路参数辨识的准确性, 取一台现场实测的油纸绝缘调压器去极化电流数据进行拟合, 拟合结果与实测电流吻合, 验证了此方法在现场噪声干扰测试条件下的可靠性; 对实测数据的拟合结果证实了扩展德拜模型对油纸绝缘介质响应过程描述的准确性, 德拜拟合对现场实测的噪声干扰起到了滤波的作用。

关键词: 油纸绝缘; 扩展德拜模型; 参数辨识; Prony 算法; 去极化电流; 拟合; 采样间隔

Debye Parameter Identification Method of Oil-paper Insulation Based on Depolarization Current Prony Algorithm Fitting

GAO Hao, LIU Qingzhen, CAI Jinding

(College of Electrical Engineering and Automation, Fujian Key Laboratory of New Energy Generation and Power Conversion Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: An adaptive sampling interval Prony algorithm is proposed to fit the data of depolarization current and identify the parameters of Debye equivalent circuit. According to the physical properties of the exponential function superposition of the depolarized current under the extended Debye equivalent model, the traditional single sampling interval Prony algorithm is improved: the adaptive selection of sampling interval is realized according to the attenuation characteristics of depolarized current sublines with different time constants, and the data of depolarized current are obtained by using the adaptive sampling interval. Prony fitting is used to obtain the subspectral relaxation parameters of the corresponding time constants, and then identify the parameters of the oil-paper insulation circuit. The simulation platform of extended Dubai model is built to simulate the PDC simulation data, which verifies the accuracy of the adaptive sampling interval Prony algorithm for parameter identification of the Dubai circuit, and a field is selected. The fitting results of the measured depolarization current data of oil-paper insulated voltage regulator coincide with the measured current, which verifies the reliability of the method under the condition of field noise interference test. The fitting results of the measured data confirm the accuracy of the extended Debye model in describing the response process of oil-paper insulated medium. The noise interference measured in the field plays a filtering role.

Key words: oil-paper insulation; extended Debye model; parameter identification; Prony algorithm; depolarization current; fitting; sampling interval

收稿日期:2020-04-28; 修回日期:2020-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(61174117)项目资助; 福建大学科技启动基金(XRC-17043)资助; 晋江市福大科教园区发展中心科研项目(2019-JJFDKY-33)资助。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(61174117), Science and Technology Start up Foundation of Fuzhou University(XRC-17043), Scientific Research Project of Fuzhou University Jinjiang Science and Education Park(2019-JJFDKY-33).

0 引言

电气设备故障是危害电网稳定运行的主要因素,而变压器发生故障概率最大的部位是其内绝缘^[1],如何对变压器内绝缘状态进行有效的判断,是国内外学者共同面临的课题。

介电响应诊断技术由于其非破坏性,在近年来得到了长足的发展^[2]。扩展德拜等效模型可以反映油纸绝缘复杂的极化过程,而被广泛应用在油纸绝缘介质响应建模当中^[3]。建立油纸绝缘介质响应等效模型,可以让不同的介质响应实验从理论上实现统一的解释,还可以借助数学工具对测试数据进行变换分析,提取新特征量,从而对变压器绝缘状态进行更加有效准确的判断。扩展德拜模型就是一种应用广泛的介质响应等效电路模型,如何根据介质响应实验数据辨识扩展德拜模型电路参数是准确判断油纸绝缘老化的基础。

在求解扩展德拜模型电路参数上,近几年来研究已经取得了很多成果,但是仍然存在一些不足。文[4-7]采用智能算法通过回复电压极化谱完成对扩展德拜等效电路的参数辨识,存在参数辨识不唯一的缺点;文[8-10]利用时域微分解谱法,可以准确判断弛豫支路数,但一次、二次微分解谱时从未端取点时具有主观性,三次微分解谱法在小时间常数支路存在偏移,而且没有考虑到噪声对微分解谱的影响;文[11-16]利用去极化电流指数函数的衰减物理特性,从去极化电流末端取点,将多指数拟合转化为单指数拟合进行参数求解,体现了介质响应的物理过程,但未考虑末端电流幅值小,受干扰更大,并且也具有取点的任意性和主观性,造成求解结果的不唯一;文[17]先对原始数据用多项式进行拟合,然后通过FFT(快速傅里叶变换)得到其频谱,用向量匹配法对频谱进行拟合,最后转换到时域得到等效电路参数,虽然避免了主观性,但多次时频域变换繁琐复杂,存在拟合支路数选择没有依据,电流末端拟合误差变大等不足。

综上所述,对去极化电流进行德拜拟合可以唯一的确定介质绝缘德拜等效电路参数,但是现有文献大多是对仿真实验去极化电流或实验室测量去极化电流进行拟合分析,对现场测量噪声干扰条件下测量的去极化电流的拟合分析较少。现场测试条件下噪声较大,毛刺较多,测得到原始去极化电流不具备进行微分操作等复杂变换的条件;而对于主观性较强的拟合方法,由于选点的不唯一,得到拟合效果结果会随着选点的主观性而存在差异,想要

得到一条拟合效果较好的曲线需要进行多次试探。

文中分析了在扩展德拜模型的描述下的介质响应的物理过程,得到去极化电流曲线指数函数叠加的物理特性;提出一种基于自适应采样间隔 Prony 算法拟合的扩展德拜等效电路的参数辨识方法:首先,建立样本矩阵,用矩阵奇异值分解—全局最小二乘法(singular value decomposition-total least squares, SVD-TLS)确定模型阶数,即弛豫支路数;然后,针对不同大小的时间常数支路,利用不同的采样间隔对去极化电流数据进行二次采样,代入扩展 Prony 算法分别求出对应不同时间常数支路的时间常数与弛豫系数;最后,通过去极化电流辨识支路参数的公式,求解出各支路的支路电阻、电容,实现对扩展德拜电路参数的辨识。

文中通过对采样间隔的自适应选取,避免了主观性;确定支路数 N 之后,只需要再等间隔采样 $2N+1$ 个采样点,就可以对去极化电流可靠拟合,提升了拟合效率;Prony 算法用全局最小二乘(TLS)做为依据进行拟合,保证了拟合的准确度。对现场实测的变压器去极化电流进行拟合时,利用拟合效果作为评价标准来选择支路数,得到了较好的拟合效果,为噪声条件下进行去极化电流拟合的支路数判断提供了新思路。

1 变压器介质响应过程的数学模型

扩展德拜等效电路是一种应用较为广泛的描述油纸绝缘介质响应过程的数学模型^[8-18],文中用扩展德拜模型对介质响应进行建模,其电路拓扑见图1。

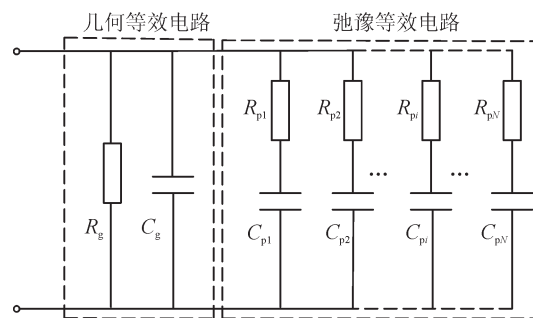


图1 扩展德拜等效电路

Fig. 1 The extended Debye equivalent circuit

扩展德拜等效电路由几何等效电路和弛豫等效电路组成。其中, R_g 为介质绝缘电阻, C_g 为介质电容;为了反映非均匀介质中的复杂极化过程,扩展德拜模型将非均匀绝缘介质的弛豫响应表示为多个均匀介质弛豫响应的叠加,每个单一均匀介质的弛豫响应用一条 R 、 C 串联支路表示,多条弛豫支路并联得到扩展德拜等效电路的弛豫等效电路。

对绝缘介质进行PDC试验时,需要先对介质两端外加直流高压 U_0 , 经过充电极化和放电去极化, 测量过程见图2。

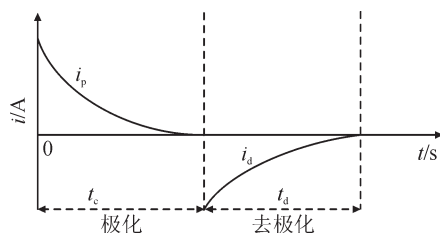


图2 极化/去极化电流法测量过程

Fig. 2 Polarization/depolarization current measurement process

根据扩展德拜等效电路和PDC测量过程,去极化电流是 N 条极化支路的零状态响应电流的叠加,若充电极化时间为 t_c , 时间 t 从短接被测试品开始计,去极化电流可以表示为

$$i_d(t) = \sum_{i=1}^N i_{di}(t) = \sum_{i=1}^N \frac{U_0}{R_{pi}} (1 - e^{-t_c/\tau_i}) e^{-t/\tau_i} = \sum_{i=1}^N B_i e^{-t/\tau_i} \quad (1)$$

由式(1)得

$$B_i = \frac{U_0}{R_{pi}} (1 - e^{-t_c/\tau_i}) \quad (2)$$

充电弛豫系数 B_i 是不随时间 t 变化而变化的常数^[18],在扩展德拜模型的描述下去极化电流是指数函数叠加的形式^[19]。

通过PDC曲线得到每条支路的弛豫系数 B_i 和时间常数 τ_i 后,支路参数可以计算为

$$\begin{cases} R_{pi} = \frac{U_0}{B_i} (1 - e^{-t_c/\tau_i}) \\ C_{pi} = \tau_i / R_{pi} \end{cases} \quad (3)$$

综上,用去极化电流数据辨识德拜等效电路参数的关键在于求解各等效支路的弛豫系数和时间常数。

2 基于Prony算法的去极化电流的拟合

2.1 Prony算法对指数叠加函数的拟合

Prony算法是一种利用指数项模型拟合被测样本的方法,并随着近年来计算机技术的发展越来越广泛的应用在各个领域中,对式(2)形式的指数叠加形式的去极化电流,其Prony拟合的步骤可以简述如下:

$$\begin{cases} D_1 \mu_1^k + D_2 \mu_2^k + \dots + D_N \mu_N^k = i_d(k) \\ D_1 \mu_1^{k+1} + D_2 \mu_2^{k+1} + \dots + D_N \mu_N^{k+1} = i_d(k+1) \\ \dots \\ D_1 \mu_1^{k+N} + D_2 \mu_2^{k+N} + \dots + D_N \mu_N^{k+N} = i_d(k+N) \\ \dots \\ D_1 \mu_1^{k+2N-1} + D_2 \mu_2^{k+2N-1} + \dots + D_N \mu_N^{k+2N-1} = i_d(k+2N-1) \end{cases} \quad (12)$$

方程组(12)为范德蒙德形式,求解此方程组可以得到 D_i 的值,将 D_i 和步骤4)中求得的 τ_i 代入式

1)数据的等间距采样。去极化电流表达式具有以下 N 个指数函数项叠加的形式

$$i_d(t) = \sum_{i=1}^N B_i e^{-t/\tau_i} \quad (4)$$

将函数进行等间距采样使其离散化,将自变量归一化为从0到 $N-1$ 的整数,得到离散化的去极化电流序列 $i_d(j)$ 。

$$i_d(j) = \sum_{i=1}^N B_i e^{(-j\Delta t/\tau_i)} = \sum_{i=1}^N B_i \mu_i^j \quad (5)$$

$$\mu_i = e^{(-\Delta t/\tau_i)} \quad (6)$$

式(5)、(6)中: Δt 为采样间隔; j 为从0到 $N-1$ 的整数,当从时间 t_0 开始采样时:

$$i_d(j) = \sum_{i=1}^N B_i e^{(-t_0/\tau_i)} e^{(-j\Delta t/\tau_i)} = \sum_{i=1}^N D_i e^{(-j\Delta t/\tau_i)} = \sum_{i=1}^N D_i \mu_i^j \quad (7)$$

$$D_i = B_i e^{(-t_0/\tau_i)} \quad (8)$$

式(7)、(8)中: D_i 为指数函数叠加常数系数; B_i 为实际去极化电流子谱线的弛豫系数。

2)构造样本矩阵,列写参数方程。在Prony算法中,构造样本矩阵列为

$$R = \begin{bmatrix} r(1,0) & r(1,1) & \dots & r(1,p) \\ r(2,0) & r(2,1) & \dots & r(2,p) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r(p_e,1) & r(p_e,2) & \dots & r(p_e,p_e) \end{bmatrix} \quad (9)$$

式(9)中,样本矩阵元素 $r(d,q)$ 定义为

$$r(d,q) = \sum_{n=p}^{N-1} i_d(n-q) i_d^*(n-d) \quad (10)$$

3)确定中间参数。确定样本矩阵 R 的有效秩,即支路数 N ,并且用SVD-TLS方法求取中间参数 $\alpha_1 \dots \alpha_N$ 。

4)指数函数叠加的底数。求解多项式

$$\mu^N + \alpha_1 \mu^{N-1} + \alpha_2 \mu^{N-2} + \dots + \alpha_{N-1} \mu + \alpha_N = 0 \quad (11)$$

得到指数函数叠加的底数 $\mu_i (i=1 \dots N)$, 将求得的 μ_i 代入式(6)可以求得时间常数 τ_i 。

5)求指数函数叠加常数系数。将求得的底数代入形成方程(7),得到 N 个采样点的离散电流方程,构成方程组(12)

(9)求得弛豫系数 B_i 。这样就实现了利用Prony算法对指数叠加函数的拟合。

2.2 基于 Prony 算法的采样间隔选取

Prony 算法指出, N 个指数函数叠加形式的离散数列满足一个长度为 N 的线性迭代方程^[20]。因此, 确定指数函数叠加序列的叠加数 N 之后, 只需要 $2N+1$ 个采样点构造样本矩阵就可以对多指数函数叠加进行拟合^[21]。

但是, 在利用单一采样间隔的 Prony 算法对大量指数函数叠加函数进行拟合的过程中, 当出现子

叠加项中时间常数差距过大时, 会出现如下现象:

- 1) 用较大的采样间隔进行辨识, 大时间常数叠加项拟合较准确, 小时间常数项不准确;
- 2) 用较小的采样间隔进行辨识时, 小时间常数项较为准确, 大时间常数项支路不准确。

现举例说明出现以上现象的原因。取文[10]中一台变压器 T_2 , 已知其各条子谱线的弛豫系数和时间常数见表 1。

表 1 变压器 T_2 子谱线的时间常数和弛豫系数

Table 1 Time constant and relaxation coefficient of T_2 's sub-spectral lines

参数	子谱线					
	1	2	3	4	5	6
弛豫系数 $B \times 10^{-8} / A$	4.520 5	13.622 0	47.716 0	155.506 9	471.770 2	630.352 9
时间常数 τ / s	419.393 3	11.503 3	1.546 7	0.303 3	0.066 7	0.020 0

将变压器 T_2 的各条子谱线衰减曲线绘制到对数坐标系下, 其中小时间常数子谱线(小于 1 s), 中等时间常数子谱线(1~100 s), 大时间常数子谱线(大于 100 s)分别用不同的线形表示。绘制的从 0~10 000 s 的子谱线衰减曲线见图 3。

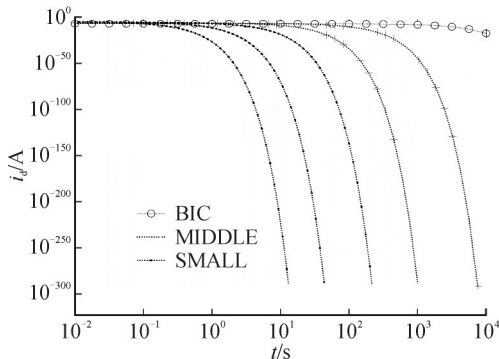


图 3 T_2 不同时间常数子谱线 0~10 000 s 衰减曲线

Fig. 3 0~10 000 s attenuation curve of sub-spectral lines with different time constants in T_2

由图 3 可见, 小时间常数子谱线(SMALL)衰减极快, 在大时间间隔(大于 10 s)的采样范围之内, 最小的时间常数子谱线已经衰减到 $10 \times 10^{-200} A$ 以下, 以至于难以拟合。

同样, 图 4 绘制出变压器 T_2 从 0~1 s 的各条子谱线的衰减曲线见图 4。

由图 4 可见, 在较小采样间隔(小于 1 s)的采样时间范围之内, 大时间常数子谱线(BIG)衰减很慢, 近似于一条平行于时间轴的直线, 导致各个采样点之间几乎没有差异, 导致小采样间隔对大时间常数支路的拟合并不准确。

由以上分析得出结论: 采样间隔要和时间常数子谱线相匹配, 才可以保证在采样区间内被拟合曲

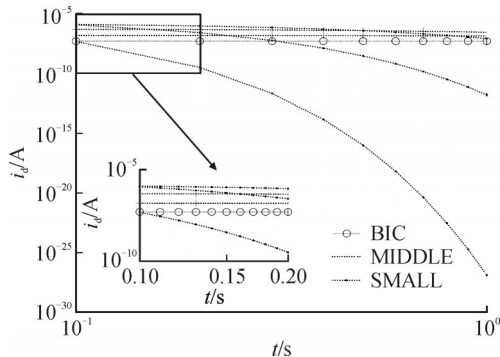


图 4 T_2 不同时间常数子谱线 0~1 s 衰减曲线

Fig. 4 0~1 s attenuation curve of sub-spectral lines with different time constants in T_2

线得到充分衰减且不至于衰减过小, 才能进行可靠拟合。

因此, 先从较大的时间点开始用大时间间隔进行采样, 避免小时间常数子谱线的影响, 用大采样间隔对大时间常数子谱线进行 Prony 拟合, 可以获得较为准确的大时间常数子谱线信息; 原谱线减去大时间常数指数子谱线得到剩余谱线, 再对剩余谱线用更小的采样间隔对小时间常数项进行拟合, 可以得到比较准确的结果。

2.3 自适应采样间隔的 Prony 算法

综上, 为了解决单一采样间隔的 Prony 算法对各子谱线时间常数差异过大时拟合不准确的问题, 文中提出的自适应采样间隔 Prony 算法主要计算步骤如下:

- 1) 利用去极化电流数据构造样本矩阵, 用 SVD-TLS 方法确定阶数, 即弛豫支路数 $N^{[20]}$;
- 2) 用较大的采样间隔(200 s 以上)对去极化电流曲线进行二次采样, 二次采样后的去极化电流数据

代入扩展 Prony 算法,求出大于此采样间隔的时间常数的叠加曲线;

3)去极化电流曲线减去较大时间常数的叠加曲线后得到剩余去极化电流曲线,再将当前采样间隔减去步进采样间隔,确定新的采样间隔,用扩展 Prony 算法求解两个采样间隔之间大小的时间常数叠加曲线;

4)重复步骤3),直到采样间隔小于10 s,利用1 s 求解时间常数范围在[1 s, 10 s]的叠加曲线,利用最小采样间隔求解 τ_i 小于1 s子谱线参数;

5)在拟合的过程中,如果解出子谱线数等于 N , 则停止解谱,输出数据,如果重复步骤4)仍然不能解出足够的子谱线,将剩余谱线再从大采样间隔开始解谱,直到解出足够数量的子谱线。

利用多采样间隔的 Prony 算法对油纸绝缘等效电路参数辨识的流程图见图5。

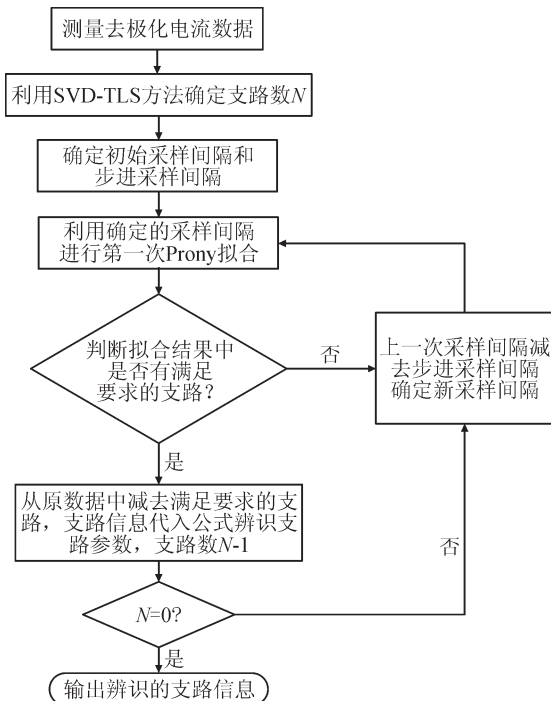


图5 自适应采样间隔扩展 Prony 拟合算法流程图

Fig. 5 Flow chart of adaptive sampling interval extended Prony fitting algorithm

3 拟合实例分析

3.1 参数辨识准确性验证

为了验证自适应采样间隔 Prony 算法拟合和2.3节中推导参数计算公式的有效性和准确性,选取文[22]中一台型号为SZG-31500/110油浸式变压器 T_1 ,已知各极化支路参数见表2(C_{pe} 为88.80 nF; R_p 为1.12 G Ω)。

将变压器 T_1 的德拜电路参数代入仿真平台进

表2 变压器 T_1 德拜电路参数

Table 2 Debye circuit parameters of T_1

支路	τ_i/s	$R_{pi}/G\Omega$	C_{pe}/nF
1	0.258 0	0.10	2.58
2	1.252 8	0.27	4.64
3	8.037 6	0.68	11.82
4	41.437 3	0.61	67.93
5	164.082 0	0.82	200.10
6	489.793 2	1.56	313.97

行极化去极化电流的仿真,极化充电时间设置为5 000 s;将得到的去极化电流数据代入自适应采样间隔的 Prony 算法,求得数据矩阵的秩为6,说明有6条驰豫支路,计算得各条支路的弛豫参数见表3,拟合曲线见图6。

表3 去极化电流拟合结果

Table 3 Fitting results of simulated depolarization current

支路	τ_i/s	B_i
1	0.258 000 001 7	$1.923\ 96\times10^{-5}$
2	1.252 800 028 0	$7.348\ 56\times10^{-6}$
3	8.037 600 448 0	$2.937\ 52\times10^{-6}$
4	41.437 300 640 0	$3.277\ 89\times10^{-6}$
5	164.082 000 002 0	$2.438\ 88\times10^{-6}$
6	489.793 202 380 0	$1.281\ 98\times10^{-6}$

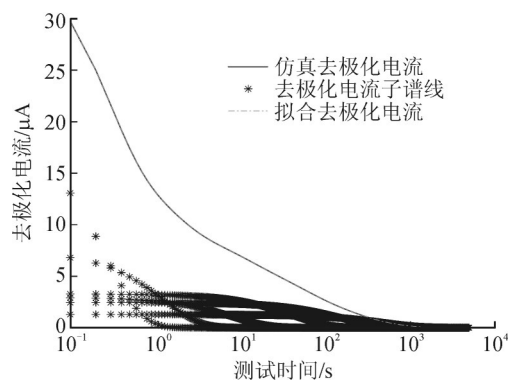


图6 去极化电流拟合效果图

Fig. 6 Fitting effect diagram of depolarization current

将表3中的 τ_i 和表2中的 τ_i 进行对比,可见自适应采样间隔的 Prony 算法对理想信号的拟合具有很高的准确性。

将表3中的数据代入式(4)对德拜电路的参数进行辨识,得到结果见表4。

将表4中求得的支路参数数据和表2的支路参数的数据进行对比,拟合支路参数与原支路参数吻合度超过97%,证明了所提出的 Prony 拟合与2.3节中对德拜等效电路参数辨识公式推导的准确性和可靠性。

表 4 变压器拟合支路参数

Table 4 Transformer fitting branch parameters

支路	τ_i/s	$R_{pi}/G\Omega$	C_{pi}/nF
1	0.258 0	0.102 00	2.530 0
2	1.252 8	0.272 10	4.603 1
3	8.037 6	6.808 40	11.805 3
4	41.437 3	6.101 47	67.930 0
5	164.082 0	8.200 50	200.087 8
6	489.793 2	1.560 03	313.963 6

3.2 现场实测调压器去极化电流数据验证

为了验证算法在现场噪声干扰测试条件下的有效性,取一台型号为TDJA-A0/0.5的单相油浸式感应调压器,利用DIRANA 介电响应分析仪对其进行现场实测。现场测试过程与调压器铭牌信息见图 7,测量得到调压器的去极化电流曲线见图 8。

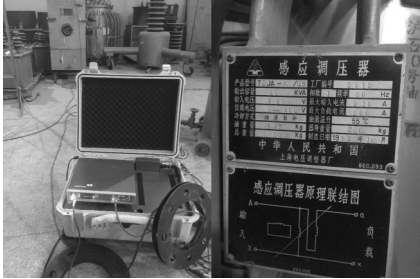


图 7 对调压器现场实测去极化电流

Fig. 7 Field measurement of depolarization current for voltage regulator

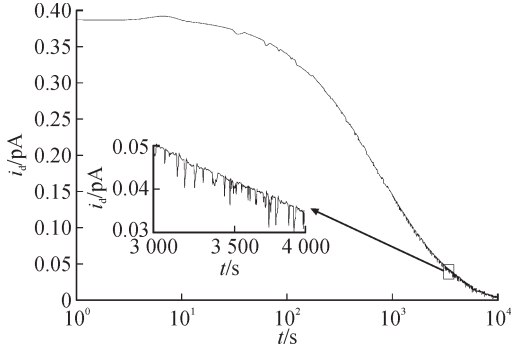


图 8 实测调压器去极化电流曲线

Fig. 8 Measurement of depolarization current data of voltage regulator

可见实测的去极化电流受到外界干扰较大,在噪声的影响下毛刺较多,很难用微分法进行求解;用传统拟合方法时由于末端电流衰减较大,噪声对末端影响更加明显,以及人为选点的主观性,想得到比较好的拟合效果需要多次试探。

在现场测试噪声条件下用 Prony 算法进行拟合时,由于噪声影响直接求数据矩阵秩准确获得支路数有困难。但是利用扩展德拜等效电路有支路数一般在 3~8 条的特点^[23],将支路数分别设置为 3~8 条,分别对该例中现场实测的去极化电流数据进行自适应多采样间隔的 Prony 拟合,拟合参数结果见表 5。

表 5 实测去极化电流的拟合结果

Table 5 Fitting results of measured depolarization current

支路	$[B_1, \tau_1]$	$[B_2, \tau_2]$	$[B_3, \tau_3]$	$[B_4, \tau_4]$	$[B_5, \tau_5]$	$[B_6, \tau_6]$	$[B_7, \tau_7]$	$[B_8, \tau_8]$
3	$[1.863 \times 10^{-10}, 2\ 321.96]$	$[2.01 \times 10^{-10}, 450.53]$	$[-6.49 \times 10^{-13}, 37\ 899.2]$	—	—	—	—	—
4	$[1.818 \times 10^{-10}, 2\ 321.96]$	$[2.06 \times 10^{-10}, 450.53]$	$[-8.97 \times 10^{-12}, 95.95]$	$[8.71 \times 10^{-12}, 4\ 487]$	—	—	—	—
5	$[1.707\ 5 \times 10^{-10}, 2\ 380.10]$	$[2.174\ 2 \times 10^{-10}, 467.227\ 8]$	$[-4.002 \times 10^{-12}, 5\ 275.46]$	$[4.149\ 5 \times 10^{-12}, 192.265\ 9]$	$[1.229 \times 10^{-12}, 7\ 344.72]$	—	—	—
6	$[1.506\ 1 \times 10^{-10}, 2\ 396.123]$	$[2.974 \times 10^{-10}, 473.724\ 4]$	$[1.938\ 6 \times 10^{-11}, 2\ 859.856\ 5]$	$[-2.306\ 6 \times 10^{-11}, 382.195]$	$[3.499\ 6 \times 10^{-12}, 2\ 868.7]$	$[-3.133\ 5 \times 10^{-12}, 163.984\ 2]$	—	—
7	$[1.702\ 3 \times 10^{-10}, 2\ 435.04]$	$[2.143\ 5 \times 10^{-10}, 492.85]$	$[-2.489\ 6 \times 10^{-11}, 3\ 932.227\ 8]$	$[2.942\ 776 \times 10^{-11}, 505.449]$	$[6.445\ 2 \times 10^{-12}, 3.095]$	$[4.253\ 2 \times 10^{-11}, 5\ 598.597]$	$[4.923\ 1 \times 10^{-11}, 209.083]$	—
8	$[1.637\ 69 \times 10^{-10}, 2\ 438.19]$	$[2.224\ 6 \times 10^{-10}, 492.916\ 3]$	$[-1.248\ 6 \times 10^{-11}, 3\ 053.89]$	$[1.418\ 3 \times 10^{-11}, 501.038\ 4]$	$[1.185\ 9 \times 10^{-11}, 3\ 490.04]$	$[1.316\ 1 \times 10^{-10}, 416.275\ 8]$	$[2.145\ 7 \times 10^{-12}, 5\ 382.28]$	$[-1.738\ 1 \times 10^{-12}, 93.079\ 9]$

由表 5 拟合结果可知:

1)拟合结果中有两条子谱线占据较大的比重,剩余的子谱线比两条主要子谱线数量级小 10 倍以上,而且时间常数很大,近乎一条直线;

2)3 条以上支路进行拟合时,拟合结果中出现负数,这与实际不符,但子谱线中正负相互抵消,对拟

合结果影响不大。

因此,该例中将占比重最大的两条子谱线叠加作为拟合曲线,其他子谱线视为干扰,可以得到比较好的拟合效果。为了更直观地展示拟合效果与筛选过程,将 Prony 拟合得到的子谱线和去除干扰后的拟合曲线见图 9。

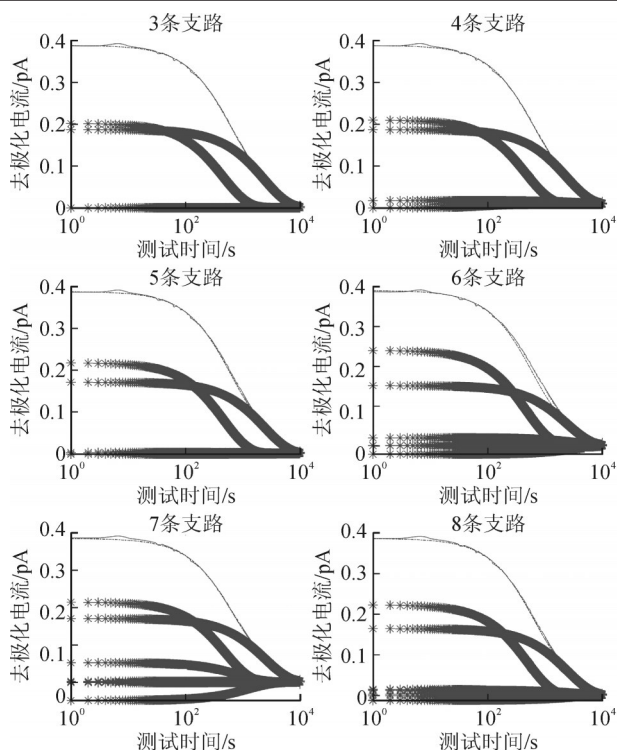


图9 不同支路数模型的拟合效果图

Fig. 9 Fitting effect of 3~8 branches

表6 弗雷歇距离与信噪比

Table 6 Fréchet distance and SNR

支路数	3	4	5	6	7	8
弗雷歇距离	1.954×10^{-10}	1.821×10^{-10}	2.694×10^{-10}	6.760×10^{-10}	1.716×10^{-10}	2.635×10^{-10}
SNR	31.196 5	31.810 3	28.408 2	20.415 6	32.430 1	28.599 6

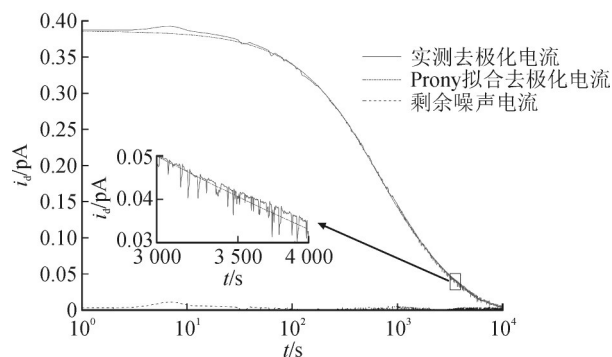


图10 实测去极化电流Prony拟合效果图

Fig. 10 Prony fitting effect map of measured depolarization current

由图10可见,现场实测去极化电流虽然因为噪声干扰较大导致曲线毛刺较多,并不光滑,用Prony算法进行德拜拟合之后可以得到一条光滑平整的拟合曲线,有效滤除了噪声干扰。

此例证实了德拜等效电路对油纸绝缘介质响应过程描述的准确性;同时,验证了Prony算法对含噪声干扰的现场实测数据拟合的有效性,利用滤除干扰后的拟合效果作为标准选取支路数和最优拟

将弗雷歇距离^[24]以及信噪比^[25](SNR)作为两条曲线相似度的判据来量化拟合效果,筛选拟合效果最好的拟合曲线作为最终拟合结果。其中弗雷歇距离是一种基于空间路径的相似度描述方式^[26],求取两条曲线之间弗雷歇距离的数学式为^[27]

$$\delta_F(P, Q) = \inf_{\alpha, \beta} \max_{t \in [0, 1]} \{d(A(\alpha(t)), B(\beta(t)))\} \quad (13)$$

分别对3~8条支路模型的拟合曲线分别求取和实测曲线的弗雷歇距离以及信噪比(SNR)见表6。

弗雷歇距离越短,两条曲线的相似度越高^[23];信噪比越大,拟合曲线的滤波效果越好^[22]。用7条支路进行拟合时,滤除干扰后的拟合曲线和实测曲线之间的弗雷歇距离最短,信噪比也最大,拟合效果最高。

将7条支路滤除干扰后的拟合结果作为最终拟合结果,见图10。

合结果,对噪声干扰较大的现场实测去极化电流的拟合具有参考价值。

4 结论

文中利用德拜等效电路对油纸变压器的介质弛豫过程进行建模,提出自适应采样间隔的Prony算法对去极化电流进行拟合并辨识德拜等效电路参数的方法,最后通过现场实测的去极化电流的拟合,证明了在实测噪声条件下该算法的有效性,为进一步深入探究油纸变压器的绝缘老化状态打下基础。

利用自适应采样间隔的Prony算法拟合实测去极化电流并实现油纸变压器参数的辨识,与传统的通过去极化电流的德拜参数辨识方法相比具有一定的优越性,主要体现在:

- 1)避免了人工取点拟合的主观性,提高了算法在现场实测噪声条件下的可靠性;
- 2)算法通过最小化误差能量(TLS)作为依据进行拟合,保证了拟合的准确性;

3)用实测时域数据进行拟合,避免了时频域转换以及微分等复杂计算,因此避免了因转换而造成的中间误差。

参考文献:

- [1] 孙才新. 电气设备油中气体在线监测与故障诊断技术[M]. 北京:科学出版社,2003:6-11.
SUN Caixin. On line monitoring and fault diagnosis technology of gas in oil of electrical equipment[M]. Beijing: Science Press, 2003:6-11.
- [2] SETAYESHMEHR A, FOFANA I, EICHLER C, et al. Dielectric spectroscopic measurements on transformer oil-paper insulation under controlled laboratory conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2008, 15(4): 1100-1111.
- [3] 魏建林,王世强,吴凤娇,等. 变压器绝缘老化引起预试电气绝缘参数变化的仿真研究[J]. 高电压技术, 2009, 35(7): 1618-1623.
WEI Jianlin, WANG Shiqiang, WU Fengjiao, et al. Simulation on variation of electrical insulation parameters in predictive test caused by insulation aging of power transformer[J]. High Voltage Engineering, 2009, 35(7): 1618-1623.
- [4] 张涛,蔡金錠. 油纸绝缘变压器介质响应电路参数辨识的研究[J]. 电工电能新技术, 2010, 29(4): 35-39.
ZHANG Tao, CAI Jinding. Research on parameters identification for dielectric response equivalent circuit of transformers with oil - paper insulation[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2010, 29(4): 35-39.
- [5] 林智勇,蔡金錠. 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.
- [6] 彭积城,蔡金錠. 变压器油纸绝缘老化状态的探讨[J]. 高压电器, 2015, 51(5): 132-138.
PENG Jicheng, CAI Jinding. Discussion on evaluation of aging condition for transformer oil-paper insulation[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(5): 132-138.
- [7] 刘丽军,蔡金錠,江修波. 油纸绝缘变压器介质响应模型参数辨识研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2015, 29(7): 1003-1010.
LIU Lijun, CAI Jinding, JIANG Xiubo. Research on parameters identification for dielectric response equivalent model of oil - paper insulation transformer[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2015, 29(7): 1003-1010.
- [8] 蔡金錠,严欣,蔡嘉. 去极化电流微分法在求解变压器极化等效电路参数中的应用[J]. 高电压技术, 2016, 42(10): 3172-3177.
CAI Jinding, YAN Xin, CAI Jia. Application of differential depolarization current method for solving equivalent polarization circuit parameters of transformer[J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(10): 3172-3177.
- [9] 蔡锋,江修波,蔡金錠. 应用极化电流辨识油纸绝缘系统等值电路参数[J]. 高压电器, 2016, 52(8): 64-70.
CAI Feng, JIANG Xiubo, CAI Jinding. Extended debye equivalent circuit parameter identification based on polarization current[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(8): 64-70.
- [10] 叶荣,蔡金錠. 油纸绝缘极化等效电路的时域介电谱三次微分解析法[J]. 仪器仪表学报, 2018, 39(6): 112-119.
YE Rong, CAI Jinding. Analytic method of cubic differential in time domain dielectric spectroscopy for oil-paper insulation polarization equivalent circuit[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2018, 39(6): 112-119.
- [11] 刘骥,赵明云,张明泽,等. 变压器油纸绝缘老化介电谱特性及特征量研究[J]. 电机与控制学报, 2018, 22(11): 67-74.
LIU Ji, ZHAO Mingyun, ZHANG Mingze, et al. Dielectric spectroscopy and characteristic parameters of transformer oil - paper insulation aging[J]. Electric Machines and Control, 2018, 22(11): 67-74.
- [12] 林智勇,张达敏,郑运鸿,等. 混联等效电路p参数诊断变压器油纸绝缘老化研究[J]. 电力系统保护与控制, 2020, 48(15): 164-169.
LIN Zhiyong, ZHANG Damin, ZHENG Yunhong, et al. Investigation on the p parameter of hybrid equivalent circuit to diagnose transformer oil-paper insulation aging[J]. Power System Protection and Control, 2020, 48(15): 164-169.
- [13] 林春耀,马志钦,杨贤,等. 油纸绝缘气隙放电能量特性与产气规律的相关性[J]. 广东电力, 2017, 30(7): 83-88.
LIN Chunyao, MA Zhiqin, YANG Xian, et al. Correlation between discharge energy characteristic and gas producing regularity in oil - paper air - gap insulation[J]. Guangdong Electric Power, 2017, 30(7): 83-88.
- [14] 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.
- [15] 孔灿,张大宁,田杰,等. 110 kV 变压器油纸绝缘套管不均匀绝缘受潮劣化分析[J]. 智慧电力, 2020, 48(4): 119-124.
KONG Can, ZHANG Daning, TIAN Jie, et al. Non-uniform moisture degradation analysis of 110 kV transformer oil-paper insulation bushing[J]. Smart Power, 2020, 48(4): 119-124.

- 119-124.
- [16] 杨 雁,杨丽君,徐积全,等. 用于评估油纸绝缘热老化状态的极化/去极化电流特征参量[J]. 高电压技术, 2013,39(2):336-341.
- YANG Yan, YANG Lijun, XU Jiquan, et al. Characteristic parameters for assessing aging condition of oil-paper insulation by polarization/depolarization current[J]. High Voltage Engineering, 2013, 39(2):336-341.
- [17] 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.
- SHANG 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.
- [18] 叶 荣,蔡金锭. 基于弛豫贡献度的变压器油纸绝缘系统老化状态评估[J]. 电工电能新技术, 2018, 37(11):15-22.
- YE Rong, CAI Jinding. Evaluation of aging status of transformer oil-paper insulation system based on relaxation contribution degree[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2018, 37(11): 15-22.
- [19] 刘庆珍,张晓燕,蔡金锭. 基于降维技术与 K-means 聚类的油纸绝缘状态综合灰评估[J]. 电力系统保护与控制, 2019, 47(8):62-70.
- LIU Qingzhen, ZHANG Xiaoyan, CAI Jinding. Comprehensive grey evaluation for oil-paper insulation based on dimension reduction techniques and K-means cluster[J]. Power System Protection and Control, 2019, 47(8):62-70.
- [20] BRAAK D, ZHANG J M, KOLLAR M. Integrability and weak diffraction in a two-particle bose-hubbard model[J]. Journal of Physics a - Mathematical and Theoretical, 2014, 47(46):465303.
- [21] 束洪春. 电力工程信号处理应用[M]. 北京:科学出版社, 2009:185-193.
- SHU Hongchun. Application of signal processing in power system[M]. Beijing: Science Press, 2009:185-193.
- [22] 林智勇,张达敏,仲训杲,等. 基于老化因子的变压器绝缘状态分析[J]. 山东大学学报(工学版), 2019, 49(1): 114-119.
- LIN Zhiyong, ZHANG Damin, ZHONG Xungao, et al. Analysis of insulation state of transformer based on aging factor [J]. Journal of Shandong University(Engineering Science), 2019, 49(1):114-119.
- [23] 邹 阳. 变压器油纸绝缘弛豫响应特性建模及老化诊断研究[D]. 福州:福州大学, 2017:58.
- ZOU Yang. Establish model of dielectric relaxation response of transformer's oil-paper insulation and study on diagnosis of aging[D]. Fuzhou: Fuzhou University, 2017:58.
- [24] HELMUT A, GODAU M. Computing the fréchet distance between two polygonal curves[J]. International Journal of Computational Geometry & Applications, 1995, 5(1n2): 75-91.
- [25] 张晓林. 通信原理[M]. 第2版. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2017:39-45.
- ZHANG Xiaolin. Communication theory[M]. 2nd ed. Harbin: Harbin Engineering University Press, 2017:39-45.
- [26] FRÉCHET M M. Sur quelques points du calcul fonctionnel [J]. Rendiconti Del Circolo Matematico Di Palermo, 1906, 22(1): 1-72.
- [27] 黄世泽,陈 威,张 帆,等. 基于弗雷歇距离的道岔故障诊断方法[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2018, 46(12):80-85.
- HUANG Shize, CHEN Wei, ZHANG Fan, et al. Method of turnout fault diagnosis based on frechet distance[J]. Journal of Tongji University(Natural Science), 2018, 46(12):80-85.

高 浩(1995—),男,硕士研究生,主要研究方向为电力设备故障诊断(E-mail:gaohao_electric@126.com)。

刘庆珍(1971—),女,副教授,研究生导师,主要研究方向为电力设备故障诊断与系统优化。

蔡金锭(1954—2020),男,教授,博士生导师,主要研究方向为电力系统故障诊断。