

铁磁元件J-A磁滞模型参数辨识

对电网特殊运行状态仿真时,常要建立考虑磁滞效应的铁磁元件模型。根据测量得到的磁通-电流特性,通过参数辨识建立铁磁元件J-A磁滞模型。根据铁磁元件的磁通电流关系向磁化强度与磁场强度关系的推导结果,建立了J-A磁滞方程参数辨识模型,并给出了参数优化辨识的方法;在Matlab环境下编制了J-A方程参数辨识的优化目标函数,用遗传算法工具箱(GADS)对J-A模型参数进行辨识。结果表明,建立的参数辨识模型正确、有效。

董张卓/西安石油大学电子工程学院

伍弘尚 腾王清亮/西安科技大学电控学院

0 引言

铁磁元件(诸如电力变压器、电流互感器和电抗器等含铁心设备)是电力系统的重要元件之一。电力系统中,由于铁磁元件的非线性特性引起的浪涌、铁磁谐振是常见状况,对其进行仿真分析需要较为准确的模型^[1-4]。在电力系统异常情况下,铁磁元件的仿真也需要建立非线性模型,其核心是对励磁支路的处理^[5]。较为准确的模型拟考虑励磁支路的磁滞效应。因此,研究非线性电感磁滞现象并建模,对实现电力系统在特殊情况下的仿真、分析具有重要意义。

磁滞回线是反映铁磁元件性能的重要特征曲线,如利用磁滞回线辨识变压器励磁电感^[6]、设计软磁复合材料的变压器^[7]等。对铁磁元件磁滞现象进行研究,需首先测得其磁滞回线,提出回线的数学计算模型,从而进行下一步分析研究。

目前铁磁元件常用的磁滞模型有

Globus、Preisach、Stoner-Wohlfarth以及Jiles-Atherton(J-A)模型。前两种磁滞模型建立在微观基础上,适用于铁磁元件从微观到宏观的建模^[8-9];分段线性化模型适用于宏观应用,实现原理简单,但应用灵活性较差,只适合特定工况^[10];J-A模型以微分方程形式描述铁磁材料的总体特性,参数简单直观,适用于大多数工况^[11-12]。

J-A磁滞模型描述的是磁化强度 M 与磁场强度 H 之间的关系,主要通过5个参数表征铁磁元件特性。目前辨识这5个参数最常用的方法有两类:一类是基于参数的物理意义,通过实验测得磁滞曲线并逐步辨识;另一类方法是着重于参数的数学描述,通过改变模型参数值尝试找出使总体误差最小的最佳参数组合。如文献[13]利用爱泼斯坦方圈测量了一组硅钢片的磁滞回环,同时应用Simulink仿真得到了一个磁滞回线并与实验所得进行对比,采用模拟退火法不断缩小两个回环之间的差别,最终得到一组满足实际情况的最佳参数组合;文献[14]通过改进J-A数学模型,利用神经网络结合遗传算法辨识得到J-A参数;文献[15]将J-A模型参数分为两组,分别通过测量磁滞回线饱和特性和损耗特性的方法,利用遗传算法优化了参数;文献[16]先确定了各参数比较合理的拟合初始值及初始变化百分比,通过实验测得硅钢片数据后对各参数采用逐个优化的方法,最终得到一组最佳逼近J-A模型的参数组合。

以电磁式电压互感器为例,J-A



董张卓/教授

关键词/Keywords

铁磁元件·
电压互感器·
励磁支路·
J-A磁滞模型·
参数辨识·

陕西省科技厅自然科学基金(2015JM5211)。

磁滞模型参数辨识的过程简述如下：通过实验测得电压互感器铁心励磁特性，并选取特殊点值；以特殊点值为输入参数编写优化用目标函数（遗传算法适应度函数）；确定J-A模型参数的初始值，并给出目标函数；使用遗传算法与直接搜索工具箱（GADS）优化目标函数，并得出结果。

1 电磁式电压互感器电路模型

电磁式电压互感器与变压器本质上相同，因此也可采用T形等效电路，如图1所示。其中， R_1 、 L_1 为电压互感器一次绕组漏阻和漏感； R_2 、 L_2 为电压互感器二次绕组漏阻和漏感； R_{NL} 、 L_{NL} 为励磁支路的非线性电阻和非线性电感。

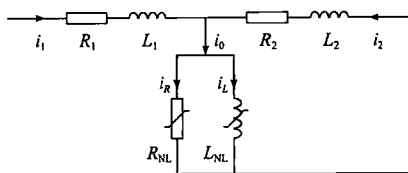


图1 电压互感器T形等效电路模型

图1所示电路模型中，低压侧的阻抗值远小于励磁支路阻抗，计算中可以将其忽略。因此，当高压侧开路时，电压互感器的等效电路可简化成如图2所示。其中， R_{NL} 为励磁电阻，反映的是铁磁元件铁心损耗，主要由涡流损耗和磁滞损耗两部分组成。

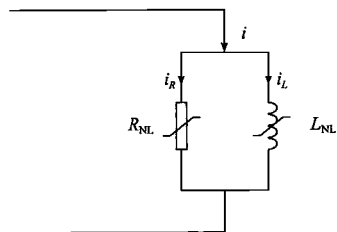


图2 高压侧空载时电压互感器等效电路模型

2 J-A磁滞模型^[17]

J-A磁滞模型所描述的是磁化强度 M 与磁场强度 H 之间的关系。将 M 与 H 的关系转化为磁感应强度 B 与 H 之间的关系，即

$$B = \mu_0 (H + M) \quad (1)$$

而 B 和 H 之间的磁化关系是由 H_e 和 M 之间的无

磁滞磁化曲线来代替的。

$$M_{an} = M_s f(H_e) \quad (2)$$

式中， M_{an} 为非磁滞磁化强度； M_s 为饱和磁化强度； H_e 为有效磁场强度。

$$H_e = H + \alpha M \quad (3)$$

式中， α 为平均场参数，反映磁畴间的耦合，由实验测得。

J-A模型利用改进的Langevin函数较好地模拟大部分类型的无磁滞曲线，函数形式为

$$M_{an} = M_s [\cot(H_e / a) - a / H_e] \quad (4)$$

式中， a 为表征无磁滞磁化曲线形状的参数。

J-A模型将铁磁材料的磁化过程分为不可逆磁化过程与可逆磁化过程，其中不可逆磁化过程是导致磁滞并形成磁滞回线的原因。

设不可逆磁化强度为 M_{irr} ，它是由物质结构的不连续性而形成的磁畴牵制引起的；可逆磁化强度为 M_{rev} ，它是由磁畴以弹性方式弯曲引起的。磁化过程消耗的能量（不可逆分量引起的损耗）为

$$E_{pin} = \mu_0 k \int_0^{M_{irr}} dM_{irr} \quad (5)$$

根据能量守恒和式（3）可得

$$M_{irr} = M_{an} - k\delta(dM_{irr}/dH_e) \quad (6)$$

$$M_{rev} = c(M_{an} - M_{irr}) \quad (7)$$

式中， δ 为方向参数（+1/-1）； k 为磁滞损耗参数； c 为可逆系数。

由式（7）可得

$$\frac{dM}{dH} = (1-c) \frac{dM_{irr}}{dH} + c \frac{dM_{an}}{dH} \quad (8)$$

最终变换得J-A模型的微分方程为

$$\frac{dM}{dH} = \frac{(1-c)(M_{an} - M_{irr}) + k\delta c \left(\frac{dM_{an}}{dH_e} \right)}{k\delta - (1-c)\alpha(M_{an} - M_{irr}) - k\delta c \alpha \left(\frac{dM_{an}}{dH_e} \right)} \quad (9)$$

饱和磁化强度 M_s 、平均场参数 α 、形状参数 a 、磁滞损耗参数 k 和可逆系数 c 这5个参数共同确定了J-A磁滞模型。因此，只要确定了实际铁磁元件励磁特性的这5个参数值，便能得到标准J-A磁滞模型。

3 J-A磁滞模型参数辨识方法

3.1 电压互感器励磁特性及特殊点选取

对电磁式电压互感器,按图2的电路模型分析其励磁特性。在其二次侧施加工频电压,并进行电压、电流录波,选取录波波形中,外加电压为一定值的波形,即得到磁滞回线如图3所示。

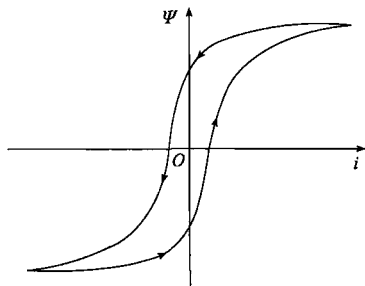


图3 电压互感器铁心励磁特性曲线

选取回线的特殊点值:

- 1) 励磁电流、磁链最大值,即 i_m 、 Ψ_m 。
- 2) 当电流为0时磁链的值(剩磁),即 Ψ_r 。
- 3) 当磁链为0时电流的值(矫顽力),即 i_c 。

设电压互感器一次绕组匝数为 N ,铁心截面积为 S ,有效磁路长度为 L_e ,则有

$$\begin{cases} H = \frac{Ni}{L_e} \\ B = \frac{\Psi}{NS} \end{cases} \quad (10)$$

令 $g=1/(\mu NS)$, $h=N/L_e$,代入式(1)中可得

$$M = g\Psi - hi \quad (11)$$

那么互感器磁路饱和点、最大值点、剩磁点和矫顽力点的磁化强度、磁链以及磁化电流之间的关系为

$$\begin{cases} M_s = g\Psi_s - hi_s \\ M_m = g\Psi_m - hi_m \\ M_r = g\Psi_r \\ M_c = hi_c \end{cases} \quad (12)$$

式中, g 、 h 的值取决于电压互感器本身材料品质,不因外界条件而改变,是定值。

而J-A磁滞模型所描述的是磁化强度 M 与磁场强度 H 之间的关系,为了更好地体现 $\Psi-i$ 向 $M-H$ 的转化过程,应采用标么值描述。

设电压互感器额定电压、电流分别为 U_N 、 I_N ,则磁链额定值 $\Psi_N = U_N/\omega$;其一次侧等效匝数为 N_s ,有效磁路长度为 L_{eN} ,铁心截面积为 S_N 。

将上述额定数据作为基准值,则各个参数的标么值如下(用 X' 表示,下同):

- 1) $\Psi = \frac{\sqrt{2}U}{\omega} \cos \omega t$, 则 $\Psi' = \frac{\Psi}{\Psi_N} = \frac{u'}{\omega}$ 。
- 2) $i = \sqrt{2}I \sin \omega t$, 则 $i' = i/I_N$ 。
- 3) $N = 150$ 匝(假设值), 则 $N' = N/N_s$ 。
- 4) $L_e = 60$ cm(假设值), 则 $L'_e = L_e/L_{eN}$ 。
- 5) $S = 60 \times 10^{-2} \text{ m}^2$ (假设值), 则 $S' = S/S_N$ 。

取匝数 N_s 、有效磁路长路 L_{eN} 以及铁心截面积 S_N 的值为实际值(假设值), 则 $N' = N/N_s = 1$, $L'_e = L_e/L_{eN} = 1$, $S' = S/S_N = 1$ 。那么有

$$\begin{cases} B' = \frac{\Psi'}{N'S'} = \frac{\Psi'}{1} = \Psi' \\ H' = \frac{N'i'}{L'_e} = \frac{i'}{1} = i' \\ M' = \frac{B'}{\mu_0} - H' = \frac{\Psi'}{\mu_0} - i' \end{cases} \quad (13)$$

即磁化强度的标么值可直接用磁链、电流的标么值表示出来,其中并不涉及 g 、 h 等固有参数。

那么,通过图3选取的4个特殊点值便等效转化为:

- 1) 磁场强度、磁化强度最大值 $H_{\max}$ 、 $M_{\max}$ 。
- 2) 当磁场强度 H 为0时磁化强度的值(剩磁) M_r 。
- 3) 当磁化强度 M 为0时磁场强度的值(矫顽力) H_c 。

3.2 优化目标函数

J-A磁滞模型可简化表示为

$$M = f_{JA}(H, M_s, \alpha, a, k, c) \quad (14)$$

若 M_s 、 α 、 a 、 k 和 c 已知,则磁化强度 M 是关于磁场强度 H 的单值函数。

将J-A磁滞模型用标么值表示为

$$M' = f_{JA}(H', M_s, \alpha, a, k, c) \quad (15)$$

实际测量得到流过非线性电感励磁电流为 i ,其标么值为 i' ,接着可得磁场强度标么值 H' ,代入

式(15)中可计算得到磁化强度标么值 M' ，进而回推可得磁链标么值 Ψ' ，即磁链计算值 Ψ'_{cal} 。该过程可得到式(15)的变形为

$$\Psi'_{cal} = f_{JA}(i', M_s, \alpha, a, k, c) \tag{16}$$

实际测量得到并与 i' 成对应关系的磁链可记为磁链实验值 Ψ'_{exp} 。由此可建立理想的优化目标函数为

$$\Psi'_{mse} = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (\Psi'_{cal} - \Psi'_{exp})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \tag{17}$$

式中， Ψ'_{mse} 为控制参数变化的反馈量，使计算数据与实验数据之间的均方根误差不断减小，直至达到目标允许的最大误差值。

实际操作中，为了提高效率，并不取用所有测量得到的 $\Psi-i$ 数值，而是选取有明显特征的数值，即前文所述的 H_{max} 、 M_{max} 、 M_r 和 H_c 这4个实际值。而与之对应的4个计算值 $\tilde{H}_{max}$ 、 $\tilde{M}_{max}$ 、 $\tilde{M}_r$ 和 $\tilde{H}_c$ 由下式得到

$$[\tilde{H}_{max}, \tilde{M}_{max}, \tilde{M}_r, \tilde{H}_c] = f_{JA}(M_{s0}, \alpha_0, a_0, k_0, c_0) \tag{18}$$

式中， M_{s0} 、 α_0 、 a_0 、 k_0 和 c_0 为给入的参数初值。而这5个参数初值也同样由实际的 $\Psi-i$ 曲线(磁滞回线)决定。

由式(17)、式(18)可得优化用目标函数为

$$f_{obj} = \left\{ \frac{1}{4} [(H_{max} - \tilde{H}_{max})^2 + (M_{max} - \tilde{M}_{max})^2 + (M_r - \tilde{M}_r)^2 + (H_c - \tilde{H}_c)^2] \right\}^{\frac{1}{2}} \tag{19}$$

3.3 参数初始值选取

由前文可知，要得到优化目标函数必须根据实际的 $\Psi-i$ 曲线得到表征J-A磁滞模型的5个参数的初始值。根据5个参数对磁滞效应的影响，分析可得：

磁滞损耗参数 k 和可逆系数 c 共同表征磁滞回线面积。若用 S_{ja} 表示磁滞回线面积，则有

$$S_{ja} = f_1(k, c) \tag{20}$$

平均场参数 α 和形状参数 a 共同表征磁感应强度 $B(M)$ 的幅值(相同 H 下)，即

$$M = f_2(a, \alpha) \tag{21}$$

式中， f_1 、 f_2 为某函数关系，表达式未知，可借助实际的磁滞回线图形由经验得出近似表达。此

外，形状参数 a 与饱和点至剩磁点的斜率相关；可逆系数 c 与矫顽力相关；平均场参数 α 与磁滞曲线平滑度相关。

选取初值做法为：首先根据J-A模型的表达式编写Matlab程序，使之能根据输入的5个参数值得到对应的磁滞回线图；其次，输入多组参数组合(可让其中某几项保持不变)找出式(20)、式(21)的近似表达；最后根据试验所得非线性电感磁滞回线，结合J-A模型参数本身特性得到一组初值。

4 辨识求解

遗传算法与直接搜索工具箱(GADS)可求解各种非线性、带约束和极值等问题^[18]。采用GADS对J-A磁滞模型的参数进行优化辨识，其结果准确度高且操作过程简便。

选取实际非线性电感关于J-A磁滞模型5个参数的初始值及特殊点值，在Matlab环境下编写目标函数；调用GADS并将目标函数作为遗传算法的适应度函数添加，设置算法参数，运行后得出结果；逐步缩减参数范围，多次运行寻优。

为了验证目标函数及辨识方案的可行性，给入一组已知J-A模型5个参数值的磁滞回环，利用GADS得到优化辨识结果，并与已知参数对比，结果如表1所示。

表1 优化结果与已知参数值对比

参数	准确值	初始值	优化值
$M_s/(A/m)$	1.70E+6	1.65E+6	1.71E+6
α	0.001	0.000 8	0.001
$a/(A/m)$	550	500	565.349
k	1 500	1 300	1 526.719
c	0.8	0.6	0.795

由表1可知，用GADS辨识出的参数结果准确度高，可用于实际非线性电感J-A磁滞模型参数辨识。

5 实例测试与分析

为了验证J-A磁滞模型参数辨识过程的可行性及正确性，选取同批次、同型号为JDZX10-

10B的10 kV电磁式电压互感器3台进行实测。JDZX10-10B电压互感器的基本参数为：额定电压比 $10/0.1/\sqrt{3}/0.1/3$ ，测量绕组额定输出 $30\text{ V}\cdot\text{A}$ ，极限输出 $200\text{ V}\cdot\text{A}$ 。3台特性基本一致，下面仅以其中一台测试数据进行分析验证。

5.1 测试方法与测试记录

测试电路如图4所示。测试电源为接市电220 V的交流工频电压源，提供可调电压 $0\sim 300\text{ V}$ ，将其加在电压互感器低压侧测量绕组上；采用日置（HIOKI）PW3335-04功率计测量电压互感器二次侧的电压、电流和功率并记录；采用ELSPEC G4500电能质量分析仪对互感器二次电压、电流进行录波并分析。

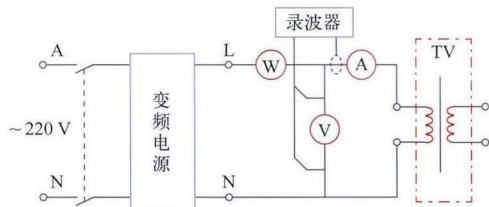


图4 电磁式电压互感器空载测试

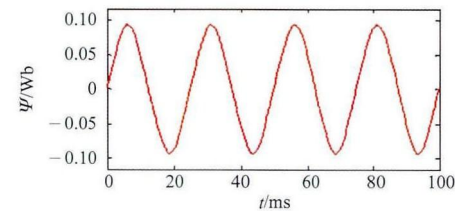
对电压互感器进行初始退磁操作，使其电压为0时，电流也为0；缓慢升高电压，依次记录其电压、电流及功率损耗。经过计算可得电压互感器铁心非线性电感上流过的电流以及对应的磁链大小。部分记录结果如表2所示。

表2 电压互感器空载时低压侧测量数据

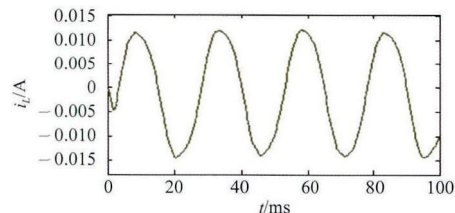
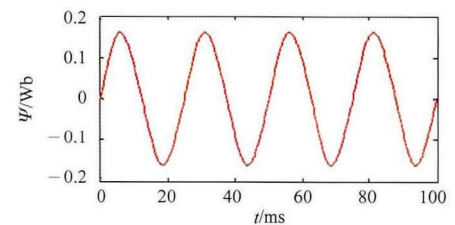
序号	电压（有效值）/V	电流（有效值）/A	功率（有效值）/W
1	0	0	0
2	10.572	0.010 6	0.093 1
3	20.050	0.017 4	0.314 6
4	30.275	0.024 2	0.691 7
5	40.340	0.031 1	1.198 4
6	51.008	0.038 5	1.882 2
7	60.357	0.045 4	2.610 1
8	70.529	0.054 0	3.562 6
9	80.476	0.067 2	4.683 1
10	91.690	0.110 9	6.256 0
11	101.170	0.226 1	8.071 0

用G4500录下的电压波形呈标准正弦波，而电流波形根据电压互感器铁心饱和程度不同而呈现

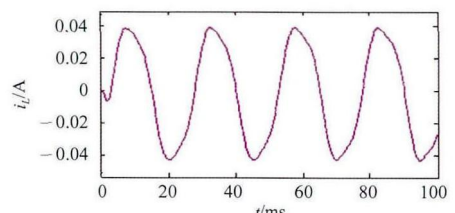
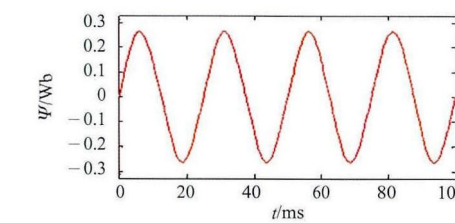
出不同形状。滤除高次谐波及分布电容和线圈电感引起的局部铁磁谐振影响，可得到电流、电压波形，进而得到电压互感器的励磁电流、磁链波形，如图5所示。



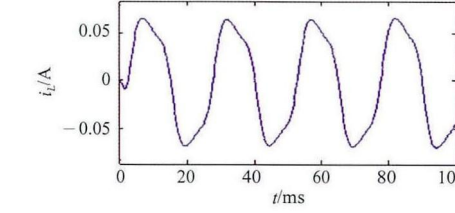
(a) 二次电压幅值为30 V

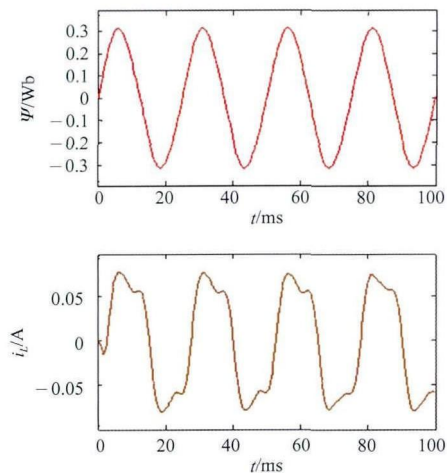


(b) 二次电压幅值为50 V



(c) 二次电压幅值为80 V





(d) 二次电压幅值为100 V

图5 不同电压幅值下的励磁电流、磁链波形

根据测量数据可得目标电压互感器的一组磁滞回线 (TV二次电压幅值为30 V、50 V)，如图6所示。

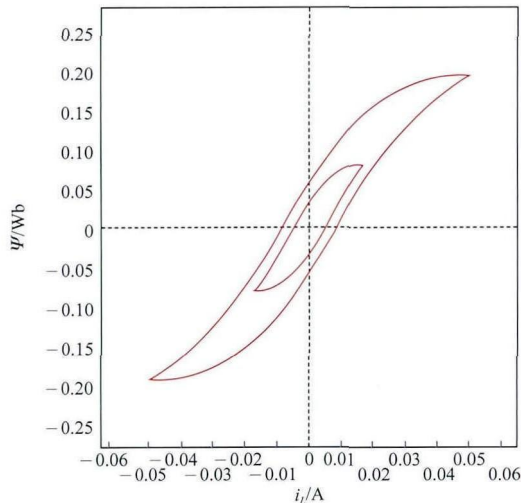


图6 不同电压幅值下的铁心磁滞回线

5.2 辨识结果与分析

为了得到更加准确的辨识结果，将辨识过程分为两步进行：第一步，以图6所示磁滞回线组中面积较大的一条作为辨识用目标曲线，得到与之对应的J-A磁滞模型参数；第二步，根据第一步得到的J-A模型参数绘制新的磁滞回线组，并与图6中所示面积较小的回线进行比对。经过比对，若回线误差在可控范围内，则认为辨识结果准确度高。

按照前文所提出的方法编写目标函数，用GADS对其进行优化，得到第一步的辨识结果如表3所示（表中仅列出了3组结果）。

表3 电压互感器J-A磁滞模型辨识结果

参数	辨识值 (1)	辨识值 (2)	辨识值 (3)
$M_s/(A/m)$	1.71E+6	1.74E+6	1.71E+6
α	0.001	0.001	0.001
$a(A/m)$	1 385	1 300	1 450
k	1 022	825	950
c	0.5	0.389	0.33

将最终辨识得到的磁滞回环与测量得到的磁滞回环（见图6）进行比较，其结果如图7所示。

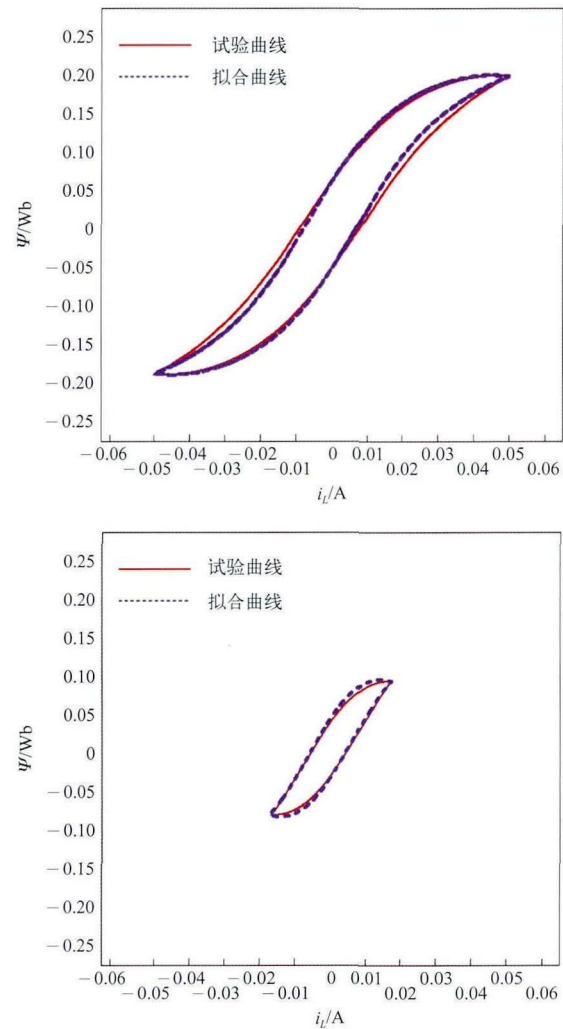


图7 电压互感器测量与辨识结果对比

由图7可知，利用遗传算法辨识实际非线性电感J-A磁滞模型切实可行，且结果准确度高。

6 结束语

1) 利用GADS辨识磁滞模型参数,减少了编程环节,提高了参数辨识的效率及可操作性。

2) 利用GADS辨识未知参数的关键在于建立优化目标函数,即遗传算法的适应度函数。目标函数建立的合理性决定了辨识结果的准确度。

3) 利用遗传算法辨识非线性电感 $J-A$ 磁滞模型,可快速建立实际变压器、电磁式互感器等含铁心设备的励磁模型,为研究分析铁磁元件谐振、互感器特性等方面奠定了基础。

参考文献

- [1] 邵文权, 乔妮, 王建波. 基于波形互相关系数的变压器励磁涌流识别方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (1): 28-33.
- [2] 傅伟, 赵莉华, 梁勇, 等. 多台变压器空载合闸励磁涌流及其抑制方案的研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (1): 28-33.
- [3] 戚宜威, 尹项根, 李甘, 等. 一种电流互感器仿真分析平台构建方法 [J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43 (22): 69-76.
- [4] 董张卓, 李养俊, 徐建军, 等. 用于铁磁谐振过电压计算的电压互感器模型 [J]. 电力学报, 2012, 27 (5): 463-468.
- [5] 方芳, 王铁军, 王向军. 变压器等效电路中励磁支路问题探讨 [J]. 电气电子教学学报, 2012, 34 (1): 117-119.
- [6] 何源, 李新, 罗建. 利用磁滞回线辨识变压器励磁电感研究 [J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41 (14): 19-24.
- [7] Clénet S, Cros J, Haouara I, et al. A direct identification method of the hysteresis model for the design of SMC transformers [J]. IEEE Transaction on Magnetics, 2000, 36 (5): 3466-3469.
- [8] 郭子政. 磁滞模型研究进展 [J]. 信息记录材料, 2012, 13 (5): 48-52.
- [9] 赵国生. 磁滞数学模型及考虑磁滞时磁场数值计算 [M]. 郑州: 黄河水利出版社, 2004.
- [10] 任静. JA/SW三维混合磁滞模型理论及仿真研究 [D]. 天津: 河北工业大学, 2010.
- [11] Jiles D C, Atherton D L. Theory of ferromagnetic hysteresis [J]. Journal of Applied Physics, 1984, 55 (6): 2115-2120.
- [12] 王洋, 王昕. 基于J-A模型磁滞回线仿真及有效性研究 [J]. 农业科技与装备, 2011 (10): 50-53.
- [13] 王付胜, 文鹏, 张兴. 三电平环宽自适应准定频滞环模型预测控制研究 [J]. 电气工程学报, 2016, 11 (4): 9-14.
- [14] 李慧奇, 杨延菊, 邓聘. 基于神经网络结合遗传算法的Jiles-Atherton磁滞模型参数计算 [J]. 电网与清洁能源, 2012, 28 (4): 19-22.
- [15] 袁中琛, 刘连光. 变压器铁心磁滞回线模型参数辨识 [J]. 电网与清洁能源, 2010, 26 (9): 17-19.
- [16] 李晓萍, 彭青顺, 李金保, 等. 变压器铁心磁滞模型参数辨识 [J]. 电网技术, 2012, 36 (2): 200-205.
- [17] 文雯, 张怀武, 钟智勇. 一种改进磁滞数学模型参数的计算方法 [J]. 磁性材料及器件, 2007, 38 (1): 30-33.
- [18] 郭海双, 梁佳雯, 张劲昀. MATLAB遗传算法工具箱GADS优化及应用 [J]. 电子设计工程, 2015, 23 (10): 27-29.

(收稿日期: 2016-03-30) **EA**

欢迎订阅 欢迎投稿 欢迎刊登广告