



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 106093699 A

(43)申请公布日 2016.11.09

(21)申请号 201610369477.6

(22)申请日 2016.05.30

(71)申请人 上海交通大学

地址 200240 上海市闵行区东川路800号

(72)发明人 刘亚东 胡琛临 梁函卿 盛戈皞  
江秀臣

(74)专利代理机构 上海新天专利代理有限公司  
31213

代理人 张宁展

(51)Int.Cl.

G01R 31/08(2006.01)

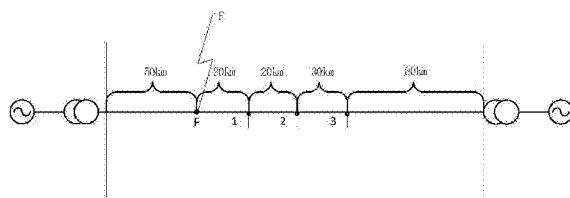
权利要求书2页 说明书5页 附图2页

(54)发明名称

输电线路故障电流行波波形的重现方法

(57)摘要

本发明公开了一种输电线路故障电流行波波形的重现方法，在输电线上安装故障行波检测装置，根据其种两点检测到的故障点电流行波，先通过最小二乘法设立基于频依模型的目标函数，通过智能搜索算法粒子群算法反演出该段输电线路的分布参数。通过对同一条线路另外段的检测点波形进行反演并与真实检测波形进行对比验证该分布参数的正确性，最终可以通过此反演方法精确反演出故障线路上任意未知点的故障电流行波波形。本发明绝对误差不超过 $3\mu s$ ，相对误差不超过6%。



1.一种输电线路故障电流行波波形的重现方法,其特征在于,该方法包括以下步骤:

步骤S1:在输电线路上依次设定多个故障检测点,用于故障电流行波波形的采集;

步骤S2:对输电线路上距离故障实际发生处同侧除最近一个检测点的另两个故障检测点的波形进行卡伦布尔变换三相解耦;

步骤S3:对经三相解耦后的行波各模量进行小波包变换后进行快速傅里叶变换,分频率段代入线路频依函数模型;

步骤S4:对各个频率段通过靠近故障点的检测波形的波形能量占比作为系数进行加权组合生成最终的目标寻优函数;

步骤S5:通过粒子群算法对目标寻优函数进行全局求解,得到该段输电线路的分布参数;

步骤S6:将得到的分布参数代入线路频依函数模型,根据已知点波形结合线路频依参数模型反演出未知点波形。

2.根据权利要求1所述的输电线路故障电流行波波形的重现方法,其特征在于,所述的步骤S3中分频率段代入线路频依函数模型的具体步骤:

步骤S3.1:对于N层小波包变换后将两个检测点各分成的 $2^N$ 个频段中的每一个频段波形,进行快速傅里叶变换生成各自 $2^N$ 段频域数据;

步骤S3.2:将靠近故障点的那处检测点的各模量的频域数据乘以线路依频函数H,并与另一检测点对应模量的对应频段的数据做差得 $\Delta d(i)$ ,i表示第i个频段;

其中 $H = e^{-\lambda x}$ ,x是两个检测点之间的距离, $\lambda = \sqrt{(R + j 2\pi f L)(G + j 2\pi f C)}$ ,对于每个频段,f为该频段的中心频率,R是电阻,L是电感,G是电导,C是电容。

3.根据权利要求1所述的输电线路故障电流行波波形的重现方法,其特征在于,所述的步骤S4中加权组合的具体步骤:

步骤S4.1:对于N层小波包变换,对靠近故障点出的检测点的解耦波形进行卡伦布尔变换解耦;

步骤S4.2:对解耦后的各模量波形进行N层小波包变换分成 $2^N$ 个频段。

步骤S4.3:各个频段的分量所拥有的波形能量占总波形能量的百分比就是加权组合的权重 $a(i)$ ,i表示第i个频段;

步骤S4.4:最终加权后的目标函数如下: $Q = \sum_{i=1}^{2^N} a(i) \cdot \Delta d(i) \cdot \Delta d(i)^*$ ,\*表示共轭转置。

4.根据权利要求1所述的输电线路故障电流行波波形的方法,其特征在于,所述的步骤S6中反演未知点波形的具体步骤:

S6.1:在S5中得到线路分布参数之后,确定线路频依函数模型H,其中 $H = e^{-\lambda x}$ ,x是行波传输的距离,将用于反演的已知点波形进行卡伦布尔变换解耦成为各模量波形;

S6.2:对三相解耦后的行波线模波形进行快速傅里叶变换,根据未知点与已知点的位置关系与线路频依函数模型做运算:

若未知点在已知点的下游,则已知点各模量波形乘以线路频依函数模型H;

若未知点在已知点与线路故障点中间,则已知点各模量波形除以线路频依函数模型H;

S6.3:根据运算后未知点的线模波形,结合故障类型边界条件,推得未知点的零模波形;

S6.4:根据未知点的各模量波形进行卡伦布尔反变换得到未知点的三相故障电流行波波形。

## 输电线路故障电流行波波形的重现方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及输电线路故障设备检测技术领域,具体是一种输电线路故障电流行波波形的重现方法。

### 背景技术

[0002] 输电线路是电力系统中最易发生故障的设备,对于输电线路的故障测距和故障定位,学者进行了诸多研究。对于输电线路的故障而言,只可被动增加其防御能力以减少输电线路发生故障的概率。而在实际线路局部改造工程应用时,由于缺乏故障数据作为支撑,使得改造工作无法做到有的放矢,从而浪费大量的人力物力投资。若能重演故障的发展过程,实现输电线路故障整个过程的状态情景可视,对输电线路故障分析、诊断、后期的线路防御方案的制定及故障事故演习等方面都有重大的现实意义。

[0003] 对于单相线路,若设该段输电线路均匀、统一,其单位长度的电阻、电感、电容和电导分别为R、L、G、C,输电线上取一段长度为dx的线路,该线路在频率域上的传播方程为:

$$[0004] \begin{cases} -\frac{dU}{dx} = (R + j\omega L)I \\ -\frac{dI}{dx} = (G + j\omega C)U \end{cases} \quad (1)$$

[0005] 式(1)的解最终可以写成如下形式:

$$[0006] \begin{cases} U_x = A_1 e^{-\lambda x} + A_2 e^{\lambda x} \\ I_x = A_1 e^{-\lambda x} / Z_c - A_2 e^{\lambda x} / Z_c \end{cases} \quad (2)$$

[0007] 其中,  $\lambda = \beta + j\alpha = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$  为线路传播系数,x为传播距离,Z<sub>c</sub>为波阻抗。A<sub>1</sub>、A<sub>2</sub>为由边界条件确定的积分常数。

[0008] 对于单个故障行波,若不需考虑沿x反方向传播的反行波,式(2)可以写为:

$$[0009] \begin{cases} U_x^* = A_1^* e^{-\lambda^* x} \\ I_x^* = A_1^* e^{-\lambda^* x} / Z_c^* \end{cases} \quad (3)$$

[0010] 由式(3)可得,对于线路上相距为x的两点1和2,他们之间的电流波和电压波有如下关系

$$[0011] \begin{cases} U_{x_2} = U_{x_1} e^{-\lambda(x_2-x_1)} = U_{x_1} e^{-\lambda x} \\ I_{x_2} = I_{x_1} e^{-\lambda(x_2-x_1)} = I_{x_1} e^{-\lambda x} \end{cases} \quad (4)$$

[0012] 由式(4)可以看出,波在单相均匀输电线路的传播与其频率密切相关,且随着传播距离x的增加,电压、电流逐渐衰减。记H=e<sup>-λx</sup>为输电线路频率域沿线传播的传递函数,则该传播模型称为输电线路频依函数模型。

[0013] 而对于三相输电线路来说,三相间存在耦合关系,需通过相模变换变成三个独立的分量,以便于分析。

[0014] 对于线路上相距为d的两点1和2,由(4)式经过相模变换后最终得到如下电流行波

## 波形关系

$$\begin{aligned} [0015] \quad & \left\{ \begin{array}{l} I_2^{(i)} = I_1^{(i)} H^{(i)} = I_1^{(i)} e^{-\lambda^{(i)} d} \\ \lambda^{(i)} = \sqrt{(R^{(i)} + j\omega L^{(i)})(G^{(i)} + j\omega C^{(i)})} \end{array} \right. \quad (5) \end{aligned}$$

[0016] 其中,上标*i*(*i*=0,1,2)表示*i*模分量。

[0017] 若想知道输电线路的传输规律,λ中的四个分布参数必须已知,而从式(5)可以看到,在传递函数中λ有四个变量且相互耦合影响,传统的数学方法对于这类方程的求解已经变得力不从心,且很难得到全局最优解。故需要借用全局优化智能算法——粒子群算法。

[0018] 粒子群算法(Particle Swarm Optimization,PSO)是由Kennedy和Eberhart在1995年提出的一种基于群体智能的优化算法,该算法演变于鸟群寻找其活动范围内的食物这一行为。

[0019] 在粒子群算法中,每只鸟都抽象为一个没有体积没有质量的粒子,每个粒子都代表着问题的一个潜在解。粒子所在的位置的好坏通过一个预先拟定的适应度函数来进行比较和取舍。每个粒子都将在给定解空间中进行运动,并且由一个速度变量来决定其方向。在每一代中,粒子将会追踪两个优化极值,一个是粒子本身至今止所找到的最优解pbest,另外一个是整个群体至今为止所找到的最优解gbest。粒子每更新一次位置,就计算一次适应度值,然后根据所有粒子的pbest和gbest来确定新的个体极值和群体极值,并且更新各自pbest所对应的位置和群体gbest对应的位置。

[0020] 在故障重演方面,国内外学者更多的关注系统层面的故障重现,如华北电力大学张东英依靠电网一次模型、电网实时运行、故障录波信息、保护动作信息及故障过程中开关动作等信息先构建故障区域确定可疑设备,然后根据可疑设备主动搜集与可疑设备相关的信息,综合利用故障录波结果作为中间结论,最后利用证据理论、正反混合推理等方法最终确定故障设备和对故障过程进行初步判断。但是对于输电线路故障行波波形信息的更多利用和数据挖掘并未有充分挖掘。

## 发明内容

[0021] 为了解决故障点信息重演这块技术的缺失,本发明旨在提供一种输电线路故障电流行波波形的重现方法,以故障沿线检测点检测到的行波数据为依据,通过智能算法粒子群算法反演出输电线路上的分布参数,再结合输电线路频依模型反演出线路故障点的行波波形。

[0022] 本发明的技术解决方案如下:

[0023] 一种输电线路故障电流行波波形的重现方法,该方法包括以下步骤:

[0024] 步骤S1:在输电线上依次设定多个故障检测点,用于故障电流行波波形的采集;

[0025] 步骤S2:对输电线上距离故障实际发生处同侧除最近一个检测点的另两个故障检测点的波形进行卡伦布尔变换三相解耦;

[0026] 步骤S3:对经三相解耦后的行波各模量进行小波包变换后进行快速傅里叶变换,分频率段代入线路频依函数模型,具体步骤:

[0027] 步骤S3.1:对于N层小波包变换后将两个检测点各分成的2<sup>N</sup>个频段中的每一个频段波形,进行快速傅里叶变换生成各自2<sup>N</sup>段频域数据。

[0028] 步骤S3.2:将靠近故障点的那处检测点的各模量的频域数据乘以线路依频函数H，并与另一检测点对应模量的对应频段的数据做差得 $\Delta d(i)$ ,i表示第i个频段;

[0029] 其中 $H=e^{-\lambda x}$ ,x是两个检测点之间的距离, $\lambda=\sqrt{(R+j\cdot 2\pi f L)(G+j\cdot 2\pi f C)}$ ,对于每个频段,f为该频段的中心频率,R是电阻,L是电感,G是电导,C是电容。

[0030] 步骤S4:对各个频率段通过靠近故障点的检测波形的波形能量占比作为系数进行加权组合生成最终的目标寻优函数;

[0031] 步骤S4.1:对于N层小波包变换,对靠近故障点出的检测点的解耦波形进行卡伦布尔变换解耦。

[0032] 步骤S4.2:对解耦后的各模量波形进行N层小波包变换分成 $2^N$ 个频段。

[0033] 步骤S4.3:各个频段的分量所拥有的波形能量占总波形能量的百分比就是加权组合的权重 $a(i)$ ,i表示第i个频段;

[0034] 步骤S4.4:最终加权后的目标函数如下: $Q=\sum_{i=1}^{2^N} a(i) \cdot \Delta d(i) \cdot \Delta d(i)^*$ ,\*表示共轭转置。

[0035] 步骤S5:通过粒子群算法对目标寻优函数进行全局求解,得到该段输电线路的分布参数;

[0036] 步骤S6:将得到的分布参数代入线路频依函数模型,根据已知点波形结合线路频依参数模型反演出未知点波形,具体步骤:

[0037] S6.1:在S5中得到线路分布参数之后,确定线路频依函数模型H,其中 $H=e^{-\lambda x}$ ,x是行波传输的距离,将用于反演的已知点波形进行卡伦布尔变换解耦成为各模量波形;

[0038] S6.2:对三相解耦后的行波线模波形进行快速傅里叶变换,根据未知点与已知点的位置关系与线路频依函数模型做运算:

[0039] 若未知点在已知点的下游,则已知点各模量波形乘以线路频依函数模型H;

[0040] 若未知点在已知点与线路故障点中间,则已知点各模量波形除以线路频依函数模型H;

[0041] S6.3:根据运算后未知点的线模波形,结合故障类型边界条件,推得未知点的零模波形;

[0042] S6.4:根据未知点的各模量波形进行卡伦布尔反变换得到未知点的三相故障电流行波波形。

[0043] 分布参数反演原理是基于使得行波传递模型理论推得的行波和观测测量得到的实际波形的残差达到最小来进行目标函数寻优,本发明所用为最小二乘目标函数:

[0044]  $Q = \Delta d \cdot \Delta d^*$  (6)

[0045] 式中 $\Delta d=d_{cal}-d_{obs}$ , $d_{cal}$ 是当前传递模型对应的正演数据, $d_{obs}$ 是实际测量到的数据,\*表示共轭转置。

[0046] 而本发明分析的电流行波波形是个高频暂态信号,在对于其细节提取过程中我们用到了小波包变换对信号进行分频段处理,从而最后目标函数是由各个频率段的分量所组合形成的,形式如下:

$$[0047] Q = \sum_{i=1}^n a(i) \cdot \Delta d \cdot \Delta d^* \quad (7)$$

[0048] 式子中 $a(i)$ 表示第n-1层小波包变换后第i段的权重系数,由波形各个频段的能量

占总能量的百分比确定；d为经过卡伦布尔三相解耦并快速傅里叶变换之后的波形数据。

[0049] 通过对(7)式中的目标函数用智能算法粒子群算法进行全局寻优，得到线路上两个检测点间线路的各模量分布参数。

[0050] 求出线路上各模量的分布参数之后，传递函数H就已经确定，从而可以根据已知检测点的波形结合频依模型H计算出线路上其他点的波形并与该点的真实检测波形相对比，来验证反演参数的正确性和波形反演方法的可行性。

[0051] 本发明利用行波在输电线路中的频依传播特性构建故障电流波形的反演模型，通过对线路分布参数的求取和故障电流行波波形的反演，技术效果如下：

[0052] 1)通过构建故障电流行波波形的反演模型，结合小波包变换和快速傅里叶变换设立最小二乘目标函数，并通过智能搜索算法粒子群算法全局寻优，能有效并准确地根据两个检测点波形求出输电线路上的分布参数。

[0053] 2)先求线路分布参数，再结合行波传递模型能根据已知点的波形精确反演出未知点的波形。

[0054] 3)能精确得到线路上各点的行波，为后期全面利用行波故障信息，进行故障分析做技术支撑。

## 附图说明

[0055] 图1是输电线路pscad模型示意图

[0056] 图2是检测点1、2、3电流行波波形

[0057] 图3是用于参数反演的各模量波形图

[0058] 图4是检测点1的电流行波波形对比图

## 具体实施方式

[0059] 下面结合附图，给出本发明的较佳实施例，并予以详细描述。

[0060] 在PSCAD中建立如图1的输电线路模型。线路采用频依模型，F为雷击故障点，在故障点沿线20km, 40km和70km依次设立三个检测点，用于故障电流行波波形的采集。输电线路的杆塔为实际杆塔ZB1的模型。

[0061] 线路在0.2秒时在点F处遭受雷击，在pscad中用一个高频的脉冲信号进行模拟，产生沿线传播的暂态电流行波，在下游检测点1, 2, 3分别检测到衰减和畸变后的电流行波波形如图2所示，行波波形的采样频率取1MHz.

[0062] 由图2可以看出，F点发生故障之后，检测点1, 2, 3的第一个电流行波波形波头和波尾大部都相对完好，但是由于线路行波存在折反射，故无法得到单一得到首个波的完整波形。为了使得反演更加精确，本文拟截去首个波头和第二个波头重叠部分，并对其进行卡伦布尔变换三相解耦，解耦后的各模量波形如图3所示

[0063] 对经三相解耦后的行波各模量进行5层小波包变换分成32个频段，并进行快速傅里叶变换，分频率段代入线路频依函数模型H。

[0064] 对各个频率段通过靠近故障点的检测波形(此处为检测点2)的波形能量占比作为系数进行加权组合生成最终的目标寻优函数如下：

$$[0065] \quad Q = \sum_{i=1}^{32} a(i) \cdot \Delta d(i) \cdot \Delta d(i)^*$$

[0066] 通过粒子群算法对目标寻优函数进行全局求解,得到该段输电线路的各模量分布参数如表1所示:

[0067] 表1 检测点2,3之间的分布参数

[0068]

模量\参数	阻抗(ohms/km)	导纳(mhos/km)
0模	0.100 0+0.963 000 000i	0.100 0e-4+0.338 684 532e-5i
1模	0.020 0+0.184 026 962i	1.000 0e-7+0.692 692 783e-5i
2模	0.020 0+0.184 063 857i	1.000 0e-7+0.692 751 668e-5i

[0069] 针对波形反演的效果,本发明以以下5方面来进行评价。

[0070] 1)波头起始时间 $t_s$ 。

[0071] 2)波头上升时间 $t_i = t_{0.9I_m} - t_{0.1I_m}$ 。即在波的幅值从最大幅值的0.1倍上升到0.9倍所用的时间。

[0072] 3)故障行波峰值 $I_m$ 。

[0073] 4)峰值的位置 $t_m$ 。

[0074] 5)半波长度 $t_{hm} = t_h - t_s$ 。其中 $t_h$ 为幅值增加到最高再下降到一半时的时刻。

[0075] 通过以上5方面的对比评价,能全方位的反映波形的各方面特性。

[0076] 由于零模分量的反演受到各方面的制约,并不能准确反演,故本发明放弃了对零模的反演,转而通过不同故障类型时零模和线模的边界条件,结合线模的反演结果得到零模分量。本例故障类型为A相接地,通过边界条件及相模关系可以求得线路反演零模分量。再对各模量波形进行卡伦布尔反变换得到三相电流波形对比图如图4所示。

[0077] 对图4中第一个波头的数据,本发明的5个评价体系评价如下:

[0078] 1)波头起始时间 $t_s$ 。三相反演波形和检测波形绝对误差分别为A相1μs,B相0μs,C相1μs。

[0079] 2)波头上升时间 $t_i = t_{0.9I_m} - t_{0.1I_m}$ 。A、B、C三相的相对误差分别为2.954%,4.091%,2.778%。

[0080] 3)故障行波峰值 $I_m$ 。A、B、C三相的相对误差分别为0.568%,0.468%,4.998%。

[0081] 4)峰值的位置 $t_m$ 。A、B、C三相的绝对误差分别3μs,1μs,1μs。

[0082] 5)半波长度 $t_{hm} = t_h - t_s$ 。A、B、C三相的相对误差分别为0.669%,2.857%,4.111%。

[0083] 经过大仿真验证,该故障电流行波波形反演方法对五项评价指标绝对误差不超过3μs,相对误差不超过6%。

[0084] 要注意的是,以上列举的仅为本发明的具体实施例,显然本发明不限于以上实施例,随之有着许多的类似变化。本领域的技术人员如果从本发明公开的内容直接导出或联想到的所有变形,均应属于本发明的保护范围。

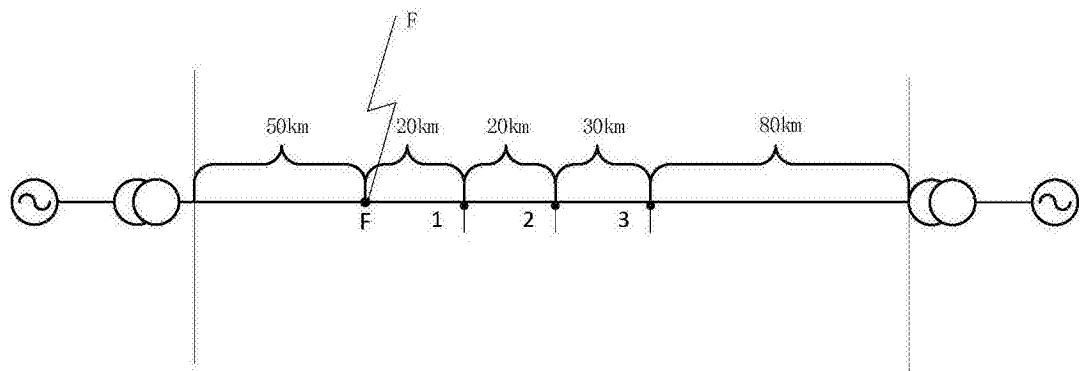


图1

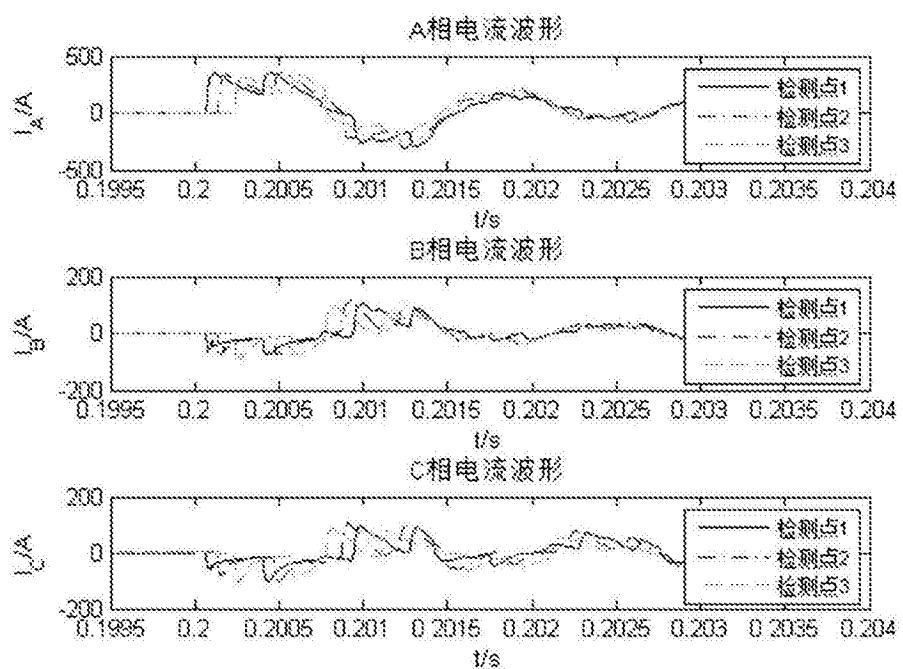


图2

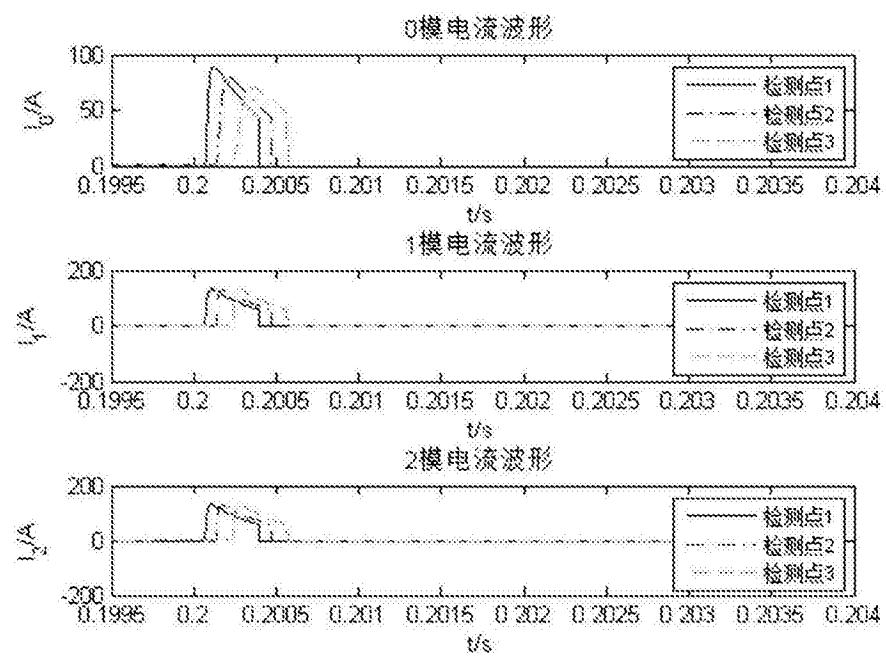


图3

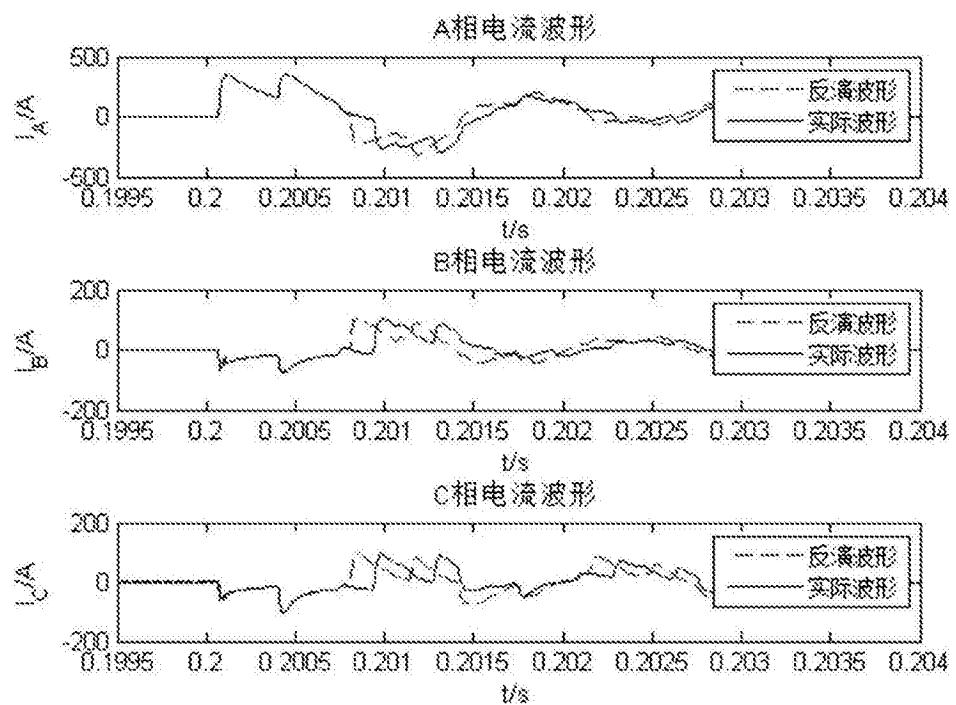


图4