

基于衰减振荡信号特征参数和伪阻抗的电路参数计算方法

张文海^{1)†} 肖先勇¹⁾ 杨景岗²⁾ 李勇³⁾ 袁明友⁴⁾ 熊茜⁵⁾

1)(四川大学电气信息学院, 成都 610065)

2)(国家电网乐山电力股份有限公司, 乐山 614000)

3)(国家电网宜宾供电公司, 宜宾 644000)

4)(国家电网绵阳供电公司, 绵阳 621000)

5)(国家电网资阳供电公司, 资阳 641300)

(2013年10月23日收到; 2014年1月19日收到修改稿)

本文研究了基于暂态信号中衰减振荡信号的电路参数计算理论和方法. 在电力系统线路发生故障时, 通过计算暂态信号流路径电路参数可确定故障位置、推断故障原因, 而衰减振荡信号作为暂态信号主要成分, 因此分析基于衰减振荡信号的电路参数计算在电力系统故障定位中有重要理论价值和实际工程意义. 结合 $R-L$ 电路和 $R-C$ 电路, 首先推导了时域衰减振荡电压、电流信号特征参数与各元件参数以及电路参数间定量关系; 并分析了电路在衰减振荡信号下阻抗特性, 结合稳态正弦分量阻抗概念, 将电路流经衰减振荡信号时的阻抗特性定义为伪阻抗, 并确定了伪阻抗与电路参数和信号特征参数间的关系; 同时分析了串并联条件下伪阻抗与元件参数关系. 以此为基础分别提出了基于信号特征参数和基于伪阻抗的电路参数计算理论, 结合现有衰减振荡信号特征提取方法, 提出具体计算方法, 为基于衰减振荡信号的电路参数计算理论发展以及实际工程应用奠定了重要基础. 通过 MATLAB 模拟产生故障信号对所提理论和方法进行验证, 结果证明了所提理论和方法的正确性和准确性, 并以实际电网故障信息为基础, 基于 PSCAD/EMTDC 建立实际配网模型并对实际单相接地故障进行重现, 对配网单相接地故障进行定位分析, 结果证明了方法的可行性.

关键词: 电路参数, 衰减振荡信号, 特征参数, 伪阻抗

PACS: 84.37.+q, 84.70.+p, 43.60.Hj

DOI: 10.7498/aps.63.098403

1 引言

在电力系统中, 当线路发生接地故障时, 系统将和大地构成新的流通回路, 该流通回路电路参数直接反应了故障距离和故障电阻等信息, 利用变电站端电压、电流信号测量信号计算回路参数即可确定故障位置并推断故障原因, 该思路已在继电保护和故障定位中得到了大量应用^[1-5]. 传统方法计算信号流通回路电路参数时主要利用稳态基频分量^[1,2], 但稳态基频受负荷参数影响, 且在某些故障情况下(如非有效接地系统单相接地故障^[6])基频

分量小、特征弱, 而暂态信号流路径独立, 不受负荷影响, 且幅值大、特征明显, 因此基于暂态信号进行电路参数计算具有独特优势^[3-5]. 由于系统中存在大量电感、电容元件, 在状态突变时(如故障、电容器投切等)将产生大量暂态信号, 且频谱分布范围广(从直流到 MHz)^[7], 但由于回路存在电阻导致大部分暂态信号都将衰减, 因此衰减振荡信号为暂态信号主要成分, 基于暂态信号的电路参数计算核心在于研究基于衰减振荡信号的电路参数计算. 并且随着电子式互感器技术在电力系统的推广^[8], 使得暂态高频分量的准确采集成为可能, 为基于衰减

† 通讯作者. E-mail: zhangwh1989@163.com

振荡信号的电路参数计算奠定了基础。

现有基于暂态信号电路参数计算方法主要从微分方程以及频域分析进行计算。由于暂态信号中除直流分量外的其他交流分量都满足微分方程,文献[9]通过列写微分方程求解电路参数,但微分方程法计算结果受单点采样误差影响较大[10],易受噪声影响,计算结果可靠性不高;文献[3,4]则从频域角度进行分析,利用FFT(fast fourier transform)分析并提取电压、电流暂态信号在某频率信号下的幅值和相位信息计算回路阻抗,并使用稳态正弦分量下阻抗与电路参数间的关系计算电路参数,该方法在稳态正弦分量(包括基频和谐波)分析计算中应用较多[11],但当信号存在衰减时,一方面频率识别将出现偏移[12,13],另一方面由于衰减振荡信号下的阻抗特性不同于稳态正弦分量阻抗,此时不能利用稳态正弦分量阻抗与电路参数关系计算电路参数;文献[5]利用时频分析提取衰减振荡电压、电流分量幅值和相位计算回路阻抗,并利用电抗分量计算回路电感,然而对于衰减振荡信号下的电路阻抗特性缺乏研究,并且对如何准确计算回路电阻缺乏研究。

由于在衰减振荡信号下电路参数与信号特征参数关系以及电路阻抗特性研究的缺乏,导致基于衰减振荡信号的电路参数计算缺乏理论依据和参考。本文从衰减振荡信号特征出发,结合 $R-L$ 电路和 $R-C$ 电路,详细推导了两种电路中衰减振荡电压、电流时域特征参数与电路参数之间的对应关系,并深入研究了电路参数在衰减振荡信号下的阻抗特性,将其定义为伪阻抗,同时确定了伪阻抗与电路参数和衰减振荡信号参数间的关系。并分别根据衰减振荡电压、电流时域信号特征参数与电路参数间的关系和伪阻抗与电路参数间的关系提出了基于衰减振荡信号特征参数和基于伪阻抗的电路参数计算理论。通过MATLAB数值仿真分析证明了理论分析的正确性,所提两种方法均能较准确计算回路参数,并根据对实际电网故障的调查,用PSCAD/EMTDC建立实际配网模型并对实际故障进行重现,仿真验证了本文方法正确性。

2 衰减振荡信号模型

典型衰减振荡信号表达式为[12,14]

$$S = A \cdot \cos(\omega t + \varphi) \cdot e^{-\tau t}, \quad (1)$$

式中 A , ω , φ , τ 分别为幅值、角频率、初相位和衰减系数,本文将这四个参数称为衰减振荡信号特征参数,典型曲线如图1。

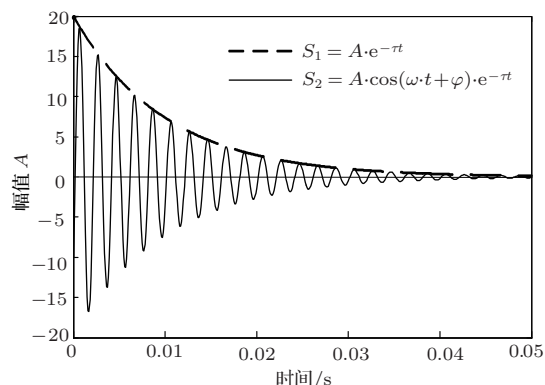


图1 衰减振荡信号曲线图(两信号中, $A = 20$, $\omega = 3140$, $\varphi = -120$, $\tau = 100$)

结合图1,信号特征参数意义如下:角频率 $\omega = 2\pi f$, f 为信号频率,代表信号在1s内过零点次数;幅值 A 表示当 $\cos(\omega t + \varphi) = 1$ 时所有点连线与幅值轴交点(即信号极大值点包络线与幅值轴交点,即图1中信号 S_1 与幅值轴交点),当且仅当 φ 为零时,信号在零时刻瞬时值与信号幅值相等;初相角表示 $t = 0$ 时的信号相位角。本文所指衰减振荡信号为 $A \neq 0$, $\tau > 0$ 的信号。

3 $R-L$ 电路及 $R-C$ 电路在衰减振荡信号下特性分析

在实际电力系统中,主要输、变电设备包括:变压器、输电线路、电容器组以及负荷,变压器、输电线路主要由电感和电阻元件构成,因此集中参数可等效为 $R-L$ 模型[15],电容器组则可等效为 $R-C$ 电路,由于负荷的不确定性,则可等效为任意元件的组合。本节将分别针对 $R-L$ 电路和 $R-C$ 电路在衰减振荡信号下的特性进行分析。

3.1 衰减振荡信号的电压、电流特征分析

如图2,分别为 $R-L$ 电路和 $R-C$ 电路原理图,图中 R , L , C 分别为对应电路的电阻、电感和电容。当 $R-L$ 回路或 $R-C$ 回路流过稳态正弦交流信号时,回路会对电流产生阻碍作用,并用阻抗进行定量刻画,等于电压相量与电流相量之比($R-L$ 回路阻抗 $Z = R + j\omega L$, $R-C$ 回路阻抗 $Z = R + 1/j\omega C$,其中 ω 为稳态正弦分量角频率)。然而当信号存在

衰减时, 基于稳态正弦分量阻抗计算的电路参数计算方法不再适用. 图2中 $u_1(t)$, $u_2(t)$ 为 R - L 电路和 R - C 电路端口电压, $i(t)$ 为电流瞬时值, $u_R(t)$, $u_L(t)$, $u_C(t)$ 分别为电阻、电感和电容上的电压降, 假设电流为

$$i(t) = I_{\text{mag}} \cdot \cos(\omega t + \varphi_i) \cdot e^{-\tau t}, \quad (2)$$

式中, I_{mag} 表示电流信号幅值, ω 为角频率, φ_i 为初相角, τ 衰减系数. 据(2)式和电阻、电感元件微分方程可分别写出 R - L 回路的三个电压分量表达式^[7], 据电容元件的电压、电流微分方程 $i(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}$ 可写出 $u_C(t)$ 以及 $u_2(t)$ 表达式, 各电压表达式为

$$\begin{aligned} u_R(t) &= i(t) \cdot R = I_{\text{mag}} \cdot R \cdot \cos(\omega t + \varphi_i) \cdot e^{-\tau t}, \\ u_L(t) &= L \cdot \frac{di(t)}{dt} \\ &= -I_{\text{mag}} \cdot L \cdot \tau \cdot \cos(\omega t + \varphi_i) \cdot e^{-\tau t} \\ &\quad - I_{\text{mag}} \cdot L \cdot \omega \cdot \sin(\omega t + \varphi_i) \cdot e^{-\tau t}, \\ u_C(t) &= \frac{1}{C} \cdot \int i(t) dt \\ &= \frac{1}{C} \cdot I_{\text{mag}} \cdot \int \cos(\omega t + \varphi_i) \cdot e^{-\tau t} dt \\ &= \frac{I_{\text{mag}}}{C(\tau^2 + \omega^2)} \cdot e^{-\tau t} \\ &\quad \times [-\tau \cdot \cos(\omega t + \varphi_i) + \omega \cdot \sin(\omega t + \varphi_i)], \\ u_1(t) &= u_R(t) + u_L(t), \\ u_2(t) &= u_R(t) + u_C(t). \end{aligned} \quad (3)$$

分别对 $u_L(t)$, $u_C(t)$, $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 利用三角和公式化简有

$$\begin{aligned} u_L(t) &= I_{\text{mag}} \cdot L \cdot \sqrt{\tau^2 + \omega^2} \\ &\quad \times \cos(\omega t + \varphi_i + \theta_L) \cdot e^{-\tau t}, \\ u_C(t) &= \frac{I_{\text{mag}}}{C \cdot \sqrt{\tau^2 + \omega^2}} \cdot \cos(\omega t + \varphi_i + \theta_C) \cdot e^{-\tau t}, \\ u_1(t) &= I_{\text{mag}} \cdot \sqrt{(R - L \cdot \tau)^2 + (\omega \cdot L)^2} \\ &\quad \times \cos(\omega t + \varphi_i + \theta'_1) \cdot e^{-\tau t}, \\ u_2(t) &= \frac{I_{\text{mag}} \cdot \sqrt{[R \cdot C \cdot (\tau^2 + \omega^2) - \tau]^2 + \omega^2}}{C \cdot (\tau^2 + \omega^2)} \\ &\quad \times \cos(\omega t + \varphi_i + \theta'_2) \cdot e^{-\tau t}, \end{aligned} \quad (4)$$

式中 θ_L , θ_C , θ'_1 和 θ'_2 满足下式:

$$\begin{aligned} \theta_L &= \pi - \tan^{-1} \left(\frac{\omega}{\tau} \right), \\ \theta_C &= \tan^{-1} \left(-\frac{\tau}{\omega} \right) - \frac{\pi}{2}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta'_1 &= \tan^{-1} \frac{L \cdot \omega}{R - L \cdot \tau}, \\ \theta'_2 &= \tan^{-1} \left(\frac{R \cdot C \cdot (\tau^2 + \omega^2) - \tau}{\omega} \right) - \frac{\pi}{2}. \end{aligned} \quad (5)$$

当 $\tau = 0$ 时, $\theta_L = 90^\circ$, 即电压超前电流 90° , 呈纯感性; $\theta_C = -90^\circ$ 即电压滞后于电流 90° , 呈纯容性; $\theta'_1 = \tan^{-1} \frac{L \cdot \omega}{R}$, $\theta'_2 = \tan^{-1}(\omega RC) - \frac{\pi}{2}$, 与稳态正弦分量下的回路阻抗特性相同.

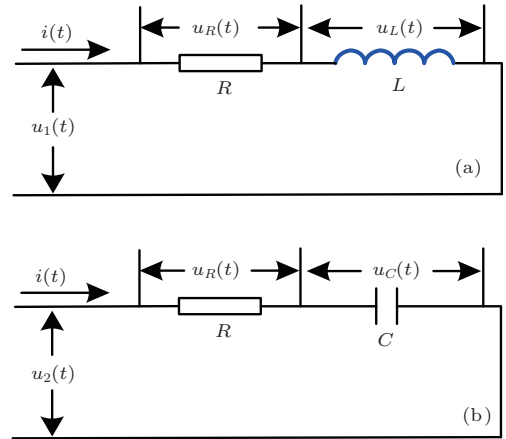


图2 分析电路图 (a) R - L 电路等效模型; (b) R - C 电路等效模型图

3.2 衰减振荡信号特征参数与电路参数关系

为确定电路参数与衰减振荡电压、电流信号特征参数间的关系, 结合(2)式和(4)式中 $i(t)$, $u_1(t)$ 和 $u_2(t)$ 表达式可发现 R - L 电路和 R - C 电路中的电压、电流信号幅值和相位之间存在直接联系. R - L 电路中的两信号幅值比和相位差如下式:

$$\begin{aligned} \frac{U_{1\text{mag}}}{I_{\text{mag}}} &= \sqrt{(R - L \cdot \tau)^2 + (L \cdot \omega)^2}, \\ \tan(\varphi_{1u} - \varphi_i) &= \frac{L \cdot \omega}{R - L \cdot \tau}, \end{aligned} \quad (6)$$

式中 $U_{1\text{mag}}$, I_{mag} 分别表示 R - L 电路衰减振荡电压、电流信号幅值, φ_{1u} , φ_i 分别表示衰减振荡电压、电流信号相位, 且其中电压幅值和相位为

$$\begin{aligned} U_{1\text{mag}} &= I_{\text{mag}} \cdot \sqrt{(R - L \cdot \tau)^2 + (\omega \cdot L)^2}, \\ \varphi_{1u} &= \varphi_i + \theta'_1. \end{aligned}$$

R - C 电路的两信号关系如下式:

$$\begin{aligned} \frac{U_{2\text{mag}}}{I_{\text{mag}}} &= \frac{\sqrt{[R \cdot C \cdot (\tau^2 + \omega^2) - \tau]^2 + \omega^2}}{C \cdot (\tau^2 + \omega^2)}, \\ \tan(\varphi_{2u} - \varphi_i) &= \frac{\omega}{\tau - R \cdot C \cdot (\tau^2 + \omega^2)}, \end{aligned} \quad (7)$$

式中 U_{2mag} 表示 $R-C$ 电路中衰减振荡电压信号幅值, φ_{2u} 表示电压相位, 且有

$$U_{2mag} = \frac{I_{mag} \cdot \sqrt{[R \cdot C \cdot (\tau^2 + \omega^2) - \tau]^2 + \omega^2}}{C \cdot (\tau^2 + \omega^2)},$$

$$\varphi_{2u} = \varphi_i + \theta'_2.$$

因此通过电压、电流信号时域表达式中各特征参数(包括幅值、相角、角频率和衰减系数)即可计算出电路参数, 并且现有针对衰减振荡信号特征参数提取方法已有大量研究^[13,16,17], 可直接利用现有分析方法计算结果进行计算.

3.3 $R-L$ 电路及 $R-C$ 电路在衰减振荡信号下的伪阻抗特性

为分析 $R-L$ 回路及 $R-C$ 电路中各元件参数在衰减振荡信号下阻抗特性, 结合稳态正弦信号分析方法, 将衰减振荡信号表示为相量形式, 类似于稳态正弦信号, 用旋转相量在虚轴(或实轴)上的投影来表示^[18], 不同之处在于对于稳态正弦信号来说, 相量的模是不变的, 而衰减振荡信号的模随时间衰减. 当用相量形式进行表示时, 模值为包含时间和衰减系数的变量, 各信号相量形式如下:

$$\begin{aligned} \dot{I} &= I_{mag} \cdot e^{-\tau t} \angle \varphi_i, \\ \dot{U}_R &= I_{mag} \cdot R \cdot e^{-\tau t} \angle \varphi_i, \\ \dot{U}_C &= \frac{I_{mag}}{C \cdot \sqrt{\tau^2 + \omega^2}} \cdot e^{-\tau t} \angle (\varphi_i + \theta_C), \\ \dot{U}_L &= I_{mag} \cdot L \cdot \sqrt{\tau^2 + \omega^2} \cdot e^{-\tau t} \angle (\varphi_i + \theta_L), \\ \dot{U}_1 &= I_{mag} \cdot \sqrt{(R - L \cdot \tau)^2 + (\omega \cdot L)^2} \\ &\quad \times e^{-\tau t} \angle (\varphi_i + \theta'_1), \\ \dot{U}_2 &= \frac{I_{mag} \cdot \sqrt{[R \cdot C \cdot (\tau^2 + \omega^2) - \tau]^2 + \omega^2}}{C \cdot (\tau^2 + \omega^2)} \\ &\quad \times e^{-\tau t} \angle (\varphi_i + \theta'_2). \end{aligned} \quad (8)$$

为区分电路在衰减振荡信号和稳态正弦信号下阻抗的不同, 本文将电路在衰减振荡信号下的阻抗定义为伪阻抗.

定义 伪阻抗等于电路流经衰减振荡信号时电压相量与电流相量之比, 其实部为伪电阻, 虚部为伪电抗.

根据(8)式可分别计算出电阻、电感、电容以及 $R-L$ 电路和 $R-C$ 电路在衰减振荡信号下的伪阻抗 $Z'_R, Z'_L, Z'_C, Z'_1, Z'_2$, 如下:

$$Z'_R = R,$$

$$Z'_L = L \cdot \sqrt{\tau^2 + \omega^2} \angle \theta_L = -L \cdot \tau + j\omega L,$$

$$\begin{aligned} Z'_C &= \frac{1}{C \cdot \sqrt{\tau^2 + \omega^2}} \cdot \angle \theta_C \\ &= \frac{-\tau}{C \cdot (\tau^2 + \omega^2)} + j \frac{-\omega}{C \cdot (\tau^2 + \omega^2)}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z'_1 &= \sqrt{(R - L \cdot \tau)^2 + (\omega \cdot L)^2} \angle \theta'_1 \\ &= (R - L \cdot \tau) + j\omega L, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Z'_2 &= \frac{\sqrt{[R \cdot C \cdot (\tau^2 + \omega^2) - \tau]^2 + \omega^2}}{C \cdot (\tau^2 + \omega^2)} \angle \theta'_2 \\ &= \frac{RC \cdot (\tau^2 + \omega^2) - \tau}{C \cdot (\tau^2 + \omega^2)} + j \frac{-\omega}{C \cdot (\tau^2 + \omega^2)}. \end{aligned} \quad (9)$$

从(9)式可发现: 1) 对于电阻, 伪阻抗等于电阻值, 与稳态正弦信号下阻抗相同; 2) 对于电感, 伪阻抗中同时包含伪电阻和伪电抗, 其中电感的伪电抗等于稳态正弦信号电抗值, 而伪电阻为负数, 由于信号衰减引起, 同时受电感和衰减系数影响; 3) 对于电容, 伪阻抗中的伪电阻和伪电抗则都同时受电容参数、信号衰减和信号频率影响, 并且伪电阻为负数; 4) 在 $R-L$ 电路和 $R-C$ 电路中, 伪阻抗为电感或电容伪阻抗与电阻伪阻抗之和, 与稳态正弦分析方法相同. 综合分析发现, $R-L$ 电路在流经衰减振荡信号和稳态正弦信号时的差异是由于信号衰减特征在电感上引起的, 并且主要体现在伪电阻上, 而伪电抗与稳态正弦信号下的电抗相同; 对于电容电路流经衰减振荡信号时, 情况则有所不同, 信号的衰减同时影响了伪电阻和伪电抗, 并且伪电阻还受到信号频率影响. 当衰减系数 $\tau = 0$ 时, 伪阻抗退化为稳态正弦信号下的阻抗, 因此伪阻抗可理解为稳态正弦信号阻抗的扩展.

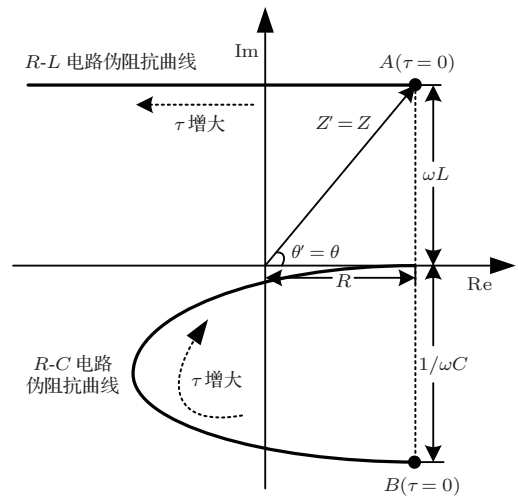


图3 $R-L$ 电路和 $R-C$ 电路伪阻抗与衰减系数关系图

在复平面上作出在固定频率信号下伪阻抗与衰减系数关系图,如图3所示,对于R-L电路伪阻抗曲线,图中Z和θ表示电路在稳态正弦信号下的阻抗和相角,当衰减系数τ=0时,伪阻抗位于A点,与稳态正弦信号阻抗相等;对于R-C电路伪阻抗曲线,B点对应于τ=0时的伪阻抗点,伪电阻和伪电抗都同时受衰减系数影响.由图可知,对于R-L电路,衰减系数对伪阻抗的影响主要是在伪电阻上,而伪电抗不变且等于稳态正弦信号电抗值,因此利用伪阻抗虚部(伪电抗)并结合信号频率即可计算回路电感,如下:

$$L = \frac{X'}{\omega} = \frac{X'}{2\pi f},$$

$$R = R' + L \cdot \tau, \tag{10}$$

其中R'和X'分别为伪电阻和伪电抗,但是计算回路电阻时,则需估计信号衰减系数,并结合伪电阻及回路电感进行计算.对于R-C电路,伪电阻和伪电抗同时受衰减系数影响,此时需要联立伪电阻、伪电抗与电容和电阻间的关系进行求解,其计算结果为

$$C = -\frac{2\pi f}{X'(\tau^2 + 4\pi^2 f^2)},$$

$$R = R' - \frac{\tau \cdot X'}{2\pi f}. \tag{11}$$

此时也就解释了基于频域分析的FFT不能准确计算电路参数的原因,因为其不能反映信号衰减特征.

4 电路元件串、并联下的伪阻抗特性分析

在实际电力系统中,单独的电路元件是很少的,其均是由众多的R, L, C串并联等效而成,因此分析串并联条件下伪阻抗等效模型与各元件伪阻抗间关系在实际应用中显得尤为重要.第三节中分析了R, L, C各元件伪阻抗特性,以及R-L电路和R-C电路伪阻抗特性,其可理解为串联情况下伪阻抗特性分析,结果表明串联电路的伪阻抗等于两单独元件的伪阻抗之和,其与在稳态正弦分量下的阻抗计算方法相同.

当电路由元件并联形成时,如图4, Z₁和Z₂分别表示两组合元件的伪阻抗, I, I₁, I₂和U分别表示电路中衰减振荡信号的电流、电压相量形式,如3.3节中相量表示方式,因此有如下基本方程:

$$I_1 = \frac{\dot{U}}{Z_1}, \quad I_2 = \frac{\dot{U}}{Z_2},$$

$$\frac{\dot{U}}{\dot{I}} = Z, \quad \dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2. \tag{12}$$

利用(12)式可以解出等效伪阻抗Z = $\frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2}$,从式中可以看出,等效伪阻抗的计算方法与稳态等效阻抗的计算方法相同,因此传统的稳态阻抗串并联关系计算仍然适用于伪阻抗的串并联计算中,其差异在于,在计算伪阻抗时,需知道信号振荡频率和衰减系数,并且各元件伪阻抗计算方法也与传统方法不再相同.当电路同时存在电感和电容时,根据两端衰减电压和电流只能计算等效伪阻抗,并不能分别求出电感和电容值.

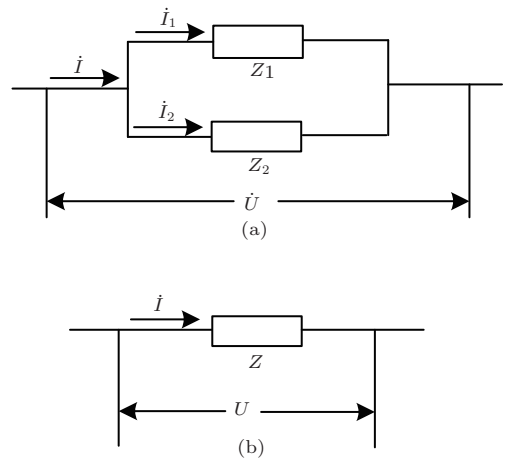


图4 并联电路伪阻抗等效分析图 (a) 并联电路图; (b) 等效电路图

5 基于衰减振荡信号的电路参数计算

结合第三节中电路参数与衰减振荡信号特征参数以及电路参数与伪阻抗之间的关系,分别提出了基于衰减振荡信号特征参数和基于伪阻抗特征的电路参数计算方法.但在进行计算之前,首先要根据算法需要分别计算衰减振荡信号特征参数和回路伪阻抗.而在实际暂态信号中,衰减振荡信号与基频、衰减直流等同时存在^[6],因此首先需要从混合信号中分离出衰减振荡电压、电流信号特征.针对衰减振荡信号特征提取分析方法主要包括两类:一类是通过数值分析方法求解混合信号中各频率信号特征参数;另一类是通过时频分析法提取信号各频率分量的幅值、相位随时间的变化规律.本节将分别利用这两类分析方法结合衰减振荡信号特征参数与电路参数关系和伪阻抗与电路参数关系实现基于衰减振荡信号的电路参数计算.

5.1 基于衰减振荡信号特征参数的电路参数计算

实际电力系统中的暂态信号可以表示为由一系列具有任意幅值、相位、频率和衰减系数的指数函数的组合为

$$S(t) = \sum_{k=1}^n A_k \cdot e^{-\tau_k \cdot t} \cdot \cos(\omega_k t + \varphi_k), \quad (13)$$

式中 A_k , ω_k , τ_k , φ_k 分别为各频率分量的幅值、角频率、衰减系数和初相角. 针对 (13) 式中各频率信号特征参数的计算方法已大量存在, 现有典型计算方法包括 Prony 法 [13,16] 和矩阵束法 [17] 等, 其均可准确估计出各频率信号特征参数.

据 3.2 节可知, 衰减振荡电压、电流信号特征参数与电路参数关系如 (6), (7) 式, 式中衰减振荡电压、电流信号特征参数可利用现有分析方法计算得出. 对于 $R-L$ 电路, 此时只有 R , L 两个未知数, 通过方程组求解可确定电路参数, 如

$$L = \frac{U_{\text{mag}} \cdot \tan(\varphi_u - \varphi_i)}{\omega \cdot I_{\text{mag}} \cdot \sqrt{1 + \tan^2(\varphi_u - \varphi_i)}},$$

$$R = \frac{U_{\text{mag}} \cdot \omega + \tan(\varphi_u - \varphi_i) \cdot U_{\text{mag}} \cdot \tau}{\omega \cdot I_{\text{mag}} \cdot \sqrt{1 + \tan^2(\varphi_u - \varphi_i)}}. \quad (14)$$

对于 $R-C$ 电路只有 R , C 两个未知数, 计算式为

$$C = -\frac{\omega \cdot I_{\text{mag}}}{U_{\text{mag}} \cdot \sin(\varphi_u - \varphi_i) \cdot (\tau^2 + \omega^2)},$$

$$R = \{\omega \cdot U_{\text{mag}} \cdot \cos(\varphi_u - \varphi_i) - \tau \cdot U_{\text{mag}} \cdot \sin(\varphi_u - \varphi_i)\} \times \{\omega \cdot I_{\text{mag}}\}^{-1}. \quad (15)$$

从 (14), (15) 中可看出, $R-L$ 回路电感仅与电压、电流信号幅值、相位和频率有关, 不受信号衰减系数影响, 而电阻计算则受衰减系数影响; $R-C$ 电路的两参数计算则都会受衰减系数影响. 并且当衰减系数 $\tau = 0$ 时, 公式退化为稳态正弦信号下的电路参数计算.

5.2 基于伪阻抗特征的电路参数计算

据 3.3 节可知, 伪阻抗与电路参数之间也有直接联系, 如 (10), (11) 式. 对于 $R-L$ 电路, 利用伪电抗结合信号振荡频率可计算回路电感, 再根据衰减系数可计算回路电阻, 但如何准确计算回路伪阻抗以及信号衰减系数是关键; 对于 $R-C$ 电路则可同时利用伪电阻和伪电抗并结合信号频率以及衰减系

数求解电路参数. 伪阻抗为电路流经衰减振荡信号时的电压相量和电流相量之比, 因此需要分别计算出衰减振荡电压、电流相量信息, 现有分析方法可同时计算信号幅值和相位的方法主要为频域 FFT 变换和时频域复小波变换及 S 变换等.

FFT 作为经典频域分析方法, 可计算出信号在不同频率下的幅值和相位信息, 在稳态基频信号下的阻抗计算中得到了大量应用. 但当信号存在衰减时, 此时计算的阻抗可理解为伪阻抗, 实部为伪电阻, 虚部为伪电抗, 根据伪电抗结合识别频率可计算出回路电感, 但由于信号衰减导致频率识别存在固有误差 [12,13], 导致回路电感计算不准确. 因伪电阻受衰减系数影响, 而 FFT 为频域分析方法, 不能估计出信号衰减系数, 因此不能计算回路电阻, 其计算电阻仅是伪电阻.

另一类可计算伪阻抗的方法为时频分析法, 通过时频分析提取衰减振荡信号幅值和相位随时间变化信息, 典型分析方法即为复小波变换 [19-22] 和 S 变换 [23]. 以复小波变换为例, 在确定被提取信号频率后, 结合母小波中心频率和采样频率确定变换尺度, 在该尺度下进行变换可提取该频率下电压、电流信号幅值和相位随时间变化信息 [5], 利用对应时刻信号比值可计算出伪阻抗随时间变化曲线, 再根据电压或电流信号幅值变化可估计信号衰减系数, 结合 (10), (11) 式可计算电路参数. 与 FFT 变换相比, 基于时频分析的伪阻抗计算方法不受信号衰减影响, 并且可根据信号随时间变化特征估计信号衰减系数, 能准确计算电路参数.

6 仿真分析

为验证分析理论正确性和所提计算方法准确性, 通过 MATLAB 产生一组混合衰减振荡电压和电流信号进行数值仿真, 分别对 $R-L$ 电路和 $R-C$ 电路进行分析验证. 然后根据对实际配电网故障的调查, 以获得的实际数据为基础, 用 PSCAD/EMTDC 建立电网和故障重现模型, 通过采集的电压和电流信号进行故障测距并估算故障电阻, 对方法可行性进行分析验证.

6.1 基于数值仿真的 $R-L$ 电路参数计算

假设信号为非有效接地系统单相接地故障暂态信号, 此时暂态信号中将包括基频分量、衰减直

流和两个衰减振荡信号共 4 个分量^[14], 假设电流信号为

$$\begin{aligned}
 S &= S_1 + S_2 + S_3 + S_4 \\
 &= A_1 e^{-\tau_1 t} + A_2 \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2) \\
 &\quad + A_3 e^{-\tau_3 t} \cos(2\pi f_3 t + \varphi_3) \\
 &\quad + A_4 e^{-\tau_4 t} \cos(2\pi f_4 t + \varphi_4), \quad (16)
 \end{aligned}$$

式中 A_1, τ_1 为衰减直流分量的幅值和衰减系数, A_2, f_2, φ_2 为基频分量幅值、频率和相位, $A_3, A_4, \tau_3, \tau_4, f_3, f_4, \varphi_3, \varphi_4$ 为两衰减振荡信号的幅值、衰减系数、频率和相位.

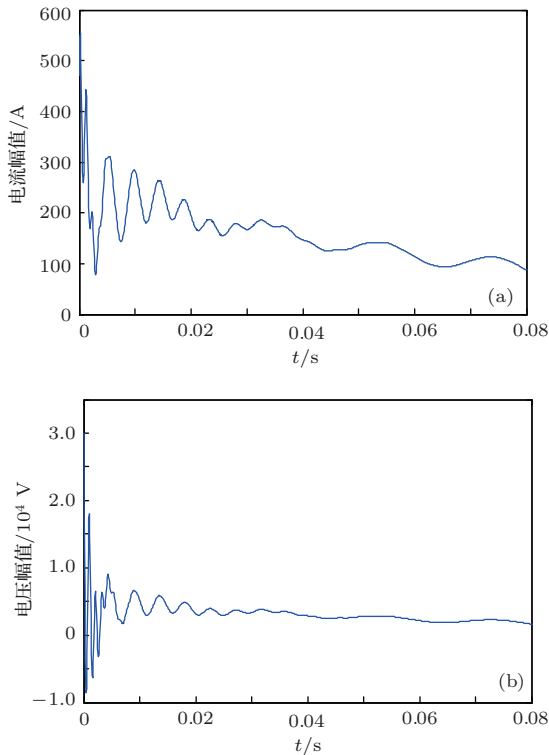


图5 数值信号波形图 (a) 电流信号波形图; (b) 电压信号波形图

据 (3) 式可求出电压信号. 以图 2 中 $R-L$ 电路为例, 假设电路参数 $R = 20 \Omega, L = 19 \text{ mH}$, 信号

采样频率为 10 kHz, 信号持续 4 个基频周波.

参考文献 [14] 中故障电流参数时, 如

$$\begin{aligned}
 S_1 : A_1 &= 253.2, \quad \tau_1 = 12.9, \\
 S_2 : A_2 &= 16.1, \quad f_2 = 50, \quad \varphi_2 = 99.86, \\
 S_3 : A_3 &= 161.6, \quad \tau_3 = 101.2, \quad f_3 = 219.9, \\
 &\quad \varphi_3 = -56.63, \\
 S_4 : A_4 &= 216.2, \quad \tau_4 = 652.3, \quad f_4 = 899.6, \\
 &\quad \varphi_4 = -52.39. \quad (17)
 \end{aligned}$$

电流、电压信号波形如图 5 所示.

分别使用传统 FFT, 以及本文提出的基于信号特征参数法和基于复小波变换的伪阻抗特征法计算电感和电阻参数, 信号特征参数法利用 Prony 法提取衰减振荡信号特征参数, 而复小波变换选择以“Morlet”为母小波. 以 (17) 式中参数为基础, 适当修改部分参数值, 分别考虑噪声信号、信号衰减系数、信号振荡频率对于三种方法计算结果影响, 误差计算为

$$\text{error} = \left| \frac{\text{计算值} - \text{准确值}}{\text{准确值}} \right| \times 100\%. \quad (18)$$

6.1.1 噪声对电路参数计算影响

以 (13) 式中信号为分析对象, 利用混合信号中衰减振荡信号 S_3 计算电路参数, 分别考虑不同信噪比对参数计算结果的影响, 回路电阻和电感计算结果分别如表 1 和表 2 所示. 从表 1, 2 结果来看, 基于 FFT 变换的电阻、电感计算误差都较大, 原因在于其计算电阻为伪电阻, 与电感参数和信号衰减系数有关, 而计算电感受 FFT 变换的影响, 并不适用于衰减振荡信号的分析. 对于噪声的影响, FFT 变换法和复小波伪阻抗法基本不受噪声影响, 而信号特征参数法则受噪声影响明显, 随着信噪比的降低, 其误差明显增大.

表 1 噪声对电阻计算结果影响

信噪比 /dB	信号频率 /Hz	回路电阻						
		准确值/ Ω	FFT/ Ω	误差/%	信号特征参数法/ Ω	误差/%	复小波伪阻抗法/ Ω	误差/%
100	219.9	20	18.19	9.05	19.89	0.55	19.96	0.20
70	219.9	20	18.19	9.05	20.19	0.95	19.96	0.20
40	219.9	20	18.19	9.05	21.10	5.50	19.96	0.20
10	219.9	20	18.21	8.95	21.40	7.02	19.96	0.20

表2 噪声对电感计算结果影响

信噪比 /dB	信号频率 /Hz	回路电感						
		准确值/mH	FFT/mH	误差/%	信号特征参数法/mH	误差/%	复小波伪阻抗法/mH	误差/%
100	219.9	19.6	14.78	24.59	19.60	0	19.57	0.15
70	219.9	19.6	14.78	24.59	19.27	1.68	19.57	0.15
40	219.9	19.6	14.78	24.59	18.57	5.26	19.57	0.15
10	219.9	19.6	14.76	24.69	18.07	7.81	19.59	0.05

6.1.2 信号衰减系数对参数计算影响

同样以衰减振荡信号 S_3 为分析对象, 此时考虑衰减系数对电路参数计算影响, 结果如表3和表4. 从表中可以看出, 衰减系数对基于FFT的电阻计算(实际为伪电阻)有明显影响, 也恰好反映了伪电阻与信号衰减系数之间的关系, 并且对基于

FFT的电感计算也有明显影响, 衰减系数越小, 计算误差越小, 不难理解, 当信号衰减系数小时, 信号趋于稳态正弦, 因此基于FFT的计算也更准确. 对于信号特征参数法和复小波伪阻抗法, 也会受衰减系数影响, 原因在于衰减系数大时, 可利用信号持续时间短, 误差有所增加, 但计算仍较准确.

表3 衰减系数对电阻计算结果影响

信号频率 /Hz	衰减 系数	回路电阻						
		准确值/ Ω	FFT/ Ω	误差/%	信号特征参数法/ Ω	误差/%	复小波伪阻抗法/ Ω	误差/%
219.9	50	20	19.91	0.45	20	0	19.97	0.15
219.9	150	20	16.77	16.15	19.98	0.10	19.93	0.35
219.9	250	20	14.41	27.95	19.92	0.40	19.84	0.80
219.9	350	20	14.27	28.65	19.79	1.05	19.62	1.90

表4 衰减系数对电感计算结果影响

信号频率 /Hz	衰减 系数	回路电感						
		准确值/mH	FFT/mH	误差/%	信号特征参数法/mH	误差/%	复小波伪阻抗法/mH	误差/%
219.9	50	19.6	16.62	15.20	19.59	0.05	19.58	0.10
219.9	150	19.6	13.27	32.29	19.49	0.56	19.55	0.26
219.9	250	19.6	10.73	45.25	19.29	1.58	19.50	0.51
219.9	350	19.6	8.18	58.26	18.99	3.11	19.42	0.92

6.1.3 信号振荡频率对参数计算影响

当信号衰减系数不变, 考虑信号振荡频率对电路参数计算的影响, 结果如表5和表6. 从结果可以看出, 信号振荡频率对基于FFT的电感计算影响明显, 原因在于频率越大, 感抗越大, 越有利于准确计算. 而信号振荡频率对信号特征参数法和复小波伪阻抗法影响很小.

综合三种因素对三种计算方法的影响发现: 1) 基于FFT的回路电阻计算受衰减系数影响明显, 因为其计算电阻实际上为与衰减系数有关的伪电阻, 并且电感计算误差也较大, 且受信号振荡频率和衰减系数影响, 主要是由于算法特点造成的; 2)

信号特征参数法受噪声影响明显, 主要是噪声对信号特征参数提取算法的影响, 衰减系数对计算结果也会产生较小影响, 但振荡频率则无明显影响; 3) 复小波伪阻抗法则不受噪声及振荡频率影响, 仅有衰减系数对其有所影响, 但仍能保持较高计算精度. 综合发现, 本文所提基于信号特征参数和基于伪阻抗的电路参数算法均有较高计算精度, 其参数计算准确性与信号特征提取方法有关, 就本文使用分析方法而言, 基于复小波的伪阻抗法相较于Prony的信号特征参数算法在抗噪性上效果更好.

表5 振荡频率对电阻计算结果影响

信号频率 /Hz	衰减 系数	回路电阻						
		准确值/ Ω	FFT/ Ω	误差/%	信号特征参数法/ Ω	误差/%	复小波伪阻抗法/ Ω	误差/%
119.9	101.2	20	18.27	8.65	19.98	0.10	20.05	0.25
219.9	101.2	20	18.19	9.05	19.99	0.05	19.96	0.20
319.9	101.2	20	18.26	8.7	19.99	0.05	19.95	0.25
419.9	101.2	20	18.36	8.2	19.99	0.05	19.95	0.25

表6 振荡频率对电感计算结果影响

信号频率 /Hz	衰减 系数	回路电感						
		准确值/mH	FFT/mH	误差/%	信号特征参数法/mH	误差/%	复小波伪阻抗法/mH	误差/%
119.9	101.2	19.6	11.75	40.05	19.43	0.87	19.59	0.05
219.9	101.2	19.6	14.78	24.59	19.55	0.26	19.57	0.15
319.9	101.2	19.6	16.14	17.65	19.58	0.10	19.57	0.15
419.9	101.2	19.6	16.91	13.72	19.58	0.10	19.57	0.15

6.2 基于数值仿真的 R-C 电路参数计算

本节针对本文方法在 R-C 电路中的参数计算正确性进行了分析, 假设图 2(b) 中的电阻为 2 Ω , 电容为 10 μF , 电流同 6.1 节, 此时利用电压、电流

衰减振荡信号进行电路参数计算, 两种方法计算结果如表 7. 从表中可看出, 本文所提两种算法均能较正确计算出回路电阻和电容, 证明了分析理论正确性和方法的准确性.

表7 基于衰减振荡信号的 R-C 电路参数计算结果

信号频率 /Hz	衰减 系数	回路电阻					回路电容				
		准确值	信号特征	误差	复小波伪	误差	准确值	信号特征	误差	复小波伪	误差
		/ Ω	参数法/ Ω	/%	阻抗法/ Ω	/%	/ μF	参数法/ μF	/%	阻抗法/ μF	/%
219.9	101.2	2	1.99	0.5	1.99	0.5	10	9.99	0.1	10.00	0
899.6	652.3	2	1.99	0.5	2.00	0.5	10	9.97	0.3	10.16	1.6

6.3 PSCAD/EMTDC 仿真分析

根据实际配电网等效模型和实际故障信息, 在 PSCAD/EMTDC 中搭建仿真平台, 简化电路如图 6, 以馈线 1 为分析对象, 其他馈线利用简化电路, 线路参数如文献 [5], 馈线 1 各区段距离如图 6 中所示. 进行测距时, 利用本文所提方法计算衰减振荡信号回路电感和电阻, 结合线路单位电感计算故障距离.

如图 7 为故障距离为 1.7 km, 故障电阻为 5 Ω 时的三相电压电流波形图, 其中 C 相为故障相, 故障时刻为 0.02 s, 从图中可看出故障后明显的衰减振荡信号. 分别假设在馈线 1 中不同故障距离 (如图 6 中标示故障点) 以及故障电阻情况下发生单相接地故障, 利用本文所提方法对衰减振荡信号进行

提取并计算故障距离同时估计故障电阻,

将线路等效为 R-L 串联模型, 根据故障相故障后电压电流信号, 基于复小波伪阻抗法提取衰减振荡分量计算回路电感和电阻, 结合线路参数进行故障测距并估算故障电阻, 对比了传统方法故障电阻估计以及考虑伪阻抗特性的故障电阻估计结果, 如表 8. 从表中可看出, 该方法可较准确计算故障距离, 证明了方法可行性, 并且从故障电阻估计误差可看出, 考虑伪阻抗特性的故障电阻估计较传统估计方法有很大提高, 但是估计精度有待进一步提高, 其主要原因在于衰减振荡分量频率识别准确性以及线路模型精确性. 并且在分析过程中发现, Prony 法在解析电压和电流信号时, 其频率识别不一致, 从而导致方法不适用, 因此在实际应用时, 还需要进一步考虑信号解析算法的鲁棒性.

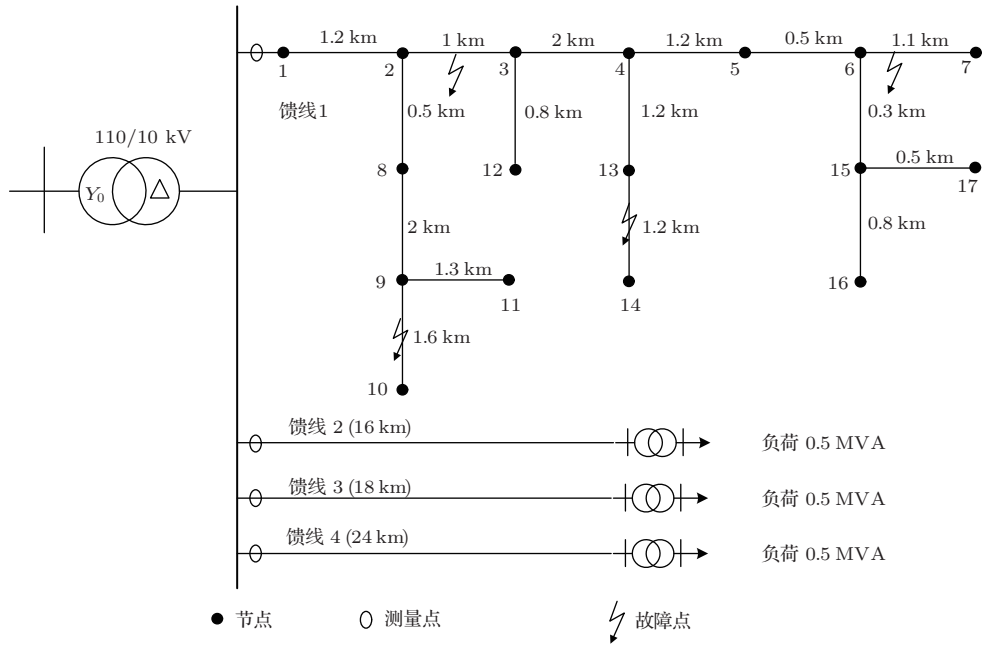


图6 配电网简化等效模型图

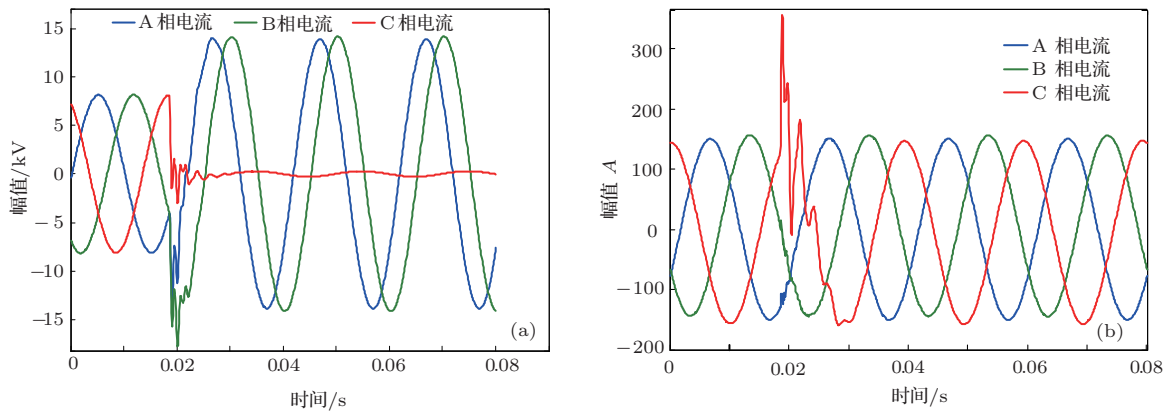


图7 (网刊彩色) 配电网单相接地故障前后信号波形图 (a) 三相电压信号; (b) 三相电流信号

表8 基于复小波伪阻抗法的故障测距结果验证及故障电阻估计比较

实际故障 距离/km	实际故障 电阻/ Ω	计算距离 /km	误差 /%	传统方法估计 故障电阻/ Ω	误差 /%	复小波伪阻抗法 估计故障电阻/ Ω	误差 /%
1.7	5	1.8	5.88	3.18	-36.4	4.65	-7
1.7	10	1.78	4.71	7.49	-25.1	9.83	-1.7
4.7	5	4.87	3.62	0.64	-87.2	3.8	-24
4.7	10	4.87	3.62	4.17	-58.3	8.85	-11.5
6	5	6.21	3.5	0.01	-99.8	4.2	-12
6	10	6.28	4.67	2.4	-76	8.1	-12
6.9	5	7.19	4.20	0.1	-98	3.2	-16
6.9	10	7.18	4.06	1.7	-83	7.8	-11

7 结 论

结合 $R-L$ 电路和 $R-C$ 电路对衰减振荡信号特征参数与电路参数关系进行了深入分析, 并且发现电路在衰减振荡信号下的阻抗特性与在稳态正弦信号下的阻抗特性存在很大差异, 主要原因在于信号衰减在电感及电容上带来的影响. 将电路对衰减振荡信号的阻抗特性定义为伪阻抗, 并提出了定量确定方法, 并对各元件的伪阻抗特性以及串并联电路的伪阻抗特性进行了分析. 结合衰减振荡信号特征参数与电路参数之间的关系, 以及伪阻抗与电路参数之间的关系, 分别提出了基于衰减振荡信号特征参数和基于伪阻抗的电路参数计算方法, 并结合现有信号特征提取方法, 确定了具体参数计算方法. 通过 MATLAB 模拟产生实际故障信号, 并分析了噪声、衰减系数和振荡频率对传统方法和本文所提方法的影响, 分别对 $R-L$ 电路和 $R-C$ 电路分别进行了分析, 结果证明了分析理论以及所提方法的正确性. 同时, 以实际电网和实际故障信息为基础, 用 PSCAD/EMTDC 建立实际配网和故障重现模型, 对基于复小波伪阻抗法的电路参数计算进行测距分析, 结果证明该方法可较准确计算故障距离并且可准确估计故障电阻. 通过本文研究, 弥补了基于衰减振荡信号的电路参数计算理论分析空白, 为该方法在实际工程中的应用奠定了重要理论基础. 在实际工程中, 由于衰减振荡信号受多方面因素影响, 如何保证在小幅值情况下的计算准确性和可靠性将是下一步研究的重点.

参考文献

- [1] Zimmerman K, Costello D 2005 *Proceedings of the 58th Annual Conference for Protective Relay Engineers-Texas, American*, April, 2005 p211
- [2] Mora-Florez J, Melendez J, Carrillo-Caicedo G 2008 *Electr. Pow. Syst. Res.* **78** 657
- [3] Kang X N, Suonan J L 2005 *Proceedings of the CSEE* **25** 22 (in Chinese)[康小宁, 索南加乐 2005 中国电机工程学报 **25** 22]
- [4] Jia K, Thomas D, Sumner M 2013 *IEEE Trans. Power Deliver.* **28** 38
- [5] Zhang W H, Xiao X Y, Wang Y 2013 *Electric Power Automation Equipment* **33** 46(in Chinese) [张文海, 肖先勇, 汪颖 2013 电力自动化设备 **33** 46]
- [6] Tang Y, Chen K, Chen Q 2007 *High Voltage Engineering* **33** 175 (in Chinese) [唐轶, 陈奎, 陈庆 2007 高电压技术 **33** 175]
- [7] Sluis L v d(translated by Wang Y Y, Zhou Y B)2003 *Transients in Power Systems* (Beijing: China Electric Power press) pp1-2 (in Chinese)[斯卢茨著(王一宇, 周于邦译) 2003 电力系统暂态(北京: 中国电力出版社)第1-第2页]
- [8] Li J H, Zheng Y P, Gu S D, Xu L 2007 *Automation of Electric Power Systems* **31** 94 (in Chinese) [李九虎, 郑玉平, 古世东, 须雷 2007 电力系统自动化 **31** 94]
- [9] Richards G G, Tan O T 1982 *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems* **4** 945
- [10] Wen S K, Yuan Z Q 2006 *Electric Power Automation equipment* **26** 47(in Chinese) [文尚坤, 袁兆强 2006 电力自动化设备 **26** 47]
- [11] Zhang F, Geng Z, Yuan W 2001 *IEEE Trans. Power Deliver.* **16** 160
- [12] Dai J Z, Fang F Q 1993 *Automation of Electric Power Systems* **17** 9(in Chinese) [戴家祯, 方富淇 1993 电力系统自动化 **17** 9]
- [13] Ding K, Chen L D, Yang Z J 2010 *Journal of Vibration and Shock* **29** 17(in Chinese) [丁康, 陈乐德, 杨志坚 2010 振动与冲击 **29** 17]
- [14] Charri O, Bastard P, Meunier M 1995 *IEEE Trans. Power Deliver.* **10** 1234
- [15] Suonan J L, Qi J, Chen F F, Song G B, Xu Q Q 2004 *Proceedings of the CSEE* **24** 119(in Chinese) [索南加乐, 齐军, 陈福锋, 宋国兵, 许庆强 2004 中国电机工程学报 **24** 119]
- [16] Hou W B, Liu T Q, Li X Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3531 (in Chinese)[侯王宾, 刘天琪, 李兴源 2010 物理学报 **59** 3531]
- [17] Sarkar T K, Pereira O 1995 *IEEE Antenn. Propag. M.* **37** 48
- [18] Chang X R, Zhao S Q 2010 *Power system transient process* (Beijing: China Machine Press) p111-113 (in Chinese) [常鲜戎, 赵书强 2010 电力系统暂态过程(北京: 科学出版社)第111—113页]
- [19] Ma T P, Hu L Q, Chen K Y 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 7209 (in Chinese) [马天鹏, 胡立群, 陈开云 2010 物理学报 **59** 7209]
- [20] Hu L Y, Fan H Y 2010 *Chin. Phys. B* **19** 4205
- [21] Cui X M, Sun C X, Li X, Du L, Li J 2004 *Transactions of China Electrotechnical Society* **19** 90(in Chinese) [崔雪梅, 孙才新, 李新, 杜林, 李剑 2004 电工技术学报 **19** 90]
- [22] Song J, Fan H Y 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 4210
- [23] Stockwell R G, MansinhaL, Lowe R P 1996 *IEEE T. Signal Proces* **44** 998

Circuit parameter calculation based on characteristic parameters and pseudo-impedance of damped oscillation signal

Zhang Wen-Hai^{1)†} Xiao Xian-Yong¹⁾ Yang Jing-Gang²⁾ Li Yong³⁾
Yuan Ming-You⁴⁾ Xiong Qian⁵⁾

1) (College of Electrical Engineering and Information Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

2) (Leshan Electric Power Co.Ltd, State Grid, Leshan 614000, China)

3) (Yibin Power Supply Company, State Grid, Yibin 644000, China)

4) (Mianyang Power Supply Company, State Grid, Mianyang 621000, China)

5) (Ziyang Power Supply Company, State Grid, Ziyang 641300, China)

(Received 23 October 2013; revised manuscript received 19 January 2014)

Abstract

This paper mainly studied the circuit parameter calculation theory and the methods based on damped oscillations in transient signals. The methods can be used for the location and origin of faults by calculating the circuit parameters of transient fault signals' path when the fault occurs in the power system transmission lines. It is important in theoretical and practical engineering to locate faults in powerlines by calculating circuit parameters based on damped oscillations which are the main component of the transient signals. In $R-L$ and $R-C$ circuits, relations of the characteristic parameters in damped oscillation voltage and current in time domain, with the circuit parameters as well as the component parameters are deduced. And the impedance characteristic of the circuit under damped oscillation is analyzed, which is defined as a pseudo-impedance based on the definition that impedance is steady and sinusoidal. Relations between the pseudo-impedance and circuit parameters are also found. Relations between component parameter and pseudo-impedance in series or parallel are also analyzed. So methods for circuit parameter calculation are proposed separately based on the characteristic parameters and pseudo-impedance, each of which is a kind of characteristic of the damped oscillation signal. Specific calculation methods are also proposed combining with the state-of-the-art signal analysis for damped oscillation signal. Analyses in this paper may lay an important foundation for practical engineering application. The proposed theory and methods are verified based on simulation of fault signals produced by MATLAB. The equivalent circuit of an actual distribution system is simulated by using PSCAD/EMTDC. Actual fault signals reappear in the simulation. Location of single-line-to-ground fault using damped oscillation signal proposed in the paper is proved feasible.

Keywords: circuit parameters, damped oscillation signal, characteristic parameters, pseudo-impedance

PACS: 84.37.+q, 84.70.+p, 43.60.Hj

DOI: 10.7498/aps.63.098403

† Corresponding author. E-mail: zhangwh1989@163.com