

基于小波变换的单相接地故障电弧模型及其 PSCAD / EMTDC 仿真研究

范李平¹, 袁兆强¹, 张凯²

(1. 三峡大学电气与新能源学院, 湖北 宜昌 443002; 2. 三峡电厂, 湖北 宜昌 443002)

摘要: 提出了一种新的基于小波变换的单相接地故障电弧建模方法及仿真研究。利用 PSCAD / EMTDC 中的逻辑判断, 传递函数等模块, 准确建立了一次、二次电弧动态特性的模型控制块, 将其封装嵌入至输电线路模型界面中, 实现了实时控制, 并将 DB5 离散小波变换应用于检测故障电弧故障信号奇异性。经过大量的仿真实验表明, 该方法可以有效提取故障电弧信号的高频分量, 并能迅速检测出电弧信号的所有异常信息和准确地识别出电弧的熄灭时间。

关键词: 单相自适应重合闸; 接地故障; 一次电弧; 二次电弧; 小波变换

Simulation on arc model of single phase earth fault and PSCAD/EMTDC based on wavelet transformation

FAN Li-ping¹, YUAN Zhao-qiang¹, ZHANG Kai²

(1. The College of Electrical Engineering & Renewable Energy, Three Gorges University, Yichang 443002, China;
2. Three Gorges Power Plant, Yichang 443002, China)

Abstract: In this paper, a new algorithm of arc modelling of single phase earth fault based on wavelet transform is proposed and simulated. The logic judgments, transfer function and other modules in the PSCAD / EMTDC are used to accurately establish model control blocks of dynamic characteristics of primary and secondary arc. And then they are packaged and embedded to the interface of transmission line model, which can realize real-time control. At the same time, the DB5 discrete wavelet transform is applied to arc fault signal strangeness detection. A large number of simulations show that the method can effectively extract high-frequency component of fault arc signal, and can quickly detect all the abnormal information of arc signal and can accurately identify the arc quenching time.

This work is supported by Natural Science Foundation of Hunan Province (No. 2006ABA202).

Key words: single-pole adaptive reclosure; earth fault; primary arc; secondary arc; wavelet transform

中图分类号: TM743 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2011)05-0051-06

0 引言

长期以来, 电弧的研究只能依靠物理过程的定性分析、简单估算、经验和大量的试验研究进行, 效率低、耗资大^[1]。科技人员希望能找到电弧的动态物理模型, 借以提高效率, 节约资金并可使设计优化。接地故障电弧的研究对于设计和发展新的继电保护装置具有非常重要的意义。创造一个实验环境来模拟故障电弧花费昂贵, 在一个实际的电力系统中模拟故障电弧, 不但代价昂贵, 而且操作起来很困难^[2]。因此, 寻求精确的故障电弧的数字仿真模型尤为重要。

由于在传统的电弧模型以往的数字仿真中, 通

常仅仅用理想短路或者一个线性电阻来模拟接地故障电弧, 大大降低了仿真结果的可信度^[3]。但是由于电弧现象的复杂性, 故障暂态过程中产生的高频信号中含有更多的故障信息, 而传统的电弧模型往往不能满足要求。为解决这个问题, 本文依据在国外学者对瞬时故障后一、二次电弧研究的基础上, 利用电弧特性的经验公式, 给出了接地故障电弧的精确数字仿真模型, 用 PSCAD 模块建立了准确的电弧模型。

1 故障电弧的数学模型分析

1.1 故障一次电弧变化的动态特性研究

在瞬时接地短路故障发生时, 故障点通过一次电弧流过较大的短路电流, 电弧并没有显著的伸长。由于电源能量的支持, 电弧有一个相对较大的横截面, 而且电弧的压降主要集中在弧柱上。一系列的

研究表明，一次电弧的动态特性可以大致由下列表达式模拟^[4-5]：

$$\frac{\partial g_p}{\partial t} = \frac{1}{T_p} (G_p - g_p) \quad (1)$$

$$G_p = \frac{|i|}{v_p l_p} \quad (2)$$

其中： g_p 是随时间变化的一次电弧电导； G_p 是一次电弧稳态电导； $|i|$ 是电弧电流的绝对值； v_p 是一次电弧单位长度的电弧电压，近似为常数。弧柱上的电压降落主要与电流有关，而且在每一个电弧周期内，一次电弧单位长度的电弧电压 v_p 近似为常数。尽管存在一些变化，电流在1.4~24 kA范围内，平均稳态电弧电压梯度为15 V/cm。对于一次电弧来讲，时间常数 T_p 和电弧长度 l_p 被认为是常量。决定一次电弧动态特性的另一个关键因素是电弧电压达到稳态电压的上升率，它可用来推导出时间常数，如式(3)^[6]所示。

$$T_p = \frac{\alpha i_p}{l_p} \quad (3)$$

式中：比例系数 α 大约为 2.85×10^5 ； i_p 是一次电弧的电流峰值。

1.2 故障二次电弧变化的动态特性研究

二次电弧是一个比一次电弧更为复杂的现象，其影响因素是多方面的。可以用式(4)来表示二次电弧的动态特性^[7]：

$$\frac{\partial g_s}{\partial t} = \frac{1}{T_s} (G_s - g_s) \quad (4)$$

其中： $G_p = \frac{|i|}{V_s L_s(t_r)}$ ， $T_s = \frac{\beta I_s}{L_s(t_r)}$ ， $V_s = 75 I_s^{-0.4}$

V/cm； g_s 是随时间变化的二次电弧电导， G_s 是二次电弧的稳态电导， T_s 是时间常数； L_s 是电弧的长度； I_s 是二次电弧的电流峰值； β 是比例系数； v_s 是二次电弧单位长度的电弧电压； $|i|$ 是电弧电流的绝对值； t_r 是以二次电弧起始时刻计算的时间。

电弧的重击穿电压还与电弧的电流有关，通过试验得出的经验公式如式(5)，其中 V_r 为电弧重击穿的电位梯度， T_c 为电弧产生到电弧熄弧的时间(包括电弧临时熄灭和永久熄灭)，式中 L_0 为电弧起始长度^[8]。

$$V_r(t_r) = [5 + 1620 T_c / (2.15 + I_s) * h(t_r - T_c)] \quad (5)$$

$$h(t_r - T_c) = \begin{cases} 1 & (t_r - T_c \geq 0) \\ 0 & (t_r - T_c \leq 0) \end{cases} \quad (6)$$

$$V_r = |V_r(t_r)| * L_s(t_r) \quad (7)$$

$$L_s(t_r) / L_0 = \begin{cases} 1 & (t_r - T_c \geq 0) \\ 10 t_r & (t_r - T_c \leq 0) \end{cases} \quad (8)$$

2 电弧模型的 PSCAD / EMTDC 建立过程

2.1 电弧模型的 PSCAD / EMTDC 描述

本文采用 PSCAD / EMTDC 进行数字仿真，利用逻辑判断，传递函数等模块建立电弧模型。以二次电弧模型为例，详述电弧模型的 PSCAD / EMTDC 描述过程，如图1所示。

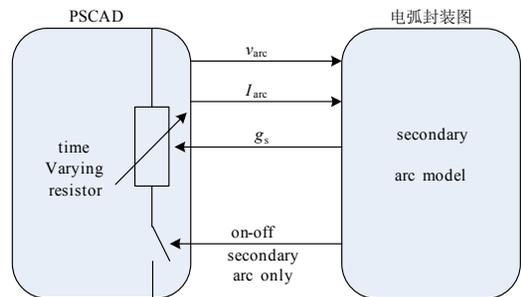


图1 二次电弧模型的 PSCAD / EMTDC 描述

Fig.1 PSCAD / EMTDC description of secondary arc model

2.2 电弧模型的 PSCAD / EMTDC 建模过程

本文描述电弧特性建立的电弧模型，采用的参数值如下：

$$V_p = 15 \text{ V/cm}, \alpha = 2.85 \times 10^5, i_p = 14 \text{ kA}, l_p = 400 \text{ cm}, I_s = 35 \text{ A}, \beta = 2.57 \times 10^{-3}, L_0 = 400 \text{ cm}$$

根据公式(1)~(3)通过循环迭代计算，得到控制一次电弧模型的非线性电阻阻值 R_{arc01} 的控制量 G_p 和 T_p ，用 PSCAD 搭建一次电弧的非线性电阻模型如图2。

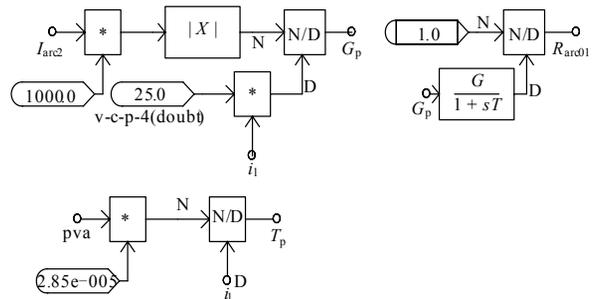


图2 一次电弧模型的非线性电阻阻值及控制量

Fig.2 Nonlinear resistance and controlled variable of primary arc model

由一次电弧的定义可以知道，一次电弧发生的时间是当故障发生到线路跳开这段时间，也就是说我们需要一个时间控制元件来控制一次电弧的输

出, 因此我们通过建立时间比较元件, 当仿真时间在 t_{ia} (此时刻的含义是故障发生的时刻) 和 t_{isa} (断路器跳开的时刻) 之间的时候, 一次电弧的阻值才有输出量, 如图 3 所示。

根据二次电弧的动态模型公式 (4) ~ (8) 分别搭建二次电弧的 PSCAD 模型图, 如图 4。通过循环迭代计算, 得到控制二次电弧模型的非线性电阻阻值 R_{arc11} 的控制量 G_s 和 T_s 。

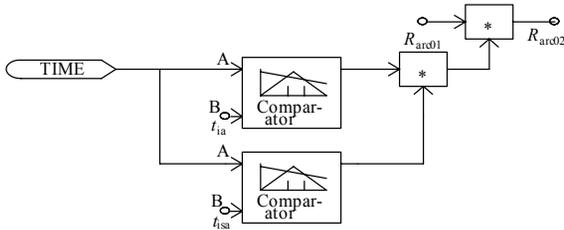


图3 用时间比较元件控制一次电弧的输出

Fig.3 Using time comparison element to control the output of primary arc

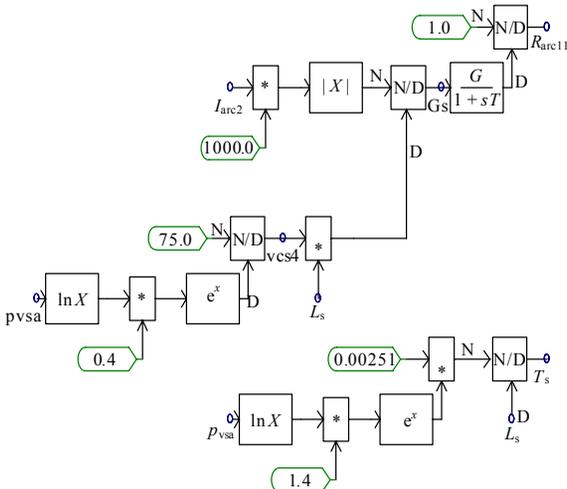


图4 二次电弧模型的非线性电阻及控制量

Fig.4 Nonlinear resistance and controlled variables of secondary arc model

由于二次电弧的长度与二次电弧燃烧时间的关系为式 (8) 所示, 从而通过时间比较器可以搭建出二次电弧长度 L_s 控制模块如图 5。

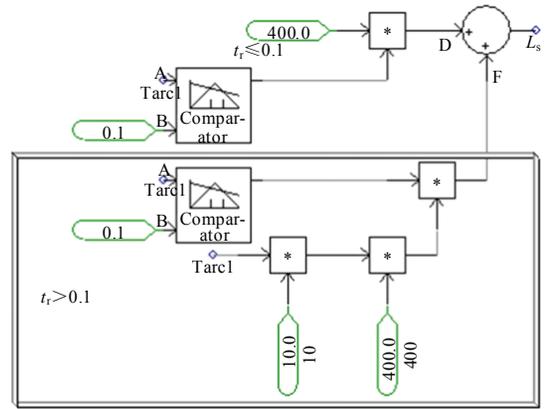


图5 电弧长度控制模型

Fig.5 Secondary arc length control model

最后将以上 PSCAD 控制模块全部封装到 ARC_MODLE 中接入线路 PSCAD 模型中, 如图 6 所示。

3 电弧模型的仿真结果

线路模型取特高压输电线路晋东南-南阳段 1 000 kV 线路系统, 如图 7 所示。线路全长 358 km。线路参数为: $R_1=0.007\ 58\ \Omega/\text{km}$, $R_0=0.154\ 21\ \Omega/\text{km}$, $L_1=0.263\ 5\ \text{H}/\text{km}$, $L_0=0.830\ 6\ \text{H}/\text{km}$, $C_1=0.013\ 970\ \mu\text{F}/\text{km}$, $C_0=0.009\ 296\ \mu\text{F}/\text{km}$ 。

实验过程如下: 线路中点处发生 A 相接地故障, $t_1=40\ \text{ms}$ 时刻线路发生 A 相接地故障, $t_2=140\ \text{ms}$ 时刻线路两端断路器跳闸, $t_3=580\ \text{ms}$ 时刻电弧完全熄灭。一次电弧和二次电弧是并联连接, 其投入时间用时空开关分别控制。本次瞬时故障仿真, 在 40 ms 时发生故障, 一次电弧产生, 投入一次电弧模型,

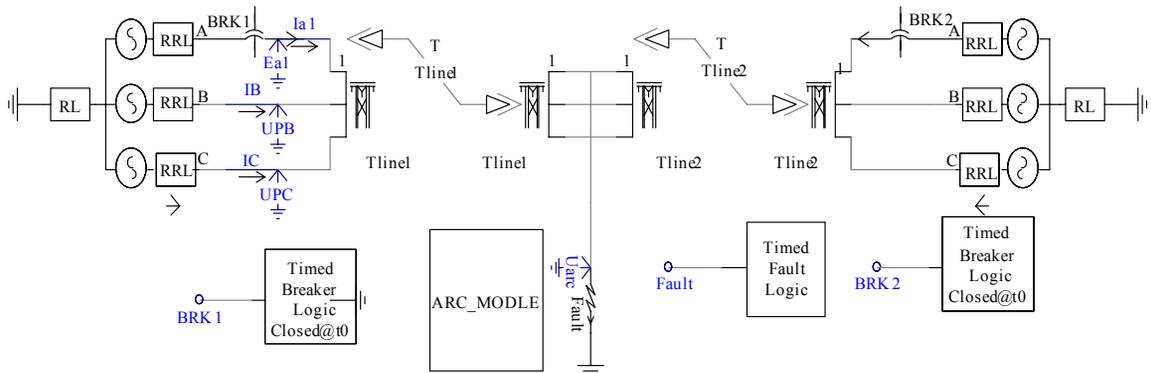


图6 线路中的电弧ARC_MODLE封装模型

Fig.6 ARC_MODLE packaged arc model

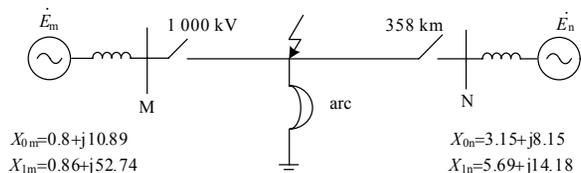
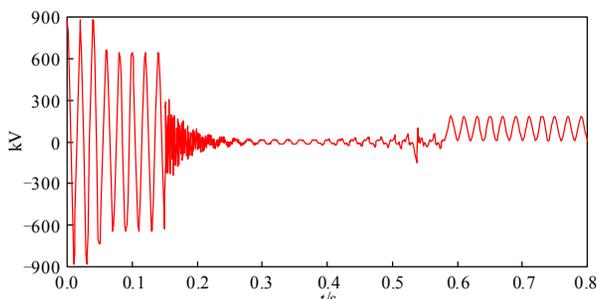


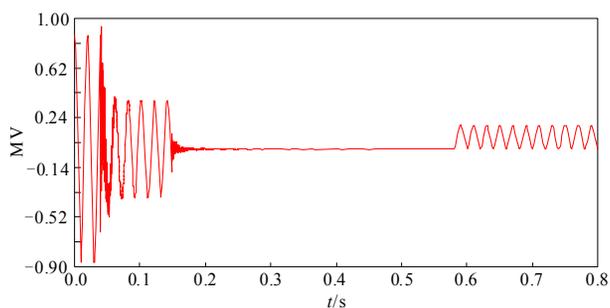
图 7 1000 kV 输电线路系统图
Fig.7 1000 kV transmission line system

此时二次电弧模型处于断开状态。140 ms 时线路两侧断路器跳开，一次电弧熄灭，时控开关断开一次电弧。同时，二次电弧产生，在逻辑开关控制下，投入二次电弧模型。

通过图 8 (a) 和图 8 (b) 比较，可以看出故障相电压受电弧特性的影响也能很清楚地识别。在电弧燃烧期间，电弧的非线性特性一直导致故障相电压畸变，直到电弧熄灭故障相电压才趋于稳定。



(a) 经电弧接地时故障相电压

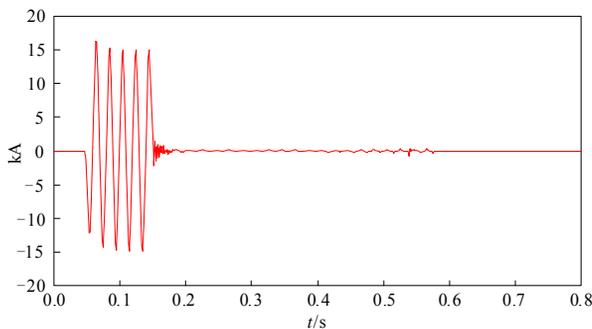


(b) 经线性电阻接地时故障相电压

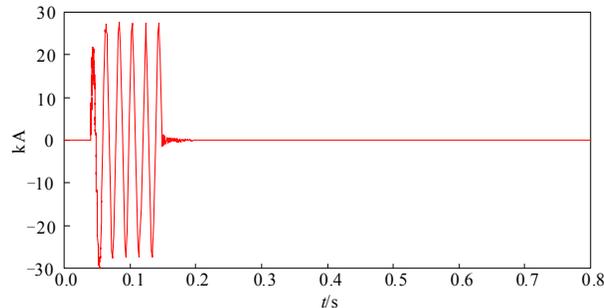
图 8 经电弧接地和经线性电阻接地故障相电压区别

Fig.8 The phase voltage difference between faults via arc-resistance grounding and linear resistance grounding

从图 9 (a) 和图 9 (b) 中可以看出，当故障点直接经线性电阻接地时，线路发生瞬时故障，断路器跳开后很短时间内，故障点电弧熄灭，电弧电流为零；而经电弧电阻串联相同阻值的线性电阻接地时，断路器跳开后，故障点电弧要持续大约 540 ms，经历燃烧-熄灭-重燃-熄灭的反复过程，直到电弧重燃电压超过实际的电弧电压，电弧才彻底熄灭，电弧电流为零。



(a) 经电弧接地时的电弧电流



(b) 经线性电阻接地故障点电流

图 9 经电弧接地和经线性电阻接地故障点电流区别

Fig.9 The current difference between faults via arc-resistance grounding and linear resistance grounding

从上述仿真图可以看出，在一次电弧和二次电弧阶段，由于电弧的非线性特性，对故障点的电压和电流都产生了严重的畸变。从电弧的暂态过程可以看出，在二次电弧阶段，电弧电压不是逐渐减小，而是在逐渐增大，直到电弧最终熄灭。当二次电弧由于实际电压不再大于重燃电压的时候，电弧才会彻底熄灭。

4 基于小波变换在检测电弧故障信号奇异性的应用

为了提取故障相的高频信号，我们可以考虑用 Daubechies 系列小波进行分析。利用 Daubechies 小波对信号进行分解时，可以将信号分为低频信号(近似信号)和高频部分(细节信号)，因此用它完全可以反映我们所需要的故障特征高频信息和低频信^[8-12]。对于小波基的选择，我们的目的不是重构信号，而是提取暂态信号的高频分量，所以选取小波基的阶数不能过高。

针对图 7 所示特高压线路系统，分别在瞬时故障和永久故障下对故障相端电压信号采样。假设故障发生在线路中部，发生 A 相金属性短路故障。采样时间段是在 0~600 ms 时间段，采样频率为 20

kHz, 则一个周期采样 400 个点。利用 Db5 小波进行 4 尺度分解后的 2^1 , 2^2 , 2^3 , 2^4 尺度下细节部分结果如图 10 和图 11 所示。

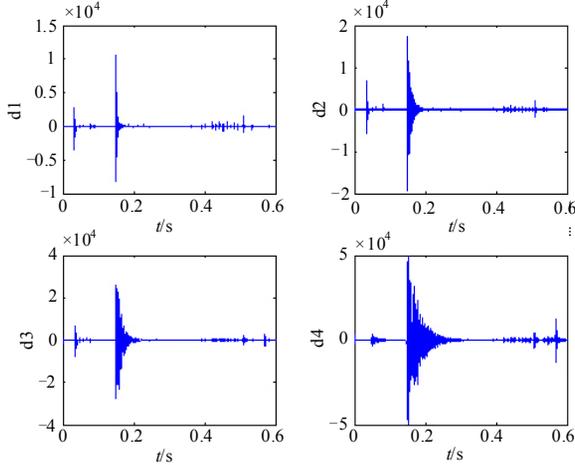


图 10 瞬时故障时 Db5 2^1 , 2^2 , 2^3 , 2^4 尺度下细节系数
Fig.10 Db5 2^1 , 2^2 , 2^3 , 2^4 scale detail coefficients on transient fault

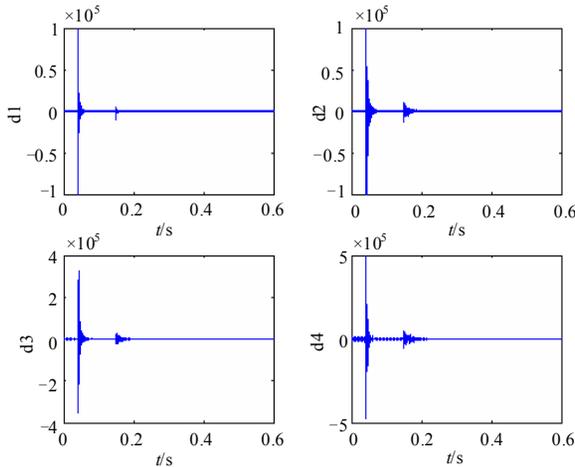


图 11 永久故障时 Db5 2^1 , 2^2 , 2^3 , 2^4 尺度下细节系数
Fig.11 Db5 2^1 , 2^2 , 2^3 , 2^4 scale detail coefficients on permanent fault

在瞬时故障时, 由于电弧的非线性电阻对故障相电压的影响, 我们可以看出其小波分解后的波形存在许多不间断突变点。从第一层结果可以看出, 在故障发生、故障相断路器跳闸及电弧永久熄灭三个时刻的突变点很明显。但在永久故障时, 存在两个主要的突变点, 分别对应故障发生、故障相断路器跳闸时刻。另外, 在瞬时故障时的二次电弧阶段由于电弧的非线性特性对故障下电压的畸变的影响, 其小波分解后的高频细节部分存在许多不间断的突变点, 当电弧熄灭的瞬间, 小波分析细节部分对应信号的高频部分, 突变点变得更为显著。

经过小波变换, 小波系数完全反映了原始信号的突变信息, 通过对小波系数进行分析便可得到原始信号中的变化特征。所以, 将小波变换用于故障电弧检测可以提取故障信号的异常信息, 这种方法可以很明显地检测到对应电弧特性的畸变。如图 12 所示, 在电弧熄灭时, 故障相端电压也存在较大的高频畸变, 我们确定了第三个较大的奇异点, 也就是电弧熄灭时刻可以大致确定在 580 ms 左右。

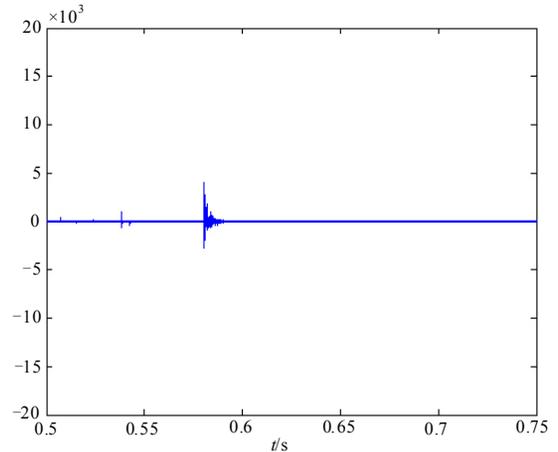


图 12 电弧熄灭时刻定位

Fig.12 Positioning arc quenching time

由仿真结果可以看出, 经过小波变换, 小波系数完全反映了原始信号的突变信息, 通过对小波系数进行分析便可得到原始信号中的变化特征。所以, 将小波变换用于故障电弧检测可以提取故障电弧信号的所有异常信息。

5 总结

本文结合国内外对故障电弧的研究成果, 根据电弧的数学经验方程, 分别建立了一次电弧模型与二次电弧模型、并对它们的动态特性进行了分析。在建立电弧模型过程中, 利用了 PSCAD / EMTDC 中的逻辑判断、传递函数等模块, 准确建立了表述一次、二次电弧动态特性的模型控制块, 将其封装嵌入至输电线路模型界面中, 实现实时控制, 较真实地模拟了线路发生单相瞬时故障时的暂态过程, PSCAD / EMTDC 仿真结果与参考文献[7]中的结果较为吻合。

故障电弧的随机性以及类似故障电弧信号的干扰, 使故障电弧检测的难度较大。现有的检测方法都是基于时域或频域分析, 难以得到故障电弧的全面特征。小波变换由于可在时频局部化, 而且时窗和频窗的宽度可调节, 非常适合突变信号的检测^[13-15]。小波变换可以将故障电弧电压信号的所有

有用信息通过小波系数反映出来, 经过综合分析便可做出有效判断。本文利用 Db 小波对电弧故障时故障相端电压进行分析, 提取其高频分量, 检测出电弧故障信号奇异性, 从而能够较为准确地识别电弧熄灭时间。在满足可靠性的同时, 更提高了重合闸动作的快速性, 这为超高压输电电路自适应重合闸技术打好了非常关键的基础。

参考文献

- [1] 王仁甫. 电弧现象模型的发展[J]. 高压电器, 1991, 27 (4): 39-46.
WANG Ren-fu. Arc phenomenon model and its developing[J]. High Voltage Apparatus, 1991, 27 (4): 39-46.
- [2] 年培新, 罗时璜. 低压配电领域中的故障电弧防护[J]. 低压电器, 2000 (1): 22-26.
NIAN Pei-xin, LUO Shi-huang. Protection of fault arc in the fields of low voltage power distribution[J]. Low Voltage Apparatus, 2000 (1): 22-26.
- [3] 何正友. 利用小波分析实现 EHV 输电线路单端量暂态保护的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21 (10): 10-14, 19.
HE Zheng-you. A study of EHV transmission lines non-unit transient protection based on wavelet analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21 (10): 10-14, 19.
- [4] Radojevic Z M, Terzija V V, Djuric M B. Numerical algorithm for blocking auto reclosure during permanent faults on overhead lines[J]. Electric Power System Research, 1998, (46): 51-58.
- [5] Dudury L M. UHV power transmission line electromagnetic transients in the single-phase reclosing currentless pause. Inproc[C]. //7th Int Symp Short Circuit Currents Power Syst. 1996.
- [6] 韩笑, 宋丽群, 李先允. 基于奇异性检测的高压输电线路暂态保护判据仿真研究[J]. 继电器, 2005, 33 (11): 26-30.
HAN Xiao, SONG Li-qun, LI Xian-yun. Simulation research on protection criterion for high-voltage transmission line based on theory of singularity detection[J]. Relay, 2005, 33 (11): 26-30.
- [7] Johns A T, Aggarwal R K, Song Y H. Improved techniques for modeling fault arcs on faulted EHV transmission systems[J]. Proc Inst Elect Eng Gen, Transm, and Distrib, 1994,141(2): 148-154.
- [8] 成敬周, 张举. 基于电弧复小波检测的单相自适应重合闸[J]. 继电器, 2005, 33 (7): 21-25.
CHENG Jing-zhou, ZHAGN Ju. Study of single-phase adaptive reclosure based on arc detection by complex wavelet algorithm[J]. Relay, 2005, 33 (7): 21-25.
- [9] 程玲, 徐玉琴, 宋稀霖. 基于电弧特性的特高压输电线路单相自适应重合闸[J]. 继电器, 2007, 35 (22): 18-21.
CHENG Ling, XU Yu-qin, SONG Zi-lin. Single-phase adaptive auto-reclosure of EHV transmission line based on the arc characteristic[J]. Relay, 2007, 35 (22): 18-21.
- [10] Djuric M B, Terzija V V. A new approach to the arcing fault detection for fast autoreclosure in transmission systems[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1995, 10 (4): 93-98.
- [11] Shi W, Li F, Han Y H, et al. The effect of ground resistance on secondary arc current on an EHV transmission line[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20 (2): 1502-1506.
- [12] Kulikov Y A, Pushkareva L I. New method of the transmission line protection[C]. //Power and Electrophysics. Korus: 2002: 406-409.
- [13] Ramold M, Idarraga G, Jager J. Transient shunt reactor dimensioning for bulk power transmission systems during normal and faulty network conditions[C]. //International Conference on Power System Technology. 2006: 1-6.
- [14] 范越, 施围. 在单相自动重合闸中检测电弧故障的新方法[J]. 继电器, 1999, 27(6): 5-6.
FAN Yue, SHI Wei. A new method to detect arc fault in single phase automatic reclosing[J]. Relay, 1999, 27(6): 5-6.
- [15] 康健. 接地故障电弧的精确数字仿真及其计算[J]. 继电器, 2002, 30(5): 14-15.
KANG Jian. Exact digital simulation and calculation of fault arcs [J]. Relay, 2002, 30(5): 14-15.

收稿日期: 2010-03-14; 修回日期: 2010-04-19

作者简介:

范李平 (1983-), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 电力系统继电保护综合自动化; E-mail: 2008fanliping@sina.com

袁兆强 (1957-), 男, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事电力系统继电保护和综合自动化方面的教学和研究工作;

张凯 (1983-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事励磁, 直流, 仪表方面的检修与维护工作。