

基于 RTDS 的电弧接地故障自定义建模及仿真分析

杨柳林¹, 李德奎², 陈延明¹, 阳育德²

(1. 广西大学电气工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西电力系统最优化与节能技术
重点实验室(广西大学), 广西 南宁 530004)

摘要: 电弧接地故障建模仿真对于电气设备的研制和电力系统安全运行的分析具有重要意义。基于实时数字仿真仪(RTDS)平台对电弧接地故障进行建模仿真。对 Cassie 电弧的连续系统数学模型进行数值逼近, 将其转换成离散系统数值递推模型; 在 RTDS 的 CBuilder 开发环境中创建了可控的 Cassie 电弧元件模型。通过与 Matlab 标准模型的测试对比实验, 以及电力系统的中性点不接地系统的单相电弧接地故障应用实验, 验证了自建元件模型的正确性和有效性。所建电弧模型填补了 RTDS 仿真模型的空白, 采用的建模方法具有普适性, 为类似的研究提供参考借鉴。研究成果可以应用于电力系统实时电弧故障仿真以及继电保护设备的实时闭环混合仿真检测。

关键词: RTDS; CBuilder; 电力系统; 电弧接地故障; Cassie 电弧; 仿真; 用户自定义元件模型

User defined modeling and simulation of arc grounding fault based on RTDS

YANG Liulin¹, LI Dekui², CHEN Yanming¹, YANG Yude²

(1. College of Electrical Engineering, Guangxi University, Nanning 530004, China; 2. Guangxi Key Laboratory of Power System Optimization and Energy Technology (Guangxi University), Nanning 530004, China)

Abstract: The fault arc simulation and modeling is very important for the development of electrical equipment and the virtual analysis of power system operation. This paper studies the arc grounding fault modeling simulation based on real time digital simulator (RTDS). The mathematical model of the continuous system of Cassie arc is numerically approximated and converted into a numerical recursive model of the discrete system; a controllable Cassie arc element model is created in the RTDS's CBuilder development environment. Through comparison with MATLAB standard model and experimental testing, as well as the neutral ungrounded system of single-phase arc grounding fault application experiments, the correctness and validity of the self-element model is validated. The arc model built in this paper fills the gap of RTDS simulation model, the method of modeling is universal, and it provides reference for similar research. The research results can be used in real-time arc fault simulation of power system and real time closed loop hybrid simulation of relay protection equipments.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China (No. 51567004).

Key words: RTDS; CBuilder; power system; fault arc grounding; Cassie arc; simulation; user defined element model

0 引言

电弧性接地故障是一种较为常见的电力系统单相接地故障形式^[1], 由此产生的电弧过电压对电气设备及电力系统安全运行都会产生严重影响^[2-3]。因此, 研究电弧接地故障的电气特性具有重要意义。

研究电弧接地故障的方法一般分为两种: 基于物理实验的方法^[4-5]和基于数字仿真的方法。由于基于物理实验的方法具有诸多局限性^[6], 因而研究人

员多采用数字仿真的方法进行研究。如文献[7-8]以开关的开合来表征电弧的燃熄, 仿真模型过于简单, 不能体现电弧复杂的电气特性; 文献[9]根据实测的电弧波形数据来建立电弧等效模型, 由于实测数据不易获取, 所建模型不具有普适性; 文献[10]构建了电弧的混沌模型, 但模型复杂不易于数字仿真实现; 文献[11]利用 EMTP 的可控时变电阻模型来等效故障电弧, 这是一种近似的电弧建模方法; 文献[12-13]利用 Matlab 的微分方程编辑器构建接地电弧仿真模型, 以及文献[14]利用 PSCAD / EMTDC 的逻辑判断和传递函数模块构建接地电弧仿真模

型, 都实现了较为精确的电弧数字仿真, 但由于受模块功能的制约, 参数调整较困难, 导致这种建模方法不够灵活。

采用数字仿真的方法研究电力系统电弧接地故障, 专业的仿真平台和精确的数值仿真模型是关键。RTDS 是一种公认的电力系统专业仿真平台, 已被广泛应用于电力系统的诸多研究领域^[15-16]。利用 RTDS 带有大量数字量和模拟量输入/输出接口和功率放大器等设备可以对电力系统中的测量与继电保护设备进行实时闭环混合仿真测试。由于 RTDS 的元件库中没有提供现成的电弧模型, 想要利用 RTDS 平台电力系统电弧接地故障进行仿真研究与设备测试, 需要用户自建电弧模型。

本文基于 RTDS 平台对电力系统电弧接地故障进行仿真研究, 以 Cassie 电弧为对象, 推导出用于仿真的数值递推模型; 利用 RTDS 的 CBuilder 开发环境创建了 Cassie 电弧元件模型, 编写了元件模型的实时运行程序; 搭建测试电路, 对自建电弧元件模型进行测试实验, 通过与 Matlab/Simulink 软件的标准电弧模型的对比, 验证了自建电弧模型的正确性; 最后将所构建 Cassie 电弧模型应用于电力系统的单相电弧接地故障实验, 实验结果表明了自建模型的有效性。

1 RTDS 用户自定义元件模型方法

虽然 RTDS 的模型库提供了丰富的仿真元件模型, 但还是会出现个别元件没有相应模型或者现有仿真元件与实际元件差异较大的情况, 因此用户需要通过建立元件数值方程并编制相应计算程序, 创建用户自定义元件模型(即 UDC 元件模型)以满足系统建模需要。

为便于用户构建 UDC 元件, RTDS 提供了一种可根据用户需要自主开发、自定义功能的开发环境——CBuilder, 通过 CBuilder 构建 UDC 元件模型的步骤如下:

- 1) 绘制元件图形;
- 2) 对元件的输入输出端点进行定位;
- 3) 定义元件的各项属性参数;
- 4) 编写元件的初始化程序;
- 5) 编写在 RTDS 中执行的实时运行程序;
- 6) 编译 UDC 元件模型;
- 7) 在仿真案例中加载 UDC 元件模型。

构建的 UDC 元件模型包括两个部分: ① DRAFT 图形文件, 用于定义和描述元件的各项属性; ② UDC 程序文件, 用于定义和描述元件运行特性, 其代码区中的程序段在仿真过程中的每个时

钟步长里反复执行。当 UDC 元件的 DRAFT 图形文件和 UDC 程序文件被创建和编译通过后, 该 UDC 元件就能够像 RTDS 元件库的其他元件一样被调用。

2 电弧模型的实现

通过对电弧的宏观研究, 一般认为电弧是一个时变电阻, 从而采用非线性微分方程式来描述电弧^[17]。目前已有多种电弧模型, 其中的 Cassie 电弧模型被认为是一种较为有效的模型^[18]。在 RTDS 中创建 Cassie 电弧模型, 其实质是将 Cassie 电弧的连续系统数学模型近似成离散系统数值递推模型。

2.1 Cassie 电弧的数值形式

Cassie 电弧的动态微分方程式为^[19]

$$\frac{d \ln g}{dt} = \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{U_c^2} - 1 \right) \quad (1)$$

式中: g 为电弧电导; τ 为电弧的时间常数; u 为电弧电压; U_c 为电弧电压常数。

由式(1)可得,

$$\ln g = \int \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{U_c^2} - 1 \right) dt \quad (2)$$

式(2)的时间离散的表达式为

$$\ln g(t) = \int_{t-\Delta t}^t \frac{1}{\tau} \left(\frac{u^2}{U_c^2} - 1 \right) dt + \ln g(t - \Delta t) \quad (3)$$

式(3)中, Δt 为时间步长。

用隐式梯形积分公式, 将式(3)化为差分方程:

$$\ln g(t) = \frac{1}{\tau} \left\{ \frac{\Delta t \left[\left(\frac{u(t)^2}{U_c^2} - 1 \right) + \left(\frac{u(t-\Delta t)^2}{U_c^2} - 1 \right) \right]}{2} \right\} + \ln g(t - \Delta t) \quad (4)$$

式中: $g(t-\Delta t)$ 表示前一时刻的电弧电导值; $g(t)$ 表示当前时刻的电弧电导值; $u(t-\Delta t)$ 表示前一时刻的电弧电压值; $u(t)$ 表示当前时刻的电弧电压值。

由式(4)改写成下列递推形式:

$$\begin{cases} K(t) = \frac{\Delta t}{2\tau} \left\{ \frac{u(t)^2 + u(t-\Delta t)^2}{U_c^2} - 2 \right\} + \ln g(t - \Delta t) \\ g(t) = e^{K(t)} \end{cases} \quad (5)$$

式(5)便是 Cassie 电弧在 RTDS/UDC 建模中所需的离散系统数值递推计算模型。

2.2 模型实现

在 RTDS 的 CBuilder 开发环境下创建的 Cassie 电弧元件模型如图 1 所示。该模型中, N1 和 N2 为元件的电气量输入输出端; EN 端为起弧使能端,

当 EN 端为逻辑真值时, 便发生故障电弧; 否则, 无故障电弧。

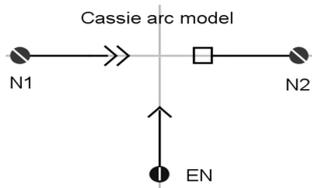


图 1 Cassie 电弧元件图形

Fig. 1 Cassie arc element graphics

该元件在仿真前还需设定图 2 中所示的参数:
 τ —电弧时间常数, 单位为 s; U_c —电弧电压常数, 单位为 V; g_0 —电弧初始电导, 单位为 S。

Cassie_arc.def					
CONFIGURATION		MONITORING		Signal Names	
Parameters					
Name	Description	Value	Unit	Min	Max
τ	the arc time constant [s], $\tau > 0$.	0	s		
U_c	the constant arc voltage [V], $U_c > 0$.	0	V		
g_0	the initial conductance of the arc [S], $g_0 > 0$.	0	S	0	

图 2 Cassie 电弧元件参数设置对话框

Fig. 2 Cassie arc element parameter setting dialog

在 RTDS 的 CBuilder 中编写的 Cassie 电弧 UDC 程序流程图如图 3 所示, 该程序被编译后在指定的 RACK 中运行。

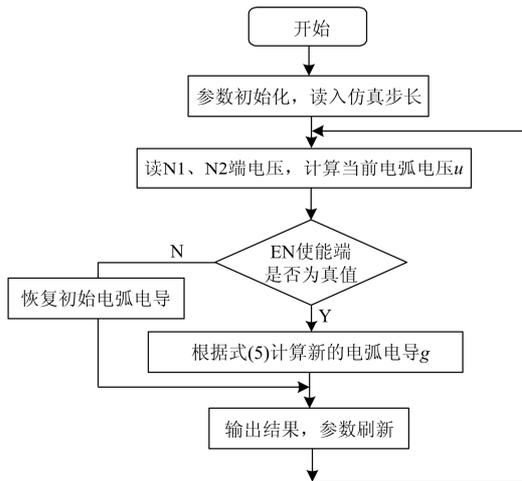


图 3 程序流程图

Fig. 3 Program flow chart

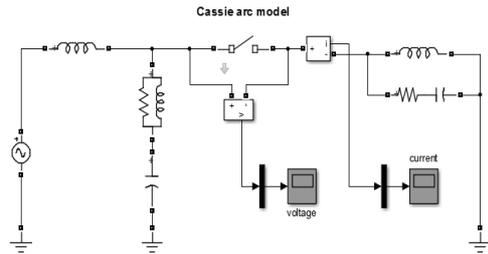
3 仿真实验与分析

为验证自建 Cassie 电弧元件的正确性和有效性, 进行了测试实验和应用实验。测试实验是用自建 Cassie 电弧元件与 Matlab 仿真软件中的标准模型

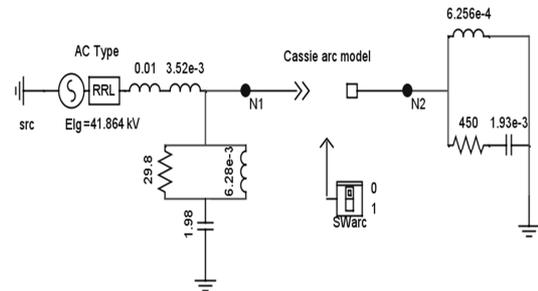
进行对比; 而应用实验是将自建 Cassie 电弧元件用于电力系统中性点不接地系统的电弧接地故障仿真实验。

3.1 测试实验及分析

参照图 4(a)中 Matlab/Simulink 的仿真电路, 在 RTDS 中搭建了相同的测试电路, 如图 4(b)所示。电路参数为: 电源电压为 41.86 kV, 频率 60 Hz, $\tau = 1.2 \times 10^{-6}$ s, $U_c = 3.850$ kV, $g_0 = 1$ S, 仿真时长设置为 0.2 s。



(a) Simulink 电弧模型测试电路

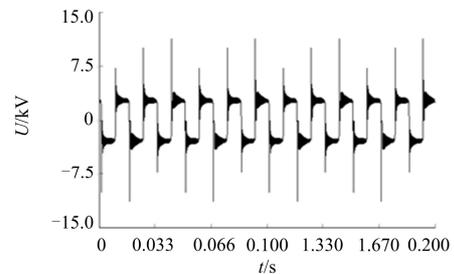


(b) RTDS 电弧模型测试电路

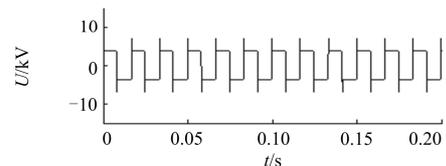
图 4 RTDS 电弧模型测试电路

Fig. 4 RTDS arc model test circuit

RTDS 测试电路的电弧电压和电流波形仿真结果如图 5、图 6 所示。



(a) RTDS 电弧电压波形



(b) Simulink 电弧电压波形

图 5 电弧电压波形

Fig. 5 Arc voltage waveform

由图 5 中可以看出, 电弧电压波形在前半波电弧电压高于后半波, 后半波电弧电压较为平稳, 这是因为在前半波建弧阶段电弧温度较低, 电弧电阻很大, 到后半波进入稳定燃弧阶段, 电离程度较高, 电弧电阻减小。通过与 Matlab/Simulink 的标准电弧模型的仿真结果对比, 发现二者形态相同, 验证了模型的准确性。

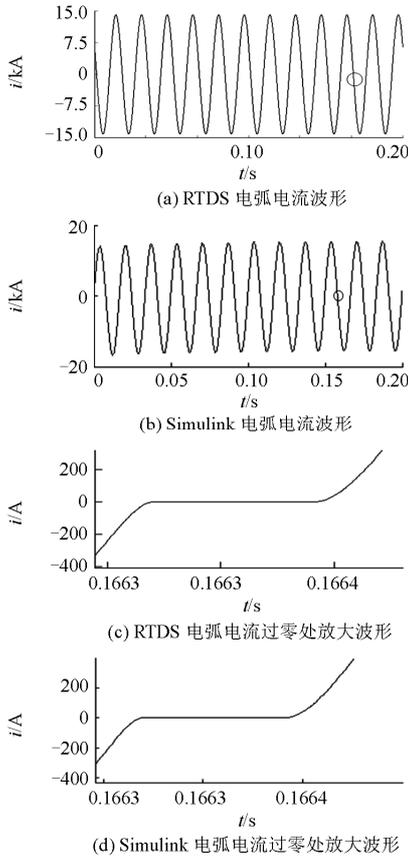


图 6 电弧电流及其细节波形

Fig. 6 Arc current and its detail waveform

由图 6(a)可以看出, 电弧电流形态大体为正弦波。图 6(c)为 RTDS 仿真电弧电流过零处(图 6(a)中圆圈标记处)的放大波形。可以看出, 零序电流在过零处有明显的“零休”现象^[13]: 在过零处电流值几乎为零且变化非常缓慢。通过与图 6(b)、图 6(d)中 Matlab/Simulink 标准电弧模型的仿真结果对比, 发现两者有相同的电弧电流特征。

由上述分析可以得出, 自建电弧元件测试结果与标准测试电路有相同的电压、电流特征。对比结果表明了 RTDS 自建电弧模型的正确性。

3.2 应用实验及分析

在 RTDS 中搭建中性点不接地的三相系统, 进

行单相电弧接地故障仿真, 系统模型如图 7 所示。系统参数设置为: 电源电压 110 kV, 变压器变比为 110/11 kV, 采用 Yd 接法, 架空线路采用贝杰龙模型, 线路长度都为 10 km, 负载为三角形接线方式, 电阻设为 1 000 Ω, 电弧参数同上。

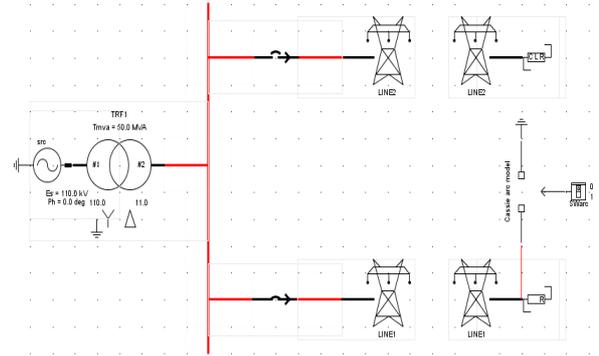


图 7 单相电弧接地故障 RTDS 仿真测试电路
Fig. 7 Single-phase arc grounding fault RTDS simulation test circuit

对图 7 系统进行单相电弧接地仿真实验, 结果如图 8~图 11 所示。

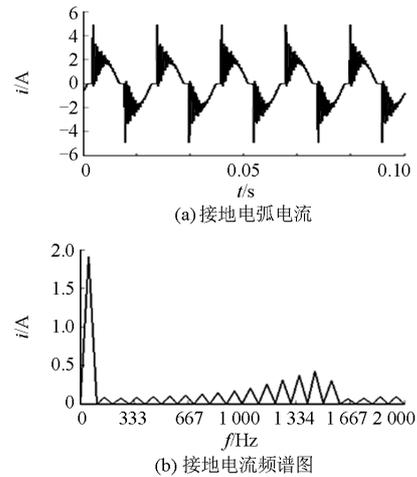


图 8 接地电流波形及其频谱图

Fig. 8 Waveforms of earth current and its spectrum chart

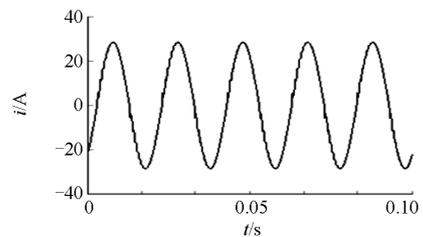


图 9 故障相电流波形

Fig. 9 Fault phase current waveform

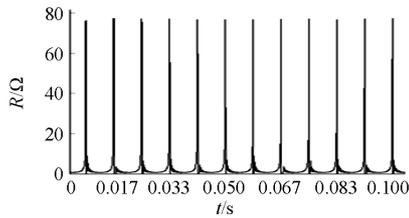


图 10 电弧电阻波形

Fig. 10 Arc resistance waveform

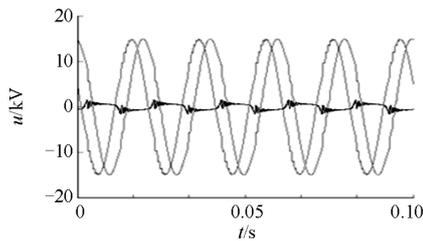


图 11 母线三相对地电压波形

Fig. 11 Three phase to earth voltage waveform of bus

从图 8(a)接地电弧电流波形可以看出, 发生电弧接地故障时接地电流频率成分较为复杂。图 8(b)频谱图显示, 电弧电流中工频基波成分的含量最大, 其中含有较多的 3、5、7、9 等奇数次谐波成分, 高频振荡频率集中在 1 000~1 700 Hz 范围, 符合小电流接地系统发生弧光接地故障时接地电流频谱特征。由图 9 所示波形看到, 故障相电流波形由于叠加了接地电弧电流, 表面变得不再光滑。而从图 10 电弧电阻波形图可以看出, 在接地电流过零处附近电弧电阻急剧上升, 这是因为在建弧和熄弧阶段, 电弧电压降低导致电弧电离程度减小, 从而使电阻急剧升高。图 11 波形显示故障相对地电压降低, 非故障相对地电压上升, 仿真结果符合中性点不接地系统发生单相弧光接地时三相对地电压的故障特征。

通过电力系统单相电弧接地故障的仿真实验, 表明了 RTDS 自建电弧模型的有效性, 其能够和 RTDS 系统模型很好地融合, 可用于复杂三相电力系统的仿真。

4 结论

本文基于 Cassie 电弧的精确连续数学模型, 采用数值逼近的方法, 推导出电弧的离散系统数值递推计算模型。在 RTDS 的 CBuilder 开发环境中创建了 Cassie 电弧模型, 填补了 RTDS 仿真模型的空白。通过与 Matlab 标准模型的仿真结果比对, 验证了自建电弧模型的正确性; 将自建电弧模型应用于电力

系统中性点不接地系统的单相电弧接地仿真实验, 实验结果表明所建电弧模型的有效性。

采用 RTDS/UDC 方式编程创建电弧元件, 模型精确, 方法简洁、灵便, 该建模方法具有普适性, 为类似研究提供了参考借鉴; 所建电弧元件模型可用于复杂电力系统的电弧故障仿真, 研究成果为进一步开展电力系统实时电弧故障仿真以及实时闭环仿真检测奠定了基础。

参考文献

- [1] WU Huaren, LI Xiaohui, STADE D, et al. Arc fault model for low-voltage AC systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20(2): 1204-1205.
- [2] 张喜玲, 杨慧霞, 蒋冠前. 弧光保护关键技术研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(14): 130-135.
ZHANG Xiling, YANG Huixia, JIANG Guanqian. Study on key technologies of electric arc protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(14): 130-135.
- [3] 陈奎, 程天华, 彭伟光, 等. 馈电开关用电弧性单相接地保护方法的研究[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(3): 107-111.
CHEN Kui, CHENG Tianhua, PENG Weiguang, et al. Research of arc single-phase earth protection for feed switch protection[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(3): 107-111.
- [4] 王晓远, 高淼, 赵玉双. 阻性负载下低压故障电弧特性分析[J]. 电力自动化设备, 2015, 35(5): 106-110.
WANG Xiaoyuan, GAO Miao, ZHAO Yushuang. Characteristic analysis of low-voltage arc fault in resistive load conditions[J]. Electric Power Automation Equipment, 2015, 35(5): 106-110.
- [5] 朱立颖, 武建文. 横向磁场下中频真空电弧形态及电弧电压特性[J]. 中国电机工程学报, 2011, 31(1): 131-137.
ZHU Liying, WU Jianwen. Modes of intermediate-frequency vacuum arc and characteristics of arc voltage under transverse magnetic field[J]. Proceedings of the CSEE, 2011, 31(1): 131-137.
- [6] 许晔, 郭谋发, 陈彬, 等. 配电网单相接地电弧建模及仿真分析研究[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(7): 57-64.
XU Ye, GUO Moufa, CHEN Bin, et al. Modeling and simulation analysis of arc in distribution network[J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(7): 57-64.
- [7] 赵新红, 袁洪, 车伟, 等. 小波变换在小电流接地电弧故障选线中的应用[J]. 高电压技术, 2005, 31(10): 18-20.

- ZHAO Xinhong, YUAN Hong, CHE Wei, et al. Study of arc-grounding fault selection based on wavelet analysis for the small current neutral grounding system[J]. High Voltage Engineering, 2005, 31(10): 18-20.
- [8] 张志霞, 张欣雨. 配电网间歇性电弧接地故障选线方法[J]. 中国电力, 2013, 46(8): 108-111, 117.
ZHANG Zhixia, ZHANG Xinyu. Selection method of intermittent arc-grounding fault based on an adaptive notch filter[J]. Electric Power, 2013, 46(8): 108-111, 117.
- [9] 束洪春, 刘振松, 彭仕欣. 同塔双回线电弧故障单端测距算法[J]. 电力自动化设备, 2008, 28(12): 11-15.
SHU Hongchun, LIU Zhensong, PENG Shixin. Single terminal arc fault location for two parallel transmission lines on same tower[J]. Electric Power Automation Equipment, 2008, 28(12): 11-15.
- [10] 刘晓明, 韩颖, 王尔智, 等. 基于多物理场耦合的高压 SF6 断路器混沌电弧模型[J]. 电工技术学报, 2013, 28(1): 165-172.
LIU Xiaoming, HAN Ying, WANG Erzhi, et al. Chaos of arc model for SF6 circuit breaker based on coupled multiple-physical field simulation[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2013, 28(1): 165-172.
- [11] 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): 14-16.
KANG Jian. Exact digital simulation and calculation of fault arcs[J]. Relay, 2002, 30(5): 14-16.
- [12] 黄绍平, 杨青, 李靖. 基于 MATLAB 的电弧模型仿真[J]. 电力系统及其自动化学报, 2005, 17(5): 64-66, 70.
HUANG Shaoping, YANG Qing, LI Jing. Simulation of arc models based on MATLAB[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2005, 17(5): 64-66, 70.
- [13] 于然, 付周兴, 王清亮, 等. 基于 MATLAB 的电弧建模仿真及故障分析[J]. 高压电器, 2011, 47(9): 95-99, 106.
YU Ran, FU Zhouxing, WANG Qingliang, et al. Modeling simulation and fault analysis of arc based on MATLAB[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(9): 95-99, 106.
- [14] 范李平, 袁兆强, 张凯. 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[J]. 电力系统保护与控制, 2011, 39(5): 51-56.
FAN Liping, YUAN Zhaoqiang, ZHANG Kai. Simulation on arc model of single phase earth fault and PSCAD/EMTDC based on wavelet transformation[J]. Power System Protection and Control, 2011, 39(5): 51-56.
- [15] 纪尚昆, 冯彦维, 阳育德. 基于 RTDS 的电力系统在线无功电压优化控制评估[J]. 电网与清洁能源, 2014, 30(3): 23-29.
JI Shangkun, FENG Yanwei, YANG Yude. Power system online reactive voltage optimal control and assessment based on RTDS[J]. Power System and Clean Energy, 2014, 30(3): 23-29.
- [16] 范宏, 朱牧之, 沈冰, 等. 线路保护实时仿真自动测试平台设计[J]. 电力系统保护与控制, 2015, 43(5): 123-129.
FAN Hong, ZHU Muzhi, SHEN Bing, et al. Research on automatic testing system of line protection based on real time simulation [J]. Power System Protection and Control, 2015, 43(5): 123-129.
- [17] 顾荣斌, 蔡旭, 陈海昆, 等. 非有效接地电网单相电弧接地故障的建模及仿真[J]. 电力系统自动化, 2009, 33(13): 63-67.
GU Rongbin, CAI Xu, CHEN Haikun, et al. Modeling and simulating of single-phase arc grounding fault in non-effective earthed networks[J]. Automation of Electric Power Systems, 2009, 33(13): 63-67.
- [18] 姜斌峰, 王莉. 低压交流电线故障电弧模型研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2009, 21(4): 20-24.
JIANG Binfeng, WANG Li. Research on arc model in AC low-voltage electrical wire fault[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2009, 21(4): 20-24.
- [19] SCHAVEMAKER P H. Arc model blockset[DB]. Power Systems Laboratory, Delft University of Technology, the Netherlands (eps.et.tudelft.nl), 2001.

收稿日期: 2015-08-29; 修回日期: 2015-12-14

作者简介:

杨柳林(1977-), 男, 讲师, 从事电力系统分析计算、电力系统自动装置以及电能质量等方面的研究; E-mail: yang03667@126.com

李德奎(1988-), 男, 通信作者, 硕士研究生, 从事电力系统故障诊断方面的研究; E-mail: ldkgxu@163.com

陈延明(1966-), 男, 博士, 博士生导师, 从事电力电子拓扑、建模、控制与应用, 电力系统自动控制的研究。E-mail: yanmingchen@126.com

(编辑 葛艳娜)