

# 基于 MATLAB 的继电器静态特性仿真程序

刘世明<sup>1</sup>, 井嵘<sup>2</sup>

(1. 烟台东方电子信息产业集团股份有限公司, 山东 烟台 264001; 2. 烟台市电业局, 山东 烟台 264000)

**摘要:** 介绍了一个继电器静态特性仿真程序—PRES C, 该程序在 MATLAB 语言环境下使用, 采用开放式结构, 可以由用户扩充继电器判据, 进行仿真计算和分析。对 PRES C 的几种用处, 包括继电器特性分析、选相元件仿真以及单端电量测距算法仿真等, 都举例进行了演示。

**关键词:** MATLAB 语言; 静态特性; 仿真

**中图分类号:** TM74      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1003-4897(2003)05-0077-04

## 1 PRES C 的设计思想

影响距离继电器工作状态的变化因素有多种, 例如系统阻抗的变化、两端电势角的变化、接地电阻的大小等等。分析继电器动作特性的分析方法也有多种, 如阻抗分析法、电压向量图法、阻抗继电器支接电阻动作特性的计算机辅助分析方法等等。各种方法都有其优点, 也有其不全面的地方。根据研究问题的侧重点不一样, 可以选择不同的分析方法。其实, 这些方法的分析结果都是试图在二维平面上显示继电器的某种动作特性; 而继电器的动作特性与多个因素有关, 即有多个自变量, 当然, 其因变量只有一个: 继电器动作状态——动作或者不动作。

阻抗分析法非常适合于动作方程的推导, 其分析结果也容易在阻抗平面上表示出来。电压向量图法在向量平面上用平面几何的方法演算保护的動作特性, 演算过程和结果清晰直观。要使用这两种分析方法, 都要有一定的平面几何知识, 如果要借助计算机辅助分析, 则需要向量计算机或者计算机的向量处理算法。阻抗继电器支接电阻动作特性的计算机辅助分析方法直接利用计算机进行迭代计算, 计算结果可以在平面图上以线路距离—耐受过渡电阻的形式直观地表示出来, 十分方便简单。为了方便地分析各种继电器的特性, 比较、研究继电器在不同条件下的动作情况, 本程序在“阻抗继电器支接电阻动作特性通用计算机辅助分析程序”<sup>[1]</sup>——“阻抗继电器分析程序”原型的基础上, 进行了一定的变化、改进和扩充, 编制出了全新的“继电器静态特性仿真程序(Protection Relay Emulator of Static Character)”, 简称 PRES C。

PRES C 采用 MATLAB 语言编写, 运行在 MATLAB 语言环境下, 具有方便直观的界面, 并且用户接

口简单方便, 容易扩充。采用 PRES C 工具, 大大方便了继电器性能的分析, 也为产品开发中的方案比较和选择提供了良好的支持。

PRES C 主要利用了 MATLAB 的复数计算功能, 及其强大的图形显示能力。利用 MATLAB 的复数计算功能, 可以十分方便地表示电力系统的相量, 推导计算也非常直观简单; 利用 MATLAB 的强大的图形显示能力, 可以清晰地表达仿真计算的结果, 使得继电器的静态特性一目了然。此外, MATLAB 的解释性执行方式, 也使得程序的开放性得以保证。由于 PRES C 没有采用 MATLAB 中的特殊的函数或 SIMULINK 部件, 因此可以在最基本的 MATLAB 教学版上运行, 无需商业版本, 很适合国内单位和个人的普及应用。

## 2 PRES C 的计算模型

为了比较全面地分析继电器的动作特性, PRES C 考虑的系统是以双机、双回线为基础的。其基本系统结构如图 1 所示。

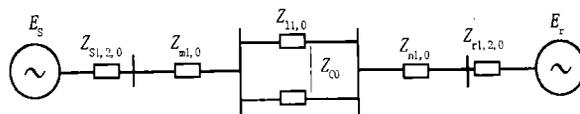


图 1 PRES C 基本系统结构示意图

Fig. 1 The diagram of basic system of PRES C

图 1 中:  $E_s$ 、 $E_r$  是两端的系统电势;  $Z_s$ 、 $Z_r$  分别是系统的内阻抗。 $Z_l$  就是保护安装处的线路阻抗。由于本系统考虑了并联双回线的情况, 因此可以仿真邻线故障对继电保护的影响。当然, 作为一个简单仿真程序, 这里没有考虑跨线故障的情况, 也没有考虑线路的分布电容的影响。此外, 为了方便地研究反向故障以及远端故障对继电器或选相元件等的

影响,系统中还在电源和并联线路之间考虑了连接线。这两条线路的参数  $Z_m$  和  $Z_n$  可以独立设置,既可以与被保护线路的参数相同,也可以与被保护线路的参数不同,其线路长度也可以独立设置,如果设置长度等于零,就表示没有这条线路,由系统直接与保护线路相连。

由于在对称情况下继电器的动作特性很容易分析,既不涉及到互感,又可以不考虑过渡电阻,因此本仿真程序没有考虑对称性故障。PRESC 中可以仿真的几种单故障是三个单相故障,三个两相相间短路以及三个两相经过渡电阻短路共 9 种。对于每一种故障,又可以考虑区内故障、反向故障、邻线故障和正向区外(线外)故障等几种情况。

PRESC 作为一个简单的静态仿真分析程序,所有计算都采用相量计算,计算结果包括正常时的电压、负荷电流、故障后的正、负、零序电流电压等数据也是以相量形式给出。由于不考虑频率偏移等动态因素,因此故障前后的相量也是基于同一参考相量的,因此可以直接用故障后的正序电流相量减去故障前的负荷电流,就得到了故障分量正序电流相量。对于每一种故障,PRESC 程序中的分析方法是首先得出故障点处的三个序分量电流,然后根据序网络得到保护安装处的各序电流分配系数,乘以故障点处的序电流,就是继电器测到的故障分量序电流。而序电压就等于序电流乘以继电器与故障点背端的综合序阻抗。以上结果加上正常状态下的负荷量,就是故障后的电量了。将计算得到的故障电量,然后调用用户选定的继电器或选相、测距等判据函数,得到的判断结果是一个逻辑变量(继电器的动作与否,选相结果正确与否,或者测距结果正确与否)。PRESC 的主程序根据继电器函数文件的判断结果,在每个故障点处采用循环计算及二分法不断修改过渡电阻,最终寻找到该故障点处继电器动作与不动作的临界过渡电阻;然后再进行下个故障点的计算,最终得到该继电器或选相、测距等判据函数在不同故障点的耐受过渡电阻的能力,最后在平面坐标系上显示出仿真计算的结果。由于在二维平面上只能表示一个自变量的函数(在 PRESC 中耐受的过渡电阻是故障距离的函数),因此对于两相接地故障,只考虑了其接地过渡电阻,认为相间过渡电阻为零;而对于相间短路,考虑了较大范围的相间过渡电阻。

在 PRESC 的整个仿真过程中,故障电量的计算以及修改过渡电阻和故障点进行循环计算的过程都是由内部函数完成的,而继电器或选相、测距等判据

函数是开放的,可以由用户自由编程。此外,PRESC 计算中所用的系统和线路参数也是以函数文件的形式存放的,用户也可以自由编程设定,因此可以说 PRESC 是一个开放的继电器静态特性仿真计算平台。

PRESC 计算各种单故障情况下故障电量时采用的都是经典的故障分析中的计算公式,无需特别说明。这里只介绍其中对并联双回线上故障的计算。

并联双回线中任意一条线内部故障时,可以得到如图 2 所示的故障系统阻抗网络示意图。对该图进行分析,列写网络方程,求解后可以得到以下结果。

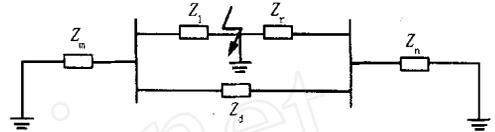


图 2 双回线故障网络示意图

Fig 2 The diagram of couple line fault circuit

从故障点看进去的系统综合阻抗为:

$$Z_{\Sigma} = \frac{Z_l + Z_m + k \cdot Z_m}{1 + Z_a / Z_b}$$

式中:  $k = \frac{Z_l}{Z_d} - \frac{Z_r}{Z_d} \cdot \frac{Z_a}{Z_b}$ ,

$$Z_a = Z_l + Z_m + \frac{Z_m}{Z_d} \cdot Z_l + \frac{Z_n}{Z_d} \cdot Z_l$$

$$Z_b = Z_r + Z_n + \frac{Z_n}{Z_d} \cdot Z_r + \frac{Z_m}{Z_d} \cdot Z_r$$

$Z_l$  上流过的故障电流占故障点的总故障电流的比例为:

$$C_{Zl} = \frac{Z_b}{Z_b + Z_a}$$

$Z_d$  上流过的故障电流占故障点的总故障电流的比例为:

$$C_{Zd} = \left[ \frac{Z_l}{Z_d} - \frac{Z_r}{Z_d} \cdot \frac{Z_a}{Z_b} \right] \cdot \frac{Z_b}{Z_b + Z_a}$$

有了上述公式后,对于并联双回线上的故障,只要得出故障附加状态的序网络图,都可以归为图 2 所示的形式,从而可以方便地求解。需要指出的是,对于零序网络,  $Z_m$  和  $Z_n$  中应该包含有零序互感,这一点在 PRESC 中已经考虑到了。

### 3 PRESC 计算方案举例

关于 PRESC 的使用方法和继电器判据函数文件的编程方法以及计算结果的图形表示的解释在 PRESC 软件包中的说明文件中都有详尽的解释。以下通过仿真结果举例说明 PRESC 的作用。需要说

明的是,以下的示例只是为了说明 PRESC 的作用,其仿真分析的结果以及对结果的分析都是在特定的系统和线路参数等条件下得到的单次仿真的结果,并不是对各保护算法的评价。

### 3.1 距离继电器仿真结果举例

以带记忆的姆欧继电器为例,在设定的系统和线路参数下进行仿真计算,研究姆欧继电器在并联双回线上的静态特性。以下是 PRESC 的计算结果的图形显示。图 3 是在有邻线零序电流补偿的条件下的动作情况,图 4 是没有邻线零序电流补偿的条件下的动作情况。

对比两个仿真结果可以知道,在并联双回线接线的线路上的姆欧继电器,在判据中加入邻线零序电流补偿(图 3),可以保证继电器的保护范围与整定值相同(图 3 中显示整定值为线路长度的 80%);但是邻线零序电流也有负作用,如图 3 中所示,在邻线故障时,继电器也会动作(图 3 中负半平面的阴影区域),另外在线路外部故障时也会有一定的超越(图 3 中 100%~120%之间的阴影区域),因此继电器判据采用邻线零序电流补偿后,必须采取一定的措施,防止发生超越动作等问题。

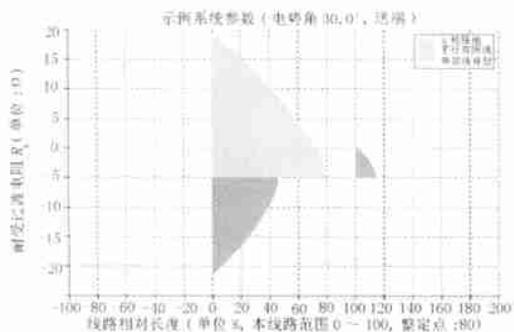


图 3 带记忆的姆欧继电器特性 1

Fig. 3 The character 1 of mho relay with memory function

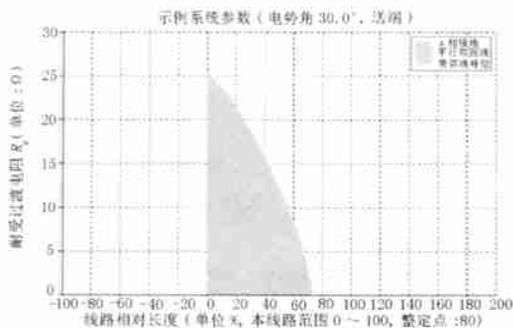


图 4 带记忆的姆欧继电器特性 2

Fig. 4 The character 2 of mho relay with memory function

而如果继电器判据中没有采用邻线零序电流补

偿(图 4),则不会在邻线故障时动作(图 4 中没有负半平面的显示区域),但是继电器会缩短保护范围(图 4 中显示整定值为线路长度的 80%,保护范围约为线路长度的 75%)。

### 3.2 选相元件仿真结果举例

以稳态序分量选相元件为例,用  $\arg(I_0/I_2)$  在复平面上区分出大小相同的 A、B、C 三个区间,落入 A 区则选中 A 相接地故障或 BC 两相接地故障。考察在不同的区间划分条件下 AB 两相接地故障越区落入 A 区的情况。图 5 是  $(-60^\circ, 60^\circ)$  区间划分情况,图 6 是  $(-30^\circ, 90^\circ)$  区间划分情况。图中阴影显示的区域表示 AB 两相接地故障落入了选相的 A 区,而空白区域表示没有落入 A 区。

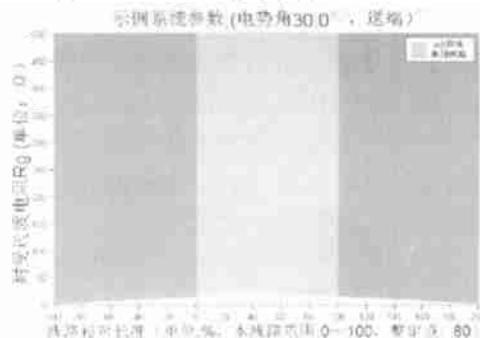


图 5 序分量选相元件特性 1

Fig 5 Character of phase-identify function 1

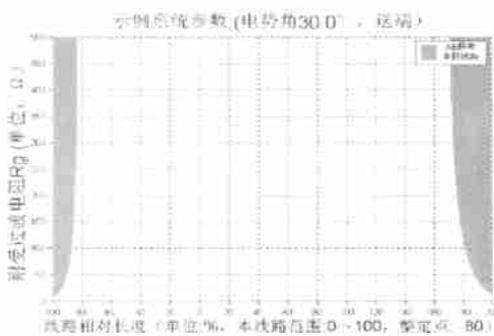


图 6 序分量选相元件特性 2

Fig 6 Character of phase-identify function 2

从仿真结果可以看出,在本次仿真计算所采用的系统参数的条件下,AB 两相接地短路故障会在  $(-60^\circ, 60^\circ)$  的选相区间中有很大的区间,只要过渡电阻稍微大一些,或者故障点较远,就会落入 A 区。因此如果采用这种选相区间,必须有其它措施区分 A 区中的 AB 两相接地故障,或者采用其它方法防止它落入 A 区。

而采用  $(-30^\circ, 90^\circ)$  的选相区间则基本上没有什么问题,从仿真结果图形上,只在距保护很远的地方

经较大过渡电阻的 AB 两相接地故障才会进入 A 区,可以说基本上对保护的选相动作不会产生什么影响。

### 3.3 测距算法仿真结果举例

目前 PRESC 只能计算继电器安装处的单侧电量,因此可以检验采用单端电气量的测距算法。下面以简单的计算电抗测距算法为例,在单相接地故障条件下演示 PRESC 的仿真结果。计算电抗的公式为:

$$X_1 = \frac{U_c \cdot I_{0s} - U_s \cdot I_{0c}}{I_{0s} \cdot (I_c \text{ ctg } \alpha_1 - I_s) - I_{0c} \cdot (I_s \text{ ctg } \alpha_1 + I_c)}$$

式中:下标“c”表示相量的实部,“s”表示相量的虚部,U是母线电压,I是线路电流(含零序补偿),I<sub>0</sub>是零序电流,α<sub>1</sub>是线路正序阻抗角。如果计算结果与真正的故障线路电抗的误差在5%范围内,则认为测距正确,在图中显示在阴影区域内,否则以空白显示。在同样的系统和线路参数条件下,图7是在线路送电端的测距结果,图8是在线路受电侧的测距结果。

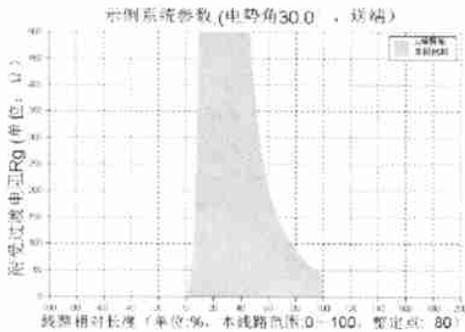


图7 送电端测距结果

Fig 7 Fault-location result at send-end

从仿真结果可以看出,采用该测距算法,在本次仿真的系统参数下,线路上发生故障时,送电端与受电端的测距结果很多情况下是不相同的(送电端的

100%相当于受电端的0%,反之亦然),其中以送电端的测距结果正确性较大。

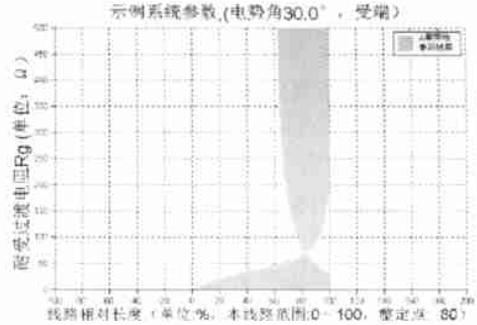


图8 受电端测距结果

Fig 8 Fault-location result at receive-end

## 4 结束语

本文介绍了一个继电器静态特性仿真程序 PRESC,并举例演示了它的计算结果,说明了它的基本作用。文中分别举例介绍了继电器判据、选相计算以及测距算法等三种仿真用途,当然还可以编写完整的选相继电器判据或选相测距以及方向判据等程序,进行继电器完整流程的仿真计算,不再一一介绍。

### 参考文献:

[1] 叶萍. 微型机高压输电线路保护新原理的研究[D]. 武汉:华中理工大学博士论文,1996.

收稿日期: 2002-11-19; 修回日期: 2002-12-28

### 作者简介:

刘世明(1972-),男,博士,从事继电保护产品开发及科研工作;

井 嵘(1971-),男,本科,工程师,从事变电检修、继电保护等工作。

## Protection relay static character emulation program based on MATLAB

LIU Shi-ming<sup>1</sup>, JING Rong<sup>2</sup>

(1. YanTai Electronic Information Industry Co. LTD, YanTai 264001, China; 2. YanTai Power Supply Bureau, YanTai 264000, China)

**Abstract:** This paper recommends a program - PRESC made by author. The program can be used to emulate the static character of distance relay or static character of some elements of distance relay. It is programmed with MATLAB language and works under MATLAB environment. Adopting the benefits of MATLAB environment, PRESC has an open structure. By means of using PRESC, users can expand relay functions to emulate the static character of any distance relay freely. The paper illustrates several usage of PRESC, which include analyzing distance relay character, simulating fault - phase choosing element and simulating a fault - location formula using only local data. The result diagrams of these samples are also demonstrated in the paper.

**Key words:** MATLAB; static character; simulation