

基于实际装置的距离保护 动态仿真研究

刘 强¹, 蔡泽祥¹, 詹少伟², 刘为雄¹

(1. 华南理工大学 电力学院, 广东 广州 510640;

2. 南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 211100)

摘要: 以距离保护为研究对象, 分析距离继电器的动作方程在阻抗平面上的动态特性, 采取与实际保护装置相同的数据处理过程, 开发了距离保护仿真软件。仿真软件数据载入部分采用 COM-TRADE 格式, 图形显示部分采用多视图方法, 将距离保护内部各元件的动态工作过程按故障数据的采样点以直观的方式再现出来, 实现对保护装置动作过程描述的透明化、可视化、定量化。以实际故障录波数据和基于 PSCAD/EMTDC 模型仿真产生的故障数据为例对软件进行仿真, 分析距离保护的启动元件、选相元件、工频变化量继电器、接地距离继电器的仿真结果, 说明软件能精确地再现故障时保护内部各元件的动态行为。并可评估在不同运行工况下, 继电器在数据不同采样点之间的动态表现。

关键词: 电力系统; 距离保护; 动态性能; 仿真

中图分类号: TM 774

文献标识码: A

文章编号: 1006-6047(2007)11-0008-04

0 引言

继电保护的数字化, 改善了保护的整体性能, 提高了保护的可靠性, 在保证电力系统的安全、稳定和经济运行等方面起着重要的作用。但由于保护原理是用软件实现, 继电保护元件的内部动态行为是难以得知的。对于保护装置的误动和拒动, 往往不清楚装置中是哪个模块或逻辑导致了保护的不正确动作^[1-4]。

另外, 随着电网的结构日趋复杂, 运行方式变化频繁, 给继电保护的运行和分析带来困难。如由于交直流系统的相互作用, 使得现有微机保护装置原理及运行方案往往不能满足要求。应研究在新的电网运行环境及特殊故障条件对系统中现已运行的保护装置的影响, 或研究新的保护原理和运行方案以满足系统的不同要求。

因此, 建立面向实际保护装置的仿真系统, 实现保护装置内部元件动作过程描述的透明化^[5-6], 以研究内部元件在数据不同采样点的动态表现, 进行精确的定量分析和试验, 这对于在系统的特殊工况下分析、评估保护装置的动作行为是非常必要的。

按上述思想为研究思路, 以 RCS-901 型微机保护装置为例, 研制了距离保护的仿真软件。该软件采取与实际保护装置相同的采样、滤波、算法、继电器动作方程判别等数据处理过程, 保护内部各元件能按数据采样点进行单步的或连续的仿真, 最大限

度地反映实际距离保护装置的算法和核心继电器的动态特性, 将描述内部动态过程的相关变量以直观的方式显示出来, 并能自动生成测试报告。利用该仿真软件, 可以分析保护的動作过程是否符合产品的性能要求, 保护的動作行为与故障发展过程是否吻合等。

1 距离继电器动作特性和测量阻抗的分析

这里主要研究距离继电器的动作特性, 并对其在系统故障状态下的動作行为进行分析。其实质是, 在各种故障条件下, 求得继电器安装处的电压、电流, 然后代入继电器的動作方程和動作条件^[7], 并按采样点进行动态计算。

另一方面, 虽然没有直接计算出继电器的测量阻抗, 但为了可视化的目的, 通过计算可求得继电器的阻抗特性, 然后与求得的测量阻抗绘制在同一阻抗平面图上^[7-10]。这样, 可直观地观察距离继电器和测量阻抗在经过故障数据的每个采样点时的动态变化过程。

1.1 距离继电器的动作特性

由工作电压 U_{op} 和极化量 U_p 组成的各种特性的距离元件, 是许多微机保护采用的距离元件判据, 继电器的比相動作方程为

$$-90^\circ \leq \arg \frac{U_{op}}{U_p} \leq 90^\circ \quad (1)$$

在相位比较原理构成的继电器中引入各种极化量, 其目的是解决距离保护会出现的一些问题, 如: 反映经过渡电阻短路的能力、超越、误选相、方向性的保证等。这类继电器并未直接计算出测量阻抗,

比较的是 U_{op} 和 U_p 的相位,与 U_{op} 、 U_p 的大小无关。这些极化量的引入,改善了距离继电器的运行性能,提高了可靠性。由于所选用的极化量不同,可构成各种不同的距离继电器,其性能受极化量的影响很大^[11-13]。

以 RCS-901 保护装置为例说明,I 段接地距离继电器是由正序电压极化的方向阻抗继电器和零序电抗继电器组成。正序电压极化的方向阻抗继电器引入移相角 θ_1 为 0° 、 15° 、 30° 以扩大允许过渡电阻的能力,但在对侧电流助增下可能超越,因而引入零序电抗继电器以防止超越。

正序电压极化的方向阻抗继电器和零序电抗继电器(A 相)比相动作方程为^[13]

$$-90^\circ \leq \arg \frac{U_A - (I_A + K3I_0)Z_{set}}{-U_{1,A} e^{j\theta_1}} \leq 90^\circ \quad (2)$$

$$-90^\circ \leq \arg \frac{U_A - (I_A + K3I_0)Z_{set}}{-3I_0 Z_D} \leq 90^\circ \quad (3)$$

式中 U_A 、 I_A 为保护安装处的 A 相电压和电流; I_0 、 K 为零序电流及其补偿系数; Z_{set} 为距离继电器的整定阻抗; $U_{1,A}$ 为 A 相的正序电压; θ_1 为移相角; Z_D 为模拟阻抗,等于 $1 \angle 78^\circ \Omega$ 。

在阻抗平面上,当 $\theta_1=0^\circ$ 时,与式(2)(3)相对应的动作方程为^[13]

$$-90^\circ \leq \arg \frac{Z_{set} - Z_K}{Z_{S1} + Z_K} \leq 90^\circ \quad (4)$$

$$168^\circ + \beta \leq \arg(Z_K - Z_{set}) \leq 348^\circ + \beta \quad (5)$$

式中 Z_{S1} 为保护安装处等值系统的正序阻抗; Z_K 为继电器的测量阻抗; β 是 I_0 和 $I_A + K3I_0$ 的相位差。

保护安装处继电器阻抗特性如图 1 所示,圆为正序电压极化的方向阻抗继电器的阻抗特性,直线 a 为零序电抗的阻抗特性。

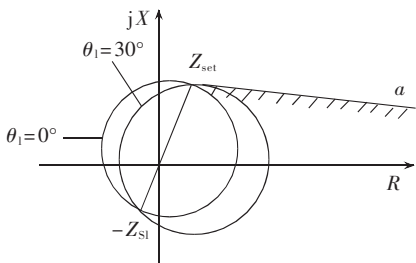


图 1 正方向故障时继电器的阻抗特性

Fig.1 Impedance characteristics of relay at positive direction fault

如果继电器的阻抗动作特性随系统的运行方式、故障情况变化而变化,表现为在阻抗平面上没有固定的动作边界。等值系统的正序阻抗 Z_{S1} 随系统运行方式而变,所以正序电压极化的方向阻抗继电器在阻抗平面上的继电器的动作边界是不固定的。

β 是 I_0 和 $I_A + K3I_0$ 的相位差,约等于单相接地时附加阻抗的阻抗角,与系统运行方式、故障点位置和过渡电阻等有关,所以零序电抗继电器在阻抗平面上的动作边界也是不固定的。

根据保护安装处正序电压和电流分量,可计算出正序阻抗 Z_{S1} ,在整定阻抗 Z_{set} 已知时,继电器的阻抗特性即可画出。系统正序阻抗 Z_{S1} 越大,继电器特性圆下移范围越大。

显然,在电压、电流输入数据的不同采样点,实际保护装置均对继电器的动作方程进行计算和判断,所以对继电器的动态特性的仿真应精确到采样点,继电器动作特性在阻抗平面上表现为按采样点的动态变化。

1.2 距离继电器测量阻抗

以接地继电器为例,设在保护安装处的正方向 l_k km 处 A 相发生经过渡电阻 R_g 接地故障,故障相 A 继电器的测量阻抗为^[13]

$$Z_K = \frac{U_m}{I_m} = Z_1 l_k + \frac{I_f}{I_A + K3I_0} R_g = Z_1 l_k + \Delta Z_A \quad (6)$$

式中 U_m 、 I_m 为保护安装处的测量电压 U_A 和测量电流 $I_A + K3I_0$; I_f 为故障点的短路电流; Z_1 为线路正序阻抗; ΔZ_A 是附加测量阻抗。

由式(6)可见,当 $R_g \neq 0$ 时,测量阻抗中出现附加测量阻抗 ΔZ_A ,破坏了测量阻抗与故障点距离的正比关系。 ΔZ_A 由系统运行情况、故障点位置、过渡电阻等因素所决定。由此可见,测量阻抗是多变量函数。

由式(6)知,求得故障时继电器的测量电压、电流,即可求得计及系统中各种因素变化时的测量阻抗 Z_K 。这样,能在阻抗平面上画出测量阻抗,并根据数据的不同采样点动态刷新显示测量阻抗的变化。

需要说明的是,这里判断阻抗继电器是否动作,是按比相动作方程为依据,精确到采样点,这也是实际保护装置的实现方法。比相动作方程转换到阻抗平面的阻抗特性,是为了能在阻抗平面上直观地观察继电器动作特性按采样点的动态变化,不作为继电器的判据。

2 按实际保护装置构建的仿真系统

这里以 RCS-901 型的微机保护装置为例,研制了距离保护仿真软件。软件结构采用模块化设计思想,下面介绍主要模块。

数据载入部分采用 IEEE 标准的 COMTRADE 格式,以供现场的故障录波数据进行保护的仿真测试。电磁暂态仿真程序、继电保护测试仪等产生的测试数据,经程序转换也可以生成 COMTRADE 格式的数据。

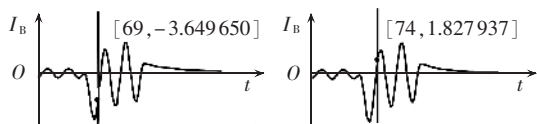
基本算法库模块中包含通用的算法,如傅氏算法、比相算法等,它们主要用于数据处理。而元件模块算法库中则是各种元件算法的数字实现,如零序电抗继电器、正序电压极化的方向阻抗继电器等,主要完成各元件的动作判断、阻抗计算等,是仿真软件的核心。各元件算法的实现是与实际保护相同的。如式(2)的余弦型比相算法为^[13]

$$\operatorname{Re}(\mathbf{U}_{op})\operatorname{Re}(3\mathbf{U}_{Al}e^{j\theta_1})+\operatorname{Im}(\mathbf{U}_{op})\operatorname{Im}(3\mathbf{U}_{Al}e^{j\theta_1})\leq 0 \quad (7)$$

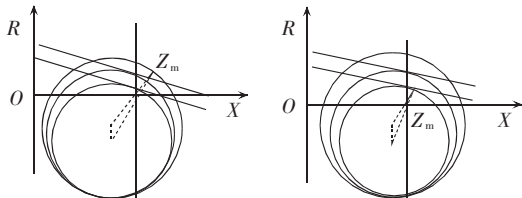
要实现式(7),首先应计算 $\operatorname{Re}(\mathbf{U}_{op})$ 、 $\operatorname{Im}(\mathbf{U}_{op})$ 、 $\operatorname{Re}(3\mathbf{U}_{Al}e^{j\theta_1})$ 、 $\operatorname{Im}(3\mathbf{U}_{Al}e^{j\theta_1})$,以计算 $\operatorname{Re}(3\mathbf{U}_{Al}e^{j\theta_1})$ 为例说明有下式^[13]:

$$\operatorname{Re}(3\mathbf{U}_{Al}e^{j\theta_1})=\frac{2}{N}\sum_{k=1}^N\left[u_{AB}(k)\sin\left(k\frac{2\pi}{N}-\theta_1\right)+u_{BC}(k)\sin\left(k\frac{2\pi}{N}-60^\circ-\theta_1\right)\right] \quad (8)$$

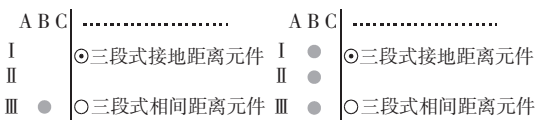
图形显示部分采用多视图的办法,最大程度地展示出整个仿真过程中的信息。仿真软件的部分界面如图 2 所示,图 2(a)显示当 B 相电流在第 69、74 个采样点、瞬时值分别为 $-3.649\,650\text{ A}$ 、 $1.827\,937\text{ A}$ (二次值)时,图 2(c)显示Ⅲ、I 段继电器的 B 相分别动作。图 2(b)可观察继电器动作特性和测量阻抗经过故障数据采样点时的动态变化。继电器动作方程是按采样点动态计算的,在当前采样点发生变动时各视图会同步地更新显示。



(a) 电流波形



(b) 接地方向阻抗继电器特性



(c) 保护的行动结果

图 2 仿真软件的部分界面

Fig.2 Some displays of simulation software

对仿真系统和 RCS-901 距离保护装置进行了同步对比测试,就动作边界、动作时间、过渡电阻、不同故障位置的影响等方面进行了分析。从测试的结果看:仿真软件中元件的动作时间是纯理论上的,比实际装置的动作时间短。但仿真软件与保护装置对同样的数据所反映出的选择性、灵敏度基本吻合,其核心测量元件的动作时间可比,证实了仿真软件是正确和可行的。此仿真软件已经应用于电力系统的继电保护部门,成为继电保护技术人员的有力助手。

3 距离继电器的仿真分析举例

3.1 对实际故障录波数据的仿真分析

2003 年 6 月 27 日下午 15:03:04,220 kV 广东北涌甲线 B 相线路遭雷击发生单相接地故障,两侧

距离 I 段等保护动作,经 50 ms 跳开 B 相开关。将罗涌站北涌甲线的故障录波数据导入距离保护仿真软件后可以看出,在故障录波数据的第 54 个采样点发生故障。表 1 列出部分元件动作时的仿真结果(R_1 为距离保护的启动元件; R_2 为相电流差变化量选相元件; R_3 为 I 段序电流选相元件; R_4 为工频变化量接地阻抗继电器; R_5 为 I 段接地距离继电器; t 为动作时间; n 为元件动作时对应的数据采样点)。

表 1 对实际故障录波数据的仿真结果

Tab.1 Simulative results with real recorded fault data

元件	t/ms	n	动作相别
R_1	5.00	60	-
R_2	5.83	61	B
R_3	16.67	74	B
R_4	15.00	72	B
R_5	16.67	74	B

表 1 说明,保护的选相元件正确动作,测量继电器也能正确选相,各元件的动作时间准确到采样点,仿真软件能精确地再现故障时保护装置内部各元件的动态行为,这对保护装置动作过程的分析是十分有利的。

3.2 基于 PSCAD/EMTDC 输出数据的仿真分析

这里利用 PSCAD/EMTDC 建立北涌甲、乙线的等值模型,相关参数如图 3 所示,M 侧为罗涌站,N 侧为北郊站,I 线为北涌甲线,Ⅱ线为北涌乙线, $E_M=230\angle 0^\circ\text{ kV}$, $Z_{sM1}=7.6705\angle 90^\circ\Omega$, $Z_{sM0}=17.3512\angle 90^\circ\Omega$, $E_N=240\angle 16.2^\circ\text{ kV}$, $Z_{sN1}=4.3378\angle 90^\circ\Omega$, $Z_{sN0}=2.2747\angle 90^\circ\Omega$, $Z_1=0.025\,96+j\,0.315\,6\Omega/\text{km}$, $Z_0=0.1298+j\,0.890\,9\Omega/\text{km}$, $Z_m=j\,0.443\,2\Omega/\text{km}$, $R_g=1.62\Omega$, $l_{MN}=33.9\text{ km}$ 。当距离母线 M 13.56 km 处的 f 点发生 B 相经 1.62Ω 接地短路时,能一定程度上再现罗涌站北涌甲线故障录波的正常潮流及故障波形。将 PSCAD/EMTDC 输出的罗涌站北涌甲线的故障数据导入仿真软件,仿真结果如表 2 的方案 1 所示。表 2 中的 $R_1\sim R_5$ 代表的元件与表 1 相同。

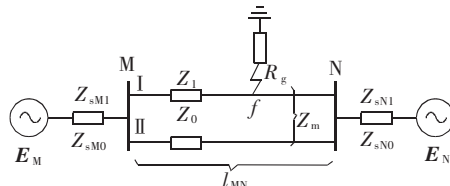


图 3 北涌甲、乙线的等值模型

Fig.3 Equivalent model of BeiYong line I and II

另外,在图 3 所示的等值模型基础上,保持故障地点、故障类型不变时,改变运行工况如等值阻抗、等值电势、故障点的过渡电阻等,产生的故障数据导入仿真软件,以研究系统在不同运行工况下的距离继电器动作行为。表 2 的方案 2、3、4 是分别改变等值电势、故障点过渡电阻、系统阻抗中的一个参数,各元件动作时对应故障数据的采样点。

表 2 改变运行条件时元件动作
相对应的数据采样点

Tab.2 Sampling points when element actions
under different operating conditions

方案	等值模型	R ₁	R ₂	R ₃	R ₄	R ₅
1	图 3 所示	61	61	74	70	74
2	改图 3 中的 E_M 为 $E_M=242 \angle 25^\circ \text{ kV}$	58	58	73	69	73
3	改图 3 中的 R_g 为 $R_g=3 \Omega$	61	62	84	71	84
4	改图 3 中的 Z_{sM0} 为 $Z_{sM0}=2.35 \angle 90^\circ \Omega$	61	61	73	69	73

表 2 说明,仿真软件能精确地反映改变系统运行工况时保护内部各元件的动作行为,这为分析、评估保护装置在特殊工况和故障条件下的动作行为提供了专业辅助工具。

4 结论

a. 在分析实际保护装置的動作行为时,会涉及保护装置的算法、数据窗长度、滤波处理、单个继电器动作特性等细节,应研究这些细节在不同数据采样点之间的表现。文中以距离保护为例,建立了面向实际保护装置的仿真软件。利用该仿真软件,能对距离保护的动态特性进行研究,可作为评价继电保护方案和保护装置故障分析的专业分析工具。

b. 在本文研究思路的基础上,可进一步建立微机保护装置软件的统一分析平台。目前,微机保护的硬件已日趋完善,各厂家硬件设计已趋于统一^[14],保护装置的区别主要在其软件上。如将各厂家提供的实际保护装置软件封装成独立的控件,以插件的形式接入仿真平台,通过计算机数据处理和可视化技术,实现对实际保护装置动作过程的仿真。这样,可利用电网继电保护的故障信息系统^[15-16],逐步建成微机保护装置软件的仿真分析实验室和现场技术人员的高级培训基地,并可作为测试新原理、新保护算法的实验室。建立微机保护装置软件的统一分析平台,对保护装置的事故分析有重要意义,对产品的研制、开发及改进也有重要的指导意义。

参考文献:

[1] 贺家李,郭征. 继电保护可靠性与动态性能仿真[J]. 电网技术, 2004,28(9):18-22.
HE Jia-li, GUO Zheng. Reliability and dynamic performance simulation of protective relaying[J]. Power System Technology, 2004,28(9):18-22.

[2] 刘为雄,蔡泽祥,邹俊雄. 模块化的电力系统继电保护图形数据一体化设计[J]. 电力自动化设备,2003,23(11):51-53.
LIU Wei-xiong, CAI Ze-xiang, ZOU Jun-xiong. Modularized design of graph-datum integration for relay protection of power system[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(11):51-53.

[3] 赵志华. 图形化编程与继电保护装置开发[J]. 电力自动化设备, 2004,24(2):70-72.
ZHAO Zhi-hua. Discussion of graphical programming and protective relay development[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(2):70-72.

[4] 刘云,陈金富,杨雄平,等. 电网继电保护动作仿真软件开发[J]. 电力自动化设备,2007,27(2):90-92.
LIU Yun, CHEN Jin-fu, YANG Xiong-ping, et al. Development of relay protective action simulation software[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(2):90-92.

[5] 赵自刚,黄少锋. 扩充微机继电保护装置功能[J]. 电力系统自动化,1998,22(4):61-63.
ZHAO Zi-gang, HUANG Shao-feng. Extension to the functions of microcomputer-based protective relay[J]. Automation of Electric Power Systems,1998,22(4):61-63.

[6] 江卫良,郝后堂,李先波,等. 微机保护动作过程可视化分析技术的实现[J]. 电力系统自动化,2004,28(14):89-92.
JIANG Wei-liang, HAO Hou-tang, LI Xian-bo, et al. Realization of the visual analysis technique for microprocessor-based protection operating process[J]. Automation of Electric Power Systems,2004,28(14):89-92.

[7] 王梅义. 电网继电保护应用[M]. 北京:中国电力出版社,1999.

[8] 林湘宁,刘沛,徐韬. 一种新的差动保护动作行为分析方法[J]. 电力系统自动化,2003,27(23):45-50.
LIN Xiang-ning, LIU Pei, XU Tao. A novel analysis methodology of differential protection operation behavior[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(23):45-50.

[9] EL-ARROUDI K, JOOS G, MCGILLIS D T. Operation of impedance protection relays with the STATCOM[J]. IEEE Trans Power Del,2002,17(2):381-387.

[10] MARTTILA R J. Effect of transmission line loading on the performance characteristics of polyphase distance relay elements[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,1988,3(4):1466-1474.

[11] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术[M]. 北京:中国电力出版社,2005.

[12] 高中德. 超高压电网继电保护专题分析[M]. 北京:水利电力出版社,1990.

[13] 许正亚. 输电线路新型距离保护[M]. 北京:中国水利水电出版社,2002.

[14] 罗海云,董慧娟. 微机保护平台研究[J]. 电力系统自动化, 2005,29(8):92-95.
LUO Hai-yun, DONG Hui-juan. Microcomputer based protective relay platform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2005,29(8):92-95.

[15] 刘清瑞. 继电保护与故障信息管理系统的结构、功能及其实现[J]. 电力自动化设备,2004,24(4):93-95.
LIU Qing-rui. Main functions and implementation of protective relays and fault-recording information management system[J]. Electric Power Automation Equipment,2004,24(4):93-95.

[16] 燕京,陈政. 电网继电保护及故障信息管理系统设计[J]. 电力自动化设备,2006,26(12):85-89.
YAN Jing, CHEN Zheng. Design of relay protection and fault information management system[J]. Electric Power Automation Equipment,2006,26(12):85-89.

(责任编辑:李 玲)

作者简介:

刘 强(1972-),男,广东梅州人,讲师,博士研究生,研究方向为电力系统继电保护(E-mail:liuqiang601@yahoo.com.cn);
蔡泽祥(1960-),男,江苏南京人,教授,博士,博士研究生导师,研究方向为电力系统继电保护、电力系统稳定分析与控制;
詹少伟(1981-),男,安徽肥东人,硕士,研究方向为电力系统继电保护;
刘为雄(1969-),男,湖北汉川人,副教授,博士,研究方向为电力系统计算与继电保护。

Dynamic simulation of distance protection based on real equipment

LIU Qiang¹,CAI Ze-xiang¹,ZHAN Shao-wei²,LIU Wei-xiong¹

(1. Electric Power College,South China University of Technology,Guangzhou 510640, China;2. Nanjing NARI-RELAYS Electric Co.,Ltd.,Nanjing 211100,China)

Abstract: Taking distance relay as the research object,the dynamic characteristics of its operation equation on impedance plane are analyzed. The simulation software of distance relay is developed applying the same data-handling technique of real protective equipment. COMTRADE data format is used in its data-input module and multi-views graphics are adopted in its display module. The internal information and dynamic behavior of distance relay elements are displayed directly at each sampling point of fault data,which describes the process of protective operation transparently,visually and quantitatively. The simulation software is tested with the real recorded fault data and the simulative fault data based on PSCAD/EMTDC for startup component,phase-selector,power frequency variable relay,grounding distance relay. Test results show that the dynamic behavior of the internal components of real protective equipment under different operating conditions can be exactly reproduced and evaluated.

This work is supported by Natural Science Foundation of Guangdong Province(04020015).

Key words: power system; distance protection; dynamic performance; simulation