

一种基于小波的继电保护启动元件性能监测方法

熊小伏¹, 王胜涛¹, 孙鑫¹, 陈星田¹, 字美荣²

(1. 重庆大学输配电装备及系统安全与新技术国家重点实验室, 重庆 400030; 2. 昆明供电局, 云南 昆明 650011)

摘要: 启动元件的选择以及启动门槛值的大小直接影响到整套继电保护装置的性能, 而目前尚未对继电保护装置的启动元件性能进行自动在线分析评价。提出了一种基于故障录波数据和小波变换的继电保护装置启动性能监测方法, 通过利用故障录波数据和继电保护信息实现对继电保护装置启动元件性能的监测。应用该方法能够对继电保护装置启动元件性能是否满足预定指标进行监测, 对于完整评价继电保护性能、发现隐藏故障、积累整定数据具有参考价值。仿真分析验证了此方法的合理性。

关键词: 小波; 继电保护; 启动元件; 故障录波; 继电保护信息

A method for performance monitoring of relay starting element based on wavelet transform

XIONG Xiao-fu¹, WANG Sheng-tao¹, SUN Xin¹, CHEN Xing-tian¹, ZI Mei-rong²

(1. State Key Laboratory of Power Transmission Equipment & System Security and New Technology, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. Kunming Power Supply Bureau, Kunming 650011, China)

Abstract: The selection of starting elements and the threshold value for starting affects the performance of whole relay protection equipment directly, however, there is no on-line method presently to analyze and evaluate the performance of starting elements in relay protection devices automatically. This paper brings forward an on-line method for monitoring performance of starting elements in relay devices, which is based on fault recorder data and wavelet transform. With the fault recorder data and the relay information, we could monitor the performance of starting elements in relay devices. The method could detect if the performance of starting elements in relay devices have reached the required guidelines, also it is of reference value for evaluating relay performance completely, discovering hidden failure in relay system and accumulating setting data. The simulation results verify the rationality of this method.

This work is supported by National Natural Science Foundation of China(No.50777068).

Key words: wavelet transform; relay protection; starting element; fault recorder; relay information

中图分类号: TM771 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2010)24-0043-05

0 引言

随着电力系统的快速发展, 输电线路的电压等级和输送容量逐步提高, 由输电线路故障所造成的损失也越来越大, 因此快速、有效地切除输电线路故障是电力系统安全运行所要解决的首要问题。启动元件的有效、可靠的快速动作将能保证整组保护装置能够正确及时的动作。如果在故障时启动元件不能动作或者不能及时动作, 则将导致保护拒动或者延误动作时间, 给被保护设备造成重大损失, 从而可能引起上一级保护越级跳闸, 不但延长了故障

切除时间, 影响系统的稳定, 而且可能扩大停电范围^[1-2]。随着信息技术的发展和电力系统继电保护原理的不断完善, 新技术、新原理的应用对继电保护提出快速保护和暂态保护的要求^[3-7], 这对启动元件也提出了更高的要求, 启动元件能否有效、快速正确反映故障信息来为保护所用将显得尤为重要。为此, 有必要对继电保护的启动元件进行监测, 使其能与保护装置密切配合。

小波理论是近年来发展起来的用于信号处理的有力工具。它具有自动改变窗长的功能, 可以很好地把信号在空间和频率上局部化, 赋予了信号的局部奇异性, 从而可以对奇异点进行准确分析定位, 基于此, 小波理论在电力系统故障诊断中得到广泛

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50777068)

应用^[8-10]，在保护装置启动原理上也出现了基于小波变换的新的保护方法^[11-13]。本文提出了基于小波方法实现对继电保护启动元件性能的监测，仿真结果验证了该方法的合理性。

1 继电保护启动元件分析

1.1 突变量启动元件

微机继电保护装置中一般都设有启动元件，启动元件的动作速度、灵敏性和可靠性直接影响到了整套保护装置的性能。启动元件的作用是：当系统正常运行时闭锁保护，而在系统发生异常时，使保护装置进入故障处理程序，如图 1 所示。设置启动元件提高了继电保护装置的可靠性，是目前微机保护中常用的方式。

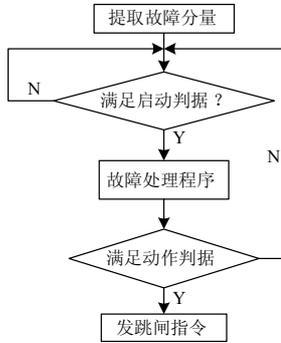


图1 保护启动原理

Fig.1 Startup of relay protection

传统微机保护常采用稳态量启动元件和反映故障前后相电流差突变量启动元件，稳态量启动元件的启动门槛值受系统最大负荷的影响，多用于后备保护；突变量启动元件反应故障灵敏，但有效信息持续时间短，因此多用于快速动作的主保护。

目前对故障后 t_k 时刻的电流突变量 $\Delta i(k)$ 的提取方式有如下几种^[1]：

$$\Delta i(k) = i(k) - i(k - N) \quad (1)$$

$$\Delta i(k) = i(k) + i(k - N / 2) \quad (2)$$

$$\Delta i(k) = [i(k) - i(k - N)] - [i(k - N) - i(k - 2N)] \quad (3)$$

$$\Delta i(k) = [i(k) + i(k - N / 2)] - [i(k - N) + i(k - 3N / 2)] \quad (4)$$

式 (1) ~ (4) 中， N 为一个工频周期内的采样点数。

以某保护装置中的相电流故障分量启动元件动作判据为例：

$$\begin{aligned} |\Delta I_{\varphi\varphi}| &> I_{\text{set}} \\ I_{\text{set}} &= 1.25\Delta I_{T\varphi\varphi} + 0.2I_N \end{aligned} \quad (5)$$

其中： $\Delta I_{\varphi\varphi}$ 是相电流差突变量 $\Delta i_{\varphi\varphi}$ 的积分值； $0.2I_N$ 为固定门槛 (I_N 为额定电流)； $\Delta i_{\varphi\varphi}$ 为浮动门槛，随着变化量的变化而自动调整。当相电流差的突变量 ΔI_{AB} 、 ΔI_{BC} 、 ΔI_{CA} 大于整定值时，保护装置启动。

1.2 继电保护启动元件监测的意义

当电网发生故障或扰动时，要求继电保护启动元件能按照设计要求及时启动。由于目前的启动元件的门槛值常常是通过经验整定的，不同的故障模式、不同的门槛值会使得继电保护的启动时间不同。在继电保护的启动行为分析中，一项首要的任务就是检查继电保护装置在电网故障或扰动冲击下是否启动以及何时启动。但由于保护动作中间过程未反应在故障录波图上，通过故障录波图往往不能直观准确地给出继电保护装置启动行为的评价。

在继电保护信息系统完整建立后，保护装置的中间动作过程(包括继电保护装置的启动时间)以及故障录波信息可以同时获取，因此可以在线分析继电保护装置的启动性能，从而更加准确地评价整套继电保护装置的启动行为，也便于积累运行经验，更合理地给出启动元件的整定门槛。

2 基于小波方法的继电保护启动元件性能监测

2.1 利用故障录波数据进行启动元件性能监测的原理

故障录波装置能够在电力系统发生故障或扰动时自动记录故障信息，所记录的电流、电压等信息为分析电力系统故障和事故提供了科学依据。在正常情况下，当发生电力系统故障时，启动元件能够根据所监测电气量的异常变化自动启动，保护装置的启动元件启动越及时，启动时间与故障发生时间越接近，说明启动元件性能就越优；反之若启动元件不能启动或启动时刻与故障时刻有较大差异，则说明该保护装置启动原理不正确或启动门槛值不准确。因此，启动元件性能的好坏可以通过比较保护装置启动时刻与故障发生时刻之间的差异得出。实际应用中，还应考虑故障信息处理过程中的各种扰动因素，因此引入允许启动时间差异值参与评判，使启动元件性能的监测更为合理。启动元件性能监测原理图如图 2 所示。

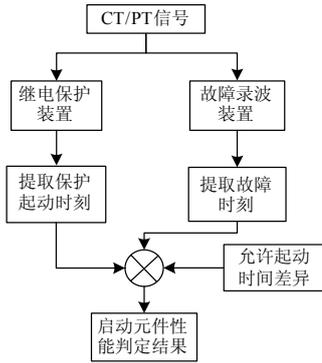


图2 启动元件性能监测

Fig.2 Monitoring performance of starting element

2.2 启动元件性能监测判据

定义保护装置 P_i 启动时差 ΔT :

$$\Delta T = T_i - T_f \quad (6)$$

式中: T_i 为保护装置 P_i 的启动时刻; T_f 为故障的实际发生的时刻; ΔT_e 为保护装置 P_i 启动时差允许阈值, 当继电保护启动性能正常时, 应有:

$$\Delta T \leq \Delta T_e \quad (7)$$

以图3所示系统为例, 安装了采用相电流差突变量启动元件的保护装置 P_1 、 P_2 。

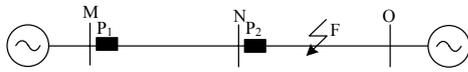


图3 线路保护模型

Fig.3 Model of line's relay protection

当继电保护启动元件性能正常时, P_1 、 P_2 的启动时刻 T_1 、 T_2 均应满足如下的关系:

$$T_1 - T_f \leq \Delta T_e \quad (8)$$

$$T_2 - T_f \leq \Delta T_e \quad (9)$$

若不满足此关系, 则说明相应的保护装置启动元件性能异常。

按上述方法, 对保护装置启动元件启动性能进行监测的关键就是如何准确地确定故障时刻 T_f 以及允许误差 ΔT_e 的大小。电力系统故障情况下, 电流、电压信号将发生畸变, 过去的研究表明, 小波方法是识别信号畸变时刻的很好工具。

2.3 小波方法提取故障时刻

根据小波理论, 将任意 $L^2(\mathbb{R})$ 空间中的函数 $f(t)$ 在小波基下进行展开, 称这种展开为函数 $f(t)$ 的连续小波变换 (Continue Wavelet Transform, CWT), 其表达式为:

$$WT_f(a, \tau) = \left\langle f(t), \psi_{a,\tau}(t) \right\rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{\mathbb{R}} f(t) \overline{\psi\left(\frac{t-\tau}{a}\right)} dt \quad (10)$$

由 CWT 的定义可知, 小波变换同傅里叶变换一样, 都是一种积分变换。

CWT 中, 尺度 a 及时间 τ 均连续变化, 小波基函数 $\psi_{a,\tau}(t)$ 具有很大的相关性, 因此信号 $f(t)$ 的 CWT 系数 $WT_f(a, \tau)$ 的信息量是冗余的。若采用将尺度按照幂级数进行离散化等方法进行离散方法的处理, 将得到离散小波变换, 篇幅所限, 对此不展开详细讨论。

若函数 $\psi(x)$ 被称为基本小波, 则它满足:

$$\int_{\mathbb{R}} \psi(x) dx = 0 \quad (11)$$

令 $\psi_a(x)$ 是以尺度因子 a 对 $\psi(x)$ 的伸缩, 即:

$$\psi_a(x) = \frac{1}{2} \psi\left(\frac{x}{a}\right) \quad (12)$$

显然, 小波变换可理解为当输入为 f 时在系统 ψ_a 下的响应。

又令 $a=2^j$, 则 $\psi_{2^j}(x)$ 被称为二进小波, $Wf(2^j, x)$ 称为二进小波变换:

$$Wf(2^j, x) = f * \psi_{2^j}(x) \quad (13)$$

采用检测小波变换系数模的局部极值点的方法检测信号的奇异点位置在电力系统故障诊断中得到大量的运用。本文中故障发生时刻 T_f 可通过模极大值来准确确定。由于故障时刻模极大值点满足:

$\frac{\partial W_f(a_0, T_f)}{\partial t} = 0$, 且 $\forall t \in (t_0, \delta)$, 都有 $|W_f(a_0, t)| \leq |W_f(a_0, T_f)|$ 成立。于是 (a_0, T_f) 就是模极大值点, 对应的奇异点即故障时刻 T_f 。

2.4 判据 ΔT_e 取值方法

由前可知, ΔT_e 表示了容许继电保护装置实际启动时间与真实故障发生时间的差异大小。无论继电保护装置采用何种启动原理, 这一差值的容许度应有基本一致的标准, 但目前尚未建立此标准。

继电保护装置测试时, 往往只注意整组动作时间。但整组动作时间合格并不表示可忽略对继电保护装置启动性能的分析与监视, 其原因在于整组动作试验时所加的故障量的大小和故障类型均是有限的, 并不能代表所有故障情况。

为此, 本文建议参考取值为: 对于动作时间要求在一个周波以上的继电保护装置, 启动时间差异取 10%; 对于超高速动作的继电保护装置, 启动时

间差异容许值取 5%。

3 仿真分析

以图 4 所示系统为例建立仿真系统，利用上节所述方法实现对故障时刻 T_f 的确定。

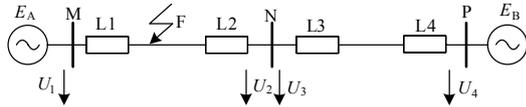


图4 仿真系统模型

Fig.4 Model of the simulation system

系统参数如下：

$E_A=E_B=500$ kV；线路 L1 长度为 42 km，线路 L2 长度为 100 km，线路 L3 长度为 52 km，线路 L4 长度为 100 km；各线路单位阻抗值相同：正序阻抗为 $Z_1=0.01273+j0.2864 \Omega/\text{km}$ ；零序阻抗为 $Z_0=0.3864+j1.2957 \Omega/\text{km}$ ；线路对地正序电容为 $C_1=0.01274 \mu\text{F}/\text{km}$ ；线路对地零序电容为 $C_0=0.07751 \mu\text{F}/\text{km}$ 。

设 $t=0.1$ s 时发生 AB 相间短路故障，采样频率设为 1 200 Hz。首先获取母线 M 处保护装置采集到的电压电流，经过计算得到故障相电流 i_{AB} ，如图 5 所示。

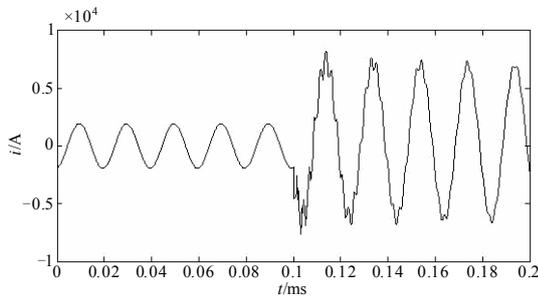


图5 AB短路故障M侧 i_{AB} 波形

Fig.5 Waveform of i_{AB} in bus M for the AB short fault

使用 dbN 小波系中 db5 小波对此暂态信号进行 5 层分解，得到如图 6 所示输出。

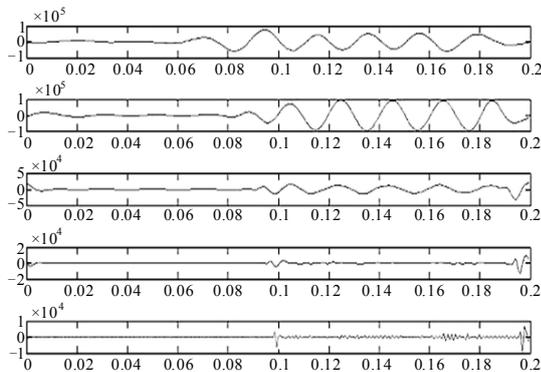


图6 M侧 i_{AB} 的5层小波分解

Fig.6 Wavelet transform of i_{AB} in bus M

图 6 中，由上至下依次为尺度 1~5，其中尺度 5 下对于信号 i_{AB} 突变情况的小波描述最为显著：其中 0.1 s 处为信号发生突变的时刻，而 0.2 s 附近的波动为小波窗的边界效应，与原始信号无关。据此可得到故障发生时刻 T_f 为 0.1 s。

仿真可见，利用小波方法可以相当准确地识别故障时刻。

4 结论

继电保护装置启动元件是否启动以及何时启动，对继电保护动作可靠性和灵敏性有重要影响。有必要监视在电力系统发生各种故障和扰动情况下，继电保护装置启动元件的反应行为。本文提出了一种对启动元件性能进行监测的方法，利用小波方法提取故障波形中的故障时刻，然后将继电保护装置的启动时刻与之进行比较，根据此差异的大小可评价继电保护装置启动元件的启动性能，还可据此调整启动元件的门槛值，达到灵敏性和可靠性之间的平衡。

文中给出了小波算法以及仿真算例，证实了本文所提方法的有效性。

参考文献

- [1] 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.
- [2] 柳焕章，李晓华，尹项根，等. 三相同时刻采样值高灵敏启动元件[J]. 电力系统自动化，2003，27（19）：52-56.
LIU Huan-zhang, LI Xiao-hua, YIN Xiang-gen, et al. High sensitive starting element based on three phase simultaneous sampling values[J]. Power System Technology, 2003, 27（19）：52-56.
- [3] 许西平，王鹏. 光纤通道应用于继电保护中的若干问题探讨[J]. 继电器，2007，35（4）：75-78.
XU Xi-ping, WANG Peng. Discussion on the application of fiber channel in relay protection[J]. Relay, 2007, 35（4）：75-78.
- [4] 陈德树，唐萃，尹项根，等. 特高压交流输电继电保护及相关问题[J]. 继电器，2007，35（5）：1-3.
CHEN De-shu, TANG Cui, YIN Xiang-gen, et al. Special issues and suggestion on protective relaying applied in UHV transmission line[J]. Relay, 2007, 35(5): 1-3.
- [5] 滕林，刘万顺，李贵存，等. 光学电流传感器及其在继电保护中的应用[J]. 电网技术，2002，26（1）：31-33.
TENG Lin, LIU Wan-shun, LI Gui-cun, et al. Optical current transducer and its application in protective relaying[J]. Power System Technology, 2002, 26（1）：31-33.

- [6] 葛耀中. 自适应继电保护及其前景展望[J]. 电力系统自动化, 1997, 21 (9) : 42-46.
GE Yao-zhong. Adaptive protection relay and its prospect of development[J]. Automation of Electric Power Systems, 1997, 21 (9) : 42-46.
- [7] 李九虎, 郑玉平, 古世东, 等. 电子式互感器在数字化变电站的应用[J]. 电力系统自动化, 2007, 31 (7) : 94-98.
LI Jiu-hu, ZHENG Yu-ping, GU Shi-dong, et al. Application of electronic instrument transformer in digital substation[J]. Automation of Electric Power Systems, 2007, 31 (7) : 94-98.
- [8] 李冬辉, 史临潼. 小波理论在直流系统接地故障检测中的应用[J]. 继电器, 2004, 32 (21) : 29-33.
LI Dong-hui, SHI Lin-tong. Method for detecting DC system grounding fault based on wavelet transform[J]. Relay, 2004, 32 (21) : 29-33.
- [9] 何正友, 陈小勤, 等. 基于暂态电流小波熵权的输电线路故障选相方法[J]. 电力系统自动化, 2006, 30(21): 39-43.
HE Zheng-you, CHEN Xiao-qin, et al. Faulted phase selecting method of transmission lines based on wavelet entropy weight of transient current[J]. Automation of Electric Power Systems, 2006, 30 (21) : 39-43.
- [10] 徐勇, 胡德. 小波网络在故障诊断中的应用研究[J]. 继电器, 2000, 28 (8) : 13-15.
XU Yong, HU De. Application of the wavelet neural network in PD fault diagnosis of electrical power transformers[J]. Relay, 2000, 28 (8) : 13-15.
- [11] 李贵存, 刘万顺, 贾清泉, 等. 一种利用小波原理防止变压器差动保护误动的新算法[J]. 电网技术, 2001, 25 (7) : 48-51.
LI Gui-cun, LIU Wan-shun, JIA Qing-quan, et al. A new algorithm to prevent misoperation of transformer based on principle of wavelet transform[J]. Power System Technology, 2001, 25 (7) : 48-51.
- [12] 苏斌, 董新洲, 孙元章. 基于小波变换的行波差动保护[J]. 电力系统自动化, 2004, 28 (18) : 25-29.
SU Bin, DONG Xin-zhou, SUN Yuan-zhang. Traveling wave differential protection based on wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems, 2004, 28 (18) : 25-29.
- [13] 邵能灵, 侯志俭, 李晓华, 等. 基于多尺度B样条小波的发电机采样值差动保护[J]. 电力系统自动化, 2002, 26 (7) : 28-32.
TAI Neng-ling, HOU Zhi-jian, LI Xiao-hua, et al. New generator sample differential protection based on B-Spline wavelets[J]. Automation of Electric Power Systems, 2002, 26 (7) : 28-32.

收稿日期: 2009-12-24; 修回日期: 2010-01-25

作者简介:

熊小伏 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统保护与监控研究;

王胜涛 (1984-), 男, 硕士研究生, 从事电力系统保护研究. E-mail: shengtao1092@sina.com

(上接第 42 页 continued from page 42)

- [10] Taguchi A, Imayoshi T, Nagafuchi T, et al. A study of SMES control logic for power system stabilization[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2007, 17(2): 2343-2346.
- [11] 张崇巍, 张兴. PWM整流器及其控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 325-330.
- [12] Lee Y S. Superconducting magnetic energy storage controller design and stability analysis for a power system with various load characteristics[J]. Electric Power Systems Research, 1999, 51 (1) : 33-41.
- [13] Walker L H. 10MW GTO converter for battery peaking service[J]. IEEE Trans Industry Application, 1990, 26 (1) : 63-72.
- [14] 张文亮, 丘明, 来小康. 储能技术在电力系统中的应用[J]. 电网技术, 2008, 32 (7) : 1-9.
ZHANG Wen-liang, QIU Ming, LAI Xiao-kang. Application of energy storage technologies in power grids[J]. Power System Technology, 2008, 32 (7) : 1-9.
- [15] 李艳, 程时杰, 潘垣. 超导磁储能系统的自适应单神经元控制[J]. 电网技术, 2005, 29 (20) : 57-61.
LI Yan, CHENG Shi-jie, PAN Yuan. Adaptive single neuron based control for superconducting magnetic energy storage unit[J]. Power System Technology, 2005, 29 (20) : 57-61.
- [16] Dechanupaprittha S, Hongesombut K, Watanabe M, et al. Stabilization of tie-line power flow by robust SMES controller for interconnected power system with wind farms[J]. IEEE Trans on Applied Superconductivity, 2007, 17 (2) : 2365-2368.

收稿日期: 2009-12-19; 修回日期: 2010-02-12

作者简介:

张占奎 (1985-), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统分析和风力发电并网研究; E-mail: zkzhang@epri.sgcc.com.cn

王德意 (1962-), 男, 教授, 博士生导师, 长期从事电力系统分析及同步电机励磁系统方面的研究;

迟永宁 (1973-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为风电并网、电力系统稳定与控制。