

基于小波变换模之和的奇异性检测启动元件算法

孔凡坊^{1,2}, 王三桃¹, 潘佩芳¹, 吴军基²

(1.温州市电力局, 浙江 温州 325000; 2.南京理工大学动力学院, 江苏 南京 210094)

摘要: 利用小波变换的奇异性检测原理, 准确检测和定位故障行波波头的到来, 进而构造了基于小波变换模之和的奇异性检测启动元件, 并给出实用元件算法。ATP 仿真和实测故障暂态数据验证表明, 该启动元件满足故障启动的要求——故障时可靠不拒动, 无故障时可靠不误动, 可用于行波保护或暂态量保护的故障检测与启动。

关键词: 奇异性检测; 小波变换模之和; 启动元件; ATP 仿真; 数据验证

Singularity detection starting element algorithm based on wavelet transform modulus sum

KONG Fan-fang^{1,2}, WANG San-tao¹, PAN Pei-fang¹, WU Jun-ji²

(1.Wenzhou Electric Power Bureau, Wenzhou 325000, China; 2. School of Power Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: Coming of fault traveling-wave is detected and located accurately using principle of wavelet singularity detection, singularity detection starting element based on wavelet transform modulus sum is constructed, and practical element algorithm is given. ATP simulation and authentication on measured transient faulted data show that the starting element meets the requirement of fault starting——not resist action when fault and not action when no fault, it is suitable for the fault detection and starting on traveling-wave protection or transient-based protection.

Key words: singularity detection; wavelet transform modulus sum; starting element; ATP simulation; data authentication

中图分类号: TM744 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)11-0024-04

0 引言

启动元件担负着故障检测与启动的任务, 在超高速暂态量保护中, 对其提出了更高的要求——必须在极短时间(如 1 ms)内做出正确判断: 故障时可靠灵敏启动; 无故障和干扰情况下不误启动或尽可能降低其误启动率^[1]。行波启动元件可以通过小波变换检测故障行波波头的奇异性来构造^[2]。文献[3]利用小波变换模极大(WTMM)随尺度的变化规律来识别故障行波与噪声干扰, 但存在故障时拒动的现象。文献[4]在分析基于 WTMM 行波启动元件拒动原因的基础上, 提出了基于小波变换模之和(WTMS)的启动元件, 但该方法因其整定门槛很小而使在伴有强噪声或干扰时有可能误启动。

本文在前人研究的基础上^[5], 对行波启动元件进行了相应改进, 构造了基于小波变换模之和的奇异性检测启动元件。ATP 仿真和实测故障暂态数据验证表明该启动元件满足故障启动的要求。

1 小波变换模之和的奇异性检测原理

在二进小波变换中, 尺度因子 a 取二进序列即

$\{2^j\}_{j \in \mathbb{Z}}$, 若 (a, x_0) 为孤立奇异点, 且为影响锥 $|x - x_0| \leq ca$ 内的模极大点, 则有:

$$\log_2 |W_\psi f(2^j, k_0)|_m \leq \log_2 A + j(\alpha + 1/2) \quad (1)$$

上式若取等号, 进一步得到:

$$\frac{|W_\psi f(2^{j+1}, x_0)|_m}{|W_\psi f(2^j, x_0)|_m} = 2^{(\alpha+1/2)} \quad (2)$$

式(2)就是小波变换模极大随尺度的传播规律, 利用此规律便可区分故障行波和噪声等干扰信号。

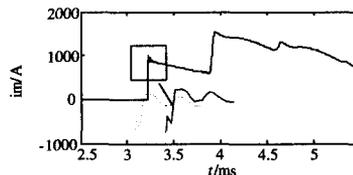


图 1 近距离故障时故障电流 1 模分量
Fig.1 1-mode fault current at close fault

上述规律仅适用于孤立奇异点, 对于影响锥内含有多个奇异点的情况却不适用^[4]。当输电线路近距离故障或对端母线附近故障时, 由于各种反射波紧邻初始故障行波, 可能会造成多个奇异点落入其

相应的影响锥内(如图 1 所示), 其后果是造成故障行波波头奇异度的下降, 甚至使 $LE\alpha < 0$ 。因此, 基于小波变换模极大的奇异性检测方法不能准确检测输电线路近距离故障时故障行波波头的奇异度。

为解决此问题, 定义算子 N , 计算 x_0 点在 $|x - x_0| \leq ca$ 内的小波变换模之和 (WTMS)^[4]为:

$$Nf(a, x_0) = \int_{|x-x_0| \leq ca} |Wf(a, x)| dx \quad (3)$$

进一步有

$$Nf(a, x_0) \leq A'a^{\alpha+3/2} \quad (4)$$

式中: $A' > 0$, 取二进小波变换时, 可推出

$$\frac{Nf(2^{j+1}, x_0)}{Nf(2^j, x_0)} = 2^{\alpha+3/2} \quad (5)$$

信号在 x_0 点的 $LE\alpha$ 也可以用小波变换模之和随尺度变化的规律来度量, 与小波变换模极大值随尺度变化的规律相比, 其适用范围更广, 不仅适用于孤立奇异点, 也适用于非孤立奇异点的度量, 因此该方法更适合构造行波启动元件。

2 基于小波变换模之和的奇异性检测启动元件算法

由此, 可以构造基于小波变换模之和的奇异性检测启动元件。具体步骤如下:

1) 初步检测信号奇异性, 区分正常情况和故障情况。具体方法是利用三阶中心样条小波对故障模电流进行第一尺度离散二进小波变换时, 采用改进梯度算法^[5]来计算改进梯度的模极大值, 即式(6)。

$$Grad(k) = \sum_{n=k+1}^{k+4} i(n) - \sum_{m=k-4}^{k-1} i(m) \quad (6)$$

2) 根据奇异点 k_0 影响锥内的小波系数, 计算 k_0 点影响锥内小波变换模之和 $Ni(2^j, k_0)$, $j=1, 2, 3$ 。

3) 确定小波变换模之和随尺度的传播特性。前文已经讨论过, 故障行波的局部奇异度范围是 $-0.5 < LE\alpha < 1$, 那么

$$R_s = \frac{Nf(2^{j+1}, x_0)}{Nf(2^j, x_0)} = 2^{\alpha+3/2} \geq 2 \quad j=1, 2, 3 \quad (7)$$

若式(7)成立, 则判别该电流为故障电流, 启动元件动作; 否则启动元件不动作。这里将式(6)、式(7)分别称为启动元件的约束①和约束②。

如图2所示为某“弱故障”下原梯度算法(第一尺度小波系数)及改进梯度算法的梯度值。由图2可知, 原梯度算法的模极大值为14.65, 在有效的阈值下是不会可靠动作的; 而改进梯度算法的梯度模极大值为141.89, 从而显著提高了该约束的灵敏度。

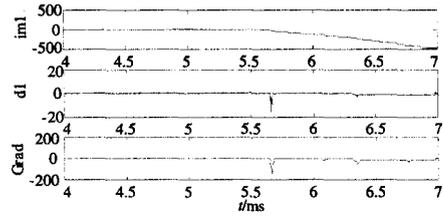


图2 故障初始角为 3° 过渡电阻 500Ω 时 A 相接地故障
Fig.2 A-phase ground fault with inception angle 3°
and path resistance 500Ω

基于小波变换模之和的奇异性检测启动元件算法的具体实现流程如图 3 所示。

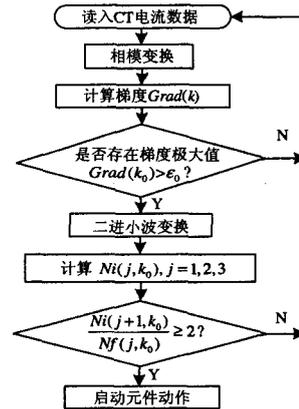


图 3 启动元件的程序流程

Fig.3 Flow chart of starting element

3 ATP 仿真与故障暂态数据验证

3.1 ATP 仿真

如图 4 为一 500 kV 超高压输电系统, 线路参数与结构取自华中电网平武线, 仿真模型采用 J.Marti 频率相关模型。设被保护线路为 MN, 考察 M 侧启动元件的动作性能。由于线路故障中有 70% 以上都是单相接地短路, 且其它类型的故障大都是由单相接地引起的, 因此在确定约束①阈值 ϵ_0 时, 均以单相接地短路为依据。

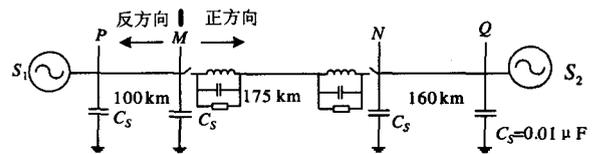


图 4 500 kV 超高压输电系统

Fig.4 EHV transmission system of 500 kV

表 1 给出了故障初始角为 3° 发生单相接地故障时, 启动元件中原梯度算法 $Wi(1, k_0)$ 和改进梯度算法 $Grad(k_0)$ 计算值(二者的模极大值取两线模量中的大者)。由表 1 可知, 约束①的改进梯度算法比原算法

小波变换模极大值基本上提高了一个数量级。

表 1 约束①改进算法与原算法的性能比较

Tab.1 Comparison of improved algorithm and original

algorithm of constraint ①						
故障位置	过渡电阻	$Wi(1,k_0)$	$Grad(k_0)$	过渡电阻	$Wi(1,k_0)$	$Grad(k_0)$
2 km	300	23.27	180.87	500	16.21	126.38
100 km	300	12.28	167.29	500	8.56	116.91
174 km	300	6.15	101.00	500	4.34	70.66

在对约束①门槛值 ϵ_0 进行整定时, 应遵循以下原则: 故障时应可靠地启动, 尤其是在区内“弱故障”条件下要可靠灵敏地启动。由此, 门槛值 ϵ_0 应以区内末端“弱故障”为整定依据。用公式表示为:

$$\epsilon_0 = k_{rel} [Grad(k_0)] \quad (8)$$

其中: k_{rel} 为可靠系数; $[Grad(k_0)]$ 为区内末端“弱故障”时改进梯度模极大值中的最小者。在本仿真测试中, 取 $k_{rel}=0.8$, $[Grad(k_0)]=70.66$, 由此可以确定门槛值的大小为 $\epsilon_0=56.5$ 。

为验证约束①门槛值整定原则的正确性, 对其进行各种故障条件下的仿真。表 2 给出了在过渡电阻为 200Ω , 不同位置、不同初始角的情况下发生各种类型短路故障时, 启动元件约束①计算值。

由表 3 给出的整个启动元件算法的仿真结果可以看出: 该启动元件在区内故障(尤其是弱故障、区内近距离和对端母线附近故障)时均能够可靠启动。

3.2 故障暂态数据验证

利用山东科汇电气股份有限公司提供的实测故障暂态数据对启动元件的原理算法进行验证。

图 5 示出了重庆电网长万变某一线路发生 B 相接地故障时的暂态模电流波形, 同时给出了 1 模暂态电流行波小波变换模极大值沿尺度传播的波形图, 如图 6 所示。

表 2 启动元件约束①的动作性能

Tab.2 Performance of constraint ① of starting element

	故障类型	Ag		ABg	
	故障初始角	2°	30°	2°	30°
50 km	$Grad(k_0)$	99.80	1	2531.9	3275.3
	故障类型	AB		ABC	
	故障初始角	2°	30°	2°	30°
	$Grad(k_0)$	41420.	6	9226.0	8664.5
150 km	故障类型	Ag		ABg	
	故障初始角	2°	30°	2°	30°
	$Grad(k_0)$	75.69	939.0	2.5333	3484.5
	故障类型	AB		ABC	
故障初始角	2°	30°	2°	30°	
$Grad(k_0)$	3650.1	5953.2	7.5511	8324.6	

表 3 单相接地故障时, 启动元件的动作性能

Tab.3 Performance of starting element for single-phase ground fault

故障初始角	故障位置	过渡电阻	$Grad(k_0)$	R_S	动作情况
2°	2 km	20	315.13	2.32	启动
		400	102.76	2.71	启动
	173 km	20	185.58	5.45	启动
		400	60.22	4.48	启动
	60 km	20	278.84	4.50	启动
		400	90.70	4.54	启动
260 km(正向区外)	20	153.52	5.46	启动	
	400	50.46		不启动	
5°	2 km	20	744.2	2.43	启动
		400	242.80	2.67	启动
	173 km	20	420.20	5.24	启动
		400	136.32	4.18	启动
	60 km	20	651.5	4.28	启动
		400	211.97	4.34	启动
260 km(正向区外)	20	304.76	5.25	启动	
	400	83.35	5.29	启动	

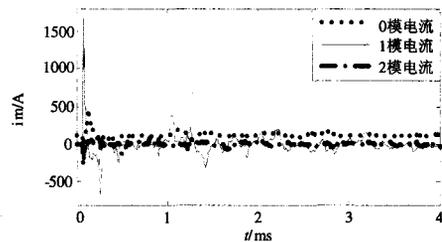


图 5 故障暂态的模量电流

Fig.5 Mode-current of fault transient

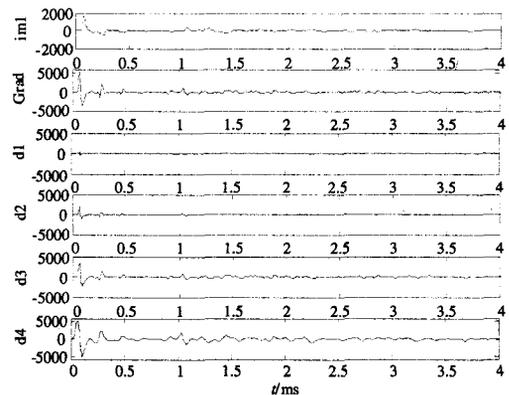


图 6 1 模电流的奇异性检测

Fig.6 Singularity detection on 1-mode current

由启动元件算法得到 $Grad(k_0)=5473.0$, $R_S=3.5025$, 启动元件能够可靠启动。

综合以上启动元件的原理算法及其仿真、数据

验证结果, 总结出基于小波变换模之和的奇异性检测启动元件算法具有以下特点:

1) 约束①由于采用改进梯度算法, 使梯度模极大值增大, 提高了启动元件区内故障时的动作灵敏度, 同时也提高了无故障时约束①的抗干扰性能。

2) 约束②采用基于 WTMS 的奇异性检测, 避免了以往基于 WTMM 的奇异性检测方法在近距离或对端母线附近故障可能出现拒动的情况。

3) 奇异性检测对象是故障行波波头, 同时采用支集长度较短的三阶中心样条小波, 计算复杂度较低, 因此该启动元件具有超高速的动作特点。

需要说明, 实际应用中应根据具体输电网络对约束①的门槛通过数字仿真和现场校验加以确定, 而启动元件应满足的要求便是门槛值确定的原则。

对于电压过零点故障时无行波过程而造成的启动元件启动失败, 文献[5]指出可采用突变量启动原理解决其在此类故障时无法启动的问题。

4 结论

本文对启动元件的两个约束进行了改进, 分别采用了改进梯度算法和小波变换模之和算法, 使启动元件进一步满足故障时不拒动、无故障时可靠不误动的要求。ATP 仿真及故障暂态数据验证表明该启动元件具有可靠的动作性能, 是正确和实用的。

参考文献

[1] 葛耀中. 新型继电保护与故障测距原理与技术[M]. 西安:

西安交通大学出版社, 1996.

[2] Mallat S, Hwang W L. Singularity Detection and Processing with Wavelets[J]. IEEE Trans on Information Theory, 1992, 38(2): 617-643.

[3] 董新洲, 贺家李, 葛耀中. 小波变换在行波故障检测中的应用[J]. 继电器, 1998, 26(5): 1-4.

DONG Xin-zhou, HE Jia-li, GE Yao-zhong. Application of Wavelet Transform in Detection of Fault Traveling Waves[J]. Relay, 1998, 26(5): 1-4.

[4] 段建东, 张保会. 行波启动元件的算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(9): 30-36.

DUAN Jian-dong, ZHANG Bao-hui. Study on Starting Algorithm Using Traveling-waves[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(9): 30-36.

[5] 魏军, 罗四倍. 基于信号奇异性检测的行波启动元件算法的探讨[J]. 继电器, 2007, 35(21): 1-6.

WEI Jun, LUO Si-bei. Traveling-wave Starting Algorithm Based on Signal Singularity Detection[J]. Relay, 2007, 35(21): 1-6.

收稿日期: 2008-07-07; 修回日期: 2008-11-15

作者简介:

孔凡坊(1984-), 男, 硕士, 主要研究方向为电力系统继电保护; Email: kongfanfang2002@126.com

王三桃(1978-), 女, 本科, 从事继电保护及安全自动装置方面的工作;

吴军基(1955-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电力系统及其自动化、电力市场等方面的教学与科研工作。

(上接第 23 页 continued from page 23)

[11] 朱坚民, 郭冰菁, 王中宇, 等. 基于最大熵方法的测量结果估计及测量不确定度评定[J]. 电测与仪表, 2005, 42(476): 5-8.

ZHU Jian-min, GUO Bing-jing, WANG Zhong-yu, et al. Study on Evaluation of Measurement Result and Uncertainty Based on Maximum Entropy Method[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2005, 42(476): 5-8.

[12] 刁艳芳, 王本德, 刘冀. 基于最大熵原理方法的洪水预报误差分布研究[J]. 水利学报, 2007, 38(5): 591-595.

DIAO Yan-fang, WANG Ben-de, LIU Ji. Study on Distribution of Flood Forecasting Errors by the Method

based on Maximum Entropy[J]. Shuili Xuebao, 2007, 38(5): 591-595.

[13] 冯利华. 最大熵原理与地震频度-震级关系[J]. 地震地质, 2003, 25(2): 260-264.

FENG Li-hua. Maximum Entropy Principle and Seismic Magnitude-frequency Relation [J]. Seismology and Geology, 2003, 25(6): 260-264.

收稿日期: 2008-07-18

作者简介:

刘鑫(1983-), 男, 硕士研究生, 研究方向为电力谐波分析; E-mail: janzl7@163.com

杨洪耕(1949-), 男, 教授, 博士生导师, 从事电能质量、电力谐波分析与控制方面的研究与教学工作。