

基于广义多分辨形态学梯度的电力系统振荡与故障的识别算法

张义辉, 刘显荣

(重庆科技学院电子信息学院自动化教研室, 重庆 400060)

摘要: 提出将广义多分辨形态学梯度(GMMG)变换引入电力系统振荡与故障的识别中的算法。该算法能正确区分各种振荡与故障, 避免保护误动; 在振荡过程中发生故障时, 亦能迅速识别, 其性能优于传统的以及基于小波分析的振荡闭锁方案。用EMTP仿真各种振荡和故障得到的结果对所提算法的有效性进行了检验。结果表明: 所提出的算法可以保证振荡与故障的正确识别, 表明其在微机保护装置中具有实时应用的前景。

关键词: 电力系统; 继电保护; 振荡闭锁; GMMG

Generalized multi-resolution morphological gradient based algorithm of fault identification during power swings

ZHANG Yi-hui, LIU Xian-rong

(Chongqing University of Science and Technology, Chongqing 400060, China)

Abstract: A scheme to distinguish swing and faults occurring in transmission lines is proposed based on a generalized multi-resolution morphological gradient(GMMG) transform. The EMTP simulation results show that the faults during power swing can be identified correctly by use of the algorithm so that the protection need not to be blocked during system swing. Also, the algorithm is easy to be realized in the real-time process.

Key words: power system; relay protection; power swing blocking; GMMG

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2008)08-0001-05

0 引言

电力系统振荡会引起保护误动, 振荡过程中不允许保护发生误动作; 而在发生故障时, 要求保护正确动作。这里就提出了振荡与短路故障如何区别以及振荡过程中如何迅速开放保护的问题。在我国, 电网联系相对薄弱, 振荡闭锁元件原则上偏重于如何在振荡中再故障的情况下快速开放保护以及防止振荡中保护误动作。

现有的工程实用判据有很多, 其中 dR/dt [1]和 $d(u \cos \varphi)/dt$ [2]这两种判据比较有相似之处, 它们实质上反映的都是有功分量, 都需要一个较长的延时(至少0.2 s)才能检测出振荡中的故障。

另一种区分振荡与故障的原理是基于 $|I_2| + |I_0|$ 与 $|I_1|$ 之比(I_1 、 I_2 、 I_0 分别为正、负、零序电流值)。当系统在振荡中又发生不对称故障时, 只要两侧摇摆电势的相差减小时, 保护能立刻作出判断, 这一方案对振荡中保护的性能有所改善[3]。但

由于引入了 I_1 作为制动量, 在某些故障条件下延时可能较长, 同时该判据不能识别三相短路。

基于暂态突变量的判别方法一般都能够准确地地区分纯振荡与纯故障, 对于振荡期间发生的各种短路故障也能准确识别, 是一类很有发展前景的方法。文献[4]利用小波变换将电流分解为低频部分(平滑版本)和高频部分(细节版本)。高频部分在振荡时很小, 而短路时很大。因此, 可以利用高频部分作为识别振荡期间发生不对称短路的依据。但是该文的振荡模型对系统频率定义不周全, 有待改进, 同时并没有考虑到合闸角的因素, 而这对于基于暂态突变量的判据方法恰恰十分重要, 另外, 小波算法计算量大, 应用并不灵活。

近年来, 一种新的现代信号处理工具—数学形态学在电力系统信号分析中获得了非常广泛的应用[4-7]。这是一种纯时域的分析, 计算量小, 噪声抑制能力强。数学形态学基本算子均为一类低通滤波器, 通过与微分运算结合, 它进一步可以构成各种高性能奇异信号检测工具。针对上述在缓变信号

中检测突变的困难,更有效地提取信号的高频部分,本文提出将广义多分辨形态学梯度(GMMG)变换引入电力系统振荡与故障的识别算法中。在此基础上,基于EMTP,利用更加符合电力系统机电暂态过程的全过程系统振荡模型,对振荡及故障进行仿真验证,并考虑了合闸角因素,结果证明所提算法具有有效性和实用性,同时具有更高的灵敏度。下面首先简单数学形态学的基本理论和应用思路,进而探讨其设计适合本文应用目的的算法。

1 GMMG 变换

数学形态学(MM)是一种非线性分析方法,其对信号波形特征的研究完全在时域中进行^[8]。腐蚀(erosion)和膨胀(dilation)是最基本的两种MM变换,能实现基本的低通滤波功能。

令 $f(x)$ 和 $g(x)$ 分别表示一维输入信号和结构元素(也是一个信号),设 $D_f \subseteq E$ 和 $D_g \subseteq E$ 分别表示两个函数的定义域集合。用函数 $g(x)$ 的本影去膨胀或腐蚀函数 $f(x)$ 的本影,从而产生新函数的本影。函数膨胀和腐蚀运算的计算公式为:

$$(f \oplus g)(x) = \max_y \{f(x-y) + g(y)\} \quad (1)$$

$$(f \ominus g)(x) = \min_y \{f(x+y) - g(y)\} \quad (2)$$

式中: \oplus 表示膨胀运算; \ominus 表示腐蚀运算。为了检测信号中蕴含的奇异性,文献[9]构造了基本形态学梯度(MG)如下式:

$$G_{\text{grad}}(f) = (f \oplus g)(x) - (f \ominus g)(x) \quad (3)$$

MG常用来进行图像的边沿检测。这个算子只能检测单向性的奇异信号,且灵敏度受单一结构元素的制约。

为了提高检测灵敏度,文献[10]利用MG设计了一种多分辨形态学梯度(MMG)技术。在MMG中,设计一种可变原点位置的扁平结构元素来分别提取波形中上下边沿,利用多分辨的思想逐层递进分析来提取奇异信号,该算法在定位行波波头的应用方面取得了较好的效果。然而,将其直接应用于提取高频噪声环境下的信号奇异时,效果并不理想。

实际上,在多分辨形态学分析中,结构元素宽度的变化并不应局限于二进递减一种。连续递减、长度不变、或连续递增,乃至按一定规律递减或递增,都应当是可行的设计,只要各层的结构元素满足递进的包含关系,就可以在保留稳态或准稳态信号规则性的同时检出奇异信号。文献[11]按照这样

的思路,设计了相应的算法,对强高频噪声环境下的信号检测进行了仿真研究,取得了较好的效果。为与文献[9]的算法相区分,将这种结构元素非二进变化的MMG算法称为广义多分辨形态学变换(GMMG)。并将其应用于自动重合闸方案中瞬时性故障和永久性故障的区分,该算法滤波器效果良好,使得判据在信号平稳段的输出接近1,在信号奇异时刻附近,能量比明显增强,便于整定。这正好适用于我们所研究的振荡与故障的区分。因此,本文将GMMG引入到对振荡和故障的电流波形的分析中,以期利用其对奇异信号较强的敏感性,提取理想的故障信息。

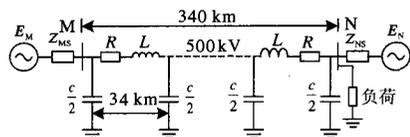
2 基于 GMMG 的振荡与故障的特征识别

虽然振荡与故障的电流波形都具有很大的峰值,但振荡和故障有其自身的特点,这就决定了它们在各个频带中的表现会有区别。选择适当GMMG变换,对它们进行滤波分析,分析其在各频带上的表现细节,将可获得有效的判据。这里的分析信号为相电流,通过仿真分析,可以确定采用结构元素连续递增的设计,当结构元素初时长度为3、在分解的第3层,就可以取得相当满意的效果。利用此设计的GMMG对振荡和故障条件下相电流进行处理,即使振荡中发生切机、甩负荷等异常情况或操作,该滤波输出仍然相对平稳。而在系统正常运行时发生故障,将引发一个强暂态过程,故障电流通过GMMG滤波后,奇异时刻电流比起振荡电流和各种扰动情况下的而言要大得多。即使在振荡中发生故障,通过GMMG的信号检测,故障与非故障的区分仍然非常明显。由于系统的结构参数和运行参数可能变化较大,采用信号突变的绝对值进行判断适应性不强。为此,提出一种基于相对值比较的判据,设计有两个数据窗,数据窗长均为一个周波,两个数据窗的起点也相隔一个周波,判据采用前一个数据窗内最大绝对值与后一个数据窗最大绝对值相比较,当该相对值大于某一阈值时,判为故障,否则判为非故障,阈值值可通过充分的仿真实验确定。

3 EMTP 仿真试验及结果分析

3.1 仿真模型

仿真系统模型采用典型的两机系统,如图1所示。为了模拟切机过程,N侧实际上是由两台发电机模拟的机群。其中一台为相对于M侧机群的失步系统,另一台容量较小的发电机模拟在切机时被切去的容量。



$Z_{MS1}=Z_{NS1}=2.534+j200.46 \Omega$, $Z_{MS0}=Z_{NS0}=1.121+j67.23 \Omega$,
 $X_1=0.2783 \Omega/\text{km}$, $R_1=0.027 \Omega/\text{km}$, $X_0=0.6494 \Omega/\text{km}$,
 $R_0=0.1948 \Omega/\text{km}$, $C_1=0.0127 \mu\text{F}/\text{km}$, $C_0=0.009 \mu\text{F}/\text{km}$,
 $LD=2000+j986 \text{ MVA}$.

图 1 仿真系统模型

Fig.1 Power system for simulation

MN 为一条 500 kV, 340 km 的模拟输电线路, 线路参数源于华中电网平武线。模拟线路由 10 个 π 型等值电路串联而成。在所设定的系统参数下, 振荡中心位于线路的中点。为更好地讨论问题, 短路点设在振荡中心处。因为在振荡过程中两侧电势相对相角摆开到 180° 时, 该点的电压为零, 与三相短路无异; 此时若发生短路故障, 电流变化非常小, 特征最为轻微。

振荡模型采用文献[12]中的面向继电保护的全过程系统振荡模型。该模型较之以前的振荡模型具有清晰的物理特征, 对振荡过程中的各项指标均能设定, 是一个完全可控的系统振荡模型, 便于我们得到更为准确的结果。

3.2 仿真结果及分析

3.2.1 算例仿真

1) 纯振荡波形

所研究的算例是建立在一纯振荡现象基础上的, 其电流波形及参数见图 2。

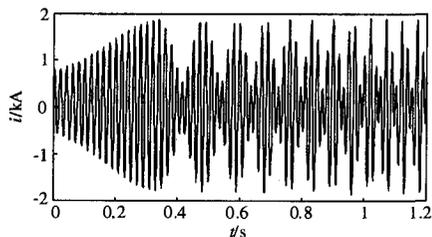


图 2 纯振荡电流波形

Fig.2 Time domain simulation result of the pure swing current

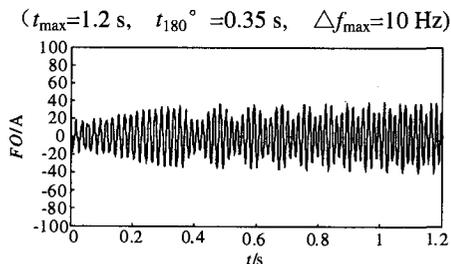


图 3 纯振荡电流 GMMG 滤波输出

Fig.3 GMMG output of the pure swing current

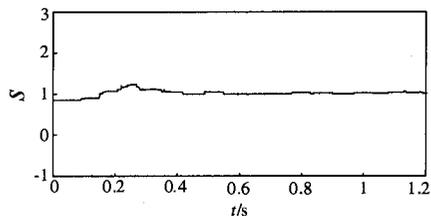


图 4 纯振荡 GMMG 输出双窗相对值

Fig.4 Dual-window relative value of GMMG output of the pure swing current

对图 2 进行 GMMG 分析, 结果见图 3。对图 3 的序列进行相对值求取, 结果见图 4。其它情况的分析同本算例。从图 4 可见, 在全振荡过程中, 相对值比最大不超过 1.3。与下面振荡中发生各种扰动相比, 该比值相对较小。文献[4]已经指出, 为了将故障与非故障进行有效区分, 需要考察最严重的非故障扰动, 并且指出, 切除 10% 的系统容量是从工程应用的角度系统可能经历的最严重的扰动。这个过程模拟见图 5~7。

2) 振荡中切机波形

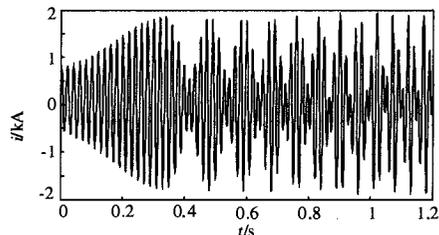


图 5 振荡中切机电流波形

Fig.5 Time domain simulation result of the swing current when tripping the generator during swing

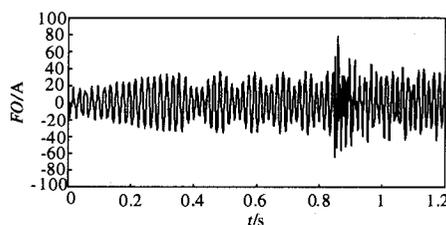


图 6 振荡中切机电流 GMMG 滤波输出

Fig. 6 GMMG output corresponding to the current in Fig.5

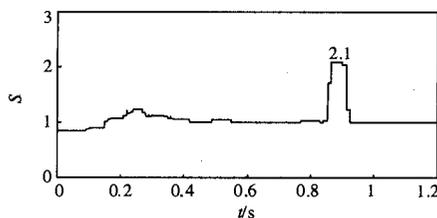


图 7 振荡中切机电流 GMMG 输出双窗相对值

Fig.7 Dual-window relative value of GMMG output in Fig.6

图 5~图 7 是振荡中切机的仿真波形。从图 7 可见,在切机时刻,相对值达到最大,为 2.1。可以以此为基础,制定门槛的整定值。

从上面分析可知,整定值应以振荡中切机的相电流 GMMG 输出双窗相对值的极大值为基准,设为 $MaxS_{swing}$, 该值等于 2.1, 则整定值 K_{pu} 为

$$K_{pu} = K_{re} MaxS_{swing} \quad (4)$$

K_{re} 为可靠系数, 设为 1.3, 则整定值为 2.73。

3) 单相金属接地故障波形

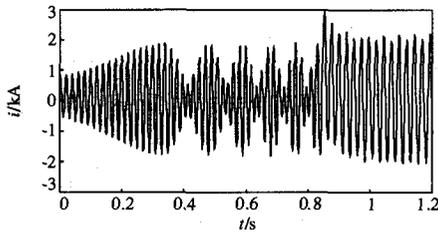


图 8 振荡中发生单相金属接地故障时电流波形
Fig.8 Time domain simulation result of the current when bolted single phase to ground fault occurs

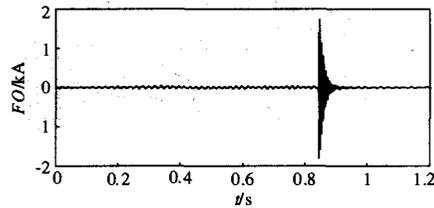


图 9 振荡中发生单相金属接地故障时电流 GMMG 滤波输出
Fig.9 GMMG output corresponding to the current in Fig.8

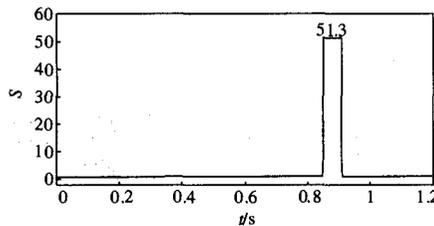


图 10 振荡中发生单相金属接地故障时电流 GMMG 输出双窗相对值

Fig.10 Dual-window relative value of GMMG output in Fig.9

算例 C 为一故障合闸角为 80° 的振荡中发生金属性单相接地故障的分析, 结果见图 8~10。这是比较典型的故障情况, 由图 10 可见, 相对值最大达到 51.3, 远远高于门槛值。

4) 单相高阻接地故障波形

为了考察极端情况, 考察了各种条件下发生的振荡中的故障。其中高阻接地、低合闸角是对基于暂态分析的判据最不利的情况, 图 11~13 给出了

5° 合闸角、 300Ω 接地情况下相对值判据的分析结果。相对值输出为 15.7。

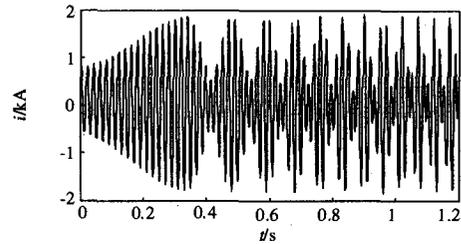


图 11 振荡中发生单相高阻接地时的电流波形
Fig. 11 Time domain simulation result of the current when single phase to ground via 300Ω resistance occurs

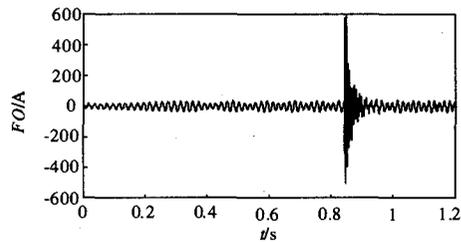


图 12 振荡中发生单相高阻接地故障时电流 GMMG 滤波输出
Fig. 12 GMMG output corresponding to the current in Fig.11

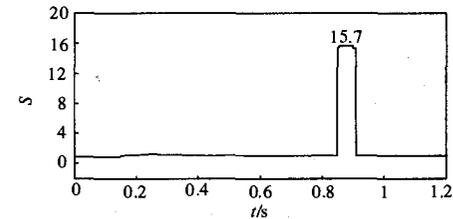


图 13 振荡中发生单相高阻接地故障时电流 GMMG 输出双窗相对值
Fig.13 Dual-window relative value of GMMG output in Fig.12

由于灵敏度系数可定义为各种故障相电流 GMMG 输出双窗相对极大值中的最小值与整定值之比, 设该最小值为 $MinS_{fault}$, 则判别灵敏度 K_{sen} 为

$$K_{sen} = MinS_{fault} / K_{pu} \quad (5)$$

该值为 5.75。满足保护灵敏度的要求。顺便指出, 文献[4]的小波算法声称的灵敏度为 3, 其灵敏度似乎已经比较令人满意。其实, 该文没有考虑合闸角这一最重要的因素, 这里将文献[4]中用于考察灵敏度算例重新进行验算对比, 在 5° 合闸角的情况下, 其灵敏度下降为 1.6。可见, 较之文献[4]的小波算法, 有很大的提高。

4 结论

成功地设计出一种基于 GMMG 变换的线路保

护识别振荡与故障的实时算法。仿真结果表明, 所提出的算法能准确区分纯振荡与纯故障, 对于振荡中发生的各种典型故障也能做到准确识别, 故障发生后, 在采样率为 1 200 Hz 情况下, 只需不到两个周波的故障后数据, 本判据即可正确出口; 应用该 GMMG 和相对值判据, 可以将振荡中发生的各种异常情况与振荡中的最轻微故障区分开。该算法实数运算次数少, 具有实时应用的良好前景。

参考文献

- [1] Gao Z D, Wang G B. A New Power Swing Block in Distance Protection Based on a Microcomputer Principle and Performance Analysis[A]. In: 1991 International Conference on Advances in Power System Control Operation and Management[C]. Hong Kong:1991.
- [2] 侯慧, 尹项根, 游大海. 振荡闭锁期间再故障的距离保护判别方法[J]. 继电器, 2006,34(8):7-12.
HOU Hui, YIN Xiang-gen, YOU Da-hai. Measures of Detecting Fault During Power Swing in Microcomputer Distance Protection[J]. Relay, 2006,34(8):7-12.
- [3] 沈国荣, 邓绍龙, 朱声石. 区分振荡与短路的新原理[J]. 电力系统自动化, 1990, 14(1):7-12.
SHEN Guo-rong, DENG Shao-long, ZHU Sheng-shi. The New Principle of Discrimination Between Power Swing and Short Circuit[J]. Automation of Electric Power Systems, 1990, 14(1):7-12.
- [4] 林湘宁, 刘沛, 程时杰. 电力系统振荡中轻微故障识别的小波算法研究[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(3): 39-44.
LIN Xiang-ning, LIU Pei, CHENG Shi-jie. Researches on Fault Identification During Fast Power Swings with Wavelet Transform Based Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 39-44.
- [5] 陈平, 李庆民. 从于数学形态学的数字滤波器设计与分析[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(6): 60-65.
CHEN Ping, LI Qing-min. Design and Analysis of Mathematical Morphology-based Digital Filters[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(6): 60-65.
- [6] 李庚银, 罗艳, 周明, 等. 基于数学形态学和网格分形的电能质量扰动检测及定位[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(2): 25-30.
LI Geng-yin, LUO Yan, ZHOU Ming, et al. Power Quality Disturbance Detection and Location Based on Mathematical Morphology and Grille Fractal[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(2): 25-30.
- [7] 王霄桦, 程浩忠, 胡丹. 基于数学形态学复合滤波和无时延d-q变换的电压暂态扰动识别[J]. 继电器, 2007, 35(9): 32-36, 59.
WANG Xiao-hua, CHENG Hao-zhong, HU Dan. Recognition of Transient Voltage Disturbances Based on Integrated Mathematics Morphology Filters and Non-delay d-q Transform[J]. Relay, 2007, 35(9): 32-36, 59.
- [8] 郑涛, 刘万顺, 肖仕武, 等. 一种基于数学形态学提取电流波形特征的变压器保护新原理[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(7): 18-24.
ZHENG Tao, LIU Wan-shun, XIAO Shi-wu, et al. A New Algorithm Based on the Mathematical Morphology for Power Transformer Protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 18-24.
- [9] WU Q H, Zhang J F, Zhang D J. Ultra-high-speed Directional Protection of Transmission Lines Using Mathematical Morphology[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 2003, 18(4):1134-1139.
- [10] ZHANG D, LI Q, ZHANG J, et al. Improving the Accuracy of Single-ended Transient Fault Locators Using Mathematical Morphology[A]. In: IEEE/CSEE International Conference on Power System Technology[C]. Kunming: 2002. 675-680.
- [11] 林湘宁, 刘海峰, 鲁文军, 等. 基于广义多分辨形态学梯度的自适应单相重合闸方案[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(7): 101-106.
LIN Xiang-ning, LIU Hai-feng, LU Wen-jun, et al. Generalized Multi-resolution Morphological Gradient Based Self-adaptive Single-phase Reclosure Scheme[J]. Proceedings of the CSEE, 2006, 26(7): 101-106.
- [12] 林湘宁, 刘沛, 胡帆. 面向继电保护的全过程系统振荡仿真[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(22): 56-59.
LIN Xiang-ning, LIU Pei, HU Fan. Complete Power System Oscillation Simulation for Relay Protection Research[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(22): 56-59.

收稿日期: 2007-09-27

作者简介:

张义辉(1972-)男, 工程师, 工学硕士, 主要从事微机控制、电力系统继电保护等方面的研究。E-mail: zhangyihui1@163.com