

基于数学形态学的电力系统振荡中故障识别和改进的选相方法

邹力, 赵青春, 林湘宁, 刘沛

(华中科技大学电气与电子工程学院, 湖北省武汉市 430074)

Mathematical Morphology Based Fault Detector and Improved Phase Selector in Power Swing

ZOU Li, ZHAO Qing-chun, LIN Xiang-ning, LIU Pei

(Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei Province, China)

ABSTRACT: The blocked protective relays should be able to respond to internal fault occurring during power swing blocking state. Therefore, it is necessary to distinguish faults from swing. It is also desirable to identify the fault phase correctly and rapidly during power swing so that distance relay can measure the impedance correctly and trip the fault selectively. The conventional sequence component fault phase selector mal-operates in some cases during power swing according to dynamic simulation results. In order to overcome the disadvantage, a fault detector and improved fault phase selector during power swing based on series multi-resolution morphological gradient (SMMG) transform are proposed in this paper. First, a SMMG filter is used to detect fault inception. If the fault is either a single or a double phase(s) to ground one according to the sequence component fault phase selection scheme, another SMMG filter is then employed to process three modular current signals so as to distinguish between them. Using EMTP, an extensive series of simulations has been carried out on a model system to verify the efficiency and feasibility of the proposed scheme.

KEY WORDS: power system; power swing block; distance protection; series multi-resolution morphological gradient; fault phase selection

摘要: 为了使振荡闭锁装置能在振荡中再故障时开放保护,就必须能区分振荡与故障,且故障相的单相阻抗继电器在振荡时也应能正确测量阻抗。但如何在振荡中快速正确地选出一个故障相进行阻抗测量是距离保护能否有选择性地切除振荡中故障的关键问题。在动模实验中发现:对于振荡中发生的故障,在一定情况下序分量选相元件会误选相。文中利

用级联多分辨形态梯度变换(SMMG)提出了一种电力系统振荡中的故障检测和改进的故障选相方案:先利用一个SMMG滤波器对相电流进行处理,构成一个自适应的振荡中故障启动元件;检测到故障或扰动后,对接地故障,如果由现有的序分量选相方法判断出其落在包含单相和相间2种故障类型的区域,则可利用故障后3个模电流分量的SMMG系数局部模极大值确定其故障相别。用EMTP在一个系统模型上进行了大量的仿真研究,其结果验证了该方案的有效性和易用性,该方法判别灵敏,结果可靠,所提出的算法易于实现,在现有的微机保护装置中可以直接采用。

关键词: 电力系统; 振荡闭锁; 距离保护; 级联多分辨形态梯度; 故障选相

0 引言

电力系统振荡时电流上升、电压下降,可能引起距离保护误动作(此时继电保护不应动作),故对受其影响可能会误动的保护(主要是距离保护)要实现振荡闭锁^[1]。在振荡过程中发生故障时应能有选择地较快地切除故障,为了使振荡闭锁装置能在振荡中再故障时开放保护,其必须能区分振荡与故障。

目前广泛应用的振荡故障识别方法为:①检测 dR/dt 的变化^[2],但该方法得到正确结果所需的时间较长(测量振荡中心电压变化率 $dU\cos\phi/dt$ 的方法与其相似);②基于 $|I_2+I_0|$ 与 $|I_1|$ 之比,该方案将改善振荡中保护的性能;③文献[3]提出了基于振荡中测量阻抗变化规律的自适应振荡闭锁算法;文献[4]提出了利用对称分量识别振荡中故障的方法。近年来,有学者尝试利用小波分析^[5]、神经网络等新技术来区分振荡与故障,但这些方法尚处于理论研究

基金项目: 国家自然科学基金项目(50177011)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China (50177011).

阶段, 其性能还有待进一步研究。

虽然故障相的单相阻抗继电器在振荡时能进行正确测量, 但如何在振荡中快速正确地选出一个故障相进行阻抗测量, 则是距离保护能有选择性地切除振荡故障的关键所在。目前国内数字式高压线路保护主要采用相电流差突变量选相和序分量选相相结合的方法来实现故障选相: 保护启动后第1次采用相电流差突变量选相元件选相, 振荡闭锁期间, 由于选相元件对突变量的提取困难而采用稳态量选相, 一般采用序电流的分区结合阻抗比较方法构成。但在动模实验中发现, 对于振荡中发生的故障, 在一定情况下序分量选相元件会误选相^[6]。为此, 文献[7]提出了一种基于高频故障分量的振荡中不对称故障的故障选相新原理, 但是该方案对硬件的采样频率和CPU处理能力等提出了较高的要求, 在目前标准的微机继电保护硬件中实现还存在困难。

数学形态学(MM)是一门建立在集论基础之上的学科, 它是几何形态分析和描述的有力工具^[8]。有关形态学的技术和应用正在不断地发展和扩大, 目前已在电力系统行波保护去噪^[9]、电能质量扰动检测^[10]、介损在线监测^[11]、变压器励磁涌流识别^[12]等方面得到应用。本文利用级联多分辨形态梯度变换(SMMG)提出了一种电力系统振荡中故障检测和改进的选相方案。

1 级联多分辨形态梯度变换

数学形态学用集合来描述目标信号, 在考察信号时, 要设计一种收集信号信息的“探针”, 称为结构元素, 其在信号中不断移动, 便可以提取有用的信息做特征分析和描述。腐蚀(erosion)和膨胀(dilation)是最基本的二值形态变换, 腐蚀变换是一种收缩变换, 这种变换使目标肢体收缩, 使孔洞扩张。作为对偶, 膨胀变换是一个扩张过程, 这种变换使目标肢体扩张, 孔洞收缩。

利用结构元素 g 对信号 f 的腐蚀和膨胀定义为^[8]

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

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

由式(1)、(2)可见, 腐蚀和膨胀的计算相当简单, 只包含加、减法运算, 不涉及乘、除, 因而对实时信号的处理速度快、时延小, 这一特点对于继电保护来说具有非常重要的意义。本文提出和构造的算子均由腐蚀和膨胀这2个基本运算构成, 同传统的数字滤波算法相比, 其计算较为简单。

文献[13]利用MG设计了一种多分辨形态梯度

(MMG)技术。为了提取信号波形中的上升和下降边沿, 在MMG中, 文献[13]设计了一种可变并具有不同原点位置的扁平结构元素如下:

$$g^+ = \{g_1, g_2, \dots, g_{l-1}, \underline{g}_l\} \quad (3)$$

$$g^- = \{\underline{g}_1, g_2, \dots, g_{l-1}, g_l\} \quad (4)$$

式中, 结构元素 g^+ 和 g^- 分别用来对应于波形中上、下边沿的提取; $l = 2^{1-a} l_1$ 为结构元素宽度; a 为MMG的分析层数; l_1 为结构元素在第1层的初始宽度; 下划线采样点 \underline{g} 分别表示它们的原点位置。

灰值多分辨形态梯度 r_g^a 定义为

$$r_g^{a+}(x) = (r_g^{a-1} \oplus g^+)(x) - (r_g^{a-1} \ominus g^+)(x) \quad (5)$$

$$r_g^{a-}(x) = (r_g^{a-1} \ominus g^-)(x) - (r_g^{a-1} \oplus g^-)(x) \quad (6)$$

$$r_g^a(x) = r_g^{a+}(x) + r_g^{a-}(x) \quad (7)$$

当 $a=1$ 时, $r^0 = f$, 为输入信号。

MMG 可用来抑制输入信号中的稳态分量和突出波形的暂态特征, 不同长度的结构元素可用来提取不同细致程度的暂态特征。然而仿真研究表明, 对于某些特别微弱或相对缓慢的变化, 简单的MMG变换表现不佳。文献[14]提出了一种级联多分辨形态梯度滤波技术, 并尝试将其应用于电力系统微机保护中。

令 g 表示一个扁平结构元素, 其宽度为 $l = 2^a$, 用算子 M_{MGL} 表示输入信号关于 g 的、级数为 a 的多分辨形态梯度变换; 令一个扁平结构元素序列 $\{g_i\}$ 的长度分别为 $l_i = 2^{a_i}$, $i=1, 2, 3, \dots, n$, 用算子

$\prod_{i=1}^n S_{MMGL_i}$ 表示输入信号关于 $\{g_i\}$ 的、级数为 a_i 的

n 级级联多分辨形态梯度变换。如果这 n 个结构元素完全相同, 设长度为 L , 则相应的SMMG变换记为 S_{MMGL}^n 。SMMG变换的流程见图1, 其中, $M_{F1}, M_{F2}, \dots, M_{Fn}$ 为MMG变换。(同文献[14])需要指出的是: 利用SMMG进行实时信号处理的时候, 当数据窗向前移动至奇异点进入数据窗时, SMMG输出的模值会从较小的数值明显变大, 基于瞬时值判据的元件就可能动作; 当数据窗继续向前移动至信号奇异点位于数据窗中央时, SMMG具有最大的输出模值。因此, 对于基于瞬时值的判据来说, 当采用的数据窗长度为 D_w 时, 判据的最大响应时延为 $(D_w+1)/2$ 个采样点。 n 阶SMMG的数据窗长度为

$$DW_{SMMG} = 2 \left[\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{a_i} (2^{1-j} l_i - 1) \right] - 1 \quad (8)$$

判据的最大响应时延为

$$d_{SMMG} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{a_i} (2^{1-j} l_i - 1) \quad (9)$$

式中, $\sum_{j=1}^{a_i} (2^{1-j} l_i - 1)$ 为第 i 阶 MMG 的响应时延。

目前, SMMG 中结构元素长度和级联顺序的选择尚无一个完备的理论依据, 其主要手段还是试探法。依据被处理信号的特点, 其选择有如下的原则:

(1) 优先考虑短结构元素在前、长结构元素在后的级联顺序。最小的结构元素长度为 2, 它可捕捉在一定的采样率下能分辨的最小信号的变化。因此, 设计 SMMG 用于检测信号微弱的变化时, 均可考虑以长度为 2 的结构元素开始; 通过其后级联长度较长的结构元素, 就能有效地抑制经由短结构元素处理后的波形中非奇异点处的表现, 即增强了奇异点处的变化。

(2) 如果待检测的变化微弱, 则需要多次级联短结构元素; 如果背景信号变化较快, 则需要短结构元素后级联较长的结构元素。因此, 待检测的变化越微弱、背景信号变化越剧烈, 需要的 SMMG 的阶数就越高, 所需的数据窗就越长, 算法的响应延时也就越长。



图 1 SMMG 变换示意图

Fig. 1 Block diagram of smmg

2 系统振荡中的故障识别和改进的选相方案

2.1 系统振荡中的故障检测

在时域外在表现上, 电力系统振荡与故障的电流波形都具有很大的峰值, 采用基于工频稳态的算法, 对保护安装处的电流、电压有可能得到相似的结果, 因而难以区分振荡和故障。系统正常运行时发生故障, 将引发一个强烈的暂态过程, 故障电流通过 SMMG 滤波器后将在其 SMMG 系数中产生一个局部模极大值, 而 SMMG 能够在包含丰富信息的暂态采样序列中提取出能够识别各状态的特征。

在本文的仿真研究中, 采样频率为 2kHz, 用一个 $S_{MMG2}^4 \times S_{MMG4}^1$ 的形态滤波器来构成振荡中的故障起动元件, 当振荡中心位于被保护线路内, 两端电源夹角为 180° 时发生三相短路, 对于任何振荡和故障识别方法都是最严峻的考验。用故障分量的观点来看, 因为故障前故障点处的电压降至零, 即在故障后很短的一段时间内故障附加状态下故障点处的虚拟电源接近零, 因而由它产生的工频故障分量和暂态故障分量都非常小。图 2(a)给出了 2 侧电源

相对相角摆开到 180° 附近时(350ms)振荡中心发生三相经 200Ω 电阻接地短路的归一化后的故障电流(图中虚线所示)及其 SMMG 系数(图中实线所示)。此时故障电流幅值基本没有变化, 而其 SMMG 系数从一个呈现小幅值波动的信号突变到一个具有相当高幅值的暂态信号。仿真结果表明, 由故障引起的 SMMG 系数的局部模极大值可作为区分振荡电流和故障电流的依据, 并具有很高的灵敏度。

本文设计了一种自适应的振荡中故障识别算法, 具体步骤为:

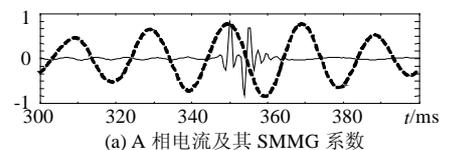
(1) 从振荡闭锁元件启动后的半个周波开始, 对于任一路相电流采样值, 将长度为 15 的数据窗输入到 SMMG 中即可得到一个 SMMG 系数; 随着采样的进行, 数据窗向前移动一个点, 即可得到一个新的 SMMG 系数, 如此往复。这样逐点计算一个周波, 记下 SMMG 系数的模极大值 S_{max} 。

(2) 将 S_{max} 乘以可靠系数 $K_r=2.0$ 作为一个门槛记为 S_{th} 。

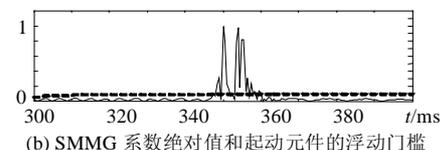
(3) 数据窗向前移动一个点, 即可得到一个新的 SMMG 系数。如果该系数的模值小于 S_{max} , 则重复步骤(3); 如果该系数的模值大于 S_{max} 小于 S_{th} , 则令 S_{max} 等于该系数模值并回到步骤(2); 如果该系数的模值大于 S_{th} , 则进入步骤(4)。

(4) 振荡中故障起动元件动作。

图 2(b)给出了故障电流 SMMG 输出的绝对值(见图中实线)和起动判据的浮动门槛 S_{th} (见图中虚线)。这里采用的浮动门槛可以有效地区分振荡电流和故障电流, SMMG 对由于短路造成的电流信号畸变具有很强的表现, 而对于振荡甚至是快速振荡电流的表现与短路电流相比却非常小, 并且 SMMG 输出不会随着振荡周期的变化而发生明显的变化。



(a) A 相电流及其 SMMG 系数



(b) SMMG 系数绝对值和起动元件的浮动门槛

图 2 振荡中心发生三相故障

Fig. 2 Three phase fault occurring at swing center

2.2 系统振荡中的选相测量

在序分量选相中, 不接地故障采用阻抗选相, 接地故障采用零序、负序分量的相对相位关系结合阻抗选相, 即将不同故障情况下的负序、零序电流

相对相位划分为6个相区,以其相区来确认故障的类型。其中有3个相区包含单相和相间2种故障,由于这2种故障的相别总是不相关的,且其相间阻抗元件对两相故障总能准确动作^[15],故可采用相间阻抗排除法来判别其故障类型:如果保护装置测量到的相间阻抗值在整定的相间阻抗范围之内,则确认为相间接地故障,否则,确认为相应的单相接地故障。采用零序、负序分量的相对相位关系结合阻抗排除的序分量选相元件在一般情况下都能进行准确的选相,但在系统振荡的某些情况下(如系统振荡和单相接地故障同时存在且振荡中心和故障点在同一条长线上),序分量选相元件可能会误选相。文献[6]从不对称故障开放判据和阻抗排除法2个方面分析了造成误选相的原因:发生单相接地故障时,如果保护装置测量到的相间阻抗值小于整定值(如果振荡中心远离保护安装处,在2端电源相角差偏离180°较小时,相间测量阻抗可能小于其整定值),那么带来的后果是误选为相间接地。文献[1]采用一个时间继电器来区分单相和相间接地故障,但这会增加选相时延,且如果振荡中心比较靠近保护安装处,即使在2端电源相角差偏离180°较大时,相间测量阻抗也可能在整定值之内,这个延时可能更长。(此句是进一步说明,文献[1]的方法带来的延时在某些情况下可能更长)

为了解决以上问题,本文利用SMMG技术,结合现有的模故障分量选相方法^[16],提出了一种改进的用于振荡故障的选相方法。基于故障分量的选相元件,从理论上消除了负荷电流的影响,比起传统的选相方案,其性能有显著的提高^[17]。根据叠加原理,系统中故障分量可由在故障点叠加等效电源来求解。等效电源由故障点故障前电压及故障类型决定。由线性变换理论可知,对故障分量网络仍可采用模分量进行分析。文献[16]从故障边界条件中推导出各模量等效电源,从而得出各种类型故障时各模量故障分量的特征。目前提取工频故障分量的方法是:将故障前一个周期的电气量采样值记忆下来,再与故障后的采样值相减^[1]。但是在振荡闭锁期间,由于频率偏差以及电流幅值不断变化,利用该方法提取故障分量是有困难的。作为一种特征提取工具,SMMG能感受并增强信号波形上的微小变化、反映其突变的大小。本文利用SMMG滤波器提取模电流的故障分量,仿真结果表明,SMMG能够在系统振荡状态下有效地提取故障分量。

故障起动后,如果序分量选相的结果落在包括

单相和相间接地故障的重叠区内,则可利用如下方法判断是否为单相接地故障。本文的方法需要用到利用模电流分量,利用下面的矩阵 W 通过线性变换可将3个相电流变换成3个电流模分量 $[s_1 \ s_2 \ s_3]^T$:(此处只给出了线性变换矩阵,线性变换的形式由于读者均比较熟悉故没有给出)

$$W = \begin{bmatrix} 0 & -\sqrt{3} & \sqrt{3} \\ \sqrt{3} & 0 & -\sqrt{3} \\ -\sqrt{3} & \sqrt{3} & 0 \end{bmatrix}^T$$

实际上, s_1, s_2, s_3 分别是以A、B、C三相为参照的电流模2分量。

将上述3个模电流分量输入形态学滤波器 $SMMG_2^6 \times SMMG_4^1$,其输出的SMMG系数可以反映各模电流工频故障分量的大小,输出结果如表1所示。其中, $m_1 \sim m_3$ 分别是 $s_1 \sim s_3$ 的SMMG变换结果,“1”代表SMMG系数中有一个明显的模极大值发生,“0”代表没有。表中所示的特性可用于判断是否为单相接地故障。

从故障起动后第1个采样点开始至第10点为止,采用长度为19的数据窗,对于每一个模电流分量可以逐点计算出10个SMMG系数。记下这10个SMMG系数中的局部模极大值 $M_i, i=1, 2, 3$,并以这3个模极大值构成如下的选相判据:

如果是单相(以A相例)接地故障,则有

$$(kM_1 \leq M_2) \cap (kM_1 \leq M_3), \quad (10)$$

即 M_1 远远小于 M_2 和 M_3 系数;如果是B或C相单相接地故障则分别对应 M_2 或 M_3 远远小于其它2个系数。如果不存在某个系数远远小于另2个系数,则表明不是单相故障。 k 为整定门槛,根据下面的仿真结果确定。

表1 电流模分量经过SMMG滤波器后的输出特性

Tab. 1 Characteristics of the output patterns of the SMMG filter

变换结果	AG	BG	CG
m_1	0	1	1
m_2	1	0	1
m_3	1	1	0

3 EMTP 仿真研究及结果分析

本文利用EMTP建立了一个340km、500kV的双电源单回线系统如图3所示。其线路参数取自华中电网500kV平武线。待研究的保护安装在母线M侧,采用文献[5]的振荡模型。为了充分验证所提出算法的有效性,在该模型系统中进行了大量的仿真:在线路上每隔34km设置了10个故障点;为了仿真最不利的情况,设故障均发生在振荡过程中2侧电

势相对相角摆开到 180° 附近的时候, 考虑了 A 相电压过零点的故障初始角 0° 、 90° 、 180° 和 270° 4 种故障情况(由于振荡中频率可能发生偏差, 这 4 个角度均为近似值); 接地故障考虑了 0Ω 、 50Ω 、 200Ω 共 3 种过渡电阻。

假设接地距离继电器和相间距离继电器都按线路全长的 80% 整定, 则其整定值为 $Z_{set}=76.05\Omega$ 。在振荡中心(距离 M 侧母线约 102km)处发生金属性 A 相接地故障, 故障启动后, M 侧母线处的 A 相测量阻抗和 B-C 相间测量阻抗分别为 29.40Ω 和 66.51Ω 。M 侧保护测量到的 B-C 相间阻抗在整定范围之内, 现有的序分量结合阻抗排除的方法会将 A 相接地故障误选为 B-C 相间接地故障。图 4 给出的是故障发生时母线 M 处的模电流(虚线) $s_1\sim s_3$ 及其 SMMG 系数(实线) $m_1\sim m_3$ 。横坐标为时间, ms, 纵坐标是归一化后的幅值, 故障发生时刻为 350ms。从图中不难看出: 故障发生后, $M_1=1.000$ 、 $M_2=0.994$ 、 $M_3=0.008$, 可明确地表明是 A 相接地发生故障。

图 5 给出了在距离母线 M 侧 306 km 处发生带 200Ω 过渡电阻的 B-G 故障时 M 处的 3 个模电流及其 SMMG 系数, 故障发生时刻为 360ms。显然, 在这种情况下本文的方案也能正确选相, 并且具有较高的灵敏度。这一故障情况是仿真的单相接地故障

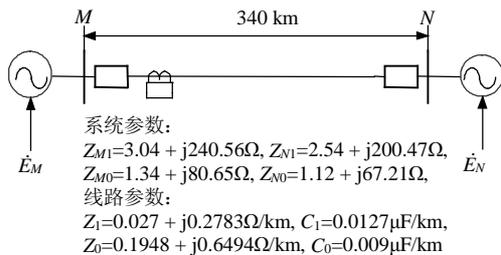


图 3 双端电源系统模型
 Fig. 3 A model power system

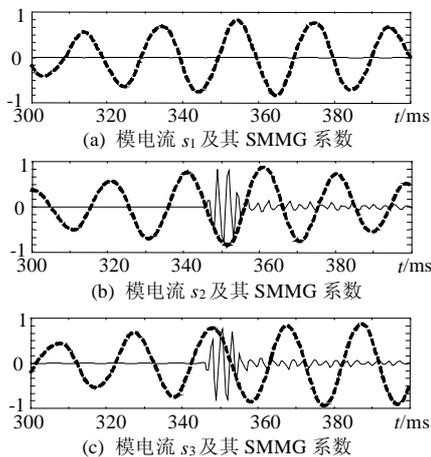


图 4 在振荡中心处发生金属性 A 相接地故障
 Fig. 4 Solid A-G fault occurring at swing center

中 3 个系数 M_1 、 M_2 、 M_3 相差最小, 即灵敏度最低的一种情况, M_1/M_2 和 M_3/M_2 中较小的一个为 $k_{smin}=29.99$ 。图 6 给出的是在 360ms、振荡中心处发生 C-A 相间接地短路的情况, 从图中可见, 3 个模电流的 SMMG 系数都具有较大的幅值, 表明此时发生的不是单相接地故障。这一情况是仿真的相间接地故障中 3 个系数 M_1 、 M_2 、 M_3 相差最大的一种情况, 3 个系数两两之间的比值最大的一个 M_1/M_3 为 $k_{dmax}=2.72$ 。仿真结果显示, 即使在最不利的情况下, 单相接地故障时 3 个系数局部模极大值的差别也是非常明显的; 而对于相间接地故障, 这 3 个系数的数值都很接近。因此很容易选取一个 k 值, 使得该选相元件同时具有很高的灵敏度和可靠性。例如, 设可靠性系数 $k_{re}=1.5$, 则式(10)中的 k 整定为 $k=k_{re}\times k_{dmax}=4.08$, 校验灵敏度 $k_{sen}=k_{smin}/k=7.34$ 。

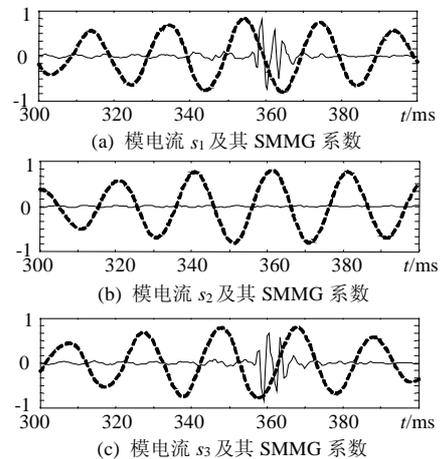


图 5 距离 M 侧母线 306km 处发生带 $200W$ 过渡电阻的 B 相接地故障
 Fig. 5 B-G fault with ground resistance of $200W$ occurring at 306 km from bus M

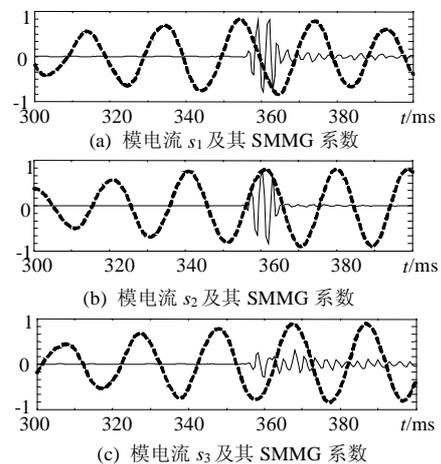


图 6 在振荡中心处发生 CA 两相接地故障
 Fig. 6 C-A-G fault occurring at swing center

4 结论

对于振荡中发生的故障,在一定情况下现有的序分量选相元件会误选相。针对这一问题,本文利用级联多分辨形态梯度变换提出了一种电力系统振荡中故障检测和改进的选相方案:先利用一个SMMG滤波器对相电流进行处理,构成一个自适应的振荡故障起动元件。检测到故障或扰动后,对于接地故障,可利用现有的序分量选相方法比较零、负序分量的相对相位关系来确定区域。如果落在包含单相和相间2种故障类型的区域,则起动本文中的基于形态学变换的辅助选相元件。分别将3个电流模分量输入到一个SMMG滤波器,利用故障后三个模电流SMMG系数的局部模极大值,就可以灵敏且可靠地确定故障相别。EMTP仿真表明:该方案不受故障位置、故障初始相角以及接地电阻等因素的影响。此外,由于SMMG具有表达直观、滤波器设计简单、数据窗短、计算速度快以及变换结果易于识别等优点,因此所提出的算法易于实现,在现有的微机保护装置中可以直接采用。

参考文献

- [1] 朱声石. 高压电网继电保护原理与技术(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 1995.
- [2] Gao Z D, Wang G B. A new power swing block in distance protection based on a microcomputer principle and performance analysis [C]. 1991 International Conference on Advances in Power System Control Operation and Management, HongKong, 1991.
- [3] 何奔腾, 顾纯洁. 一种自适应振荡闭锁新原理[C]. 全国高等学校电力系统及其自动化专业第九届学术年会论文集, 重庆, 1993, 818-824.
He Benteng, Gu Chunjie. A novel principle of self-adaptive power swing blocking, Proceedings of 1993 9th CUS-EPISA, Chongqing, 1993, 818-824(in Chinese).
- [4] Q X Yang, Z Y Xu, L L Lai, et al. Fault identification during power swings with symmetrical component[C]. Proceedings of EMPD'98 1998 International Conference on Energy Management and Power Delivery: 1214-1220, Hongkong.
- [5] 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 Xiangning, Liu Pei, Cheng Shijie. Research on fault identification during fast power swings with wavelet transform based algorithm [J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(3): 39-44(in Chinese).
- [6] 索南加乐, 许庆强, 宋国兵, 等. 电力系统振荡过程中序分量选相元件动作行为分析[J]. 电力系统自动化, 2003, 27(2): 52-55.
Suonan Jiale, Xu Qingqiang, Song Guobing, et al. Analysis on the operating characteristics of the sequence component fault phase selector during power swings[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(2): 52-55(in Chinese).
- [7] 焦邵华, 刘万顺, 张振华, 等. 电力系统振荡中不对称故障的选相方法[J]. 华北电力大学学报, 1999, 26(2): 6-11.
Jiao Shaohua, Liu Wanshun, Zhang Zhenhua, et al. A new approach to select the fault phase of unbalance fault during power swing [J]. Journal of North China Electric Power University, 1999, 26(2): 6-11(in Chinese).
- [8] Serra J. Morphological filtering: an overview. Signal Processing, 1994, 38(4): 3-11.
- [9] 林湘宁, 刘沛, 刘世明. 电力系统超高速保护的形态学-小波综合滤波算法[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(9): 19-24.
Lin Xiangning, Liu Pei, Liu Shiming. A novel integrated morphology-wavelet filter algorithm used for ultra-high speed protection of power system[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(9): 19-24(in Chinese).
- [10] 束洪春, 王晶, 陈学允. 动态电能质量扰动的多尺度形态学分析[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(4): 63-67.
Shu Hongchun, Wang Jing, Chen Xueyun. Multiscale morphology analysis of dynamic power quality disturbances[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(4): 63-67(in Chinese).
- [11] 王楠, 律方成, 刘云鹏, 等. 自适应广义形态滤波方法在介损在线监测数据处理中的应用研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 161-165.
Wang Nan, Lv Fangcheng, Liu Yunpeng, et al. Study on application of adaptive generalized morphological filter in processing on-line monitoring tan δ data[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 161-165(in Chinese).
- [12] 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 Wanshun, Xiao Shiwu, et al. A new algorithm based on the mathematical morphology for power transformer protection [J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(7): 18-24(in Chinese).
- [13] Zhang D, Li Q, Zhang J, et al. Improving the accuracy of single-ended transient fault locators using mathematical morphology, presented at IEEE/CSEE International Conference on Power System Technology, Kunming, China, 2002.
- [14] 邹力, 刘沛, 赵青春. 级联形态梯度变换及其在继电保护中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 113-118.
Zou Li, Liu Pei, Zhao Qingchun. Series multi-resolution morphological gradient and applications in protection relaying[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 113-118(in Chinese).
- [15] 徐振宇, 杨奇逊, 刘万顺. 一种序分量高压线路保护选相元件[J]. 中国电机工程学报, 1997, 17(3): 214-216.
Xu Zhenyu, Yang Qixun, Liu Wanshun. A sequence fault phase selector for transmission line protective relay[J]. Proceedings of the CSEE, 1997, 17(3): 214-216(in Chinese).
- [16] 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.
- [17] 林湘宁, 刘沛, 杨春明, 等. 基于相关分析的故障序分量选相元件[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(5): 16-21.
Lin Xiangning, Liu Pei, Yang Chunming, et al. A superimposed phase selector based on symmetrical components and correlation analysis [J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(5): 16-21(in Chinese).

收稿日期: 2006-02-08。

作者简介:

邹力(1978—), 男, 博士研究生, 主要从事电力系统保护和控制、现代数字信号处理技术在电力系统中的应用等方面的研究, zouli2000@263.net;

赵青春(1980—), 男, 硕士研究生, 主要从事电力系统继电保护等方面的研究;

林湘宁(1970—), 男, 副教授, 主要从事电力系统继电保护与控制、现代信号处理在电力系统中的应用、新型配电技术环境下的保护新原理和新技术等方面的研究;

刘沛(1944—), 女, 博士生导师, 主要从事继电保护及变电站综合自动化等方面的研究工作。

(责任编辑 喻银凤)