

继电保护抗 TA 暂态饱和和改进 Prony 算法

任龙飞¹, 郝治国¹, 张保会¹, 王小立²

(1. 西安交通大学 电气工程学院, 陕西 西安 710049; 2. 宁夏电力公司调度中心, 宁夏 银川 750001)

摘要: 针对 TA 暂态饱和引起的保护不正确动作, 基于 Prony 算法原理, 提出一种抗 TA 暂态饱和的改进算法。该方法给定 50 Hz 工频量对应特征根, 利用奇异值分解(SVD)降阶, 选择最接近最优采样率的频率进行采样, 以在短数据窗条件下, 提高计算结果准确性并减少计算量。TA 暂态饱和试验数据及实际故障录波数据计算结果证明在短数据窗内, 改进 Prony 算法仅利用 TA 二次电流的非饱和段数据, 就可快速提取故障电流有效信息; 通过仿真算例验证了改进 Prony 算法能在发生转换性故障情况下, 保证继电保护正确动作。

关键词: 电流互感器; 暂态饱和; Prony 算法; 短数据窗; 继电保护

中图分类号: TM 77

文献标识码: A

DOI: 10.3969/j.issn.1006-6047.2014.05.020

0 引言

电流互感器(TA)是继电保护系统的重要组件, 其准确传变一次电流是继电保护能正确动作的首要前提。P 级 TA 已应用于电力系统近 100 年, 其配置时仅按通过最大稳态短路电流选择, 不考虑暂态饱和问题。过去电网结构简单, 短路电流小, TA 暂态饱和问题并不突出。随着国民经济高速发展, 电网规模快速增长, 短路电流急剧增加, 同时衰减时间常数变大, 特别是微机保护的广泛应用, 使 TA 二次侧负载由阻抗型变为电阻型, 使得 P 级 TA 剩磁大幅增加, 导致 P 级 TA 暂态饱和问题日益严重, 由此引起的继电保护不正确动作问题日益突出。

对于 TA 暂态饱和, 差动保护中多使用比率制动减小其对保护的影响, 但其灵敏度和抗 TA 饱和性能间存在矛盾。目前, TA 饱和检测技术比较成熟, 常用方法包括二次谐波检测^[1]、时差法^[2]、小波分析法^[3]以及差分法^[4]等, 它们能在 TA 发生暂态饱和时, 分辨出饱和段和非饱和段数据。差动保护为防止区外故障时由 TA 暂态饱和引起保护误动作, 也常采用在检测到 TA 饱和后直接闭锁保护的措施。但闭锁保护是一种消极的抗饱和措施, 并不能得到故障电流信息, 并且对于区外区内转换型故障, 可能会造成保护拒动。

目前, 抗 TA 暂态饱和和算法主要包括补偿法^[5]、神经网络法^[6]、最小二乘法^[7]以及小矢量算法^[8]等。补偿法利用励磁电流补偿畸变的二次电流获得一次电流, 其初始磁通及饱和磁通难以准确测定, 会影响其计算结果。神经网络具有较好的非线性拟和能力, 可用于还原一次电流, 其所用样本较多, 稳定性较差。最小二乘法使用二次电流非饱和段数据, 以一

阶泰勒级数形式逼近故障电流, 所用时间窗较长, 在严重饱和情况下, 非饱和段数据较短, 计算结果偏差严重, 并且其计算量较大。小矢量算法利用小矢量与全周傅里叶算法之间的关系计算故障电流幅值, 计算结果受衰减直流分量及谐波干扰影响较大。

Prony 算法是采用指数衰减型正弦量的线性组合来拟合等间隔采样数据的数学模型。本文基于 Prony 算法原理, 针对 TA 暂态饱和和情况下面临的短数据窗及保护快速性要求, 对 Prony 算法进行了相应的改进, 改进算法能在短数据窗内, 仅利用非饱和段数据, 以较小计算量迅速提取故障电流有效信息。

1 Prony 算法原理

传统的傅里叶分析认为信号由不衰减的正弦量线性组合而成, 而 Prony 算法在模型假设中加入了衰减因子, 即:

$$x(t) = \sum_{i=1}^q A_i e^{\alpha_i t} \cos(2\pi f_i t + \theta_i) \quad (1)$$

设其中有 u 个正弦量, v 个直流分量, 对正弦量应用欧拉公式, 每个正弦量对应一对共轭的复衰减因子。离散化后将其写成统一的指数函数形式:

$$\hat{x} = \sum_{m=1}^p b_m z_m^n \quad (2)$$

$$\hat{x}(n) = - \sum_{m=1}^p a_m \hat{x}(n-m) \quad (3)$$

其中, $b_m = A_m e^{j\theta_m}$; $z_m = \exp[(\alpha_m + j2\pi f_m)\Delta T]$; $p = 2u + v$; a_m 为自回归(AR)模型系数。

式(2)是某一常系数线性差分方程式(3)的解。定义实际测量值和估测值之间的误差为 $e(n)$, 可认为是白噪声, 代入式(3)中, 则有:

$$\hat{x}(n) = - \sum_{m=1}^p a_m x(n-m) + \varepsilon(n) \quad (4)$$

$$\varepsilon(n) = \sum_{m=0}^p a_m e(n-m) \quad (5)$$

收稿日期: 2013-05-15; 修回日期: 2014-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51277142)

Project supported by the National Natural Science Foundation of China(51277142)

由式(4)可见,估测值转换为一个 p 阶自回归滑动平均(ARMA)模型。 $x(n)$ 可看作是噪声激励某 AR 模型的输出,该模型参数为待求量,求解该模型参数的原则是保证最优逼近,即使得目标函数

$$E = \sum_{n=p}^{N-1} |\varepsilon(n)|^2 = \sum_{n=p}^{N-1} \left| \sum_{m=0}^p a_m x(n-m) \right|^2 \quad (6)$$

取值最小(其中, N 为采样点数),此时的约束条件为目标函数对 AR 模型各系数的偏导数为 0,即有:

$$\sum_{m=0}^p a_m \left[\sum_{n=p}^{N-1} x(n-m)x^*(n-i) \right] = 0 \quad i=1,2,\dots,p \quad (7)$$

其中,“*”表示取共轭。

定义:

$$r(i,j) = \sum_{n=p}^{N-1} x(n-j)x^*(n-i) \quad (8)$$

则式(7)可写为:

$$\begin{bmatrix} r(1,0) & r(1,1) & \cdots & r(1,p) \\ r(2,0) & r(2,1) & \cdots & r(2,p) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r(p,0) & r(p,1) & \cdots & r(p,p) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon(p) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} \quad (9)$$

方程系数矩阵式(7)称为样本矩阵,求解此方程即可得到 AR 模型系数以及最小误差能量估计值 $\varepsilon(p)$ 。从而有特征方程:

$$1 + a_1 z^{-1} + \cdots + a_p z^{-p} = 0 \quad (10)$$

解此方程得到特征根 $z_i(i=1,2,\dots,p)$,将式(2)写成矩阵形式有:

$$\begin{aligned} ZB &= \hat{X} \quad (11) \\ Z &= \begin{bmatrix} 1 & 1 & \cdots & 1 \\ z_1 & z_2 & \cdots & z_p \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \cdots & z_p^{N-1} \end{bmatrix} \\ B &= [b_1 \ b_2 \ \cdots \ b_p]^T \end{aligned}$$

求出方程式(11)的最小二乘解可得各个分量的振幅 A_i 、相位 θ_i 、衰减因子 α_i 、频率 f_i 为:

$$\begin{cases} A_i = |b_i| \\ \theta_i = \arctan(\text{Im}b_i / \text{Re}b_i) \\ \alpha_i = \ln |z_i| / \Delta T \\ f_i = \arctan(\text{Im}b_i / \text{Re}b_i) / (2\pi \Delta T) \end{cases} \quad (12)$$

2 改进 Prony 算法

TA 发生暂态饱和时,二次电流波形中饱和数据段和非饱和数据段交替出现。非饱和数据段长度由铁芯饱和程度决定,一般情况下,轻度饱和时非饱和数据段长度为 10 ms 左右,中度饱和时约 5 ms,重度饱和时仅 2.5 ms 左右。基本 Prony 算法需要的计算时间窗较长且计算量较大,故不能直接用于 TA 暂态饱和情况下故障电流信息的提取。结合 TA 暂态饱和和非饱和数据段特征及工频量动作特性要

求,对 Prony 算法进行相应改进。

2.1 给定工频特征根

电力系统故障电流主要由衰减直流分量、工频分量以及谐波分量组成。工频量保护利用故障电流的工频信息构成保护判据,因此可给定 50 Hz 频率对应的 2 个特征根 $z_1 = e^{j2\pi \cdot 50\Delta T}$ 、 $z_2 = e^{-j2\pi \cdot 50\Delta T}$,使得计算结果中必定含有工频分量,提高算法在短时间窗下工频量计算的准确性。

由于 z_1, z_2 为特征方程式(10)的 2 个根,则必有约束条件:

$$\sum_{i=0}^p a_i z_1^{p-i} = 0, \quad \sum_{i=0}^p a_i z_2^{p-i} = 0 \quad (13)$$

要使目标函数式(6)最小,可设拉格朗日函数为:

$$L = \sum_{n=p}^{N-1} |\varepsilon(n)|^2 + \lambda_1 \sum_{i=0}^p a_i z_1^{p-i} + \lambda_2 \sum_{i=0}^p a_i z_2^{p-i} \quad (14)$$

拉格朗日函数对所有变量求偏导为 0,即:

$$\begin{cases} \sum_{m=0}^p 2a_m \left[\sum_{n=p}^{N-1} x(n-m)x^*(n-i) \right] + \lambda_1 z_1^{p-1} + \lambda_2 z_2^{p-1} = 0 \\ \sum_{i=0}^p a_i z_1^{p-i} = 0 \\ \sum_{i=0}^p a_i z_2^{p-i} = 0 \end{cases} \quad (15)$$

令 $r'(i,j) = \sum_{n=p}^{N-1} 2x(n-j)x^*(n-i)$,则式(15)可写成

矩阵形式:

$$\begin{bmatrix} r'(0,0) & r'(0,1) & \cdots & r'(0,p) & z_1^p & z_2^p \\ r'(1,0) & r'(1,1) & \cdots & r'(1,p) & z_1^{p-1} & z_2^{p-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r'(p,0) & r'(p,1) & \cdots & r'(p,p) & 1 & 1 \\ z_1^p & z_1^{p-1} & \cdots & 1 & 0 & 0 \\ z_2^p & z_2^{p-1} & \cdots & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_p \\ \lambda_1 \\ \lambda_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_p \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

$z_1^i, z_2^i (j=0,1,\dots,p)$ 与 $r'(i,j)$ 数值相差比较悬殊,可能会导致方程病态。计算时可先求出 $r'(i,j)$ 的数量级,设为 10^k ,然后对方程进行同解变形:

$$\begin{bmatrix} r'(0,0) & r'(0,1) & \cdots & r'(0,p) & 10^k z_1^p & 10^k z_2^p \\ r'(1,0) & r'(1,1) & \cdots & r'(1,p) & 10^k z_1^{p-1} & 10^k z_2^{p-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ r'(p,0) & r'(p,1) & \cdots & r'(p,p) & 10^k & 10^k \\ 10^k z_1^p & 10^k z_1^{p-1} & \cdots & 10^k & 0 & 0 \\ 10^k z_2^p & 10^k z_2^{p-1} & \cdots & 10^k & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ a_1 \\ \vdots \\ a_p \\ \frac{\lambda_1}{10^k} \\ \frac{\lambda_2}{10^k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_p \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

求解式(17),得到 AR 模型参数,再根据式(12),即可得到各分量参数值。

2.2 奇异值分解降阶

Prony 算法模型阶数的确定对计算结果准确度

和计算量都有较大的影响。辨识未知信号阶数主要与选取时间窗包含的采样点数 N 有关,根据时间序列分析中的经验公式估计阶数上限值 L_{\max} 有^[9]:

$$\begin{cases} \frac{N}{3} \leq L_{\max} \leq \frac{N}{2} & N < 100 \\ L_{\max} = \frac{2N}{\ln(2N)} & 100 \leq N \leq 200 \end{cases} \quad (18)$$

实际计算表明,要获得比较精确的结果,计算阶数通常接近 L_{\max} ,其值较大。实际上,故障电流能量主要集中于工频分量、衰减直流分量及低次谐波中,其他分量幅值都极小。因此,可对样本矩阵进行奇异值分解(SVD),根据奇异值的分布估计信号中主要影响因素的阶数。

SVD 定理:令矩阵 $A \in \mathbb{C}^{m \times n}$,则存在酉矩阵 $U \in \mathbb{C}^{m \times m}$ 、 $V \in \mathbb{C}^{n \times n}$ 使得式(19)成立。

$$A = U \Sigma V^H \quad (19)$$

其中, Σ 为 $n \times n$ 维对角阵,其主对角元素非负,且按从大到小顺序排列。

对于 Prony 算法,可先根据阶数上限经验公式确定 L_{\max} ,并构造样本矩阵:

$$R = \begin{bmatrix} r(1,0) & r(1,1) & \cdots & r(1,L_{\max}) \\ r(2,0) & r(2,1) & \cdots & r(2,L_{\max}) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ r(L_{\max},0) & r(L_{\max},1) & \cdots & r(L_{\max},L_{\max}) \end{bmatrix} \quad (20)$$

对样本矩阵式(20)进行 SVD,奇异值数量级存在较大差异,可取对数进行比较。有效阶数对应的奇异值对数值较大且连续变化;0 附近会有 1 个或 2 个点数值发生突变,认为是有效阶数和噪声的临界分界点;而后奇异值对数值变化趋势极平缓,且数值均很小,对应信号中噪声干扰等非主要成分。计算中,一般将临界分界点化归在有效阶数中。

构造一信号包含衰减直流分量、工频分量以及 2 次、3 次、5 次谐波,其理论阶数为 9,采样率为 500 点/周期,选择 5 ms 数据窗。按照经验公式选择阶数上限为 45,计算样本矩阵并进行 SVD,计算结果如图 1 所示。

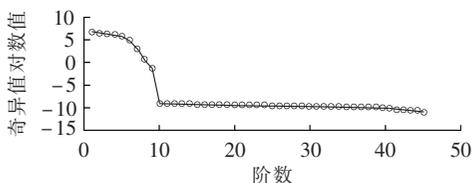


图 1 奇异值分布图

Fig.1 Distribution of singular value

2.3 合理选择计算采样率

式(9)中,方程条件数和采样率间存在 U 型曲线的关系^[10],即存在一个理论上的最优采样频率,使得参数辨识精度最高,故计算用采样频率逼近最优采

样频率时可提高计算精度。定义表达式:

$$F/f_s - B = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ \vdots \\ f_n \end{bmatrix} \frac{1}{f_s} - \begin{bmatrix} \frac{1}{4n} \\ \frac{3}{4n} \\ \vdots \\ \frac{2n-1}{4n} \end{bmatrix} \quad (21)$$

其中, $f_i (i=1, 2, \dots, n)$ 为信号中的各分量频率; n 为分析信号中频率分量的个数; f_s 为采样频率。当式(21)的二范数 $\|F/f_s - B\|$ 取最小时,对应最优采样频率 f_{opt} 。表 1 给出了不同故障电流模型情况下计算得到的最优采样频率,在不考虑时间窗长度限制时最优采样频率都比较低。

表 1 最优采样频率

Tab.1 Optimal sampling frequency

信号频率成分/Hz	最优采样频率/Hz
0,50	84
0,50,150	284
0,50,100,150	280
0,50,100,150,250	445

应用于抗 TA 暂态饱和中时,所选时间窗长度为周期的 1/4 左右,并且考虑到 Prony 算法要求计算的采样点数不能少于 2 倍阶数值,故必须在兼顾时间窗长度和阶数的情况下确定计算用采样频率,使其尽量接近最优采样频率。计算时可将所选时间窗对应采样点数除以 2 倍的由 SVD 确定的阶数值,将结果取整即为估计的分频值。适当降低采样频率后,可减少计算量并提高计算精确度,同时,噪声干扰的影响也会减弱。

2.4 算法流程及应用

利用 TA 暂态饱和时非饱和段数据实现故障电流有效信息提取,改进算法计算流程如下:

- 根据饱和和检测结果,选择非饱和数据段;
- 确定阶数上限,以上限阶数计算样本矩阵;
- 对样本矩阵进行 SVD,估计有效阶数值;
- 根据有效阶数估计值,合理选择计算采样率,保证所选时间窗包含采样点数大于 2 倍阶数值;
- 计算各频率分量参数。

传统算法在 TA 发生暂态饱和后可能引起保护不正确动作,其本质原因在于二次电流发生部分畸变。如对于差动保护,若两侧 TA 由于暂态饱和程度不同,或在最严重情况下仅一侧 TA 发生饱和,在区外故障时亦会出现较大的差电流,引起保护误动作;对于距离保护,不能准确获取工频电流,则阻抗与故障距离的计算会出现较大偏差,可能会引起保护的不正确动作。改进 Prony 算法仅利用故障发生后 3 ~ 5 ms 内的非饱和段数据,获取一次电流信息,故

可以保证保护不受 TA 暂态饱和影响,提高保护动作性能的准确性;其所用时间窗较短,但与半周傅里叶等传统算法相比,计算量较大,过程所需时间较长。故障后 TA 未发生暂态饱和情况下,从故障启动元件动作到保护做出判断所需的时间较传统算法长,故可将改进 Prony 算法与传统算法配合使用,基于改进 Prony 算法的继电保护抗 TA 暂态饱和方案如图 2 所示。

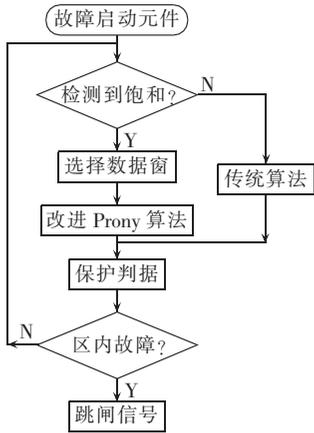


图 2 抗 TA 暂态饱和方案

Fig.2 Scheme against transient CT saturation

3 算例分析

3.1 TA 暂态饱和和试验

为研究 TA 暂态饱和和传变特性,进行了暂态饱和和试验。试验对象选取 P 级 TA,变比为 1 000:1。试验中,一次电流穿芯而过,试验 TA 的二次侧接入录波仪,以便监测其二次电流波形。录波仪采样率为 25 kHz(500 点/周期),一次系统设置连续故障。

连续 2 次故障的二次侧波形见图 3、4。P 级 TA 在故障期间发生了比较明显的暂态饱和现象,并且再次故障时的饱和情况更加严重。试验中通入一次电流为衰减直流分量和工频分量的叠加,参数见表 2。

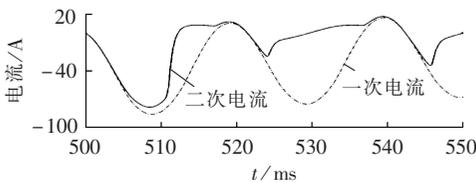


图 3 首次故障电流波形

Fig.3 Current waveforms during first fault

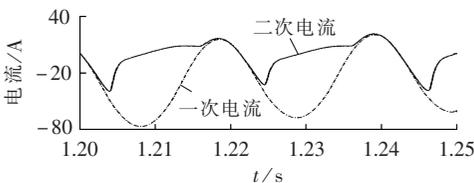


图 4 再次故障二次电流波形图

Fig.4 Current waveforms during second fault

表 2 一次电流参数

Tab.2 Parameters of primary current

故障	工频电流分量		衰减直流初值/A	衰减因子
	幅值/A	相位/(°)		
首次故障	46.29	0.2471	45.44	-10.80
再次故障	43.43	0.5361	39.72	-12.64

首次故障时,非饱和段数据长度大于 5 ms,选择 5 ms(125 个采样点)数据窗进行计算。由式(19)选择阶数上限值为 45,构造样本矩阵并进行 SVD,据图 5 可估计有效阶数为 3,故进行 15 分频,5 ms 时间窗对应 8 个采样点。

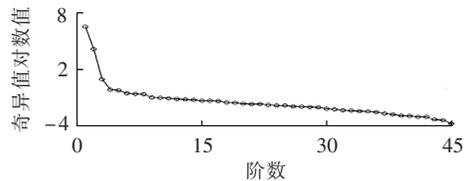


图 5 首次故障奇异值分布图

Fig.5 Distribution of singular value during first fault

短时间窗条件下,不能直接使用基本 Prony 算法计算,以下所列均为给定 50 Hz 特征根条件下不同阶数和采样率的计算结果对比。表 3 中,采样率较高时,所选计算阶数需远高于信号主要阶数,才能得到比较精确的结果,这导致计算量剧增。进行合理的分频降阶后,可得到准确度相当或更好的结果,大幅减少了计算量。

表 3 首次故障电流计算结果

Tab.3 Calculative results of fault current during first fault

阶数	工频电流分量			衰减直流初值/A	衰减因子
	幅值/A	幅值误差/%	相位/(°)		
15 阶	29.30	-36.71	80.79	5.42	-241.20
25 阶	48.89	5.60	27.50	44.93	-44.12
15 分频 3 阶	48.35	4.43	25.78	45.18	-3.55

由图 4 可见,再次故障时饱和更加严重,第 1 个周期内非饱和数据段缩短,选择 2.5 ms 数据窗进行计算,选择阶数上限为 30,根据图 6 可得有效阶数约为 3~5 阶,取 5 阶;对原信号进行 5 分频,2.5 ms 数据窗对应 12 个采样点。

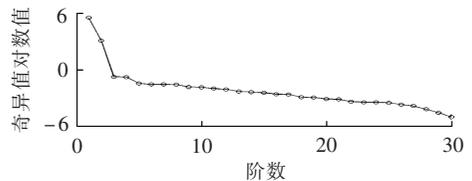


图 6 再次故障奇异值分布图

Fig.6 Distribution of singular value during second fault

表 4 计算结果中,除衰减直流分量和工频分量外,剩余的一个频率分量幅值极小,不再列出。在 TA 严重饱和情况下,使用更短的数据窗进行计算,亦能

表 4 再次故障电流计算结果

Tab.4 Calculative results of fault current during second fault

阶数	工频电流分量				衰减直流初值/A	衰减因子
	幅值/A	幅值误差/%	相位/(°)	相位误差/(°)		
5 分频 5 阶 (使用二次电流)	45.66	5.14	60.16	14.51	25.81	-140.79
5 分频 5 阶 (使用一次电流)	44.22	1.88	41.83	30.72	36.08	-20.12

准确提取故障电流中的工频分量幅值。但由表 4 可见,使用二次电流计算时,5P30 型 TA 幅值误差大于 5%,相位误差也较大,这主要是由于 P 级 TA 在严重饱和情况下,在非饱和段亦会有一些偏差。表 4 中最后一列,选取同一时间段一次电流数据进行计算,则可以得到准确的计算结果。

3.2 实际故障录波

选取电力系统实际运行过程中,线路发生 BC 相间短路时,变压器差动保护 C 相 TA 录波数据进行分析。TA 二次侧电流信号采样率为 3 kHz,所含噪声干扰较大。非饱和段数据长度在 10 ms 左右,计算采用 10 ms 数据窗,对应 30 个采样点,选择阶数上限为 15。

由图 7 可估计信号有效阶数为 3 阶,故采用 3 分频进行计算,计算结果和原始采样率计算结果见表 5,各拟合数据与原始信号对比见图 8。表 5 中,采用分频降阶处理后的结果与原始采样频率高阶计算结果非常接近,特别是工频量的幅值和相位以及

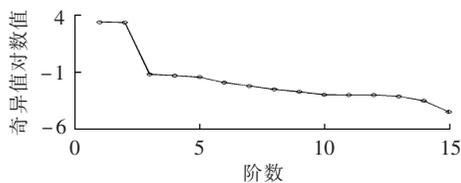


图 7 录波数据奇异值分布图

Fig.7 Singular value distribution of data record

表 5 改进 Prony 算法计算结果

Tab.5 Calculative results of improved Prony algorithm

阶数	工频电流分量		衰减直流初值/A	衰减因子
	幅值/A	相位/(°)		
3 分频 3 阶	6.91	173.03	0.77	-72.31
15 阶	7.02	167.88	0.79	-22.31

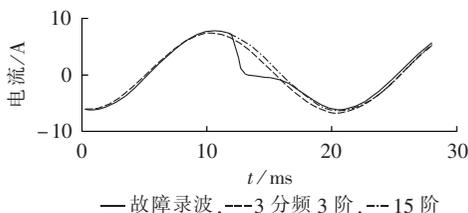


图 8 改进 Prony 算法拟合结果

Fig.8 Fitting results of improved Prony algorithm

衰减直流分量初值差异极小,衰减因子相差较大,但其对于波形的影响甚小,拟合结果与原始录波数据在非饱和段吻合得很好。

3.3 转换型故障仿真算例

利用 PSCAD 搭建 330 kV 双电源系统,接线如图 9 所示,一侧采用 3/2 接线方式。仿真主要研究线路 L₂ 的差动保护,其中 M 侧电流 I_{m1}、I_{m2} 分别由 TA₁ 和 TA₂ 得到,N 侧电流 I_n 由 TA₃ 得到。TA₁ 和 TA₃ 在仿真中采用理想 TA 模型,故障过程中不发生暂态饱和现象。TA₂ 在仿真中采用自带 JA 模型,通过合理设置各项参数来模拟 P 级 TA 在故障过程中发生的暂态饱和现象。一次系统设置区外转区内型单相接地故障,区外故障持续 100 ms,区内故障持续 100 ms,故障间隔时间 110 ms。故障电流波形如图 10 所示。

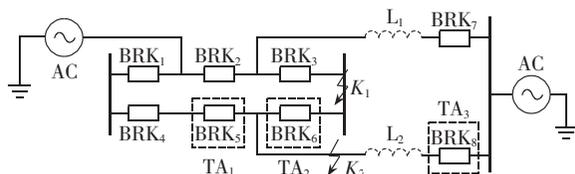


图 9 线路差动保护示意图

Fig.9 Schematic diagram of line differential protection

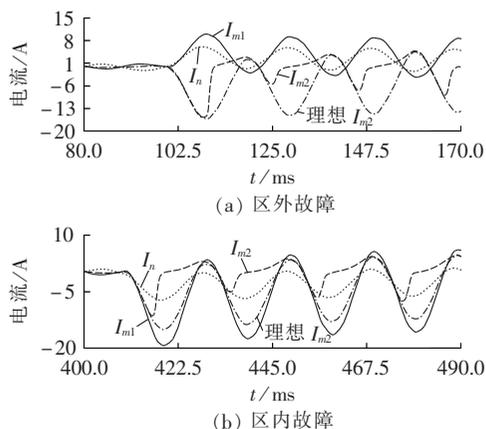


图 10 故障电流波形

Fig.10 Waveforms of fault current

基于工频量的线路差动保护常采用比率制动,其制动电流 I_{res} 、动作电流 I_d 以及保护判据由式 (22)~(24) 给出:

$$I_d = I_{m1} + I_{m2} + I_n \quad (22)$$

$$I_{res} = I_{m1} + I_{m2} - I_n \quad (23)$$

$$\begin{cases} |I_d| > K |I_{res}| \\ |I_d| > I_{CD} \end{cases} \quad (24)$$

其中, I_{CD} 为门槛值,其值较小,本算例中取为 1 A; K 为制动系数,取值范围为 0.4~0.6,本算例中取 0.6。直接使用傅里叶算法提取工频量进行计算,会出现较大偏差,区外故障期间动作特性如图 11 所示,可见线路差动保护落在动作区,会发生误动作。若为了

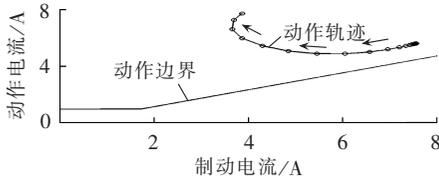


图 11 区外故障傅里叶算法结果

Fig.11 Calculative result of Fourier algorithm for out-zone fault

防止由 TA 暂态饱和引起的区外故障保护误动作,在检测到 TA 发生暂态饱和后闭锁保护,则在接下来的区内故障期间,线路 L₂ 保护会发生拒动。

使用改进 Prony 算法进行计算,根据样本矩阵 SVD 结果估测有效阶数为 7 阶,区外故障选择 5 ms 数据窗,区内故障选择 3.5 ms 数据窗,计算结果见表 6。区外故障期间,动作电流接近 0,根据式(24)可知,保护不会发生误动作;区内故障期间,动作电流显著大于制动电流,根据式(24)可知保护不会发生拒动。故使用改进 Prony 算法可防止由 TA 暂态饱和引起的区外故障误动作以及为防止区外故障保护误动作采取闭锁保护措施时,可能引起的区内故障保护拒动。

表 6 改进 Prony 算法计算结果

Tab.6 Calculative results of improved Prony algorithm

电流	区外故障		区内故障	
	幅值/A	相位/(°)	幅值/A	相位/(°)
I_{m1}	5.47	-162.72	10.38	25.21
I_{m2}	8.50	24.64	8.26	30.37
I_n	3.15	142.67	3.59	52.14
I_d	0.01		21.93	
I_{ns}	6.30		15.43	

4 结语

文章介绍了 Prony 算法基本原理,针对 TA 暂态饱和时面临的短数据窗以及继电保护快速性要求等问题,提出了改进 Prony 算法。改进方法包括给定 50 Hz 工频量对应特征根、SVD 降阶、合理选择采样频率。改进算法可利用二次电流中非饱和数据段在较短数据窗内迅速获取故障电流有效信息。利用试验数据及故障录波数据,在不同程度 TA 暂态饱和情况下,分别选取 10 ms、5 ms 以及 2.5 ms 时间窗使用改进 Prony 算法进行计算,计算结果证明改进算法可不受 TA 暂态饱和影响,准确获取故障电流有效信息;通过仿真算例,验证了改进算法在转换型故障期间,可保证线路保护正确动作。本文提出的改进 Prony 算法可为防止由 TA 暂态饱和引起的继电保护不正确动作提供一种新的思路。

参考文献:

[1] 袁季修,卓乐友,盛和乐,等. 保护用电流互感器应用的若干问

题——《电流互感器和电压互感器选择和计算导则》简介[J]. 电力自动化设备,2003,23(8):69-72.

YUAN Jixiu,ZHUO Leyou,SHENG Hele,et al. Some problems on application of current transformers in protection—introduction of “Guide to the selection and calculation of CT and PT”[J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(8):69-72.

[2] 袁季修,卓乐友,吴聚业. 保护用电流互感器应用指南[M]. 北京:中国电力出版社,2003:8-109.

[3] 浦南桢,翟学峰,袁宇波,等. P 级 TA 饱和对数字式比率制动特性差动保护的影响[J]. 电力自动化设备,2003,23(4):76-80.

PU Nanzhen,ZHAI Xuefeng,YUAN Yubo,et al. Impact of P-type CT saturation on digital ratio-restrained differential protection [J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(4):76-80.

[4] 王志鹏,郑玉平,贺家李. 通过计算谐波比确定母线保护中电流互感器的饱和[J]. 电力系统及其自动化学报,2000,12(5):19-24.

WANG Zhipeng,ZHENG Yuping,HE Jiali. An algorithm to distinguish current transformer’s saturation by calculating the harmonic ratio of the brance current [J]. Proceedings of the CSU-EPSA,2000,12(5):19-24.

[5] 李丽,都洪基,刘林兴,等. 计算谐波比确定母线保护中电流互感器的饱和[J]. 电力自动化设备,2003,23(7):69-72.

LI Li,DU Hongji,LIN Linxing,et al. Research on confirming on CT’s saturation busbar protection by calculating harmonic ration [J]. Electric Power Automation Equipment,2003,23(7):69-72.

[6] 郝后堂,史泽兵,江卫良. 重合于故障时 TA 饱和对差动保护的影响及对策[J]. 电力自动化设备,2013,33(4):167-170.

HAO Houtang,SHI Zebing,JIANG Weiliang. Influence of CT saturation on differential protection during faulty line reclose and countermeasure [J]. Electric Power Automation Equipment,2013,33(4):167-170.

[7] 李岩,陈德树,张哲,等. 鉴别 TA 饱和的改进时差法研究[J]. 继电器,2001,29(11):1-8.

LI Yan,CHEN Deshu,ZHANG Zhe,et al. Research of the improved time difference method to distinguish TA’s saturation [J]. Relay,2001,29(11):1-8.

[8] 曹豫宁,李永丽,张兴华,等. 基于小波变换的电流互感器饱和实时检测新判据[J]. 电力系统自动化,2001,25(10):27-30.

CAO Yuning,LI Yongli,ZHANG Xinghua,et al. A new on-line criterion for current transformer saturation based on wavelet transform[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,25(10):27-30.

[9] KANG Y C,LIM U J,KANG S H,et al. Compensation of the distortion in the secondary current caused by saturation and remanence in a CT[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(4):1642-1649.

[10] KANG Y C,KANG S H. T saturation detection algorithm[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(1):78-85.

[11] 龚狄武,龙志君,刘韬文,等. 基于 ANN 的补偿电流互感器饱和和对传变电流影响的算法[J]. 电力系统自动化,2001,12(6):34-36.

GONG Qingwu,LONG Zhijun,LIU Taowen,et al. ANN based algorithm to solve transforming error caused by current transformer saturation[J]. Automation of Electric Power Systems,2001,12(6):34-36.

[12] PAN J,VU K,HU Y. An efficient compensation algorithm for current transformer saturation effects[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2004,19(4):1623-1628.

- [13] 文明浩,陈德树. 小矢量算法浅析[J]. 电力系统自动化,2003,27(5):42-44.
WEN Minghao, CHEN Deshu. Simple analysis of phaselet algorithm[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(5):42-44.
- [14] 王家林,夏立,吴正国,等. 采用改进 Prony 算法的电力系统故障暂态信号分析[J]. 电力自动化设备,2012,32(7):89-93.
WANG Jialin, XIA Li, WU Zhengguo, et al. Power system harmonic state estimation based on generalized ridge estimation [J]. Electric Power Automation Equipment, 2012, 32(7):89-93.
- [15] 张贤达. 矩阵分析与应用[M]. 北京:清华大学出版社,2004.
- [16] BUSHUEV O, IBRYAEVA O. Choosing an optimal sampling rate to improve the performance of signal analysis by Prony's method[C]//2012 35th International Conference on Telecom-

munication and Signal Processing. Prague, The Czech Republic: IEEE, 2012:634-638.

作者简介:



任龙飞

任龙飞(1989-),男,陕西宝鸡人,硕士研究生,主要研究方向为电力系统继电保护(E-mail:ren.longfei@qq.com);
郝治国(1976-),男,内蒙古鄂尔多斯人,副教授,博士,主要研究方向为电力系统继电保护及电力系统建模与仿真等;
张保会(1953-),男,河北魏县人,教授,博士,从事电力系统继电保护、安全自动装置、电力系统通信等方面的研究工作。

Improved Prony algorithm against transient CT saturation for relay protection

REN Longfei¹, HAO Zhiguo¹, ZHANG Baohui¹, WANG Xiaoli²

(1. College of Electrical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Ningxia Power Dispatch Centre, Yinchuan 750001, China)

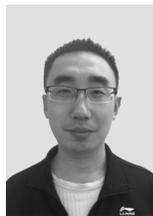
Abstract: The transient CT(Current Transformer) saturation may cause the malfunction of relay protection, for which an improved Prony algorithm is proposed. In order to improve the calculation accuracy and decrease the calculation load in short data window, it sets the eigenvalues corresponding to 50 Hz, adopts SVD(Singular Value Decomposition) to reduce the order and acquires data with the sampling frequency nearest to the optimal one. Data of transient CT saturation experiments and calculative results based on actual fault recording data demonstrate that, the useful information of faulty currents can be quickly extracted out by the proposed algorithm only based on the unsaturated section of CT secondary current in short data window. Results of case simulation also show that, the proposed algorithm guarantees the proper operation of relay protection during fault transfer.

Key words: current transformer; transient saturation; Prony algorithm; short time window; relay protection

(上接第 120 页 continued from page 120)

- magnetically controllable reactor[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(11):77-81.
- [16] 陈柏超. 新型可控饱和电抗器理论及应用[M]. 武汉:武汉水利电力大学出版社,1999:41-45.
- [17] 刘海鹏,尹忠东,赵士硕. 磁控电抗器快速性研究[J]. 电力电子技术,2013,47(1):15-17.
LIU Haipeng, YIN Zhongdong, ZHAO Shishuo. Research on the quickness of magnetically controlled reactor[J]. Power Electronics, 2013, 47(1):15-17.

作者简介:



刘海鹏

刘海鹏(1982-),男,山西晋中人,博士研究生,主要研究方向为电力电子技术在电力系统中的应用(E-mail:liuhaipeng_2005@163.com);

尹忠东(1968-),男,江西井冈山山人,教授,博士,主要从事 FACTS、电能质量与高压技术方面的教学、研究工作。

Improvement of SMCR response

LIU Haipeng^{1,2}, YIN Zhongdong¹, LI Heming¹, CAO Songwei¹

(1. State Key Laboratory of Alternate Electrical Power System with Renewable Energy Sources,

North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Faculty of Information Engineering and Automation, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: The excitation and demagnetization responses of SMCR(Separate excitation Magnetic Control Reactor) are slow, which limits its application. The structure and working principle of SMCR are introduced and the factors influencing its response are analyzed. An improved winding structure of SMCR is proposed to eliminate the DC circulation in its working winding loop, which effectively enhances the response of its working current. The working current reaches the stable status if once the control current is stable. The improved SMCR has the same output current of the traditional SMCR under the same AC working voltage. The experimental results verify that the structural improvement is rational and effective.

Key words: SMCR; DC circulation; response speed; winding structure; current control; electric reactors