

基于 Prony 分析的励磁涌流识别方法

王雪

(华北电力大学电力系, 河北 保定 071003)

摘要: 目前电力变压器差动保护的主要问题仍是如何准确识别出励磁涌流。励磁涌流中包含大量谐波分量, 各谐波分量除幅值信息之外还包括衰减信息, 如何有效地利用这些信息来提高保护动作的正确率是一个值得关注的问题。利用 Prony 分析方法可以直接计算出各分量的频率、幅值、衰减等信息, 本文利用 Matlab 语言实现 Prony 分析方法, 获得了涌流中谐波衰减特征, 利用二次谐波衰减因数和基波衰减因数之比构成识别涌流的新方法, 通过对动模试验数据的分析计算验证了本方法的有效性。

关键词: Prony 分析; 励磁涌流; 谐波分量; 衰减因数; 动模试验

An inrush current identification method based on Prony analysis

WANG Xue

(Dept of Electric Power Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China)

Abstract: Now the main problem in differential protection of transformer is how to identify inrush current. Inrush current contains a mass of harmonic components, which have the information of attenuation besides of magnitude. How to use these information to improve the performance of transformer protection is worthy studying. The information of frequency, magnitude and attenuation can be calculated directly with Prony analysis method. In the paper, Prony method is realized with Matlab program and the attenuation characteristic of all harmonic components are obtained. A new method to recognize inrush is put forward based on the ratio between the attenuation of the second harmonic component and the primary component. The availability of the method is proved by data analyzing from dynamic analog test.

Key words: Prony analysis; inrush current; harmonic component; attenuation factor; dynamic analog test

中图分类号: TM77 文献标识码: A 文章编号: 1003-4897(2007)06-0001-04

0 引言

电力变压器是电力系统中十分重要的供电设备, 它的故障将对供电可靠性和系统的正常运行带来严重的影响, 一直以来人们对变压器保护进行了大量研究, 取得了很多成果^[1~4]。但是保护正确动作率一直很低平均不到 80%, 绝大部分属于误动^[5]。对于目前普遍应用的变压器差动保护而言, 主要问题在于如何准确识别励磁涌流和内部故障电流。现在实际运行的差动保护大多利用二次谐波制动原理来识别励磁涌流, 但是由于多种原因尤其是目前大型变压器铁芯采用冷轧硅钢片之后, 使励磁涌流中二次谐波含量有时低至 10% 以下, 影响二次谐波制动原理的应用效果^[6]。不过我们应该看到二次谐波制动原理只用到了二次谐波幅值上的区别, 没有注意到各谐波分量在变压器不同状态下衰减速度

的不同, 经过对动模试验数据的分析可以看到这种差别是明显存在的, 因此把这种特征加以利用必然可以提高差动保护的应用性能。

Prony 分析是 1795 年 Prony 提出的使用指数函数的线性组合来描述等间隔采样数据的数学模型, 非常适合分析电力系统暂态变量, 目前 Prony 方法已在电力系统中得到广泛应用^[7~15]。相对于傅立叶分析它有下列的优点: 可以直接求信号的幅值、相位、衰减常数, 无需从频域来求, 计算量大为减小, 而且无需考虑衰减直流分量造成的频率混叠对结果的影响。

本文利用 Prony 分析方法计算出电流中二次谐波分量和基波分量的衰减特征, 并据此识别励磁涌流, 通过对动模试验数据的分析可以验证该方法的有效性。

1 Prony 分析^[16]

1.1 Prony 分析模型

Prony 分析采用的数学模型为一组 p 个具有任意幅值、相位、频率与衰减因子的指数函数，其离散时间的数学形式为：

$$\hat{x}(n) = \sum_{i=1}^p b_i z_i^n \quad n = 0, 1, \dots, N-1 \quad (1)$$

其中： b_i 和 z_i 为复数，即

$$\begin{aligned} b_i &= A_i \exp(j\theta_i) \\ z_i &= \exp[(\alpha_i + j2\pi f_i)\Delta t] \end{aligned} \quad (2)$$

式中： A_i 为幅值， θ_i 为相位， α_i 为衰减因子， f_i 为信号频率。

1.2 Prony 分析原理

本算法用式 (1) 的结果拟合原始数据，拟合的目的是使最小二乘意义上的总方差最小。在计算参数的过程中为避免求解非线性方程组，这里采用下面的方法。首先定义特征多项式，

$$\psi(z) = \prod_{i=1}^p (z - z_i) = \sum_{i=0}^p \alpha_i z^{p-i} \quad (\alpha_0 = 1) \quad (3)$$

z_i 为多项式的特征根。

根据式 (1)、(3) 可以得到一个递推的差分方程式

$$\begin{aligned} x(n) &= -\sum_{i=1}^p \alpha_i x(n-i) + \varepsilon(n) \\ n &= 0, 1, \dots, N-1 \end{aligned} \quad (4)$$

式 (4) 可以看作一组线性的矩阵方程，应用广义逆的方法可以求出满足最小二乘的根 α_i ，将其代入式 (3) 就可以求出 z_i 的值。由 z_i 可以求出下面参数的数值：

$$\alpha_i = \ln|z_i| / \Delta t \quad (5)$$

$$f_i = \arctan[\text{Im}(z_i) / \text{Re}(z_i)] / (2\pi\Delta t) \quad (6)$$

求得 z_i 之后，指数模型式 (1) 可以简化为未知参数 b_i 的线性方程，即：

$$\mathbf{Z}\mathbf{b} = \hat{\mathbf{x}} \quad (7)$$

$$\text{式中： } \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ z_1 & z_2 & \dots & z_p \\ \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ z_1^{N-1} & z_2^{N-1} & \dots & z_p^{N-1} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{b} = [b_1, b_2, \dots, b_p]^T$$

$$\hat{\mathbf{x}} = [\hat{x}(0), \hat{x}(1), \dots, \hat{x}(N-1)]^T$$

由式 (7) 可以计算出参数 b_i ：

$$\mathbf{b} = (\mathbf{Z}^H \mathbf{Z})^{-1} \mathbf{Z}^H \hat{\mathbf{x}} \quad (8)$$

根据 b_i 的数值，进而可以计算 A_i 、 θ_i ：

$$A_i = |b_i| \quad (9)$$

$$\theta_i = \arctan[\text{Im}(b_i) / \text{Re}(b_i)] / (2\pi\Delta t) \quad (10)$$

2 基于电流衰减特征的涌流识别方法

图 1 为正常变压器空载合闸和带故障变压器空载合闸时的电流波形。其中波形 1 为正常变压器空载合闸时电流波形，波形 2 为带故障变压器空载合闸时电流波形，可以明显地看到涌流时电流衰减较快，而有故障的情况下基本看不到明显的衰减，基于这种情况，这里提出下面几种衰减特征：基波分量的衰减常数、二次谐波分量衰减常数、二次谐波分量衰减常数与基波分量的衰减常数之比。通过对这三个特征的分析、比较，最终确定了一种基于分量衰减速度比值特征的识别涌流的方法。

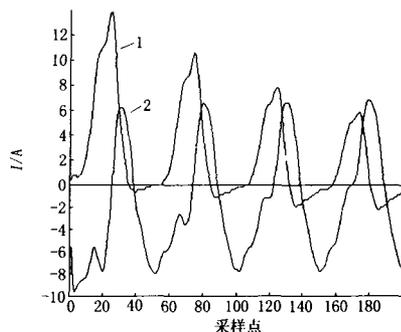


图 1 变压器电流波形

Fig.1 Current waveforms of transformer

3 电流信号的 Prony 方法分析

3.1 动模试验系统

为了对前面提出的特征进行分析，通过动模试验获得了大量变压器在各种运行状态下的真实数据。动模试验系统接线如图 2 所示。

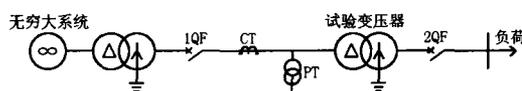


图 2 动模试验系统接线

Fig.2 Dynamic analog test system

试验变压器为三相变压器组，接线为 Y/d11，

单相变压器的参数为：额定容量 10kVA，额定电压 500/380kV，空载电流为 1.45%，空载损耗为 1%，短路电压为 14%，短路损耗为 0.35%。在后面的分析过程中每周波采样点数为 50。

3.2 Prony 方法分析结果

电力系统暂态信号中包含丰富的衰减谐波信息，Prony 方法可以准确的把它们分离计算出来，图 3 是利用 Prony 方法分解励磁涌流谐波信息，然后又由这些分量拟合原涌流波形，可以看到拟合点和原波形十分吻合，从这里也可以看到 Prony 方法分析暂态信号的正确性。

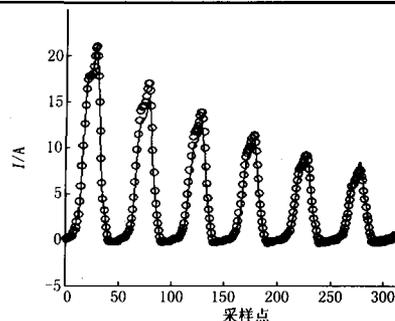


图 3 励磁涌流的 Prony 方法拟合
Fig.3 Fitting wave of inrush by Prony method

表 1 各种运行状态下变压器高压侧电流的 Prony 方法分析结果

Tab.1 Analysis results of primary current of transformer with Prony method

| 运行状态 | | α_1 | | α_2 | | α_2/α_1 | |
|---------|----|--------------------------|--------------------------|-------------------|--------------------------|---------------------|---------------------|
| | | 故障相 | 正常相 | 故障相 | 正常相 | 故障相 | 正常相 |
| 正常空载合闸 | | -1.19~-26.89 | | -0.77~-32.78 | | 0.65~1.77 | |
| 带故障空载合闸 | 匝间 | >0 或 -0.01~ -2.03 | >0 或 -0.22~ -12.8 | -2.78~ -13.81 | -2.21~ -14.14 | <0 或 2.02~ 336.8 | <0 或 1.82~ 15.88 |
| | 接地 | >0 或 -0.002~ -0.71 | >0 或 -0.19~ -3.78 | -5.98 ~ -47.77 | -2.77 ~ -59.19 | <0 或>21.26 | <0 或>3.82 |
| | 相间 | >0 或 -0.03~ -0.54 | >0 或 -1.48~ -12.60 | -1.63 ~ -62.89 | -4.49~ -32.02 | <0 或>34.15 | <0 或>2.3 |
| 运行中发生故障 | 匝间 | >0 或 -0.002~ -0.13 | >0 或 -0.01~ -0.13 | -4.2 ~ -16.25 | >0 或 -0.76~ -23.02 | <0 或>46.16 | <0 或>16 |
| | 接地 | >0 或 -0.01~ -0.06 | >0 或 -0.03~ -0.41 | -22.12~ -62.09 | -4.88~ -41.82 | <0 或>454.60 | <0 或>101.43 |
| | 相间 | >0 或 -0.03~ -0.07 | 0.01~0.40 | -5.09~ -69.73 | -15.52~ -77.90 | <0 或>202.56 | <0 |

注：表中 α_1 是基波分量衰减因数， α_2 是二次谐波分量衰减因数

表 1 给出了变压器在各种运行状态下的高压侧三相电流的 Prony 方法分析结果。从中可以看到前面指出的三个特征量在不同的运行状态下也不是定值，在一定的范围内变化，正常变压器空载合闸时励磁涌流的产生和很多因素相关，其大小和衰减速度也是变化的，大多数情况下基波分量衰减是比较快的，衰减因数绝对值大于 5，但是少数情况下只能达到 1 左右，在带有故障的情况下，基波分量衰减是很小的，衰减因数绝对值一般都小于 1，有

时在故障发生开始的一段时间内基波幅值还是增加的，但是当故障比较轻微时衰减因数绝对值可达到 2 左右，因此如果单纯依靠基波的衰减速度来识别涌流，不可避免会有错误判断。同样可以看到二次谐波分量衰减速度在不同情况下也有一定程度的交叉。

因此本文最终选择二者的比值作为判断的依据，在涌流情况下二次谐波衰减速度和基波衰减速度是大致相当的，然而在故障的情况下，基波衰减

很小甚至还有小幅增加,而二次谐波分量衰减则非常快,这一点在故障相上体现的更为充分,其比值或者是负值或者是很大的一个数值。根据对大量动模数据的分析结果,可以把门槛值定位 2,如果二次谐波衰减速度和基波衰减速度比值大于 2 或者为负数,就判断变压器发生故障,否则判断变压器正常。

针对本文选取的定值当变压器带有轻微匝间故障空载空闸时候,能够正确识别但灵敏度不是很高,因为变压器轻微故障时候外部电气量变化是非常小的,但是当故障严重程度增加之后,这个比值很快上升达到几十,甚至几百,因此总的来看采用这种方法的灵敏度比目前采用的二次谐波制动原理有了很大的提高。

4 结论

本文利用 Prony 方法对变压器在不同工作状态下的动模试验数据进行了分析,比较了不同电流分量的衰减速度以及衰减速度的比值,在分析的基础上提出利用二次谐波衰减速度和基波衰减速度比值大小来识别励磁涌流,从动模数据的分析结果上看这种方法大大提高了判断的灵敏度。

参考文献

- [1] 张雪松,何奔腾. 变压器励磁涌流的相移比较鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(19): 43-47.
ZHANG Xue-song, HE Ben-teng. A New Method to Identify Inrush Current by Phasor Comparison[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(19): 43-47
- [2] 郑涛,刘万顺,刘建飞,等. 采用数学形态学防止变压器差动保护误动的新方法[J]. 中国电机工程学报, 2005, 25(20): 6-11.
ZHENG Tao, LIU Wan-shun, LIU Jian-fei, et al. A New Algorithm Based on the Mathematical Morphology for Avoiding Maloperation of Transformer Differential Protection[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25(20): 6-11.
- [3] 宗洪良, 金华烽, 朱振飞, 等. 基于励磁阻抗变化的变压器历次涌流判别方法[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(7): 91-94.
ZONG Hong-liang, JIN Hua-feng, ZHU Zhen-fei, et al. Transformer Inrush Detected by the Variation of Magnetizing Impedance[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(7): 91-94.
- [4] 陈德树, 尹项根, 张哲, 等. 虚拟三次谐波制动式变压器差动保护[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(8): 19-23.
CHEN De-shu, YIN Xiang-gen, ZHANG Zhe, et al. Virtual Third Harmonic Restrained Transformer Differential Protection Principle and Practice[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(8): 19-23.
- [5] 周玉兰, 王玉玲, 赵曼勇. 2004 年全国电网继电保护与安全自动装置运行情况[J]. 电网技术, 2004, 29(16): 42-48.
ZHAO Yu-lan, WANG Yu-ling, ZHAO Man-yong. Statistics of Operation Situation of Protective Relays and Automation Devices of Power Systems in China in 2004[J]. Power System Technology, 2004, 29(16): 42-48.
- [6] 王维俭. 电气主设备继电保护原理与应用(第二版)[M]. 北京: 中国电力出版社, 2002.
WANG Wei-jian. Relay Protection Theory and Application of Electric Main Equipment[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2002.
- [7] 曹维, 翁斌伟, 陈陈. 电力系统暂态变量的 Prony 分析[J]. 电工技术学报, 2000, 15(6): 56-60.
CAO Wei, WENG Bin-wei, CHEN Chen. Prony Analysis of Power System Transient Variables[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2000, 15(6): 56-60.
- [8] 郁惟镛, 吴小建, 左问, 等. 基于暂态分量的小电流接地系统故障定位新方案[J]. 中国电力, 1998, 31(2): 13-16.
YU Wei-yong, WU Xiao-jian, ZUO Wen, et al. Fault Location on Peterson-coil Grounding System Based on Transient Component[J]. Electric Power, 1998, 31(2): 13-16.
- [9] 吴茂林, 崔翔, 卢铁兵, 等. 变电站瞬态过程德 Prony 分析[J]. 华北电力大学学报, 2004, 31(2): 24-27.
WU Mao-lin, CUI Xiang, LU Tie-bing, et al. Prony Analysis on Electromagnetic Transient Process in Substation[J]. Journal of North China Electric Power University, 2004, 31(2): 24-27.
- [10] 徐东杰, 贺仁睦, 高海龙. 基于迭代 Prony 算法德传递函数识别[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(6): 40-43.
XU Dong-jie, HE Ren-mu, GAO Hai-long. Transfer Function Identification Using Iterative Prony Method[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(6): 40-43.
- [11] 芦晶晶, 郭剑, 田芳, 等. 基于 Prony 方法德电力系统振荡模式分析及 PSS 参数设计[J]. 电网技术, 2004, 28(15): 31-34.
LU Jing-jing, GUO Jian, TIAN Fang, et al. Power System Oscillation Mode Analysis and Parameter Determination of PSS Based on Prony Method[J]. Power System Technology, 2004, 28(15): 31-34.
- [12] Hauer J F, Demeure C J, Scharf L L. Initial Results in Prony Analysis of Power System Response Signals[A]. In: IEEE Summer Meeting [C]. California: 1989.
(下转第 15 页 continued on page 15)

- Triangles and Their Mathematical Properties[J]. *Applicat Fibonacci Numbers*, 1990,5:199-206.
- [18] Ferri G, Faccio M, Amico A D. A New Fast Method for Ladder Networks Characterization[J]. *IEEE Trans on Circuits Syst I*, 1991,38:1377-1382.
- [19] Antonini G. A New Methodology for the Transient Analysis of Lossy and Dispersive Multiconductor Transmission Lines[J]. *IEEE Trans on Microwave Theory and Techniques*, 2004,52(9):2227-2239.
- [20] LU Tie-bing, CUI Xiang, LI Lin. Transient Analysis of Aerial Multi-conductor Transmission Lines with Branch[J]. *IEEE Trans on Magn*, 2001,37(5):3298-3302.
- [21] LU Tie-bing, CUI Xiang, LI Lin. Time-domain Analysis of Transient Electromagnetic Field Generated by Aerial Busbars above Lossy Soil[J]. *IEEE Trans on Magn*, 2002,38(2):773-776.
- [22] Lee S Y, Konrad A, Saldanha R. Lossy Transmission Line Transient Analysis by the Finite Element Method[J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 1993,29(2):1730-1732.
- [23] Miranda G C D, Emilio A, Araujo A Dm, et al. Finite Element Method for Transmission Line Corona Effect Simulation Using the EMTP[J]. *Electric Machines and Power Systems*, 1999,27(7):781-794.
- [24] Dao J, Jin J A. General Approach for the Stability Analysis of the Time Domain Finite Element Method for Electromagnetic Simulations[J]. *IEEE Trans on Ant Pro*, 2002,50(11):1624-1632.
- [25] Raugi M. Wavelet Transform Solution of Multi-Conductor Transmission Line Transients[J]. *IEEE Trans on Magnetics*, 1999,35(3): 1554-1557.
- [26] Grivet-Talocia S, Canavero F. Wavelet-based Adaptive Solution for the Nonuniform Multiconductor Transmission Lines[J]. *IEEE Microwave and Guided Wave Letters*, 1998,8:287-289.
- [27] Raugi B M. Transient Numerical Solution of Nonuniform MTL Equations with Nonlinear Loads by Wavelet Expansion in Time or Space Domain[J]. *IEEE Trans on CAS*, 2000,47(8):1178-1190.
- [28] Chui C K. Wavelets: A Tutorial in Theory and Applications[M]. New York, Academic Press, 1992.
- [29] Daubechies I. The Wavelet Transform, Time-frequency Localization and Signal Analysis[J]. *IEEE Trans on Information Theory*, 1990, 36(5):961-1005.
- [30] Mallat S, Zhong S. Characterization of Signals from Multi-Scale Edge[J]. *IEEE Trans on PAMI*, 1992,14(7): 710-732.

收稿日期: 2006-07-01; 修回日期: 2006-10-18

作者简介:

王大鹏(1970-), 女, 副教授, 硕士, 研究方向为电力系统继电保护;

魏佩瑜(1960-), 女, 副教授, 学士, 研究方向为电工理论与新技术;

王婧(1983-), 女, 硕士研究生, 研究方向为电力系统继电保护;

哈恒旭(1972-), 男, 博士, 副教授, 研究方向为电力系统继电保护。E-mail:hxharr@163.com

(上接第4页 continued from page 4)

- [13] 石敏, 吴正国, 尹为民. 基于多信号分类法和普罗尼法的间谐波参数估计[J]. *电网技术*, 2005, 29(15): 81-84.
SHI Min, WU Zheng-guo, YIN Wei-min. Inter-harmonic Parameter Estimation Based on Multi-signal Classification and Prony Method[J]. *Power System Technology*, 2005,29(15):81-84.
- [14] 李一泉, 何奔腾. 基于 Prony 算法的电容式电压互感器暂态基波识别[J]. *中国电机工程学报*, 2005, 25(14): 30-34.
LI Yi-quan, HE Ben-teng. Identification of Fundamental Wave in CTV Transient Process Based on Expanded Prony Algorithm[J]. *Proceedings of the CSEE*, 2005, 25(14):30-34.
- [15] Pierre D A, Trudnowski D J, Hauer J F. Identifying Linear Reduced-order Models for Systems with Arbitrary Initial Conditions Using Prony Signal Analysis[J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1992, 37(6): 831-835.
- [16] 张贤达. 现代信号处理(第二版)[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002.
ZHANG Xian-da. *Modern Signal Processing, Second Edition*[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2002.

收稿日期: 2006-11-07

作者简介:

王雪(1978-), 男, 硕士, 讲师, 从事电力系统继电保护研究。E-mail:wangxuedl@126.com