

故障电流与励磁涌流的 EMD 特性分析

倪良华, 姚春球

(南京工程学院电力工程学院, 江苏 南京 211167)

摘要: 从 IMF (intrinsic mode functions) 需满足的两个条件出发, 定性分析了故障电流、非对称涌流、对称涌流经过 EMD (empirical mode decomposition) 分解后各自的 IMF 波形组成特征。在此基础上提出主导 IMF 概念, 并利用 IMF 的能量特征对主导 IMF 进行提取, 然后采用故障电流与涌流不同的主导 IMF 组成特征对其进行区分。另外, 理论分析考察了恒定直流分量和衰减非周期分量对 IMF 组成特征的影响。在 Matlab 下对动模仿真数据分析结果表明了故障电流与涌流在主导 IMF 构成上差别明显, 是一个识别涌流的简单实用判据。

关键词: 经验模态分解 (EMD); 本征模函数 (IMF); 励磁涌流; 故障电流

Characteristics analysis of fault current and inrush based on EMD

NI Liang-hua, YAO Chun-qiu

(Power Engineering Institute, Nanjing Institute of Technology, Nanjing 211167, China)

Abstract: Focused on the two conditions which IMF (intrinsic mode functions) needs to meet, the IMF characteristics of fault current, non-symmetrical inrush and symmetrical inrush are analyzed qualitatively after EMD (empirical mode decomposition) decomposition. On the basis of self-defined IMF-led extracted by its energy characteristics, both inrush current and fault current of power transformers can be distinguished by their IMF-led characteristics. In addition, this paper analyzes the impact on IMF characteristics made by constant DC components and decaying DC components in theory. The MATLAB analysis conducted from dynamic simulation data shows that the IMF difference between fault current and inrush is obviously, and can be used to identify inrush simply and practical.

Key words: empirical mode decomposition (EMD); intrinsic mode functions (IMF); inrush; fault current

中图分类号: TM93; TM77 文献标识码: A 文章编号: 1674-3415(2009)10-0027-06

0 引言

目前变压器保护的难题仍是如何正确识别励磁涌流和故障电流。近年来, 在国内外学者提出的诸多鉴别原理中, 大体可分为基于模型和基于波形两种。基于模型的原理, 如: 基于磁通特性^[1], 基于等值电路方程^[2], 基于功率差动^[3]等, 对某些参数在测量上存在技术上的困难, 目前多采用人为假设, 且用到了较多的电气量, 增加了保护配置的复杂性, 其应用前景有待于理论上的进一步突破; 基于波形特征的原理以励磁涌流和内部故障电流波形特征的差异为依据, 主要利用二次谐波制动原理和间断角原理, 是运用于实践的主流。新近提出的原理, 如波形对称原理^[4], 波形相关性分析法^[5], 采样值差动原理^[6]等, 是间断角原理及其改进或者其衍生, 该原理的识别方案存在非周期分量等因素的影响, 导致变压器励磁涌流的正确识别率难以满足

要求。

本文采用经验模态分解(EMD)将信号分解为若干个本征模函数(IMF), 然后理论分析及仿真了故障电流与涌流不同的 IMF 组成特征, 为识别涌流提供了新的特征。

1 EMD算法

经验模态分解(EMD)将信号 $S(t)$ 分解成若干阶的本征模态函数(IMFs, 第 i 个 IMF 记作 C_i) 和一个残余信号 r 的和(见式 7)。

每个本征模态函数, 必须满足两个条件^[7]:

1) 在整个时程内, 极值点的个数与穿越零点的次数相等或最多差 1。

2) 在任意点处上下包络线的均值为零。

第一个条件类似于传统平稳高斯过程中窄带的定义; 第二个条件利用极值包络的均值为零强制信号局部对称, 排除了由于波形不对称而引起的瞬

时频率的波动^[8]。但是在实际测试中所得的信号是复杂信号,并不能满足本征模态函数的条件。所以黄锷(Norden E.Huang)进行了如下的假设^[9]:

- 1) 任何信号都是由一些不同的本征模态组成。
- 2) 每个模态可以是线性的,也可以是非线性的。其局部极值点数和零点相同,并且上下包络线关于时间轴局部对称。

3) 任何时候,一个信号都可以包含许多本征模态信号,如果模态之间相互重叠,便形成复合信号。

在此假设条件下,每一阶 IMF 由如下方法得出:根据信号 $S(t)$ 的局部极大值和局部极小值求出其上包络 $v_1(t)$ 及下包络 $v_2(t)$ 之平均值

$$m_{11} = \frac{1}{2} [v_1(t) + v_2(t)] \quad (1)$$

然后考察 $S(t)$ 与 m_{11} 的差即为 h_{11} , 即

$$S(t) - m_{11} = h_{11} \quad (2)$$

若 h_{11} 不是 IMF, 将 h_{11} 视为新的 $S(t)$, 重复式(2) k 次

$$h_{1k} = h_{1(k-1)} - m_{1k} \quad (3)$$

式中: h_{1k} 为第 k 次筛选所得数据; $h_{1(k-1)}$ 为第 $k-1$ 次筛选所得数据; m_{1k} 为 $h_{1(k-1)}$ 上下包络之平均值; 利用 S_D 的值判断每次筛选结果是否为 IMF 分量:

$$S_D = \sum_{i=0}^r \left| \frac{h_{1(k-1)}(t) - h_{1k}(t)}{h_{1(k-1)}^2(t)} \right| \quad (4)$$

S_D 的值常取 0.2~0.3。当 h_{1k} 满足 S_D 的值要求, 则令:

$$c_1 = h_{1k} \quad (5)$$

c_1 视为一个 IMF。作

$$S(t) - c_1 = r \quad (6)$$

视 r 为新的 $S(t)$, 重复以上过程, 依次得到第二个 IMF c_2 , 第三个 IMF $c_3 \dots$, 直到 $r(t)$ 基本呈单调趋势或者 $|r(t)|$ 很小可视为测量误差时即可停止。于是

$$S(t) = \sum_{i=1}^n c_i + r \quad (7)$$

式(7)表明了 EMD 分解的完备性。

2 故障电流与涌流的EMD特性分析

2.1 IMF特征分析及提取

(1) 故障电流

根据叠加原理可以将故障时的网络分成正常情况和故障分量两部分^[10], 因此故障电流 $S(t)$ 也可以看成是正弦电流分量($C(t)$)与故障电流分量($R(t)$)

的线性叠加。而对于正弦电流分量 $C(t)$ 来说, 它满足 EMD 算法中 IMF 的两个条件, 因此 $C(t)$ 就是一个 IMF。由于故障电流为近似正弦函数^[11], 所以故障电流分量 $R(t)$ 相对 $C(t)$ 来说偏小, 从 $R(t)$ 中分解出来的 IMF(如果满足 EMD 分解)相对 $C(t)$ 更加偏小。故此, 对故障电流进行 EMD 分解后的 IMF 中, 存在一个也仅一个相对其他 IMF 来说很大的 IMF— $C(t)$ 。

图 1 为故障电流的 EMD 分解图。从图中可以看出, 是正弦电流的 IMF 分量为 C_4 , 其幅值约为 2.0, 其他 IMF 分量均很小, 最大的还不到 0.3。

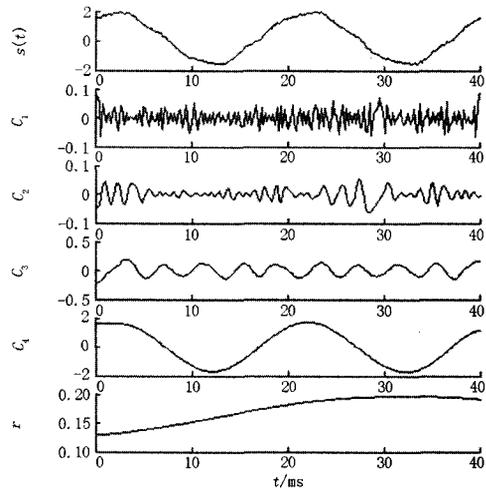


图 1 故障电流 EMD 分解

Fig.1 EMD decomposition of fault current

(2) 非对称涌流

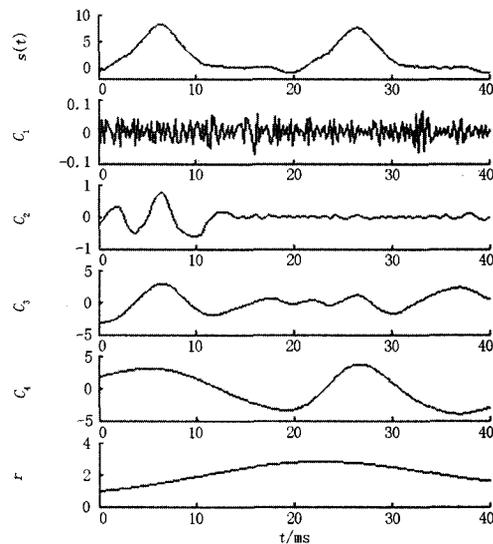


图 2 非对称涌流 EMD 分解

Fig.2 EMD decomposition of non-symmetrical inrush

由于非对称涌流 $S(t)$ 总偏离在时间轴的一侧, 它及它的相似波形就不可能满足 EMD 算法中 IMF 的第二个条件, 这就使得 $S(t)$ 经过 EMD 分解后的 IMF 分量中不存在与 $S(t)$ 波形近似的。另外, 各个 IMF 分量利用极值包络的均值为零强制信号局部对称, 而残余信号 r 的值很小或者呈单调趋势, 根据式(7)可知分解后的 IMF 分量中不存在一个相对其他 IMF 来说很大的 IMF。如图 2 中所示的非对称涌流 $S(t)$, 幅值最大的两个 IMF 是 C_3 和 C_4 , 其幅值约为 2.8 和 3.7, 两者相差不大。

(3) 对称涌流

对于对称涌流来说, 如图 3 中 $S(t)$ 所示, 其极值点的个数与穿越零点的数目相差很大(穿越零点很多), $S(t)$ 经过 EMD 分解后的 IMF 分量中不存在与 $S(t)$ 波形近似的。与非对称涌流类似, 所以 $S(t)$ 分解后的 IMF 分量中不存在一个相对其他 IMF 来说很大的 IMF。在图 3 中, 幅值最大的两个 IMF 是 C_1 和 C_2 , 其幅值约为 2.9 和 3.4, 两者相差不大。

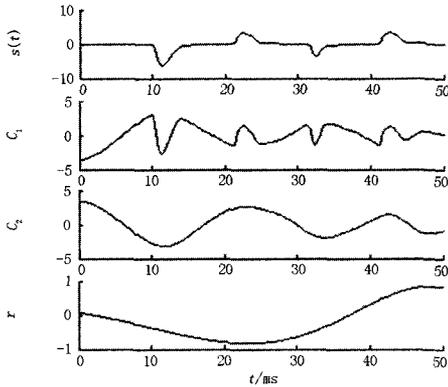


图 3 对称涌流 EMD 分解

Fig.3 EMD decomposition of symmetrical inrush

定义主导 IMF(leading IMF, 记为 IMF-led)分量为: 一个相对其他 IMF 来说很大的 IMF 分量。综合上述可知, 故障电流和励磁涌流一个经过 EMD 分解后 IMF 分量的区别在于: 前者存在主导 IMF 分量, 能量比较集中, 而后者不存在主导 IMF 分量, 能量比较分散。

为了方便提取主导 IMF 分量, 定义第 i 个 IMF 分量的能量 E_i 及能量比 μ_i 如式(8)、(9)所示, μ_i 并没有涉及到式(7)中残余信号 r 。

$$E_i = \int_a^b |C_i(t)|^2 dt \quad (8)$$

$$\mu_i = \frac{E_i}{\sum_{k=1}^n E_k} \quad (9)$$

$$\mu_{\max} = \max_{i=1}^n \{E_i\} \quad (10)$$

式中: μ_{\max} 为 IMF 分量中能量最大的, 若 μ_{\max} 满足式(10), 则分解的 IMF 分量中存在主导 IMF 分量。当信号波形接近于正弦波形时, μ_{\max} 值接近于 1, 若为涌流波形, 则 μ_{\max} 值相对较小。

$$\mu_{\max} \geq \mu_{zd} \quad (11)$$

μ_{zd} 一般可以取 0.8~0.9。

2.2 非周期分量对 IMF 特征提取影响分析

(1) 恒定直流分量

给信号 $S(t)$ 迭加一个恒定直流分量 C 得到信号 $S_1(t)$ 。给信号 $S(t)$ 迭加一个恒定直流分量 C 得到信号 $S_1(t)$ 。当 $S_1(t)$ 进行 EMD 分解时, 式(2)中的 h_{11} 已经由减法消除了 C 的影响; 当 $k>1$ 时, m_{1k} 由 $h_{1(k-1)}$ 形成, 所以 $m_{1k}(k>1)$ 不受 C 的影响, 从而由式(3)知 $h_{1k}(k>1)$ 不受 C 的影响。因此, h_{1k} 不受 C 的影响, 从而 $S_1(t)$ 进行 EMD 分解得到的 IMF 分量不受 C 的影响。

假设 $S(t)$ 经过 EMD 分解后第 i 个 IMF 为 C_i , 残余信号为 r , 综合以上分析, 根据式(7)可得 $S_1(t)$ 经 EMD 分解如式(12)所示。

$$s_1(t) = \sum_{i=1}^n c_i + (r + C) \quad (12)$$

如在图 3 中对称涌流信号 $S(t)$ 上迭加恒定直流分量 $C=20$ 得到信号 $S_1(t)$, 对 $S_1(t)$ 进行 EMD 分解如图 4 所示。

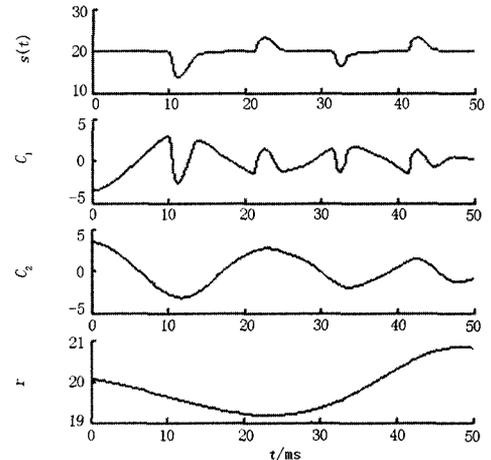


图 4 对称涌流迭加恒定直流分量 EMD 分解

Fig.4 EMD decomposition of symmetrical inrush superposition constant DC component

从图 4 中可以看出, $S(t)$ 和 $S_1(t)$ 分解所得的 IMF 一致, 而 $S_1(t)$ 的残余信号就是在 $S(t)$ 残余信号的基

基础上迭加恒定直流分量 $C=20$ 而得到。

(2) 衰减非周期分量

给信号 $S(t)$ 迭加一个衰减非周期分量 $C(t)$ 得到信号 $S_1(t)$ 。由于迭加 $C(t)$ 后会不均等影响到上包络 $v_1(t)$ 及下包络 $v_2(t)$ ，因此式(2)、(3)均会受到 $C(t)$ 的影响。

设 $C(t) = Ae^{-\frac{t}{T}}$ ，取 $S(t)$ 为图 3 中的对称涌流信号， $A = \text{Max}(S(t))$ ， $T=0.02$ ，对 $S_1(t)$ 作 EMD 分解如图 5 所示。

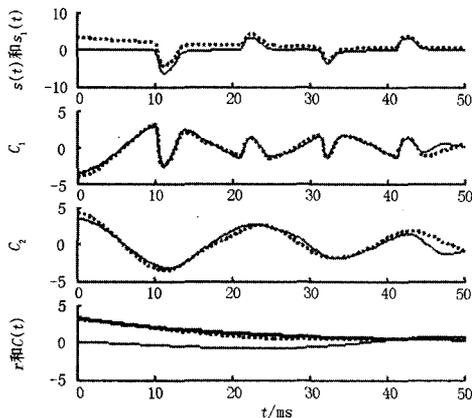


图 5 对称涌流迭加衰减非周期分量 EMD 分解

Fig.5 EMD decomposition of symmetrical inrush superposition decaying DC components

图 5 中，粗虚线为迭加了衰减非周期分量的信号 $S_1(t)$ 及其相关 IMF 分量，实线为 $S(t)$ 信号及其 IMF 分量，粗实线为所迭加的衰减非周期分量。从图 5 中可以看出，尽管 $S_1(t)$ 迭加了很大的衰减非周期分量，但它分解所得的 IMF 分量与 $S(t)$ 分解的 IMF 分量在波形上趋势一致，在大小上差别不大(从数据文件中获得 C_1 、 C_2 的最大差别依次为 0.436 5、1.627 3， C_2 差别略微偏大，是由于 EMD 分解时的端点效应所致，出现在端点处)。

综上所述，恒定非周期分量对 IMF 分量没有影响；衰减非周期分量对 IMF 分量影响很小，当 EMD 分解的端点效应^[12,13]能够很好解决时，这种影响几乎可以忽略。

2.3 EMD 用于保护存在问题分析

(1) 数据窗长度的选取

保护要求速动性，数据窗越短越好；EMD 分解由于端点效应存在，数据窗越长效果越好；经过多次仿真，数据窗取一个工频周期采样点数可兼顾二者要求。另外，采用合理的数据延拓方式^[12,13]以最大限度降低端点效应的影响，数据窗的长度可以进一步降低。

(2) EMD 分解次数的确定

对不同的信号，分解出来的 IMF 层数是不同的。按照 EMD 分解理论， $r(t)$ 基本呈单调趋势或者 $|r(t)|$ 很小可视为测量误差时即可停止分解，这可能导致保护设备不能够及时完成计算。根据 2.1 中的分析，文中进行 EMD 分解就是为了确定信号中是否含有主导 IMF。所以，只要确定 $r(t)$ 不含有主导 IMF 分量即可停止分解，确定原则为：分解余量 $r(t)$ 与原始信号 $S(t)$ 能量比小于阈值 K_f ，即 $|r(t)|/|S(t)| < K_f$ 。 K_f 可以取 0.3~0.4。

因此，文中 EMD 分解停止原则为： $r(t)$ 基本呈单调趋势或者 $r(t)$ 不含有主导 IMF 分量。

3 仿真分析

为进一步验证上述特征分析的正确性和可行性，本文利用文献[14, 15]中动模试验获得的变压器在各种运行状况下的大量真实数据对其进行验证。

动模数据的采样频率为 5 kHz，系统接线如图 6 所示，此系统中的试验变压器为三单相变压器组，采用 Y-d-11 接线，单相变压器参数如下：额定容量为 10 kVA；低压侧额定电压为 380 V；低压侧额定电流为 25.3 A；高压侧额定电压为 1 kV；高压侧额定电流为 10 A；空载电流为 1.45%；空载损耗为 1%；短路损耗为 0.35%；短路电压为 9.0%~15.0%。

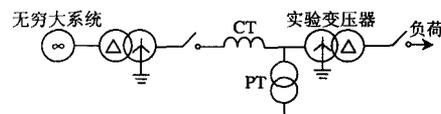


图 6 动模实验系统接线图

Fig. 6 Connection scheme of the dynamic analogue testing system

取数据窗为 100 个采样点，求取变压器空载合闸、变压器相间短路、变压器空投在匝间故障时波形对应的 μ_{\max} 变化曲线如图 7~9 所示。

图 7(a)为 DF1024 波形分析系统中导出的空投时 A、B、C 三相差动波形，励磁涌流波形明显；图 7(b)为 A、B、C 三相差流的 μ_{\max} 值变化曲线，由于在前 20 ms 数据不够一个数据窗，没有输出。从 μ_{\max} 变化曲线可以看出，当 μ_{\max} 值越小则说明 IMF 分量中能量越分散，主导 IMF 分量越不明显。

图 8(a)为 B 相 32%的位置和 C 相 32%的位置发生了相间短路时的三相差动波形。由于做差流前，Y 侧取的电流依次为 A、B 相，B、C 相，C、A 相之差，因此 B、C 相的故障将反映到最后的三相差

流上。由图中可以看出, 三相差流均接近于正弦曲线, 含主导 IMF 分量, 各相的 μ_{\max} 值始终大于 0.99。

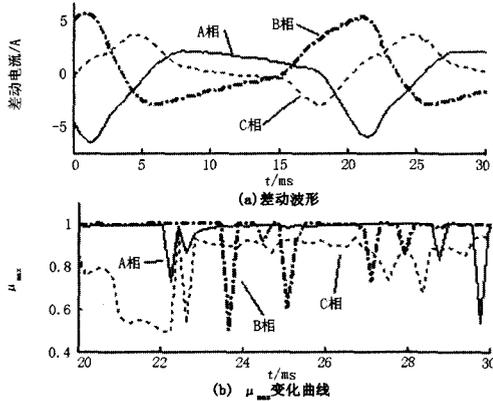


图 7 变压器空投时波形及其 μ_{\max} 波形

Fig.7 Waveforms and its μ_{\max} when switching on a transformer without load

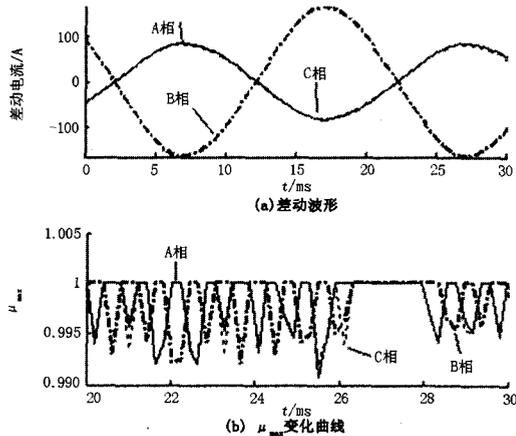


图 8 变压器相间短路时波形及其 μ_{\max} 波形

Fig.8 Waveforms and its μ_{\max} when phase-to-phase fault of transformer occurred

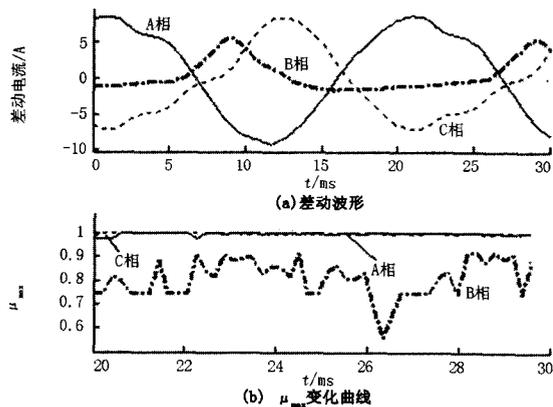


图 9 变压器空投在匝间故障时波形及其 μ_{\max} 波形

Fig.9 Waveforms and its μ_{\max} when switching on a transformer in a state of inter-turn fault

图 9(a)为变压器空投于 A 相 9%处发生匝间短路时的三相差动波形, A 相故障将反映到 A、C 相差流上, B 相出现比较大幅值的差动电流是由于合闸过程中涌流的影响, 相对故障差流, 此时 B 相涌流幅值较大。由图 9(b)中同样可以看出, AC 相反映故障差流, 其值均在 0.95 以上, B 相反映涌流, 值相对较小, 在 0.9 以下。

从以上分析以及总结其他状况下 μ_{\max} 值可知: 励磁涌流中不存在主导 IMF 分量, 能量分散, 在半周波内 μ_{\max} 值存在小于 0.8 的区段。轻微匝间故障时 μ_{\max} 值可能大于 0.8, 但小于 0.9; 故障电流能量集中, μ_{\max} 大部分情况在 0.98 以上。因此, 考虑到一定的裕度, 式 (11) 中 μ_{zd} 取值范围为 0.9~0.95。

4 结语

本文针对故障电流和励磁涌流的 EMD 特征进行了详细的分析研究, 指出了故障电流与励磁涌流区别的明显特征: 前者含有主导 IMF 分量, 而后者不含有; 给出了具体特征提取方案。理论分析和相关仿真表明, 该特征简单实用, 几乎不受非周期分量的影响, 为新保护原理的提出奠定了基础。由于 EMD 分解还存在譬如端点效应等问题, 在实际应用时, 数据窗就不能够太短等, 这些是以后要继续深入研究的问题。

参考文献

- [1] 宗洪良, 金华烽, 朱振飞, 等. 基于励磁阻抗变化的变压器励磁涌流判别方法[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.
- [2] 王增平, 徐岩, 王雪, 等. 基于变压器模型的新型变压器保护原理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 54-58.
WANG Zeng-ping, XU Yan, WANG Xue, et al. Study on the Novel Transformer Protection Principle Based on the Transformer Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 54-58.
- [3] Kuniaki Yabe. Power Differential Method for Discriminating Between Fault and Magnetizing Inrush Current in Transformers[J]. IEEE Trans on Power Delivery, 1997, 12(3).
- [4] 孙志杰, 陈云仑. 波形对称原理的变压器差动保护[J]. 电力系统自动化, 1996, 20(4): 42-46.

SUN Zhi-jie, CHEN Yun-lun. Transformer Differential Protection Based on the Characteristic Analysis of the First and Second Half cycle of the Magnetizing Inrush Current[J]. Automation of Electric Power Systems, 1996, 20(4): 42-46.

[5] 林湘宁, 刘沛, 杨春明, 等. 用改进型波形相关法鉴别励磁涌流的研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(5): 56-60, 70.
LIN Xiang-ning, LIU Pei, YANG Chun-ming, et al. Studies for Identification of the Inrush Based on Improved Correlation Algorithm[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(5): 56-60, 70.

[6] 胡玉峰, 陈德树. 基于采样值差动的励磁涌流鉴别方法[J]. 中国电机工程学报, 2000, 20(9): 55-58.
HU Yu-feng, CHEN De-shu. A New Method to Identify Inrush Current Based on Sampled Values[J]. Proceedings of the CSEE, 2000, 20(9): 55-58.

[7] 李天云, 赵妍, 李楠. 基于EMD的Hilbert变换应用于暂态信号分析[J]. 电力系统自动化, 2005, 29(4): 49-53.
LI Tian-yun, ZHAO Yan, LI Nan. Apply Empirical Mode Decomposition Hilbert Transform to Power System Transient Signal Analysis [J]. Automation of Electric Power Systems, 2005, 29(4): 49-53.

[8] 熊卫华, 赵光宙. 基于希尔伯特——黄变换的变压器铁心振动特性分析[J]. 电工技术学报, 2006, 21(8): 9-13.
XIONG Wei-hua, ZHAO Guang-zhou. Analysis of Transformer Core Vibration Characteristics Using Hilbert-Huang Transformation [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006, 21(8): 9-13.

[9] 钟佑明, 秦树人, 汤宝平. 一种振动信号新变换法的研究[J]. 振动工程学报, 2002, 15(2): 233-238.
ZHONG You-ming, QIN Shu-ren, TANG Bao-ping. Study on a New Transform Method for Vibration Signal[J]. Journal of Vibration Engineering, 2002, 15(2): 233-238.

[10] 刘万顺. 电力系统故障分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 1998.

[11] 和敬涵, 李静正, 姚斌, 等. 基于波形正弦度特征的变压器励磁涌流判别算法[J]. 中国电机工程学报, 2007, 27(4): 18-24.

HE Jing-han, LI Jing-zheng, YAO Bin, et al. A New Approach of Transformer Inrush Detected Based on the Sine Degree Principle of Current Waveforms[J]. Proceedings of the CSEE, 2007, 27(4): 18-24.

[12] 邓拥军, 王伟, 钱成春, 等. EMD方法及Hilbert变换中边界问题的处理[J]. 科学通报, 2001, 46(3): 257-263.
DENG Yong-jun, WANG Wei, QIAN Cheng-chun, et al. Comments and Modifications on EMD Method[J]. Chinese Science Bulletin, 2001, 46(3): 257-263.

[13] 季月波, 秦树人, 白林, 等. 有限区间信号边界效应问题的研究[J]. 振动与冲击, 2002, 21(4): 108-112.
JI Yue-bo, QIN Shu-ren, BAI Lin, et al. Research on the Edge Effect of Cutoff Signal with Limited Time Domain[J]. Journal of Vibration and Shock, 2002, 21(4): 108-112.

[14] 徐岩, 王增平, 杨奇逊. 基于电压电流微分波形特性的变压器保护新原理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(2): 61-65.
XU Yan, WANG Zeng-ping, YANG Qi-xun. Research on Novel Transformer Protection Based on the Characteristics of Voltage and Differential Current[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(2): 61-65.

[15] 王增平, 徐岩, 王雪, 等. 基于变压器模型的新型变压器保护原理的研究[J]. 中国电机工程学报, 2003, 23(12): 54-58.
WANG Zeng-ping, XU Yan, WANG Xue, et al. Study on the Novel Transformer Protection Principle Based on the Transformer Model[J]. Proceedings of the CSEE, 2003, 23(12): 54-58.

收稿日期: 2008-07-02; 修回日期: 2008-11-13

作者简介:

倪良华(1966-), 男, 讲师, 主要研究方向为电力系统故障诊断, 电力系统仿真; E-mail: nilianghua_nj@163.com

姚春球(1944-), 男, 硕士, 教授, 主要研究方向为电力系统自动化。